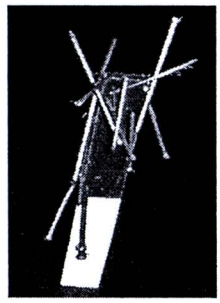
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โครงการการศึกษาค้นคว้าอิสระนี้ เป็นการสร้างชุดอุปกรณ์หัววัดฮอลล์เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์เรื่องแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก เพื่อให้การเรียนการสอนมีประสิทธิภาพมากขึ้น แม่เหล็กเป็นเรื่องที่มีบทบาทต่อเทคโนโลยีเป็นอย่างมากแต่นักเรียนกับขาดความรู้ความเข้าใจในเรื่องนี้มากที่สุด ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเรียนรู้เทคโนโลยีที่มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นรถไฟฟ้าแม่เหล็กเหนือรางที่มีความเร็วสูง ฮาร์ดดิสก์ เอ็มอาร์ไอ (MRI) บัตรแถบแม่เหล็ก หม้อแปลงไฟฟ้า ไดนาโม มอเตอร์ เป็นต้น ดังนั้นหากครูผู้สอนสามารถจัดหาอุปกรณ์ประกอบการสอนอย่างง่ายมาประกอบ การเรียนการสอนเรื่องแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก จะทำให้นักเรียนมีความเข้าใจได้ดีขึ้น และเป็นการกระตุ้นให้นักเรียนมีความสนใจมากขึ้น เพื่อให้เกิดความรู้พื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับแม่เหล็ก ในบทนี้เป็นการให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก รวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อประกอบชุดอุปกรณ์ ดังนี้

2.1 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก (Magnetic and Magnetic field)

วิชาสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากการค้นพบว่า แร่ชนิดหนึ่ง (magnetite) สามารถดูดผงเหล็กได้ จึงเรียกแร่ชนิดนี้ว่า แม่เหล็ก (Magnetic) แม่เหล็กเป็นสิ่งที่สามารถดูดวัสดุบางชนิดได้ เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ เป็นต้น การที่แม่เหล็กดูดสารบางอย่างได้ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กในบริเวณโดยรอบแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแท่งแม่เหล็กดูดติดกับตะปู

ในปี ค.ศ. 1820 เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเส้นลวดสามารถทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กได้ นั่นคือทำให้เข็มทิศเบนได้ ซึ่งนิยามบริเวณรอบๆ แท่งแม่เหล็กหรือลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เรียกว่า สนามแม่เหล็ก (magnetic field) ขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กแสดงด้วยเวกเตอร์ $\vec{B}$ สามารถแทนสนามแม่เหล็กได้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก [1] สนามแม่เหล็ก คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก [2] มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1)

$$B = \frac{\phi}{A} \qquad (2.1)$$

เมื่อ B คือ ขนาดของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา (T)

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Wb)

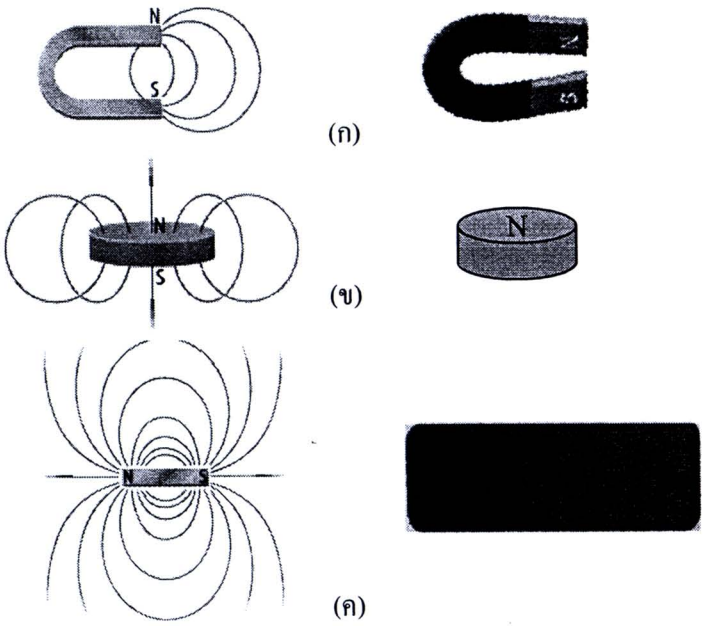
A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

2.2 เส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux)

สนามแม่เหล็กบริเวณรอบๆ แท่งแม่เหล็ก ซึ่งเกิดจากแรงแม่เหล็กกระทำต่อวัตถุ ความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กแสดงโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

1) เส้นแรงแม่เหล็ก หรือฟลักซ์แม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก หรือลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณนั้นๆ เส้นแรงแม่เหล็กแสดงให้เห็นได้โดยใช้ผงเหล็กโรยรอบๆ แท่งแม่เหล็ก หรือการระบุตำแหน่งของเข็มทิศเล็กๆ ณ จุดต่างๆ รอบๆ แท่งแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กแต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก (ก) ทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กแบบเกือกม้า (ข) ทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแผ่นแม่เหล็ก และ (ค) ทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็ก

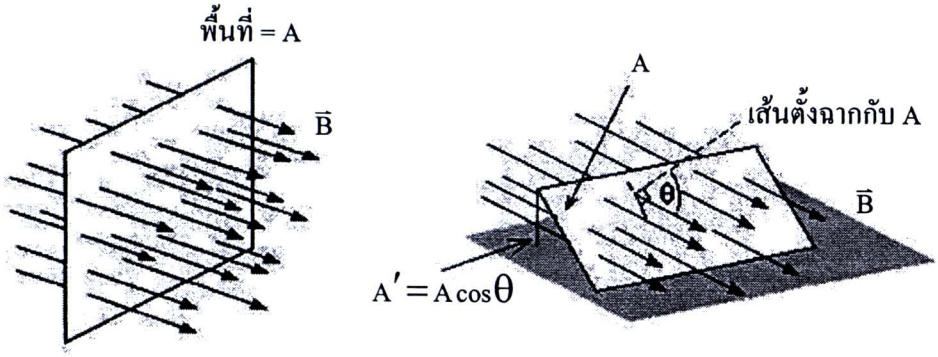
จากรูปที่ 2.2 (ก) เป็นเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบแท่งแม่เหล็กแบบเกือกม้า จะมีทิศพุ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ รูปที่ 2.2 (ข) เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กแบบแผ่นจะมีทิศพุ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ และรูปที่ 2.2 (ค) เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ จะเห็นว่าไม่ว่าจะเป็นแม่เหล็กแบบใดก็ตามทิศของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้เสมอ ซึ่งแสดงทิศของสนามแม่เหล็กนั่นเอง

2) เส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ A สม่ำเสมอ

พิจารณาสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ซึ่งคงที่ทั้งขนาดและทิศทาง ดังรูปที่ 2.3 (ก) เส้นแรงแม่เหล็กผ่านตั้งฉากกับพื้นผิวที่มีพื้นที่ A เนื่องจากสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กและแปรผกผันกับพื้นที่ ดังนั้นจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านผิวที่มีพื้นที่ A ย่อมแปรผันตรงกับ BA เรียกผลคูณของสนามแม่เหล็ก B กับพื้นที่ A ซึ่งตั้งฉากกับสนามว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Wb) จากรูปที่ 2.3 (ก) จะได้ว่า

