

材料学概论

Introduction to Materials Science

内部学习资料

清华大学 材料学院

王秀梅 田民波

第九章

内部学习资料

磁性及磁性材料

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

9.1 物质磁性的来源与本质

9.2 材料磁性的表征

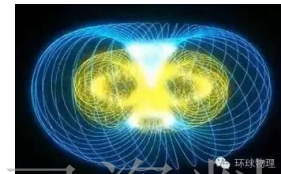
9.3 材料磁性的分类及产生机制

9.4 硬磁材料和软磁材料

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

9.1 物质磁性的来源与本质

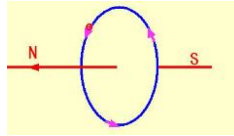
- 任何物质在外磁场中都能够或多或少地被磁化，只是磁化的程度不同。



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

9.1 物质磁性的来源与本质

- 1820年，丹麦科学家奥斯特就发现了**电流的磁效应**，第一次揭示了**磁与电存在着本质联系**。
- 安培分子电流假说**：任何物质的分子中都存在着**环形电流**，称为**分子电流**。而分子电流相当一个**基元磁体**。物质的**磁性**就决定于物质中**分子电流**对外界的**磁效应**的**总和**。
- 一切磁现象的根源是**电流的存在**。
- 物质的磁性源于原子中电子的运动**。



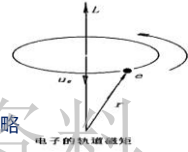
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

9.1 物质磁性的来源与本质

原子磁矩：

原子核磁矩+电子磁矩

- 原子核的磁矩仅为电子磁矩的千分之几，可以忽略
- 电子轨道磁矩：电子绕原子核运动
- 电子自旋磁矩：电子自旋具有自旋磁矩，每个电子自旋磁矩大小近似等于一个玻尔磁子 μ_B
- 原子磁矩等于核外所有电子的自旋磁矩与轨道磁矩之和
- 同一个电子轨道上一对自旋相反的电子的磁矩可以抵消
- 原子轨道被电子填满时，自旋磁矩抵消



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

过渡金属3d壳层电子结构与其磁性的关系

3d 壳层的电子结构

元素	原子序数	21	22	23	24	25	26 ^①	27 ^②	28 ^③	29	30
	元素名 ^④	Sc ^{3d1}	Ti ^{3d2}	V ^{3d3}	Cr ^{3d4}	Mn ^{3d5}	Fe ^{3d6}	Co ^{3d7}	Ni ^{3d8}	Cu	Zn
	磁性	顺磁性	顺磁性	顺磁性	反铁磁性	反铁磁性	铁磁性	铁磁性	抗磁性	抗磁性	抗磁性
电子的壳层结构	壳层结构 ^⑤	3d ^{4s}	3d ^{4s}	3d ^{4s}	3d ^{4s}	3d ^{4s}	3d ^{4s}	3d ^{4s}	3d ^{4s}	3d ^{4s}	3d ^{4s}
	3d										
	4s壳层电子数	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2

- 每一种元素的 1s²2s²2p⁶3s²3p⁶壳层均省略；
- 上角标为 3dⁿ的元素称为 3d 壳层过渡元素；
- 铁磁性元素晶体中不成对电子数的实测值比按洪德规则预测的值要小。

不成对的3d电子数？

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

某些 3d 过渡族元素离子的电子排布和离子磁矩

离子	电子数	3d 轨道电子排布	离子磁矩 (玻尔磁子)
Fe ³⁺	23		5
Mn ²⁺	23		5
Fe ²⁺	24		4
Co ²⁺	25		3
Ni ²⁺	26		2
Cu ²⁺	27		1
Zn ²⁺	28		0

