

УДК 537.533

## **Численное моделирование технологического процесса нанесения тонких пленок в газоразрядных электронно-лучевых испарителях**

*В. И. Мельник, И. В. Мельник*

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
Киев, Украина

*П. В. Порицкий*

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

*Представлена численно-аналитическая модель процессов, происходящих в газоразрядном электронно-лучевом испарителе. Совместное интегрирование уравнений, описывающих испарение металла с поверхности тигля, его перенос в объеме камеры и его осаждение на подложке позволяют рассчитывать характеристики процессов в зависимости от параметров электронного луча.*

Газоразрядные электронно-лучевые испарители находят широкое применение при нанесении покрытий сложного химического состава. В связи с этим представляет интерес численное моделирование процессов взаимодействия электронных пучков, формируемых из высоковольтного тлеющего разряда, и процесс металла в плазме, формируемой электронным пучком при давлениях порядка единиц – долей паскаля.

На рис. 1 представлена общая схема газоразрядного электронно-лучевого испарителя для осаждения металлических окисей и нитридов с электронным лучом тлеющего разряда. Мощный электронный луч из пушки 6 под углом  $90^\circ$  с помощью электромагнитной системы отклонения 5 направляется в тигель 8. Такая конструкция с отклонением электронного луча обеспечивает испарение напыляемого вещества без изменения испускания катода.

Устройства нагрева 1 и 3 требуются для обеспечения очистки стен камеры и подложек от газа. Планетарное механическое вращение подложек относительно оси технологической камеры осуществляется для получения однородного пленочного покрытия на подложке 4.

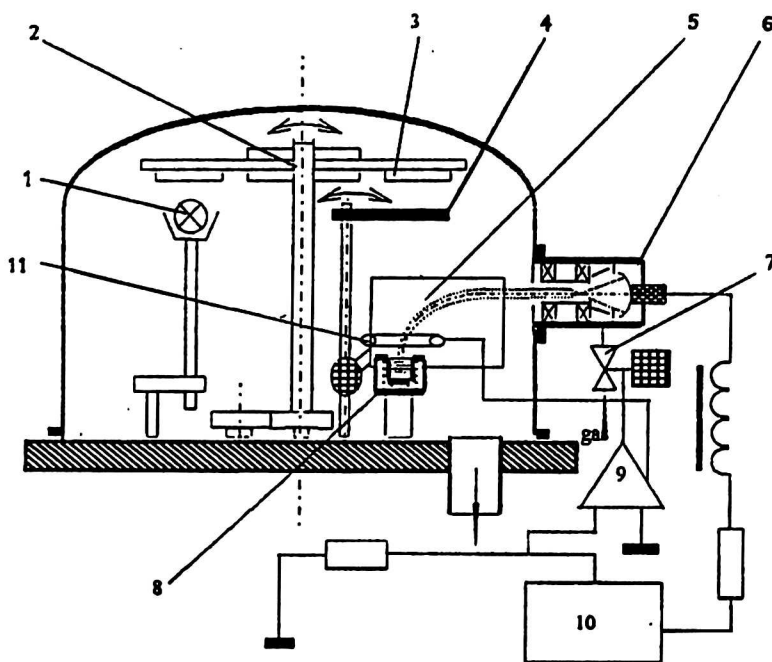


Рис. 1. Общая схема газоразрядного электронно-лучевого испарителя:

1, 3 – устройства для нагрева камеры и подложек, соответственно; 2 – устройство для вращения подложки; 4 – подложка; 5 – устройство отклонения электронного луча; 6 – электронная пушка; 7 – вентиль контроля подачи газа; 8 – тигель; 9 – электронный управляющий блок; 10 – высоковольтное электропитание

### Модель процесса испарения и конденсации

Модель формирования электронного пучка в источниках электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда была предложена в работе [1]. Поскольку ее выходными параметрами являются плотность тока электронов в поперечном сечении пучка и его удельная мощность, эта модель может быть непосредственно использована для анализа теплового воздействия пучка на поверхность испаряемого металла (рис. 2). Тогда распределение температуры на поверхности металла можно определить исходя из уравнения теплопроводности [2]:

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{q_0}{16\pi k_1 a^{3/2} \sqrt{k_2}} \int_0^\tau f_1(\tau_1) f_2(\tau_1) d\tau_1, \quad (1)$$

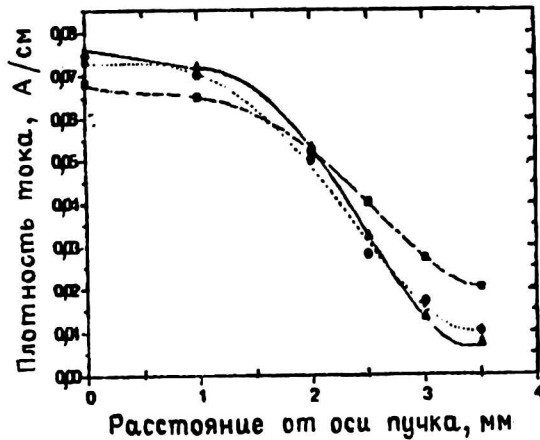
где

$$f_1(\tau_1) = \operatorname{erfc} \left[ \frac{h\sqrt{k_2} \left( 1 + \frac{z\tau_1}{h\tau} \right)}{\sqrt{1 + \frac{\tau_1}{\tau}}} \right];$$

$$f_2(\tau_1) = \frac{e^{-\frac{r^2}{4a(\tau+\tau_0)} - \frac{k_2(h-z)^2}{1+\frac{\tau}{\tau_1}}}}{(\tau + \tau_0)\sqrt{\tau + \tau_1}},$$

- $q_0$  — плотность мощности электронного пучка;  
 $c$  — удельная теплоемкость;  
 $\rho$  — плотность металла;  
 $k_1$  и  $k_2$  — концентрация тепловых источников на поверхности металла и в его объеме, соответственно;  
 $a$  — коэффициент теплопроводности;  
 $h$  — глубина положения максимума энергии источника тепла;  
 $\tau$  — время теплового воздействия,  $\tau_0 = 1/4ak_1$ ,  $\tau_1 = 1/4ak_1$ .

Рис. 2. Распределение плотности тока для различных напряжений. Общий ток разряда — 400 мА:  
 ■ —  $U_c = 10$  кВ;  
 ● —  $U_c = 20$  кВ; ▲ —  $U_c = 15$  кВ



Для случая линейного теплового источника уравнение температурного поля может быть взято в виде [2]:

$$T(r, z) = \frac{q_1}{2\pi\lambda R} + \frac{q_2}{2\pi\lambda\delta} \ln \left[ \frac{(z + \delta) + \sqrt{r^2 + (z + \delta)^2}}{(z + \delta) + \sqrt{r^2 + (z + \delta)^2}} \right], \quad (2)$$

$$q_1 = \alpha q_0, \quad q_2 = (1 - \alpha) q_0.$$

Здесь  $q_1$  и  $q_2$  — тепловые мощности точечного и линейного источника, соответственно;

$\alpha$  — коэффициент теплового распределения.

Если температура поверхности металла известна, то поток испаряющегося вещества  $j(r, z)$  в объем камеры может быть определен по формуле [3]:

$$j(r, z) = \beta \frac{p}{\vartheta T(r, z)} \ln \left( \frac{p - p_0}{p - p_s} \right), \quad (3)$$

- где  $\beta = \pi^2 D/2d$  — коэффициент передачи массы для плоской задачи;  
 $D$  — коэффициент диффузии атомов металла через газовую среду;  
 $d$  — коэффициент масштабирования;  
 $\vartheta$  — газовая постоянная;

$p$  — давление в камере;  
 $p_s = p_s(T)$  — давление насыщенных паров для испаряемого металла;  
 $p_0$  — парциальное давление паров металла в камере.