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

$$\phi = BA \qquad (2.2)$$



(ก) (ข)

รูปที่ 2.3 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ A เมื่อ (ก) เส้นแรงแม่เหล็กตั้งฉากกับผิวที่มีพื้นที่ A และ (ข) เส้นแรงแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับผิวที่มีพื้นที่ A [3]

ถ้าพื้นที่ A ไม่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์ที่ผ่านพื้นที่ A ย่อมลดลง ฟลักซ์แม่เหล็ก จึงมีค่าน้อยกว่า BA โดยพิจารณารูปที่ 2.3 (ข) จะได้ว่าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ A เท่ากับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ A' โดย A' ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จะได้ว่า A' เท่ากับ $A\cos\theta$ ฟลักซ์ที่ผ่านพื้นที่ A ในรูป 2.3 (ข) คือ

$$\phi = BA' \qquad (2.3)$$

$$\phi = BA\cos\theta \qquad (2.4)$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่าง $\vec{A}$ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จากสมการ (2.4) จะได้ว่า

(1) ฟลักซ์ที่ผ่านผิวที่มีพื้นที่ A จะมีค่าสูงสุดเมื่อผิวนั้นตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กหรือเส้นตั้งฉากพื้นที่ A ขนานกับเส้นแรงแม่เหล็ก ($\theta = 0^\circ$)

(2) ฟลักซ์เป็น 0 เมื่อพื้นผิวนั้นขนานกับสนามแม่เหล็ก ($\theta = 90^\circ$)

โดยทั่วไปแล้วสนามแม่เหล็กที่ผ่านผิวที่เราพิจารณาอาจไม่คงที่ ดังนั้นนิยามของฟลักซ์ตามสมการที่ (2.4) จึงมีความหมายเฉพาะผิวที่มีพื้นที่เล็กๆ เท่านั้น เมื่อพิจารณาผิวทั่วไปผิวหนึ่ง แบ่งเป็นส่วนย่อยๆ จำนวนมาก โดยให้แต่ละผิวย่อยๆ มีพื้นที่ ΔA และถือว่าการแปรค่าของสนามแม่เหล็กบน $\Delta\vec{A}$ ไม่ต้องคำนึงถึงถ้า $\Delta\vec{A}$ เล็กเพียงพอ เพื่อความสะดวกจึงนิยามเวกเตอร์ $\Delta\vec{A}$ ว่ามีขนาดเท่ากับพื้นที่ ΔA และมีทิศพุ่งออกตั้งฉากกับผิว จึงได้ฟลักซ์แม่เหล็ก $\Delta\phi_i$ ที่ผ่านพื้นที่เล็กๆ ΔA_i เป็น

$$\Delta\phi_i = B_i \Delta A_i \cos\theta = \vec{B}_i \cdot \Delta\vec{A}_i \qquad (2.5)$$

ถ้า ϕ เป็น ฟลักซ์ที่ผ่านผิว ดังนั้น

$$\phi \equiv \lim_{\Delta A \to 0} \sum \vec{B}_i \Delta\vec{A}_i = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}_i \qquad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) เป็นอินทิกรัลเชิงผิว โดยทั่วไปเราสนใจการหาฟลักซ์ที่ผ่านผิวปิด ถ้าให้ $\oint$ แทนอินทิกรัลรอบผิวปิด และจะเขียนฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ ที่ผ่านผิวปิดได้เป็น

$$\phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A}_i \qquad (2.7)$$

สามารถหาทิศทางของสนามแม่เหล็กได้โดยการใช้ผงตะไบเหล็กโรยรอบๆ แท่งแม่เหล็ก หรือใช้เข็มทิศวางรอบๆ แท่งแม่เหล็ก ซึ่งสามารถบอกได้เฉพาะทิศทางของสนามแม่เหล็กเท่านั้น ไม่สามารถบอกขนาดของสนามแม่เหล็กได้ จึงต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก นักวิทยาศาสตร์พยายามวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการต่าง ๆ แต่ในปัจจุบันสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้สะดวกและรวดเร็วโดยใช้ตัวรับรู้ฮอลล์ (Liner Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) จึงได้ทำการสร้างเครื่องมือหรืออุปกรณ์วัดความเข้มสนามแม่เหล็กขึ้น เป็นอุปกรณ์อย่างง่ายและราคาไม่แพง ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์การวัดความเข้มสนามแม่เหล็กจึงควรเรียนรู้เรื่องปรากฏการณ์ฮอลล์ ตัวรับรู้ฮอลล์ รวมทั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ใน ค.ศ. 1879 เอดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัย จอห์น ฮอพคินส์ ซึ่งในขณะนั้นมีอายุเพียง 24 ปี ได้พบว่าเมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ประจุพาหะ (charge carrier) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำบาง ในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ [4]

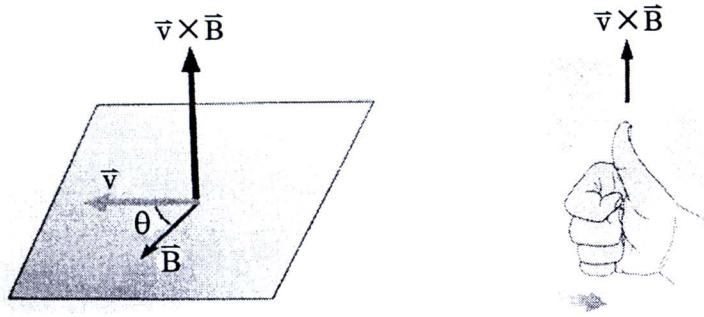
ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็ก ทำให้มีแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก หาได้จาก

$$\vec{F}_B = q\vec{v}\times\vec{B} \tag{2.8}$$

โดยขนาดของแรงแม่เหล็ก

$$F_B = qvB\sin\theta \tag{2.9}$$

มุม θ คือมุมระหว่างความเร็ว $\vec{v}$ กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ และทิศทางของแรงแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 2.4

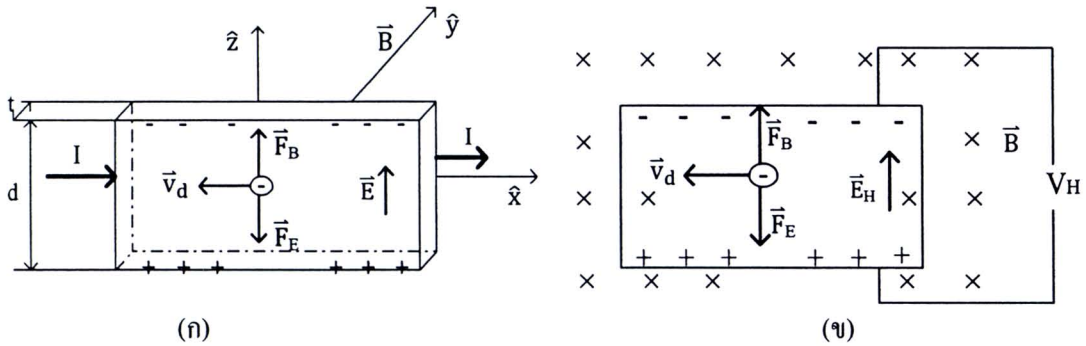


รูปที่ 2.4 (ก) แสดงทิศทางของแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก $\vec{v}\times\vec{B}$ และ (ข) แสดงการหาทิศทางของแรงแม่เหล็กจากกฎมือขวา [5]