在正尖晶石和反尖晶石铁氧体中，每个分子的离子排列和净磁矩

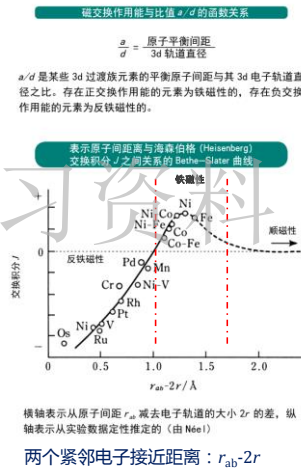
铁氧体	结构	四面体 间隙占位	八面体 间隙点位	净磁矩 / μ_B / 分子
FeO · Fe ₂ O ₃	反尖晶石	Fe ³⁺ 5 ←	Fe ²⁺ 4 → Fe ³⁺ 5 →	4
ZnO · Fe ₂ O ₃	正尖晶石	Zn ²⁺ 0 ←	Fe ³⁺ 5 → Fe ³⁺ 5 →	0

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

■ 交换作用：

- 处于不同原子的、未被填满壳层上的电子发生的特殊作用。
- 原子间好像在交换电子
- 交换作用所产生的交换能与晶格的原子间距有密切关系。

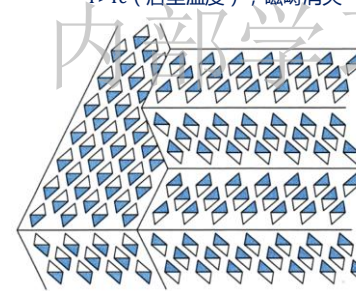
- $J > 0$, 铁磁性的物质：Fe, Ni, Ni-Co, Ni-Fe, 电子自旋方向一致，自发平行排列
- $J < 0$, 反铁磁性的物质：Mn, Cr, 电子自旋相反，自发反平行排列



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

■ 磁畴

- 由于近邻原子间的交换作用，相当于一个强磁场作用于各原子磁矩，使其平行排列——自发磁化；
- 自发磁化形成磁矩方向一致的区域： 10^9 - 10^{15} 个原子
- 自发磁化：铁磁物质与顺磁物质的本质区别
- $T > T_c$ (居里温度)，磁畴消失

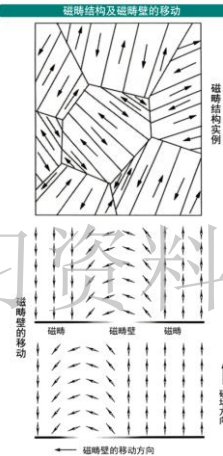


每个磁畴中的磁偶极子同向排列，但畴与畴之间随机排列，所以不存在净磁矩。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

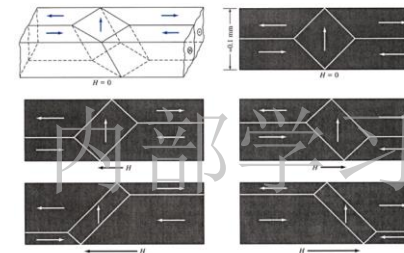
磁畴结构及畴壁的运动

- **磁畴壁**：相邻磁畴的界限。是一个过渡区，具有一定的厚度。
- 在这个过渡区，原子磁矩逐步改变方向。畴壁的能量比畴内的能量高。
- **磁畴结构**：磁畴的形状尺寸、畴壁的类型与厚度总称。
- 磁畴结构的不同是铁磁性物质磁性（硬磁、软磁等）千差万别的原因之一。



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

外加磁场增加时，磁畴的变化规律——顺者昌，逆者亡



在外加磁场的作用下，与外磁场一致的磁畴会生长、长大，不利的磁畴会缩小。磁畴生长采取磁畴壁移动的方式。

在外加磁场作用下，铁晶体中磁畴壁的运动。需要注意的是，当外加磁场增加时，那些磁矩方向与外磁场方向一致的磁畴变大，而那些方向相反的则变小(左图与右图的外加磁场自上而下增加)。

(Courtesy of R.W. DeBlois, The General Electric Co., and C.D. Graham, the University of Pennsylvania.)

