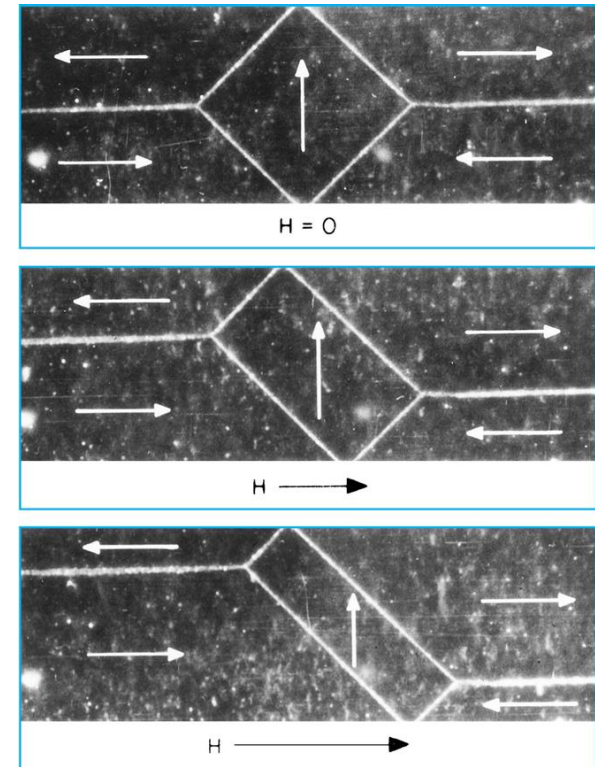


Magnetic Properties

คุณสมบัติทางแม่เหล็ก

ISSUES TO ADDRESS...

- How do we measure magnetic properties?
- What are the atomic reasons for magnetism?
- How are magnetic material classified?
- Materials design for magnetic storage.



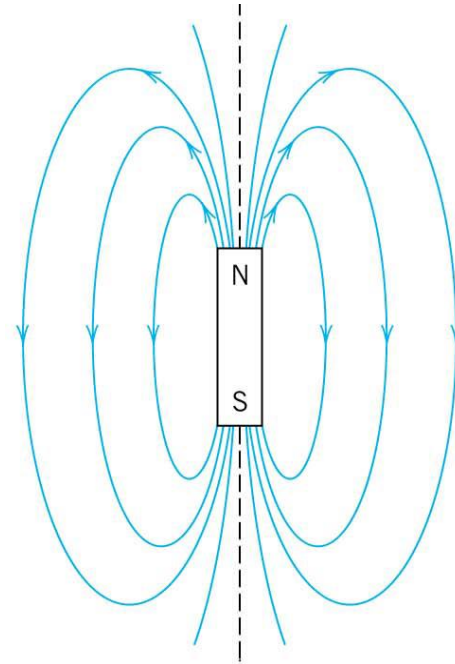
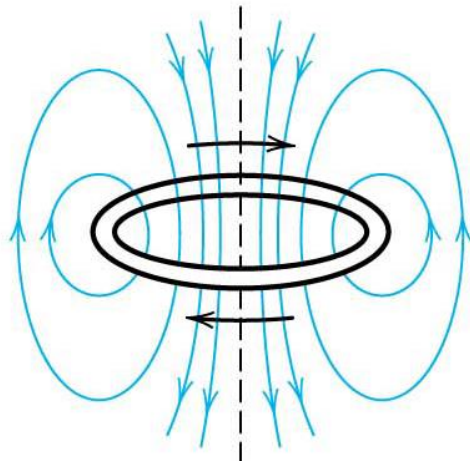
Introduction

ในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับจุดกำเนิดของสถานะแม่เหล็ก (magnetism) ในวัสดุชนิด ferromagnetic จากนั้นก็จะกล่าวถึงหน่วยพื้นฐานบางชนิดของแม่เหล็กและความสัมพันธ์ระหว่างสถานะแม่เหล็ก และวัสดุแม่เหล็ก vector สนามแม่เหล็กชนิดต่างๆ และพารามิเตอร์ เช่น diamagnetism, paramagnetism, ferromagnetism และ ferrimagnetism เป็นต้น และชนิดของวัสดุแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ของ superconductivity

BASIC CONCEPT

- Magnetic Dipoles

แรงแม่เหล็ก (Magnetic forces) สามารถเกิดขึ้นได้โดยการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในวัสดุ ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของเส้นทางของสนามแม่เหล็ก



- คำ magnetic dipole สามารถพบได้ในวัสดุแม่เหล็กทุกชนิด
magnetic dipole moment แสดงดังลูกศรในรูปข้างล่าง โดย
magnetic dipole ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากสนามแม่เหล็ก

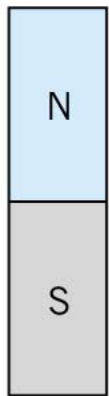
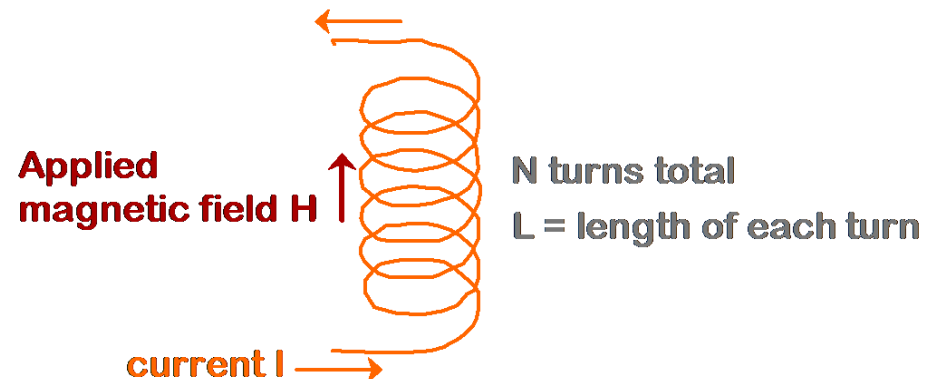


FIGURE 20.2 The magnetic moment as designated by an arrow.

Magnetic field vectors

เมื่อมีการสร้างสนามแม่เหล็กจาก
ภายนอก ซึ่งเรียกว่า magnetic
field strength : H ตัวอย่างเช่น การ
สร้างสนามแม่เหล็กโดยขดลวด
ทรงกระบอก หรือ solenoid ซึ่ง
ประกอบด้วยจำนวนรอบของขดลวด
 N และความยาว l โดยมีกระแสไฟฟ้า
ไหลผ่านเท่ากับ I ค่าของความเข้ม
ของสนามแม่เหล็ก H (A/m) มีค่า
เท่ากับ

$$H = \frac{NI}{l}$$



Magnetic induction (การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก) or magnetic flux density (ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก หรือฟลักซ์แม่เหล็ก)

ถ้านำแท่งเหล็กธรรมดาใส่ลงในขดลวด จะพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ภายนอกขดลวด solenoid จะมีความเข้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กนั้นถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดด้วย

ความเข้มใหม่ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะเท่ากับผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวด solenoid : H กับที่ เกิดขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กที่ถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดนั้น โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่นี้เราเรียกว่า Magnetic induction : B โดยมีหน่วยเป็น teslas หรือ webers per square meter (Wb/m^2) โดยทั้ง H และ B เป็นสนามเวกเตอร์

- ค่าโมเมนต์ของแม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตรที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กที่ถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวด จะเรียกว่า **magnetization : สภาพแม่เหล็ก (intensity of magnetizations)** ซึ่งแทนด้วยค่า M

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

μ_0 = ค่า permeability ในสถานะสุญญากาศ = $4\pi \times 10^{-7}$ (T.m/A)
(ค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กของสุญญากาศ)

B = magnetic induction (Teslas : T)

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (A/m)

M = magnetization (A/m)

Magnetic permeability

เมื่อนำเอาวัสดุ ferromagnetic ไปวางในสนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กนั้นมีความเข้มเพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นนี้ อาจจะบอกด้วยค่าของ magnetic permeability, μ ซึ่งถูกนิยามไว้ดังนี้

$$B = \mu H$$

ในสถานะสุญญากาศ

$$B_0 = \mu_0 H$$

ค่า μ_0 คือค่า permeability of a vacuum ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (1.257×10^{-6}) H/m