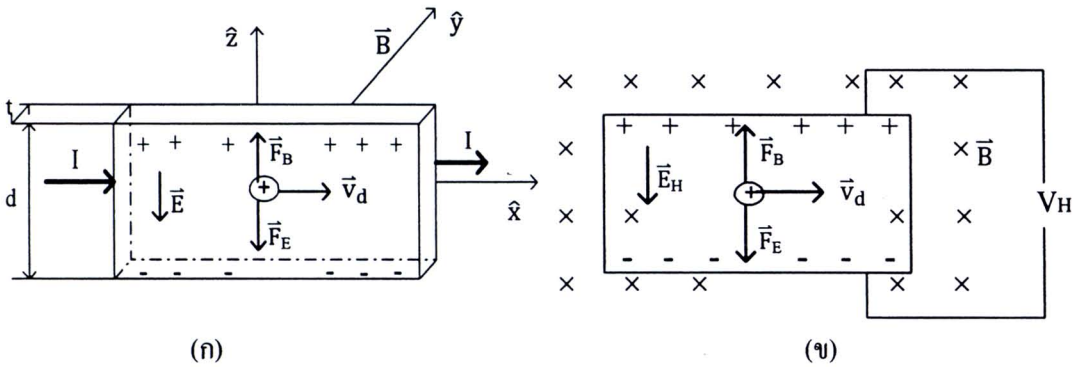
เมื่อ q เป็นประจุบวก ทิศของแรงแม่เหล็กจะตั้งฉากกับระนาบของ $\vec{v}$ กับ $\vec{B}$ เป็นไปตามกฎมือขวา สำหรับ q เป็นประจุลบ ทิศของแรงแม่เหล็กจะมีทิศตรงข้ามกับกรณีประจุบวก [6]

ปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถพิจารณาได้จากตัวนำดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.5 (ก) แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง d หนา t และมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในทิศตามแกน $+\hat{x}$ การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า q ในสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับทิศของกระแสไฟฟ้า คือเคลื่อนที่ไปในแนวตามแกน $-\hat{x}$ ด้วยความเร็วลอยเลื่อย ($\bar{v}_d$) เมื่อใส่สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ $\vec{B}$ ในทิศพุ่งเข้าและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางอยู่ในทิศตามแกน $+\hat{y}$ อิเล็กตรอนจะได้รับแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กในทิศชี้ขึ้น ทำให้อิเล็กตรอน

เกิดการเบนไปสะสมอยู่ที่ขอบบนของแผ่นตัวนำ ส่วนขอบล่างมีประจุไฟฟ้าบวกสะสมอยู่เช่นกัน การสะสมของประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสองทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Field, $\vec{E}_H$) ในแผ่นตัวนำบางมีทิศชี้ขึ้น ซึ่งทิศของสนามไฟฟ้าจะมีทิศจากบวกไปลบ และทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้า $\vec{F}_E = q\vec{E}_H$ กระทำกับอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบในทิศตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้ามีทิศชี้ขึ้น แรงทางไฟฟ้าจึงมีทิศชี้ลง สนามไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งแรงไฟฟ้าบนพาหะประจุสมดุลกับแรงแม่เหล็กที่อยู่ในทิศชี้ขึ้น เมื่อเกิดภาวะสมดุลอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะประจุจะเคลื่อนที่ไปตามแกน $-\hat{x}$ โดยไม่เกิดการเบี่ยงเบน ทำให้สนามไฟฟ้าไม่เพิ่มขึ้นด้วย หากใช้โวลต์มิเตอร์ต่อระหว่างขอบบนกับขอบล่างของตัวนำ ดังรูปที่ 2.5 (ข) จะสามารถวัดความต่างศักย์ได้ เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H)



รูปที่ 2.5 (ก) แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์สำหรับพาหะประจุที่เป็นประจุลบ และ (ข) แสดงการวัดค่าความต่างศักย์ฮอลล์ [7]



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์สำหรับพาหะประจุที่เป็นประจุบวก และ (ข) แสดงการวัดค่าความต่างศักย์ฮอลล์ [7]

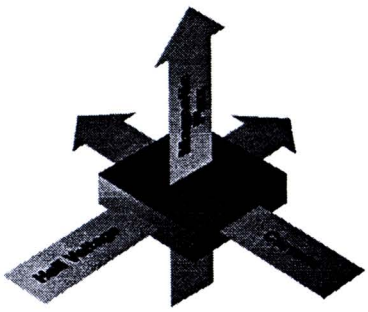
หากพาหะประจุเป็นประจุบวก ซึ่งเคลื่อนที่ตามแกน +x ในทิศเดียวกับทิศของกระแสไฟฟ้า I ดังรูปที่ 2.6 (ก) แรงแม่เหล็ก $\vec{F}_B = q\vec{v}_d \times \vec{B}$ ยังคงมีทิศขึ้น ทำให้ประจุบวกเกิดการเบี่ยงเบนไปสะสมที่ขอบบนของแผ่นตัวนำ ส่วนขอบล่างมีประจุไฟฟ้าลบสะสมอยู่เช่นกัน มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศชี้ลง ทำให้ทิศของแรงไฟฟ้ามีทิศชี้ลงตามทิศของสนามไฟฟ้า และมีทิศตรงข้ามกับทิศของแรงแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งแรงไฟฟ้าบนพาหะประจุสมดุลกับแรงแม่เหล็กที่อยู่ในทิศชี้ขึ้น เช่นเดียวกับประจุลบ จึงทำให้ประจุบวกเคลื่อนที่โดยไม่เกิดการเบี่ยงเบน ทำให้สนามไฟฟ้าไม่เพิ่มขึ้นด้วย สามารถวัดความต่างศักย์ฮอลล์ได้ ดังรูปที่ 2.6 (ข) สนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) ดังนี้

$$E_H = V_H / d \tag{2.10}$$

ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall Potential Difference หรือ Hall Voltage, V_H) จากสมการที่ (2.10) จะได้ว่า

$$V_H = E_H d \tag{2.11}$$

ทิศของกระแสไฟฟ้า, สนามแม่เหล็ก และความต่างศักย์ฮอลล์ของการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

สภาพขั้วของความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) ทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จากมิลลิโวลต์มิเตอร์ จากรูปที่ 2.5 (ข) ประจุพาหะคืออิเล็กตรอนจึงมีประจุลบ ถ้าประจุพาหะเป็นประจุบวกทิศ $\vec{v}_d$ และ $\vec{E}_H$ จะตรงข้ามกับประจุลบดังแสดงในรูป 2.6 (ข) แต่ทิศของ $\vec{F}_E$ และ $\vec{F}_B$ ยังคงเดิม ซึ่งทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านบน ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านล่าง และสภาพขั้วของ V_H จะตรงข้ามกันกรณีที่ประจุพาหะเป็นประจุลบ ความสัมพันธ์ในรูปของความต่างศักย์ฮอลล์ซึ่งใช้คำนวณ

