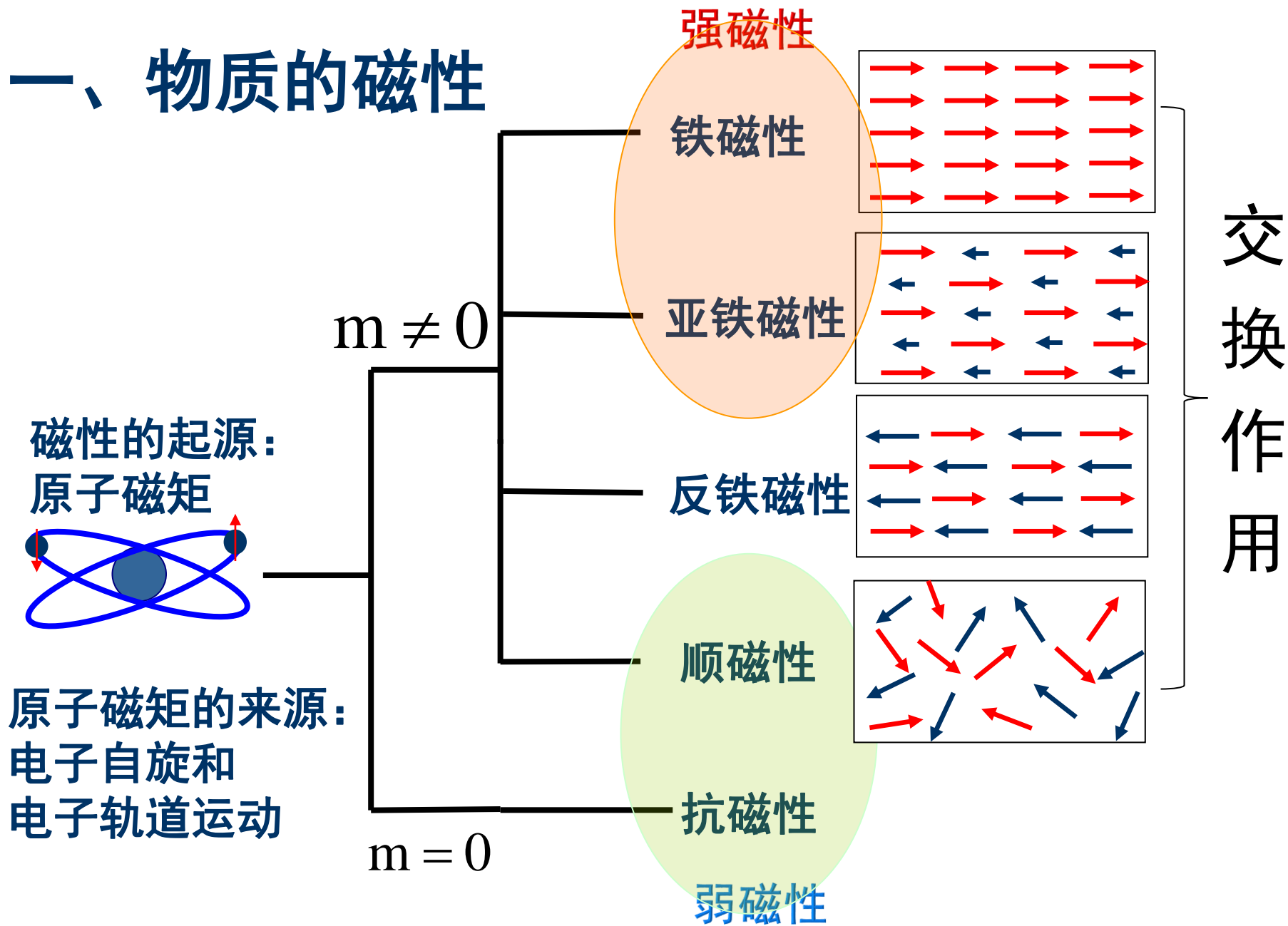


6.4 铁磁质的磁化规律 与磁路定理

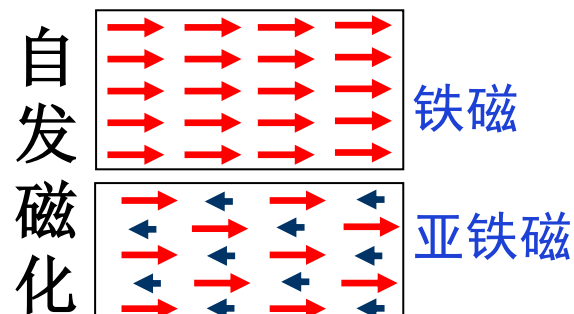
一、物质的磁性



二、（亚）铁磁质的基本现象

（亚）铁磁质

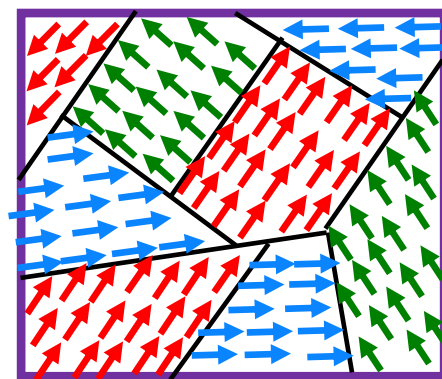
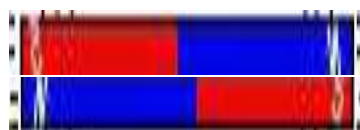
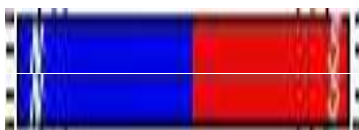
分子磁矩 $m \neq 0$ $\sum_{\text{局域}} m_{\text{分子}} \neq 0$



1. 自发磁化与磁畴

自发磁化：交换作用

分畴的原因：能量最小化

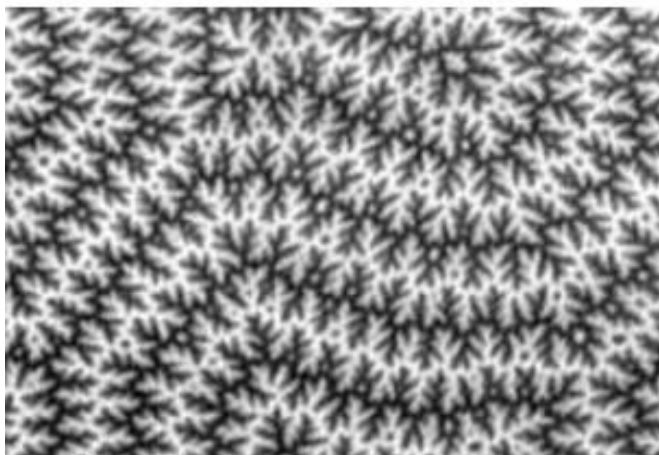


铁磁质中的磁畴

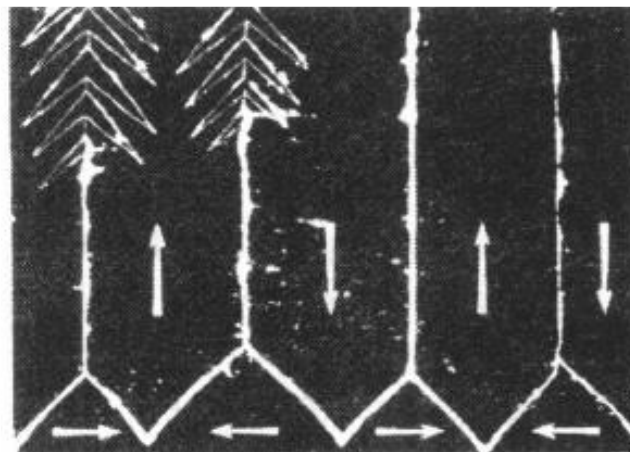
哪种情况是稳定的？

分畴的原因是为了减小静磁能！

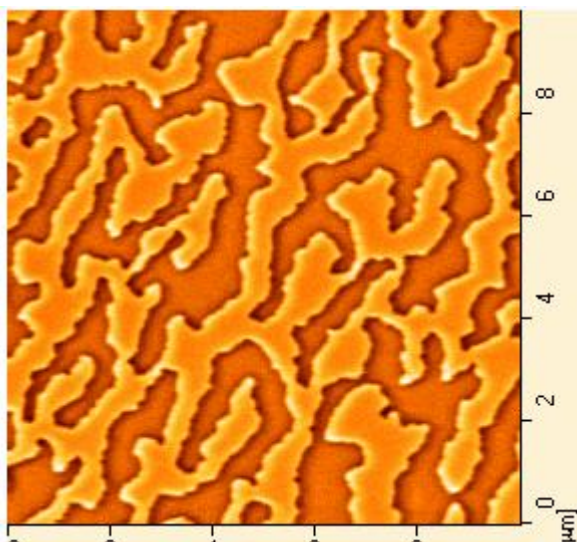
实际磁性物质中的磁畴结构



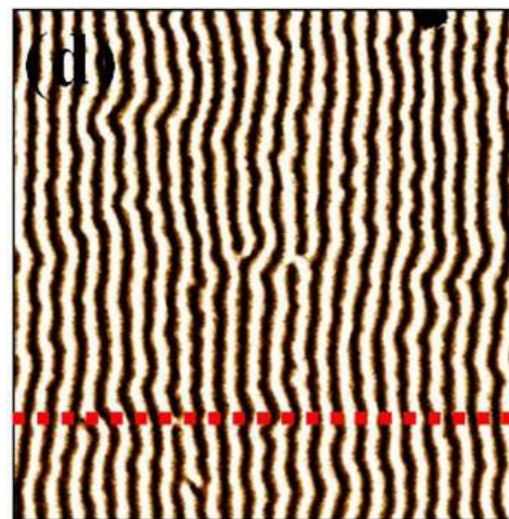
Co单晶中的磁畴结构



硅钢片中的“树枝状”磁畴



磁性薄膜中的“迷宫畴”



磁性薄膜中的“条形畴”

