



## 第七章 薄膜的物理性质

### □ 7.4 薄膜的磁学性质

7.4.1 薄膜的磁性

7.4.2 磁各向异性

7.4.3 薄膜的磁畴

7.4.4 磁阻效应

7.4.5 薄膜制备条件对磁性能的影响



### 7.4.1 薄膜的磁性

#### 磁膜材料:

厚度在**1 um**以下的**强磁性**材料。

各种磁性材料几乎都可制成成分和厚度可以控制的磁膜材料。

#### 分类:

按**材料性质**分为金属和非金属磁膜材料;

按**材料组织状态**分为非晶、多层调制和微晶磁膜材料。

#### 应用:

磁膜材料广泛用于制造计算机存储, 光通信中的磁光调制器、光隔离器和光环行器等; 也用作磁记录薄膜介质和薄膜磁头, 以及磁光记录盘等。



## 7.4.1 薄膜的磁性

## 铁磁性(ferromagnetism)

**铁磁性**，是指物质中相邻原子或离子的磁矩由于它们的相互作用而在某些区域中大致按同一方向排列，当所施加的磁场强度增大时，这些区域的合磁矩定向排列程度会随之增加到某一极限值的现象。

## 1. 自发磁化强度(spontaneous magnetization)

铁磁晶体相邻两个原子之间存在着交换作用，致使它们的磁矩平行排列，在一定温度以下，热运动不足以破坏这种有序性。

交换作用使铁磁质内部一定范围的原子或离子磁矩平行排列，无外磁场作用时，宏观体积内已具有一定的磁化强度，为铁磁质的**自发磁化强度**。

不同的铁磁质具有不同的自发磁化强度。



## 7.4.1 薄膜的磁性

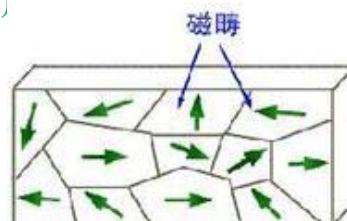
## 2. 居里温度 (Curie temperature)

温度超过某一临界温度时，交换作用不足以克服热运动作用，铁磁质自发磁化强度将消失。这个临界温度称为铁磁质的**居里温度或居里点**。

铁的居里温度是 $770^{\circ}\text{C}$ ，铁硅合金的 $690^{\circ}\text{C}$ 等。铁磁质处于居里温度以上铁磁性转变为顺磁性。

## 3. 铁磁体内的磁畴(magnetic domain)

在无外磁场作用时自发分裂为很多小区域称为**磁畴**。每个小区域内原子或离子磁矩平行排列，而各磁畴取向平均抵消，能量最低，因而整个铁磁体对外不显示磁性。





## 7.4.1 薄膜的磁性

铁磁体通过两种途径实现磁化

➤ 磁场较低时，与外磁场方向相同或相近的磁畴体积将增大，与外磁场方向相反或夹角接近180的磁畴体积将缩小；

➤ 磁场较高时，每个磁畴将作为一个整体转到外磁场方向。

如果磁化达到饱和后再撤除外磁场，铁磁体将重新分裂为很多磁畴，但每个磁畴状况和磁化强度取向，并不恢复到原先没加外磁场的情形。

铁磁质的磁化过程表现出不可逆性。



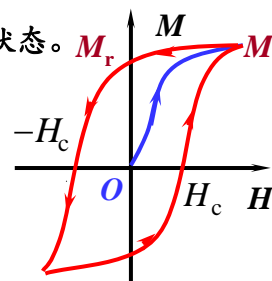
## 7.4.1 薄膜的磁性

## 4. 磁滞现象 (magnetic hysteresis)

无外磁场作用时，如果铁磁体对外不显示磁性，即 $M=0$ ，这时铁磁体所处的状态称为退磁状态。

$M$ 纵坐标 $H$ 横坐标坐标系中原点 $O$ 表示退磁状态。

饱和磁化强度用 $M_s$ 表示。基本磁化曲线，通常不是直线，铁磁体的磁化率 $\chi_m$ 不是常量，是磁场强度 $H$ 的函数。



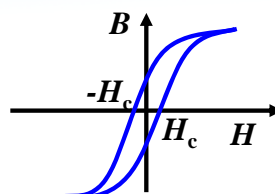
用 $M_r$ 表示剩余磁化强度；使铁磁体剩余磁化强度全部消失时所必须施加的反向磁场称为矫顽力，常用 $H_c$ 表示。



