



第五章 薄膜的形成与生长

- 5.1 凝结过程
- 5.2 薄膜晶核的形成与生长
- 5.3 薄膜的形成与生长

1



概述

薄膜的形成与生长：射向基板的原子或分子与表面碰撞，部分被反射、部分被表面吸附而停留。停留的原子或分子在自身所带能量及基板温度所对应的能量作用下，发生表面扩散及迁移，一部分由于能量高再蒸发，脱离表面，一部分落入势能谷底而被吸附，进而发生凝结。凝结伴随着晶核形成与生长过程，岛的形成、合并与生长过程，最后形成连续的薄膜层。

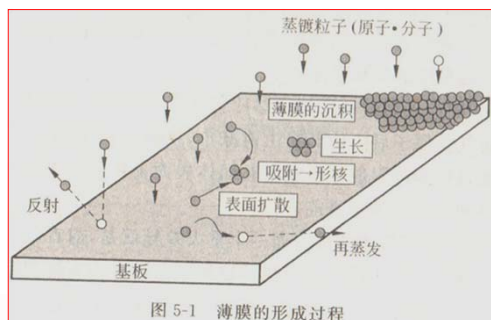


图 5-1 薄膜的形成过程

凝结过程是薄膜形成的第一阶段：是气相原子或分子入射到基体表面之后，从气相到吸附相，再到凝结相的一个相变过程。

2



5.1 凝结过程

5.1 凝结过程

1. 吸附

(1) 吸附现象

气体原子到达基片表面后发生三种现象：

- 与基体表面原子进行能量交换被吸附；
- 吸附后气相原子仍有较大的解吸能，在基体表面作短暂停留后再解吸蒸发(二次蒸发)；
- 与基体表面不进行能量交换而反射回去。

(2) 物理、化学吸附

- 物理吸附：由范德华力、静电等引起的吸附。
- 化学吸附：由化学键结合力引起的吸附（经由表面悬挂键，即不饱和的化学键）。

3



5.1 凝结过程

▪ 吸附过程的能量关系

Q_p 物理吸附热

Q_c 化学吸附热

E_d 脱附活化能

当入射到基底表面的气相原子的动能较小时，被物理吸附。吸附分子落在位能最低点，并在其附近作热振动。如果由于某种原因使它获得足够的能量而越过A点，就会发生化学吸附，放出大量热，落在位能最低点。

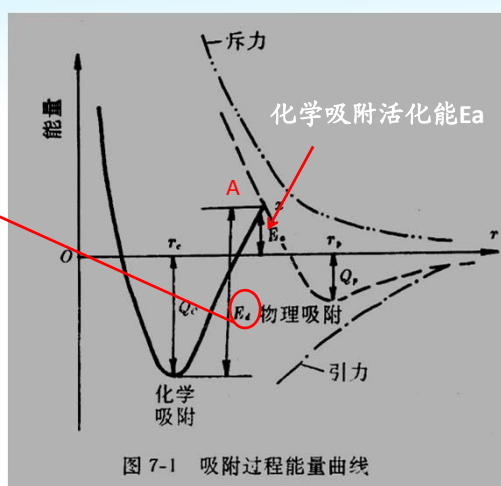



图 7-1 吸附过程能量曲线

吸附分子在滞留于表面的时间里，如果得到脱附活化能，则还会脱离表面。4



南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.1 凝结过程

(3) 入射原子的滞留时间 τ_a

吸附原子在基片表面上移动，在被脱附之前，具有的平均停留时间为：

$$\tau_a = \tau_0 \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right) = \frac{1}{f} \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)$$


脱附能

式中 τ_0 为表面原子的振动周期（大约 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s）， f 为振动频率。

脱附能 E_d 与平均停留时间 τ_a 的关系							
E_d (kcal/mol)	2.5	5	10	15	20	25	30
τ_a (s)	6.6×10^{-12}	4.4×10^{-10}	1.6×10^{-6}	8.5×10^{-3}	3.8×10	1.7×10^5	7.3×10^8

~8450天，23年

5



南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.1 凝结过程

2. 表面扩散

表面滞留期间----表面扩散过程

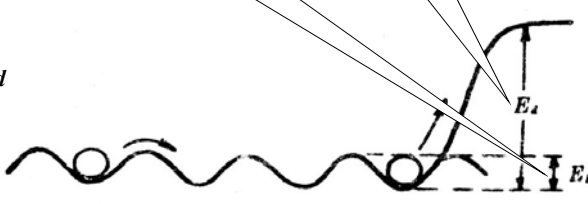
吸附原子的表面扩散是凝结的必要条件：

原子扩散 — 形成原子对 — 凝聚

表面扩散势垒(扩散激活能)