2. 居里温度

铁磁性与顺磁性的转变温度

物质	Fe	Co	Ni	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	fccPr	fccNd
$T_c(K)$	1043	1403	631	293.4	219.5	89	20	20	32	8.7	5.7

本质：交换作用和热扰动能量的竞争

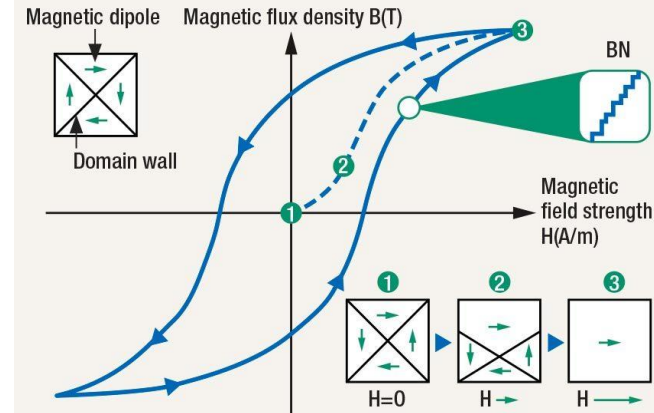
演示实验视频：居里温度（大课已播放）



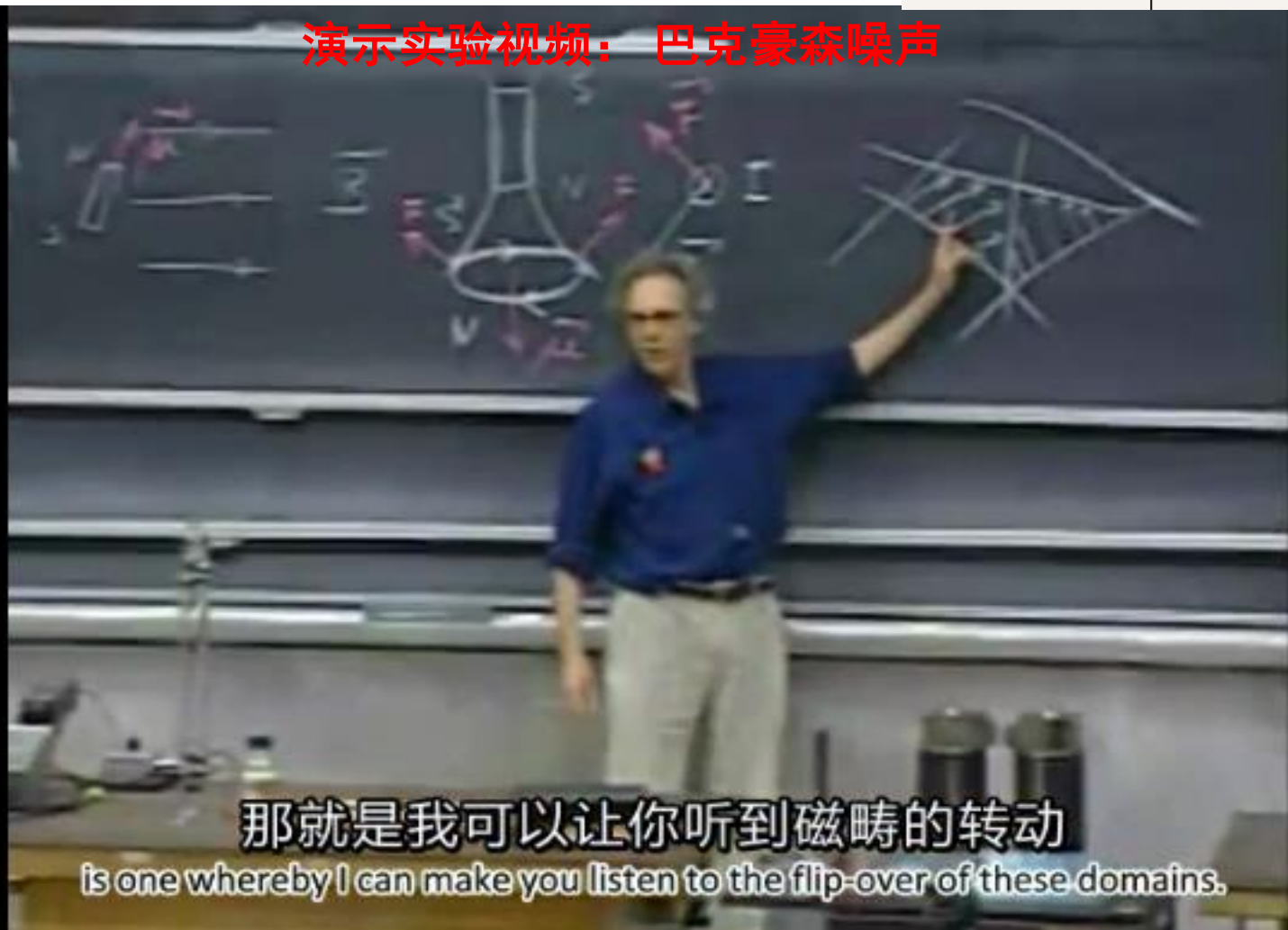
3. 磁化与磁滞现象

铁磁质磁化特点：

- 其中M的值相当大；M与H不成正比关系，甚至也不是单值关系。



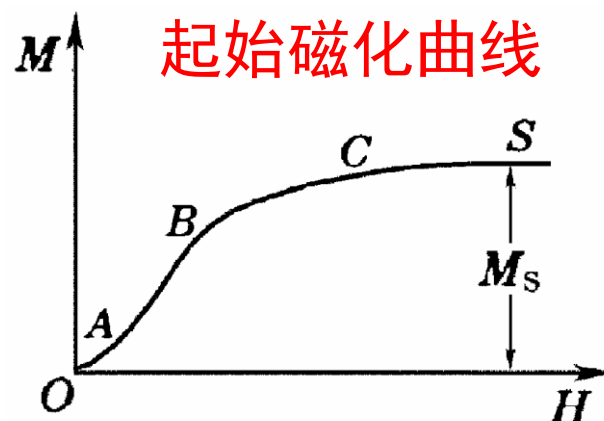
演示实验视频：巴克豪森噪声



4. 磁滞现象

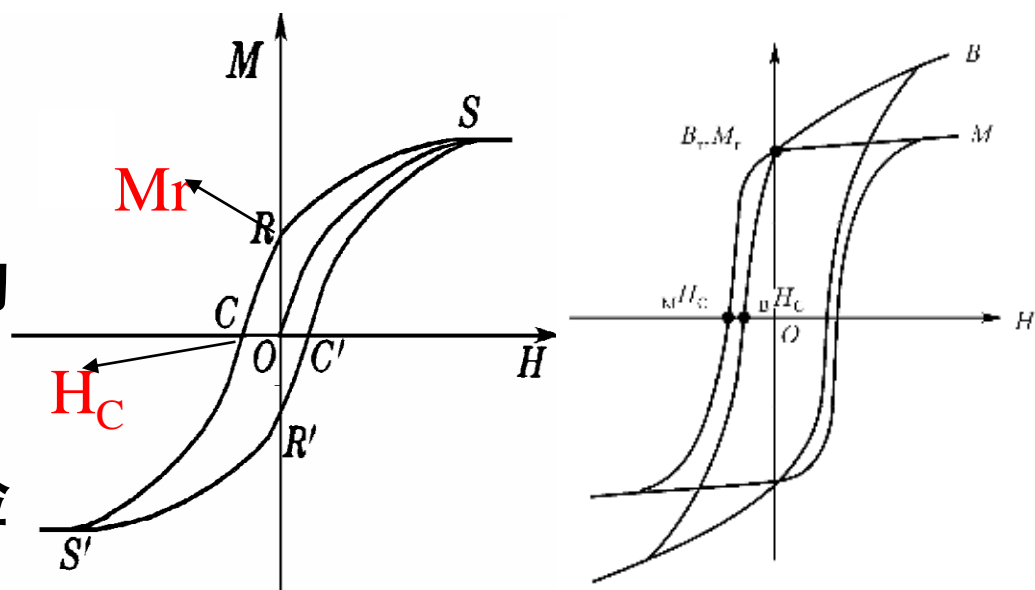
- M_s 称为饱和磁化强度
- 磁化率远大于顺磁体和抗磁体

$$\chi = \frac{M}{H}$$



磁滞回线

- M_r ：剩余磁化强度
- H_C ：矫顽力
- M 的变化总是落后于 H 的变化，称为磁滞现象。
- M - H 的关系可以通过实验测定。
- 工程上也常用 B - H 回线。



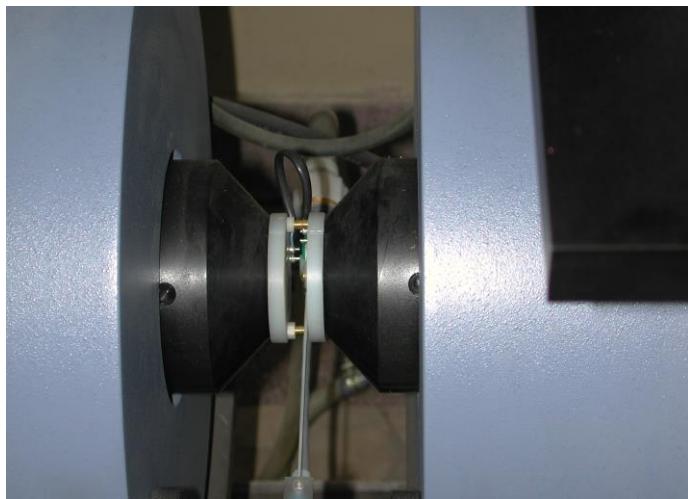
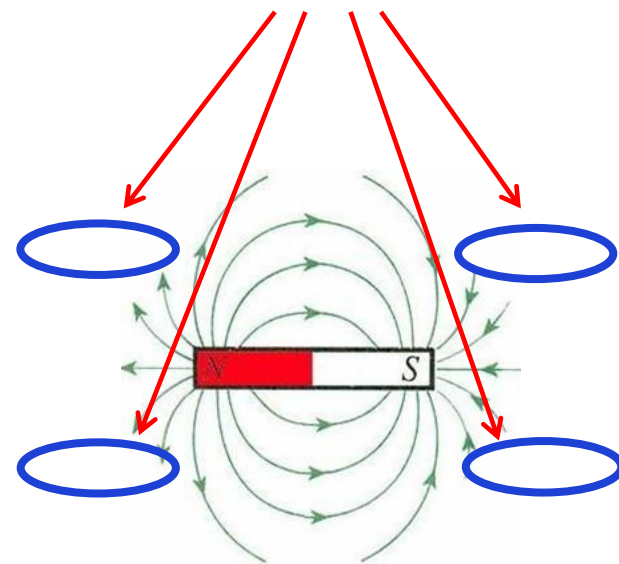
磁滞回线