ความหนาแน่นพาหะประจุ n ภายในตัวนำได้ เริ่มจากที่ภาวะสมดุลขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน จะได้

$$\vec{F}_E = \vec{F}_B$$

$$(-e)E_H = (-e)v_d B$$

$$E_H = v_d B \tag{2.12}$$

จากสมการ (2.11) และ (2.12) จะได้

$$V_H = v_d Bd \tag{2.13}$$

เนื่องจากอัตราเร็วลอยเลื่อน v_d มีค่า

$$v_d = \frac{I}{neA_0} \tag{2.14}$$

เมื่อ n คือ จำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร (หรือความหนาแน่นของพาหะประจุ)
และ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไหลผ่านมีหน่วยเป็นตารางเมตร
แทนสมการ (2.14) ลงในสมการ (2.13) จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA_0} \tag{2.15}$$

เนื่องจาก $A_0 = d \times t$ เมื่อพิจารณาจากรูป 2.5 ดังนั้น

$$V_H = \left(\frac{I}{net}\right)B \tag{2.16}$$

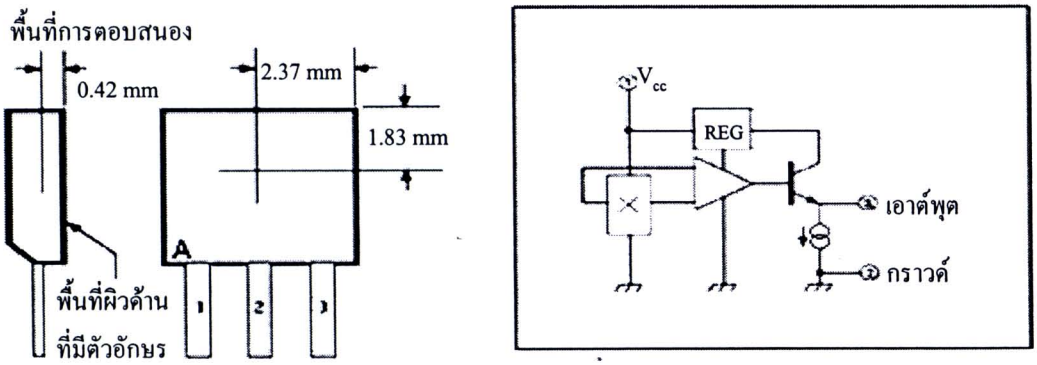
จากสมการที่ 2.16 พบว่าความต่างศักย์ฮอลล์มีค่ามากเมื่อแผ่นนั้นทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน หรือ เจอร์มิเนียม ส่วนถ้าแผ่นบางนั้นเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่ามากและเขียนสมการ (2.16) ใหม่ได้ว่า

$$B = \left(\frac{net}{I}\right)(V_H) \qquad (2.17)$$

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก B โดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์จะควบคุมให้ปริมาณกระแส I คงที่ ส่วนค่า n และ t ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนประจุพาหะน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนฉนวนมีประจุพาหะน้อยมากแต่ก็ยอมให้กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยผ่าน จากการศึกษาพบว่าสารกึ่งตัวนำที่เจือสิ่งเจือปนมีค่า $n \cong 10^{22}\ m^{-3}$ และโลหะทั่วไปมีค่า $n \cong 10^{28} m^{-3}$ [3] ดังนั้นจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการ (2.17) ได้เมื่อทราบค่า V_H และความเข้มของ*สนามแม่เหล็ก มีหน่วยในระบบเอสไอเป็น เทสลา (Tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์ T หน่วยเดิมของ*ความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ เกาส์ (gauss) แทนด้วยสัญลักษณ์ G โดยที่ 1 เทสลา (T) = 10^4 เกาส์ (G) ในการสร้างอุปกรณ์หัววัดโดยอาศัยปรากฏการฮอลล์นั้น สิ่งที่ควรต้องศึกษาและเรียนรู้คือ หัววัดซึ่งใช้ตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall sensor) และอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างและประกอบวงจร เพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์หัววัดฮอลล์ไว้ใช้งานในการทดลองได้ ดังต่อไปนี้

2.4 ตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall Sensor)

ตัวรับรู้ฮอลล์เป็นวงจรรวม ที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวดิ่ง เมื่อนำตัวรับรู้ฮอลล์ไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ แล้วนำไปวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะทำให้ทราบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ ตัวรับรู้ฮอลล์มีขนาดเล็กและลักษณะดังรูปที่ 2.8 และมีสมบัติดังตารางที่ 2.1

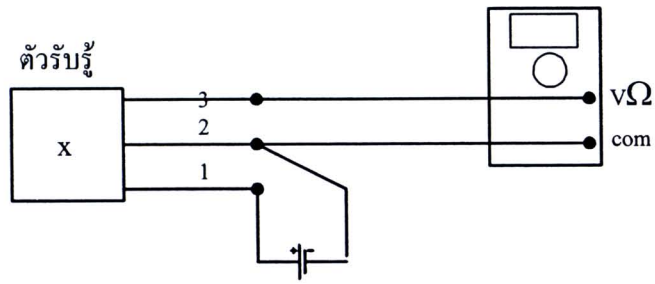


รูปที่ 2.8 วงจรรวมตัวรับรู้ฮอลล์ UGN3503U [8]

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของ IC UGN3503U [8]

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min	Typ.	Max.	Units
Operating Voltage	V_{cc}		4.5	-	6	V
Supply Current	I_{cc}		-	9	13	mA
Quiescent Output Voltage	V_{out}	B = 0 G	2.25	2.5	12.75	V
Sensitivity	ΔV_{out}	B = 0 G to ±900 G	0.75	1.3	1.75	mV/G
Bandwidth (-3 dB)	BW		-	23	-	kHz
Broadband Output Noise	V_{out}	BW = 10 Hz to 10 kHz	-	90	-	μV
Output Resistance	R_{out}		-	50	220	Ω

เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือเซลล์ไฟฟ้า 4.5-6 โวลต์ เข้ากับขา 1 และขา 2 และ ต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับขา 2 และขา 3 ดังรูปที่ 2.9 โวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าประมาณ 2.5 โวลต์ ค่านี้เป็นความต่างศักย์ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เรียกว่า Offset Voltage ค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่อกับขา 1 และขา 2 แต่จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.9 การต่อตัวรับรู้ฮอลล์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและโวลต์มิเตอร์ [9]

เมื่อนำแม่เหล็กเข้าใกล้พื้นที่การตอบสนอง (Active Area) ของตัวรับรู้ฮอลล์ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศของสนามแม่เหล็ก กล่าวคือถ้านำขั้วใต้เข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าลดลง แต่ถ้านำขั้วเหนือเข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) ดังสมการที่ (2.18)

$$B = (V_{out\ (B)} - V_{out\ (O)})\ S^{-1} \qquad (2.18)$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 05 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 249122
เลขเรียกหนังสือ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