表面扩散能

脱附能

$$E_D \approx \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{2}\right) E_d$$


吸附原子表面扩散示意图

6



5.1 凝结过程

平均表面扩散时间 τ_D

吸附原子在一个吸附位置上的停留时间称为平均表面扩散时间，用 τ_D 表示。

$$\tau_D = \tau'_0 \exp\left(\frac{E_D}{kT}\right) = \frac{1}{f_1} \exp\left(\frac{E_D}{kT}\right)$$

(f_1 为沉积原子横向振动频率)

表面扩散能

式中 τ'_0 是表面原子沿表面水平方向振动周期，一般认为 τ'_0 比 τ_0 小一点。许多情况下，也可以认为 $\tau'_0 = \tau_0$ 。

(表面原子振动周期) 大约 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s

单位时间内扩散的步数 (扩散频率) f_D 是

$$f_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{1}{\tau'_0} \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right)$$

7



5.1 凝结过程

平均表面扩散距离

吸附原子在表面停留时间经过扩散运动所移动的距离 (从起始点到终点的间隔) 称为平均表面扩散距离, \bar{x}

若用 a_0 表示相邻吸附位置间距, 则:

$$\bar{x} = a_0 \exp\left(\frac{E_d - E_D}{2kT}\right)$$

讨论:

表面扩散能 E_D 越大, 扩散越困难, 平均扩散距离也越短;
 脱附能 E_d 越大, 吸附原子在表面上停留时间越长, 则平均扩散距离也长。

对凝结过程有利

8

5.1 凝结过程

3. 凝结

脱附能

吸附原子面密度

$$n_1 = J \cdot \tau_a = J \cdot \tau_o \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)$$

不考虑反射

吸附原子在这样的迁移中与其他原子相碰撞就可形成原子对。凝结过程是指吸附原子在基体表面形成原子对及其后续过程。

吸附原子在滞留时间内迁移的次数

$$N = f_D \cdot \tau_a = \frac{\tau_a}{\tau_D} = \frac{\tau_o}{\tau'_o} \exp\left(\frac{E_d - E_D}{kT}\right)$$

近似认为: $\tau_o = \tau'$

表面扩散时间

9

5.1 凝结过程

每个吸附原子的捕获面积: $S_D = N/n_o$

式中, n_o 是单位基片表面上的吸附位置数, N 是吸附原子在滞留时间内的迁移次数。

所有滞留原子总捕获面积:

吸附原子面密度

$$S_\Sigma = n_1 \cdot S_D = n_1 \cdot \frac{N}{n_o} = \frac{n_1}{n_o} \cdot N = \frac{n_1}{n_o} \cdot f_D \cdot \tau_a$$

$$= \frac{n_1}{n_o} \exp\left(\frac{E_d - E_D}{kT}\right)$$

脱附能越高、温度越低、吸附密度越高, 表面扩散能低, 则总面积越大;

10



5.1 凝结过程

讨论:

当 $S_{\Sigma} < 1$ (单位面积) 时, 每个吸附原子的捕获面积内只有一个原子, 故不能形成原子对, 也不能产生凝结。

只有当 $S_{\Sigma} > 1$ 时才可能成膜。

当 $1 < S_{\Sigma} < 2$ 时, 发生部分凝结。平均每个吸附原子的捕获面积内有一个或两个吸附原子, 可形成原子对或三原子团。在滞留时间内, 一部分吸附原子有可能重新蒸发掉。

