

บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน



3.1 สมบัติเชิงแสงของวัสดุ

3.1.1 แนวคิดพื้นฐาน

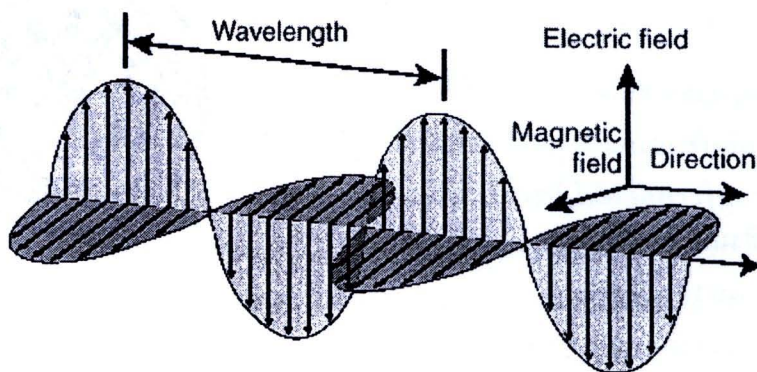
สิ่งแวดล้อมกับมนุษย์เรามีความสัมพันธ์ต่อกันตลอดมา มนุษย์สามารถรับรู้และสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมต่างๆ รอบตัว โดยอาศัยประสาทสัมผัสทั้ง 5 คือ การเห็น การได้ยิน การรับรู้กลิ่น การรับรูรส และการสัมผัส โดยมนุษย์สามารถมองเห็นสิ่งรอบๆ ตัวโดยอาศัยการมองเห็นโดยใช้อวัยวะที่เรียกว่า ตา การที่คนเราสามารถมองเห็นได้ต้องอาศัยแสงเข้ามาช่วยในการมองเห็น หากไม่มีแสงคนเราก็ไม่สามารถมองเห็นได้ เช่นในตอนกลางคืน แสงจึงเป็นสิ่งสำคัญในการมองเห็น แสงจัดเป็นพลังงานรูปหนึ่ง เช่นเดียวกับพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล ฯลฯ แต่แสงเป็นพลังงานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่ของแสงจะอยู่ในรูปของคลื่น ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวคลื่นด้วย แสดงดังภาพที่ 3.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางสุญญากาศจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากันหมด เท่ากับความเร็วของแสงคือ 3×10^8 m/s ความเร็วแสงสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรืออิเล็กทริกเพอร์มิททิวิตี (electric permittivity, ϵ_0) ของสุญญากาศและความสามารถซึมซับของสนามแม่เหล็ก (magnetic permittivity, μ_0) ของสุญญากาศแสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.1

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.1)$$

ดังนั้นจะเห็นความเกี่ยวเนื่องกันระหว่างค่าคงที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (c) และค่าคงที่ทางไฟฟ้าและค่าคงที่สนามแม่เหล็กนอกจากนี้ ความถี่ (ν) และความยาวคลื่น (λ) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันกับความเร็วแสงดังสมการที่ 3.2

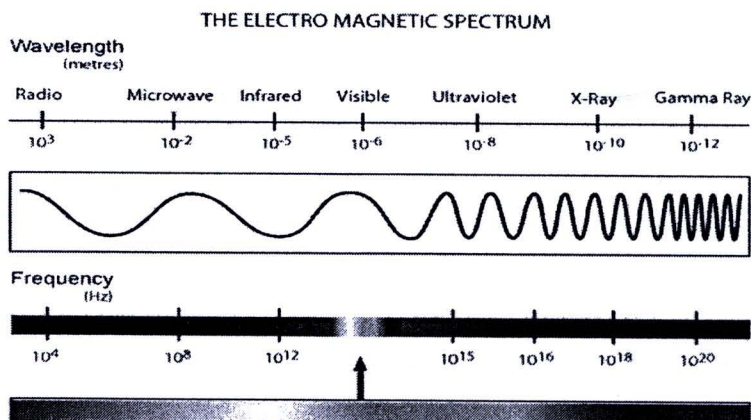
$$c = \lambda \nu \quad (3.2)$$

หน่วยของความถี่คือ เฮิรตซ์ (hertz, Hz) และ $1 \text{ Hz} = 1$ รอบต่อวินาที



ภาพที่ 3.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงองค์ประกอบของ สนามไฟฟ้า (Electric field) สนามแม่เหล็ก (Magnetic field) และทิศทางการเคลื่อนที่
(<http://shariqa.com/waves%20around%20us.htm>, 18 พ.ย. 2553)

เนื่องจากพลังงานเหล่านี้มีความถี่ และความยาวคลื่นเฉพาะตัวต่างๆ กันออกไป ภาพที่ 3.2 เป็นรูปแสดงสเปกตรัมพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่า แสงย่านที่ตามองเห็น จะมีความยาวคลื่นระหว่าง 380-780 nm ความยาวคลื่นแสงช่วยให้เราสามารถมองเห็นวัตถุต่างๆ ได้ สำหรับคลื่นที่มีความยาวสั้นกว่า 380 nm ได้แก่ รังสีเหนือม่วง รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา และคลื่นแสงที่มีความยาวมากกว่า 780 nm ได้แก่ คลื่นวิทยุ คลื่นโทรทัศน์ พลังงานเหล่านี้จะไม่มีส่วนช่วยในการมองเห็น แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เช่น รังสีเอกซ์ใช้ในการทางการแพทย์ได้แก่การถ่ายภาพร่างกายของมนุษย์ให้เห็นถึงอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกายเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการตรวจและวินิจฉัยโรคได้ดียิ่งขึ้น ใช้ในการสื่อสาร ได้แก่ คลื่นวิทยุและคลื่นโทรทัศน์ สำหรับข้อมูลรายละเอียดในการจำแนกพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านต่างๆ สรุปดังตารางข้อมูลที่ 3.1



ภาพที่ 3.2 สเปกตรัมแถบพลังงาน (<http://www.thomasnet.com/>, 7 มิ.ย. 2553)

ตารางที่ 3.1 แสดงการจำแนกพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านต่างๆ

ประเภท		ความยาวคลื่น	ความถี่	
อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)	UVC	0.1 - 0.28 nm	230 - 430 THz	
	UVB	0.28 - 0.32 nm	100 - 230 THz	
	UVA	0.32 - 0.4 nm	38 - 100 THz	
แสงที่ตามองเห็น (Visible Light)		0.4 - 0.7 nm	430 - 750 THz	
อินฟราเรด (Infrared)	อินฟราเรตใกล้	0.7 - 1.3 nm	230 - 430 THz	
	อินฟราเรตคลื่นสั้น (Near Infrared)	1.3 - 3 nm	100 - 230 THz	
	อินฟราเรตคลื่นกลาง (Middle Infrared)	3 - 8 nm	38 - 100 THz	
	อินฟราเรตความร้อน (Thermal Infrared)	8 - 14 nm	22 - 38 THz	
	อินฟราเรตไกล (Far Infrared)	14 um - 1 mm	0.3 - 22 THz	
คลื่นวิทยุ (Radio Wave)	ไมโครเวฟ (Microwave)	มิลลิเมตรย่อย	0.1 - 1 mm	0.3 - 3 THz
		มิลลิเมตร (EHF)	1 - 10 mm	30 - 300 GHz
		เซนติเมตร (SHF)	1 - 10 cm	3 - 30 GHz
		เดซิเมตร (UHF)	10 cm - 1 m	0.3 - 3 GHz
	คลื่นสั้นมาก (VHF)		1 - 10 m	30 - 300 MHz
	คลื่นสั้น (HF)		10 - 100 m	3 - 30 MHz
	คลื่นกลาง (MF)		100 m - 1 km	0.3 - 3 MHz
	คลื่นยาว (LF)		1 - 10 km	30 - 300 KHz

ที่มา: จากหนังสือ "คำบรรยายเรื่องการสำรวจจากระยะไกล : Remote Sensing Note" สำนักงาน
คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2540, ISBN 974-8027-59-7

3.1.2 ปฏิกริยาระหว่างแสงและของแข็ง (Callister, 2005)

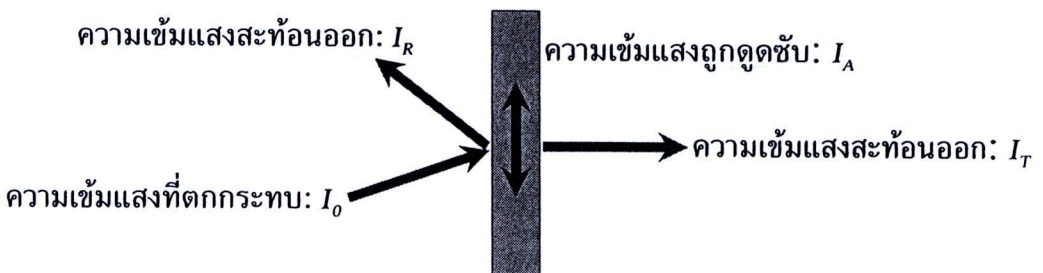
เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง เช่น จากอากาศไปในเนื้อของแข็งจะมีหลายปรากฏการณ์เกิดขึ้น แสงบางส่วนอาจผ่านเนื้อของแข็งไป ในขณะที่บางส่วนถูกดูดซับเอาไว้ และบางส่วนถูกสะท้อนที่ผิวระหว่างตัวกลางทั้งสอง ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ (I_0) จะต้องเท่ากับความเข้มแสงที่ส่องผ่าน (I_T) ถูกดูดซับ (I_A) และสะท้อนออก (I_R) แสดงดังภาพที่ 3.3 นอกจากนี้ยังเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสี่ได้ดังสมการที่ 3.3