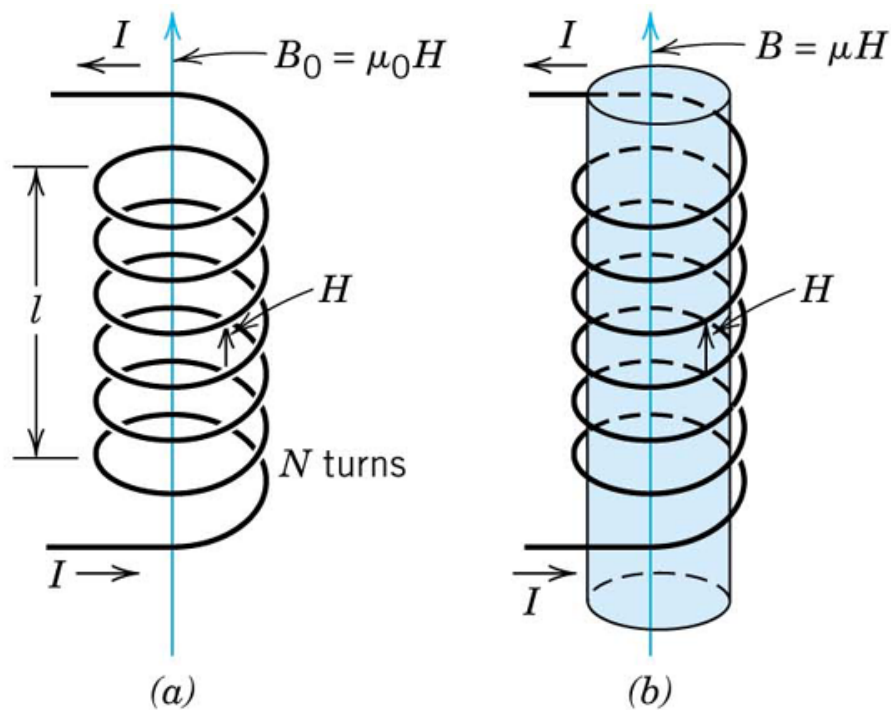


FIGURE 20.3 (a) The magnetic field H as generated by a cylindrical coil is dependent on the current I , the number of turns N , and the coil length l , according to Equation 20.1. The magnetic flux density B_0 in the presence of a vacuum is equal to $\mu_0 H$, where μ_0 is the permeability of a vacuum, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. (b) The magnetic flux density B within a solid material is equal to μH , where μ is the permeability of the solid material. (Adapted from A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976.)

- ปริมาณค่าความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์
relative permeability, μ_r
คืออัตราส่วนระหว่าง μ และ μ_0

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

• ค่าความไวต่อสภาพแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

เนื่องจากค่า magnetization (M) จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป (H) ดังนั้นสมการเขียนได้ดังนี้

$$M = \chi_m H$$

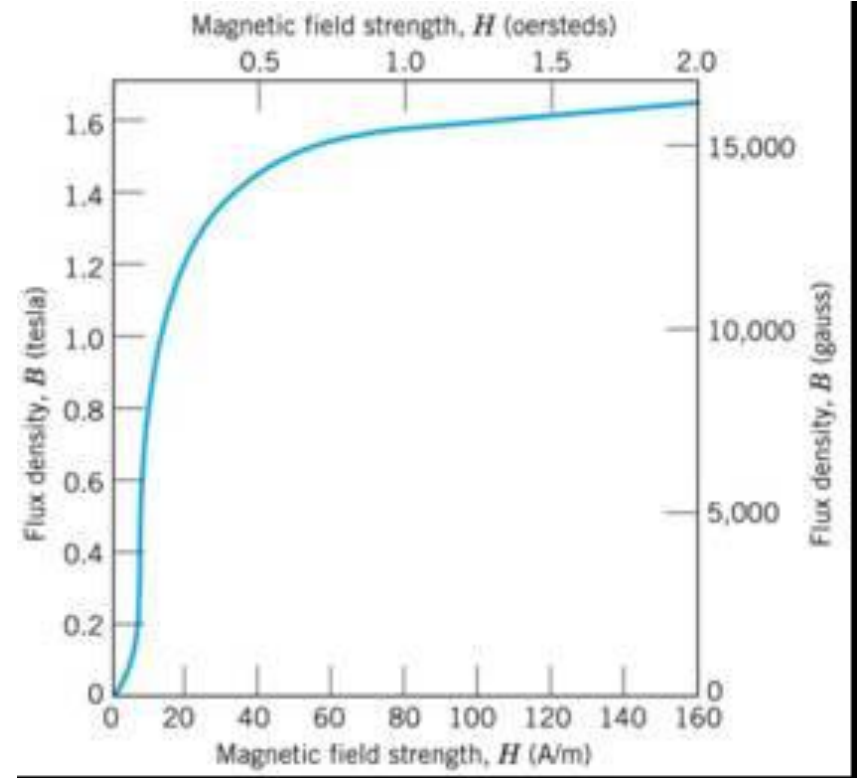
ค่า χ_m คือค่า magnetic susceptibility ซึ่งไม่มีหน่วย โดยมีค่าเท่ากับ

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

Quiz

อัลลอยด์ผสมของ Si - Fe มีค่า
ความสัมพันธ์ระหว่าง B - H เมื่อสอด
แท่งอัลลอยด์ลงในขดลวดความยาว 15
ซม. จำนวนรอบเท่ากับ 70 รอบ และมี
กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.25 A. ดังรูป
ข้างล่าง จงหาค่าดังต่อไปนี้

- 1. ค่า สนามแม่เหล็ก (Flux density), B
- 2. ค่า Permeability, μ และ ค่า Susceptibility, χ_m
- 3. ค่า Magnetization, M



Origins of magnetic moments

- สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดตัวนำสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบๆลวดตัวนำนั้น ในทำนองเดียวกันสภาวะแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุก็เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนและการเคลื่อนที่รอบ nuclei และจะทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้นดังรูป

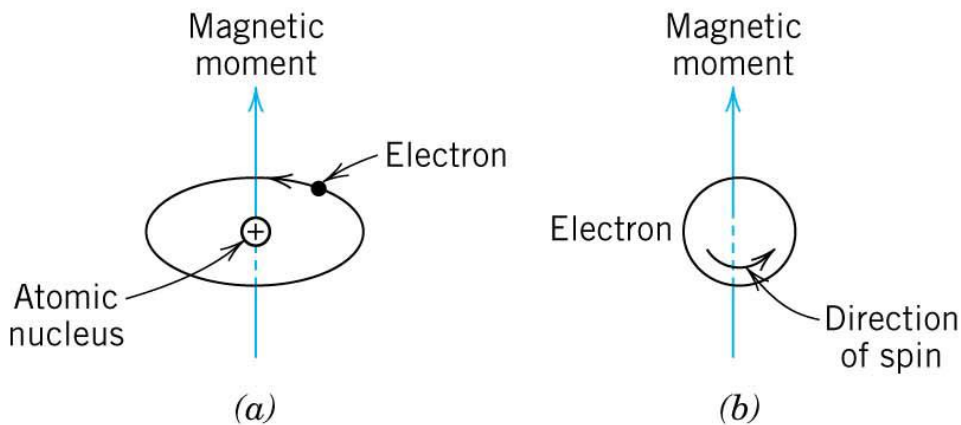


FIGURE 20.4 Demonstration of the magnetic moment associated with (a) an orbiting electron and (b) a spinning electron.