磁滞回线的测量——振动样品磁强计（VSM）



振动样品磁强计的原理

探测线圈



样品上线振动时，探测线圈中的磁通发生变化，产生感应电动势。

5. 磁滞损耗

- 当铁磁质在交变磁场作用下反复磁化，由于磁滞效应，磁体要发热而散失热量，这种能量损失称为磁滞损耗。
- 可以证明： $M-H$ 图中磁滞回线所包围的“面积”代表在一个反复磁化的循环过程中单位体积的铁芯内损耗的能量
- 磁滞回线越胖，曲线面积越大，损耗越大；
- 磁滞回线越瘦，曲线面积越小，损耗越小

证明:

设t时刻介质处于某一磁化状态P，此处 $H>0$ ， $B>0$

dt内， $P \rightarrow P'$ ， $dB>0$ ，铁芯中磁通改变量为 $d\Psi$

电源抵抗感应电动势做功

$$\Psi = NSB$$

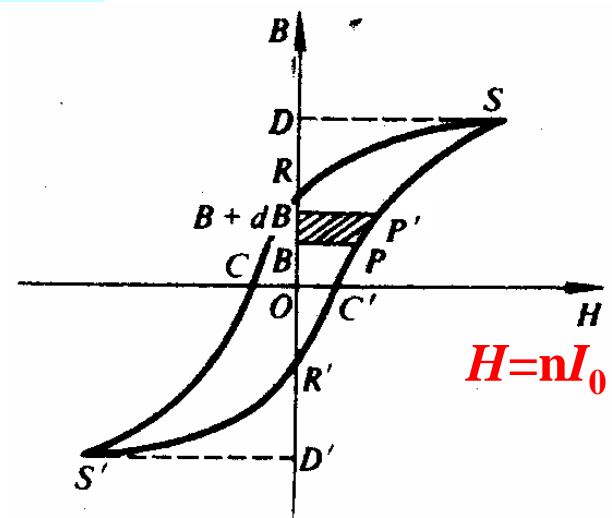
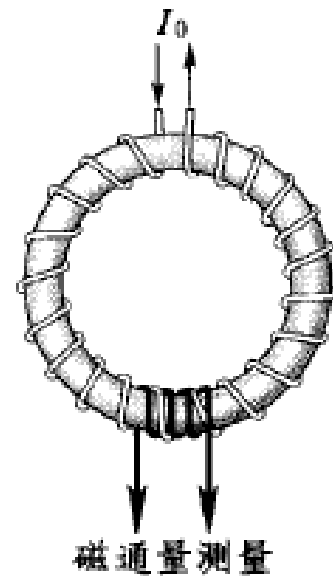
$$dA = -I_0 \varepsilon dt = I_0 \frac{d\Psi}{dt} dt = I_0 d\Psi$$

$$H = nI_0, n = \frac{N}{l}$$

$$dA = I_0 d\Psi = \frac{H}{N/l} NS dB = SlH dB = VH dB$$

$$da = \frac{dA}{V} = H dB$$

$$a = \oint_{\text{磁滞回线}} da = \oint_{\text{磁滞回线}} H dB = \text{磁滞回线所包围的“面积”}$$



三. 铁磁质的分类

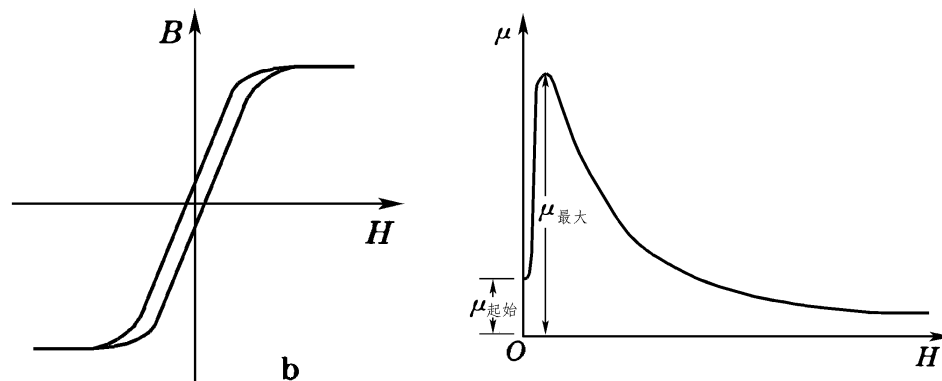
按矫顽力分类：

软磁材料

H_C 小；磁滞回线瘦，

磁滞损耗小；

磁导率高。



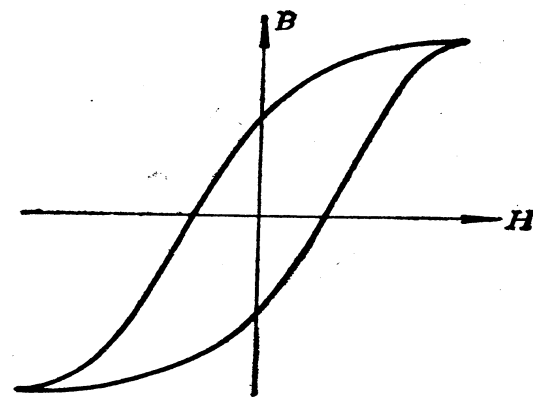
软磁材料的磁滞回线与磁导率

硬磁材料

B_R 大， H_C 大 ($10^4 \sim 10^6 \text{ A/m}$)

磁滞回线胖，磁滞损耗大；

撤外场后，仍能保持强磁性。



硬磁材料的磁滞回线

磁性材料的应用

软磁材料

作用：导磁

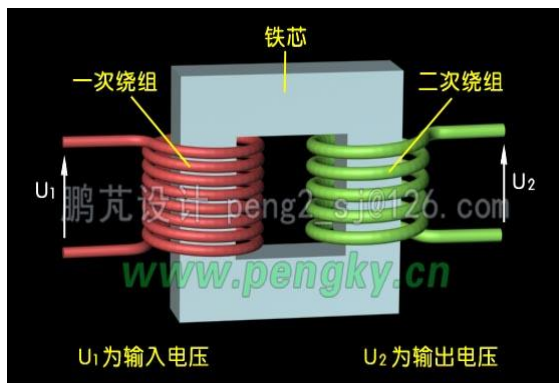
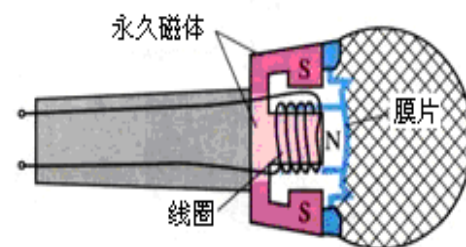


图1 单相变压器原理模型



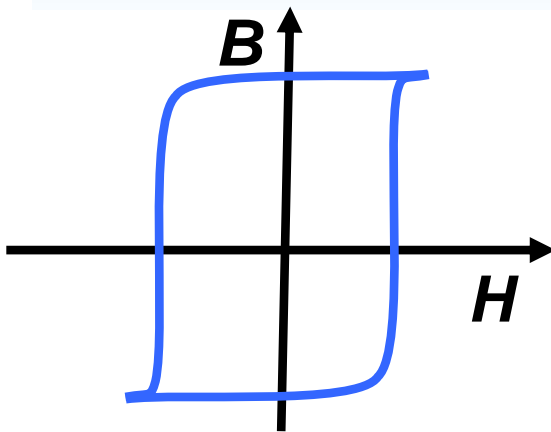
硬磁材料

作用：产生恒定磁场



矩磁材料

磁记录



参考书目

- 《磁性物理学》 宛德福 马兴隆 电子科技大学出版社 (科普)
- 《铁磁学》 上中册 戴道生、钱昆明、钟文定 科学出版社
- 《当代磁学》 李国栋 编著 科大出版社
- 《磁性材料》 都有为 张世远 南京大学出版社
- 《铁磁性物理》 葛世慧 (译) 兰州大学出版社