$$I_0 = I_T + I_A + I_R \quad (3.3)$$

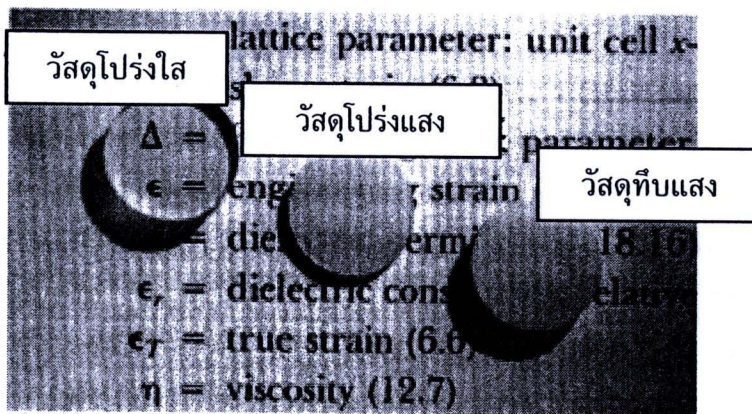
ความเข้มแสงมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร หมายถึงค่าพลังงานแสงต่อหนึ่งหน่วยเวลาในหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ สมการ 3.3 อาจเขียนได้อีกแบบหนึ่งคือ

$$T + A + R = 1 \quad (3.4)$$

โดยที่ T คือสภาพการส่องผ่าน (transmittivity) เท่ากับ (I_T / I_0) A คือ สภาพการดูดซับ (absorptivity) เท่ากับ (I_A / I_0) และ R คือ สภาพสะท้อน (reflectivity) เท่ากับ (I_R / I_0) ผลบวกของค่าทั้งสามเท่ากับหนึ่งวัสดุที่ปล่อยให้แสงผ่านได้ปริมาณมาก มีการดูดซับและสะท้อนในปริมาณน้อย เรียกว่าเป็นวัสดุโปร่งใส (transparent) เราสามารถมองเห็นวัตถุประเภทนี้ได้ วัสดุโปร่งแสง (translucent) เป็นวัสดุที่แสงส่องผ่านได้ แต่เกิดการกระจายตัวของแสงในเนื้อวัตถุ ทำให้เราไม่สามารถมองเห็นวัตถุที่อยู่ข้างหลังวัตถุประเภทนี้อย่างชัดเจน สำหรับวัสดุที่ไม่ยอมให้แสงผ่านได้เลยคือวัสดุทึบแสง (opaque) แสดงดังภาพที่ 3.4 โลหะเป็นวัสดุทึบแสงแสงขาวไม่สามารถส่องผ่านได้แสงทั้งหมดถูกดูดซับและสะท้อนออกหมดในทางตรงกันข้าม วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้านั้นสามารถทำให้โปร่งใสได้ ส่วนวัสดุกึ่งตัวนำมีทั้งแบบทึบแสงและโปร่งแสง



ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง



ภาพที่ 3.4 ภาพถ่ายแสดงการส่องผ่านแสงในชิ้นงาน อะลูมินา 3 ชั้น โดยชิ้นงานทางซ้ายเป็นผลึกเดี่ยว (แซฟไฟร์) ซึ่งโปร่งใส ชั้นกลางแบบหลายผลึกและไม่มีรูพรุนซึ่งโปร่งแสง และชั้นขวาเป็นแบบหลายผลึกที่มีความพรุนประมาณ 15% มีความทึบแสง (ดัดแปลงจาก Callister, 2005)

3.1.3 อะตอมและปรากฏการณ์ของอิเล็กตรอน (Callister, 2005)

ปรากฏการณ์ทางแสงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุของแข็งนั้น เกี่ยวข้องกันระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และอะตอม ไอออน และ/หรืออิเล็กตรอน ปฏิกริยาที่สำคัญ 2 อย่างที่เกิดขึ้น คือ อิเล็กตรอนิกส์โพลาไรเซชัน (electronic polarization) หรือเกิดชั่วไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอน และการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน

3.1.3.1 อิเล็กตรอนิกส์โพลาไรเซชัน

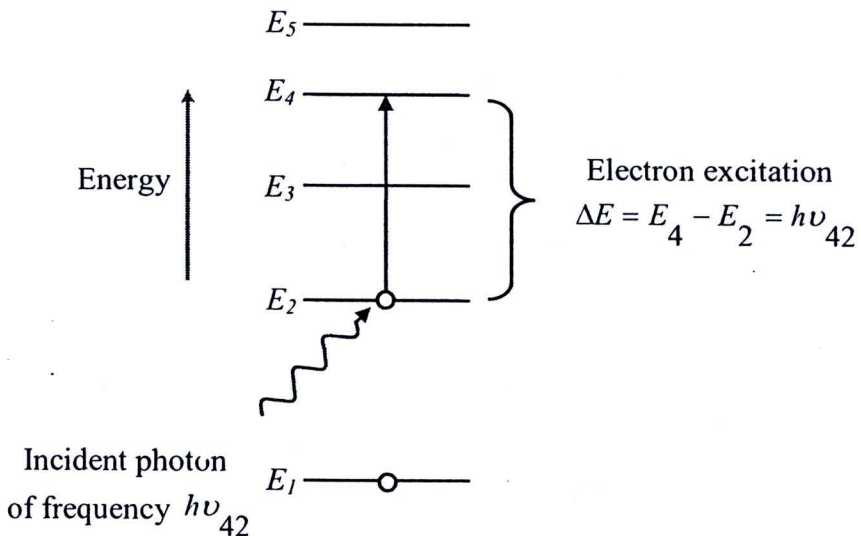
องค์ประกอบหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือคลื่นของสนามไฟฟ้า ในช่วงความถี่ของแสงสีขาว สนามไฟฟ้าจะมีปฏิกิริยาต่ออิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆอะตอม เหนี่ยวนำให้เกิดชั่วไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอน คือเคลื่อนกลุ่มของอิเล็กตรอนให้ห่างจากนิวเคลียสตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ผลลัพธ์ 2 ประการที่เกิดขึ้น คือ (1) เกิดการดูดซับพลังงานของคลื่นที่ตกกระทบ (2) คลื่นแสงผ่านตัวกลางนี้ได้ช้าลง ผลของข้อที่สองทำให้เกิดการหักเหของแสง

3.1.3.2 การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน

การดูดซับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและส่งกลับออกมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นของพลังงานหากพิจารณาจากอะตอม 1 ตัวที่มีระดับชั้นพลังงานแสดงดังภาพที่ 3.5 อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นโดยการดูดซับพลังงานจากโฟตอนที่แสงตกกระทบทำให้เปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากเดิมที่ E_2 มาอยู่ที่ชั้นระดับพลังงานที่สูงกว่าและว่างอยู่ที่ E_4 ปริมาณของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนี้ (ΔE) ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแสงที่ตกกระทบดังสมการที่ 3.5

$$\Delta E = h\nu \quad (3.5)$$

ค่า h คือค่าคงที่ของพลังค์ ข้อสังเกตหนึ่งคือเนื่องจากระดับพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าเฉพาะค่า ΔE จึงเป็นค่าที่เฉพาะด้วย ดังนั้นโฟตอนที่ตกกระทบจึงต้องมีค่าความถี่ที่เฉพาะด้วยจึงทำให้ค่าพลังงานเพียงพอในการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน หรืออีกนัยหนึ่งคือ โฟตอนต้องมีค่าพลังงานเฉพาะเพื่อที่ทำให้อิเล็กตรอนสามารถดูดซับพลังงานได้ โดยที่โฟตอนของพลังงานทั้งหมดถูกดูดซับในการกระตุ้นอิเล็กตรอนแต่ละครั้ง ประการที่สอง หลังจากอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจนเปลี่ยนระดับพลังงาน อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ในระดับพลังงานภายหลังจากการกระตุ้น (excited state) คือพลังงานชั้นที่สูงได้นาน ภายหลังเวลาเพียงสั้น ๆ มันจะตกมาในระดับพลังงานเดิมก่อนถูกกระตุ้นหรือในสถานะพื้น (ground state) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานที่ดูดซับออกมา พลังงานที่ปล่อยออกมาเป็นไปได้หลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามพลังงานที่ถูกดูดซับจะต้องเท่ากับพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาภายหลังตามกฎหมายพลังงาน

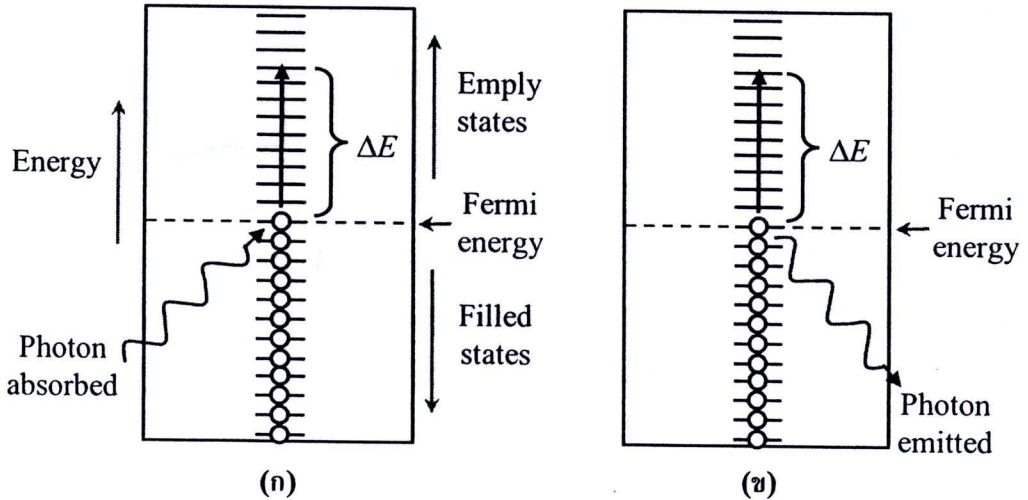


ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงการดูดซับโฟตอนโดยการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับชั้น พลังงานหนึ่งไปยังอีกระดับชั้นพลังงานหนึ่งในอะตอมเดียว พลังงานของโฟตอน $h\nu_{42}$ ต้องเท่ากับ ความแตกต่างของพลังงาน 2 ระดับชั้น ($E_4 - E_2$) (ดัดแปลงจาก Callister, 2005)

3.1.4 สมบัติทางแสงของโลหะ

เมื่อพิจารณาแถบชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในวัสดุจะเห็นว่าพลังงานในระดับสูงเป็นช่องว่างอยู่ กล่าวคือไม่มีอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานนั้น วัสดุเหล่านี้จึงทึบแสง เนื่องจากแสงขาวที่ตกกระทบถ่ายเทพลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเลื่อนพลังงานเข้าไปอยู่ที่ชั้นระดับพลังงานที่ว่างที่อยู่เหนือชั้นเฟอมี แสดงดังภาพที่ 3.6(ก) จึงดูดซับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังสมการที่