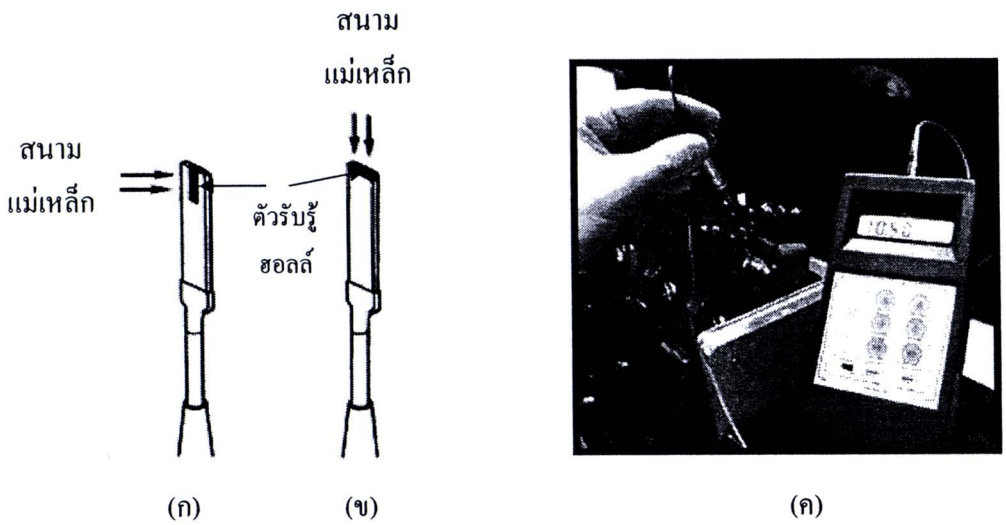
$V_{out\ (O)}$ เป็นความต่างศักย์ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก

$V_{out\ (B)}$ เป็นความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็ก

S เป็นสัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเทสลา (V/T)

B เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็ก หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

ตัวรับรู้ฮอลล์สามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็กได้ทั้งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับขดลวดโซลินอยด์ และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับลวดตัวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กถาวรนั้น เกิดสนามแม่เหล็กได้โดยไม่ต้องมีกระไฟฟ้าไหลผ่าน ส่วนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์และลวดตัวนำจะเกิดขึ้นได้ต้องมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ในการทดลองได้สร้างหัววัดสนามแม่เหล็กมี 2 แบบ คือ แบบตามยาวใช้สำหรับวัดสนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และแบบตามขวางใช้สำหรับวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดตัวนำตรงที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะหัววัด (ก) หัววัดแบบตามขวาง (ข) หัววัดแบบตามยาว และ (ค) เทสลามิเตอร์แบบพกพา

ปัจจุบันได้มีการประดิษฐ์เซ็นเซอร์แม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ ในแนวระนาบที่มีความละเอียดต่ำกว่า 10 nT การตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้น โดยความไวของการตอบสนองขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ผลิตเซ็นเซอร์ [10]

2.5 ตัวต้านทาน (Resister)

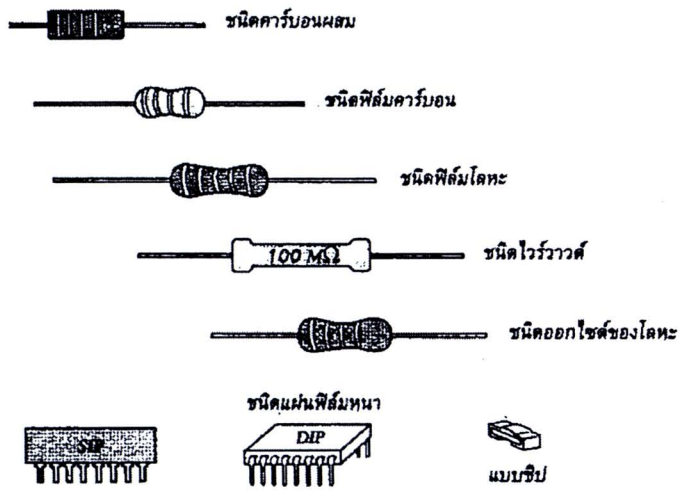
ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่จำกัดกระแสไฟฟ้า โดยตัวของมันเองจะมีค่าเรียกว่า ค่าความต้านทาน (Resistance) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ถ้าหากตัวต้านทานมีค่ามาก กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้ามีค่าความต้านทานน้อยกระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลผ่านได้มาก ตัวต้านทานที่ใช้กันได้อยู่ทั่วไปมีให้เลือกใช้ได้หลายค่าและขนาดต่างๆ ตั้งแต่ 1/8 วัตต์ จนถึงหลายสิบวัตต์ ในการอ่านตัวต้านทานหากเป็นแบบวัตต์สูงๆ จะมีค่าความต้านทานพิมพ์บนตัวต้านทานนั้น แต่โดยมากจะมีรหัสสีเป็นตัวบอกค่าความต้านทาน รหัสสีแต่ละแถบจะมีค่าเป็นตัวเลขตัวต้านทานจะมีสัญลักษณ์ที่ใช้เป็น R สัญลักษณ์ของตัวต้านทาน แสดงดังรูปที่ 2.11

(ก) (ข)

รูปที่ 2.11 แสดงสัญลักษณ์ของตัวต้านทาน (ก) ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ และ (ข) ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ [11]

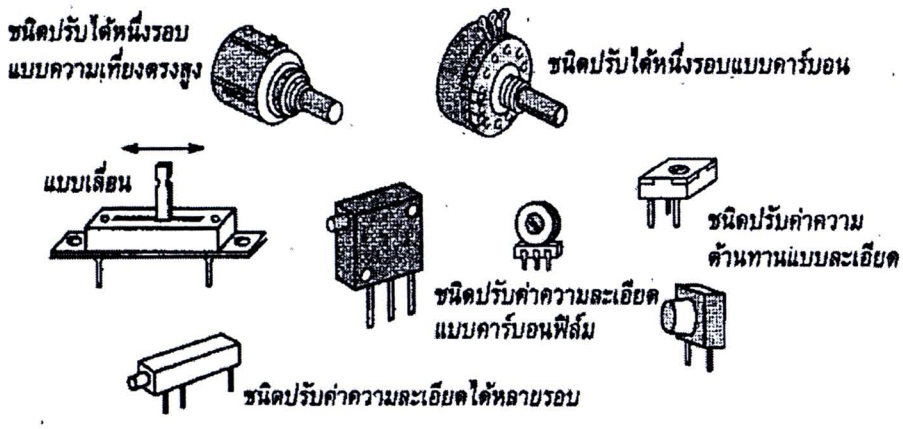
ชนิดของตัวต้านทาน

ตัวต้านทานที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ (Fixed Value Resistor) และตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (Variable Value Resistor) ซึ่งตัวต้านทานค่าคงที่นี้จะมีค่าความต้านทานที่แน่นอน และเป็นค่าที่นิยมมากในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงตัวต้านทานค่าคงที่ชนิดต่างๆ [12]

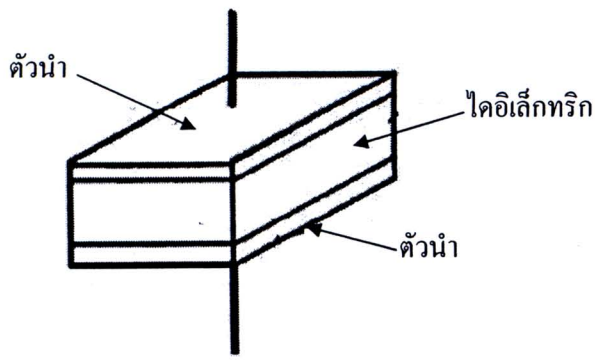
สำหรับตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้นั้น จะสามารถเลือกค่าความต้านทานที่ต้องการได้โดยการหมุนที่ปุ่มปรับค่าความต้านทาน การปรับปุ่มควบคุมระดับความดัง หรือ วอลลุม (Volume) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้เป็นตัวอย่างของตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ประเภทหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงตัวต้านทานปรับค่าได้ชนิดต่าง ๆ [12]