Borh magneton

- โดยทั่วไปค่าของ magnetic moment อาจจะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Bohr magneton, μ_B ซึ่งมีค่าเท่ากับ
$$= \frac{qh}{4\pi m_e} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A-m}^2$$

ซึ่งแต่ละอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมจะมีค่า magnetic moment เป็นทั้งค่าบวก (หมุนขึ้น) และลบ (หมุนลง)

Diamagnetism and Paramagnetism

- Diamagnetism

เป็นคุณสมบัติของแม่เหล็กที่อ่อนแอที่สุด ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบที่ไม่ถาวร (nonpermanent) หรือถาวร (permanent) ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่ออะตอมของวัสดุ จะทำให้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมเกิดการเสียสมดุลเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเล็กๆ ขึ้นในอะตอม ซึ่งค่าของ magnetic moment มีค่าน้อยมากและอยู่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก จึงมีผลทำให้เกิดผลของแม่เหล็กในทางลบซึ่งเรียกว่า diamagnetism โดยค่าของ volume susceptibility, χ_m มีค่าน้อยมากประมาณ -10^{-5}

● Paramagnetism

วัสดุสามารถแสดง magnetic susceptibility ในเชิงบวกเล็กน้อย เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก จะเรียกว่า paramagnetism และสถานะแม่เหล็กนี้จะหายไปเมื่อวัสดุนั้นถูกนำออกจากสนามแม่เหล็ก

วัสดุที่มีสถานะแม่เหล็กแบบ paramagnetism นี้มักมีค่า ความไวต่อสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วง $10^{-6} - 10^{-2}$ ซึ่งสถานะแม่เหล็กแบบนี้จะเกิดได้ เนื่องจากการเรียงตัวของ magnetic dipole moment ของอะตอมเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ทิศทางการเรียงตัวจะเกิดความไม่เป็นระเบียบมาก ขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลทำให้สถานะแม่เหล็กแบบ paramagnetism นี้ลดลง

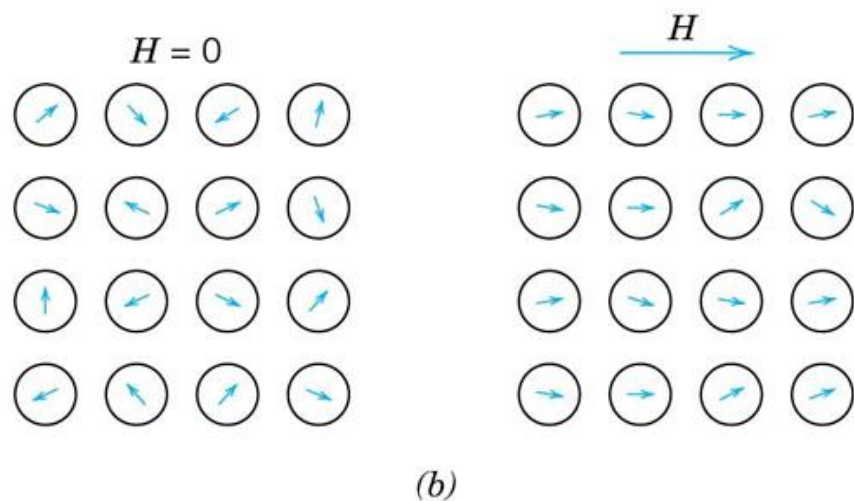
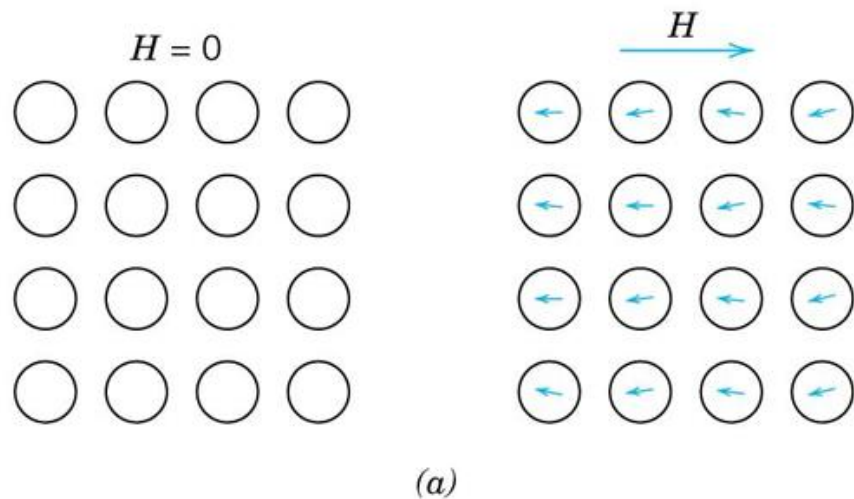


FIGURE 20.5 (a) The atomic dipole configuration for a diamagnetic material with and without a magnetic field. In the absence of an external field, no dipoles exist; in the presence of a field, dipoles are induced that are aligned opposite to the field direction. (b) Atomic dipole configuration with and without an external magnetic field for a paramagnetic material.

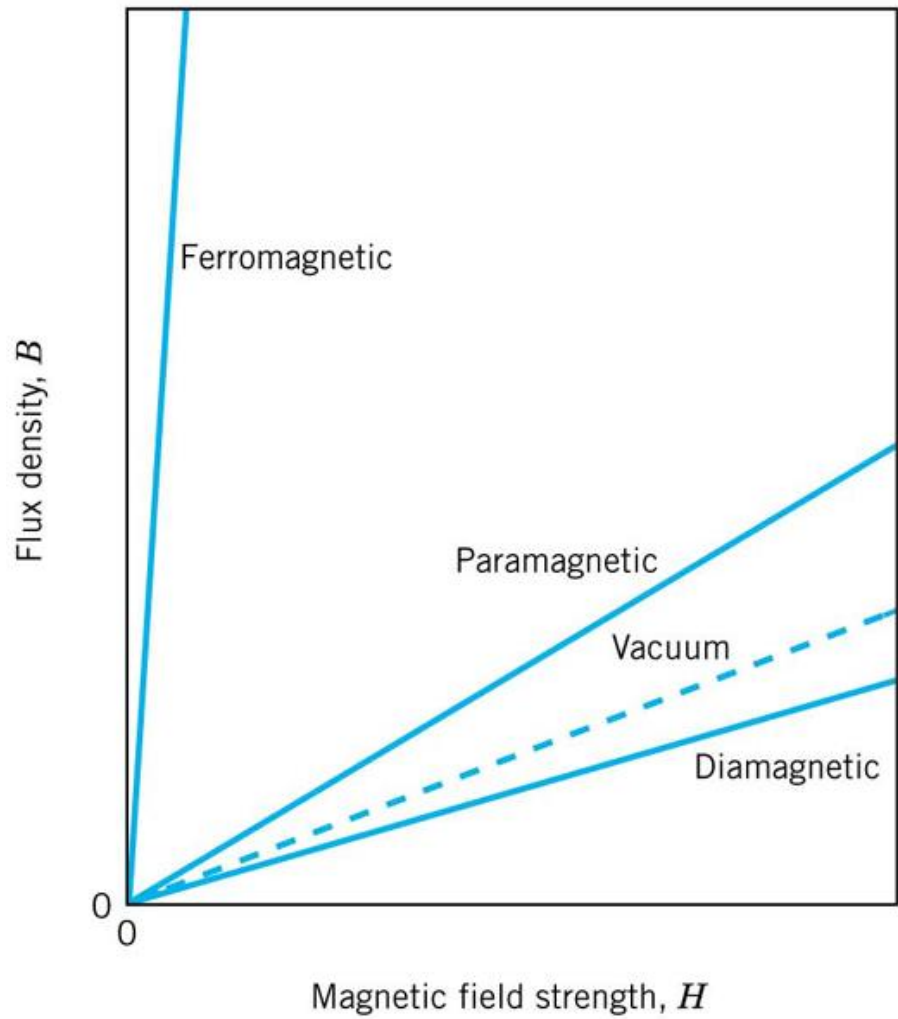


FIGURE 20.6 Schematic representation of the flux density B versus the magnetic field strength H for diamagnetic, paramagnetic, and ferromagnetic materials.