3.5 การดูดซับทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณชั้นบาง ๆ ลึกไม่เกิน $0.1\ \mu\text{m}$ จากผิวของโลหะ ดังนั้นถ้าผิวโลหะมีความหนาต่ำกว่า $0.1\ \mu\text{m}$ จะสามารถให้แสงทะลุผ่านได้



ภาพที่ 3.6 (ก) ภาพแสดงกลไกการดูดซับโฟตอนของโลหะ (ข) การปล่อยโฟตอนของแสง โดย การเลื่อนชั้นของอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานที่สูงมายังชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า (ดัดแปลง จาก Callister, 2005)

เนื่องจากระดับพลังงานที่วางอยู่ในชั้นต่อเนื่อง จึงสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกความถี่และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นระดับของพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงดังภาพที่ 3.6(ก) โลหะนั้นไม่ยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำผ่าน ไม่ว่าจะเป็นคลื่นวิทยุ แสงใต้แดง แสงขาว จนถึงแสงเหนือม่วง ที่ความถี่ไม่มากนัก แต่โลหะยอมให้แสงที่ความถี่สูงผ่าน เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น พลังงานที่ถูกดูดซับส่วนใหญ่ ส่วนมากจะถูกปล่อยออกมาในรูปของแสงที่มีความถี่เท่าแสงที่ตกกระทบการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยพลังงานแสงออกมาแสดงดังภาพที่ 3.6(ข) อัตราส่วนของการสะท้อนแสงของโลหะส่วนใหญ่มีค่าประมาณ $0.9-0.95$ บางส่วนของพลังงานจะเสื่อมสภาพสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากโลหะนั้นทึบแสงและสะท้อนแสงที่ตกกระทบเกือบทั้งหมด สีของโลหะที่เห็นคือความถี่ของแสงสะท้อนออกมาไม่ใช่เท่ากับแสงที่ดูดซับ สีโลหะที่มีสีเงินมันวาวเมื่อมีแสงขาวมาตกกระทบ บ่งบอกว่าโลหะนั้นสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกครบทุกช่วงความถี่ของแสงขาว

3.1.5 สมบัติทางแสงของโลหะ

วัสดุโลหะเป็นวัสดุที่โปร่งใสเป็นผลมาจากแถบชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน ดังนั้น นอกจากปรากฏการณ์การสะท้อน การดูดซับ การหักเหแล้ว ปรากฏการณ์การส่องผ่านจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา

3.1.5.1 การหักเหของแสง (Refraction)

เมื่อแสงส่องผ่านในวัสดุโปร่งใส จะทำให้มีความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลง มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแสงที่บริเวณผิวระหว่างตัวกลาง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การหักเห (refraction) นิยามของดัชนีการหักเห (index of refraction, n) ของวัสดุ คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วแสงในสุญญากาศ ต่อความเร็วแสงในวัสดุนั้น แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.6

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.6)$$

ค่า n ซึ่งแสดงดัชนีของการหักเห นั้นขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นจะเห็นได้เมื่อแสงขาวตกกระทบก้อนแก้วปริซึม เกิดการหักเหแสงที่มีความถี่ต่างๆ กัน (สีต่างๆกัน) หักเหไม่เท่ากัน เมื่อแสงนั้นผ่านเข้าและออกจากก้อนแก้ว เกิดการแยกเป็นสีต่างๆเกิดขึ้น นอกจากค่าดัชนีจะมีผลต่อทิศทางของแสงแล้วยังมีผลต่อปริมาณอัตราส่วนของแสงที่สะท้อนออกที่ผิวของวัสดุ จากค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ (c) เขียนความเร็วแสงในเนื้อวัสดุ (v) ดังสมการที่ 3.7

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3.7)$$

โดยที่ ϵ คือสภาพยอมทางไฟฟ้า (electric permittivity) และ μ คือความสามารถซึมซับของสนามแม่เหล็ก (magnetic permittivity) ของวัสดุ จากสมการ 3.6 เราจะได้ว่า

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (3.8)$$

โดยที่ ϵ_r และ μ_r เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าความสามารถซึมซับของสนามแม่เหล็ก สัมพันธ์ตามลำดับเนื่องจากวัสดุส่วนใหญ่มีค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กเพียงเล็กน้อย $\mu_r \cong 1$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.9

$$n \cong \sqrt{\epsilon_r}$$

(3.9)

สำหรับวัสดุโปร่งใสจะเห็นว่าค่าดัชนีการหักเหของแสงจะมีความสัมพันธ์กับค่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก จากหัวข้อที่ 3.1.3 ปรากฏการณ์การหักเห้นั้นเกี่ยวข้องกับอิล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน ที่ความถี่สูง ในระดับของแสงสีขาว การวัดค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก จึงสามารถคำนวณได้จากค่าดัชนีการหักเห ของแสงของวัสดุโดยใช้สมการที่ 3.9 การที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ช้าในตัวกลาง เนื่องมาจากเป็นปรากฏการณ์ อิล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน ขนาดของอะตอมหรือไอออนในเนื้อ วัสดุมีผลอย่างยิ่งในการช้าลงนี้ โดยทั่วไปขนาดของอะตอมหรือ ไอออนในเนื้อวัสดุยังมีขนาดใหญ่ ก็เกิดการโพลาไรเซชันมาก ส่งผลทำให้ความเร็วแสงลดลง และค่าดัชนีการหักเหของวัสดุก็ยิ่ง มากตาม จากตารางที่ 3.2 จะแสดงค่าดัชนีการหักเหของแก้ว เซรามิกโปร่งแสง และพอลิเมอร์ ชนิดต่าง ๆ ค่า n ของวัสดุเซรามิกที่เป็นแอนไอโซทรอปิก เป็นค่าเฉลี่ยของ n สำหรับแต่ละทิศทาง

ตารางที่ 3.2 ค่าดัชนีการหักเหของแสงของวัสดุโปร่งแสงบางชนิด

วัสดุตัวอย่าง		ค่าดัชนีหักเห (n)
เซรามิก	Silica glass	1.458
	Borosilicate (Pyrex) glass	1.47
	Soda-lime glass	1.51
	Quartz (SiO ₂)	1.55
	Dense optical flint glass	1.65
	Spinel (MgAl ₂ O ₄)	1.72
	Periclase (MgO)	1.74
	Conrundum (Al ₂ O ₃)	1.76
พอลิเมอร์	Polytatefluoroethylene	1.35
	Polymethyl methacrylate	1.49
	Polypropylene	1.49
	Polyethylene	1.51

(ดัดแปลงจาก Callister, 2005)

3.1.5.2 การสะท้อน (Refraction)

เมื่อแสงขาวผ่านตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีการหักเหที่ต่างไป แสงส่วนหนึ่งจะเกิดการกระเจิงที่บริเวณพื้นผิวระหว่างตัวกลางทั้งสอง แม้ตัวกลางทั้งสองนั้นจะเป็นวัสดุที่โปร่งใส ค่าสภาพสะท้อน (R) คืออัตราส่วนของแสงสะท้อนออกต่อที่ตกกระทบที่พื้นผิว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad (3.10)$$

โดยที่ I_0 คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ และ I_R คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อนออก ถ้าแสงที่ตกกระทบมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวจะได้ว่า

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (3.11)$$

โดยที่ n_1 และ n_2 คือดัชนีการหักเหของตัวกลางที่หนึ่งและที่สอง ถ้าลำแสงที่ตกกระทบไม่ตั้งฉากกับพื้นผิวค่า R จะขึ้นอยู่กับมุมที่ตกกระทบ เมื่อแสงส่องผ่านจากสุญญากาศหรือในอากาศผ่านเข้ามาในเนื้อของแข็ง s เนื่องจากดัชนีหักเหของอากาศมีค่าใกล้เคียง 1 มากดังนั้นสมการ 3.11 จึงเขียนได้ใหม่เป็น

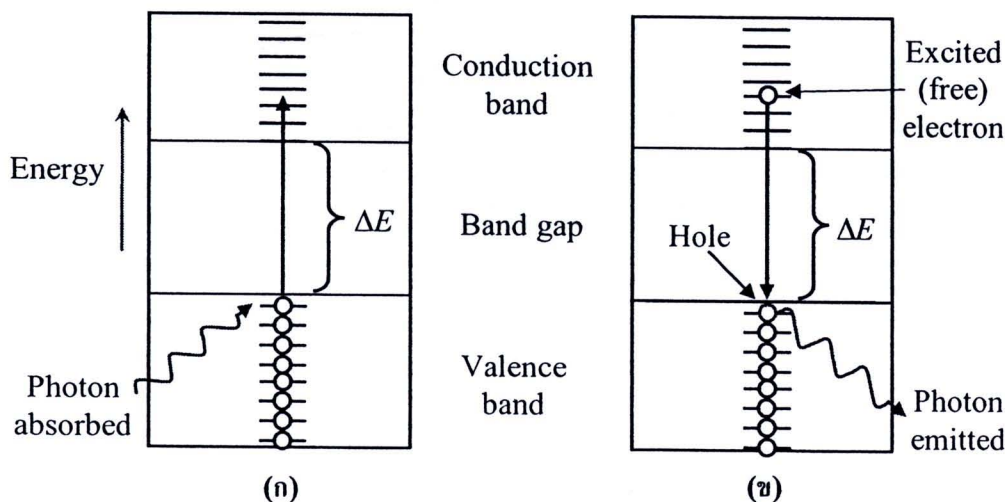
$$R = \left(\frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right)^2 \quad (3.12)$$

ดังนั้นจะเห็นว่าของแข็งที่มีค่าดัชนีการหักเหที่สูงก็จะมีค่าสภาพสะท้อนสูงเช่นกัน คือมีการสะท้อนสูง สำหรับแก้วซิลิเกต โดยทั่วไปจะมีค่าสภาพสะท้อนประมาณ 0.05 ค่าสภาพการหักเหของวัสดุขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแสงที่ตกกระทบ ค่าสภาพสะท้อนก็ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแสงที่ตกกระทบด้วยเช่นกัน

3.1.5.3 การดูดซับ (absorption)