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

9.2 材料磁性的表征

- 在磁场强度为 $H(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ 的外磁场作用下，材料内部磁场的强弱用磁感应强度 $B(\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2})$ 表示，为垂直穿过单位面积的磁力线条数，也叫磁通量密度。感应的磁场越强， B 的数值越大，磁力线就越密。

$$B_0 = \mu_0 H \quad (\mu_0 \text{ 真空磁导率, 是常数})$$

$$B = \mu H = \mu_0 (H + M) \quad (B \text{ 为磁感应强度, } \mu \text{ 为介质磁导率})$$

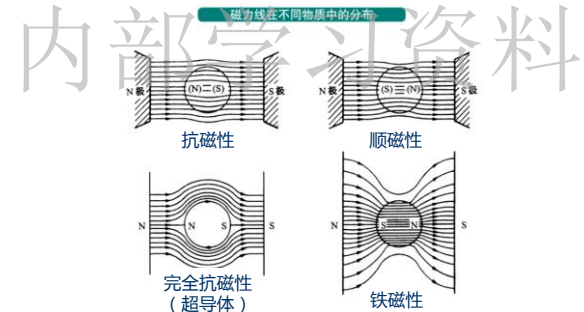
$$M = \chi H \quad \chi = \mu_r - 1 \quad (M \text{ 为磁化强度, 表征物质被磁化的程度, 可正可负; } \chi \text{ 为磁化率 (无量纲); } \mu_r \text{ 为介质的相对磁导率 } (\mu/\mu_0))$$

磁化率、磁导率都是表征磁介质磁性的重要物理量。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

9.3 材料磁性的分类及产生机制

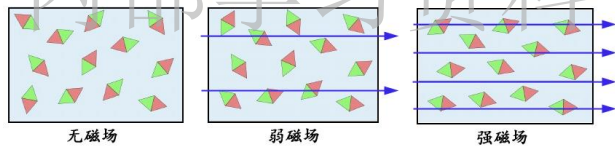
- 按照物质在外磁场中表现出来磁性的强弱（磁化强度的大小、正负），可将其分为抗磁性、顺磁性、铁磁性/亚铁磁性、反铁磁性物质。



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

顺磁性材料

- 在外磁场下感应弱的磁性，磁化率是正的，但数值很小 ($10^{-6} \sim 10^{-3}$)，磁化强度 M 的方向与磁场强度 H 的相同，且成正比；
- 材料的原子、离子或分子中存在永久磁矩，没有交换作用，相互作用远小于热运动能，在无外场作用下磁矩的取向随机、无规，没有自发磁化，没有净磁矩。
- 磁化率和温度有关，温度越高，磁化率越小。

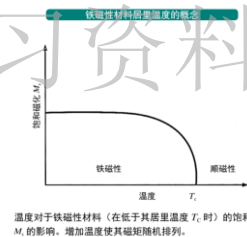


MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

铁磁性材料

- 在外磁场下感应极强的磁性，磁化率是正的，室温下可达 $10^2 \sim 10^6$ ，
- 具有永久磁矩，具有交换作用。
- 随着外磁场增大时，磁化强度迅速达到饱和，磁化率变小。
- 外磁场移去后，仍可保留极强的磁性（交换作用形成磁畴）；
- 铁磁性只在某个温度以下才表现出来，超过这个温度，铁磁性转变为顺磁性，这个温度称为居里点 T_c 。

- 亚铁磁性：属于不同次晶格的不同原子，其自旋磁矩的方向相反，数值大小不相等，因而存在部分抵消不尽的自发磁矩。由于组成亚铁磁性物质的成分必需分别具有至少两种不同的磁矩，只有化合物或合金才会表现出亚铁磁性。

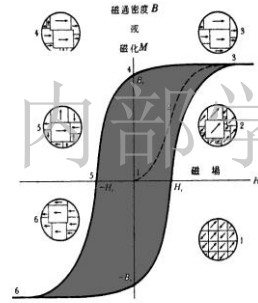


温度对于铁磁性材料（在低于其居里温度 T_c 时）的饱和磁化 M_s 的影响。增加温度使其磁矩随机排列。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

