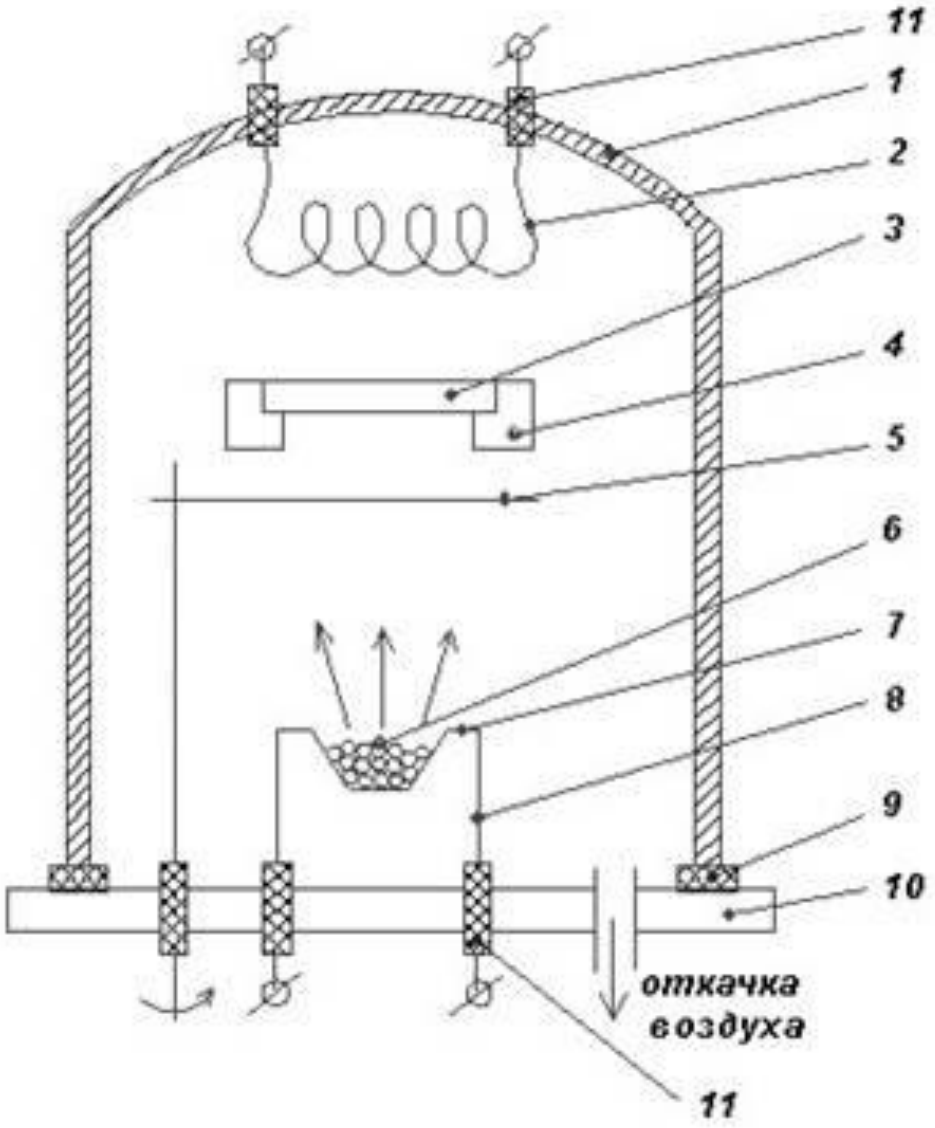
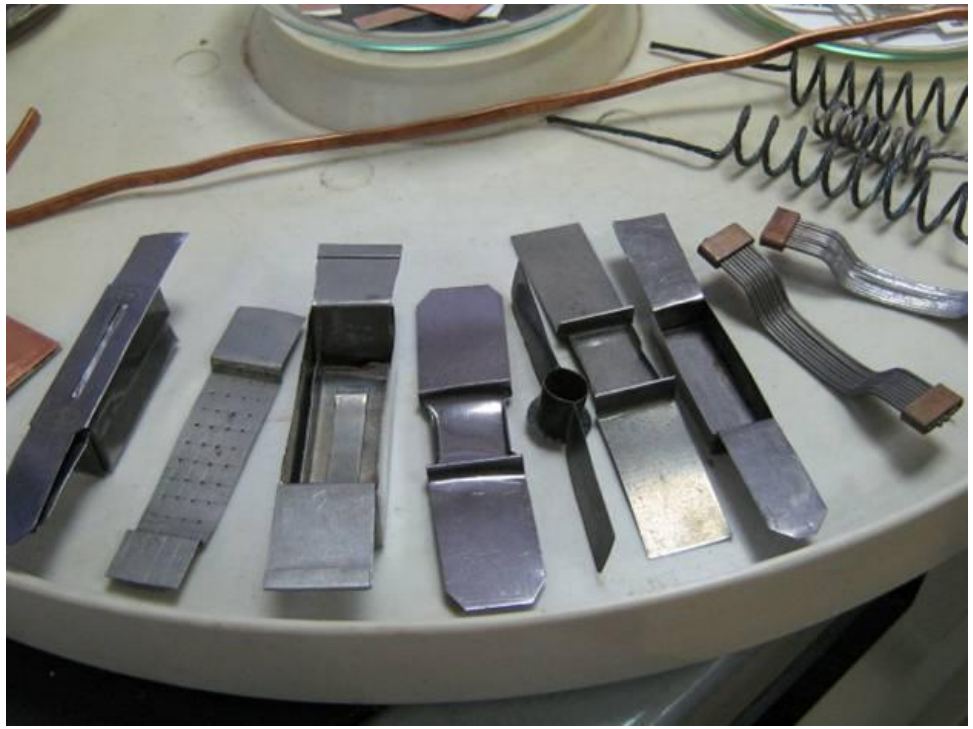