วัสดุโลหะอาจทึบแสงหรือโปร่งแสง แต่ถ้าเป็นแบบโปร่งแสงส่วนใหญ่จะไม่มีสี โดยหลักการแล้วแสงดูดซับในเนื้อวัสดุด้วยกลไก 2 ประการ ซึ่งมีผลกระทบต่อ

ลักษณะการให้แสงผ่านของวัสดุด้วย อย่างแรกคือ อิเล็กทรอนิกส์โฟลาริเซชัน (หัวข้อ 3.1.3) การดูดซับที่เกิดจากปรากฏการณ์นี้จะมีค่าสูงเฉพาะแสงที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ relaxation ของอะตอมในเนื้อวัสดุนั้น อีกกลไกหนึ่งเกี่ยวข้องกับการเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแถบ วาเลนซ์และแถบการนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบแถบชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนของอะตอม



ภาพที่ 3.7 (ก) ภาพแสดงกลไกการดูดซับโฟตอนของวัสดุโลหะ (ข) การคายพลังงานในรูปแบบของแสงโดยอิเล็กตรอนเลื่อนระดับพลังงานข้ามแถบต้องห้าม (ดัดแปลงจาก Callister, 2005)

การดูดซับพลังงานจากโฟตอนอาจเกิดขึ้นจากการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนเกือบเต็มข้ามแถบต้องห้ามมายังชั้นพลังงานที่อยู่ในแถบการนำ ดังแสดงในภาพที่ 3.7(ก) ทำให้เกิดอิเล็กตรอนในแถบอิสระในแถบการนำ 1 ตัวและในโฮล (Hole) 1 ตัวในแถบวาเลนซ์ พลังงานที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอน ΔE เป็นพลังงานโฟตอนที่ถูกดูดซับ แสดงดังสมการที่ 3.5 การดูดซับและการกระตุ้นพลังงานจะเกิดขึ้นได้หากพลังงานของโฟตอนนั้นมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนกระโดดข้ามแถบต้องห้ามไปได้ นั่นคือพลังงานของโฟตอนต้องมากกว่าค่าพลังงานของแถบต้องห้าม (E_g) หรืออาจเขียนในรูปแบบของความยาวคลื่นได้ดังนี้

$$\frac{hc}{\lambda} > E_g \quad (3.13)$$

ค่าความยาวคลื่นของแสงที่น้อยที่สุด $\lambda(\text{min})$ เท่ากับประมาณ $0.04 \mu\text{m}$ เนื่องจาก $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ และ $h = 4.13 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ ค่าพลังงานของแถบต้องห้ามมากที่สุดที่แสงขาวดูดซับ

$$\begin{aligned}
 E_g(\text{max}) &= \frac{hc}{\lambda(\text{min})} \\
 &= \frac{(4.13 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{4 \times 10^{-7} \text{ m}} \\
 &= 3.1 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

วัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็กที่มีค่าพลังงานเขตต้องห้ามมากกว่า 3.1 eV จะไม่สามารถดูดซับพลังงานของแสงขาวได้ ดังนั้นถ้าวัสดุบริสุทธิ์จะโปร่งใสและไม่มีสี ในทางตรงกันข้าม ความยาวคลื่นสูงสุดของแสงขาว $\lambda(\text{max})$ เท่ากับ $0.07 \mu\text{m}$ ค่าพลังงานของแถบต้องห้ามที่ต่ำที่สุดที่เกิดการดูดซับของแสงขาวเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 E_g(\text{min}) &= \frac{hc}{\lambda(\text{max})} \\
 &= \frac{(4.13 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{7 \times 10^{-7} \text{ m}} \\
 &= 1.8 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

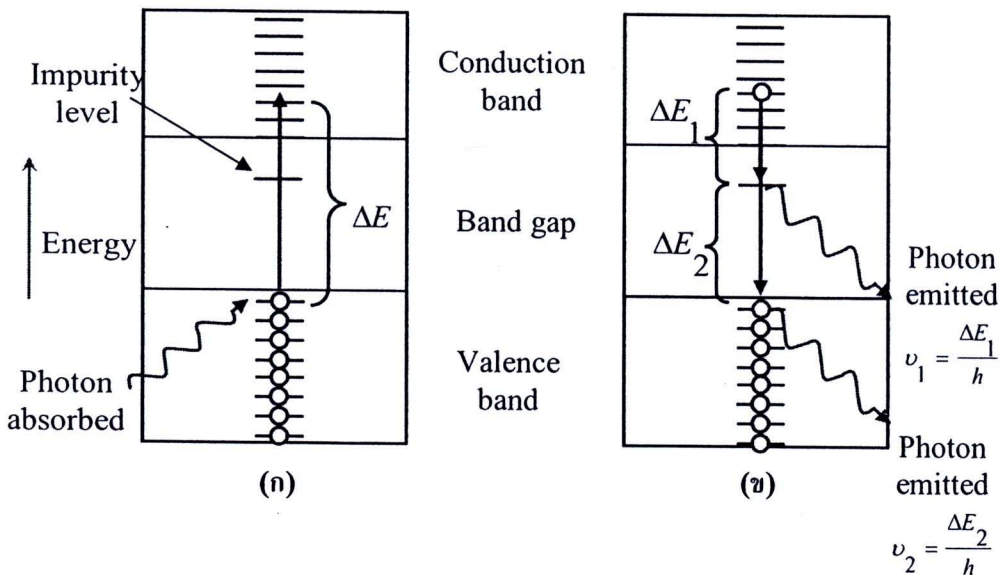
หมายความว่า จะเกิดการดูดซับแสงขาวโดยสมบูรณ์โดยกลไกการเลื่อนชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์มายังแถบการนำ หากวัสดุนั้นมีค่าแถบพลังงานต้องหำน้อยกว่า 1.8 eV วัสดุเหล่านั้นจะทึบแสง วัสดุที่มีค่าพลังงานของแถบต้องห้ามระหว่าง 1.8 และ 3.1 eV จะดูดซับพลังงานจากแสงได้บางส่วนจากในย่านความถี่ วัสดุประเภทนี้จึงมีสี วัสดุโลหะทุกชนิดจะกลายเป็นทึบแสงที่มีความถี่ค่าหนึ่ง ขึ้นอยู่กับค่า E_g ตัวอย่างเช่น เพชรมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 5.6 eV จะทึบแสงต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า $0.22 \mu\text{m}$ ในวัสดุที่มีค่าแถบพลังงานสูง อาจมีปรากฏการณ์อื่น นอกเหนือจากการเลื่อนชั้นพลังงานจากแถบวาเลนซ์และแถบการนำ เช่นถ้ามีสารเจือปน หรือมีตำหนิที่มีประจุสมอยู่ จะมีชั้นพลังงานเพิ่มขึ้นในแถบต้องห้าม เป็นชั้นพลังงานตัวให้ (donor level) หรือเป็นชั้นพลังงานตัวรับ (acceptor level) การคายพลังงานแสงอาจเกิดการเลื่อนชั้นพลังงานซึ่งเกิดจากสารเจือปนที่อยู่ในแถบต้องห้าม อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในแถบการนำอาจมีการคายพลังงานออกมาในหลายรูปแบบ เช่น เกิดการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอน และโฮลดังสมการ

$$electron + hole \rightarrow energy(\Delta E) \quad (3.14)$$

ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.7(ข) นอกจากนี้อาจเกิดการเลื่อนพลังงานหลายครั้งโดยอาศัยระดับพลังงานของสารเจือปนในแถบต้องห้ามที่ถูกแสดงดังรูปที่ 3.8(ข) คือเกิดจากการเลื่อนชั้นของอิเล็กตรอนจากการนำมายังชั้นพลังงานของสารเจือปน โดยปริมาณการดูดซับของแสงขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางและเส้นทางที่แสงผ่านปริมาณของแสงที่ส่องผ่านหรือไม่ถูกดูดซับ (I'_T) จะลดลงแปรผันตามระยะเส้นทางที่แสงผ่านดังสมการ

$$I'_T = I'_0 e^{-\beta x} \quad (3.9)$$

โดยที่ I'_0 คือค่าความเข้มแสงที่ไม่ได้สะท้อน และ β คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (absorption coefficient) มีหน่วยเป็น mm^{-1} ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดระยะ x วัดจากผิวมาภายในเนื้อวัสดุ จะเห็นว่าวัสดุที่มีค่า β มากจะดูดซับมาก



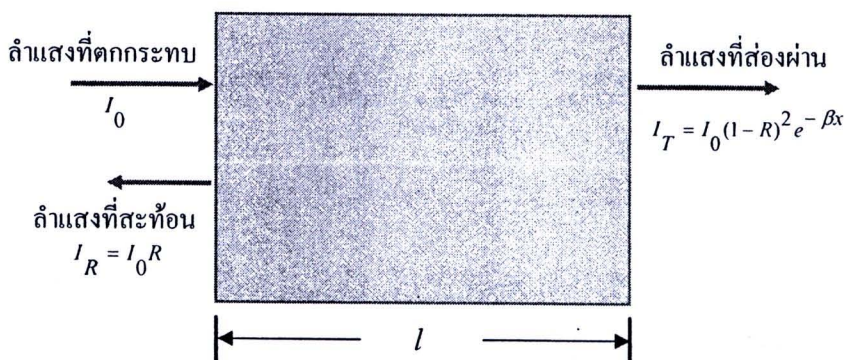
ภาพที่ 3.8 (ก) แสดงการดูดซับโฟตอนโดยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ สำหรับวัสดุที่มีระดับชั้นพลังงานของสารเจือปน (ข) แสดงการเกิดโฟตอน 2 ตัวสำหรับวัสดุที่มีระดับชั้นพลังงานของสารเจือปน (ดัดแปลงจาก Callister, 2005)

3.1.5.4 การส่องผ่าน (transmission)

ปรากฏการณ์การดูดซับ การสะท้อนและการส่องผ่านเมื่อแสงตกกระทบบนวัสดุโปร่งใสได้แสดงดังภาพที่ 3.9 เมื่อแสงที่มีความเข้ม I_0 ตกกระทบบนวัสดุที่มีความหนา l และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ β ความเข้มแสงที่ส่องผ่านทะลุออกมาทางผิวด้านหลังของวัสดุ (I_T) จะมีค่าเท่ากับ

$$I_T = I_0 (1 - R)^2 e^{-\beta x} \quad (3.10)$$

โดยที่ R คือ ค่าความสะท้อนของวัสดุ สมการนี้เป็นจริงในตัวกลางที่ผิวด้านหน้าและผิวด้านหลังของวัสดุเป็นตัวเดียวกัน



