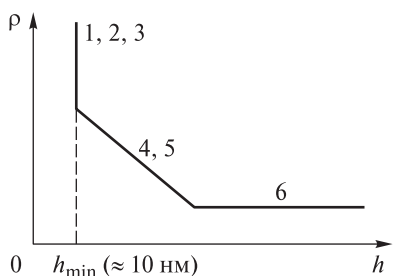


## 1.16. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК

**Цель лекции:** дать понятие основных характеристик и свойств тонких пленок и их значение для использования в приборостроении.

### 1.16.1. ТОЛЩИНА ПЛЕНКИ И ЕЕ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПО ДИАМЕТРУ ПОДЛОЖКИ

Толщина пленки оказывает существенное влияние на ее свойства, которые могут на порядки отличаться от свойств данного материала при толщинах, больших приблизительно 1 мкм.



**Рис. 1.47.** Характер влияния толщины пленки  $h$  на ее удельное сопротивление  $\rho_c$  (1–6 — стадии роста)

Влияние толщины пленки на ее удельное сопротивление. Удельное сопротивление пленки  $\rho_c$  имеет три вида зависимости от ее толщины  $h$  (рис. 1.47): 1) увеличение до бесконечности при толщине, соответствующей островковой стадии роста ( $h < h_{\min}$ ), 2) почти линейное уменьшение, соответствующее не сплошной и очень тонкой пленке и 3) независимое от толщины значение, соответствующее толстой пленке и монокристаллическому материалу.

Сопротивление тонкой пленки

$$R = \rho_c b / (ha) = \rho_{\square} b / a,$$

где  $a$ ,  $b$  — ширина и длина тонкопленочного резистивного элемента, м;  $\rho_c$ , Ом·м;  $\rho_{\square}$  («ро квадрат»), Ом/□, являются константами материала, причем  $\rho_{\square}$  соответствует максимально возможному для данного материала значению удельного сопротивления при  $h = h_{\min}$  и составляет

$$\rho_{\square} = \rho_c \frac{a}{ah} = \frac{\rho_c}{h}.$$

### 1.16.2. НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ. ЗАКОН КНУДСЕНА

Одним из показателей качества тонкопленочных покрытий является неравномерность толщины пленки  $h$ , которая, согласно закону Кнудсена, возникает в результате косинусоидального распределения потока испаряемого или распыляемого материала по направлениям (рис. 1.48):

$$dq_n(\varphi) = q_n \cos \varphi d\omega / \pi,$$

где  $q_n$  — масса испаренного или распыленного вещества, кг;  $\varphi$  — угол испарения;  $\omega$  — телесный угол испарения. Элементарный участок, на который осаждается тонкая пленка,

$$dA_0 = r^2 d\omega / \cos \Theta,$$

где  $r$  — расстояние от источника испарения или распыления до элементарной площадки;  $\Theta$  — угол конденсации.

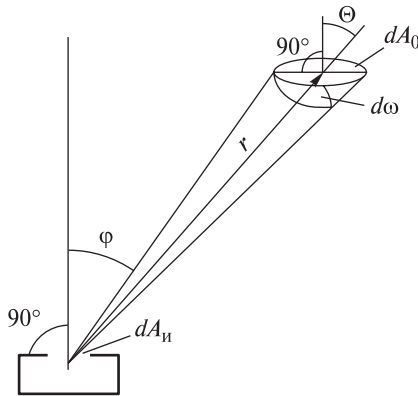


Рис. 1.48. Распределение испаренных молекул по направлениям

Закон Кнудсена имеет следующий вид:

$$\frac{dq_n(\varphi, \Theta)}{dA_0} = \frac{q_n \cos \varphi \cos \Theta}{\pi r^2}.$$

Скорость осаждения

$$v_0 = \frac{dq_n(\varphi, \Theta)}{dA_0 t} = \frac{q_n \cos \varphi \cos \Theta}{\pi r^2 t}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Число испаряемых или распыляемых атомов с молярной массой  $M$ , осаждающихся на единицу поверхности в единицу времени

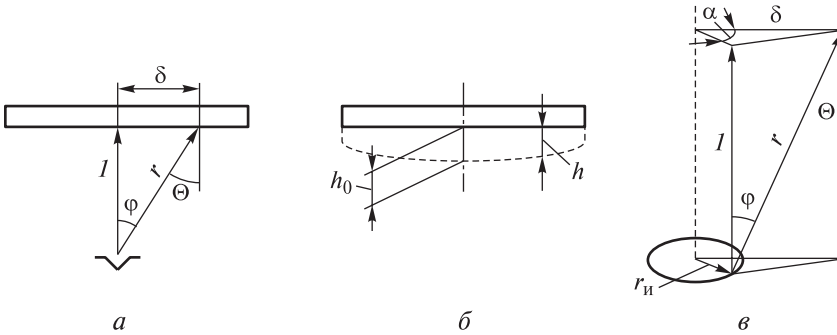
$$N_o = \nu_o N_A / M \text{ [атом}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})],$$

где  $N_A$  — число Авогадро.

Толщина пленки в произвольной точке подложки  $\delta$  (рис. 1.49)

$$h = \frac{dq_n(\varphi, \Theta)}{dA_0 \rho} = \frac{q_n l^2}{\pi r^2 \rho (l^2 + \delta^2)} \text{ [м]},$$

где  $l$  — расстояние от источника до подложки при  $\varphi = 0$ .