铁磁性的磁滞现象

磁滞回线



磁滞现象，其中显示出磁场所对磁感（或磁化）的影响。磁场的排列造成饱和磁化，点3；剩磁化，点4；退磁磁化，点5

- 饱和磁感应强度 B_s ：感应的B的最大值。
- 剩磁 B_r ：H等于0时的磁感应强度。
- 矫顽力 H_c ：B等于0时的磁场强度。
- 磁损耗：磁滞回线所包围的面积。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

17

反铁磁性材料

- 具有永久磁矩，具有负交换作用能。
- 相邻原子自旋间是受负的交换作用，自旋为反平行排列，磁矩虽处于有序状态（称为序磁性），但总的净磁矩在不受外场作用时仍为零。
- 磁化率与温度有关。在极低温度下，由于相邻原子的自旋完全反向，其磁矩几乎完全抵消，故磁化率几乎接近于0。温度升高时，磁化率逐渐增大，温度在尼尔点 T_N 达到最大值。温度超过尼尔温度，变成顺磁性。
- 反铁磁性材料比较不常见，大多数反铁磁性物质只存在于低温状况。

抗磁性

- 没有永久磁矩。
- 在外磁场中，电子轨道改变，感生出一个与外磁场方向相反的磁矩。
- 抗磁性一般很弱，磁化率为负值， -10^{-5} 。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

18

磁性分类及其产生机制

分类	原子磁矩	M-H特性	$M_s \propto \frac{1}{T}$ 随温度的变化	物质实例
强磁性	铁磁性			Fe, Co, Ni, Gd, Tb, Dy 等元素及其合金、金属间化合物等。
磁性	亚铁磁性			• 各种铁氧体材料 (Fe, Ni, Co 氧化物) • Fe, Co 等与金属离子类金属形成的金属间化合物 (TbFe 等)
弱磁性	顺磁性			Os, Pt, Rh, Pd 等 Ia 族 (Li, Na, K 等) IIa 族 (Be, Mg, Ca 等) NaCl, KCl 的 F 中心 ^①
弱磁性	反铁磁性			Cr, Mn, Ni, Sm, Fe 等 d 过渡元素或稀土元素。还有 MoO ₃ , MnF ₂ 等合金、化合物等
抗磁性	轨道电子的拉摩进动运动			Cu, Ag, Au C, Si, Ge, a-Si N, P, As, Sb, Bi S, Te, Se, F, Cl, Br, I He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn

① 关于 M_s ，请参阅P33中的图3和图4。

② 单链存在时不显示铁磁性，但与其他非铁磁性元素或铁磁性元素构成的合金或化合物显示出一定程度的铁磁性。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

19

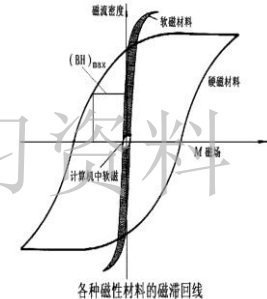
9.4 硬磁材料和软磁材料

磁性材料(Magnetic Materials)

通常指强磁性物质（铁磁和亚铁磁）。一般磁化率大于1。

- 硬磁材料：也称永磁材料，不容易被磁化，也不容易退磁。剩余磁感应强度高，矫顽力强，磁能积大。最大磁能积是其最大性能指标。

- 软磁材料：很容易被磁化和退磁。矫顽力小。

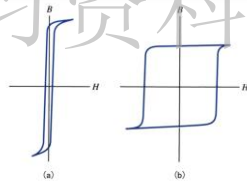


MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

20

■ 软磁材料和硬磁材料的磁滞回线的对比

- **磁导率不同**：软磁材料的初始磁导率和最大磁导率都大于硬磁材料
- **饱和磁感应强度不同**：软磁材料的饱和磁感应强度大
- **剩磁大小不同**：软磁材料的剩磁大
- **矫顽力大小不同**：软磁材料的矫顽力（一般 1A/m ）比硬磁材料的矫顽力（一般 $>100\text{A/m}$ ）小很多
- **正、反向充磁的难易度不同**：
软磁材料更容易达到磁饱和
- **磁损耗不同**：硬磁的磁损耗大