ภาพที่ 3.9 ภาพแสดงการส่องผ่านของแสงในตัวกลางที่โปร่งใสเกิดการสะท้อนและดูดซับภายในตัวกลาง (ดัดแปลงจาก Callister, 2005)

ดังนั้นปริมาณที่แสงส่องผ่านวัสดุขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่สูญเสียไปจากการดูดซับและการสะท้อน และจากที่กล่าวมาจกสมการที่ 3.4 ผลบวกของอัตราส่วนของแสงที่สะท้อน อัตราส่วนที่ถูกดูดซับ และอัตราส่วนที่ส่องผ่าน ต้องมีค่าเท่ากับ 1 และค่าอัตราส่วนเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบน

3.1.6 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสเปกโทรสโกปี

สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) คือ การศึกษาอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) กับสสาร (matter) โดยในการทดลองทำการพิจารณาสมบัติของ สสารก่อน และหลังการเกิดอันตรกิริยากับรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อแสงตก

กระทบกับสสาร แสงสามารถทำให้เกิดอันตรกิริยา เช่น ถูกสะท้อน (reflected), ถูกดูดกลืน (absorbed), ถูกคาย (emitted), ถูกกระเจิง (scattered) และ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (chemical change)

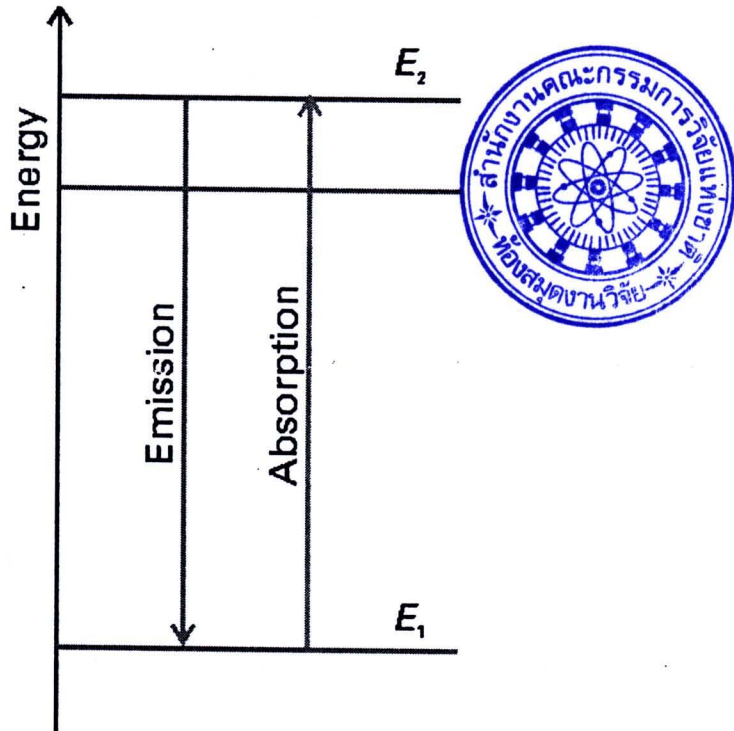
3.1.7 ชนิดของสเปกโทรสโกปี

การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีสามารถทำได้หลายแบบ ขึ้นกับว่าใช้เกณฑ์อะไรในการแบ่ง แต่โดยทั่วไปนิยมใช้เกณฑ์ในการแบ่ง 2 ชนิด คือ

3.1.7.1 การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีโดยพิจารณาจากเทคนิคที่ใช้ใน

การทดลอง

แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ สเปกโทรสโกปีแบบดูดกลืน (Absorption Spectroscopy) เป็นการศึกษาวัดพลังงานที่ ระบบต้องการเพื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่มีพลังงานต่ำไปยังสถานะที่มีพลังงานสูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 3.10 สเปกโทรสโกปีแบบเปล่งออก (Emission Spectroscopy) เป็นการศึกษาวัดพลังงานที่ระบบคายออกมา เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะถูกกระตุ้น (excited state) ไปยังสถานะพื้น (ground state)



ภาพที่ 3.10 แผนภาพพลังงานของสเปกโทรสโกปีแบบดูดกลืน และแบบเปล่งออก

3.1.7.2 การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีโดยพิจารณาจากขนาดของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป

ซึ่งแบ่งได้เป็น 6 ชนิด โดยแสดงชนิดของสเปกโทรสโกปีตามระดับพลังงานแสดงดังตารางที่ 3.3 สามารถจำแนกรายละเอียดได้ดังนี้

(1) สเปกโทรสโกปีชนิดนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy - NMR) เป็นการให้สนามแม่เหล็ก (magnetic field) ให้แก่ระบบ ซึ่งจะไป ทำให้นิวเคลียสที่จำเพาะเจาะจงเกิดการหันไปในทิศทางที่แน่นอนเมื่อเทียบกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางการจัดตัวที่ต่างกันจะมีค่าพลังงานที่ต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลค่าพลังงานที่วัดได้มาบ่งบอกถึงทิศทางการจัดตัวของนิวเคลียสชนิดต่างๆ ได้ พลังงานที่เกี่ยวข้องกับแตรอนซิซันจะมีขนาดประมาณ 10^{-6} kJ mol⁻¹ ซึ่งจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10^4 cm (radio frequency)

(2) สเปกโทรสโกปีชนิดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance Spectroscopy - ESR) เป็นเทคนิคการตรวจหาสปีชีส์ (species) ที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่ (unpaired electron) ซึ่งโดยทั่วไปมักจะหมายถึงอนุมูลอิสระ (free radical) ในกรณีที่เป็นสารอินทรีย์ และไอออนของโลหะแตรอนซิซัน ในกรณีที่เป็นสารอนินทรีย์ เนื่องจากสารที่เสถียรโดยทั่วไปมักจะมีอิเล็กตรอนครบคู่ ดังนั้นเทคนิค ESR จึงไม่ค่อยแพร่หลายเท่าเทคนิค NMR หลักการของเทคนิคนี้ จะคล้ายกับเทคนิค NMR กล่าวคือ เป็นการให้สนามแม่เหล็ก (magnetic field) แก่ระบบ ซึ่งจะไปทำให้สปินของอิเล็กตรอนที่จำเพาะเจาะจงเกิดการหันไปในทิศทางเดียวกันกับหรือตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางการจัดตัวที่ต่างกันจะมีค่าพลังงานที่ต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลค่าพลังงานที่วัดได้มาบ่งบอกถึงทิศทางการจัดตัวของอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่านิวเคลียส เทคนิคนี้จึงใช้พลังงานสำหรับแตรอนซิซันมากกว่า คือประมาณ 10^{-3} kJ mol⁻¹ โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10 cm

(3) สเปกโทรสโกปีแบบหมุน (Rotational Spectroscopy) การเปลี่ยนระดับพลังงานของสารจะเกี่ยวข้องกับการหมุนของพันธะในโมเลกุล ดังนั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับแตรอนซิซันจะมีขนาดประมาณ 10^{-1} kJ.mol⁻¹ โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.1 cm ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ (microwave frequency) จึงมักมีผู้เรียกสเปกโทรสโกปีแบบนี้ว่า สเปกโทรสโกปีชนิดไมโครเวฟ (Microwave Spectroscopy)

(4) สเปกโทรสโกปีแบบสั่น (Vibrational Spectroscopy) การเปลี่ยนระดับพลังงานของสารจะเกี่ยวข้องกับการสั่นของพันธะในโมเลกุล ดังนั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับแตรอนซิซันจะมีขนาดประมาณ 10 kJ.mol⁻¹ โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10^{-3} cm ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ย่านอินฟราเรด (infrared frequency - IR) จึงมักมีผู้เรียกสเปกโทรสโกปีแบบนี้ว่า สเปกโทรสโกปีชนิดอินฟราเรด (Infrared Spectroscopy)

(5) สเปกโทรสโกปีแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Spectroscopy) จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในสาร จึงต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าสเปกโทรสโกปีแบบหมุนและแบบสั่น นั่นคือจะต้องใช้พลังงานประมาณ $10^3 - 10^4 \text{ kJ.mol}^{-1}$ โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ $10^{-5} - 10^{-6} \text{ cm}$ ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ย่านอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล (ultraviolet-visible frequency - UV) จึงมักมีผู้เรียกสเปกโทรสโกปีแบบนี้ว่าสเปกโทรสโกปีชนิดยูวี-วิสิเบิล (UV-Visible Spectroscopy)

(6) สเปกโทรสโกปีแบบนิวเคลียร์ (Nuclear Spectroscopy) จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของนิวเคลียสในสาร จึงต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าสเปกโทรสโกปีชนิดอื่น ๆ นั่นคือจะต้องใช้พลังงานถึงประมาณ 10^8 kJ.mol^{-1} โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10^{-10} cm

ตารางที่ 3.3 การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีตามระดับพลังงาน

ชนิดของสเปกโทรสโกปี	ขนาดของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป โดยประมาณ (kJ.mol^{-1})	ความยาวคลื่นโดยประมาณ (cm)
Nuclear Magnetic Resonance (NMR)	10^{-6}	10^4
Electron Spin Resonance (ESR)	10^{-3}	10
Rotational	10^{-1}	0.1 (microwave)
Vibrational	10	10^{-3} (infrared)
Electronic	$10^3 - 10^4$	$10^{-5} - 10^{-6}$ (ultraviolet-visible)
Nuclear	10^8	10^{-10}

3.2 สมบัติเชิงแม่เหล็กของวัสดุ

3.2.1 แนวคิดพื้นฐาน

สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุเป็นผลเนื่องมาจากโมเมนต์แม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิ (net magnetic moment) ของอิเล็กตรอนในอะตอมที่ประกอบกันในวัสดุ อิเล็กตรอนแต่ละตัวในอะตอมมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่เป็นวงโคจรรอบนิวเคลียสและจากการหมุนรอบตัวเอง โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการเคลื่อนที่เป็นวงโคจรรอบ

