

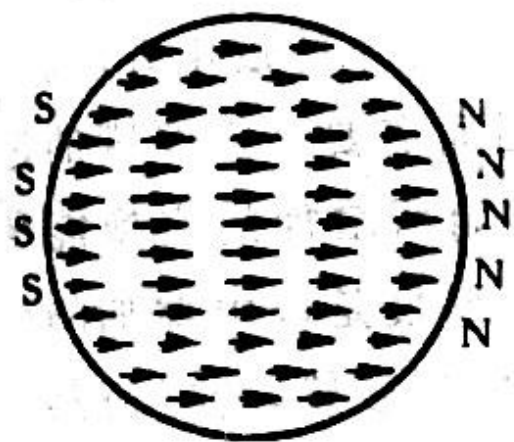
4.3 磁畴结构

- 一. 影响磁畴结构主要因素的定性考虑
- 二. 具有单轴各向异性晶体的磁畴
- 三. 立方晶系材料的磁畴
- 四. 表面磁畴
- 五. 不均匀物质中的磁畴
- 六. 单畴颗粒
- 七. 磁泡
- 八. 反铁磁畴

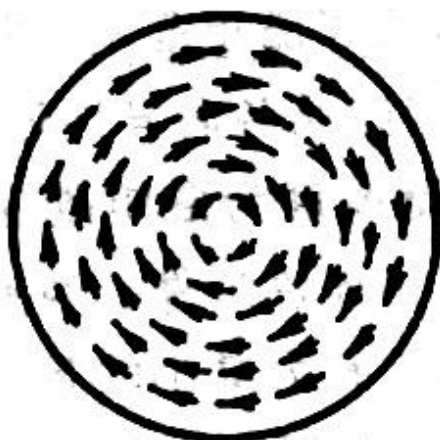
一. 影响磁畴结构主要因素的定性考虑

在铁磁体中，如果交换作用使整个晶体自发磁化到饱和，磁化强度的方向沿着晶体内的易磁化轴，这样虽能使铁磁晶体内交换能和磁晶各向异性都达到极小值。但晶体有一定的大小与形状，整个晶体均匀磁化的结果，必然在晶体表面产生磁荷，磁荷产生的退磁场会形成很大的退磁场能 F_d ，分成磁畴就会减小退磁能，但又增加了畴壁能，综合考虑成为决定磁畴结构的主要因素。总之：大块材料产生磁畴的首要原因是多畴有利于降低退磁能，但多畴又带来了畴壁能，所以稳定的多畴结构决定于体内畴壁能与表面退磁场能的平衡，相应的自由能极小。

以一个圆片样品为例来定性分析一下影响磁畴结构的主要因素。



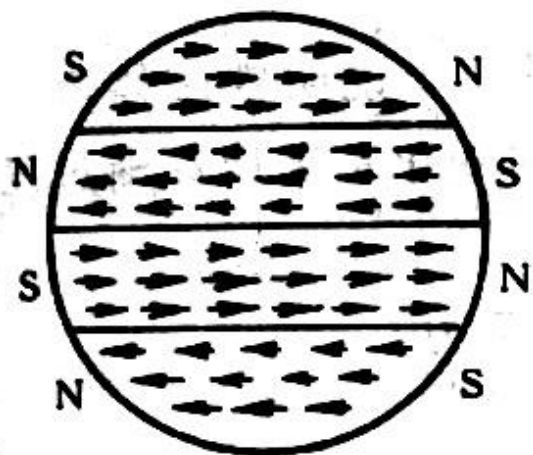
(a) 单畴结构



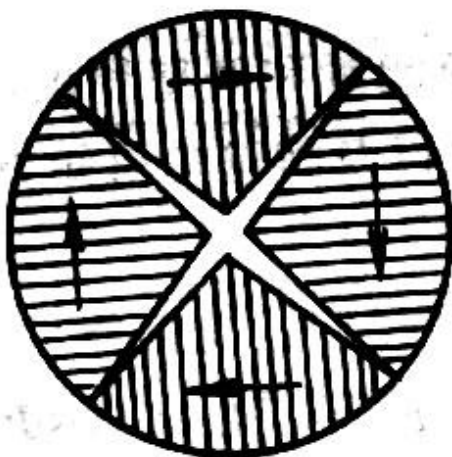
(b) 各向异性小无磁极的磁畴结构



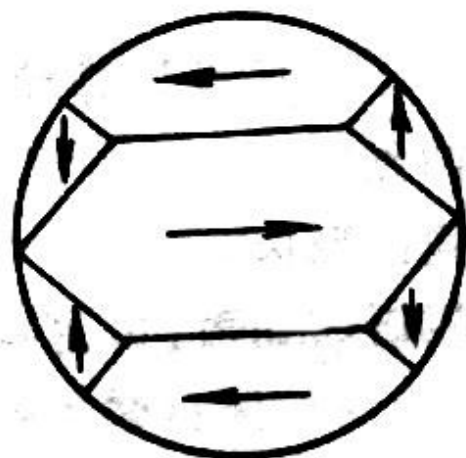
(c) 有立方各向异性的磁畴结构



(d) 单轴状态下的磁畴结构



(e) 有磁致伸缩情况时的磁畴结构



(f) 实际立方单晶体的磁畴结构

图 5-3 圆片铁磁体中的各种磁畴结构

二. 单轴各向异性晶体的磁畴结构

一个单轴各向异性晶体自发磁化后可能的磁畴结构如右图所示。晶体沿易磁化方向均匀磁化后退磁能很大，从能量的观点出发，分为两个或四个平行反向的自发磁化的区域可以大大减少退磁能，但是两个相邻的磁畴间畴壁的存在又增加了一部分畴壁能。因此自发磁化区域(磁畴)的形成不可能是无限多的，而是**以畴壁能与退磁场能之和的极小值为平衡条件**。

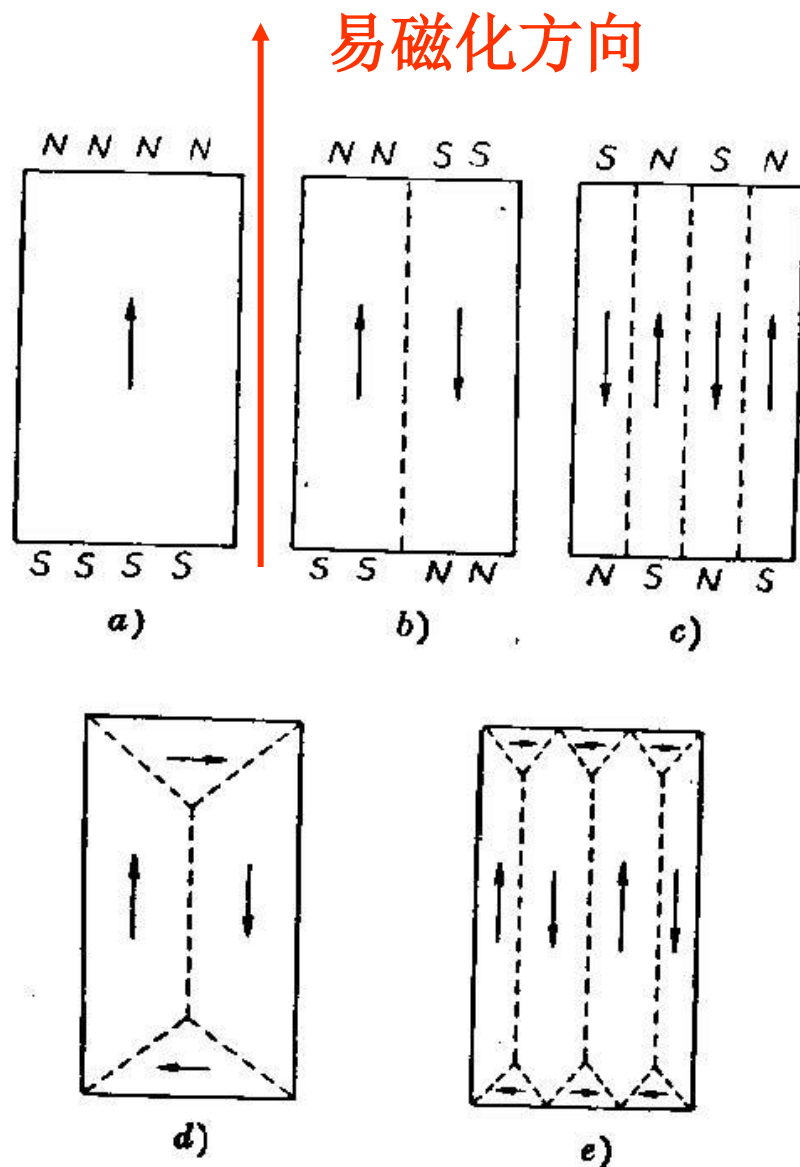


图 4-18 单轴晶体内磁畴的形成

形成**封闭畴**将进一步降低退磁能，但是封闭畴中的磁化强度方向垂直于易磁化方向，因此又会增加各向异性能。如何取舍？

片状磁畴能量的计算：考虑一个厚度为 L 、易磁化方向垂直于表面的片状材料，求解形成片状磁畴后的能量。

设片状畴的宽度为 d ，则该晶体样品表面单位面积下方柱体的总能量为：

$$E \approx 2 \times 0.85 \times 10^{-7} M_s^2 d + \gamma \frac{L}{d} \quad (\gamma \text{是畴壁单位面积能量})$$

半无限大样品片状磁畴的退磁能密度上节已知，现在要考虑上下表面，约乘以 2。后一项是畴壁的能量，磁畴的宽度是 d ，单位长度分为 $1/d$ 个畴，所以单位表面积下的畴壁总面积是 L/d ，

$$\frac{\partial E}{\partial d} = 0 \quad \text{给出平衡数值} \quad d = \frac{10^4}{M_s} \sqrt{\frac{\gamma L}{17}}$$

所以**片状畴单位体积的总能量**为：

$$F = \frac{E}{L} = 2M_s \times 10^{-4} \sqrt{\frac{17\gamma}{L}}$$

封闭畴形式能量的计算

考虑到 $L \gg d$ ，采用封闭畴形式样品表面单位面积内的畴壁面积：

$$S = \frac{1}{d} \left[(L-d) \times 1 + 4 \frac{d}{\sqrt{2}} \times 1 \right] \approx \frac{L}{d} \quad \text{闭流畴的体积: } v = \frac{2}{d} \left[\frac{1}{2} \times d \times \frac{d}{2} \right] = \frac{d}{2}$$

因而样品表面单位面积下方柱体的总能量为：

$$E = E_\gamma + E_k = \gamma \frac{L}{d} + \frac{K_1 d}{2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial d} = 0 \quad \text{给出平衡值:}$$

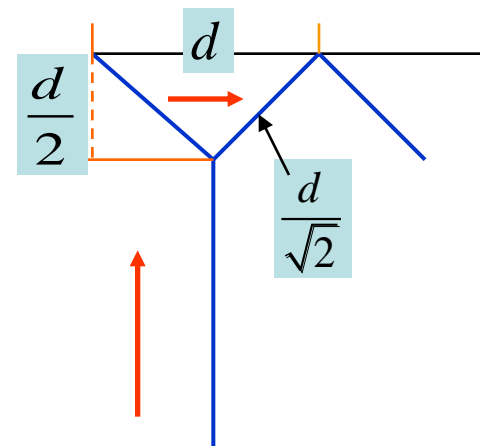
$$d = \sqrt{\frac{2\gamma L}{K_1}}$$

样品表面单位面积下的总能量

$$E = \sqrt{2\gamma L K_1}$$

单位体积能量

$$F = \frac{E}{L} = \sqrt{\frac{2\gamma K_1}{L}}$$



代入单轴各向异性材料的数值可以发现，采取片状磁畴结构能量要有利得多，这里还没有计入因闭流畴的磁致伸缩所产生应力能，否则单轴各向异性材料采用封闭磁畴结构能量会更大。总之：

相比封闭磁畴结构而言片状磁畴是单轴各向异性材料较恰当的选择。

以BaFe₁₂O₁₉为例说明:

$$K_1 = 3.3 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}, \quad M_s = 3.8 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\text{片状畴结构} \quad E \doteq 3 \times 10^2 \sqrt{\gamma L}$$

$$\text{封闭畴结构} \quad E \doteq 8 \times 10^2 \sqrt{\gamma L}$$

$$\text{取: } \gamma = 1.7 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}, L = 10^{-2} \text{ m}$$

$$\text{得: } d = 2.6 \times 10^{-5} \text{ m} = 26 \mu\text{m}$$

结论: 一般, 单轴晶体形成片状畴。片形畴宽度在几十微米量级

以 Co 为例说明: $M_s = 1.43 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}, K_1 = 5 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3},$

$$\gamma = 18 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}, L = 10^{-2} \text{ m}$$

$$\text{片状畴结构} \quad d \approx 2.3 \times 10^{-5} \text{ m} = 23 \mu\text{m},$$

$$E \approx 15.8 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

封闭畴可能

而不分畴时的退磁能: 比上面大近10倍。

$$E_d = \frac{\mu_0}{2} N M_s^2 \cdot L \approx \frac{\mu_0}{2} M_s^2 \cdot L = 12.8 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

片状畴的变异

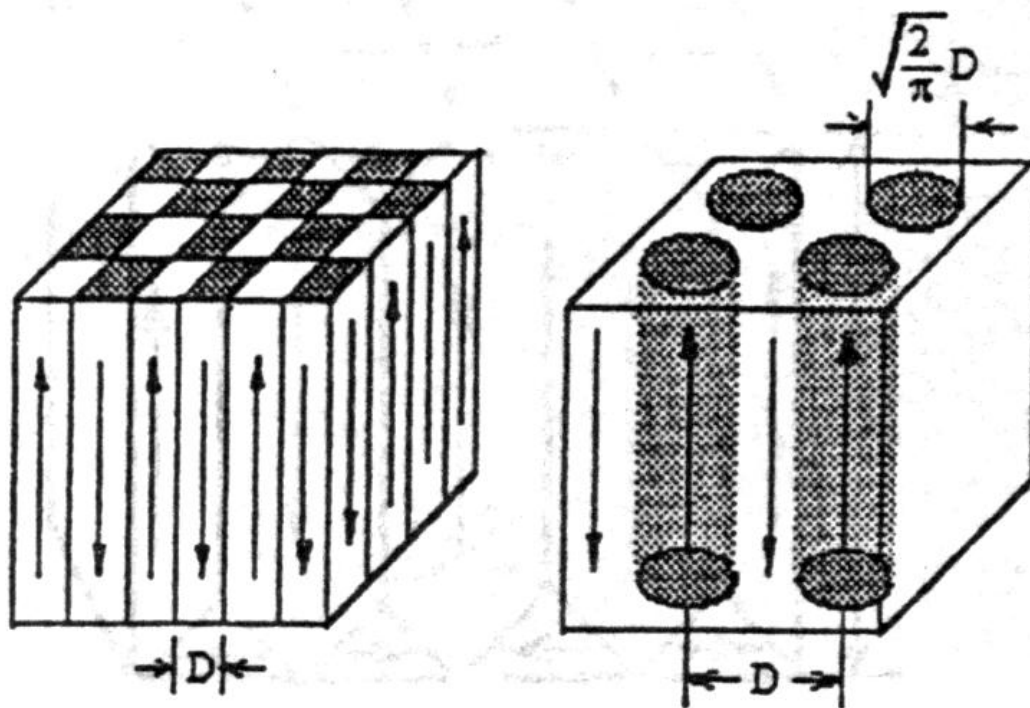
片状磁畴有相当大的退磁能，特别在材料厚度大于 $10\ \mu\text{m}$ 时。一些变形结构的能量比片状磁畴的更低。