当 $S_{\Sigma} > 2$ 时, 每个吸附原子的捕获面积内至少有两个吸附原子。可形成原子对或更大的原子团, 从而达到完全凝结。

11



5.1 凝结过程

凝聚过程的表征

(1) 凝聚系数 α_c

单位时间内, 完全凝聚的气相原子数与入射到基片表面上的总原子数之比。

$$\alpha_c = \frac{J_c}{J}$$

(2) 粘附系数 α_s

当基片表面已经存在凝结原子时, 单位时间内, 再凝结的气相原子数与入射到基片表面上的总原子数之比。

$$\alpha_s = \frac{J_s}{J} = \frac{1}{J} \frac{dn_c}{dt}$$

J 单位时间入射到基片单位面积表面上的气相总原子数; n_c 是在 t 时刻基片表面上存在的原子数。

12



5.1 凝结过程

(3) 热适应系数 α_T

表征入射气相原子（或分子）与基体表面碰撞时相互交换能量程度的物理量称为热适应系数（热平衡调节系数）。

$$\alpha_T = \frac{T_I - T_R}{T_I - T_S}$$

式中 T_I 、 T_R 和 T_S 分别表示入射气相原子、再蒸发原子和基体温度。

$\alpha_T = 1$ 完全适应, $T_R = T_S$ 入射原子与基片能量交换充分, 达到热平衡

$\alpha_T < 1$ 不完全适应, $T_S < T_R < T_I$

$\alpha_T = 0$ 完全不适应, $T_I = T_R$ 入射原子与基片完全没有热交换

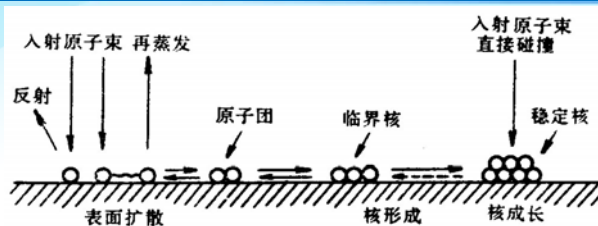
13



5.2 成核理论

5.2 成核理论

薄膜的形成是由成核开始的。



晶核形成与生长的物理过程可用图 5-3 来表示。从图中可以看出核的形成与生长的四个阶段：

(1) 从蒸发源蒸发出的气相原子入射到基片表面上, 其中一部分因能量较大而弹性反射回去, 另一部分则吸附在基片表面上。在吸附的气相原子中有一小部分因能量较大而再蒸发, 回到气相。

(2) 吸附气相原子在基底表面碰撞结合形成原子对或小原子团并凝结在基片表面上。

(3) 原子对或小原子团和其他吸附原子继续碰撞结合, 一旦原子团中的原子数超过某一个临界值, 则原子团进一步与其他吸附原子碰撞结合, 向着长大方向发展形成稳定的原子团。含有临界值原子数的原子团称为临界核, 稳定的原子团称为稳定核。

(4) 稳定核再捕获其他吸附原子, 或者与入射气相原子相结合使它进一步长大成为小岛。

14



5.2 成核理论

5.2 成核理论

稳定核：要在基片上形成稳定的薄膜，在沉积过程中必须不断产生这样的小原子团，即一旦形成就不分解。

最小稳定核：即原子团的尺寸或所含原子的数目比它再小时，原子团就不稳定。

对不同的薄膜材料与基片组合，都有各自的最小稳定核。如在玻璃上沉积金属时，最小稳定核为3-10个原子

临界核：比最小稳定核再小点，或者说再小一个原子，原子团就变成不稳定的。这种原子团为临界核。

15



5.2 成核理论

5.2 成核理论

成核理论主要有两种理论模型：

- **毛细理论（热力学界面能理论）：**建立在热力学基础上，利用宏观物理量讨论膜的形成过程。模型比较直观，所用物理量能从实验中直接测得，适用于原子数量较大的粒子。
- **统计或原子理论（原子聚集理论）：**从原子的运动和相互作用角度来讨论薄膜的形成过程和结构。可描述少数原子的成核、原子团的形成过程，物理量不易直接测得。

16



5.2 成核理论

5.2 成核理论

5.3.1 毛细理论（热力学界面能理论）

薄膜形成：气相→ 吸附相→固相的相变过程。
毛细理论视原子团为微小的凝聚滴

(1) 成核过程定性分析：

- 原子团通过吸附原子而增大，表面能增大，体系自由能增加 ΔG ；
- 到临界核时，自由能增加到最大值 ΔG_{\max} ；
- 然后，原子团再增大，体系 ΔG 下降，形成稳定核。