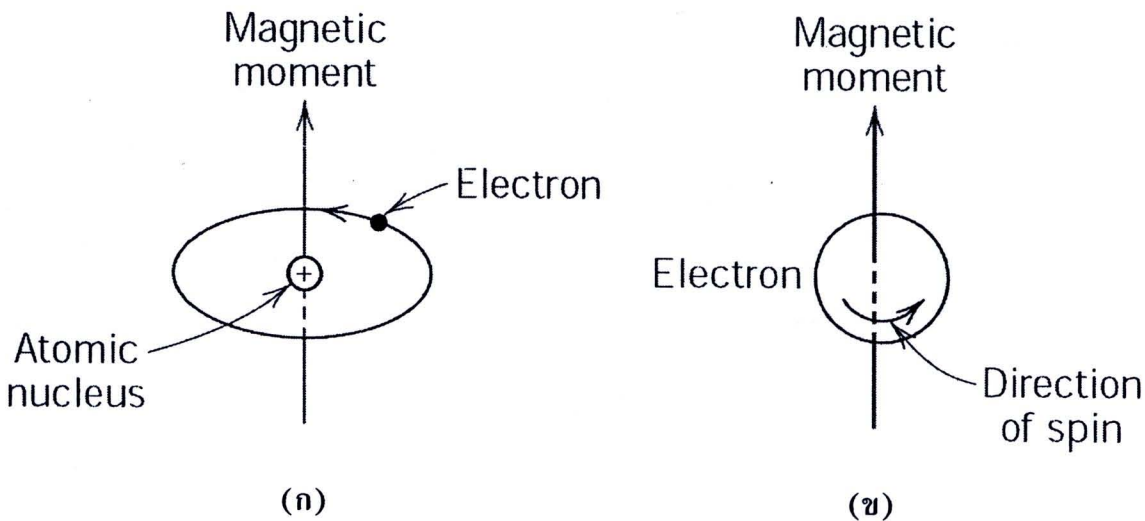
นิวเคลียส (orbital magnetic moment) เทียบได้กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนเป็นวงเล็กๆ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาดเล็กมากและมีโมเมนต์แม่เหล็ก (μ_{orbit}) วางตัวขนานกับแนวแกนของการหมุน โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการสปิน (หมุน) รอบตัวเอง ซึ่งเป็นโมเมนต์ที่มีทิศทางตามแนวการสปินของอิเล็กตรอน โดยโมเมนต์แม่เหล็กจากการสปินนี้มีทิศทางได้เพียง 2 ทิศ คือ สปินขึ้น (spin up) หรือ สปินลง (spin down) เท่านั้น ซึ่งเป็นทิศที่ขนานกันแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน

3.2.2 โมเมนต์แม่เหล็ก และแมกนีโตเซชัน

หากพิจารณาในระดับจุลภาค สาเหตุความเป็นแม่เหล็กของวัสดุมี 2 ประการ คือ การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากออร์บิทัล (Orbital) และสปิน (Spin) ของอิเล็กตรอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.2.1 โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากออร์บิทัล (Orbital Magnetic Moment หรือ M_{orbit})

การอธิบายการเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเริ่มต้นจากแบบจำลองอะตอมง่ายๆ ที่ประกอบด้วยนิวเคลียสและอิเล็กตรอนวนรอบ (Orbital motion) เป็นวงกลมรัศมี r แสดงดังภาพที่ 3.11(ก) ซึ่งจะพบว่าอนุภาคแสดงตัวเป็นประจุ ดังนั้นการโคจรของอิเล็กตรอนก็เทียบได้กับกระแสไฟฟ้าไหลวนเป็นวงกลมเล็กๆ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาดเล็กมากและมีโมเมนต์แม่เหล็กตลอดแนวของการโคจร



ภาพที่ 3.11 โมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก (ก) การโคจร (Orbiting) และ (ข) การสปินรอบตัวเองของอิเล็กตรอน (ดัดแปลงจาก William & Callister, 2001)

จากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส สามารถคำนวณกระแส I ได้เป็น

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e}{2\pi r / v} = \frac{ev}{2\pi r} \quad (3.11)$$

เมื่อ v คือ อัตราเร็ว และ T คือ คาบ ขนาดของโมเมนต์แม่เหล็ก M_{orbit} สามารถคำนวณได้เป็น

$$M_{orbit} = IA = \left(\frac{ev}{2\pi r} \right) \pi r^2 = \frac{1}{2} evr = \left(\frac{e}{2m} \right) L_o \quad (3.12)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ภายในวงโคจร และ $L_o = mvr$ คือ โมเมนตัมเชิงมุมในวงโคจร นั่นคือ โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมจะแปรผันตรงกับโมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอน แม้ว่าสารทุกชนิดประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก แต่สารส่วนใหญ่ไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กเนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะถูกหักล้างกับโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนตัวอื่น โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิจึงเป็นศูนย์

3.2.2.2 โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากสปินของอิเล็กตรอน

(Spin magnetic moment หรือ m_{spin})

สปินของอิเล็กตรอนมี 2 ชนิด คือ อัป (up) และดาวน (down)

พิจารณาการสปินของอิเล็กตรอนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω สามารถคำนวณกระแส I ได้เป็น

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e}{2\pi / \omega} = \frac{e\omega}{2\pi} \quad (3.13)$$

และสามารถคำนวณขนาดของโมเมนต์แม่เหล็ก m_{spin} ได้เป็น

$$m_{spin} = \left(\frac{e}{m} \right) L_s \quad (3.14)$$

เมื่อ L_s คือ โมเมนตัมเชิงมุมในการสปิน L_s โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากสปินในสารบางชนิดจะหักล้างกันหมด เช่น ธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ที่มีสปินอัป และสปินดาวนเท่ากัน สำหรับโปรตอน มีสปินที่ก่อให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กได้เช่นเดียวกันแต่มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ

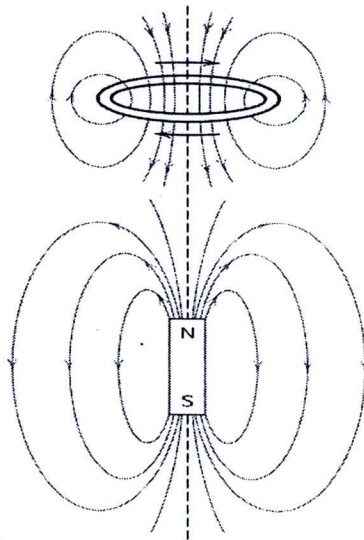
อิเล็กตรอน เนื่องจากอนุภาคทั้งสองนี้ต่างมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอน เมื่อพิจารณาโมเมนต์แม่เหล็ก m_{spin} (m) ต่อปริมาตรของวัสดุ (V) เรียกว่าแมกนีไทเซชัน (Magnetization) แทนด้วย M

$$M = \frac{m}{V} \quad (3.15)$$

3.2.3 สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

ภาพที่ 3.12 แสดงทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงแหวนตัวนำ กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก H ที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้า I ที่ไหลผ่านตัวนำ ดังสมการ

$$\oint H \cdot dl = I \quad (3.16)$$



ภาพที่ 3.12 แสดงสนามแม่เหล็กรอบ ๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลวนเป็นวงกับแท่งแม่เหล็ก (William & Callister, 2001)

การตอบสนองของวัสดุต่อสนามแม่เหล็ก H ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (Magnetic induction) หรือบางครั้งเรียกว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) แทนด้วยสัญลักษณ์ Φ ฟลักซ์แม่เหล็ก Φ (Magnetic flux) มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Weber, Wb) สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ดังสมการ

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad (3.17)$$

เมื่อ $\vec{A}$ คือ เวกเตอร์พื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร ($W.m^{-2}$) หรือเทสลา (Tesla, T)

ตัวกลางแต่ละชนิดมีการเหนี่ยวนำอย่างไร สามารถทราบได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B กับสนามแม่เหล็ก H เช่น ในสุญญากาศ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$B = \mu_0 H \quad (3.18)$$

เมื่อ μ_0 คือ สภาพซึมได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ (Magnetic permeability of free space) มีค่าคงที่เป็นสากลเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$ จากความสัมพันธ์นี้ ถ้ารู้ค่าของสนามแม่เหล็ก H ในสุญญากาศ ก็จะทำให้ทราบค่าของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ได้ทันที ในตัวกลางอื่นๆ ที่ไม่ใช่สุญญากาศ สนามแม่เหล็ก H และ B ก็ยังคงสัมพันธ์กับสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก μ ของวัสดุตัวกลางนั้น โดยเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$B = \mu H \quad (3.19)$$

ในตัวกลาง เช่น วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnets) และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์รี (Ferrimagnets) สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ไม่ได้เป็นเชิงเส้นกับสนามแม่เหล็ก H นั่นคือ μ ไม่เป็นค่าคงที่ เช่นในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร ค่า μ เปลี่ยนแปลงไปตามสนาม H ในขณะที่วัสดุแม่เหล็กพารา (Paramagnets) และไดอา (Diamagnets) ค่า μ เป็นค่าคงที่ในช่วงที่กว้างกว่าการวัดกราฟระหว่าง B กับ H หรือกราฟฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็ก

3.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก H , M และ B

ในการอธิบายปรากฏการณ์ทางแม่เหล็ก สนามแม่เหล็ก (H), แมกนีโตเซชัน (M) และสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) มีความสัมพันธ์กัน เมื่อวัสดุมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก H ผลรวมของสนามแม่เหล็ก H และ M สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ดังสมการ

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (3.20)$$

ในระบบ SI B มีหน่วยเป็น T ขณะที่ H และ M มีหน่วยเป็น Am^{-1} สมการนี้ใช้อธิบายปริมาณทางแม่เหล็กพื้นฐานทั้งสามนี้ได้ถูกต้องทุกสถานการณ์ การตอบสนองของวัสดุต่อสนามแม่เหล็กสามารถแสดงได้ด้วยสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (μ) กำหนดโดย

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.21)$$

และค่าความอ่อนไหว (Susceptibility, χ) ที่กำหนดโดย

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (3.22)$$

สภาพซึมได้ทางแม่เหล็กและค่าความอ่อนไหว อาจเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็ก H ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กและค่าความอ่อนไหวที่สนามแม่เหล็ก H ใดๆ หาได้จากความชันของกราฟ B กับ H และ M กับ H ดังสมการ

$$\mu' = \frac{dB}{dH} \quad (3.23)$$

และ

$$\chi' = \frac{dM}{dH} \quad (3.24)$$

เพื่อให้อยู่ในรูปที่สังเกตได้ง่าย จึงนิยามระบุในรูปของสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability) แทนด้วยสัญลักษณ์ μ_r กำหนดโดย