棋盘结构：

圆柱形结构：

蜂窝结构：

它们的退磁能都比片状畴低。蜂窝状是内外磁化强度反向。实际材料中观察到这种情况。



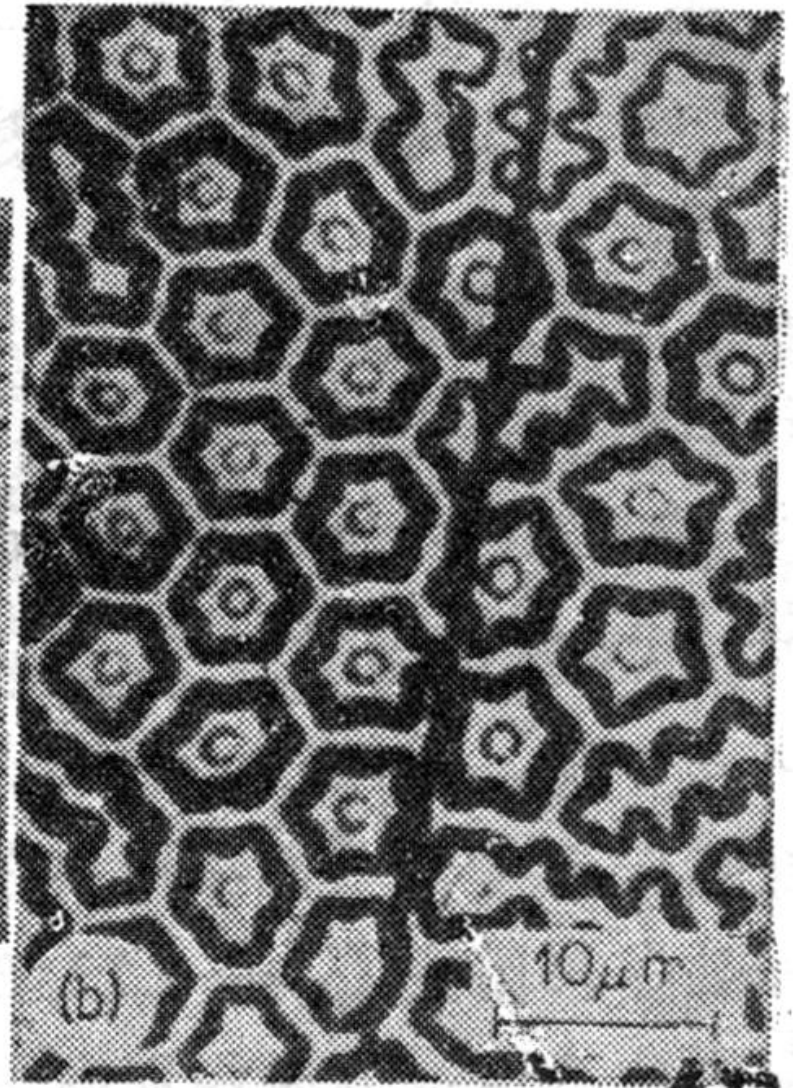
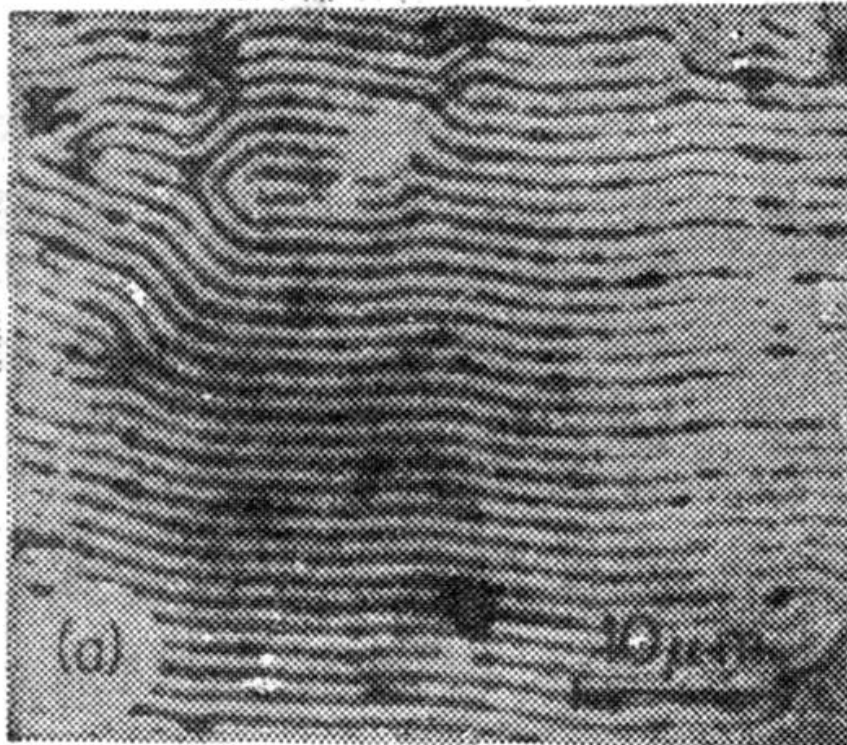
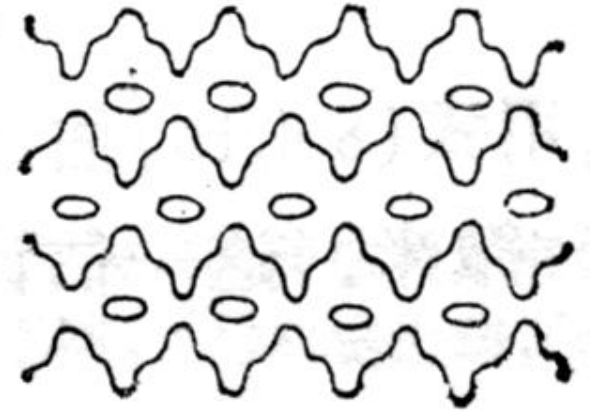
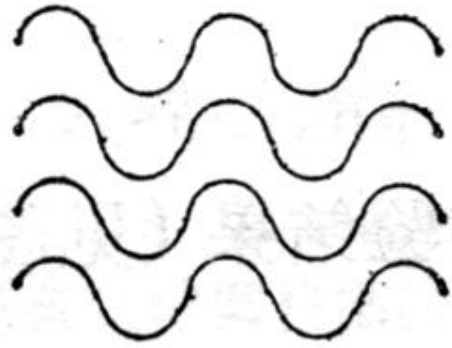


图 8.20 Ba 铁氧体单晶基面上的磁畴图形。

(a) 片形畴(晶体厚度 $L = 8$ 微米);

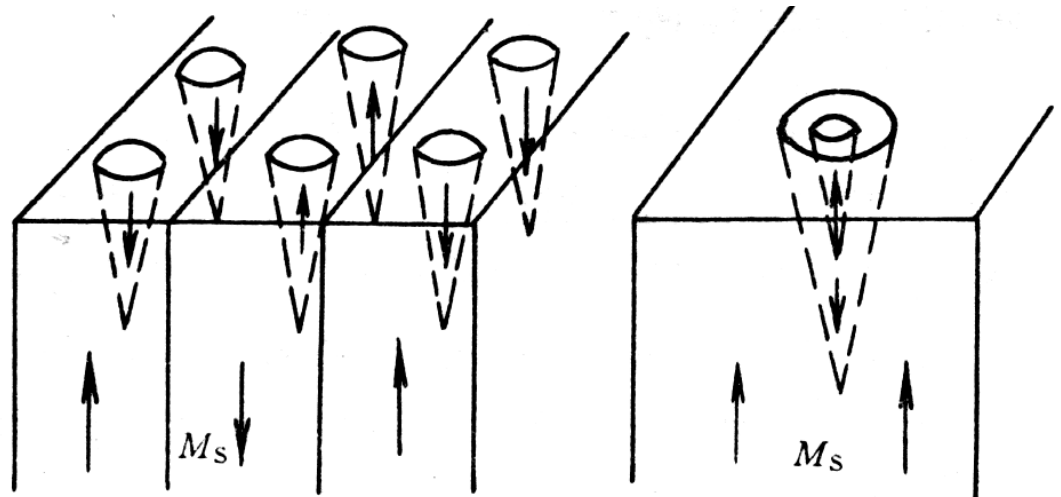
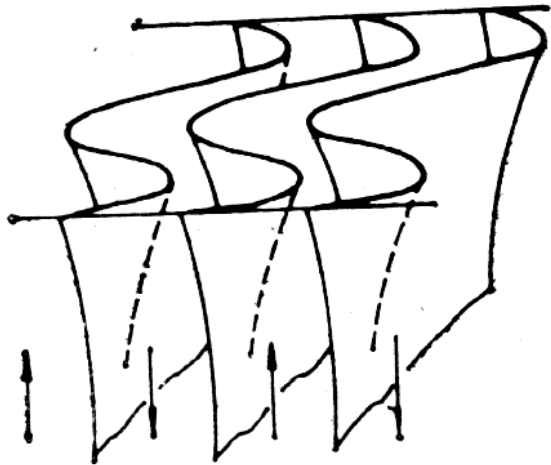
(b) 蜂窝畴(晶体厚度 $L = 75$ 微米)。

以及两种有利于降低退磁场能的**表面**磁畴结构： 波纹结构和片形—楔形畴都出现在片形主畴的端面上。



具有波纹畴壁的示意图

花纹加圆形的楔形畴



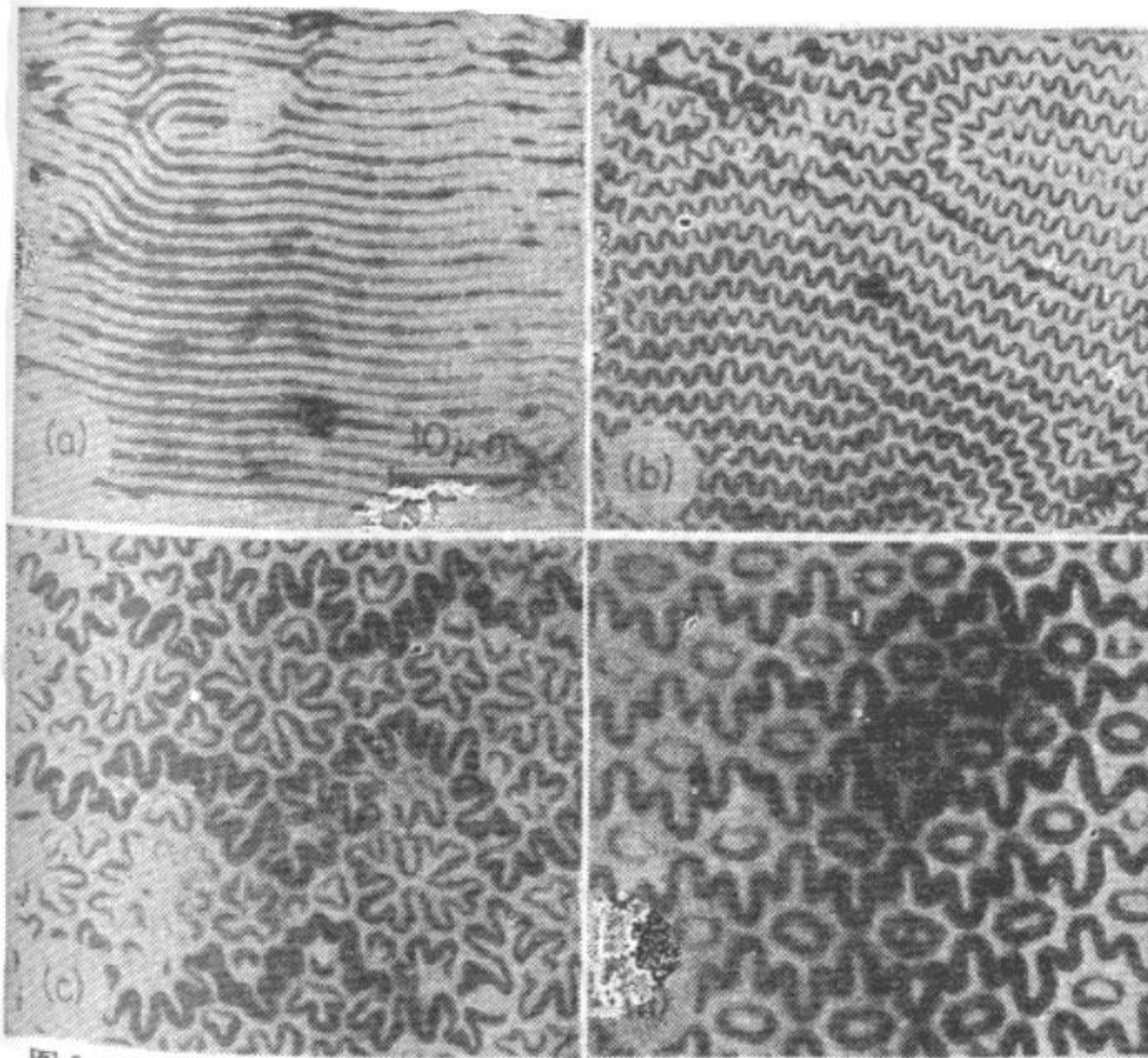


图 8.24 厚度不同的 Ba 铁氧体单晶基面上的磁畴图形。(a)厚度为 8 微米;(b)厚度为 25 微米;(c)厚度为 80 微米;(d)厚度为 750 微米。