17

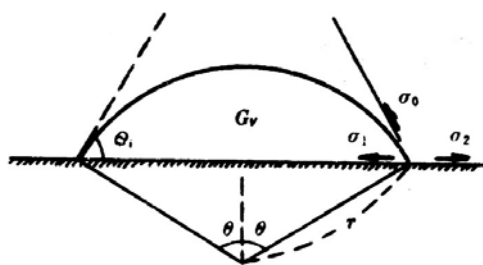


5.2 成核理论

(2) 定量分析： 热力学界面能理论

① 临界核：

假设在基片表面上形成的核是球冠形， θ 表明沉积物与衬底材料之间的浸润程度，核的曲率半径为 r 。



基体表面形成的球帽形核

总的自由能变化：

界面自由能变化+体积自由能变化

 σ 界面单位自由能 ΔG_v 凝聚相单位体积自由能

18

5.2 成核理论

1、热力学界面能理论（毛细理论）

1) 界面自由能变化:

球冠面积（核与气相界面）:

$$S = 2\pi r h = 2\pi r^2 (1 - \cos\theta)$$

球冠底面积（核与基底界面）:

$$S_1 = \pi (r \sin\theta)^2$$

原子团（核）吸附前后体系总的表面自由能变化 ΔG_s 为:

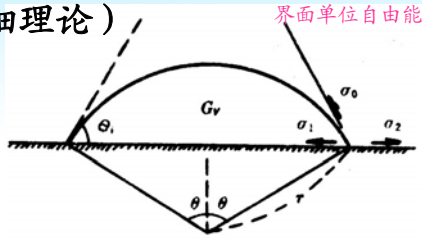
$$\Delta G_s = \sigma_0 2\pi r^2 (1 - \cos\theta) + \pi (r \sin\theta)^2 (\sigma_1 - \sigma_2)$$

平衡状态（稳定状态）要求:

$$\sigma_0 \cos\theta + \sigma_1 - \sigma_2 = 0$$

$$\Delta G_s = \sigma_0 2\pi r^2 (1 - \cos\theta) - \sigma_0 \pi (r \sin\theta)^2 \cos\theta = \sigma_0 4\pi r^2 f(\theta)$$

(其中 $f(\theta) = \frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4}$)



基底表面形成的球帽形核

5.2 成核理论

1、热力学界面能理论

2) 体积自由能变化:

凝聚相单位体积自由能

体积自由能变化: $\Delta G_v = \Delta G_v \cdot V = \Delta G_v \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot f(\theta)$

总的自由能变化: 表面自由能变化+体积自由能变化

$$\Delta G = \Delta G_s + \Delta G_v = 4\pi \cdot f(\theta) \cdot (r^2 \cdot \sigma_0 + \frac{1}{3} r^3 \cdot \Delta G_v)$$

临界核半径:

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 0 \longrightarrow r^* = -\frac{2\sigma_0}{\Delta G_v} \quad (\Delta G_v < 0)$$

临界核半径与浸润角无关



5.2 成核理论

1、热力学界面能理论

☺ 当原子团半径小于临界形核半径时，原子团不稳定；当原子团半径大于临界形核半径时， $\Delta G \downarrow$ ，原子团长大变得更稳定。

临界形核自由能：

$$\Delta G^* = \frac{16\pi \cdot \sigma_0^3 \cdot f(\theta)}{3(\Delta G_v)^2} \quad f(\theta) = \frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} = \begin{cases} 0 & \theta=0 \\ 1 & \theta=\pi \end{cases}$$

$$\Delta G^* = \begin{cases} 0 & \theta=0 & \text{完全浸润} & \text{即形成稳定核无需克服能量势垒;} \\ \text{最大} & \theta=\pi & \text{完全不浸润} & \text{形成稳定核, 所必须克服的势垒最高。} \end{cases}$$



5.2 成核理论

1、热力学界面能理论

② 成核速率

- 临界核长大速率：

在单位面积、单位时间内形成的稳定核数量。

- 临界核长大途径：

入射原子直接与临界核碰撞相结合（很少）

吸附原子做表面迁移→碰撞→结合（为主）

- 临界核长成稳定核的速率决定于：

- 1) 单位面积上的临界核数—临界核密度
- 2) 每个临界核的捕获范围
- 3) 所有吸附原子向临界核运动的总速度



5.2 成核理论

1、热力学界面能理论

成核速率 I 与临界核面密度 n_i^* 、临界核捕获范围 A 和吸附原子向临界核扩散的总速率 V 有关。

$$I = Z \cdot n_i^* \cdot A \cdot V \quad \text{式中, } Z \text{ 是Zeldovich修正系数。}$$

1) 临界核面密度: $n_i^* = n_1 \exp(-\Delta G^* / kT)$

其中, 吸附原子面密度 $n_1 = J \cdot \tau_a = J \cdot \tau_0 \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)$