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \quad (3.25)$$

ซึ่ง μ_o มีสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสุญญากาศเท่ากับ 1 จากการจัดรูปสมการเป็น

$$B = \mu_o(H + M) = \mu_o(H + \chi H) = \mu_o(1 + \chi)H = \mu H \quad (3.26)$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กกับค่าความอ่อนไหว

$$\mu_r = (\chi + 1) \quad (3.27)$$

นักฟิสิกส์ และนักวิทยาศาสตร์ มักจะอ้างอิงค่าแมกนีโตเซชัน และค่าความอ่อนไหว ในขณะที่วิศวกร ซึ่งเน้นศึกษาวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โร มักกล่าวถึงค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (William & Callister, 2001)

3.2.5 ชนิดของสภาวะแม่เหล็ก

3.2.5.1 สภาวะแม่เหล็กแบบไดอา (Diamagnetism) (Callister, 2005; Smith, 2006)

สภาวะแม่เหล็กแบบไดอา เป็นสภาพแม่เหล็กอย่างอ่อนๆ ซึ่งไม่ถาวร และคงอยู่ได้เฉพาะช่วงเวลาที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกยังคงกระทำอยู่เท่านั้น สภาพนี้จะถูก

เหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่แบบโคจรของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำ โมเมนต์แม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมามีขนาดเล็กมาก และมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศของสนามที่มากกระทำ ดังนั้นค่าความสามารถในการซึมซับสัมพัทธ์ μ_r จึงน้อยกว่าหนึ่ง (น้อยกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น) และขนาดของค่าความไวต่อสภาพแม่เหล็กจะเป็นลบ กล่าวคือ ขนาดของสนามแม่เหล็ก B ภายในของแข็งที่มีสภาพแม่เหล็กแบบไดอาจะน้อยกว่าสนามที่เกิดในสุญญากาศ ค่าความไวต่อสภาพแม่เหล็กเชิงปริมาตร χ_m ของวัสดุของแข็งที่มีสภาพแม่เหล็กแบบไดอาจะอยู่ในระดับของ -10^{-5} จากตารางที่ 3.5 เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก จะไม่มีไดโพลเกิดขึ้น แต่เมื่อมีสนาม ไดโพลจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในทิศที่ตรงข้ามกับทิศของสนามที่เหนี่ยวนำ ในที่นี้ลูกศรจะแสดงถึงโมเมนต์ของไดโพลของอะตอม ลูกศรเหล่านี้แสดงผลของโมเมนต์เนื่องจากอิเล็กตรอนเท่านั้น

3.2.5.2 สภาวะแม่เหล็กแบบพารา (Paramagnetism) (Callister, 2005)

ในวัสดุของแข็งบางชนิด อะตอมแต่ละอะตอมมีโมเมนต์ของไดโพลแบบถาวร ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเมนต์แม่เหล็กจากการโคจรและ/หรือหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนหักล้างกันไม่หมด ในสภาพที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก การเรียงตัวของไดโพลของโมเมนต์แม่เหล็กระดับอะตอมเหล่านี้จะเป็นไปอย่างสุ่ม ทำให้โดยรวมแล้วชิ้นวัสดุนั้นไม่มีสภาวะแม่เหล็กให้เห็นในระดับมหภาค แต่ไดโพลของอะตอมเหล่านี้สามารถหมุนได้อย่างอิสระ ทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กแบบพาราขึ้น เมื่อไดโพลเหล่านี้หมุนทิศอย่างมีระเบียบภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มากกระทำ ดังตารางที่ 3.5 ไดโพลแม่เหล็กเหล่านี้ต่างทำงานกันอย่างอิสระ ไม่ส่งผลกระทบต่อดีโพลที่อยู่ติดกัน เมื่ออยู่ภายในสนามแม่เหล็กภายนอก ไดโพลพวกนี้จะช่วยเสริมสนามที่เกิดขึ้นทำให้ค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ μ_r มีค่ามากกว่าหนึ่ง และทำให้ค่าความไวต่อสภาพแม่เหล็กมีค่าเป็นบวกเล็กน้อยอยู่ในช่วง 10^{-5} – 10^{-2} สำหรับวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบพารา วัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบพาราถือว่าเป็นแม่เหล็กแบบไม่ถาวร เพราะจะแสดงสภาวะแม่เหล็กก็ต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำเท่านั้น อีกทั้งความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่เกิดขึ้นในวัสดุนี้แทบจะไม่ต่างจากที่เกิดในสุญญากาศ

3.2.5.3 สภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (Ferromagnetism) (Callister, 2005; Smith, 2006)

วัสดุโลหะบางชนิดมีโมเมนต์แม่เหล็กแบบถาวรอยู่ในตัวถึงแม้ว่าจะไม่ได้้อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กก็ตาม ทำให้สามารถแสดงสภาวะแม่เหล็กที่แรงและถาวรได้ ลักษณะเฉพาะเช่นนี้เรียกว่า สภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (ferromagnetism) วัสดุที่สามารถแสดงสภาวะแม่เหล็กเช่นนี้ได้แก่ เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) และนิกเกิล (Ni) และโลหะหายาก (rare earth metals) บางตัว เช่น กาโดลิเนียม (Gd) ค่าความไวต่อสภาพแม่เหล็กในวัสดุที่มี

สภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรนีสูงได้ถึง 10^6 ดังนั้น ทำให้ $H \ll M$ และสมการที่ 3.20 จึงเหลือเพียง

$$B \cong \mu_0 M \quad (3.28)$$

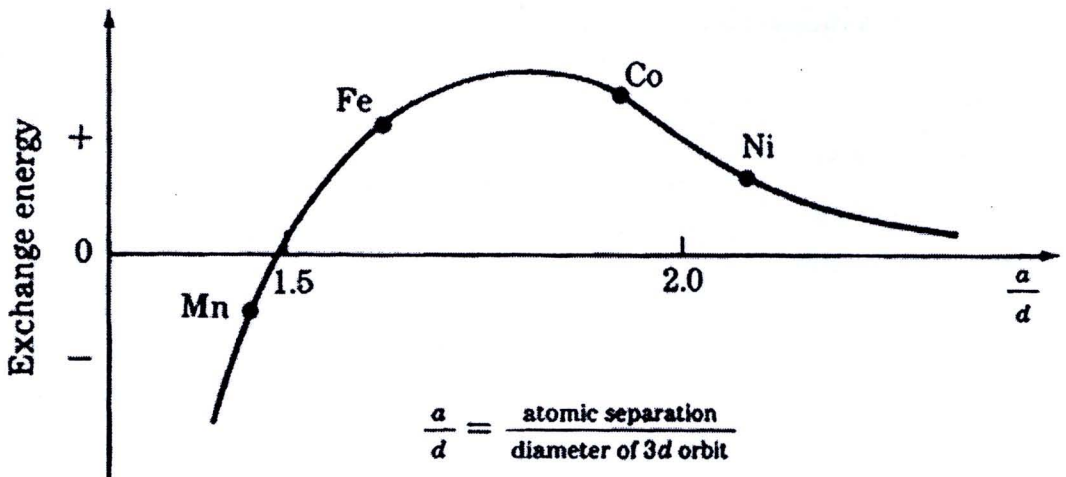
โมเมนต์แม่เหล็กแบบถาวรในวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรเป็นผลมาจากโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน ทั้งนี้มีการหักล้างกันของโมเมนต์ดังกล่าวไม่หมด อันเนื่องมาจากธรรมชาติของอิเล็กตรอนในอะตอมนั่นเอง โมเมนต์แม่เหล็กที่เป็นผลจากการโคจรของอิเล็กตรอนก็มีผลต่อโมเมนต์รวมเช่นกัน แต่ส่วนนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลจากการหมุนรอบตัวเอง นอกจากนี้ในวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรมีปฏิสัมพันธ์แบบคู่ควบ (coupling interaction) ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวสุทธิของอะตอมที่อยู่ติดกันวางตัวในทิศที่สอดคล้องกันและกัน ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามภายนอกอยู่เลยก็ตาม สมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรของธาตุทรานซิชันพวก Fe, Co, Ni เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ซึ่งอยู่ที่ระดับพลังงานชั้นในเกิดการหมุนรอบตัวเองและจัดเรียงตัวในโครงผลึก ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่เป็นคู่และหมุนสวนทิศทางกันในระดับพลังงานชั้นในจะไม่ให้ผลของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic dipole moment) นอกจากนี้อิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electrons) ของอะตอม ก็จะไม่แสดงผลของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กเช่นกัน เพราะอิเล็กตรอนนั้นเกิดพันธะทางเคมีกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมอื่น ดังนั้น จึงอาจกล่าวสรุปได้ว่าอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นในของอะตอมเท่านั้นที่จะมีบทบาทสำคัญต่อการแสดงสภาพสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โร เช่น Fe, Co และ Ni ที่มีอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่อยู่ที่ชั้นระดับพลังงาน 3d จำนวน 4, 3 และ 2 ตามลำดับ จึงทำให้ Fe, Co และ Ni สามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรได้

ตารางที่ 3.4 การจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น 3d-ออร์บิทัลของธาตุทรานซิชัน

อะตอม ของ ธาตุ	จำนวน วาเลนซ์ อิเล็กตรอน	จำนวน อิเล็กตรอน เดี่ยวในชั้น 3d	การจัดเรียงอิเล็กตรอน ในชั้น 3d ออร์บิทัล	จำนวน อิเล็กตรอน ในชั้น 4s					
V	23	3	<table><tr><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td></td><td></td></tr></table>	↑	↑	↑			2
↑	↑	↑							
Cr	24	5	<table><tr><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td></tr></table>	↑	↑	↑	↑	↑	1
↑	↑	↑	↑	↑					
Mn	25	5	<table><tr><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td></tr></table>	↑	↑	↑	↑	↑	2
↑	↑	↑	↑	↑					
Fe	26	4	<table><tr><td>↑↓</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td></tr></table>	↑↓	↑	↑	↑	↑	2
↑↓	↑	↑	↑	↑					
Co	27	3	<table><tr><td>↑↓</td><td>↑↓</td><td>↑</td><td>↑</td><td>↑</td></tr></table>	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	2
↑↓	↑↓	↑	↑	↑					
Ni	28	2	<table><tr><td>↑↓</td><td>↑↓</td><td>↑↓</td><td>↑</td><td>↑</td></tr></table>	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	2
↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑					
Cu	29	0	<table><tr><td>↑↓</td><td>↑↓</td><td>↑↓</td><td>↑↓</td><td>↑↓</td></tr></table>	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	1
↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓					