Масса материала  $M_r$ , конденсирующегося на подложке единичной площади  $A_r$ , которая располагается под углом  $\theta$  к оси тигля, может быть определена интегрированием уравнения

$$\frac{dM_r}{dA_r} = \frac{\mu j(r, z)}{4\pi R^2} \cos(\theta), \quad (4)$$

где  $\mu$  — молярная масса пара;

$R$  — расстояние между точкой на подложке и точкой на поверхности испарения.

Интенсивность потока испаряемого вещества в любой точке вакуумной камеры и массу, напыляемую на подложку, можно найти, интегрируя уравнение массопереноса {(1), (3), (4)} или {(2), (3), (4)}.

Таким образом, численный анализ испарения металла с поверхности тигля и его осаждения на подложке на основе интегрирования систем уравнений {(1), (3), (4)} или {(2), (3), (4)} был реализован на компьютере типа РС. Его сходимость была получена для всех проверенных проблем в диапазоне тока электронного луча 0,1–10 и напряжений ускорения (разгона) 1–100 кВ. Проблемы были решены для использования титана, алюминия и меди как испаряемый металл в среде кислорода и азота. Как теоретические, так и экспериментальные данные для распределения плотности тока электронного луча использовались, причем имелись небольшие различия между последними. Например, для ускоряющего напряжения 15 кВ и тока электронного луча 400 мА (см. рис. 2) величина диаметра пучка была взята 8 мм (это уровень, где плотность тока — 10 % максимальной величины). Экспериментально определенный диаметр пучка для таких состояний был 6 мм. Причины разногласия между теоретическими и экспериментальными результатами для модели формирования из электронного луча были обсуждены в работе [1].

На рис. 3 представлены полученные экспериментальные и теоретические зависимости между током разряда электронного луча и массового расхода от тигля для случая  $\theta = 30^\circ$ ,  $R = 0,8$  м. Мы видим хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений.

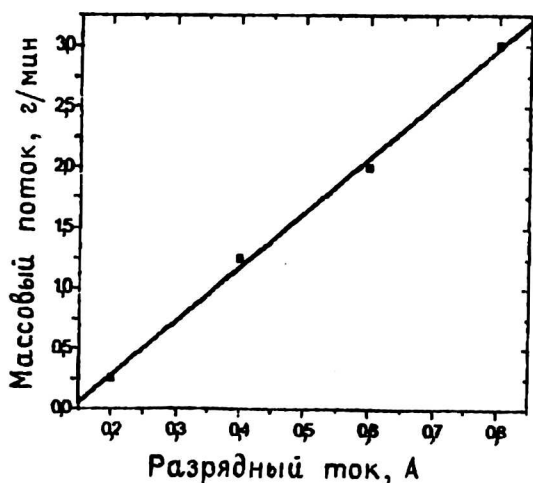


Рис. 3. Зависимость скорости испарения титана при напряжении 15 кВ

Таким образом, представленная модель испарения металла с поверхности тигля, его переноса в объеме камеры и его осаждения на подложке хорошо описывают процессы, происходящие в газоразрядном электронно-лучевом испарителе.

### Л и т е р а т у р а

1. Denbnovetsky S. V., Felba J., Melnik V. I., Melnik I. V. Model of beam formation in a glow discharge electron gun with a cold cathode//Applied surface science, 1997. № 111. P. 288–294.
2. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов.— М.: Машиностроение, 1978.
3. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1983.

## Numerical simulation of the technological process of the deposition of thin films in gas-discharge electron beam evaporation

V. I. Melnik, I. V. Melnik

National Technical University of Ukraine "KPI", Kiev, Ukraine

P. V. Porytsky

Institute for Nuclear Research, Kiev, Ukraine

*In the present paper the numerical-analytical model of processes occurred in gas-discharge electron-beam evaporator is studied. The consistent integration of the equations describing the evaporation of metal from a surface of a crucible, its mass-transfer in volume of the chamber and its condensation on a substrate allows to calculate performances of processes depending on parameters of an electron beam.*