软磁材料 (a) 和硬磁材料 (b) 的磁滞回线。软磁材料具有细长（瘦高）的磁滞回线，从而使其易于磁化和反磁化。而硬磁材料则具有宽短（胖矮）的磁滞回线，从而使其很难被磁化和反磁化。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

21

硬磁铁氧体的应用领域

硬磁体的应用	马达类	DC 马达、DD 马达、步进马达 无刷马达、通用马达 同步马达（电感器型）、旋转传感器
	扬声器、磁头	扬声器、耳机、消去用磁头、头戴式受话器 磁辊（magnet roll）、VCM（音源线圈马达）
	磁记录	磁卡、硬盘、磁带
	磁力吸附	文具、玩具用永磁体，磁簧、磁锁、磁扣， 磁吸着器（工作机用磁锁等）、磁吸盘（磁锁等）
	其他	磁选别机、磁轴承、保健器具（磁化水、磁颈圈、 磁护带、磁枕、磁腰带等）

以上分类不是从源头上而仅依具体应用，仅供参考。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

22

软磁铁氧体的应用领域

软磁铁氧体主要的应用领域	开关电源用	主变压器、驱动器用变压器、电流变换器 E 芯、RM 芯、SMD 芯、环形芯、平面芯
	电感器用（线圈铁芯）	高周波电感器、去耦用电感器、 DC-DC 换流器用电感器、 径向引导电感器、变压器耦合线圈
	传送用	调制解调变压器用、磁圈芯用、RM 芯、EP 芯、 SMD 芯、圆环芯
	大电力用	高周波大电力变压器、通用变换器、 高周波电磁加热器、扼流圈（电抗器）
	电磁兼容（EMC）对策用	芯片扼流圈、3 端子滤波器、共模（态）滤波器、 非线性电阻、共态扼流圈、AC 电源用 EMI 滤波器
	超声波发生用	磁致伸缩振子用铁氧体（强力超声波发生用）、 n 形磁致伸缩振子
	其他	电气分解用铁氧体、铁氧体电极 高周波焊接用铁氧体（二端阻抗元件芯）

近年来，软磁铁氧体在应对高周波应用方面的新技术开发，极为活跃

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

23

决定磁畴结构的能量类型

- **磁畴的存在是磁体中各种能量相互妥协的结果。**
- **静磁能**：为了减少静磁相互作用能，铁磁体分为若干个磁畴，使得整体不显磁性。分割越细，静磁能越低。
- **交换作用能**：相邻磁畴的磁矩方向不同，使得交换能增加，为了减少交换能的增加，形成磁矩方向逐渐变化的畴壁。
- **磁晶各向异性**：单晶体沿不同晶轴方向磁化所测的磁化曲线和磁化到饱和的难易程度不同，有的方向易磁化，有的方向不易磁化。这种和磁化方向有关的自由能称为磁晶各向异性能。
- **磁致伸缩能**：铁磁性物质在外磁场作用下，尺寸发生变化的现象为磁致伸缩。磁性离子之间的相互作用能随磁性离子的间距及磁矩的取向而变化。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

24

第十章

薄膜与薄膜制备

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

10.1 薄膜和薄膜的特殊性能

10.2 薄膜的制备技术

10.3 薄膜的应用举例

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

10.1 薄膜和薄膜的特殊性能

- **膜(film)**：物质的二维形态。厚度很薄，介于单原子到几毫米间的薄层。
- **薄膜(thin film)**：厚度从1nm到几个微米
- **厚膜**：厚度大于10个微米
- **包覆膜(coating)**：由原子，分子或离子沉积在基片表面形成
- **自立膜**：不需要基体而能独立成形的厚膜（如铜箔、塑料薄膜）