(Smith, 2006)

อิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ในระดับพลังงาน 3d ของอะตอม Fe, Co และNi สามารถจัดเรียงตัวขนานกันตัวเองซึ่งการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า การเกิดสภาวะแม่เหล็กตัวเอง (spontaneous magnetization) และจะเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างกันมีค่าเป็นบวก ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่ออัตราส่วนระหว่างระยะห่างของอะตอม (atomic spacing, a) และเส้นผ่านศูนย์กลางของ 3d-ออร์บิทัล (d) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.4-2.7 ดังแสดงในภาพที่ 3.13 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า Fe, Co และ Ni มีค่าอัตราส่วน a/d อยู่ในช่วงดังกล่าว จึงทำให้ค่าพลังงานแลกเปลี่ยนเป็นบวก ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้อิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ในระดับพลังงาน 3d ของอะตอม Fe, Co และ Ni สามารถเกิดการจัดเรียงตัวขนานกันตัวเองในบริเวณเล็กๆหนึ่งที่เราเรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก (magnetic domains) ในทางตรงกันข้าม แม้ว่า Mn และ Cr จะมีอิเล็กตรอนไม่มีคู่ในระดับพลังงาน 3d เช่นกัน แต่ไม่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวขนานกันเองได้ เพราะพลังงานแลกเปลี่ยนมีค่าเป็นลบ ดังแสดงในภาพที่ 2.13 จึงทำให้ Mn และ Cr ไม่แสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โร



ภาพที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแลกเปลี่ยนกับค่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของอะตอมและเส้นผ่านศูนย์กลางของ 3d-ออร์บิทัล (a/d) ของธาตุทรานซิชันบางชนิด (Smith, 2006)

โดยปกติ แม้ว่าอิเล็กตรอนเดี่ยวในระดับพลังงาน 3d จะมีการเรียงตัวขนานกันที่อุณหภูมิห้องในบริเวณโดเมนแม่เหล็ก (magnetic domains) หนึ่งๆ แต่ถ้าแต่ละโดเมนแม่เหล็กยังคงจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบก็จะทำให้ไม่มีผลทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กได้ นอกจากจะทำให้โดเมนแม่เหล็กแต่ละโดเมน เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันเสียก่อน จึงจะทำให้วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเกิดสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์ไรต์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปและเมื่อเอาสนามแม่เหล็กนั้นออก การเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กก็ยังคงมีความเป็นระเบียบเช่นเดิม แม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกอยู่ก็ตามสภาพแม่เหล็กสูงสุดที่สามารถเป็นไปได้ หรือ สภาพแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization) M_s ในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โร หมายถึง สภาพแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้เมื่อโดเมนแม่เหล็กในชิ้นวัสดุนั้นจัดวางตัวเองในทิศเดียวกับสนามภายนอกทั้งหมด และในการนี้จะเกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว (saturation flux density) B_s ขึ้นมาอีกด้วย ค่าสภาวะแม่เหล็กอิ่มตัวเป็นผลคูณของโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิในแต่ละอะตอมกับจำนวนอะตอมทั้งหมดที่มีนั่นเอง สำหรับใน Fe, Co และ Ni ค่าโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิต่ออะตอมเป็น 2.22, 1.72 และ 0.60 หน่วยโมเมนต์แม่เหล็กของบอร์ตามลำดับ

3.2.5.4 สภาวะแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร (Antiferromagnetism)

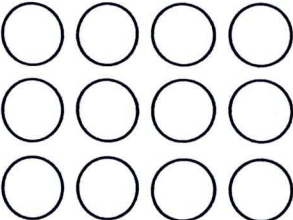
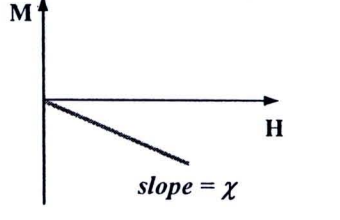
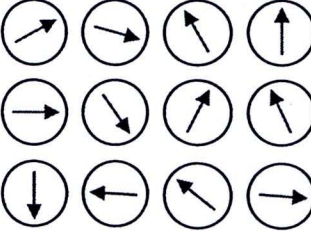
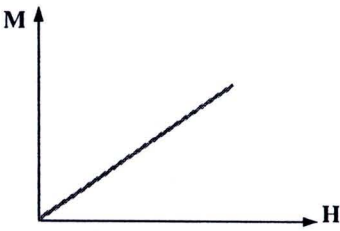
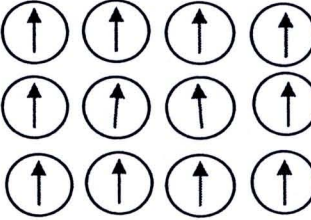
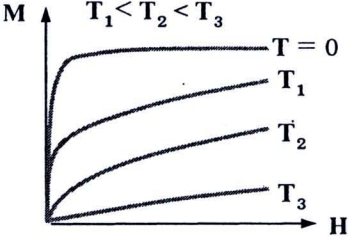
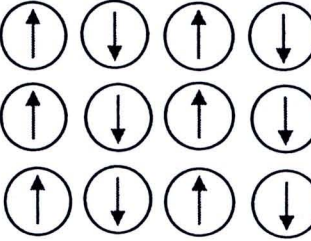
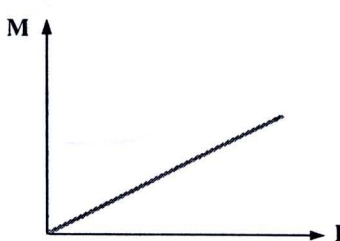
(Callister, 2005)

ปรากฏการณ์คู่ควบโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดระหว่างอะตอม หรือไอออนที่อยู่ติดกันในรูปแบบนี้ พบในวัสดุที่ไม่มีสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โร ในวัสดุกลุ่มนี้จะมีผลของการคู่ควบที่ทำให้เกิดการเรียงตัวแบบสวนทิศกัน (ขนานกันแต่ทิศตรงข้าม) กล่าวคือ การจัดเรียงโมเมนต์อันเนื่องมาจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนในอะตอมหรือไอออนที่อยู่ติดกันจะมีทิศตรงกันข้ามพอดี เรียกลักษณะนี้ว่า สภาวะแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร ตัวอย่างเช่น แมงกานิสออกไซด์ (MnO) ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกที่ประกอบด้วยไอออน คือ Mn^{2+} และ O^{2-} จะไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิที่เกิดจากไอออน O^{2-} แต่ในไอออน Mn^{2+} มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากโมเมนต์จากการหมุนรอบตัวเองเป็นหลัก ไอออน Mn^{2+} เหล่านี้ มีตำแหน่งการวางตัวอยู่ในโครงสร้างผลึกในลักษณะที่ทำให้โมเมนต์ของไอออนที่อยู่ติดต่อกันมีทิศทางสวนทางกันพอดี ซึ่งโมเมนต์แม่เหล็กจะสวนทางกันและหักล้างกันหมด ทำให้ตัววัสดุเองโดยรวมแล้วไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิเหลืออยู่

3.2.5.5 สภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์รี (Ferrimagnetism) (Callister, 2005)

เซรามิกบางชนิดสามารถมีสภาวะแม่เหล็กแบบถาวรได้ เรียกว่า สภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์รี (ferrimagnetism) ลักษณะเฉพาะในระดับมหภาคของแม่เหล็กแบบเฟอร์โร และแบบเฟอร์รีนั้นคล้าย ๆ กัน สิ่งที่แตกต่างกันก็คือ ต้นกำเนิดของโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิที่อยู่ในตัววัสดุนั้นเอง หลักการของการเกิดสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์รีจะอธิบายโดยใช้ตัวอย่างของเฟอร์ไรต์แบบคิวบิก (cubic ferrite) วัสดุไอออนิกชนิดนี้จะเขียนสูตรเคมีได้เป็น MFe_2O_4 โดยที่ M หมายถึงธาตุโลหะใด ๆ ต้นแบบของเฟอร์ไรต์ คือ แร่แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ซึ่งเป็นแม่เหล็ก และบางครั้งก็เรียกว่า แร่แม่เหล็กเข็มทิศ (lodestone) สูตรของ Fe_3O_4 อาจจะเขียนเป็น $\text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-}(\text{Fe}^{3+})_2(\text{O}^{2-})_3$ ซึ่งหมายความว่าไอออนของ Fe ที่ปรากฏในวัสดุนี้ทั้งในรูป +2 และ +3 ในอัตราส่วน 1:2 ในไอออน Fe^{2+} และ Fe^{3+} ต่างก็มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิทั้งคู่ และมีค่าเท่ากับ 4 และ 5 หน่วยโมเมนต์แม่เหล็กของ บอห์รตามลำดับ ส่วนไอออนของ O^{2-} นั้นเป็นกลางทางแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีปฏิสัมพันธ์แบบสวนทางกันของโมเมนต์จากการหมุนรอบตัวของอิเล็กตรอนระหว่างไอออนของ Fe ทั้งสองชนิดด้วยคล้าย ๆ กันกับลักษณะของสภาวะแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร แต่ต่างกันตรงที่ โมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวเหล่านี้หักล้างกันไม่หมดพอดี จึงทำให้เหลือโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิแล้วเกิดสภาวะแม่เหล็กที่เราเรียกว่า เฟอร์รีขึ้น

ตารางที่ 3.5 การแบ่งชนิดของวัสดุตามสมบัติความเป็นแม่เหล็กของสาร

ชนิด	ทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก	การเปลี่ยนแปลงของ M เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก H
Diamagnetism		
Paramagnetism		
Ferromagnetism		
Antiferromagnetism		
Ferrimagnetism	