## 7.4.1 薄膜的磁性

铁磁材料具有不同形状的磁滞回线，具有不同的应用。

1. **软磁**材料：如硅钢、坡莫合金(一种铁镍合金)、锰锌铁氧体和镍锌铁氧体等。



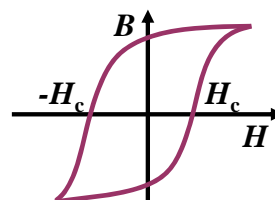
**特点：**磁导率 $\mu_r$ 大，易磁化、饱和磁感应强度大，易退磁，矫顽力( $H_c$ )小，磁滞回线的面积窄而长，损耗小( $HdB$ 面积小)。

**应用：**作变压器，还用于继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。



## 7.4.1 薄膜的磁性

2. 作永久磁铁的**硬磁**材料：碳钢、铝镍钴、稀土钴、钕铁硼和钕铁氧体等。



**特点：**矫顽力大( $>10^2 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ )、剩磁大，磁滞回线的面积大，损耗大

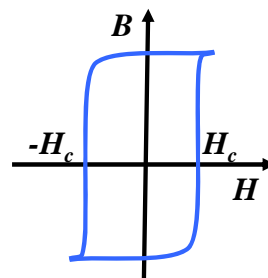
**应用：**用于磁电式电表中的永磁铁，耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。



## 7.4.1 薄膜的磁性

3. 作存储记忆元件的**矩磁**材料:  $\gamma$ -三氧化二铁或二氧化铬粉层、坡莫合金薄膜和锂锰铁氧体等。

**特点:**  $B_r=B_s$ ,  $H_c$ 不大, 磁滞回线是矩形。当正脉冲产生,  $H > H_c$ 使磁芯呈+B态, 负脉冲产生,  $H < -H_c$ 使磁芯呈-B态, 可作为二进制的两个态。



**应用:** 计算机硬盘和软盘, 录音、录像磁带等。



## 7.4.2 磁各向异性

**磁各向异性:** 磁体内的静磁能随内部的磁化方向而改变。

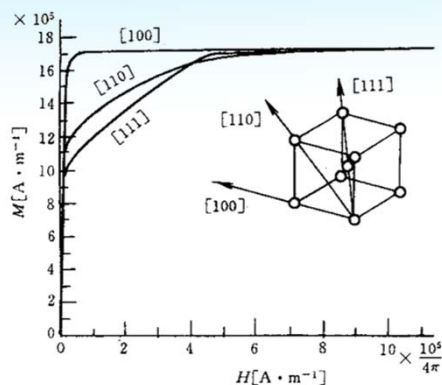
**成因:** 晶体结构或磁性本身的形状效应。

**薄膜的磁各向异性:** 薄膜在厚度方向上尺寸特别小, 这一形状效应使薄膜中存在单轴磁各向异性, 既只在薄膜内的某个方向上成为易磁化方向。

**在磁场中沉积磁性薄膜:** 薄膜表现出明显的单轴磁各向异性, 其易磁化轴与磁场平行。

## 例

- 在测量单晶铁磁性样品时发现沿不同晶向的磁化曲线不同。
- 其中有一个方向的磁化曲线最高，即最容易磁化。



铁单晶磁化曲线

在单晶体的不同晶向上，磁性能不同的性质，称为磁性的各向异性。

**磁畴：**指在未加磁场时铁磁体内部已经磁化到饱和状态的小区域。

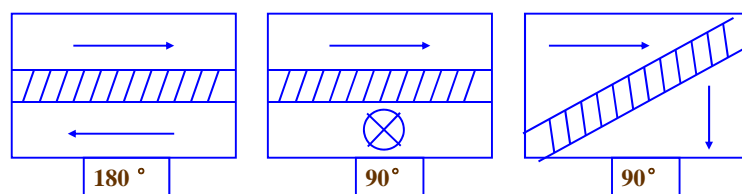
- 主畴：大而长，自发磁化方向沿晶体的易磁化方向。
- 副畴：小而短，磁化方向不定。