**Рис. 1.49.** Геометрические схемы расчета неравномерности толщины пленки  $h$  для точечного испарителя ( $a$ ,  $b$ ) и для дискового испарителя ( $в$ )

Неравномерность толщины пленки при точечном испарителе (площадь испарителя пренебрежимо мала) характеризуется отношением толщины пленки  $h$  в точке  $\delta$  к максимальной толщине пленки  $h_0$  (рис. 1.49,  $a$ ,  $b$ ):

$$\Delta = \frac{h}{h_0} = \frac{1}{[1 + (\delta/l)^2]^{3/2}}.$$

При испарителе с радиусом  $r_n$  (рис. 1.49,  $в$ ) толщина пленки в точке, отстоящей от центра подложки на расстояние  $\delta$ :

$$h = \iiint_{r_n \alpha} \frac{\nu_n r_n l^2 dr_n d\alpha dt}{\pi r^4},$$

где  $\alpha = 0 \dots 2\pi$ .

### 1.16.3. ОДНОРОДНОСТЬ СОСТАВА ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

Важным показателем качества тонких пленок являются также состав и свойства технологической среды — вакуума или рабочих газов, которые оцениваются коэффициентом загрязнения  $\gamma$  осаждаемой тонкой пленки.

При термическом испарении

$$\gamma = \frac{N_{3,0}}{N_{M,0}},$$

где  $N_{3,0}$  — поток «загрязняющих» атомов или молекул, осаждающихся на подложку, атом/(м<sup>2</sup>·с);  $N_{M,0}$  — поток атомов или молекул осаждаемого материала, атом/(м<sup>2</sup>·с), а при ионном распылении

$$\gamma = \frac{N_{3,0} - N_{3,p}}{N_{M,0} - N_{M,p}},$$

где  $N_{3,p}$  — поток «загрязняющих» атомов или молекул, осевших на подложку и распыленных ионами рабочего газа, атом/(м<sup>2</sup>·с);  $N_{M,p}$  — поток атомов или молекул осаждаемого материала, распыленных с подложки ионами рабочего газа, атом/(м<sup>2</sup>·с).

Поток атомов и молекул остаточных газов, попадающих на подложку,

$$N_{3,0} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \alpha_i \sqrt{N_A}}{\sqrt{2\pi k T M_i}},$$

а поток атомов или молекул осаждаемого в виде тонкой пленки материала

$$N_{M,0} = \frac{v_0 N_A}{M_M} = \frac{10^{-9} v'_0 \rho N_A}{M_M}.$$

Здесь  $p_i$  — парциальное давление  $i$ -го газа («загрязнения»), Па;  $\alpha_i$  — коэффициент аккомодации  $i$ -го газа;  $T$  — температура стенок вакуумной камеры, К;  $M_i$  — молярная масса  $i$ -го газа, кг/кмоль;  $v_0$  — скорость осаждения пленки, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $v'_0$ , нм/с;  $M_M$  — молярная масса материала пленки, кг/кмоль;  $\rho$  — плотность материала пленки, кг/м<sup>3</sup>.

Поток «загрязняющих» атомов или молекул, распыленных ионами рабочего газа  $N_{3,p}$ , и поток атомов или молекул осаждаемого материала, распыленных с подложки ионами рабочего газа  $N_{M,p}$ , составляют соответственно:

$$N_{3,p} = S_3 N_{3,0} \quad \text{и} \quad N_{M,p} = S_M N_{M,0},$$

где  $S_3$  — коэффициент распыления «загрязняющих» молекул;  $S_M$  — коэффициент распыления осаждаемого материала.

Таким образом, при ионном распылении

$$\gamma = \frac{N_{3,0}(1 - S_3)}{N_{M,0}(1 - S_M)}.$$

При нормальном законе распределения  $\gamma$  вероятность обеспечения требуемой чистоты осаждаемой пленки

$$P(\gamma \leq \gamma_d) = 0,5 + \Phi\left(\frac{\gamma_d - \bar{\gamma}}{\sigma_\gamma}\right),$$

где  $\Phi$  — нормированная функция Лапласа.

Математическое ожидание коэффициента загрязнения осаждаемой пленки

$$\bar{\gamma} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \alpha_i M_m}{v_0 \sqrt{2\pi k T M_i N_A}}$$

Допустимый коэффициент «загрязнения» пленки

$$\gamma_d \leq \frac{n_d h}{N_{m.o} t},$$

где  $n_d$  — допустимая концентрация загрязнений в материале пленки ( $10^{18} \dots 10^{26}$  атом/м<sup>3</sup>);  $h$  — толщина пленки, м;  $t$  — длительность процесса осаждения пленки, с.

Среднее квадратичное отклонение коэффициента загрязнения пленки

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right)^2 \sigma_{x_j}^2},$$

где  $\sigma_x$  — среднее квадратичное отклонение параметра  $x_j$ ;  $k$  — количество параметров  $x$ , влияющих на чистоту технологической среды.

## Тесты к лекции 16

### 1. С увеличением толщины тонкой пленки удельное сопротивление:

- уменьшается;
- увеличивается;
- остаётся неизменным.

### 2. Неравномерность толщины пленки при точечном испарителе определяется:

- отношением толщины пленки в заданной точке к максимальной толщине пленки;
- отношением толщины пленки в заданной точке к минимальной толщине пленки;
- отношением максимальной и минимальной толщин пленки.

### 3. Коэффициент загрязнения пленки при термическом испарении определяется:

- отношением потока молекул и атомов остаточных газов к потоку атомов испаряемого вещества;
- отношением потока молекул и атомов остаточных газов к потоку атомов и молекул рабочих газов;
- отношением потока атомов материала испарителя к потоку атомов испаряемого вещества.