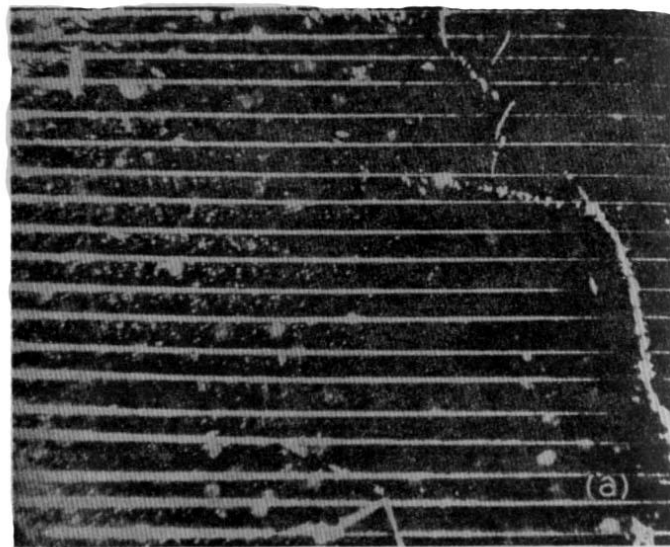
钡铁氧体上观察到的磁畴:

a:片形畴

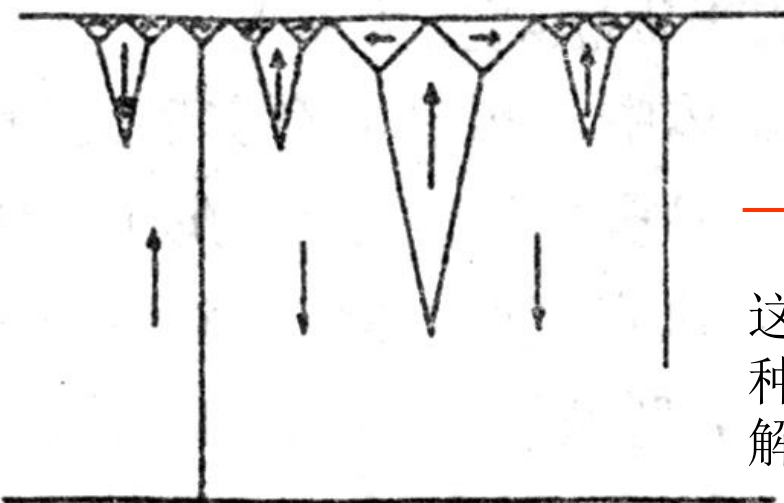
b c 波纹畴

d 波纹+楔形

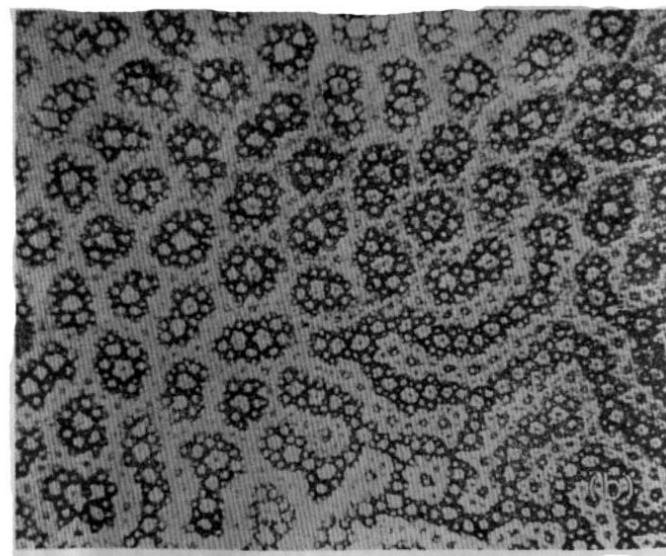
Co晶体平行于六角轴的片形畴（上图）



下右图为垂直于六角轴的雪花形表面畴：也称片形一楔形畴，其结构见下图



这只是一
种可能的
解释。



得自钴,晶体的图型(a)平行于(b)垂直于,六角轴

取自《铁磁畴》插图

三. 立方晶体材料中的磁畴结构

立方晶系 45° 封闭畴内磁化强度也与易磁轴平行，**磁晶各向异性能和退磁能都为零**，形成封闭磁畴结构的能量似乎应该比形成片形磁畴能量更低，但此时必须考虑自发磁化引起的形变产生的**磁弹性能的影响**。

立方晶系封闭畴形式能量的计算： 在立方晶系 $K>0$ 的情况下，应力方向单位体积的磁弹性能是：

$$F_\sigma = \frac{1}{2} \lambda_{100} \sigma = \frac{1}{2} \lambda_{100}^2 C_{11}$$

样品表面单位面积下方柱体的总能量为：

$$E = E_\gamma + E_{ml} = \gamma \frac{L}{d} + \frac{d}{2} \frac{1}{2} C_{11} \lambda_{100}^2$$

$$\frac{\partial E}{\partial d} = 0$$

给出平衡值

$$d = \frac{2}{\lambda_{100}} \sqrt{\frac{\gamma L}{C_{11}}}$$

$$E = \lambda_{100} \sqrt{C_{11} \gamma L}$$

$$F = \frac{E}{L} = \lambda_{100} \sqrt{\frac{C_{11} \gamma}{L}}$$

代入立方晶体的数据表明，**封闭磁畴结构的能量较低**，实验上已经观察到这种磁畴结构的存在。

[110]

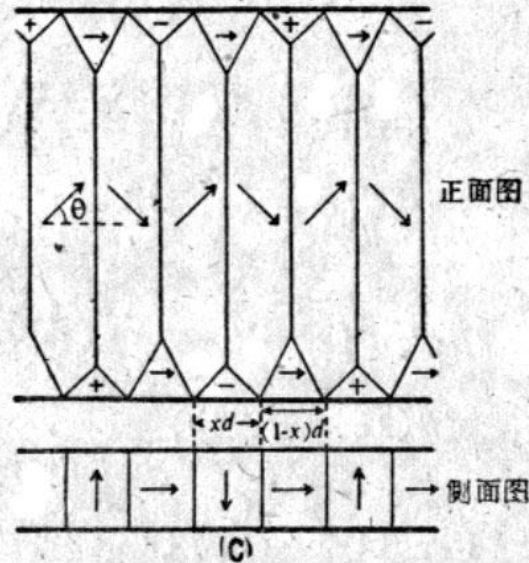
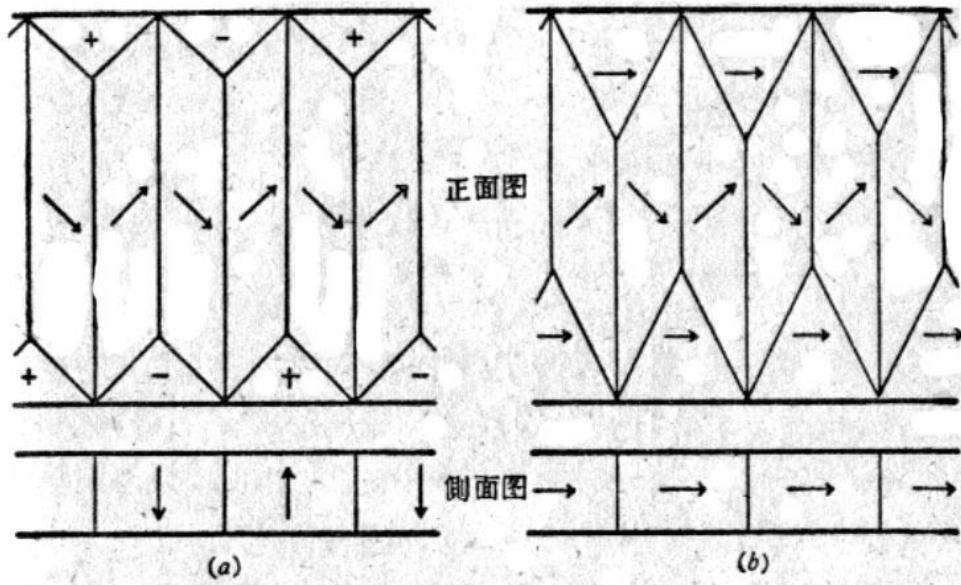


图 34 具有封闭磁畴的 [110] 试样中的磁畴排列。(a), (b) 是封闭磁畴的两个稳定排列; (c) 是 (a), (b) 两种排列的组合, 所给出的能比二者中任何一个都小些。

Fe 之数据:

$$K_1 > 0, \gamma_w = 1.7 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\lambda_{100} = 2.7 \times 10^{-5}, L = 10^{-2} \text{ m}$$

$$C_{11} = 2.36 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$M_s = 1.7 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

封闭磁畴:

$$d = 2.59 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$E = 0.13 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

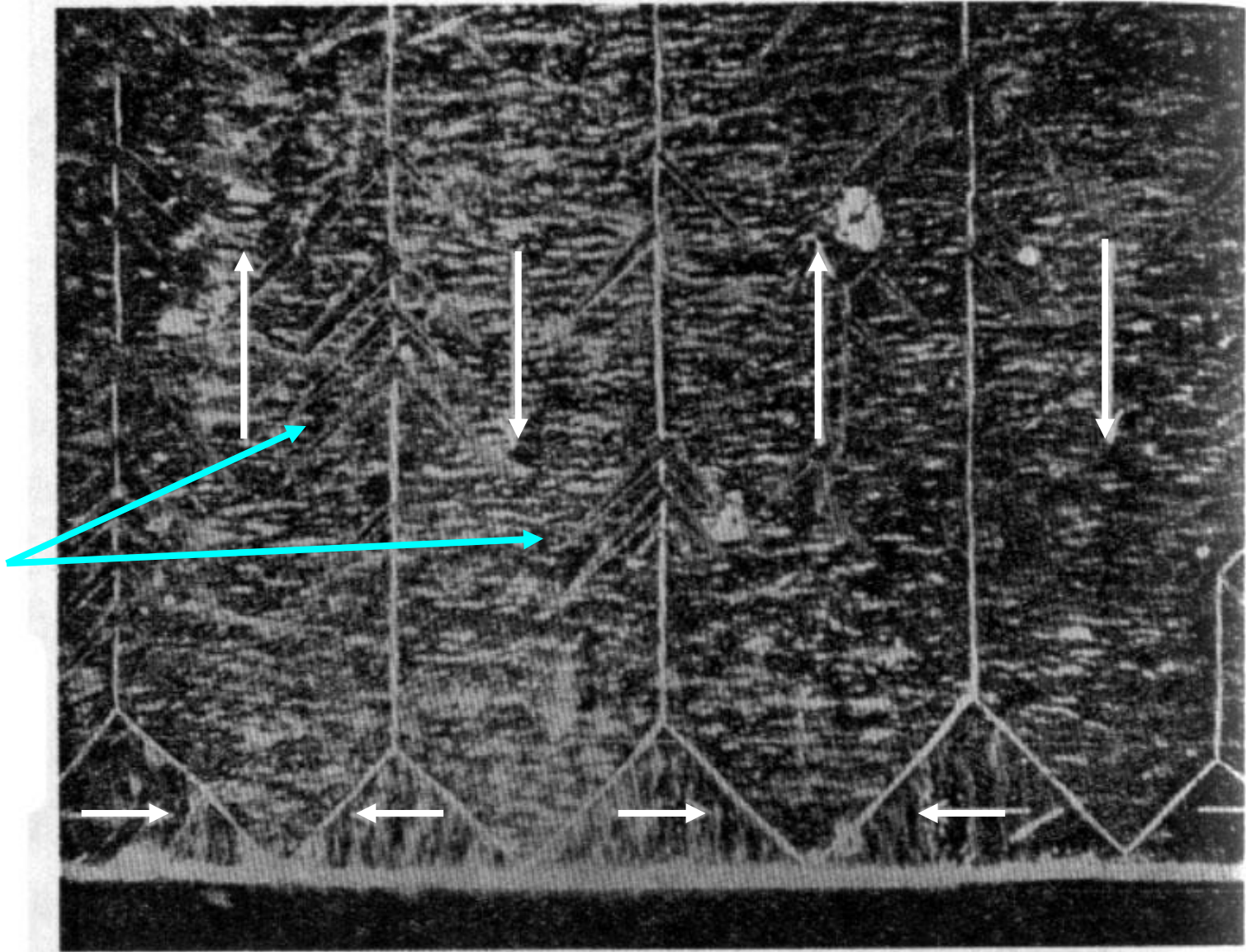
片形畴:

$$E = 5.78 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

结论: $K_1 > 0$ 的立方晶系晶体形成封闭畴。

照 片 Ⅱ

树枝状磁畴



硅鉄晶体 (100) 表面的粉紋图型。
晶軸 +

取自《铁磁畴》插图

四. 树枝状磁畴

当主畴的自发磁化强度与样品表面不平行，有一个微小的倾角时，会在表面出现磁荷，产生退磁场，为了减小这种影响，将会在表面出现一些附加的次级磁畴。形状比较复杂。例如：

树枝状磁畴。

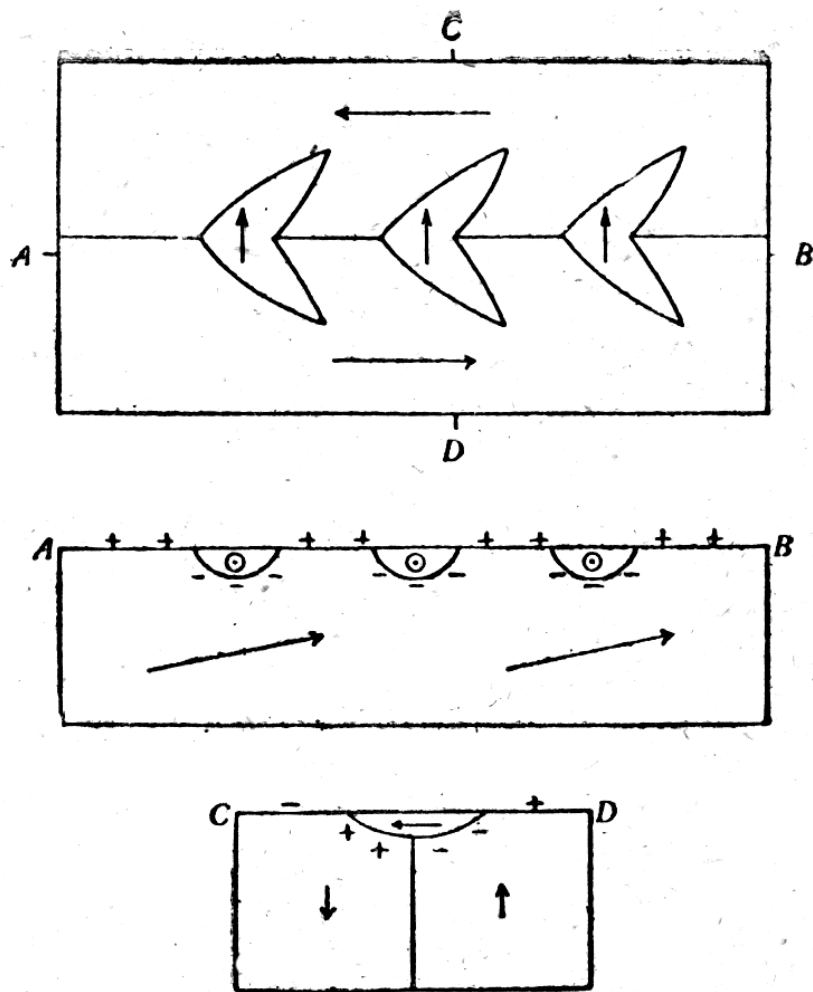
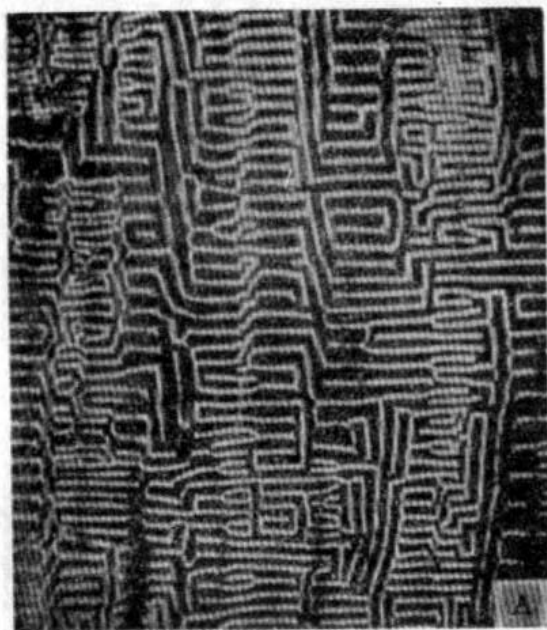


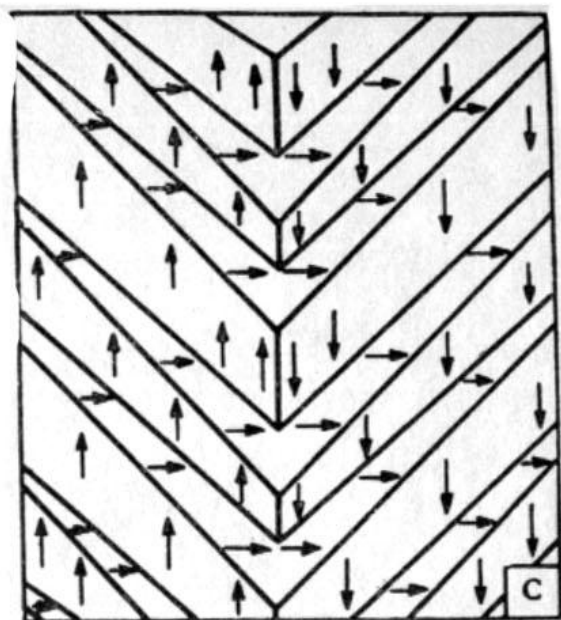
图 38 说明在微微倾斜于(100)的表面上所形成的‘梳树’图型的简图,箭头表示磁化方向,正负符号表示自由磁极(图 b 及 c)。



(a) 机械抛光表面的粉纹图型.