磁记录



2004 日立 第一款垂直记录磁盘

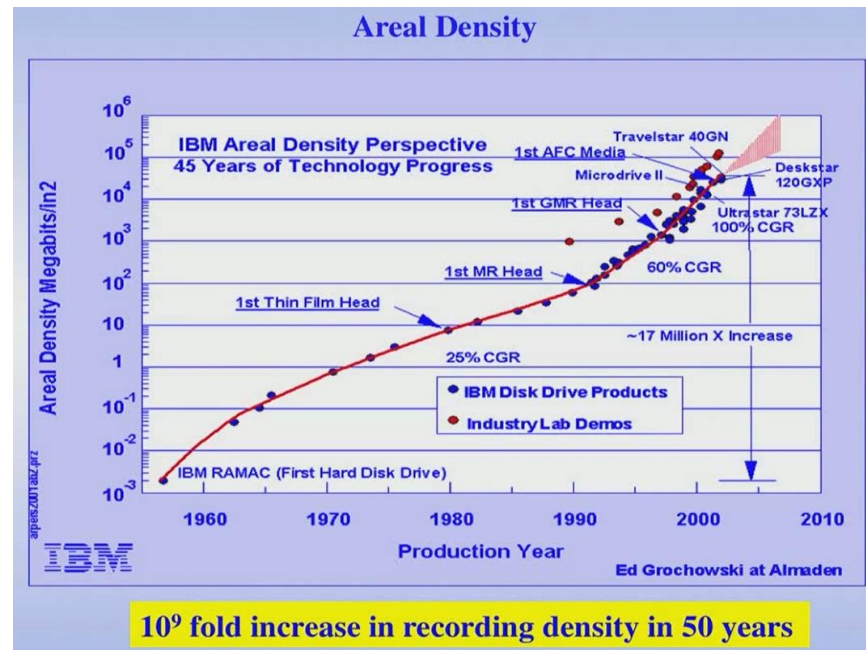
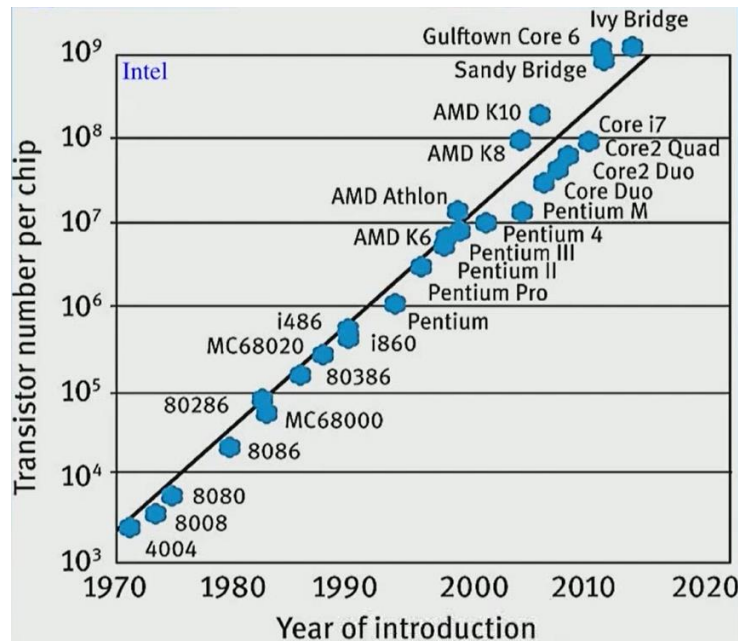
2005 希捷 第一款垂直记录计算机硬盘



Seagate 130 Gbit/inch²

高密度磁记录的发展

两个伟大的摩尔定律 (doubling every 18 months)



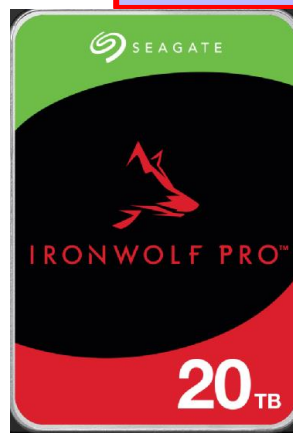
10^9 fold increase in recording density in 50 years

10^9 increase in density!
 10^9 reduction in bit cost!

RAMAC (1956): the first hard disk

5 MB @ 10^{-3} MB/in²
 \$160,000

50 24-inch disks
 Flight height: 50 μ m



$1\text{TB} = 10^3\text{GB} = 10^6\text{MB}$

希捷酷狼

网络售价 ¥ 4999

磁记录发展动态和趋势

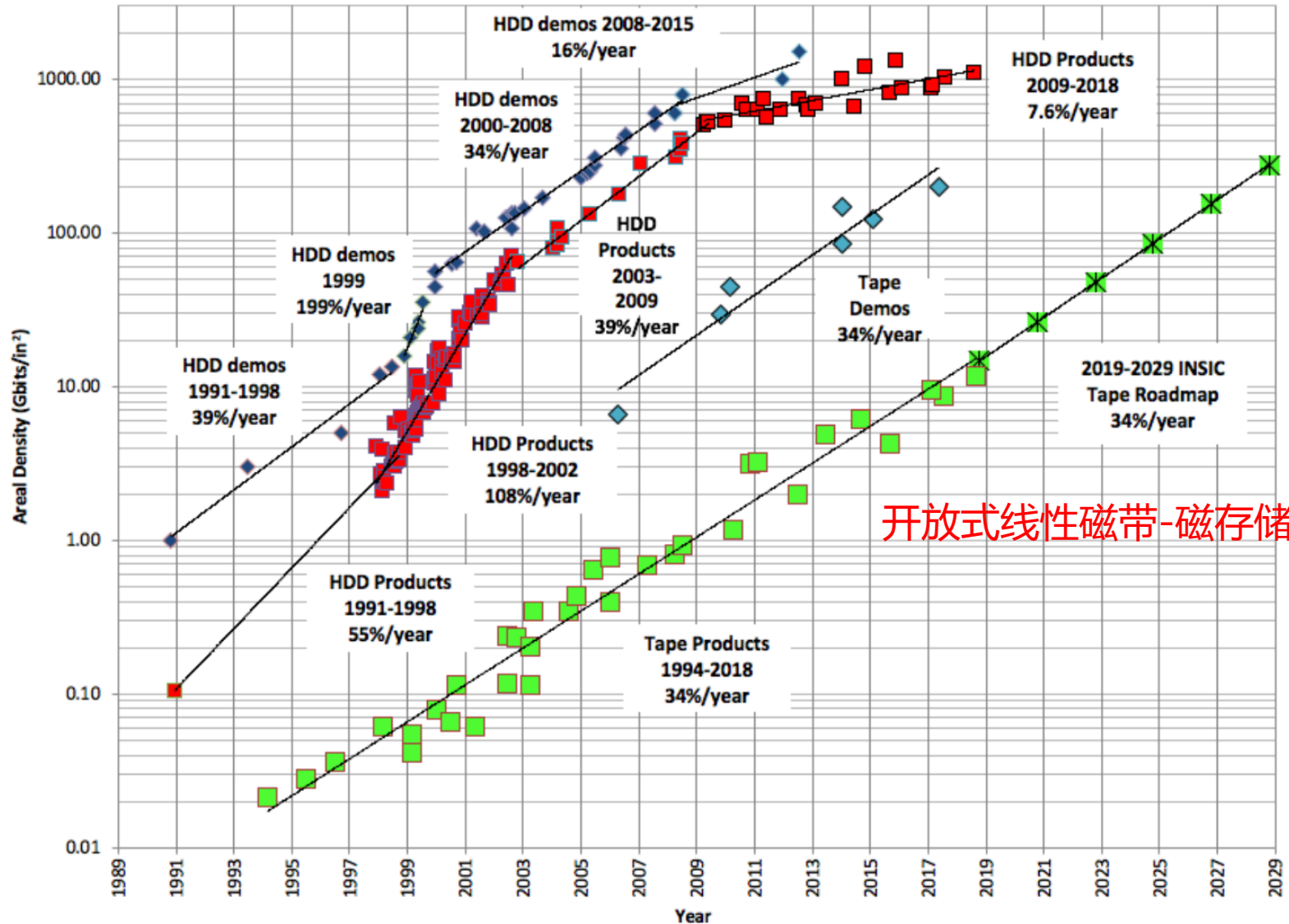
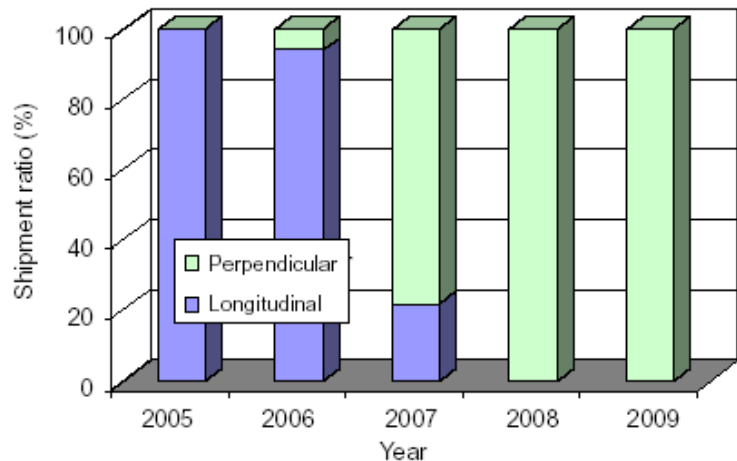
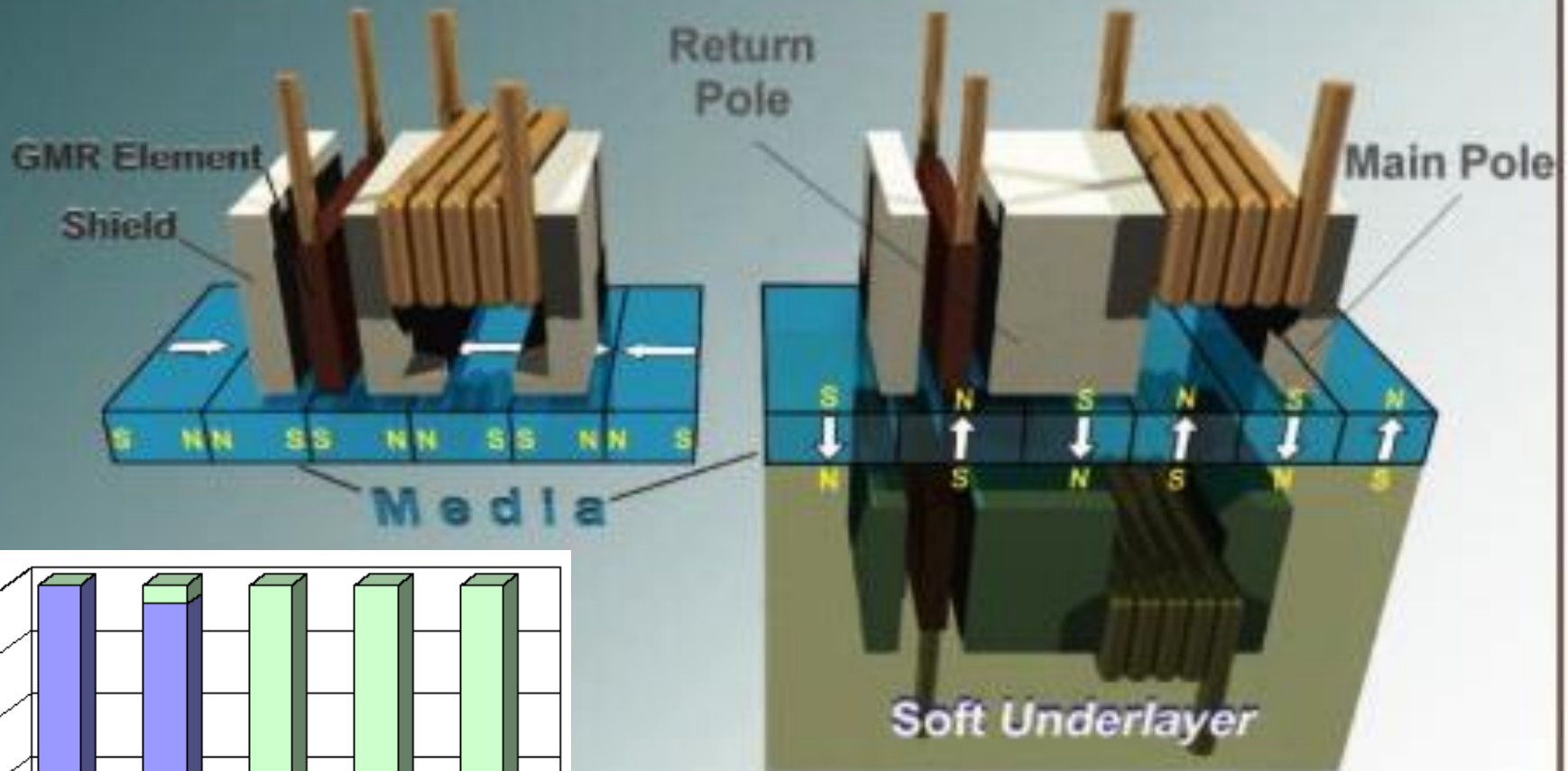