2) 每个临界核的捕获范围 (周长) 为: $A = 2\pi r^* \sin \theta$

3) 原子向临界核运动的总速率: $V = n_1 \cdot v \quad v = \frac{a_0}{\tau_D} = \frac{a_0}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right)$

相邻吸附位置间距

平均表面扩散时间²³

5.2 成核理论

1、热力学界面能理论

成核速率:

$$\begin{aligned} I &= Z \cdot n_i^* \cdot A \cdot V \\ &= Z \cdot \left[n_1 \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right) \right] \cdot (2\pi r^* \sin \theta) \cdot \left[J a_0 \exp\left(\frac{E_d - E_D}{kT}\right) \right] \\ &= Z \cdot n_1 \cdot 2\pi r^* \sin \theta \cdot J a_0 \cdot \exp\left(\frac{E_d - E_D - \Delta G^*}{kT}\right) \end{aligned}$$

与成核能量和成膜参数有关的函数

$$(J = \frac{P_v}{\sqrt{2\pi m k T}})$$

24



5.2 成核理论

1、热力学界面能理论

毛细理论（热力学界面能理论）

薄膜形成：气相→ 吸附相→固相的相变过程。

毛细理论视原子团为微小的凝聚滴

- 原子团通过吸附原子而增大，表面能增大，体系自由能增加 ΔG ；
- 到临界核时，自由能增加到最大值 ΔG_{\max} ；
- 然后，原子团再增大，体系 ΔG 下降，形成稳定核。
- 得到了成核速率。

25



5.2 成核理论

2、统计或原子理论（原子聚集理论）

问题提出：热力学界面能理论的两个假设，一是认为核尺寸变化时，其形状不变；二是认为核的表面自由能和体积自由能与块体材料相同。

显然，此假设只适用于比较大的核（大于100个原子）。

理论计算：临界核的半径 $r^* < 0.5 \text{ nm}$

实际情况：临界核的大小与成膜条件有关，基片温度低、过饱和度 high 时，临界核只有几个原子。

显然，热力学界面理论与实际情况有较大差别。

为了克服理论上的困难，1924年Frenkel提出了成核理论原子模型，并不断发展。














26

5.2 成核理论

原子聚集理论的基本内容

原子聚集理论将核（原子团）看作一个大分子，用其内部原子之间的结合能或与基片表面原子之间的结合能代替热力学理论中的自由能。**结合能**不是连续变化而是以原子对结合能为最小单位的不连续变化。

假设沉积速率恒定不变，以面心立方结构金属为例，分析临界核大小随基底温度的变化规律。

临界核		 	 	  
最小稳定核		 	 	
结合能	E_2	$E_3 = 3E_2$ $E_4 = 4E_2$ 或 $5E_2$	$E_5 = 6E_2$ $E_6 = 8E_2$	
	T_1	T_2	T_3	基底温度 T_s

临界核与最小稳定核的形状

原子聚集理论中，临界核和最小稳定核的形状与结合能的关系图。







27

5.2 成核理论

临界核和最小稳定核的形状与结合能的关系：

1) 较低基底温度 T_1 ，临界核是吸附在基体表面上的单个原子。每一个吸附原子一旦与其他吸附原子相结合都可形成稳定的原子对形状稳定核。

2) 温度大于 T_1 之后，临界核是原子对。因为此时每个原子若只受单键的约束是不稳定的，必须具有双键才能形成稳定核。此时，最小稳定核是三原子的原子团。另一种可能是四原子的方形结构，概率小。