(b) 在同一表面上经过电解抛光后的粉纹图型.



(c) 图型(b)的解释; 箭头表示磁畴磁化方向.

晶轴+ \longleftrightarrow
0.1 毫米

在同一表面上的粉纹图，它反映的不是主畴，而是表面磁畴情况，*a*是机械抛光后的图形，受到各种表面因素的影响，*b*是电解抛光后的图形，反映的是晶面规则的次级畴。

五.不均匀物质中的磁畴

1. 多晶中的磁畴:

前面讨论的都是单晶体中的畴结构类型，实际材料中的多晶体是由取向不同的许多单晶晶粒组成的，每个晶粒形成的磁畴结构与该晶粒的大小和形状有关，同一晶粒内的自发磁化的取向是相互关联的，但不同晶粒之间是无序的，所以就整块材料而言，材料是各向同性的。

下面是一个多晶磁畴结构示意图，这里**每个晶粒都形成了片形畴**，跨过晶粒边界时虽然磁化强度改变了方向，转动了一个角度，但磁力线大多还是连续的，这就减少了边界磁荷的产生，避免了更多退磁场能的产生。

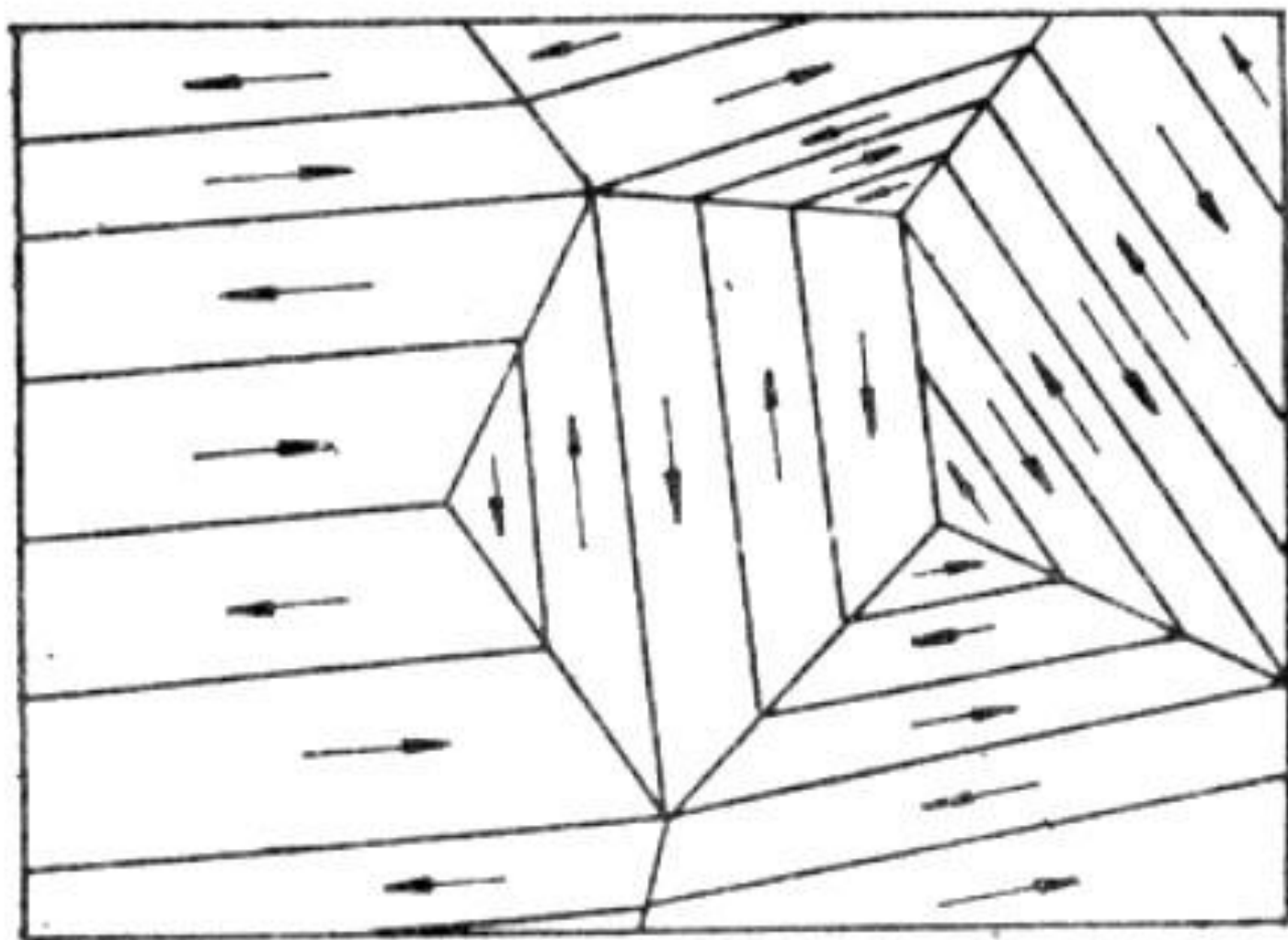


图 8.36 多晶体中的磁畴。

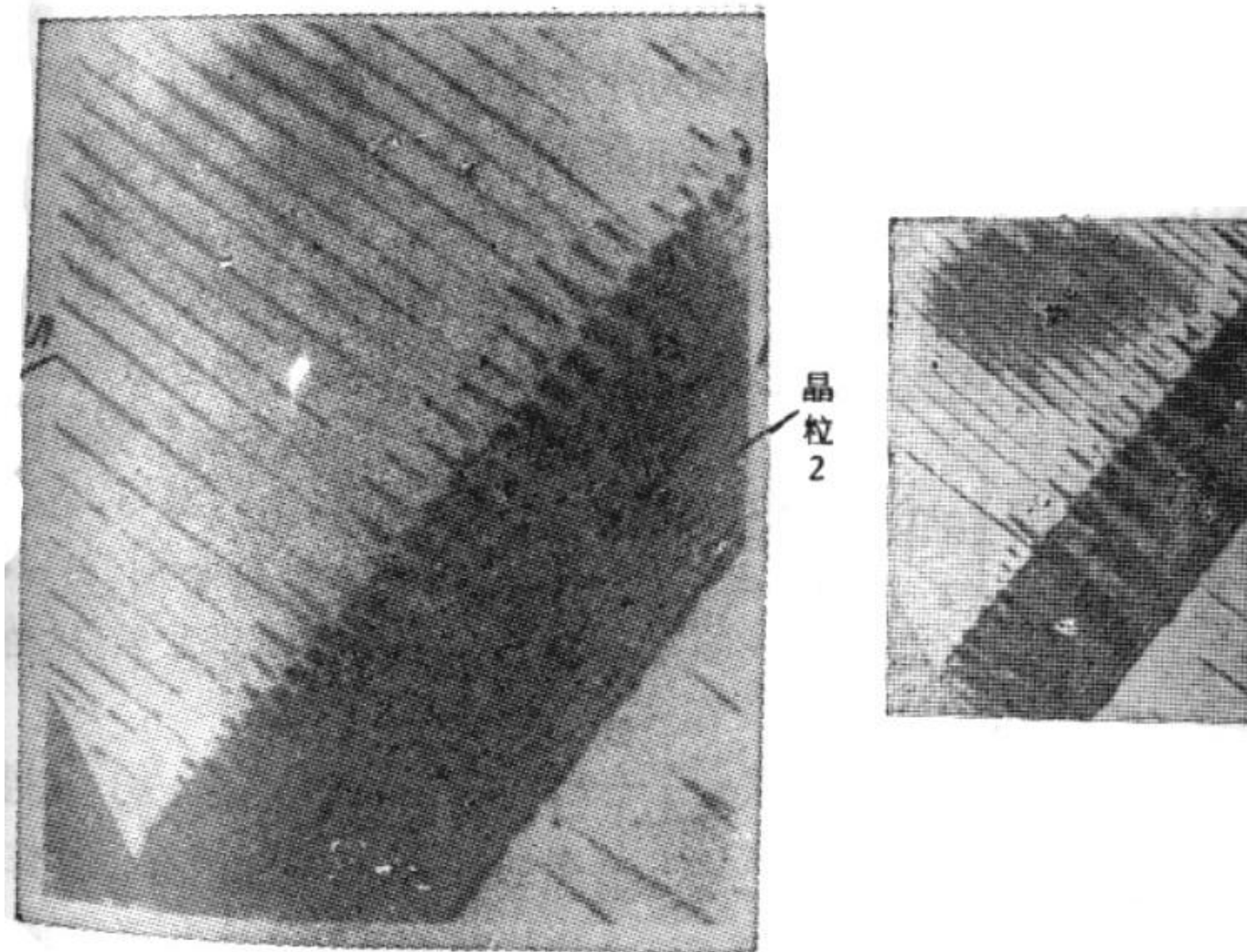


图 8.27 钴晶粒上的磁畴图片 (a) $H = 0$; (b) $H = 200$ (奥)后再去掉. (H 垂直于表面)(放大 150倍)

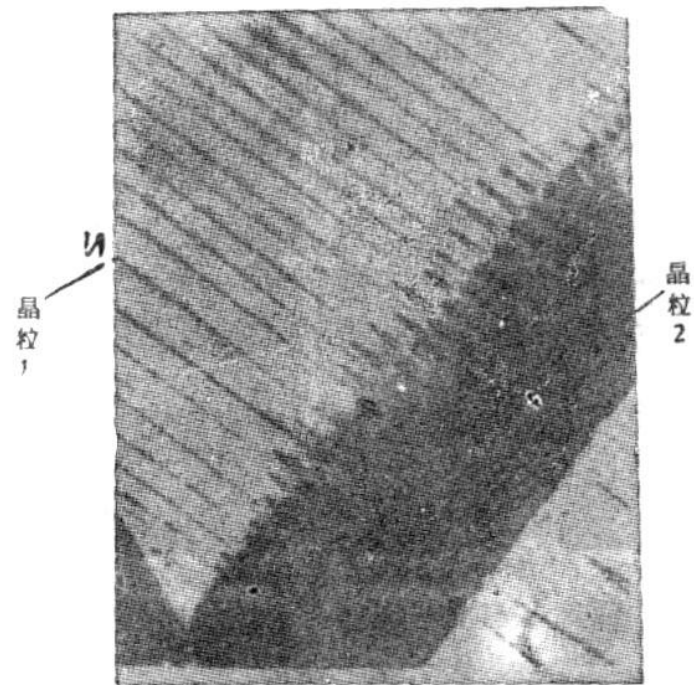


图 8.56 钴的两个晶粒上的磁畴结构,显示波片畴。

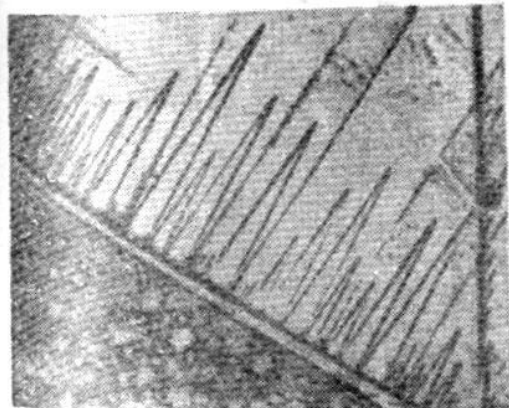


图 8.57 钴的两个晶粒上的磁畴结构,显示楔形畴。

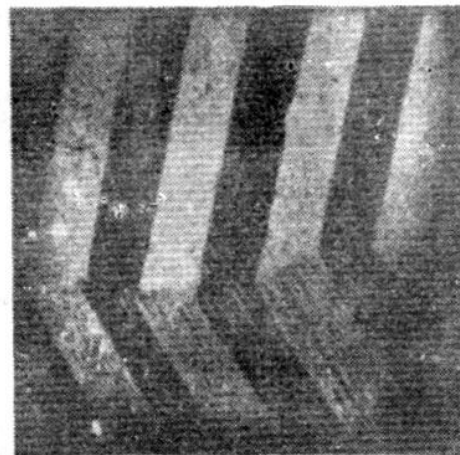
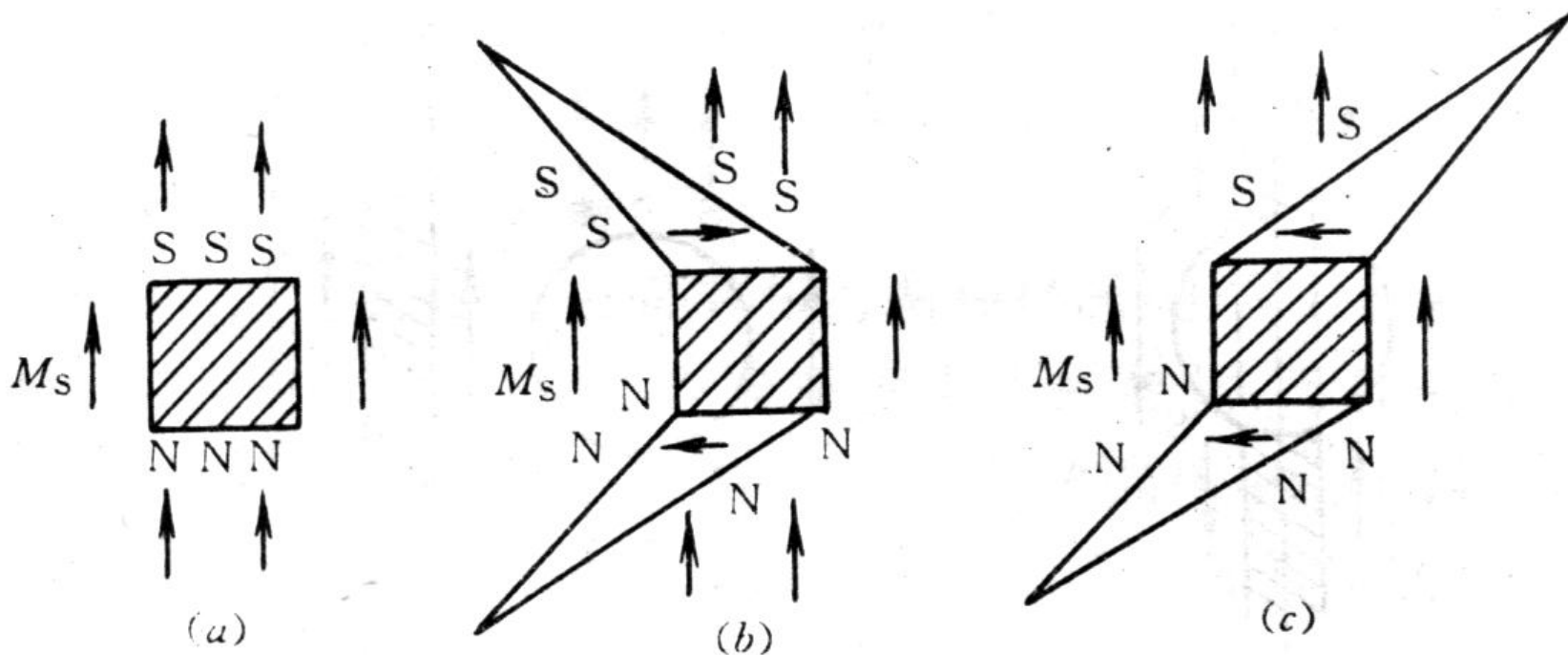


