

## **Тема 8 Физико-химические основы термического вакуумного напыления тонких пленок**



- 1. Процесс испарения веществ.**
- 2. Создание направленного потока пара вещества.**
- 3. Конденсация пара на подложке и рост пленки.**

# Конструкции испарителей



## Интенсивность испарения материала из расплава оценивают с помощью уравнения Герца – Кнудсена:

$$N_e = (2\pi m K_T T)^{-1/2} p_e \text{ [молекул/(см}^2\text{с)]}$$

где  $N_e$  – число молекул на единицу площади в единицу времени;

$m$  – молекулярная (атомная) масса;

$K_T$  – постоянная Больцмана  $K_T = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К;

$T$  – температура поверхности источника  $K$ ;

$p_e$  – равновесное давление пара испаряемого вещества Па.

1 мм рт ст = 133 Па = 1 Торр Для ТВН  $10^{-2}$ Торр = 1,33 Па

## Скорость потери массы источником на единице площади:

$$R = 4,43 \cdot 10^{-4} (M/T)^{1/2} p_e \text{ [г/(см}^2\text{с)]}$$

где  $M$  – масса грамм моля испаряемого вещества,  $p_e$  – давление пара [Па]

При фиксированной температуре, скорость испарения не может превышать некоторое значение, определяемое формулой Герца-Кнудсена, вне зависимости от количества подводимого тепла, что говорит о необходимости соблюдения теплового баланса.

Дешман табулировал  $R$  для  $P_e$

# Транспортировка пара от испарителя к подложке

Плотность потока пара будет описываться выражением:

$$\Phi(\alpha) = \Phi_0 \cdot \cos(\alpha)$$

где  $\Phi(\alpha)$  – плотность потока в направлении, составляющим с нормалью к поверхности угол  $\alpha$ ;  $\Phi_0$  – его плотность при  $\alpha = 0$ . Это уравнение представляет собой **косинусоидальный закон распределения**.

Зависимость толщины напыляемой пленки  $d$  от расстояния от центра подложки  $L$  для **испарителя малой площади** (испаритель, у которого размеры поверхности испарения малы по сравнению с расстоянием от этой поверхности до подложки), расположенного на расстоянии  $h$  от подложки, будет определяться как:

$$d = \frac{M_e}{\pi \rho h^2 [1 + (L/h)^2]^2}$$

$$d = \frac{M_e}{4\pi \rho h^2 [1 + (L/h)^2]^{3/2}}$$

где  $\rho$  – плотность напыляемого материала;  $M_e$  – масса испаренного вещества.

Относительная толщина пленки от центра подложки  $d_0$  к толщине пленки  $d$  на удалении  $L$  от центра:

$$d/d_0 = [1 + (L/h)^2]^{-2}$$

$$d/d_0 = [1 + (L/h)^2]^{-3/2}$$

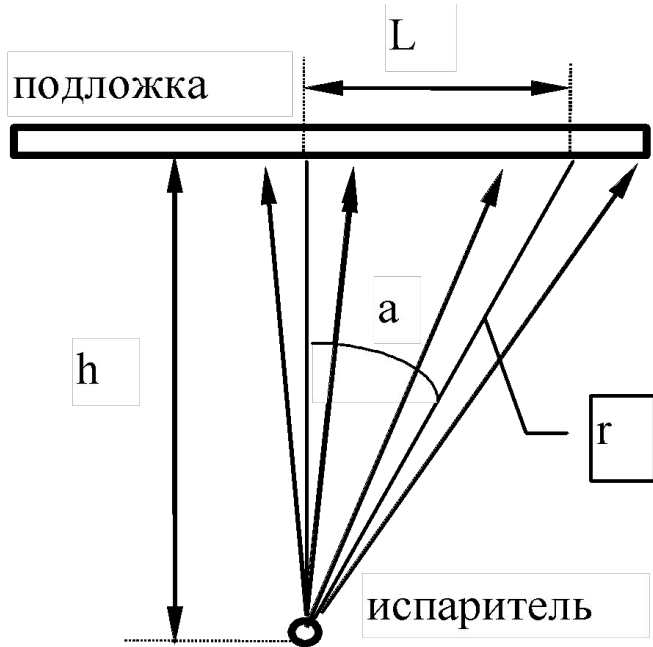


Рис. 1. Геометрия процесса напыления при методе ТВН

## Необходимость вакуума при напылении тонких пленок

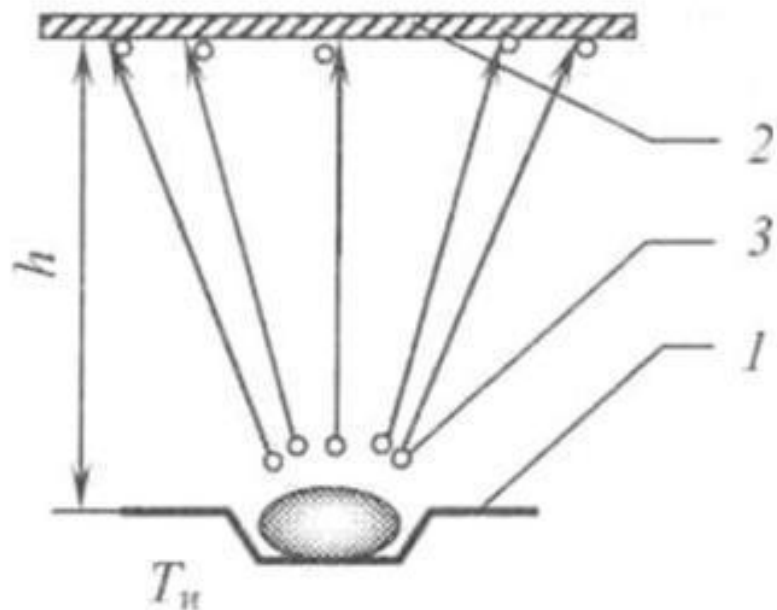


Схема процесса  
термического испарения:  
1 — испаритель; 2 —  
подложка;  
3 — молекулы испаряемого  
вещества

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi} P d_M^2},$$

где  $k$  - постоянная Больцмана;  
 $T$  - усредненная температура  
газа;  
 $P$  - давление газа в рабочем  
объеме;  
 $d_M$  - диаметр молекулы  
испаренного вещества.

## **Осаждение (конденсация) испаряемого вещества на поверхности подложки.**

### **1. Зарождение зерен**

**Островковый режим** или режим **Фольмера-Вебера** реализуется в случае, когда атомы осаждаемого вещества связаны между собою сильнее, чем с подложкой. В островковом режиме маленькие зародыши образуются прямо на поверхности подложки и затем растут, превращаясь в большие островки конденсированной фазы. Затем, сливаясь (этот процесс называется коалесценцией) образуют островки все большего размера, и после стадии заполнения каналов образуют сплошную пленку.

**Послойный режим** или режим **Франка-Ван дер Мерве** реализуется в противоположном случае, когда атомы осаждаемого вещества связаны с подложкой более сильно, чем друг с другом. Моноатомные слои заполняются в этом режиме по очереди, т.е. двумерные зародыши (толщиной в один атом) следующего слоя образуются на верхней части зародышей предыдущего слоя после его заполнения.

**В промежуточном режиме**, или режиме **Странского-Крастанова**, вначале реализуется послойный рост, затем, после заполнения одного - двух слоев начинается островковый режим роста.

**2. Рост зерен** Вокруг образовавшихся зерен начинают расти пространственные островки. В зависимости от температуры подложки они могут быть жидкими каплями или монокристаллами. Температура плавления островков на  $2/3$  меньше температуры плавления объемного материала.

### **3. Объединение островков.**

При пограничном контакте за счет разрушения границы и выделения при этом тепла островки расплавляются, а после слияния охлаждаются, образуя новый монокристалл. На монокристаллической подложке ориентация большинства островков повторяет ориентацию подложки.

**4. Заполнение каналов.** Для каждой пары конденсат-подложка при заданной скорости осаждения существует критическая температура подложки, выше которой происходит рост кристаллически ориентированной пленки независимо от степени несовершенства исходного кристалла.

Элемент	Температура, °C		Рекомендуемые материалы испарителя	
	Плавления	Испарения	Проволока, лента	Тигель
Ag	961	1047	Mo, Ta	Mo, C
Al	660	1150	W	C, BN, TiB <sub>2</sub> -BN
Au	1063	1465	W, Mo	Mo, C
Cr	1800	1205	W, Ta	-
Cu	1083	1273	W, Mo, Ta	Mo, C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Mo	2622	2533	-	-
Ni	1455	1510	W	Окислы
Pd	1555	1566	W	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Pt	1774	2090	W	ThO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>
Ta	2996	3070	-	-
Ti	1725	1546	W, Ta	C, ThO <sub>2</sub>
W	3382	3309	-	-



Температуры нагрева для различных сочетаний материалов изделия и покрытия.

Материал покрытия	Материал изделия					
	Ti	Cu	Mo	Fe	Nb	Ni
Молибден	650	500	750	350	400	400
Хром	650	450	700	600	-	400
Медь	-	-	400	450	400	350
Никель	-	350	500	350	-	-

## **Недостатки метода ТВН**

1. Большой расход материала. Конденсат осаждается не только на подложку, но и по всему объему камеры. Это приводит еще и к необходимости регулярно чистить оборудование и дополнительно обезгаживать.
2. Невысокое качество получаемых пленок, наличие загрязнений и примесей, структурных неоднородностей.
3. Неравномерность получаемых пленок по толщине.
4. Невозможность распыления тугоплавких материалов, сплавов.
5. Невозможность распыления химических соединений и диэлектриков.
6. Низкая адгезия получаемых пленок.

## **Достоинства метода ТВН**

1. Не глубокий вакуум, который относительно легко и быстро достижим.
2. Быстрый процесс. Напыление производится от долей секунд до минут нагрева.