Table 20.2 Room-Temperature Magnetic Susceptibilities for Diamagnetic and Paramagnetic Materials

<u><i>Diamagnetics</i></u>		<u><i>Paramagnetics</i></u>	
	<i>Susceptibility</i>		<i>Susceptibility</i>
	χ_m (volume)		χ_m (volume)
<u><i>Material</i></u>	<u>(SI units)</u>	<u><i>Material</i></u>	<u>(SI units)</u>
Aluminum oxide	-1.81×10^{-5}	Aluminum	2.07×10^{-5}
Copper	-0.96×10^{-5}	Chromium	3.13×10^{-4}
Gold	-3.44×10^{-5}	Chromium chloride	1.51×10^{-3}
Mercury	-2.85×10^{-5}	Manganese sulfate	3.70×10^{-3}
Silicon	-0.41×10^{-5}	Molybdenum	1.19×10^{-4}
Silver	-2.38×10^{-5}	Sodium	8.48×10^{-6}
Sodium chloride	-1.41×10^{-5}	Titanium	1.81×10^{-4}
Zinc	-1.56×10^{-5}	Zirconium	1.09×10^{-4}

Ferromagnetism

- เป็นสถานะแม่เหล็กที่สามารถคงอยู่ได้ แม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก หรือทำให้หมดสภาพไปได้ตามต้องการ สถานะแม่เหล็กแบบนี้จึงมีความสำคัญต่องานด้านวิศวกรรม วัสดุที่สามารถแสดงสถานะแม่เหล็กแบบนี้ได้ เช่น เหล็ก (BCC α ferrite) โคบอลต์ นิกเกิล และธาตุจำพวก rare earth เช่น gadolinium (Gd) เป็นต้น
- ค่า magnetic susceptibility มีค่าสูงถึง 10^6
- ใน ferromagnetism ค่า $H \ll M$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$B = \mu_0 M$$

Antiferromagnetism and Ferrimagnetism

- Antiferromagnetism

เป็นสถานะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่ง ที่เกิดขึ้นกับวัสดุบางชนิด กล่าวคือ magnetic dipoles ของอะตอมของวัสดุที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ จะเรียงตัวในทิศทางที่ตรงข้ามกันเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่ง Manganese Oxide (MnO) เป็นหนึ่งในวัสดุเซรามิกที่แสดงคุณสมบัติเช่นนี้

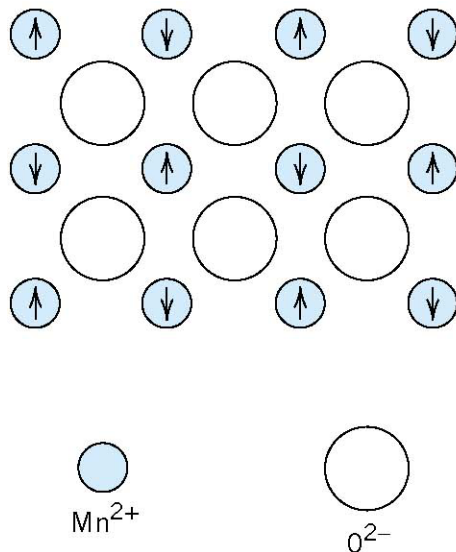


FIGURE 20.8 Schematic representation of antiparallel alignment of spin magnetic moments for antiferromagnetic manganese oxide.

• Ferrimagnetism

วัสดุเซรามิกบางชนิดจะประกอบไปด้วยไอออนต่างชนิดกันซึ่งมี magnetic moment มากน้อยแตกต่างกัน ดังนั้น เมื่อ magnetic moment เหล่านี้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกัน magnetic moment เหล่านี้จะไม่หักล้างกันหมด แต่จะยังคงมีค่า magnetic moment สุทธิในทิศทางหนึ่ง จึงทำให้วัสดุเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติสถานะแม่เหล็กได้ เราเรียกวัสดุเหล่านี้ว่า cubic ferrite เช่น Magnetite (Fe_3O_4)

FIGURE 20.9 Schematic diagram showing the spin magnetic moment configuration for Fe^{2+} and Fe^{3+} ions in Fe_3O_4 . (From Richard A. Flinn and Paul K. Trojan, *Engineering Materials and Their Applications*, 4th edition. Copyright © 1990 by John Wiley & Sons, Inc. Adapted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

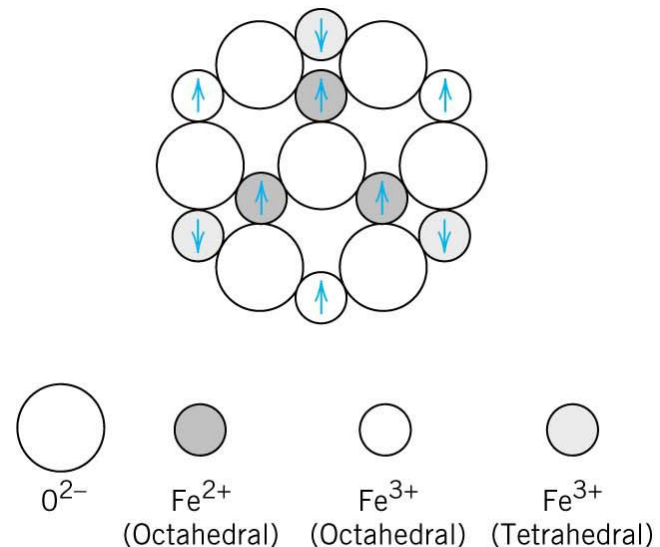


Table 20.4 Net Magnetic Moments for Six Cations

*Net Spin
Magnetic Moment
(Bohr magnetons)*

Cation

Fe³⁺

5

Fe²⁺

4

Mn²⁺

5

Co²⁺

3

Ni²⁺

2

Cu²⁺

1

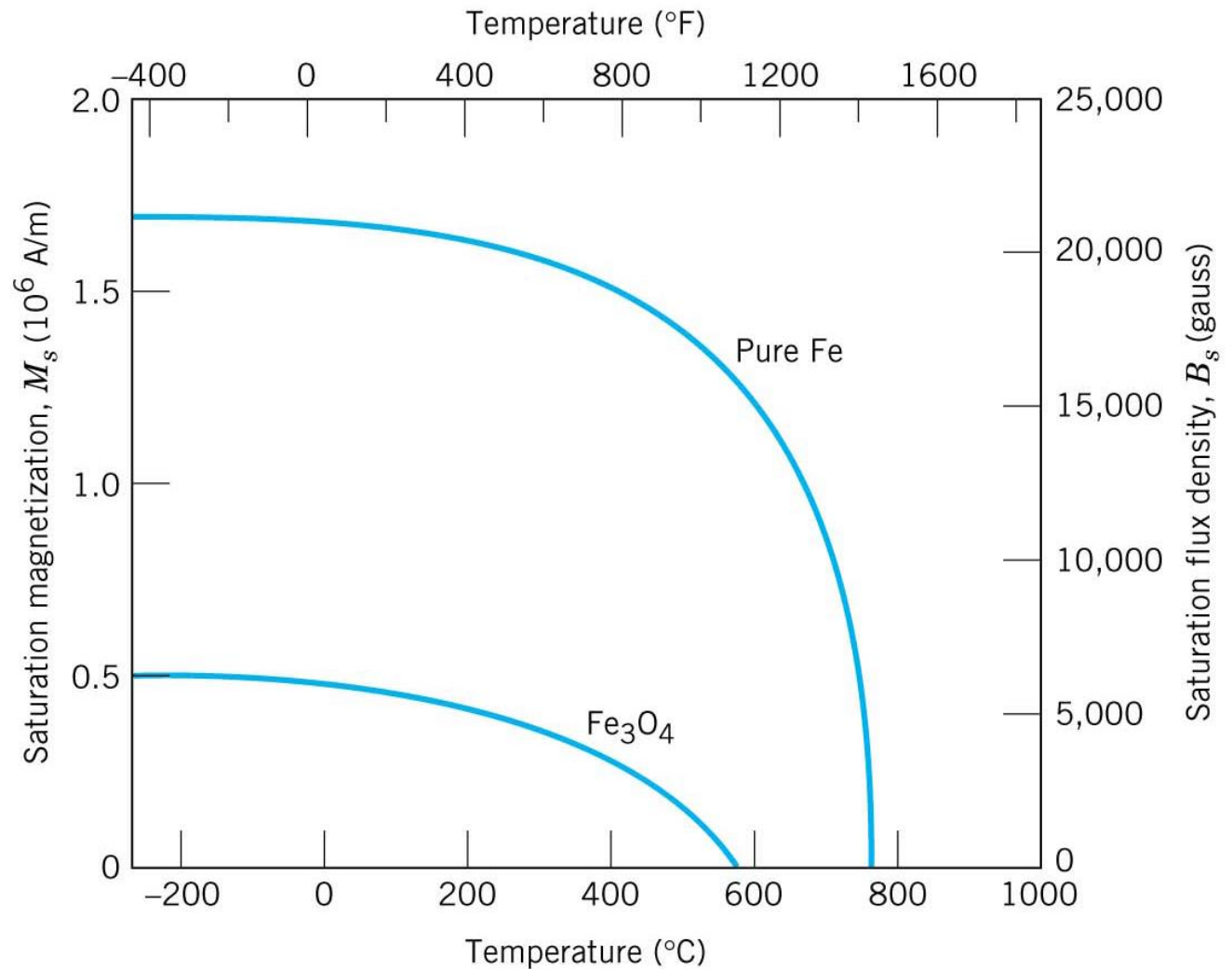
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติแม่เหล็ก

(THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON MAGNETIC BEHAVIOR)

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของอะตอม ที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 K

พลังงานความร้อนจะเป็นสาเหตุทำให้วัสดุจำพวก ferromagnetic มีการจัดเรียงตัวเกิดการเปลี่ยนแปลง ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ Curie, T_c ก็จะมีผลทำให้สถานะแม่เหล็กหมดสภาพไปอย่างสิ้นเชิง และจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็น paramagnetism แทน แต่เมื่อถูกนำมาทำให้เย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิ Curie ตัว magnetic domains จะเรียงตัวใหม่ และกลับมาเป็นสถานะแม่เหล็กอีกครั้ง

FIGURE 20.10 Plot of saturation magnetization as a function of temperature for iron and Fe_3O_4 . [Adapted from J. Smit and H. P. J. Wijn, *Ferrites*. Copyright © 1959 by N. V. Philips Gloeilampenfabrieken, Eindhoven (Holland). Reprinted by permission.]



Domains and Hysteresis

- สำหรับวัสดุ ferromagnetic หรือ ferrimagnetic ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ curie นั้น magnetic dipole moment จะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีทิศทางที่ขนานกันในบริเวณเล็กๆหนึ่งเรียกว่า magnetic domains

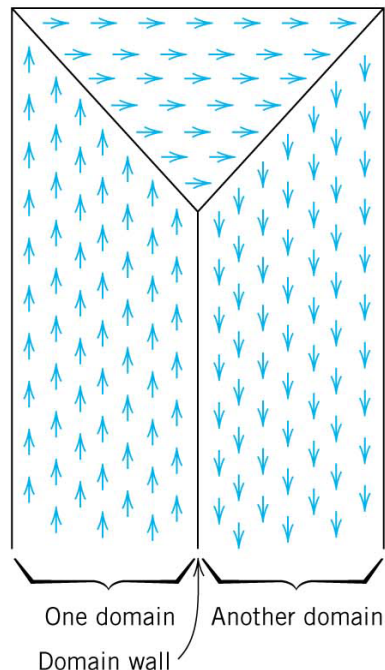


FIGURE 20.11 Schematic depiction of domains in a ferromagnetic or ferrimagnetic material; arrows represent atomic magnetic dipoles. Within each domain, all dipoles are aligned, whereas the direction of alignment varies from one domain to another.

ในบางครั้งวัสดุนั้นอาจจะยังไม่สามารถแสดงสภาพแม่เหล็กได้
เนื่องจากแต่ละ domains ยังมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบ
ทำให้ผลรวมสุทธิของ magnetic moment ของวัสดุทั้งชิ้นมีค่าน้อยหรือ
เป็นศูนย์

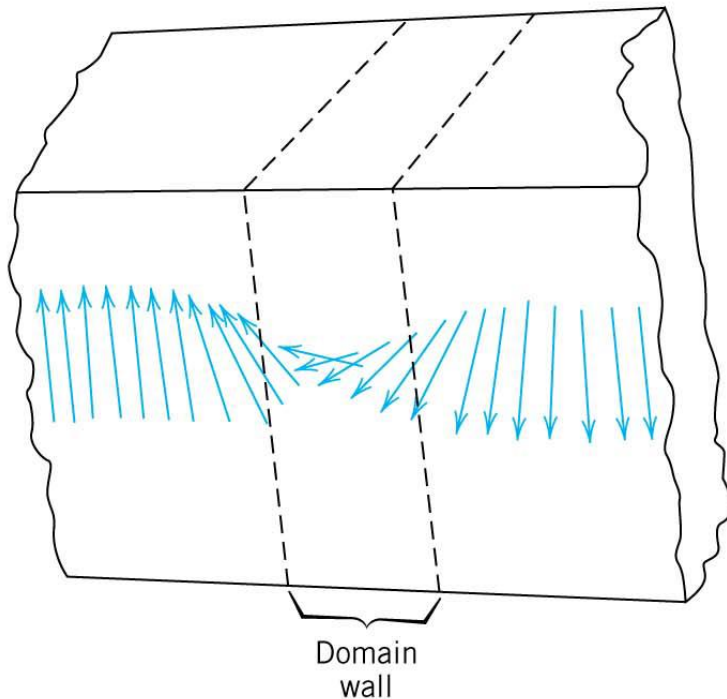


FIGURE 20.12 The gradual change in magnetic dipole orientation across a domain wall. (From W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd edition. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป magnetic domains จะพยายามจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกได้โดยการเคลื่อนที่และการหมุนของผนัง domains