2.6 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุเป็นวัสดุที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ มีการใช้งานในวงจรต่างๆ เช่น วงจรกรองสัญญาณ วงจรกรองแรงดัน วงจรกรองความถี่ ใช้ในการถ่ายทอดสัญญาณ เป็นต้น ภายในจะประกอบด้วยแผ่นโลหะสองแผ่น วางห่างกันโดยมีสารไดอิเล็กทริกกั้นอยู่ดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างตัวเก็บประจุ [3]

ตัวเก็บประจุมีค่าที่เรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) มีหน่วยเป็นฟารัด (Farad, F) หน่วยเหล่านี้จะพิมพ์ไว้บนตัวเก็บประจุซึ่งมีความสัมพันธ์กัน หน่วยมูลฐานของ EIA (Electronic Indrustry Association) นอกจากค่าความจุแล้ว บนตัวถังยังระบุอัตราการทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ค่าความผิดพลาด และสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิด้วย โดยปกติจะมีการบอกค่าเป็นตัวเลขและมีตัวอักษร ส่วนอักษร V แทนโวลต์หรืออัตราการทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุ แต่ตัวเก็บประจุแบบเซรามิคมักไม่แสดงอัตราการทนแรงดันไฟฟ้าไว้ ปกติแล้วตัวเก็บประจุแบบเซรามิคมักทนแรงดันได้ประมาณ 50 โวลต์ ค่าของตัวเก็บประจุจะพิมพ์ลงบนตังถัง เช่น 101 หมายถึง ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้า 100 pF ดังแสดงในตารางที่ 2.2

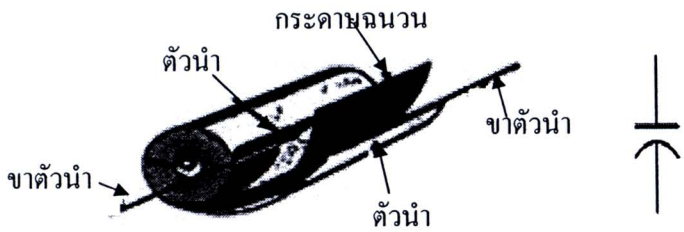
ตารางที่ 2.2 แสดงหน่วยของตัวเก็บประจุมาตรฐาน Electronic Industry Association

ไมโครฟารัด (μF)	นาโนฟารัด (nF)	ฟารัด (pF)	รหัสบนตัวเก็บประจุตามมาตรฐาน EIA
0.0001	0.10	100	101
0.00022	0.22	220	221
0.001	1.00	1,000	102
0.0033	3.30	3,300*	332
0.01	10.00	10,000*	103
0.047	47.00	47,000*	473
0.82	820.00	820,000*	824
1.0	1,000.00*	1,000,000*	105

*ตัวเลขนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้

ชนิดของตัวเก็บประจุ

1) ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุได้ แบ่งได้ 5 ชนิด ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้กระดาษชุบไข หรือน้ำมัน (Oil) เป็นฉนวนไดอิเล็กตริก โครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่นเพลต 2 แผ่น ที่เป็นแผ่นดีบุกรีดจนบางคั่นกลางด้วยกระดาษชุบไขแล้วนำมาม้วนเข้าเป็นท่อนกลม จากแผ่นเพลตทั้งสองแต่ละข้างจะถูกต่อขาที่เป็นลวดตัวนำออกมาใช้งาน ตัวเก็บประจุจะถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนไฟฟ้าชนิดต่างๆ แล้วแต่บริษัทผู้ผลิต ตัวอย่างเช่น ปลอกกระดาษแข็ง กระเบื้องเคลือบ กระดาษอาบน้ำผึ้ง เป็นต้น เพื่อป้องกันความชื้นและฝุ่นละออง ดังแสดงในรูปที่ 2.15

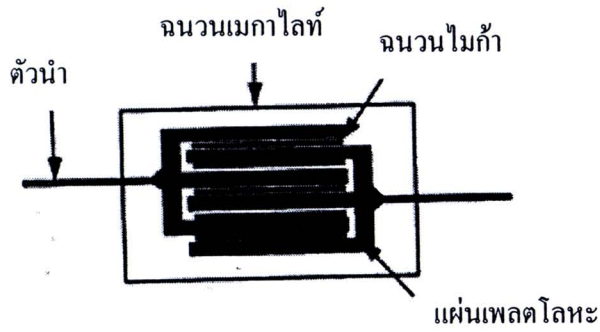


(ก) (ข)

รูปที่ 2.15 (ก) โครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ และ (ข) สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่

ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษจะมีค่าความจุไม่สูงมากนัก ซึ่งจะเขียนบอกไว้ที่ข้างๆ ตัวเก็บประจุ คืออยู่ในพิสัยจาก 10 pF ถึง 10 mF อัตราทนแรงดันไฟฟ้าสูงประมาณ 150 โวลต์ จนถึงหลายพันโวลต์ โดยมากนิยมใช้ในวงจรจ่ายกำลังไฟสูง

ตัวเก็บประจุชนิดไมก้า เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้แผ่นไมก้าเป็นฉนวนไดอิเล็กตริก ส่วนมากตัวเก็บประจุชนิดนี้จะถูกทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมเพราะแผ่นไมก้าจะมีสมบัติที่แข็งและเปราะ โครงสร้างของมันจะประกอบด้วยแผ่นเพลตโลหะบางๆ อาจใช้หลายๆ แผ่นวางสลับซ้อนกัน แต่จะต้องคั่นด้วยฉนวนไมก้า ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งตัวเก็บประจุจะถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนเมกาไลท์เพื่อป้องกันการชำรุดสึกหรอ



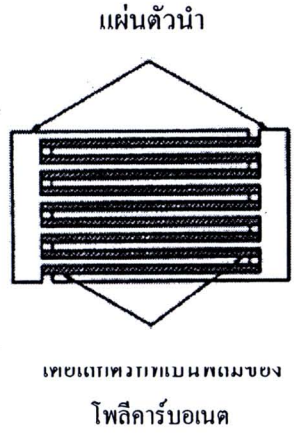
รูปที่ 2.16 แสดงตัวเก็บประจุชนิดไมก้า

ตัวเก็บประจุชนิดไมก้าจะมีค่าความจุอยู่ในพิสัยจาก 1.5 pF ถึง 0.1 mF มีอัตราทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงมากประมาณ 350 โวลต์ จนถึงหลายพันโวลต์ โดยบริษัทผู้ผลิตจะพิมพ์บอกค่าความจุอัตราทนแรงดันไฟฟ้าและค่าความคลาดเคลื่อนไว้บนตัวของมัน หรือบางทีก็ใช้สีแต้มบอกเป็นโค้ดที่ตัวเก็บ