临界核		 
最小稳定核		 
结合能	E_2	$E_3 = 3E_2$ $E_4 = 4E_2$ 或 $5E_2$
	T_1	T_2

图中 T_1 , T_2 和 T_3 称为 **转变温度或临界温度**。

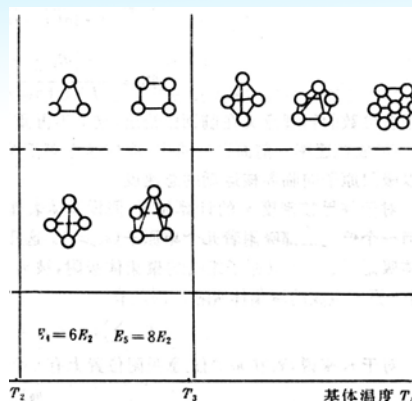
28



5.2 成核理论

3) 当温度高于 T_2 后，临界核是三原子或四原子团。因为这时双键已不能使原子稳定在核中。要形成稳定核，每个原子至少有三个键，稳定核是四原子团或五原子团。

4) 当温度再进一步升高达到 T_3 以后，临界核显然是四原子团和五原子团，有的可能是七原子团。



图中 T_1 ， T_2 和 T_3 称为**转变温度或临界温度**。

注：热力学界面能成核理论中，描述核形成条件采用临界核半径的概念。

29



5.2 成核理论

转变温度或临界温度：形成临界核的等效温度

根据临界核原子数的多少，以及结合能和吸附能的大小，可以计算形成临界核的临界温度。

对两个和三个原子结合成临界核的转换温度 T_1 、 T_2 可以用下式计算：

$$T_1 = -\frac{E_d + E_2}{k \ln(\tau_0 J / n_0)} \quad T_2 = -\frac{E_d + \frac{1}{2} E_3}{k \ln(\tau_0 J / n_0)}$$

式中 τ_0 为表面原子的振动周期（大约 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s），

J 为单位时间入射到基片单位面积的总原子数；

n_0 是单位基片表面上吸附位置数；

E_2 、 E_3 分别为两个和三个原子的结合能

30



5.2 成核理论

成核速率

成核速率 I 与临界核面密度 n_i^* 、临界核捕获范围 A 和吸附原子向临界核扩散的总速率 V 有关。

由统计理论可得到临界核密度：

$$n_i^* = n_0 \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^i \exp \left(\frac{E_i - iE_1}{kT} \right)$$

式中， n_0 和 n_1 分别为基片表面上的吸附位置密度和吸附原子密度， i 为临界核中的原子数目， E_i 是临界核的结合能， E_1 是单原子吸附状态下的势能。

31



5.2 成核理论

E_1 是单原子吸附状态下的势能，故若将 E_1 作为能量基准（零点），则临界核密度可表示为：

$$n_i^* = n_0 \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^i \exp \left(\frac{E_i}{kT} \right)$$

成核速率

$$\begin{aligned} I &= n_i^* \cdot A \cdot V \\ &= n_0 \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^i \exp \left(\frac{E_i}{kT} \right) \cdot A \cdot \left[Ja_0 \exp \left(\frac{E_d - E_D}{kT} \right) \right] \\ &= A \cdot J \cdot n_0 \cdot a_0 \cdot \left(\frac{J \cdot \tau_a}{n_0} \right)^i \cdot \exp \left(\frac{E_i + E_d - E_D}{kT} \right) \\ &= A \cdot J \cdot n_0 \cdot a_0 \cdot \left(\frac{J \cdot \tau_0}{n_0} \right)^i \cdot \exp \left(\frac{E_i + (i+1)E_d - E_D}{kT} \right) \end{aligned}$$

32



5.2 成核理论

两种成核理论的比较

- 理论依据的基本概念相同，得到的成核速率公式形式相同；
- 采用的能量不同：热力学界面能理论用自由能，原子理论用结合能；
- 微观结构模型不同：热力学界面能理论采用简单理想化几何构型（能量连续变化），原子理论采用原子团模型（能量非连续）；
- 热力学界面能理论适用于大的临界核，原子理论适用于很小的临界核；
- 两种理论都能正确给出成核速率和临界核、基片温度和基片性质的关系。一般说来，两个模型间有比较广泛的一致性。