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

薄膜材料的特殊性能

- **尺寸效应**：薄膜很薄，物性会受到薄膜厚度的影响
- **表面效应**：表面积很大
 - 表面能级很大
 - 表面散射：表面对膜内电子输运情况影响很大，随着厚度减少，电导率明显低于块体材料，还会影响其电阻温度系数、霍尔系数、热电系数等。
 - 熔点降低
 - 表面干涉效应引起光的选择性透射和反射
- **表面异常结构和非理想化学计量比特性**
- **附着力和内应力**：表面与基底存在界面相互作用，有界面能

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

10.2 薄膜的制备技术



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

气相沉积获得薄膜的三个必要条件

- 热的气相源
- 冷的基板
- 真空环境

减少蒸发物质被散射，提高成膜速率；防止镀料、被蒸发原子以及膜层的氧化；提高膜层的纯度；减少气体混入；提高膜层与基板之间的附着力；提高膜层的结晶质量及表面光洁度；



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD)

- 在真空条件下，采用物理方法，将镀料气化成气态原子、分子或部分电离成离子，在基体表面沉积具有某种特殊功能的薄膜的技术。
- ①镀料的气化；②气化原子、分子或离子的迁移；③原子、分子或离子在基体上沉积；
- 物理气相沉积的主要方法：真空蒸镀、溅射镀膜、离子镀膜、等离子体镀膜、分子束外延等。
- PVD技术不仅可沉积金属膜、合金膜、还可以沉积化合物、陶瓷、半导体、聚合物膜等。

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

真空蒸镀

真空蒸镀原理

- 真空蒸镀是在真空条件下，将镀料加热并蒸发，使大量的原子、分子气化并离开镀料表面(升华)。
- 气态的原子、分子在真空中经过很少的碰撞迁移到基体。
- 镀料原子、分子沉积在基体表面形成薄膜。

蒸发源

- 将镀料加热到蒸发温度并使之气化，这种加热装置称为蒸发源。
- 避免蒸发源材料与镀料起反应，要正确选择蒸发源材料和形状。
- 最常用的蒸发源是电阻蒸发源（蒸发低熔点材料）和电子束蒸发源（蒸发高熔点材料），此外还有脉冲激光加热蒸发源、高频感应加热、电弧加热、辐射加热等。

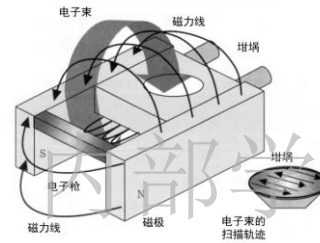
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

各种不同类型的电阻加热式蒸发源



- 电阻蒸发源适用于熔点低于1500℃的镀膜。
- 对电阻蒸发源材料的要求：熔点高；饱和蒸汽压低，防止成为杂质进入膜层，化学性能稳定，在高温下不与被蒸发材料发生化学反应；耐热性好；原料丰富。
- 常用蒸发源材料：W、Ta、Mo、Nb等难熔金属，或耐高温的金属氧化物、陶瓷以及石墨坩埚。

电子束蒸发源的基本构造



(1) 由 $\frac{1}{2}mv^2 = eU$, 得

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 5.93 \times 10^6 \sqrt{U} \text{ (m/s)}$$

(2) 由 $eVB = \frac{mv^2}{r_m}$, 得

$$r_m = \frac{mv}{eB} = 3.37 \times 10^{-6} \sqrt{\frac{U}{B}} \text{ (m)}$$

- 电子束蒸发源适合制作高熔点薄膜材料和高纯薄膜材料。
- 电子束蒸发是利用加速电子轰击镀膜材料，电子的动能转换成热能使镀膜材料加热蒸发，并成膜。
- 优点：①能获得极高的能量密度，最高可达10⁹W/cm²，加热温度可达3000~6000℃，可以蒸发难熔金属或化合物；②镀膜置于水冷的坩埚中，可避免坩埚材料的蒸发污染，制备高纯薄膜；③热量直接加热到蒸发材料表面，加热面积小，因而热效率高，热传导和热辐射损失减少。