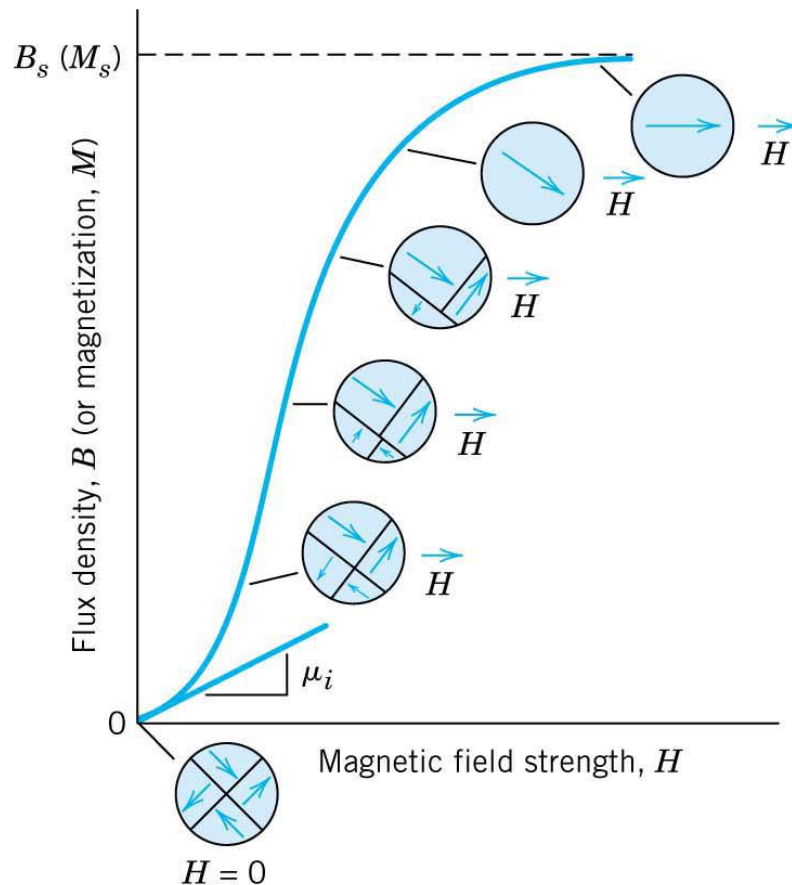
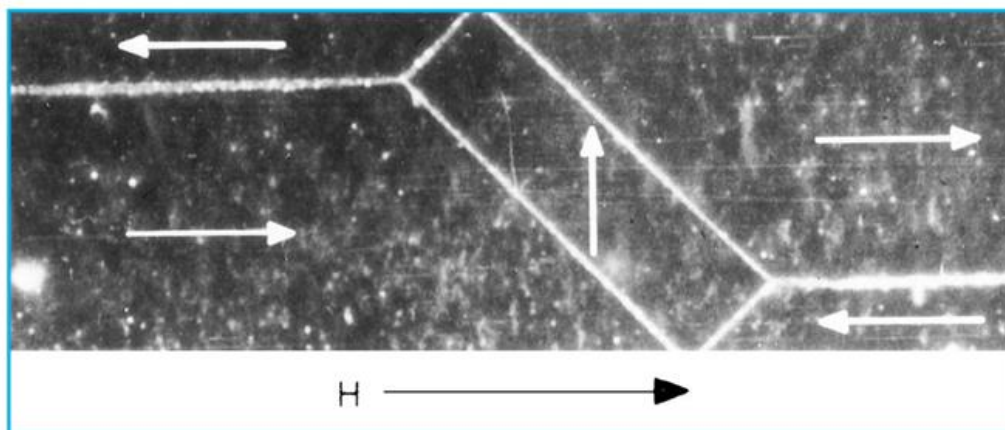
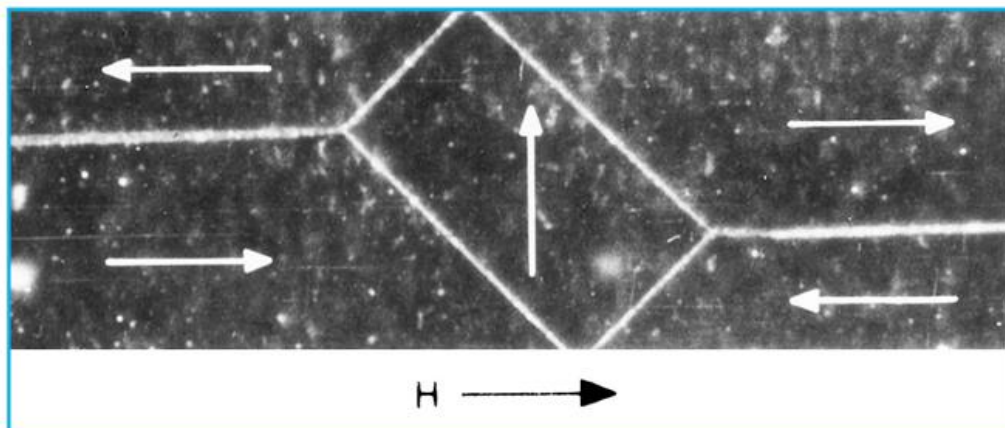
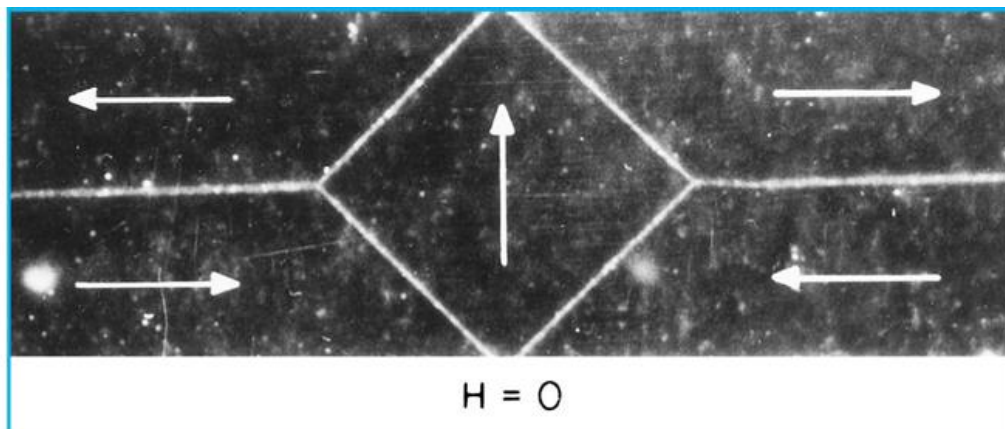
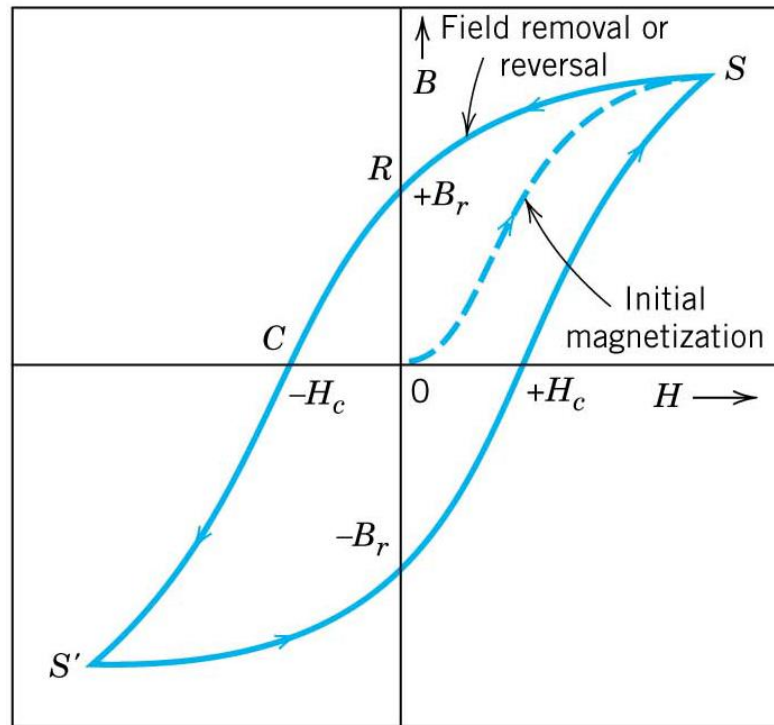


FIGURE 20.13 The B -versus- H behavior for a ferromagnetic or ferrimagnetic material that was initially unmagnetized. Domain configurations during several stages of magnetization are represented. Saturation flux density B_s , magnetization M_s , and initial permeability μ_i are also indicated. (Adapted from O. H. Wyatt and D. Dew-Hughes, *Metals, Ceramics and Polymers*, Cambridge University Press, 1974.)



• Hysteresis



เมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในโลหะจำพวก ferromagnetic เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า magnetic induction เพิ่มขึ้น (ตามเส้นโค้ง O -S) จนกระทั่งจนถึงจุดอิ่มตัวที่จุด S และเมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกลงถึงศูนย์ เส้นโค้งตามปริมาณ magnetic induction จะไม่กลับมาในแนวเส้นโค้งเดิม แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นโค้ง S -R ซึ่งสังเกตได้ว่า โลหะจะยังคงแสดงสถานะแม่เหล็กอยู่แม้จะเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกก็ตาม โดยแสดงค่า magnetic induction เท่ากับ B_r ที่จุด R จึงถูกเรียกว่า **remanent induction**

ค่า magnetic induction ของโลหะ จะลดลงเป็นศูนย์หรือ
หมดสถานะแม่เหล็กอีกครั้งเมื่อใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกัน
ข้ามในปริมาณความเข้มเท่ากับ H_c ที่จุด C ซึ่งเรียกว่า **coercive
force** ถ้าให้สนามแม่เหล็กกลับทิศหรือติดลบมากขึ้น ก็จะทำให้
โลหะมีค่า magnetic induction เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้ง C - S' ใน
ทิศทางตรงกันข้ามจากเดิม ซึ่งการได้ loop ที่สมบูรณ์ 1 รอบ
เรียกว่า **hysteresis**

Magnetic Materials

Soft Magnetic Materials เป็นวัสดุที่สามารถทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กหรือหมดสถานะแม่เหล็กได้ง่าย ซึ่งจะมีค่า hysteresis loop ที่เรียวและแคบ ซึ่งมีค่า coercive ค่อนข้างต่ำ ส่วนมากจะใช้ในการทำแกนหม้อแปลงมอเตอร์ และเครื่องปั่นไฟฟ้า

Hard Magnetic Materials หรือแม่เหล็กแบบถาวร เป็นวัสดุที่ทำให้เป็นแม่เหล็กหรือหมดสภาพแม่เหล็กได้ยาก ซึ่งจะมีค่า remanent magnetic induction (B_r) สูง และค่า coercive force (H_c) มาก