图 8.58 冷轧硅钢片上的主畴跨越两个晶粒。

2. 非磁性的参杂物和空隙对磁畴结构的影响:

Neel 1944年就指出: 晶体中存在的空洞和非磁性杂质会引起很大的退磁场, 为了减小退磁场, 在空洞附近会产生局部的磁畴结构, 称**Neel**次畴。



杂质对畴壁位置的影响：

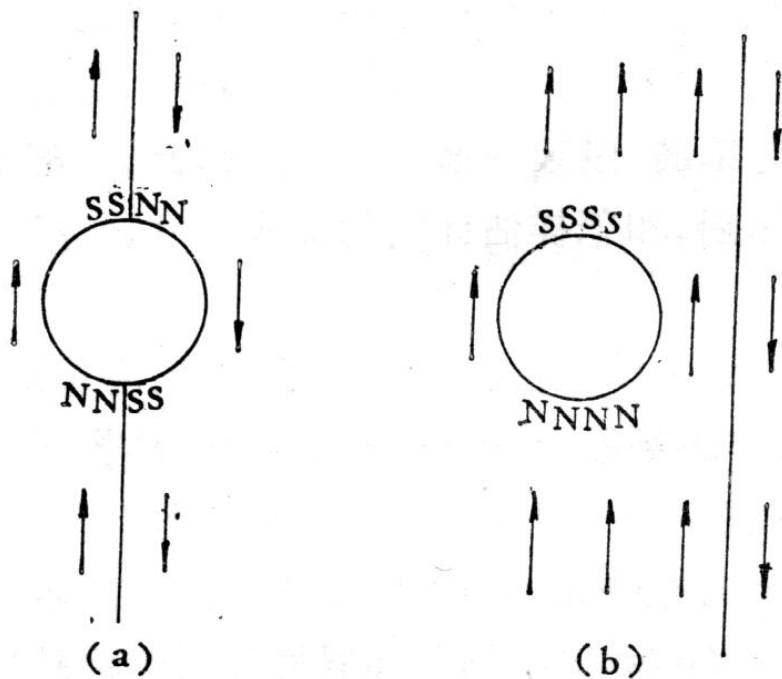


图 8.38 畴壁经过参杂物或经过参杂物附近的情况。

- 1) 降低磁荷分布；
 - 2) 减小畴壁面积
- 移动畴壁需要能量！

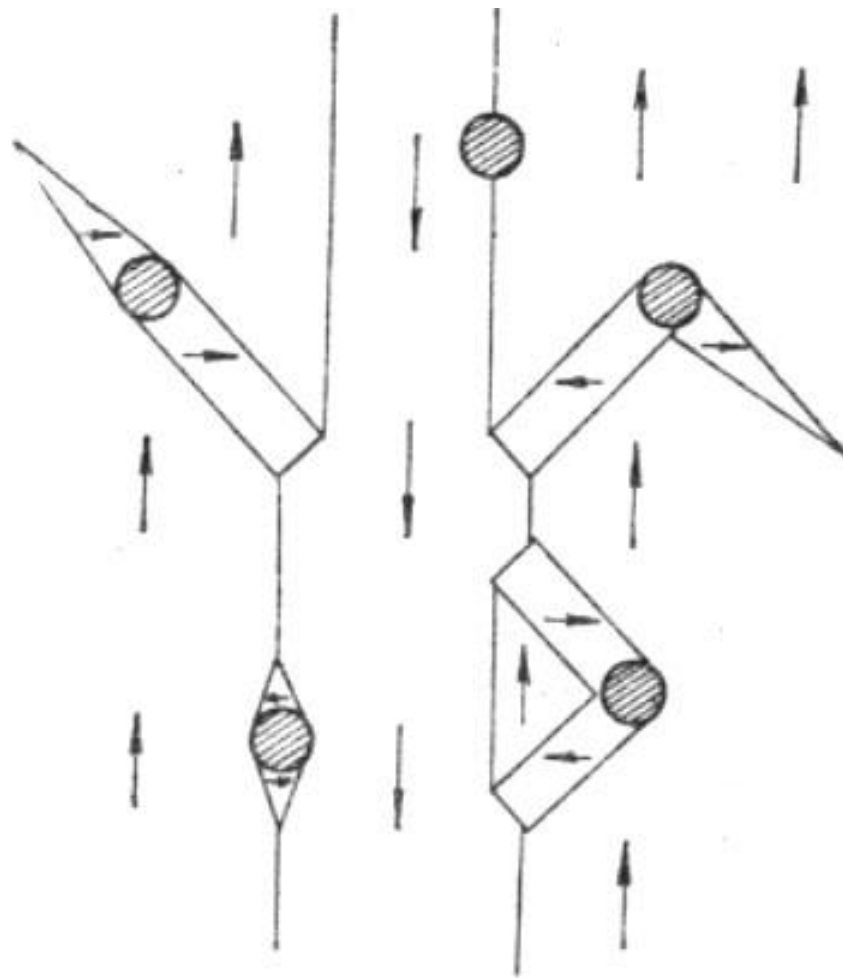


图 8.39 主畴的畴壁经过一群参杂物发生附加畴的情况。

六. 单畴颗粒

铁磁颗粒小到某一尺寸，它形成畴壁后的畴壁能大于颗粒的退磁能时，铁磁颗粒将保持为单畴结构。一个球形的铁磁颗粒的退磁能为

$$E_d = \frac{1}{2} \mu_0 N M_s^2 \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{2}{9} \mu_0 \pi R^3 M_s^2 \quad (N = \frac{1}{3})$$

如果颗粒分为四个畴时，畴壁能(γ 为畴壁能密度)为 $E_\gamma = 2\pi R^2 \gamma$

能量优势条件: $E_d < E_\gamma$ $\frac{2}{9} \mu_0 \pi R_c^3 M_s^2 = 2\pi R_c^2 \gamma$

所以立方晶系材料单畴的临界半径:

$$R_c = \frac{9}{\mu_0} \frac{\gamma_{90}}{M_s^2}$$

单轴各向异性只能分为2个畴时的临界半径

$$\frac{2}{9} \pi \mu_0 M_s^2 R^3 = \pi R^2 \gamma_{180} + \frac{1}{9} \pi \mu_0 M_s^2 R^3$$

$$R_c = \frac{9\gamma_{180}}{\mu_0 M_s^2}$$

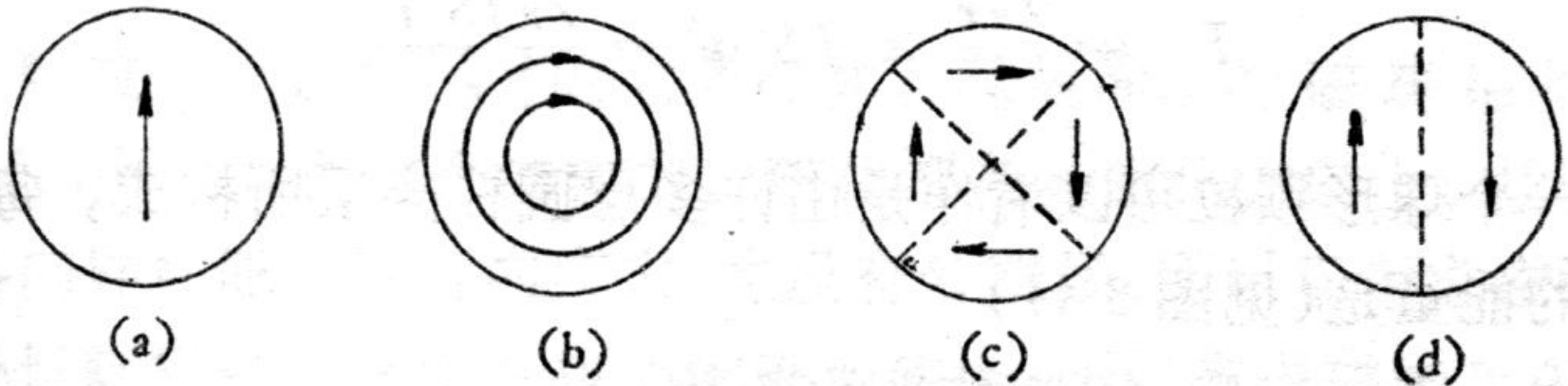


图 8.40 微小球形颗粒的磁畴结构: (a)单畴颗粒;(b),(c),(d) 大于临界尺寸的颗粒的几种最简单的磁畴结构。

对于磁晶各向异性弱的粒子，可以成圆环性磁通，图c Kittel也计算了它的临界尺寸。见姜书p274

综合以上讨论，**各种不同材料的颗粒，都有它们自己的临界尺寸，凡是颗粒小于临界尺寸的，就形成单畴，单畴颗粒的特殊性质将在以后讨论，是目前纳米磁性研究和利用的主要对象。**各种模型的计算结果如下：

表 一些铁磁晶体球形颗粒的临界尺寸

计算者	Fe(m)	Ni(m)	Co(m)	MnBi(m)
Kittel	10^{-8}	—	—	4×10^{-7}
N'eel	160×10^{-10}	—	—	—
Stoner	240×10^{-10}	520×10^{-10}	320×10^{-10}	—
КОНДОРСКИЙ	180×10^{-10}	410×10^{-10}	—	—

表 球形颗粒出现单畴的临界半径

微磁学计算结果

材料	A (10^{-11} 焦耳/米)	M_s (10^3 安/米)	γ_{180} (10^{-3} 焦耳/米 ²)	R_{c1} (10^{-10} 米)	R_c (10^{-10} 米)
Co	2.6	1431	14.4	114	500
SmCo ₅	2.0	855	69.3	168	6800
MnBi	1.0	600	12	170	2500

以上简单计算了球形粒子的单畴临界半径，但对磁畴和畴壁都使用了大块材料的计算结果，显然这种推广并不完全合理，比如，计算出的临界尺寸竟超过了大块材料中估算出来的畴壁厚度！后来发展了**微磁学理论初步解决了临界尺寸的计算问题：**

表 微磁学理论计算颗粒临界尺寸

材料类别	颗粒形状		
	球形	椭球形	圆柱形
Fe	$180 \times 10^{-10} \text{m}$	$146 \times 10^{-10} \text{m}$	$114 \times 10^{-10} \text{m}$
Ni	$410 \times 10^{-10} \text{m}$	$335 \times 10^{-10} \text{m}$	$260 \times 10^{-10} \text{m}$

在几十纳米量级！

七. 磁泡 (magnetic bubble)

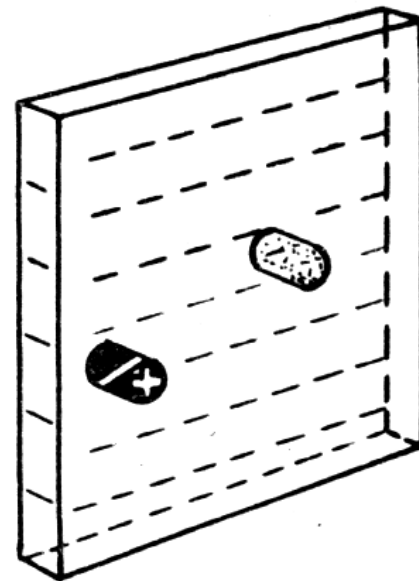
磁泡是在一些薄膜磁性材料中发现的一种圆柱形磁畴，无外磁场时看到的是蜿蜒曲折的条状磁畴，当在垂直与膜面方向施加一磁场时，条状磁畴会收缩，以致在磁场达到一定数值时，收缩为一个圆柱形磁畴，但材料表面上看是一个圆形，犹如表面上浮着的水泡，所以称磁泡。



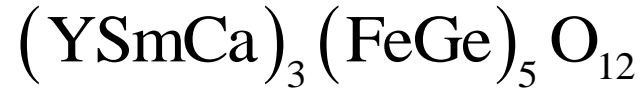
(a) 零外加磁场



(b) 小外加磁场



(c) 大外加磁场



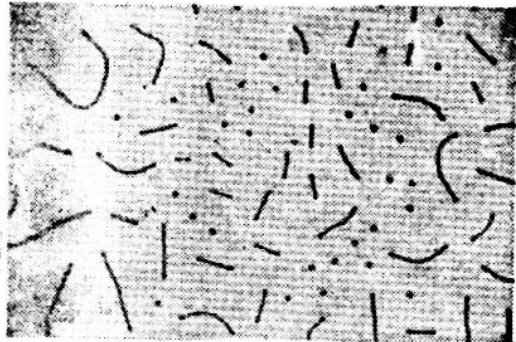
稀土石榴石铁氧体薄膜上的磁畴，
易磁向垂直于薄膜表面。

膜厚7.6微米，在垂直表面的磁场作用下发生的变化，出现泡畴。

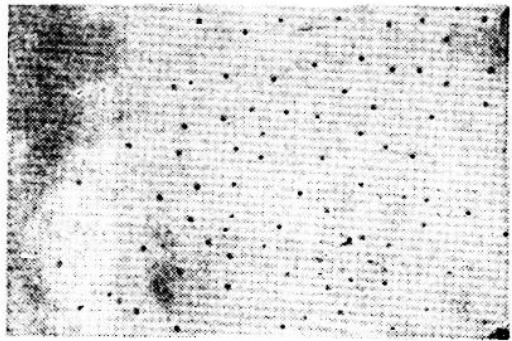


—|—10 μm

(a) 0 奥



(c) 59 奥



(e) 68.4 奥

图 8.55 稀土石榴石铁氧体 (YSmC
场的变化，薄膜厚度为 7.6 微

八. 反铁磁物质的磁畴

有证据表明，反铁磁物质也有磁畴，但和减小退磁场的原因无关，是晶格不完整性造成的。

反铁磁性物质因磁化而产生的晶格畸变由交换畸变和磁致伸缩组成。NiO的交换畸变(菱面体型畸变)或CoO的磁致伸缩(正方晶型畸变)都比其它形变大十倍以上。因此，在交换畸变集中的区域，可看作是一个单一的交换畸变晶体，这一交换畸变集中的区域称为***T***磁畴，边界称为***T***畴壁。同样对于CoO把磁致伸缩集中的区域称为***t***磁畴(正方晶型畸变)，其边界称为***t***畴壁。反铁磁性磁畴一般用X射线形貌学法(**B-B**)，双折射的光学方法和电子显微镜法。