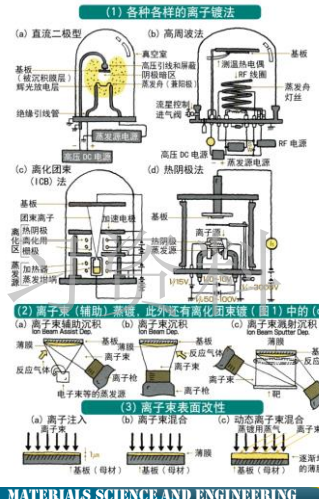
离子镀膜

离子镀的原理

- 采用某种方法形成等离子体，使蒸发原子部分离子化，在基体上施加负偏压，由于电场加速，从而使离子速度提高数万倍，以很高的能量对基体产生轰击，进而沉积于基体成膜。

离子镀的优点

- ①膜层和基体结合力强。
- ②膜层均匀，致密。
- ③在负偏压作用下绕镀性好。
- ④无污染。
- ⑤多种基体材料均适合于离子镀。



溅射镀膜

溅射

- 荷能粒子轰击固体表面，打出离子和中性原子的过程称为溅射。荷能粒子一般是离子，称为离子溅射，易于在电磁场中加速或偏转。

溅射镀膜

- 被溅射的靶材沉积到基材表面，就称作溅射镀膜。

溅射镀膜的各种方式

序号	溅射方式	靶材	Ar 气压 (Pa) 或 Torr	特点	应用
1	直流溅射	DC 1~10kV 0.1~1.5mA/cm ² RF 0.1~10W 0~100W/cm ²	1.33(10 ⁻²)	结构简单，成本低廉，溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
2	射频溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
3	磁控溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
4	直流溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
5	射频溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
6	磁控溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
7	射频溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
8	直流溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
9	射频溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)
10	磁控溅射	DC 0~10kV RF 0~10W	0.1~1.5(10 ⁻²) ~ 1.33(10 ⁻²) 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹	可溅射绝缘体、陶瓷、合金、金属等。溅射速率高，可沉积金属、合金、陶瓷、绝缘体等。	溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子) 溅射镀膜 (离子)

化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD)

- 化学气相沉积是指反应物质在气态条件下发生化学反应，生产固态物质沉积在加热的固态基体表面。

(3) 由 CVD 法所获得的薄膜实例

薄膜	挥发性化合物气体	气化温度 $T_1/^{\circ}\text{C}$	气化温度 $T_2/^{\circ}\text{C}$	载带气体	
单质金属	Cu	CuCl_2	500~700	550~1000	H_2 或 Ar
	Al	AlCl_3	125~135	800~1000	Ar 或 He
	W	$\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$	38~	93~100	Ar 或 He
	Nb	WCl_6	165~230	600~700	H_2
	Si	WF_6	200~	600~850	Ar 或 He
	Pt	NbCl_5	280~	1800~	He
合金	Ti-Ta	SiCl_4	770~1200	1000~1200	Ar 或 He
	Ti-Ta	SiH_4Cl_2	100~120	600~	Ar 或 He
	Ti-Ta	$\text{TiCl}_4 + \text{NbCl}_5$	250~	1300~1700	#
	TiC	$\text{TiCl}_4 + \text{C}_2\text{H}_4\text{CH}_3$	20~140	1100~1200	H_2
	ZrC	$\text{ZrCl}_4 + \text{C}_2\text{H}_4$	250~300	1200~1300	#
	WC	$\text{WCl}_6 + \text{C}_2\text{H}_4\text{CH}_3$	150~	1000~1500	#
氮化物	TiN	TiCl_4	20~80	1100~1200	$\text{N}_2 + \text{H}_2$
	Ta ₂ N	TaCl_5	250~300	2100~2300	N_2
	TiAlN	$\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3$	~300	#	$\text{N}_2 + \text{H}_2$
硼化物	TaB	$\text{TaCl}_5 + \text{BBr}_3$	20~180	1300~1700	H_2
	WB	$\text{WCl}_6 + \text{BBr}_3$	20~350	1400~1600	#
硅化物	MoSi	$\text{MoSiCl}_5 + \text{SiCl}_4$	~50~130	1000~1800	#
	TiSi	$\text{TiCl}_4 + \text{SiCl}_4$	~50~20	800~1200	#
氧化物	Al_2O_3	AlCl_3	130~160	800~1000	$\text{H}_2 + \text{CO}$
	SiO_2	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2$	~400	#	#
	Ta_2O_5	$\text{Ta}(\text{OC}_2\text{H}_5)_5$			