**磁畴壁：**相邻磁畴的界限。

畴壁是相邻两磁畴之间磁矩按一定规律逐渐改变方向的过渡层。

### 畴壁类型

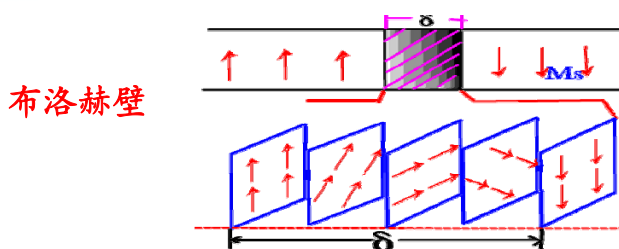
按畴壁两侧磁矩方向的差别分：90度畴壁、180度畴壁



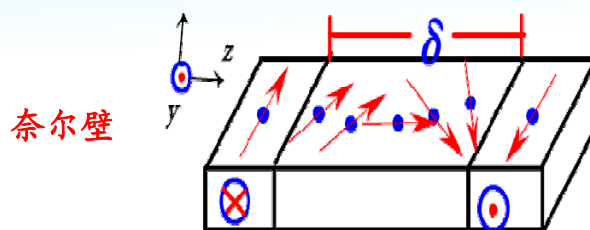
两相邻畴的磁化方向相反

两相邻畴的磁化方向垂直

按畴壁中磁矩转向的方式：布洛赫壁，奈尔壁



大块晶体材料或非常厚薄膜内的畴壁属于布洛赫壁。在布洛赫壁中，磁矩的过渡方式是始终平行于畴壁平面，180°畴壁即为布洛赫壁。



极薄的磁性薄膜中存在奈尔壁。在奈尔壁中，磁矩围绕薄膜平面的法线改变方向，并且是平行于薄膜表面而逐步过渡的。

磁阻效应：磁场引起的金属电阻变化的现象。

磁阻效应是一种量子力学效应，它产生于层状的磁性薄膜结构。这种结构是由铁磁材料和非铁磁材料薄层交替叠合而成。

表征磁阻效应大小公式：

$$\eta = \frac{R_H - R_0}{R_0} = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\rho_H - \rho_0}{\rho_0}$$

$\eta$  为磁阻系数， $R_H(\rho_H)$  为磁场为  $H$  时的电阻（电阻率）。

$R_0(\rho_0)$  为磁场为 0 时的电阻（电阻率）。多数金属材料的  $\eta$  都很小，一般不超过 3%。





#### 7.4.5 薄膜制备条件对磁性能的影响

薄膜的制备条件对薄膜的磁性能，尤其是对各向异性的影响很明显。

##### 1) 磁场控制

如在薄膜的蒸镀过程中沿相互垂直的两个方向交替地施加磁场，则沉积的薄膜的易磁化轴就轮流地取这两个方向。

##### 2) 磁场退火

已制备的磁膜的单轴各向异性可以用磁场退火改变。



#### 7.4.5 薄膜制备条件对磁性能的影响

##### 3) 基片温度

如对于基片温度高于330°C时蒸镀的坡莫合金薄膜，明显地看出用控制基片温度的方法比控制退火温度的方法更能有效地控制 $H_k$ 值。

##### 4) 斜入射各向异性

当基片与入射粒子束成一定角度时，即使没有磁场也会出现单轴磁各向异性。