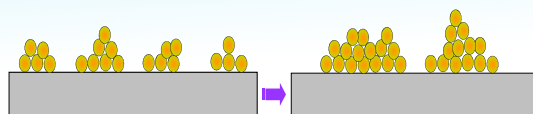
33



5.3 生长过程

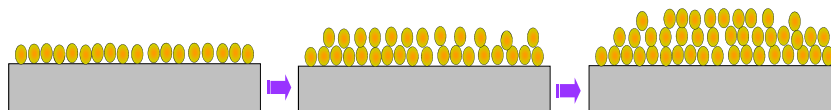
5.3.1 薄膜的生长模式

(1) 岛状模式




这种形成模式在薄膜生长的初期阶段，润湿角不为零，在基片表面上形成许多三维的岛状晶核、核生长、合并进而形成薄膜，大多数膜生长属于此类型。

(2) 单层生长模式



沉积原子在基片表面上均匀地覆盖，润湿角为零，在衬底上形成许多二维晶核，晶核长大后形成单原子层，铺满衬底，逐层生长。

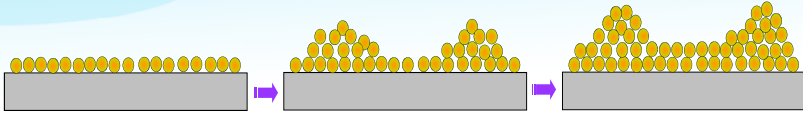
34



南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.3 生长过程


(3) 层岛复合模式



在基片表面上形成一层或更多层以后，随后的层状生长变得不利，而岛开始形成，从二维生长到三维生长转变，岛长大、结合，形成一定厚度的连续薄膜。

大多数薄膜形成与生长过程都属于第一种模式，即在基片表面上吸附的气相原子凝结之后，首先形成晶核，核不断吸附气相原子形成小岛，岛吸附气相原子形成薄膜。

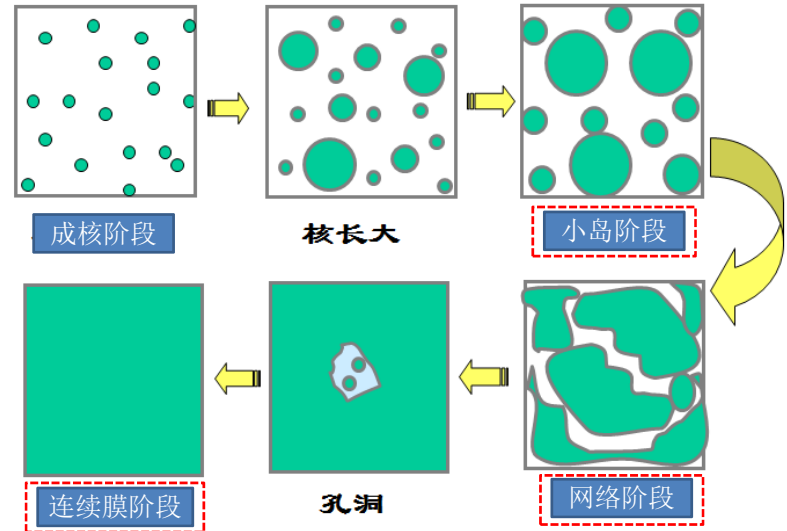
35



南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.3 生长过程

薄膜的形成过程分四个阶段（岛状生长为例）：



成核阶段

核长大


小岛阶段

连续膜阶段

孔洞

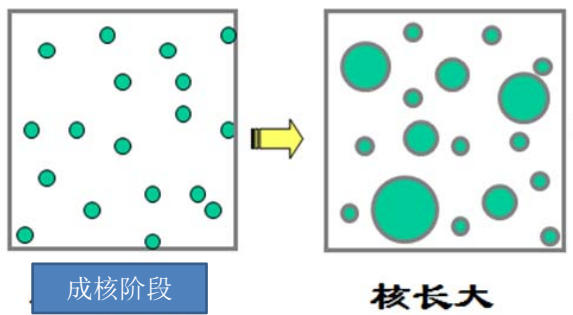
网络阶段

36



南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics


5.3 生长过程



① 成核阶段—成核和核长大

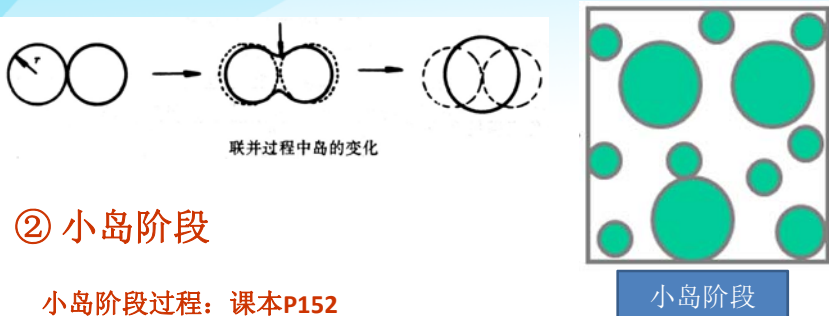
达到基片上的原子，其中一部分与基片原子交换能量后，仍具有相当大的能量，可以返回气相。另一部分则被吸附在基片表面，这种吸附主要是物理吸附，原子将在基片表面停留一定时间。由于原子本身还具有一定的能量，同时还可以从基片得到热能，因此原子有可能在表面进行迁移或扩散。在这一过程中，原子有可能再蒸发、也可能与基片发生化学作用而形成化学吸附，还可能遇到其它的蒸发原子而形成原子对或原子团。发生后两种情况时，原子再蒸发与迁移的可能性极小，从而逐渐成为稳定的凝结核。