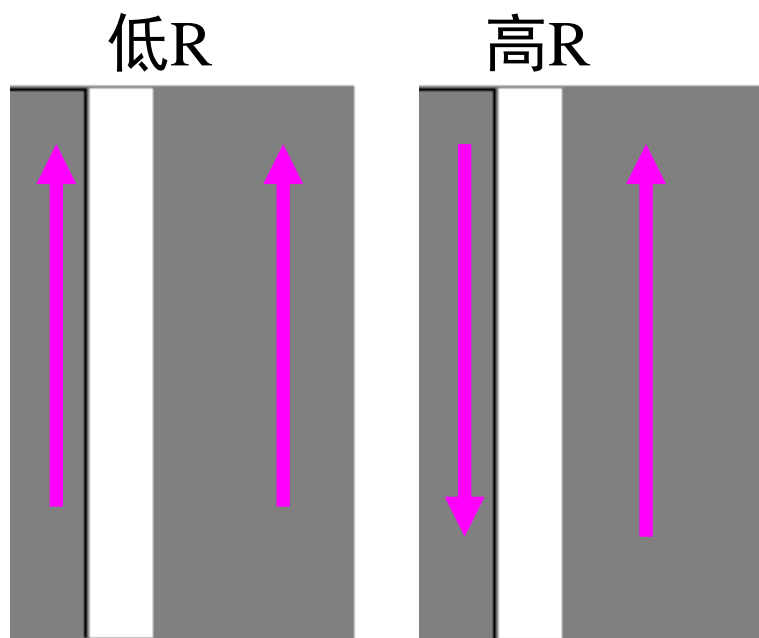
Figure 1: Areal Density Trends. Hard Disk Drive, Tape Product and Tape Technology Roadmap

水平磁记录 and 垂直磁记录

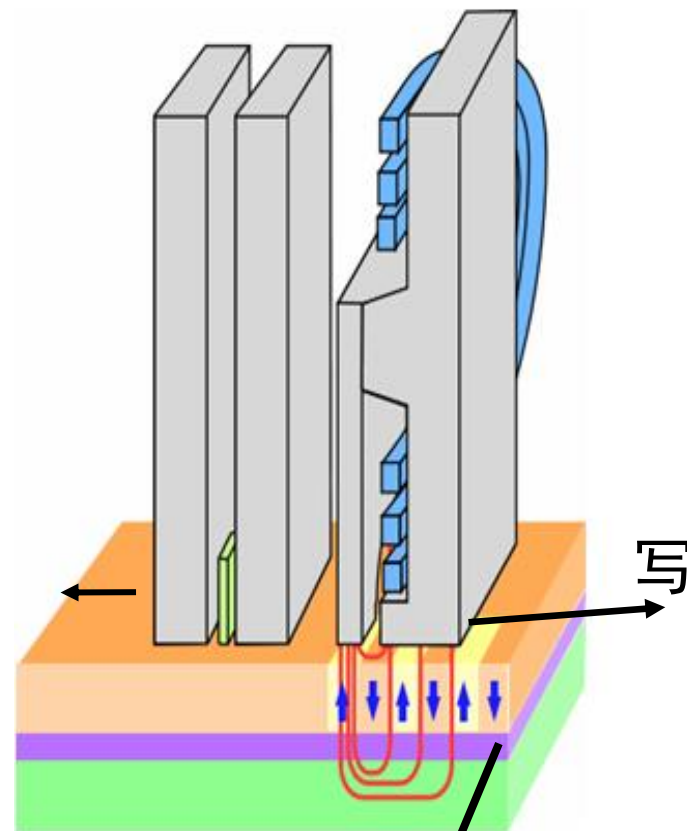
Longitudinal vs. Perpendicular Recording



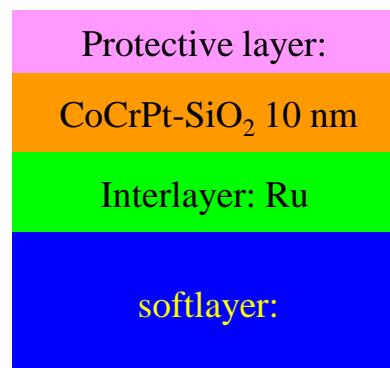
磁头简易原理



读



写

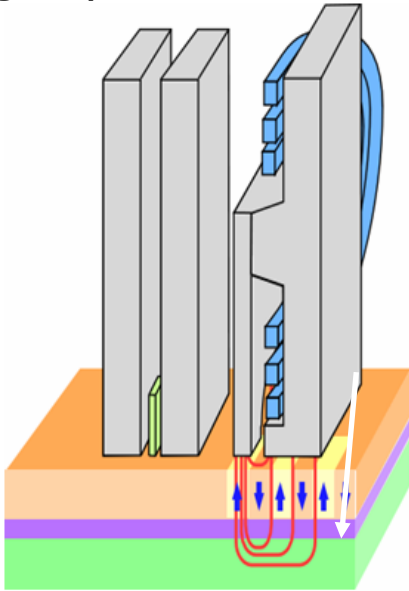


介质

Substrate

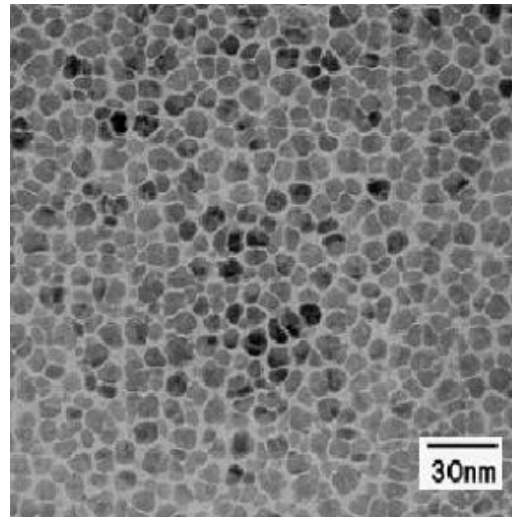
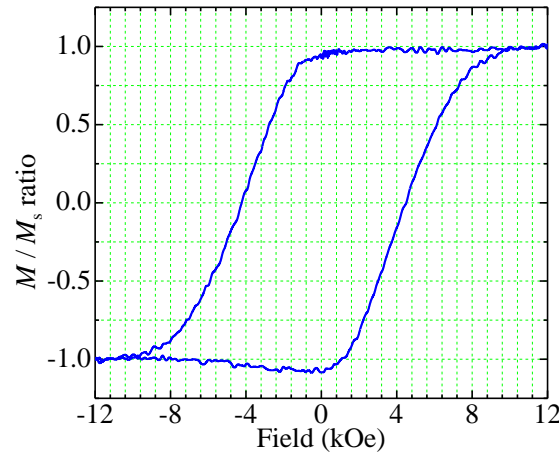
CoCrPt-SiO₂ perpendicular media