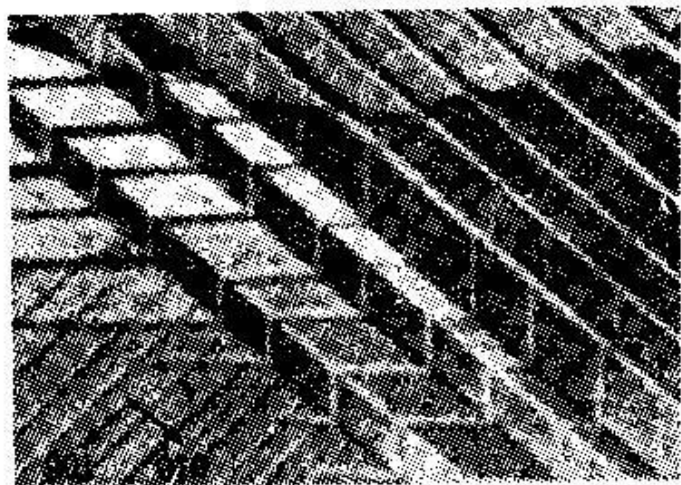


图 14.27 NiO的T 畴壁
(解理面) (50 ×)

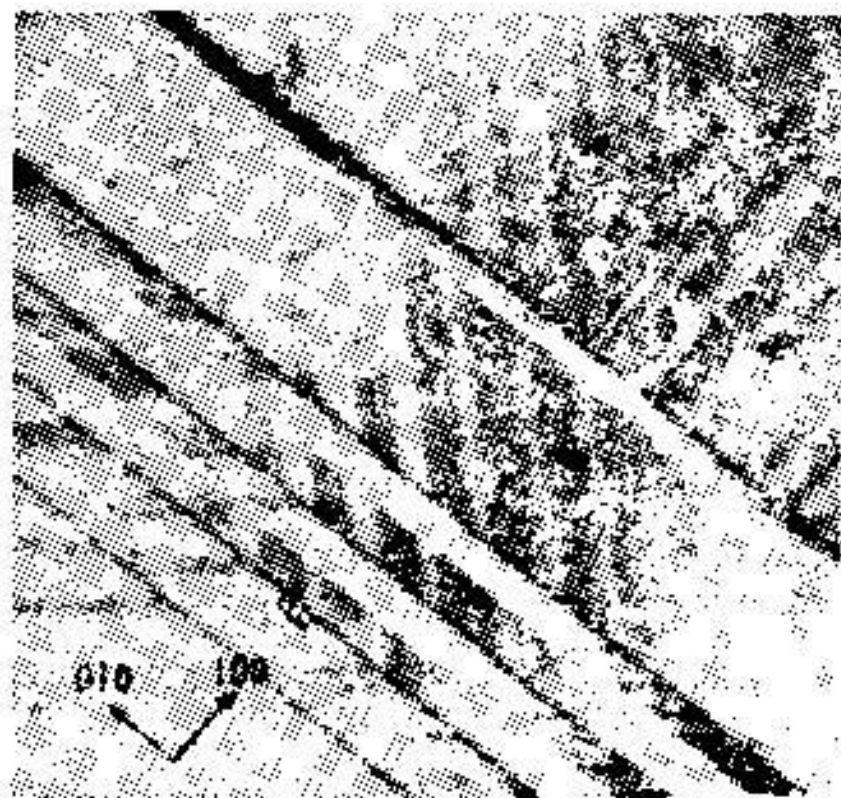


图 14.28 退火NiO的组织
(75 ×)

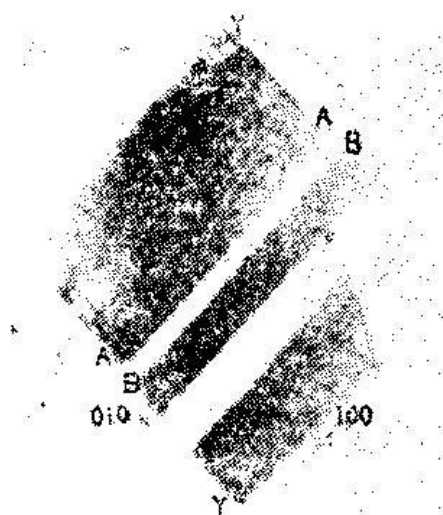
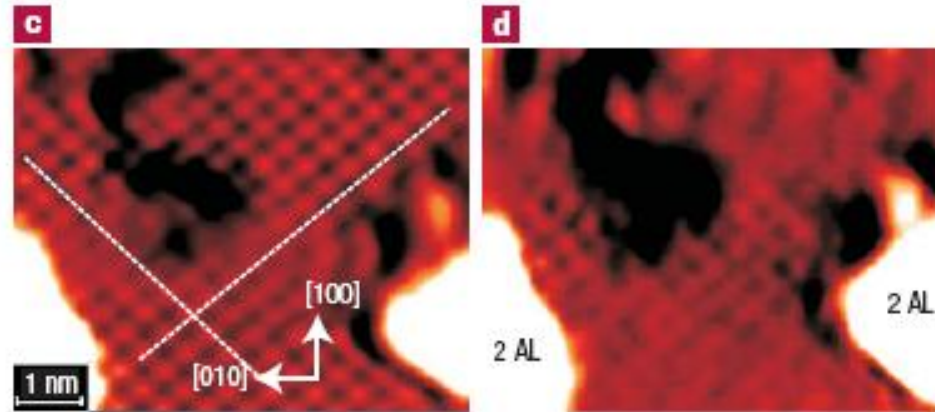
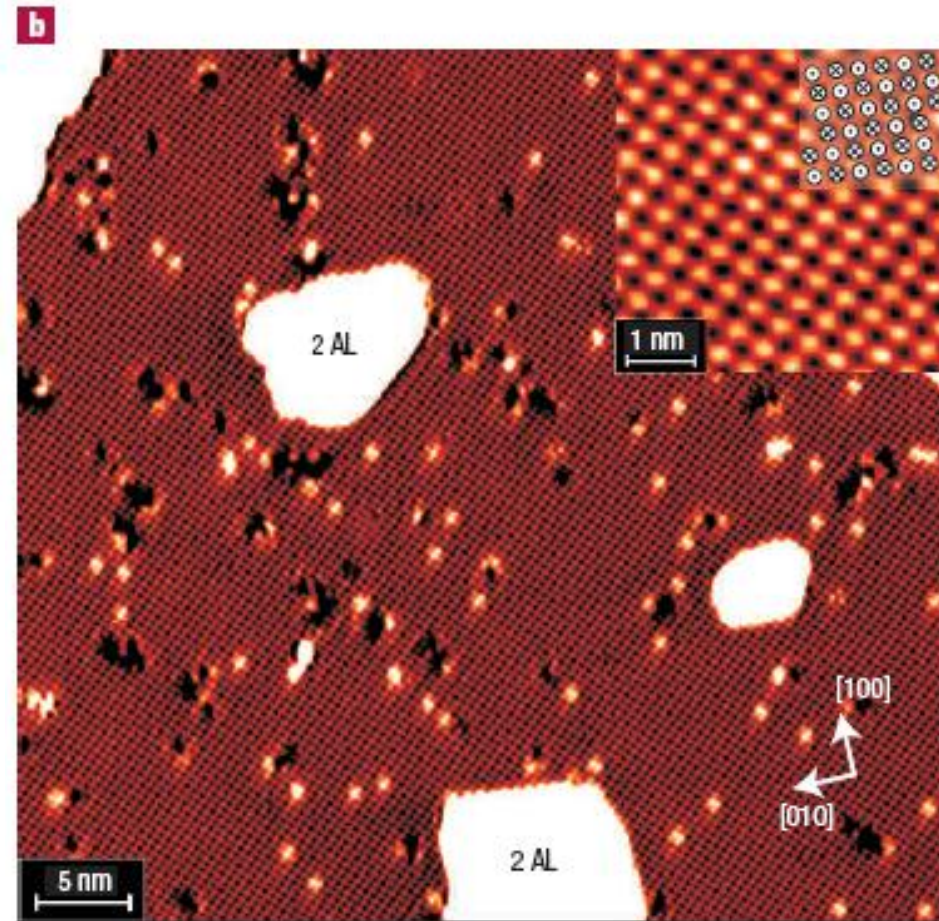


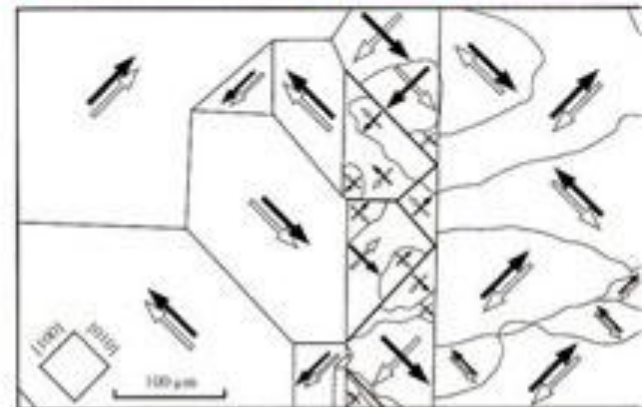
图 14.29 退火后的CoO的
T 畴壁 (13 ×)

Atomic spin structure of antiferromagnetic domain walls

nature materials | VOL. 5 | JUNE 2006 | www.nature.com/naturematerials



层间反铁磁 (AF) 耦合



3.4 ÅO ₂	487 ÅO ₂	513 ÅO ₂	6.1 ÅO ₂
			30 nm Fe
			Cu
			30 nm Fe

习题四

4.1 试证明磁晶单轴各向异性等效场：

$$H_k = \frac{2K_{u1}}{\mu_0 M_s}$$

并估算出金属Co的磁晶各向异性等效场的数值。

4.2 试推出金属铁Fe(bcc)180°畴壁的畴壁厚度和单位面积畴壁能的近似表达式并估算其数值大小。

4.3 试推出具有单轴各向异性的大块金属钴单晶形成稳定片形畴后的尺寸，并估计出数值
(设：单晶沿易磁向长1cm)。

4.4 在只考虑磁晶各向异性情形，试推出金属铁单畴粒子临界尺寸的表达式，并估计出数值。

4.4 磁畴的观察

观察磁畴的结构以及在外磁场中的变化规律是磁性实验研究的重要内容，是理解磁化机理、阐明影响磁性质因素的重要途径。已经发展了多种观察磁畴结构的实验方法：粉纹法；磁光效应法；透射电镜及扫描电镜法；X光成像法；中子衍射法以及新近发展的磁力显微镜法和X光磁二色性显微技术等。

一. 磁畴结构的观察历史和粉纹法

1907年，Weiss假设在铁磁材料中有磁畴存在，1931年 Bitter 用胶体中的铁磁性颗粒放在已抛光的铁磁晶体表面，用反射金相光学显微镜观察到磁性粒子不均匀分布而描绘出磁畴的形状。随着颗粒悬浮液的改进，铁磁颗粒集聚在畴壁附近，因而可以清楚的观察到磁畴，称为**毕特粉纹法**。