ประจุนี้ ส่วนการใช้งานของตัวเก็บประจุชนิดไมก้า นิยมใช้งานในวงจรความถี่วิทยุ (RF) และวงจรที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงมากๆ

ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิค เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กตริกที่ทำมาจากฉนวนจำพวกกระเบื้อง หรือที่เรียกว่า "เซรามิค" ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิคจะมีรูปร่างแบบแผ่นกลม (Disc) และแบบรูปทรงกระบอก (Tubular) ซึ่งจะมีค่าความจุอยู่ในพิสัยจาก 1.5 pF ถึง 0.1 mF อัตราทนแรงดันไฟฟ้าประมาณ 500 โวลต์

ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติก จะใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นแผ่นฟิล์มที่ทำมาจากโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ไมลาร์ (Mylar) โพลีสไตรีน (Polystyrene) และอื่นๆ โดยนำมาคั่นระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองแผ่นแล้วม้วนพับให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ดังจะแสดงในรูปที่ 2.17



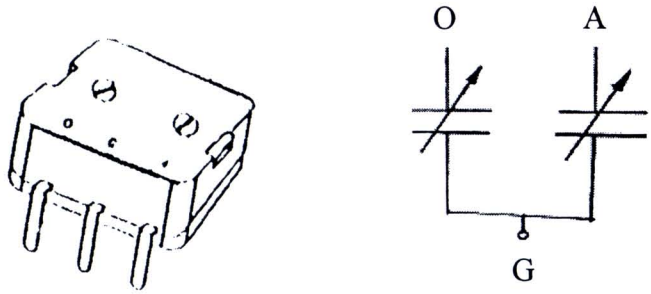
รูปที่ 2.17 แสดงตัวเก็บประจุชนิดพลาสติก

ตัวเก็บประจุชนิดพลาสติกจะมีค่าความจุอยู่ในพิสัยตั้งแต่ 2 mF ขึ้นไปและอัตราทนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 200 โวลต์ ถึง 600 โวลต์

ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้น้ำยาอิเล็กโทรไลท์เป็นแผ่นข้างหนึ่งแทนโลหะและอีกแผ่นหนึ่งเป็นแผ่นโลหะมีเยื่อบางๆ ที่เรียกว่า "ฟิล์ม" (Film) หุ้มอยู่ เยื่อบางๆ นี้คือไดอิเล็กตริก หรือแผ่นกั้น ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก ส่วนมากจะบรรจุในกระป๋องอะลูมิเนียมทรงกลมยาว และจะมีขั้วบอกไว้อย่างชัดเจน ว่าขั้วใดเป็นขั้วบวกและขั้วลบ การต่อขั้วของตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก ในการใช้งานจะต้องมีความระมัดระวังให้มากที่สุด ถ้าหากว่าต่อขั้วผิดจะมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปทำลายเยื่อที่เป็นไดอิเล็กตริกชำรุดเสียหายได้ ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกจะสามารถทำให้มีค่าความจุได้สูงนับเป็นร้อยๆ ไมโครฟารัด โดยที่ตัวเก็บประจุจะมีขนาดเล็ก ค่าความจุที่ใช้งานจะอยู่ในพิสัยสองสามไมโครฟารัดจนถึงมากกว่า 100 mF และอัตราทน

แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 5 โวลต์จนถึง 700 โวลต์ ซึ่งนิยมนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุชนิด อิเล็กโทรลิติกจะมีข้อเสียอันเนื่องมาจากค่าสูญเสียจากสารไดอิเล็กตริกที่มีค่ามาก แต่จะมีตัวเก็บประจุอีกชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการเดียวกับตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติก คือตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม (Tantalum Electrolytic Capacitor)

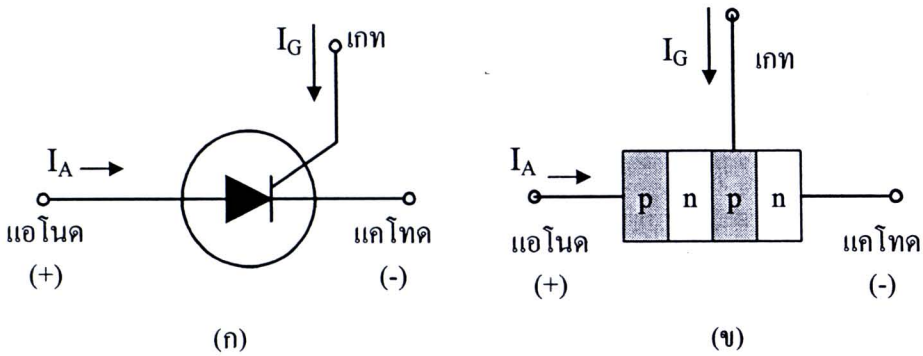
2) ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้ เป็นตัวเก็บประจุซึ่งการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ตัวเก็บประจุชนิดนี้ปกติแล้วจะประกอบด้วยอุปกรณ์ภายใน 2 ส่วน ได้แก่ แผ่นเพลตที่เคลื่อนที่ได้และแผ่นเพลตที่ติดตั้งอยู่กับที่โดยแผ่นเพลตทั้งสองจะเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับวงจรภายนอก การแบ่งประเภทของตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้นี้ จะแบ่งตามไดอิเล็กตริกที่ใช้ โดยแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ อากาศ ไมก้า เซรามิค และพลาสติก



รูปที่ 2.18 แสดงตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้ (ก) รูปร่างลักษณะของตัวเก็บประจุ และ (ข) สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้ [11]

2.7 เอสซีอาร์ (SCR: Silicon Controlled Rectifier)

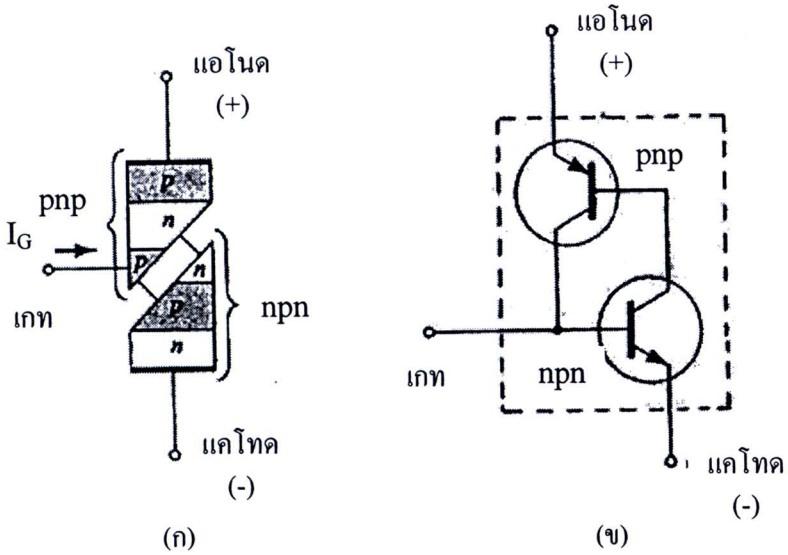
SCR เป็นอุปกรณ์เรียงกระแส ซึ่งนำกระแสได้ทิศทางเดียว ประกอบด้วยชั้นซิลิกอน 4 ชั้น 3 รอยต่อ มี 3 ขา ได้แก่ แอโนด (A) แคโทด (K) และเกท (G) ขาเกทนี้ทำหน้าที่เปิดและปิด SCR