Single-pole Write head



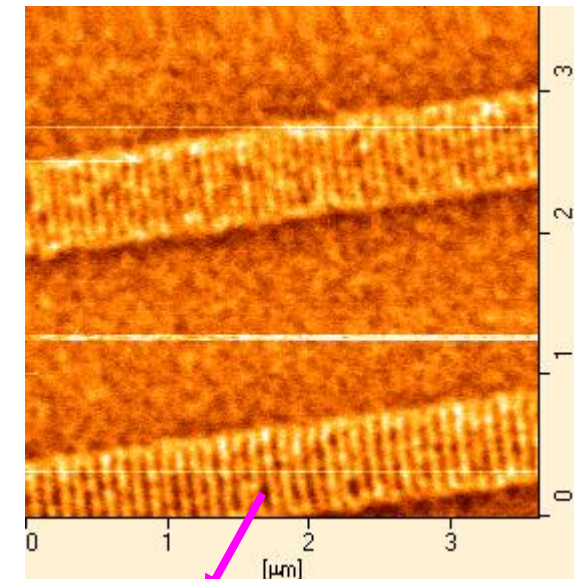
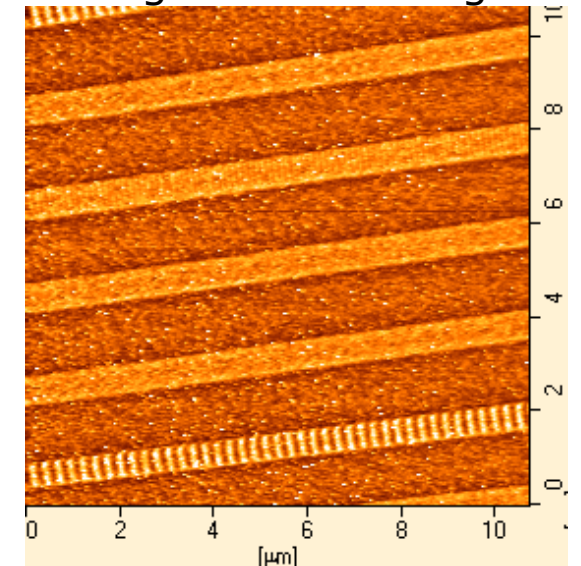
Substrate

A basic stack structure of PMR media



TEM image of recording layer

MFM images of recording bits



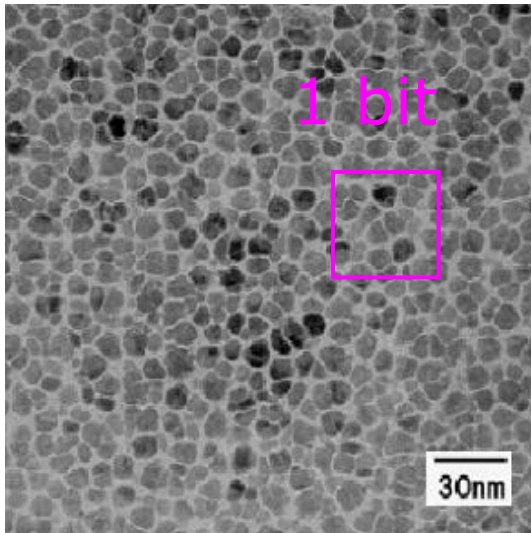
记录宽度: 40 nm¹⁹

超顺磁极限

如果进一步提高磁记录密度

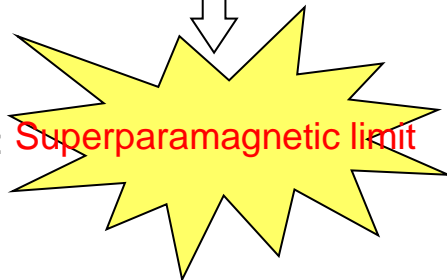
> 1Tb/in² (25×25 nm²)

Granular medium



- ✓ FePt granular media
- ✓ Exchange-coupled composite media
- ✓ Heat assisted magnetic recording
- ✓ Microwave assisted recording
- ✓ Tilted recording media

Decrease recording bit



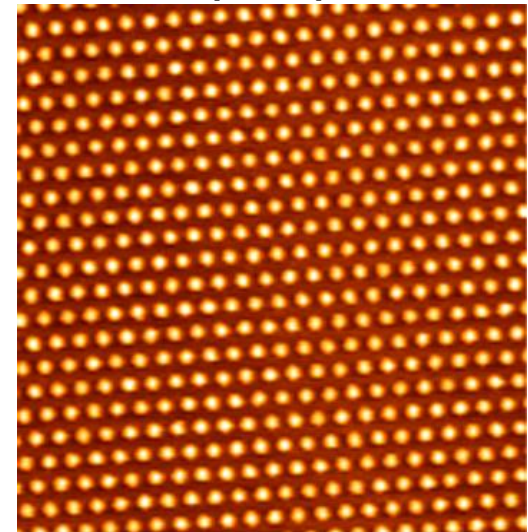
Signal to noise ratio:

Thermal stability:

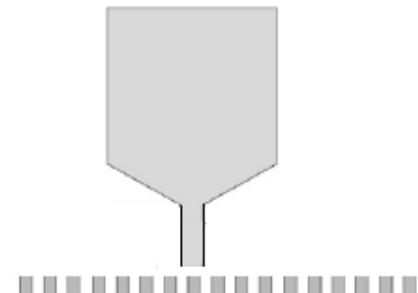
$$SNR \propto N^{1/2}$$

$$K_u V / k_B T \geq 40$$

Bit patterned media (BPM)