37



南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.3 生长过程




② 小岛阶段

小岛阶段过程：课本P152

当凝聚晶核达到一定浓度后，继续蒸发就不再形成新的晶核。新蒸发来的吸附原子通过表面迁移将聚集在已有晶核上，使晶核生长并形成小岛，这些小岛通常是三维结构，并且多数已具有该种物质的晶体结构，即已形成微晶粒。

38




南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.3 生长过程

③ 网络阶段

网络阶段过程：
课本P152



沟道

随着小岛的长大，相邻的小岛会相互接触并彼此结合，结合过程类似两个小液滴结合形成一个大液滴的情况，这是由于小岛在结合是释放出一定的能量，这些能量足以使相接触的微晶状小岛瞬时熔化，在结合以后，由于温度下降所生成的岛将重新结晶。随着小岛的不断结合，将形成网络状薄膜。

39



南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.3 生长过程

④ 连续薄膜

连续薄膜阶段过程：
课本P152




连续膜阶段

孔洞

随着原子继续沉积，吸附原子将填充岛与岛之间的间隔，也有可能是在岛与岛之间生成新的小岛，由小岛的的生长来填充空沟道，最后形成连续薄膜。

40



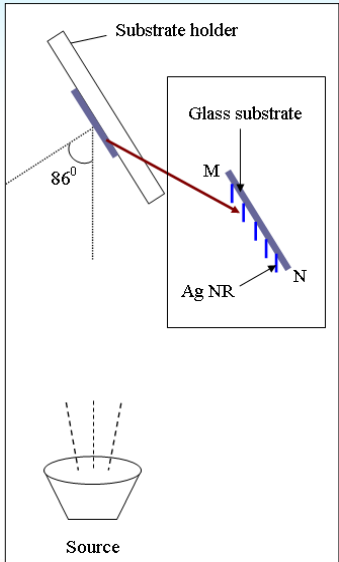
南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.3 生长过程


气相入射的角度:

原子的入射角度对膜结构有很大影响，使薄膜产生各向异性。

随着结晶颗粒的增大，入射的沉积原子就逐渐沿着原子的入射方向长大，于是会产生所谓的自身影响效应，从而使薄膜表面不平整，出现各向异性。这种沿原子入射方向生长的倾向，在入射角越大时，表现得越明显。



41



南京航空航天大学
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

5.3 生长过程

基底温度:

影响薄膜生长的粘附系数（多数降低）、高迁移速率、增加岛与岛之间扩散和成核临界尺寸、结晶和取向等. P161

基片表面状态:

粗糙度低、表面光洁，则膜层结构致密，容易结晶，否则相反，而且附着力差。

环境污染:

真空度低，材料受残余气体分子污染严重，薄膜性能变差。

42



5.4 沉积参数对薄膜生长影响

5.4 沉积参数对薄膜生长影响

沉积参数对薄膜生长的影响主要体现在：

沉积速率：

一般来说，沉积速率影响膜层中晶粒的大小与晶粒分布的均匀度以及缺陷等。

低速率：金属原子在基片上迁移时间长，容易到达吸附点位，或被吸附点位置上的小岛捕获而形成粗大的晶粒，使得薄膜的结构粗糙，膜不致密。后续原子不能及时达到，致使暴露时间长，易引入杂质，以及产生缺陷。因此，沉积速率高一些好。

高沉积速率：薄膜晶粒细小，结构致密，但由于同时凝结成的核很多，在能量上核处于能量比较高的状态，所以膜内部存在比较大的应力。

原则：对特定的材料，从具体的实验中正确选择最佳的沉积速率。

43



本章小节

本章小节

❖ 凝聚过程

吸附、吸附原子在基片上的状态

❖ 形核理论

稳定核、临界核、毛细理论、统计或原子理论


❖ 薄膜的生长过程

成核，小岛，沟道（网络），连续薄膜

❖ 薄膜的生长模式

岛状模式、单层生长模式、复合模式

44



南京航空航天大学
NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

作业

作 业

(1) 简述晶核的形成过程。

(2) 论述毛细形核理论。

(3) 简述薄膜的生长模式，并以岛状生长为例分析薄膜形成的四个主要阶段。

45