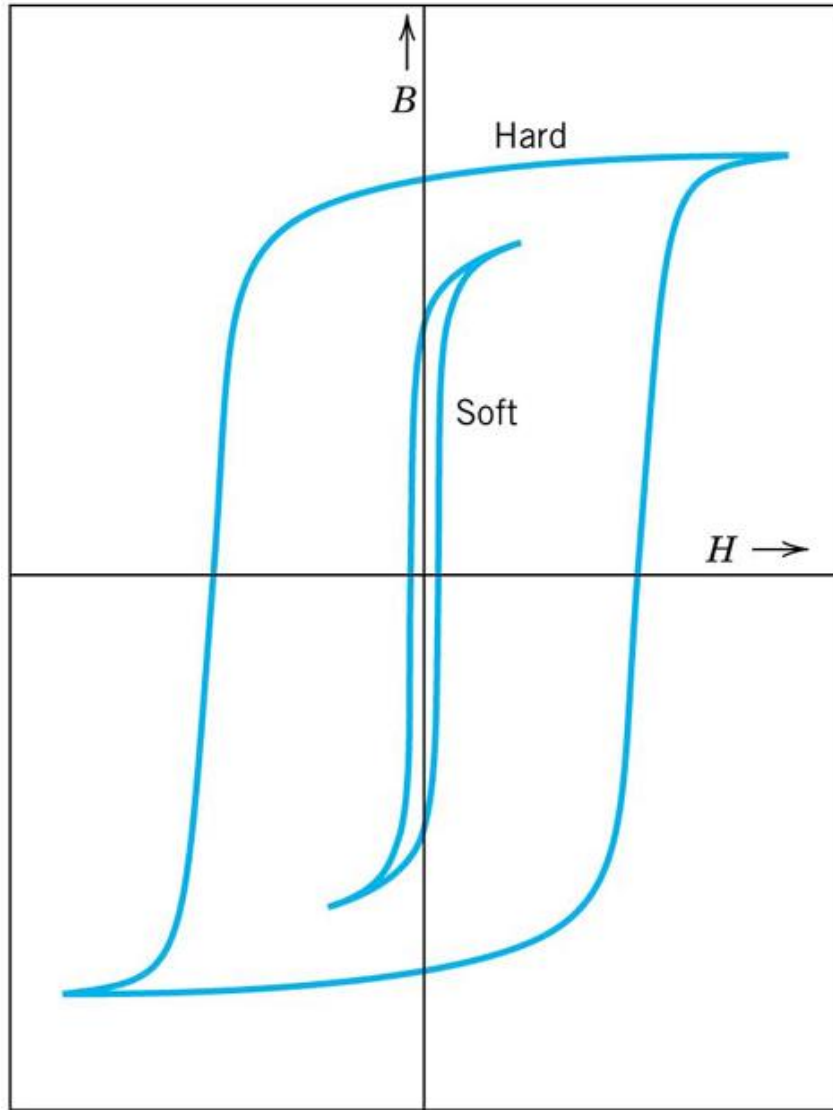


FIGURE 20.16 Schematic magnetization curves for soft and hard magnetic materials. (From K. M. Ralls, T. H. Courtney, and J. Wulff, *Introduction to Materials Science and Engineering*. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Table 20.5 Typical Properties for Several Soft Magnetic Materials

<i>Material</i>	<i>Composition (wt %)</i>	<i>Initial Relative</i>	<i>Saturation</i>	<i>Hysteresis</i>	
		<i>Permeability</i>	<i>Flux Density Bs</i>	<i>Loss/Cycle</i>	<i>Resistivity</i>
		μ_i	[tesla (gauss)]	[J/m ³ (erg/cm ³)]	(Ω -m)
Commercial iron ingot	99.95Fe	150	2.14 (21,400)	270 (2700)	1.0 x 10 ⁷
Silicon–iron (oriented)	97Fe, 3Si	1400	2.01 (20,100)	40 (400)	4.7 x 10 ⁷
45 Permalloy	55Fe, 45Ni	2500	1.60 (16,000)	120 (1200)	4.5 x 10 ⁷
Supermalloy	79Ni, 15Fe, 5Mo, 0.5Mn	75,000	0.80 (8000)	—	6.0 x 10 ⁷
Ferroxcube A	48MnFe ₂ O ₄ , 52ZnFe ₂ O ₄	1400	0.33 (3300)	~40 (~400)	2000
Ferroxcube B	36NiFe ₂ O ₄ , 64ZnFe ₂ O ₄	650	0.36 (3600)	~35 (~350)	10 ⁷

Table 20.6 Typical Properties for Several Hard Magnetic Materials

Material	Composition	Remanence	Coercivity	(BH) _{max}	Curie	Resistivity
		Br	Hc		Temperature	
		[tesla (gauss)]	[amp-turn/m (Oe)]		T _c [°C (°F)]	
	(wt %)			[kJ/m ³ (MGOe)]		ρ (Ω·m)
Tungsten steel	92.8 Fe,	0.95	5900	2.6	760	3.0 x 10 ⁷
	6 W, 0.5	(9500)	(74)	(0.33)	(1400)	
	Cr, 0.7 C					
Cunife	20 Fe, 20	0.54	44,000	12	410	1.8 x 10 ⁷
	Ni, 60 Cu	(5400)	(550)	(1.5)	(770)	
Sintered alnico 8	34 Fe, 7 Al,	0.76	125,000	36	860	—
	15 Ni, 35	(7600)	(1550)	(4.5)	(1580)	
	Co, 4 Cu, 5 Ti					
Sintered ferrite 3	BaO–6Fe ₂ O ₃	0.32	240,000	20	450	~10 ⁴
		(3200)	(3000)	(2.5)	(840)	
Cobalt rare earth 1	SmCo ₅	0.92	720,000	170	725	5.0 x 10 ⁷
		(9200)	(9,000)	(21)	(1340)	
Sintered neodymium- iron-boron	Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.16	848,000	255	310	1.6 x 10 ⁶
		(11,600)	(10,600)	(32)	(590)	

Magnetic Storage

- Audio tape, VCRs, Computer hard disks, floppy disks, credit cards

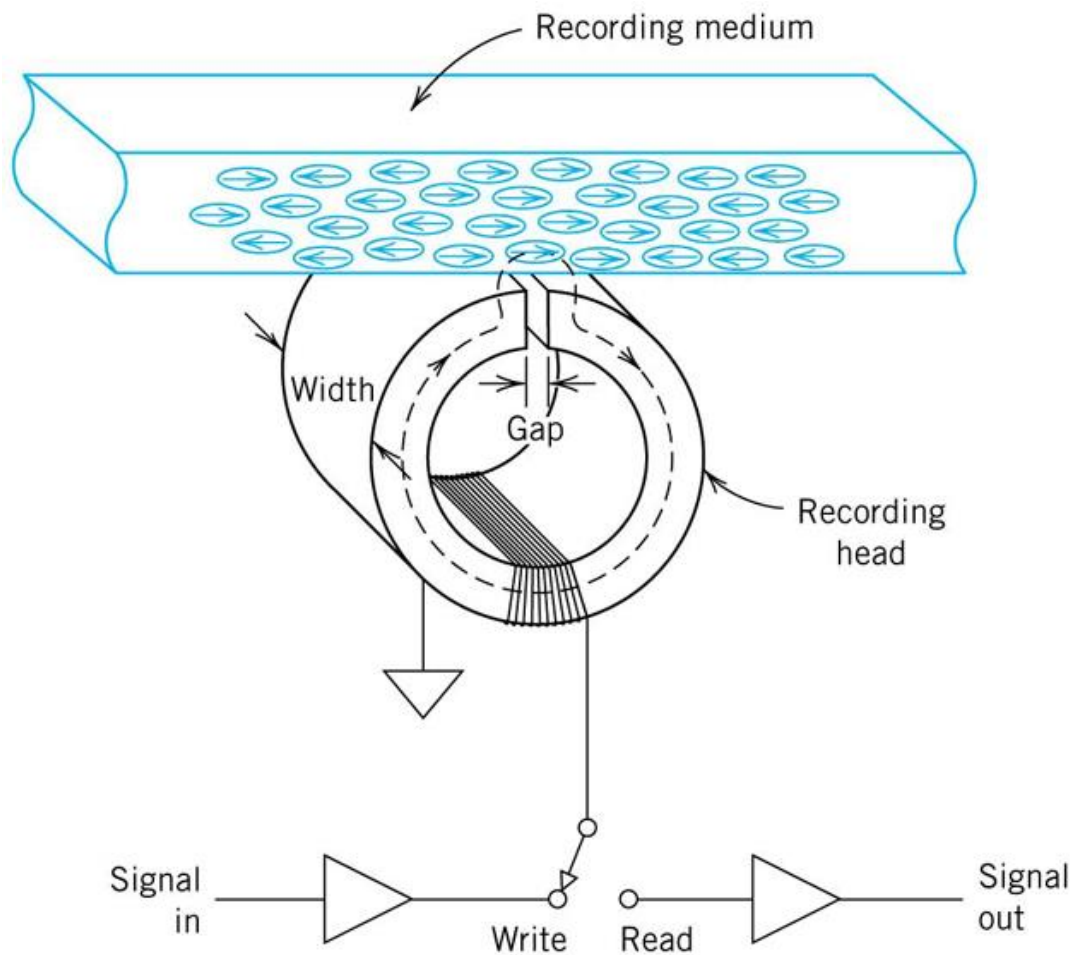


FIGURE 20.18 Schematic representation showing how information is stored and retrieved using a magnetic storage medium. (From J. U. Lemke, *MRS Bulletin*, Vol. XV, No. 3, p. 31, 1990. Reprinted with permission.)