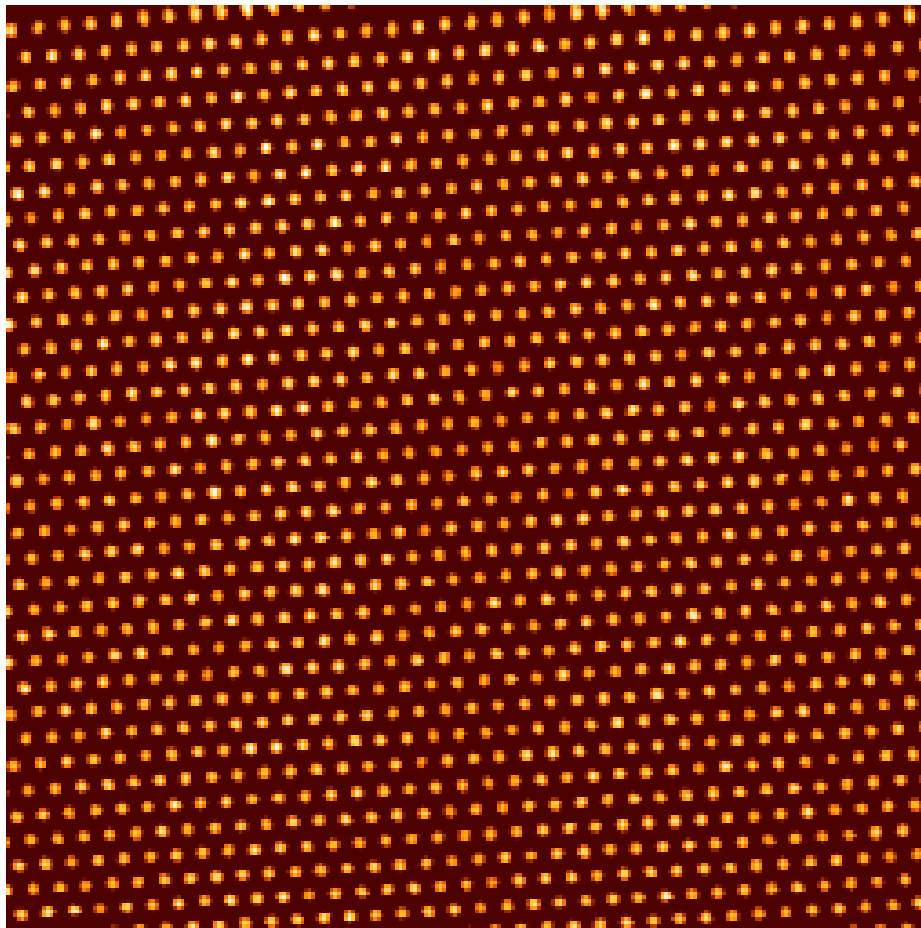
High $K_u V$



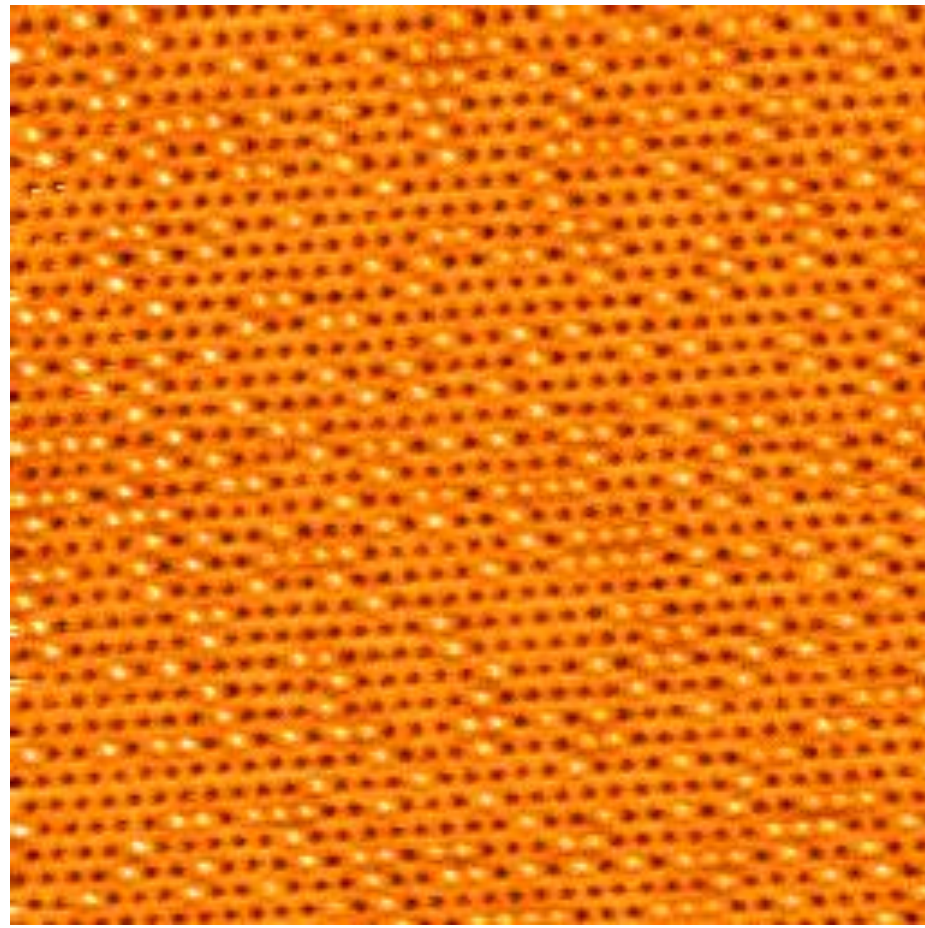
Increase the thermal stability

Dot size:20 nm

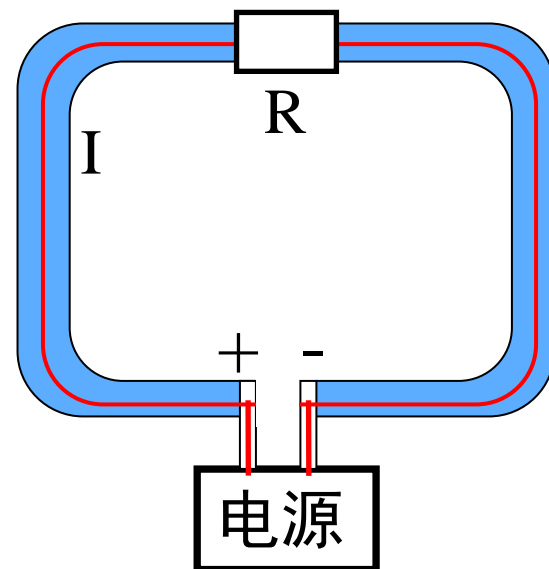
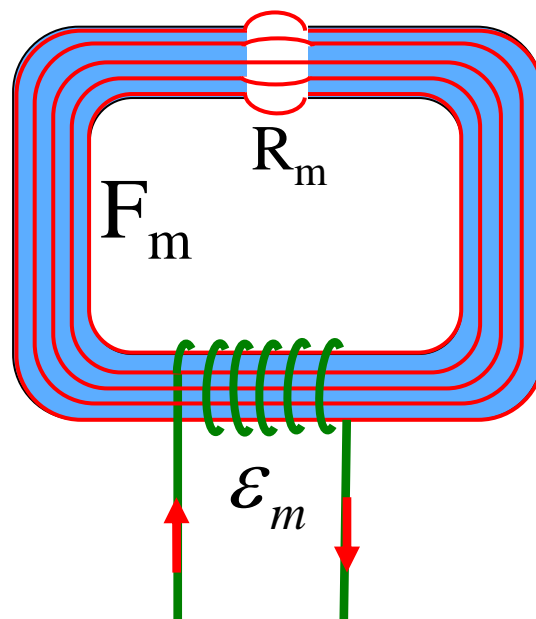
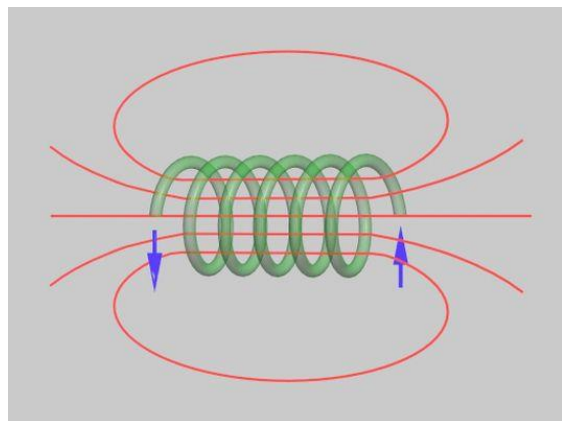
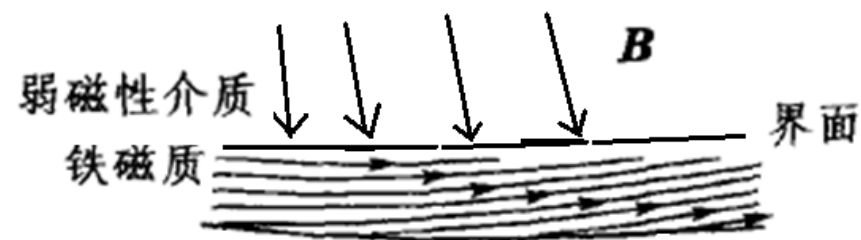
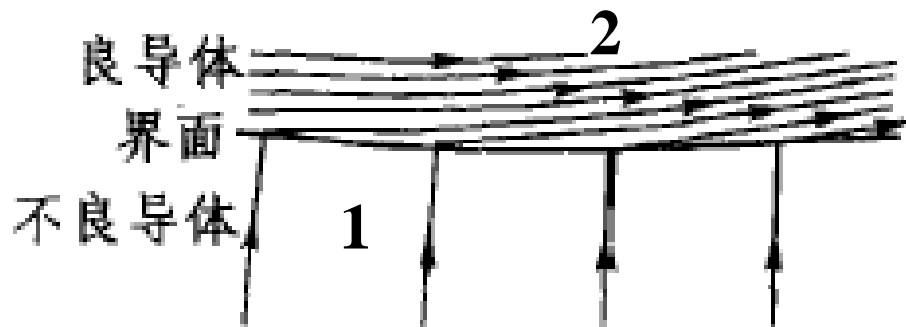
原子显微镜像



磁力像

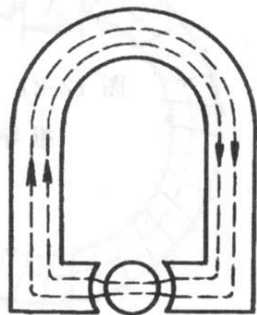


6-4 磁路定理

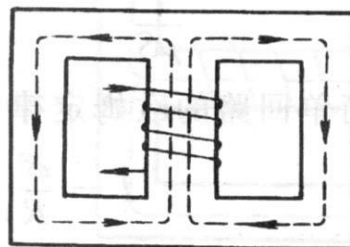


电路与磁路的相似性

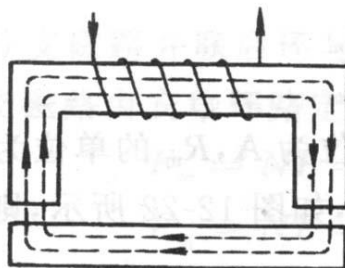
磁感应强度通过的区域称为**磁路**。



(a)



(b)



(c)



(d)

常用电工设备中的磁路图

磁路定理

- 闭合磁路的磁动势等于各段磁路的磁势降落之和（与电路类比）。

$$\mathcal{E}_m = \Phi_B \sum_i R_{mi}$$

$$\mathcal{E} = \sum_i IR_i \quad \text{电路中的欧姆定律}$$

- 它的理论依据是**磁场的安培环路定理**，只是将安培环路定理具体落实到与磁路的尺寸有关的磁阻与磁通量上。

安培环路定理：

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI_0 = \mathcal{E}_m$$

磁动势

各段磁路的
通量一样

磁阻 R_m

$$\sum_i H_i l_i = \sum_i \frac{B_i l_i}{\mu_0 \mu_i} = \sum_i \frac{\Phi_B l_i}{\mu_0 \mu_i S_i} = \Phi_B \sum_i \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i}$$

$$\mathcal{E}_m = \Phi_B \sum_i R_{mi}$$

闭合磁路的磁动势（磁通势）等于各段磁路上的磁势降落之和

磁路与电路的对比

电 路	电 动 势 \mathcal{E}	电 流 I	电 导 率 σ_i	电 阻 $R_i = \frac{l_i}{\sigma_i S_i}$	电 势 降 落 IR_i
磁 路	磁 通 势 $\mathcal{E}_m = NI_0$	磁 通 量 Φ_B	磁 导 率 $\mu_i \mu_0$	磁 阻 $R_{mi} = \frac{l_i}{\mu_i \mu_0 S_i}$	磁 势 降 落 $H_i l_i = \Phi_B \frac{l_i}{\mu_i \mu_0 S_i}$

磁路的串并联问题

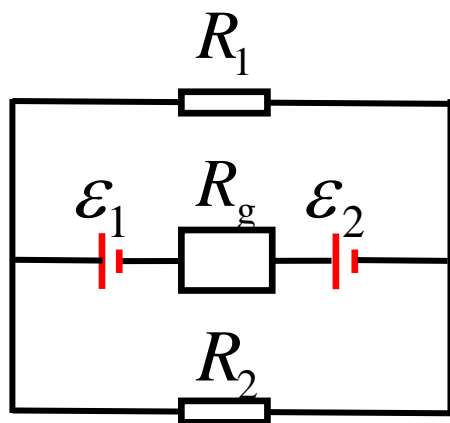
串联磁路：无分支磁路

$$\mathcal{E}_m = NI = \Phi(R_{m1} + R_{m2})$$

并联磁路：有分支磁路 和并联电路类似

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

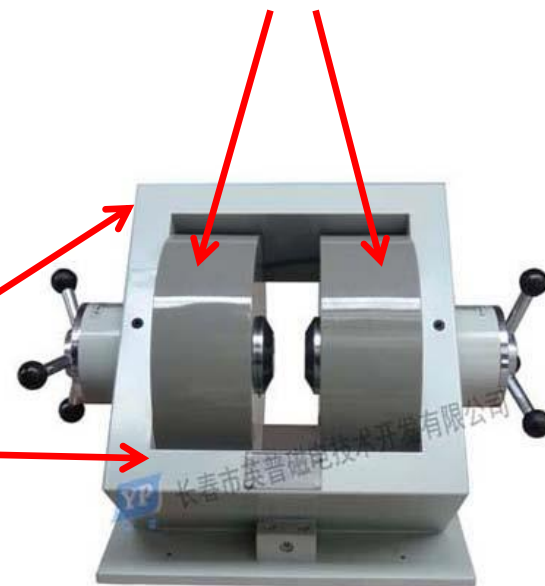
$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}}$$