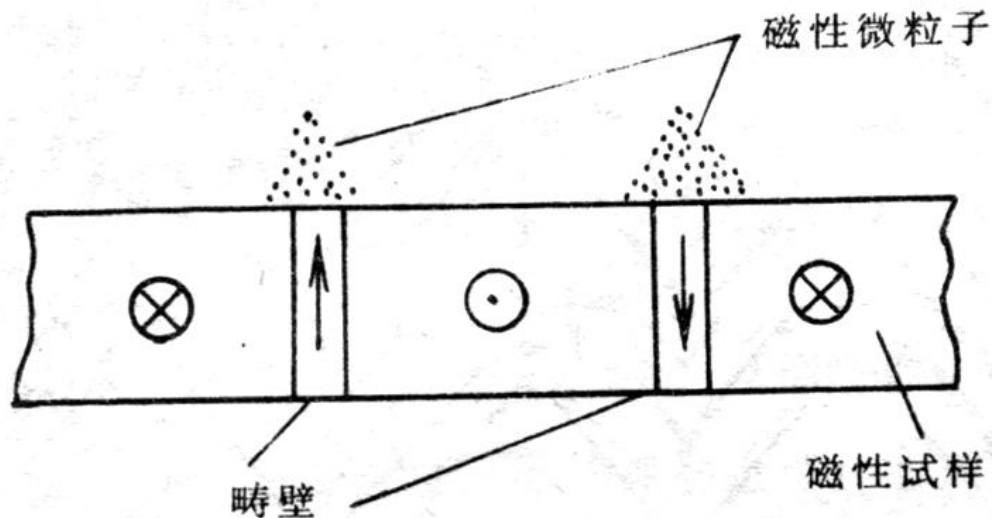


图 5-44 粉纹方法观察磁畴原理

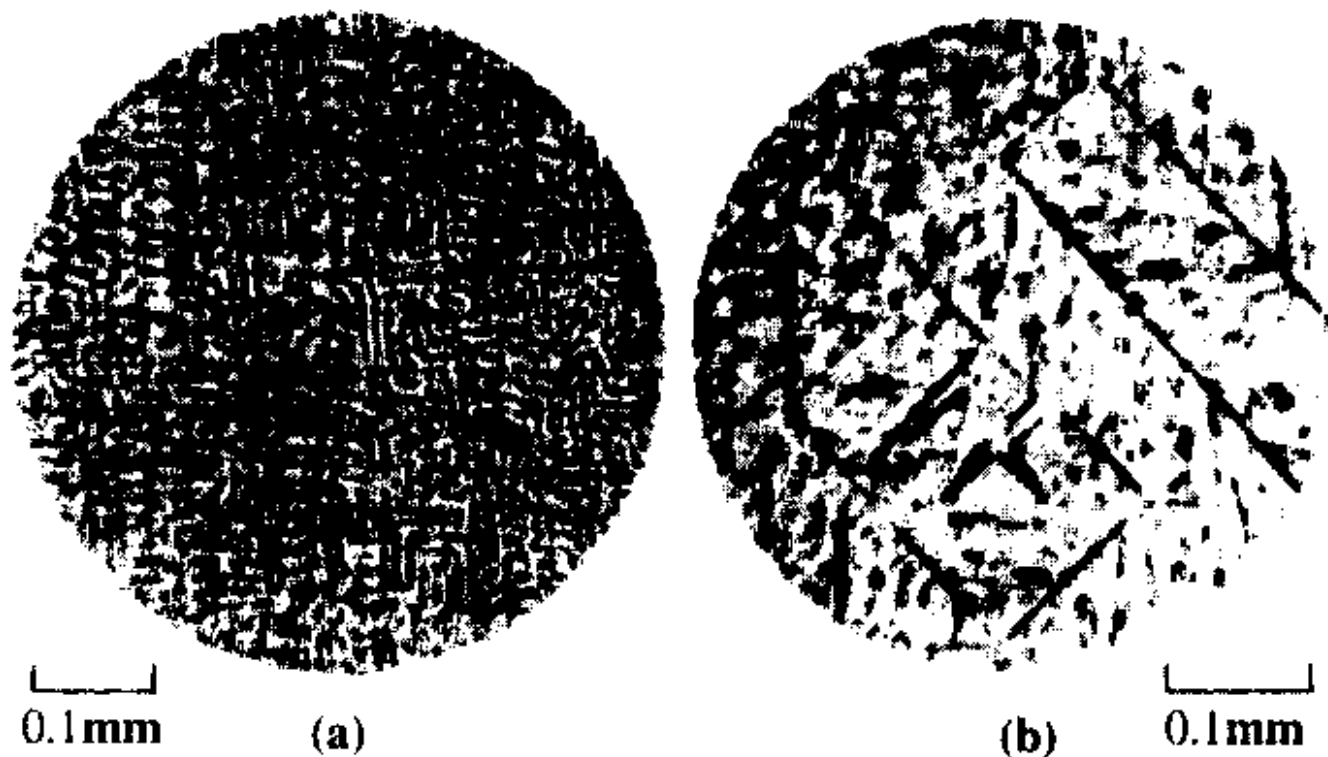


图 15.3 在 4%Si-Fe 单晶的 (001) 表面上观察到的铁磁畴图样：(a)迷宫型表面畴；
(b)从表面去掉 28 μm 厚的材料后观察到的实际畴（引自 Chikazumi 和 Suzuki⁷）

为观察磁畴，样品必须经过研磨、电解抛光、腐蚀、清洗等表面处理，悬胶液是含水氯化铁和含水氯化亚铁的水溶液加 NaOH 制成的 Fe_3O_4 粉末配以肥皂溶液。

2、磁光方法

磁光效应，例如克尔效应和法拉第效应都可用来观察磁畴结构。克尔效应是指**光线从磁性材料表面反射时其偏振平面发生旋转的现象**。如图b所示，两个磁畴中磁化强度垂直样品表面但方向相反，反射出的光的偏振面的旋转方向相反，如果调整检偏镜使某一方向的磁畴反射光通过量最大，则另一方向的磁畴就会变暗。

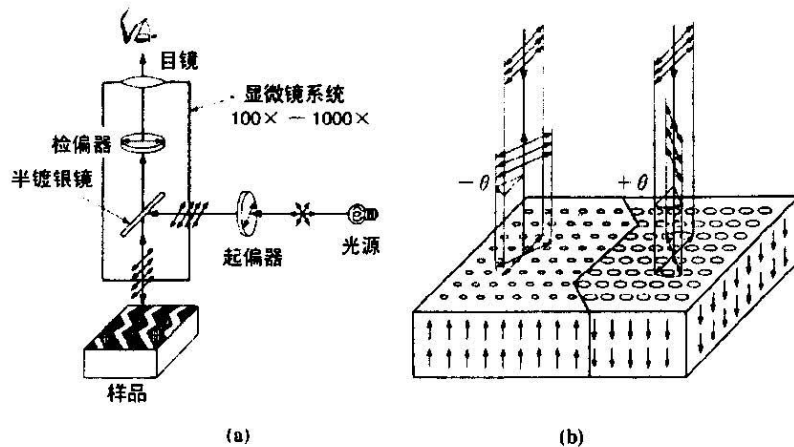
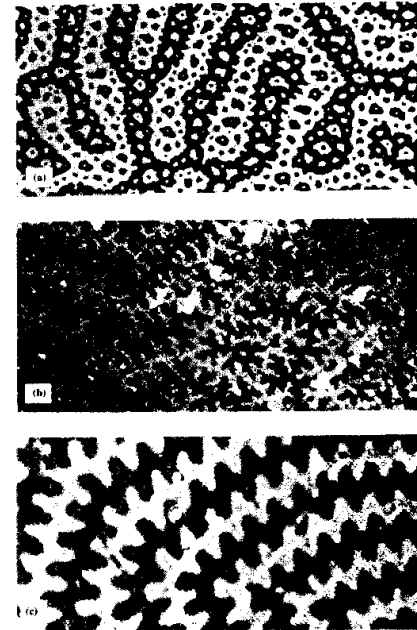


图 15.12 (a)用克尔(Kerr)磁光效应观察磁畴结构的光学显微镜

(b)从磁化强度垂直于样品表面，但方向相反的两个畴的表面，反射的偏振光的偏振面的旋转



用克尔(Kerr)磁光效应在 MnBi 合金平板的 c·平面上观察到的磁畴结构：(a) 最厚的平板
(b)中等厚度的平板；(c)最薄的平板（引自 Roberts 和 Bean¹⁶）

法拉第效应，是光在通过样品传播时，偏振面发生旋转的现象。

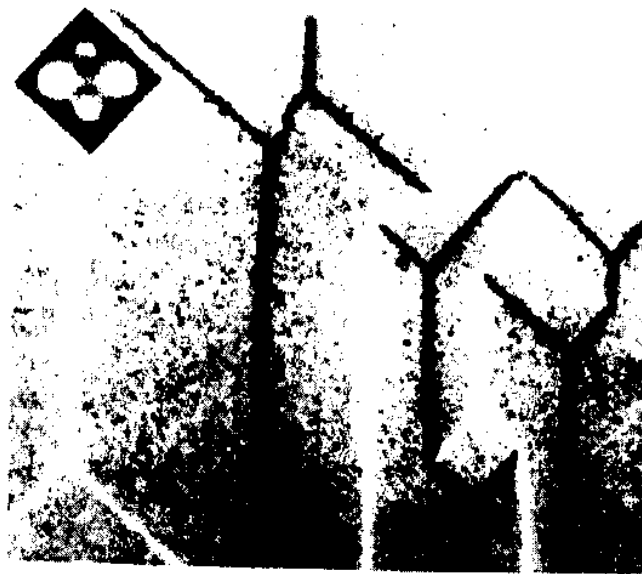
此方法要求铁磁样品能透过光，如铁石榴石单晶样品。

3、洛仑兹(Lorentz)电子显微术

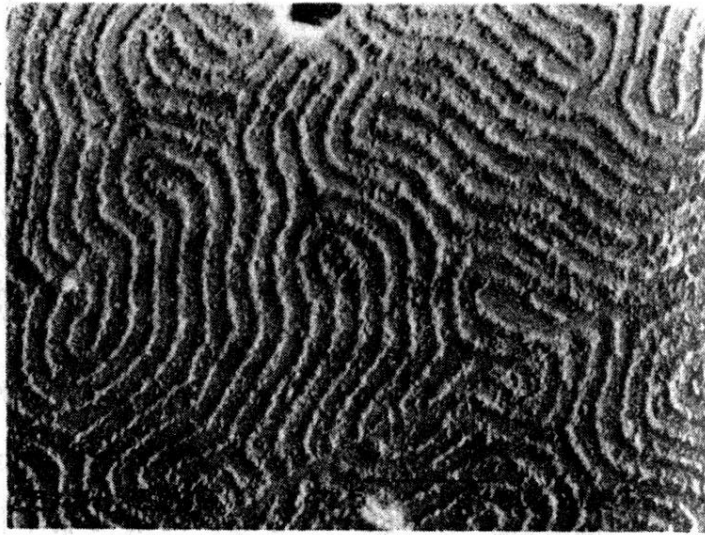
在磁性薄膜中，如薄膜薄到允许电子束穿过，则磁畴结构就能用电子显微镜来观察。其原理是，由于自发磁化的存在，作用在运动电子上的洛仑兹力，使电子束产生偏转。如果物镜从样品膜面轻微散焦，畴壁会以黑线或白线的形式出现。这种方法称为洛仑兹显微术。

其它一些方法：

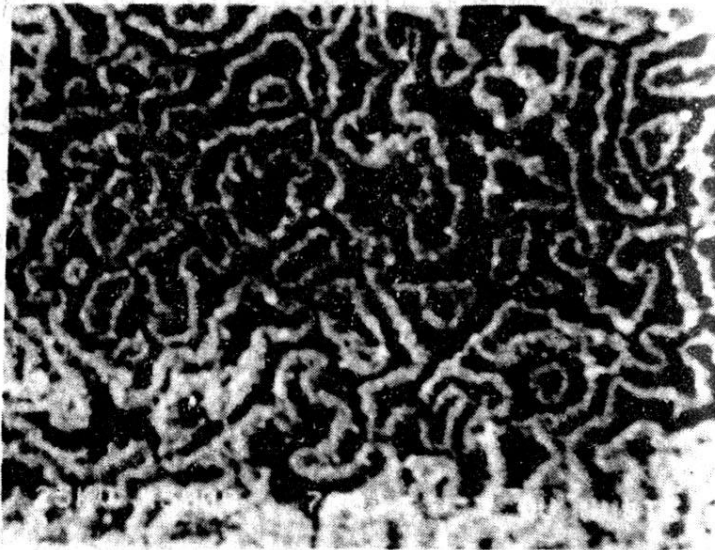
- a)扫描电子显微术
- b)X射线形貌学
- c)电子全息照相术



在厚度为 2500Å 的平行于 (001) 面的铁单晶薄膜上观察到的磁畴图样和它的衍射图 (插图)



(a) 由电镜观察到的外延石榴石单晶
 $(\text{YSmLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ 薄膜的磁畴



(b) 由电镜观察到的 TbFeCo 非晶垂直磁化膜的磁畴

4、磁力显微镜MFM

AFM针尖在与样品表面接触时，相互作用力主要是短程的原子间排斥力，而将针尖离开样品表面一段距离时，磁力、静电力及吸引的范德华力等长程作用力就能被检测出来。

MFM的工作原理同非接触模式的AFM相似，只是MFM采用的是磁性针尖；而且操作时，针尖与样品表面间距要比AFM非接触模式中的间距(5~20nm)大，一般为10~200nm。当振动的针尖接近磁性样品时，针尖与样品所产生的漏磁场相互作用而感受到磁力。

实际操作时，首先探针同样品表面接触，进行第一次扫描，获得表面形貌信息，然后抬高探针到100nm左右进行第二次扫描，测磁力信息。用表面形貌信息对磁力信息进行修正，获得真实的磁力图信息。

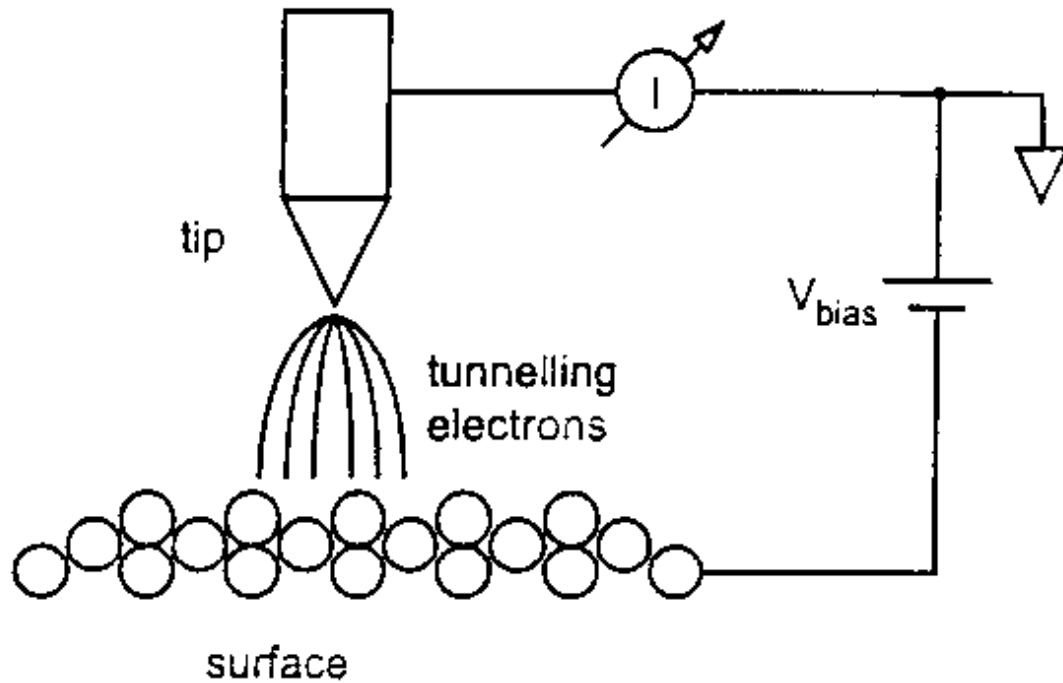


Figure 2. STM operation, schematic diagram.