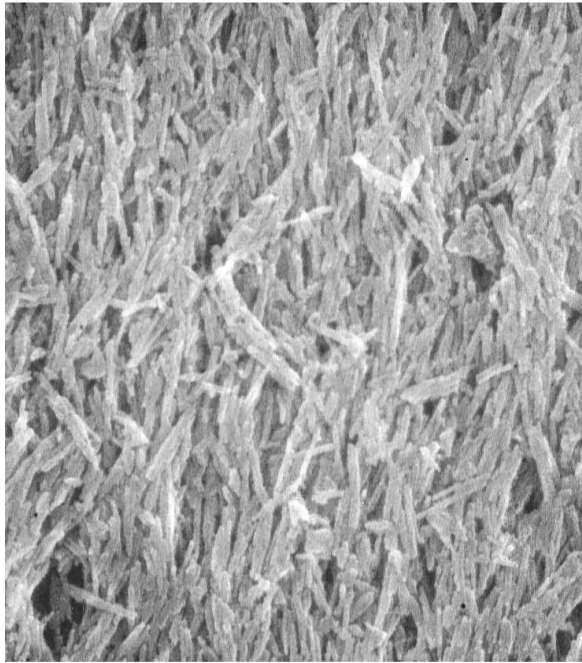
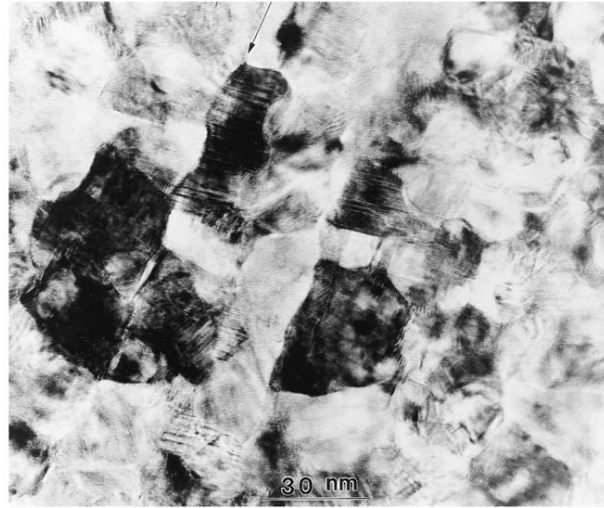
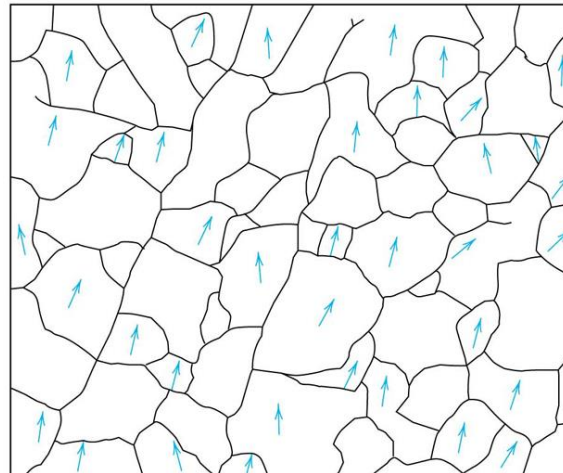


FIGURE 20.19 A scanning electron micrograph showing the microstructure of a magnetic storage disk. Needle-shaped particles of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ are oriented and embedded within an epoxy phenolic resin. 8000 $\times$. (Photograph courtesy of P. Rayner and N. L. Head, IBM Corporation.)



(a)



(b)

FIGURE 20.20 (a) A high-resolution transmission electron micrograph showing the microstructure of a cobalt-chromium-platinum thin film that is used as a high-density magnetic storage medium. The arrow at the top indicates the motion direction of the medium. 500,000 $\times$. (b) A representation of the grain structure for the electron micrograph in (a); the arrows in some of the grains indicate the texture, or the direction of easy magnetization. (From M. R. Kim, S. Guruswamy, and K. E. Johnson, *J. Appl. Phys.*, Vol. 74, No. 7, p. 4646, 1993. Reprinted with permission.)

Superconductivity

- เป็นวัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่เข้าใกล้ศูนย์เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ ($^{\circ}\text{K}$) ซึ่งอุณหภูมิวิกฤติแทนได้ด้วย T_C

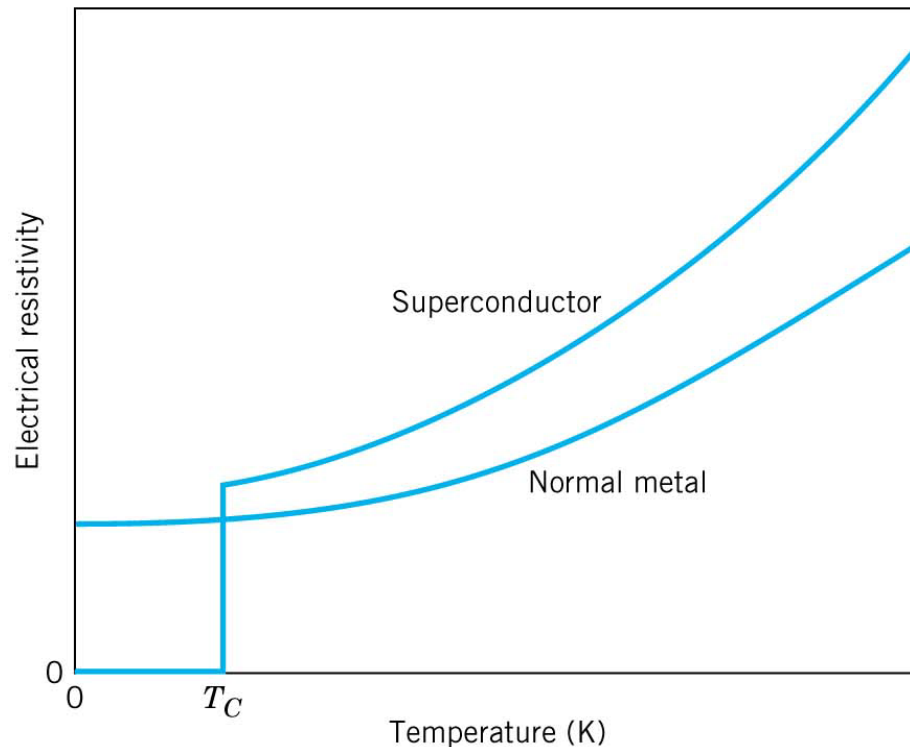


FIGURE 20.21 Temperature dependence of the electrical resistivity for normally conducting and superconducting materials in the vicinity of 0 K.

Table 20.7 Critical Temperatures and Magnetic Fluxes for Selected Superconducting Materials

<i>Material</i>	<i>Critical Temperature</i> <i>TC ((K))</i>	<i>Critical Magnetic</i> <i>Flux Density BC ((tesla))</i>
Elements		
Tungsten	0.02	0.0001
Titanium	0.40	0.0056
Aluminum	1.18	0.0105
Tin	3.72	0.0305
Mercury ()	4.15	0.0411
Lead	7.19	0.0803
Compounds and Alloys		
Nb–Ti alloy	10.2	12
Nb–Zr alloy	10.8	11
PbMo ₆ S ₈	14.0	45
V ₃ Ga	16.5	22
Nb ₃ Sn	18.3	22
Nb ₃ Al	18.9	32
Nb ₃ Ge	23.0	30
Ceramic Compounds		
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92	—
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	—
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	—
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₂ O ₈	153	—