11
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
откачка
воздуха
11

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:

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

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 К;
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:

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

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-Кнутсена, 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:

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

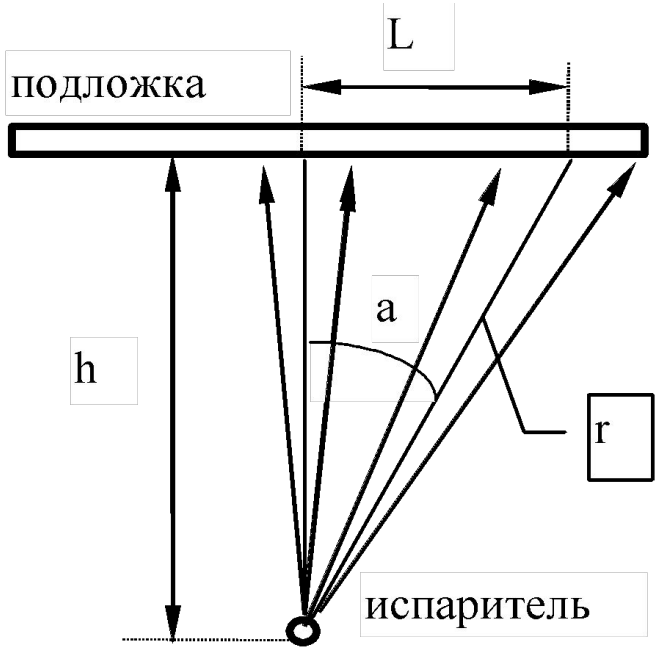


Рис.1. Геометрия процесса напыления при методе ТВН

где $\Phi(\alpha)$ − плотность потока в направлении, составляющим с нормалью к поверхности угол α; Φ_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:

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

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

где ρ − 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:

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

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

Необходимость вакуума при напылении тонких пленок

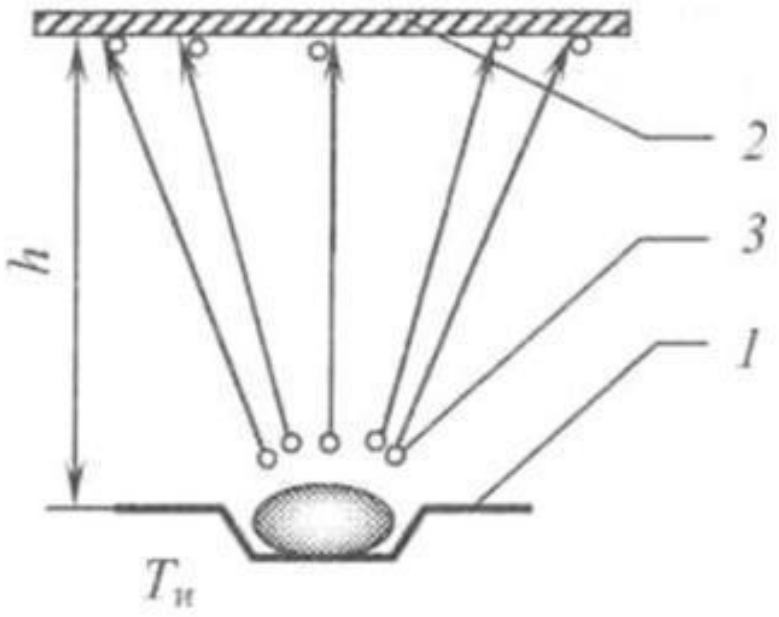


Схема процесса термического испарения:
1 — испаритель; *2* — подложка;
3 — молекулы испаряемого вещества

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

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

MyShared

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_2-BN
Au	1063	1465	W, Mo	Mo, C
Cr	1800	1205	W, Ta	-
Cu	1083	1273	W, Mo, Ta	Mo, C, Al_2O_3
Mo	2622	2533	-	-
Ni	1455	1510	W	Окислы
Pd	1555	1566	W	Al_2O_3
Pt	1774	2090	W	ThO_2, ZrO_2
Ta	2996	3070	-	-
Ti	1725	1546	W, Ta	C, ThO_2
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.