等效磁路图

两磁动势串联

两磁路并联



磁屏蔽

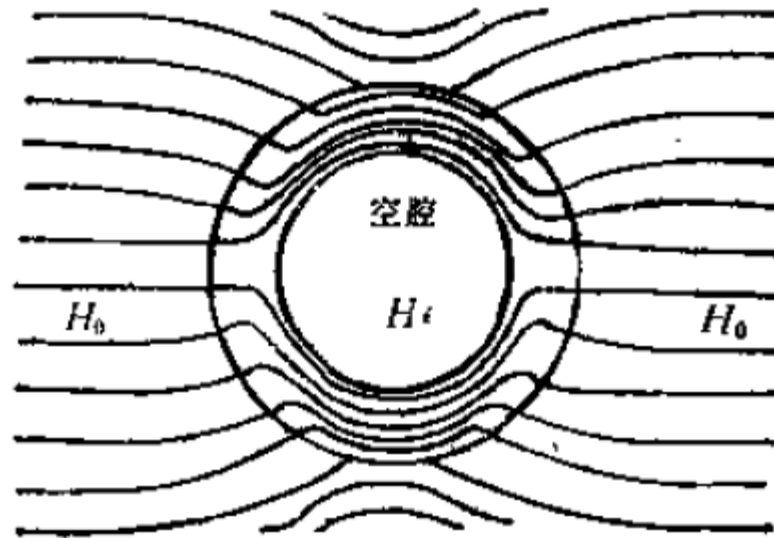
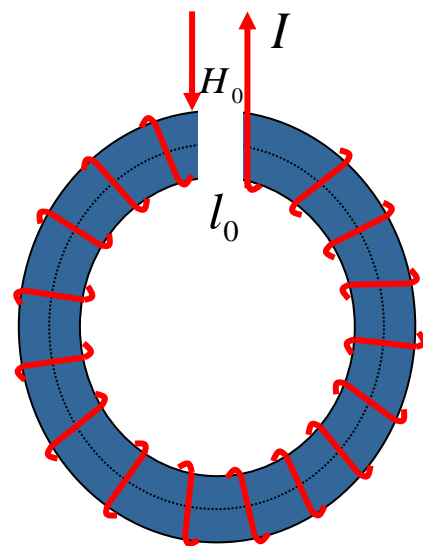


图 5-33 磁屏蔽

思考题：为何磁屏蔽效果没有电屏蔽效果好？
如何提高磁屏蔽效果？

例：如图所示，在通有电流 I ，共有 N 匝线圈的铁芯螺绕环中有一长为 l_0 的空气隙，设铁芯磁导率为 μ ，截面为 S ，长度为 l ，求气隙中的磁场 H_0



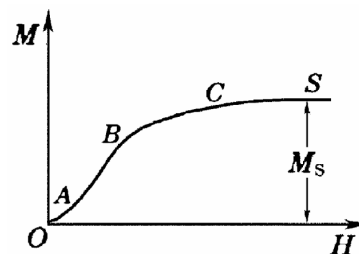
解：根据磁路定理：
$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu\mu_0 S} + \frac{l_0}{\mu_0 S}}$$

$$\Phi = BS = B_0 S \longrightarrow B_0 = \frac{\Phi}{S} \longrightarrow H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_0 S} = \frac{NI}{\frac{l}{\mu} + l_0}$$

- 空气隙越窄，磁场越强，且以倒数的形式增加
- 电流越大，磁场越强，以正比例的形式增加

前提：
 μ 是常数

实际上， H_0 在小电流范围内与 I 成正比！
原因是铁芯磁导率在铁芯磁化过程中并不是常数，在接近饱和磁化时 μ 越来越小。

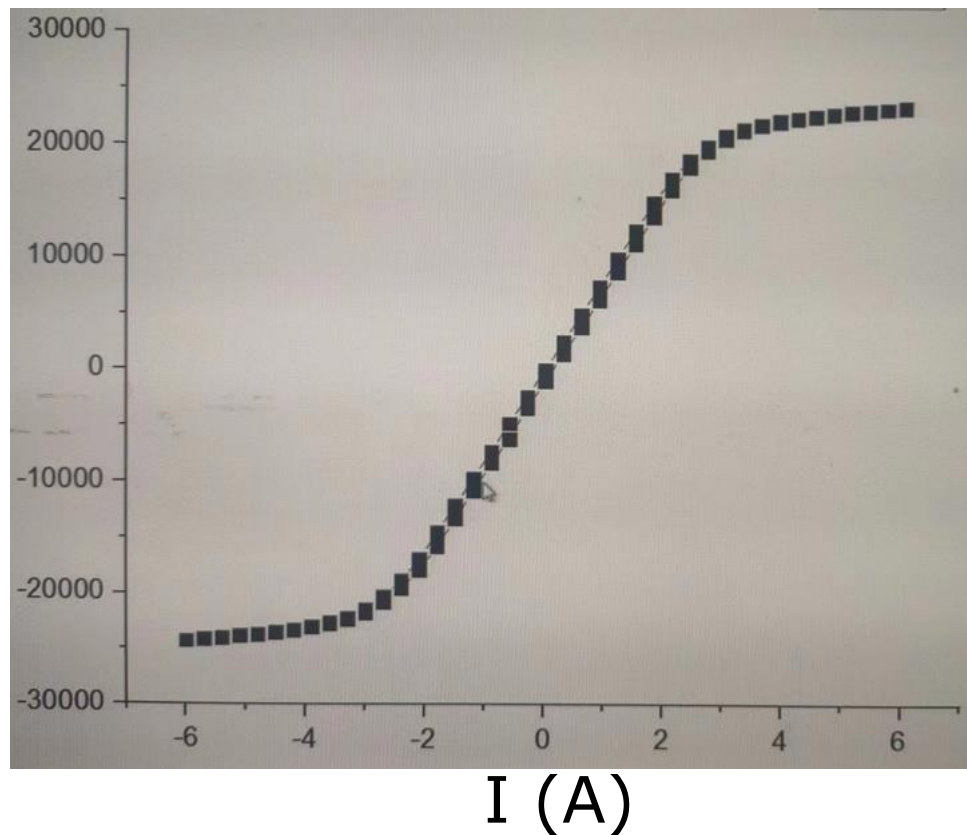


$$\begin{aligned}\mu &= 1 + \chi \\ &= 1 + \frac{M}{H}\end{aligned}$$

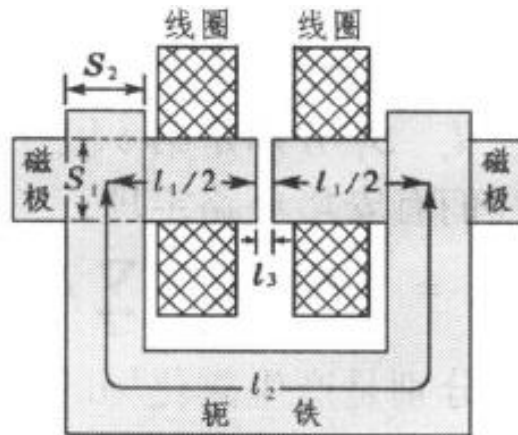
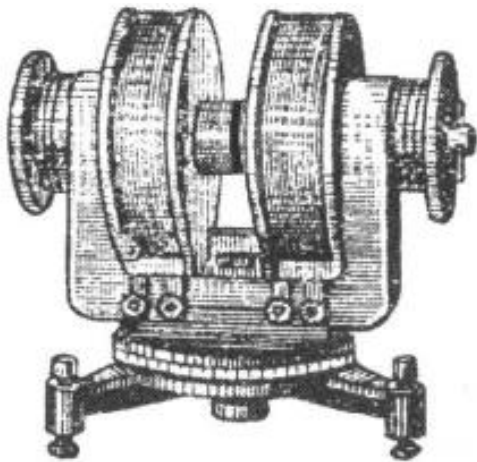
实验室电磁铁气隙磁场随电流 的变化关系



$H (\times 79.6 \text{ A/m})$



例：下面是一个U型电磁铁的外貌和磁路图，它的尺寸如下，磁极截面积 $S_1=0.01\text{m}^2$ ，长度 $l_1=0.6\text{m}$ ， $\mu_1=6000$ ，轭铁截面积 $S_2=0.02\text{m}^2$ ，长度 $l_2=1.4\text{m}$ ， $\mu_2=700$ ，气隙长度 l_3 在 $0\sim 0.05\text{m}$ 范围内可调，如果线圈匝数 $N=5000$ ，电流 I_0 最大为 4A ，问 $l_3=0.05\text{m}$ 和 0.01m 时最大磁场强度 H 值各多少？



解：根据磁路定理有

$$\Phi_B = \frac{NI_0}{\frac{l_1}{\mu_1\mu_0 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2\mu_0 S_2} + \frac{l_3}{\mu_3\mu_0 S_3}}$$

在气隙中： $\Phi_B = \mu_0 H S_3$ $\therefore H = \frac{NI_0 / S_3}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{S_3}}$

$$l_3 = 0.01\text{m}, H = 2.3 \times 10^4 \text{ Oe}$$

$$l_3 = 0.05\text{m}, H = 4.9 \times 10^3 \text{ Oe}$$

例：设螺绕环的平均长度为50cm,它的截面积是4cm²,用磁导率为 5×10^3 的材料做成,若环上绕线圈200匝。计算产生 4×10^{-4} Wb的磁通量需要的电流?若将环切去1mm,即留一空气隙,欲维持同样的磁通,则需要电流多大?

解：无气隙时：

磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu S} = 1.9 \times 10^5 \text{ A/Wb}$, **磁通势** $\mathcal{E}_m = \Phi R_m = NI_0$,解得 $I_0 = 0.38 \text{ A}$

有空气隙时：空气隙的磁阻为 $R'_m = \frac{l'}{\mu_0 S} = \frac{10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}} \text{ A/Wb} = 20 \times 10^5 \text{ A/Wb}$

环长度的微小变化可略而不计,它的磁阻与先前相同,即 $1.92 \times 10^5 \text{ A/Wb}$. 那么空气隙虽然只长1mm,它的磁阻却比铁环大近10倍,这时全部磁路的磁阻为

$$R_m + R'_m = (20 \times 10^5 + 1.92 \times 10^5) \text{ A/Wb} \approx 22 \times 10^5 \text{ A/Wb}$$

欲维持同样的磁通所需的磁通势为 $\mathcal{E}'_m = \Phi_m (R_m + R'_m) = 880 \text{ A}$

所需电流为 $I' = \frac{\mathcal{E}'_m}{N} = 4.4 \text{ A}$