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

37

10.3 薄膜的应用举例

薄膜按应用分类

- 光学薄膜：高反/减反涂层、光记录介质、光波导
- 电学薄膜：绝缘薄膜、导电薄膜、半导体器件
- 磁学薄膜：磁记录介质
- 机械薄膜：耐磨涂层（硬质膜、润滑膜）
- 化学薄膜：防氧化或防腐蚀涂层、扩散阻挡层

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

38

超硬涂层

- 氮化物、碳化物、金刚石、类金刚石

各世代典型硬质涂层的性能

世代	涂层	颜色	硬度 (HV)	厚度 μm	摩擦系数	最高使用温度 $^\circ\text{C}$	说明
第一代	① TiN 单层	金黄	2300	1~4	0.4	500	高性价比涂层
	② CrN	银亮	2000	3~15	0.5	700	适用加工铜、钛、模具
	③ TiCN	灰黑	3000	1~4	0.4	400	高韧性通用涂层
第二代	④ ZrCN 复合	蓝灰	2500	1~4	0.3	550	通用性强
	⑤ TiAlN 复合	紫色	3200	1~4	0.5	800	通用性强
	⑥ AlTiN 复合	黑	3400	1~4	0.5	300	高速、高硬度加工
第三代	⑦ TiAlCN	亚黑	3500	1~4	0.6	1000	特殊加工领域
	⑧ DLC	黑彩	1000~4000	0.5~2	0.05	400	适用于有色金属、石墨、塑胶

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

39

薄膜太阳能电池



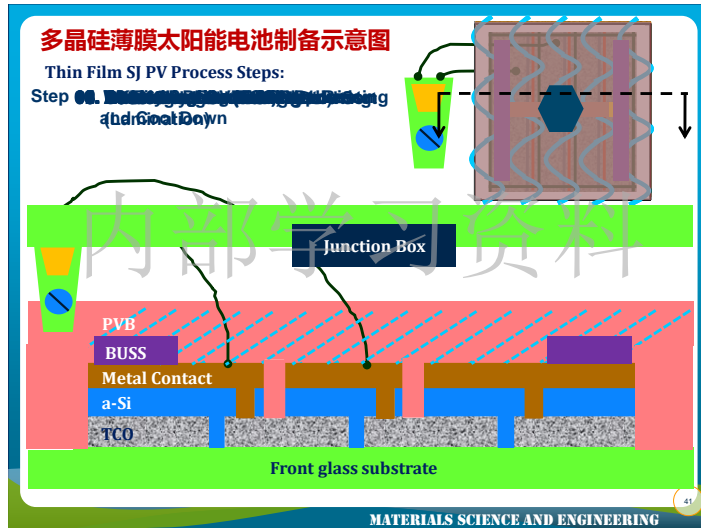
太阳能发电场

Applied Materials® 薄膜太阳能电池板 (8.5代) 面积: 5.7m^2 ($2.2\text{m} \times 2.4\text{m}$)



MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

40



第九、十章作业

- 9.2 磁性产生的根本原因是什么？分析Fe，Co，Ni具有铁磁性的原因。
- 9.3 什么是软磁材料、什么是硬磁材料？各举出两例。
- 9.5 何谓磁畴？决定磁畴结构的能量类型有哪几种？
- 10.1 给出薄膜的定义。薄膜材料具有哪些特殊性能？气相沉积薄膜需要哪三个必要条件？

内部学习资料

内部学习资料