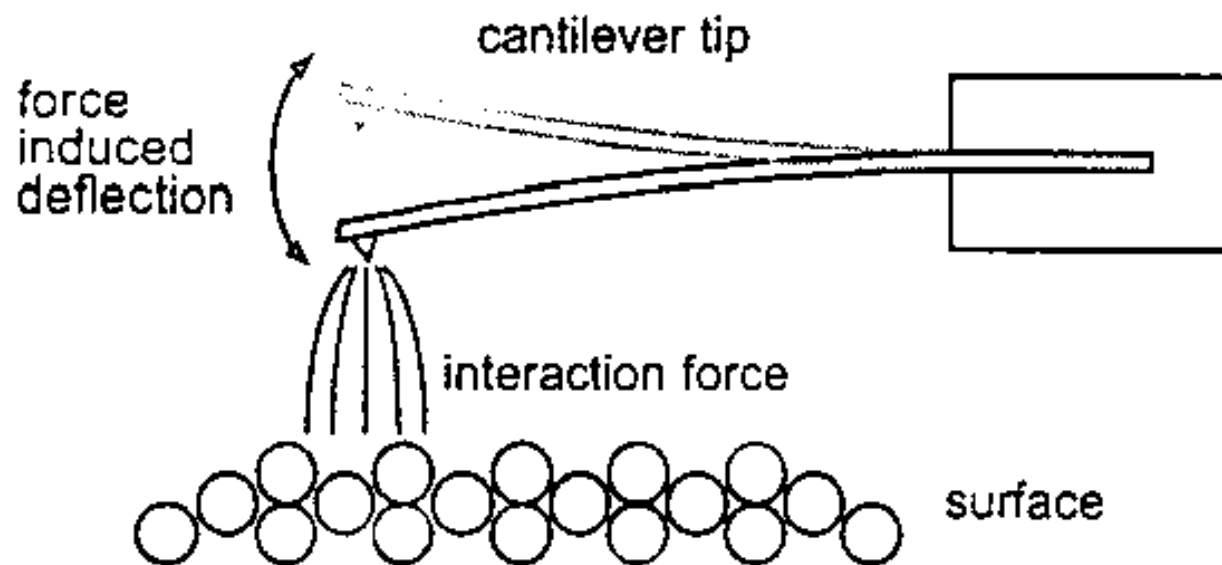
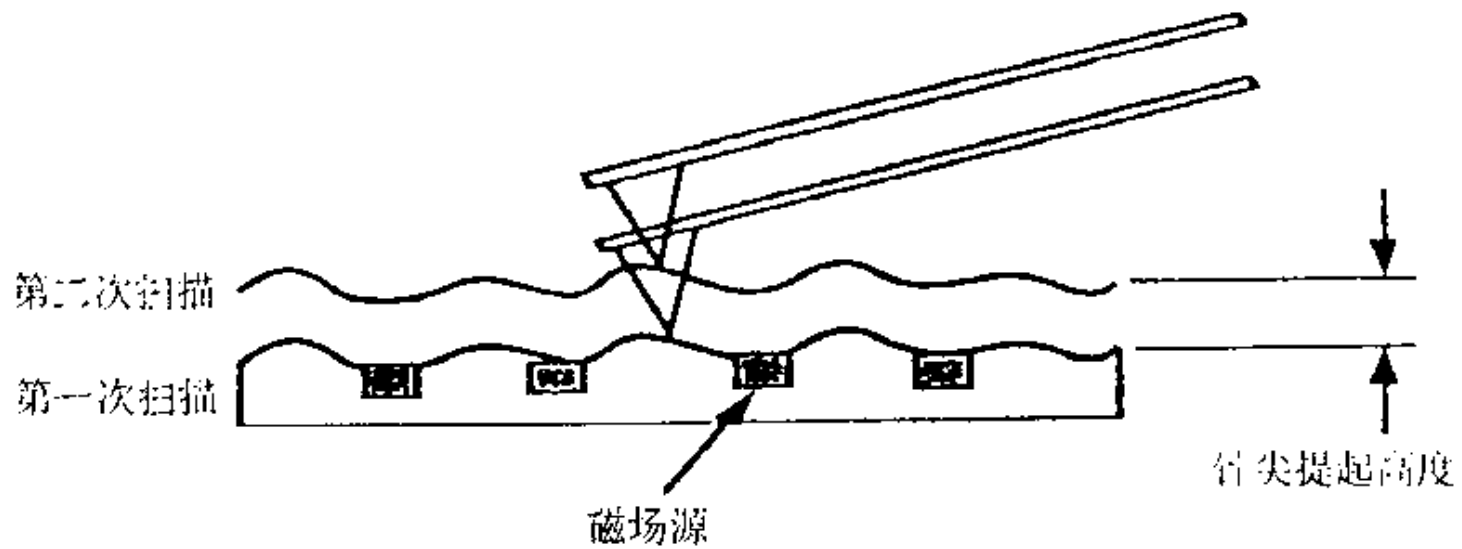


Figure 1. AFM operation, schematic diagram.



(a)

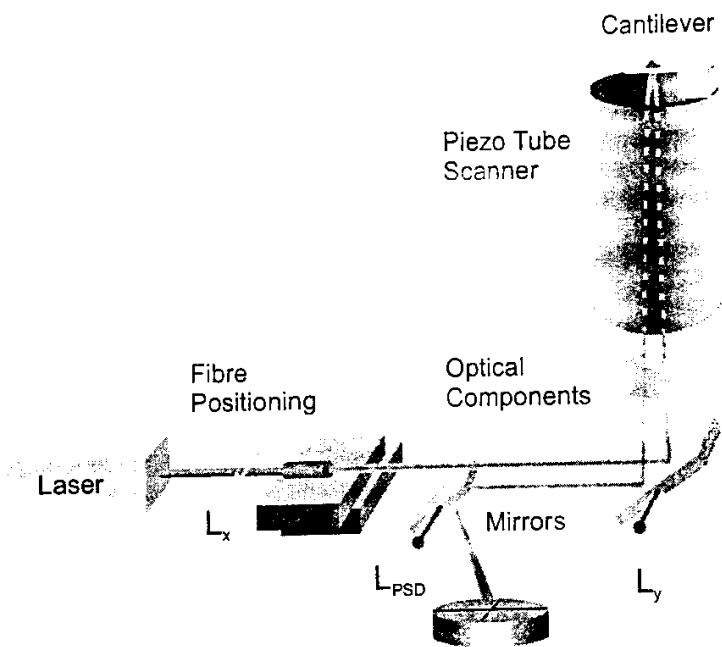


Figure 24. Optical beam deflection, schematic diagram.

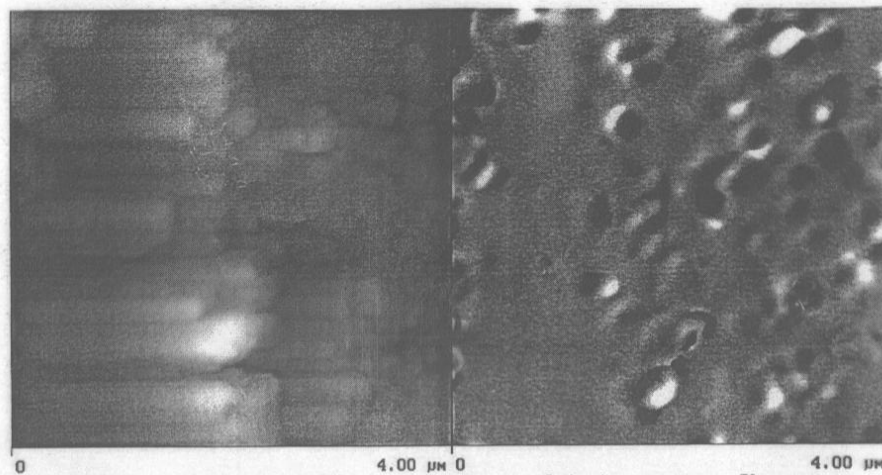
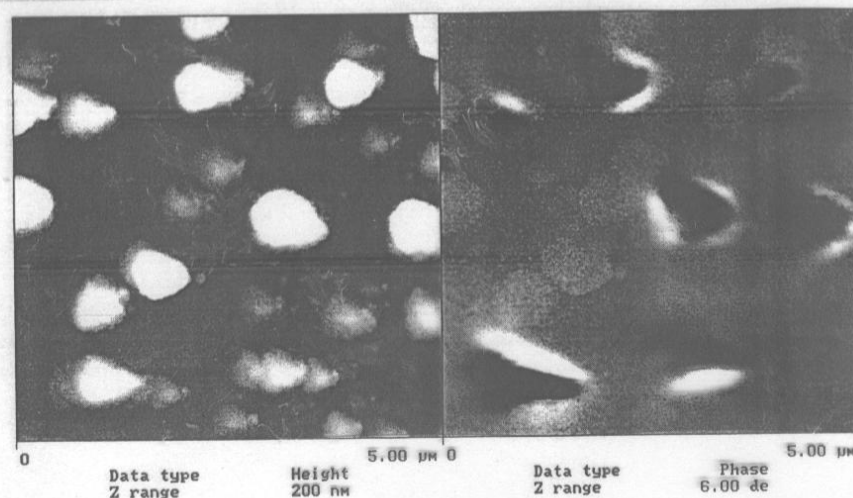


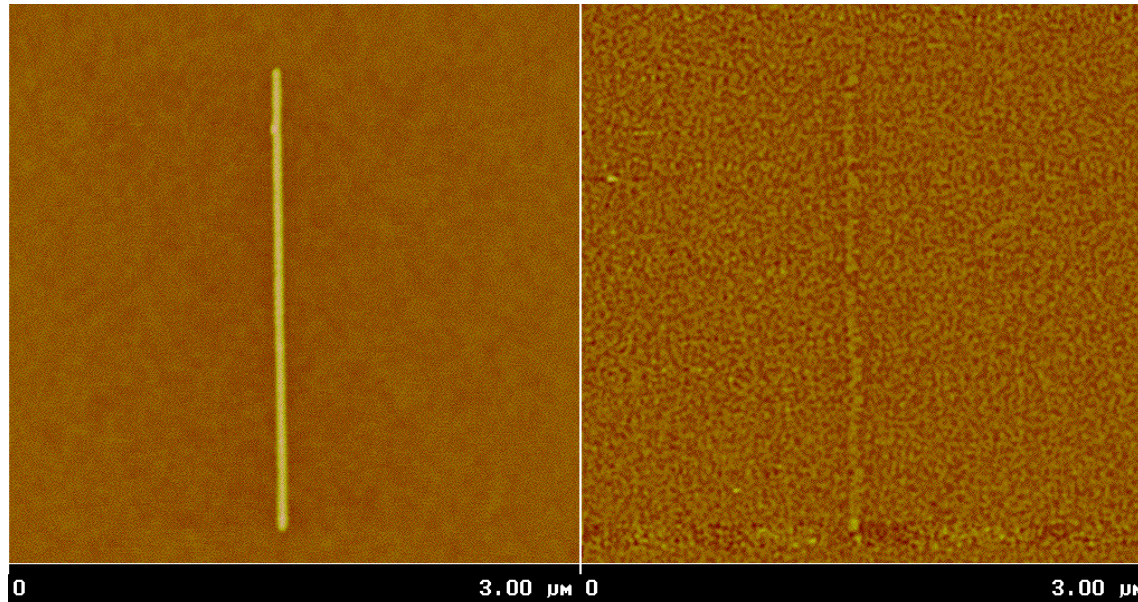
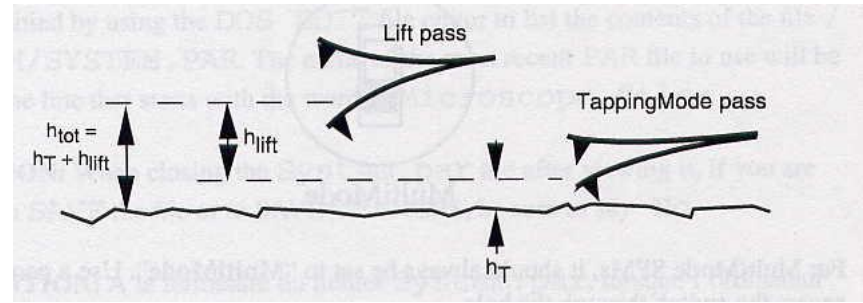
图 6 定向涂布的掺 Co,Ti 的钡铁氧体磁粉的形貌图(左图)和磁力图(右图)



11261746.001

图 1 左图为表面形貌图, 显示在 Mn^{+} 离子注入和热处理后在 GaAs 单晶表面形成的颗粒, 内含十次准晶粒子。部分颗粒为磁性粒子, 由磁力图(右图)显示。

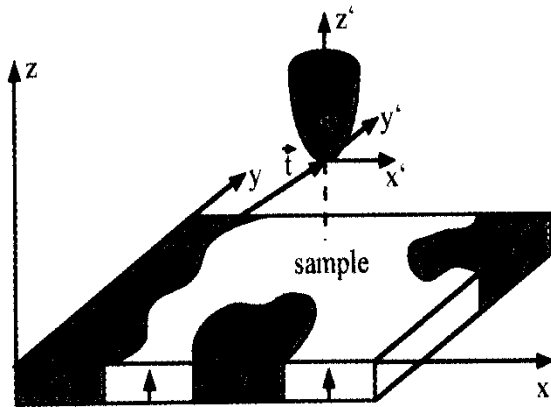
MFM of nanotube on Cu



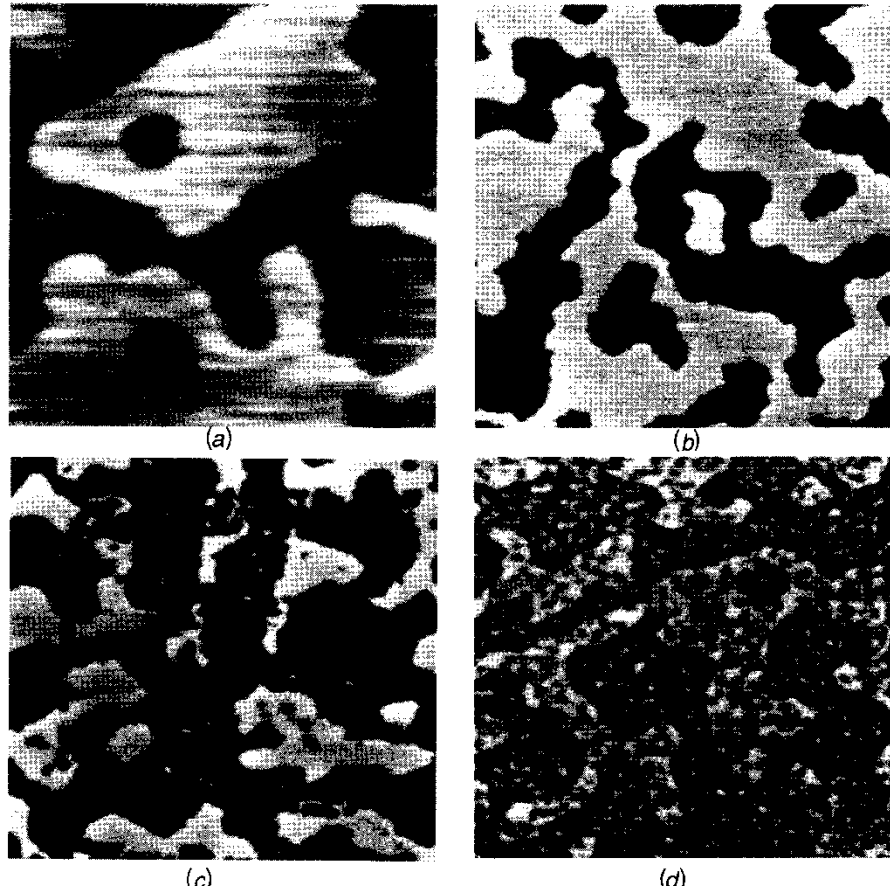
Topographic AFM image Magnetic MFM image

Multiwalled carbon nanotube shows no magnetic contrast on Cu

Magnetic Force Microscopy (MFM)



Geometry for description of MFM technique. A tip scanned to the surface and it is magnetic or is coated with a thin film of a hard or soft magnetic material.



Domain structure of epitaxial $\text{Cu}/t_{\text{Ni}}/\text{Cu}(100)$ films imaged by *MFM* over a $12\ \mu\text{m}$ square: (a) 2nm Ni, (b) 8.5 nm Ni, (c) 10.0 Nm Ni; (d) 12.5nm Ni (Bochi et al., PRB 53(1996)R1729).

磁畴观测的新技术还有：

中子散射法和圆偏振X射线显微术等

其介绍见于,当代磁学**5.2**节