รูปที่ 2.19 (ก) สัญลักษณ์ของ SCR และ (ข) โครงสร้างของ SCR [3]

หลักการทำงานของ SCR

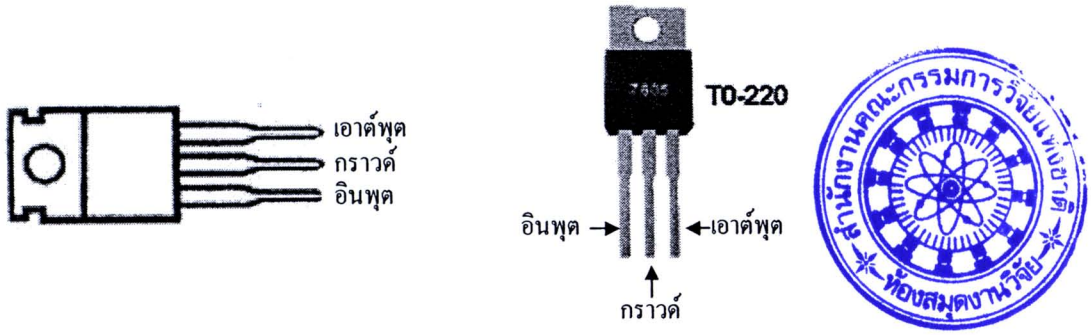
การเปิด SCR ให้นำกระแสทำได้โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า 2 ส่วน ได้แก่ ป้อนแรงดันที่ขาแอโนด-แคโทด (V_{AK}) และการป้อนแรงดันที่ขาเกท-แคโทด (V_{GK}) หรือป้อนแรงดันเกท (V_G) อย่างเหมาะสมโดยที่แรงดันเกทจะสร้างกระแสเกท (I_G) เพื่อทริกเกอร์หรือจุดฉนวนที่ขาเกท เมื่อ SCR นำกระแสแล้ว การลดกระแสทริกเกอร์ไม่สามารถปิด SCR หรือทำให้ SCR หยุดนำกระแสไม่ได้ แต่การปิด SCR ทำได้โดยลดกระแสไหลผ่าน SCR ให้ต่ำกว่ากระแสโอลดิ้ง (I_H) การแบ่งโครงสร้างของ SCR จะแบ่งโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 (ก) การแบ่งโครงสร้างของ SCR และ (ข) สัญลักษณ์การต่อทรานซิสเตอร์จากการแบ่งโครงสร้างของ SCR [3]

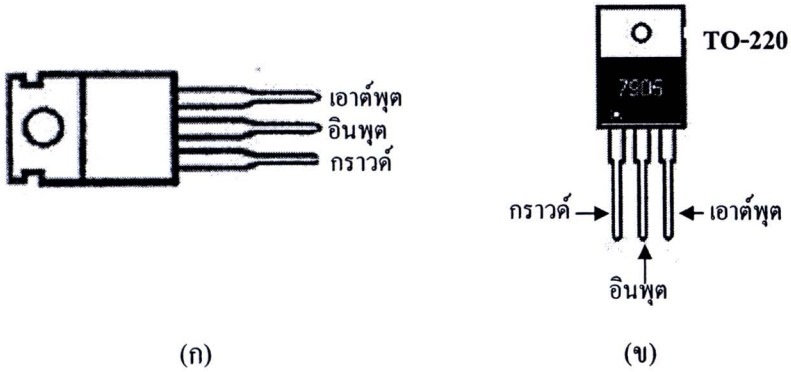
สามารถแบ่งโครงสร้างของ SCR ออกเป็นสองส่วนก็จะได้โครงสร้างใหม่ซึ่งมีลักษณะเหมือนทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อกัน ดังรูปที่ 2.20 (ก) สังเกตว่าทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งเป็นชนิด NPN ตัวหนึ่งเป็นชนิด PNP เมื่อนำสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองมาต่อกัน จะได้วงจร ดังรูป 2.20 (ข)

ไอซี Regulator เบอร์ 7805 และ 7905 เป็นไอซีที่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ โดยไอซี Regulator เบอร์ 7805 จะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า +5 V ส่วน ไอซี Regulator เบอร์ 7905 จะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า -5 V ลักษณะของไอซีแสดงดังรูปที่ 2.21 และ รูปที่ 2.22



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 2.21 (ก) ไอซี 78XX ตัวถังแบบ TO-220 และ (ข) ไอซี 7805 ตัวถังแบบ TO-220



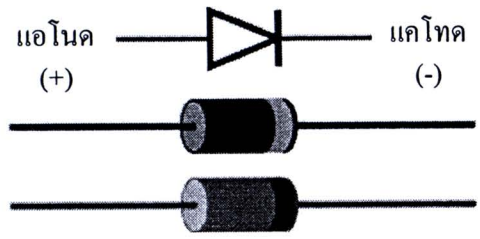
รูปที่ 2.22 (ก) ไอซี 79XX ตัวถังแบบ TO-220 และ (ข) ไอซี 7905 ตัวถังแบบ TO-220

2.8 ไดโอด (Diode)

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสองขั้ว ที่ออกแบบและควบคุมทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้า ไดโอดจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียว เป็นเรคติไฟเออร์ และกั้นการไหลในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า ไดโอดได้รับไบอัสไปข้างหน้า ถ้าให้ไบอัสย้อนกลับกับไดโอด จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล [13] เมื่อกล่าวถึงไดโอด มักจะหมายถึงไดโอดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor diode) ซึ่งก็คือผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ต่อกันได้ขั้วทางไฟฟ้าสองขั้ว ส่วนไดโอดแบบหลอดสุญญากาศ (Vacuum tube diode) ถูกใช้เฉพาะทางในเทคโนโลยีไฟฟ้าแรงสูงบางประเภท เป็นหลอดสุญญากาศที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว คือแผ่นตัวนำ (plate) และแคโทด (cathode) ส่วนใหญ่จะใช้ไดโอดในการยอมให้กระแสไปในทิศทางเดียว โดยยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในทางใดทางหนึ่ง ส่วนกระแสที่ไหลในทิศทางตรงข้ามกันจะถูกกั้น ดังนั้นจึงอาจถือว่าไดโอดเป็นวาล์วตรวจสอบแบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ซึ่งนับเป็นประโยชน์อย่างมากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้เรียงกระแสไฟฟ้าในวงจรภาคจ่ายไฟ เป็นต้น อย่างไรก็ตามไดโอดมีความสามารถมากกว่าการ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปิด-ปิดกระแสง่ายๆ ไดโอดมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ไดโอดมีรูปแบบการทำงานได้หลากหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น ซีเนอร์ไดโอด เป็นไดโอดชนิดพิเศษที่ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันให้คงที่ วาริแอกไดโอดใช้ในการปรับแต่งสัญญาณในเครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์ ทันเนลไดโอดใช้ในการสร้างสัญญาณความถี่วิทยุ และไดโอดเปล่งแสงเป็นอุปกรณ์ที่สร้างแสงขึ้น ทันเนลไดโอดมีความน่าสนใจตรงที่มันจะมีค่าความต้านทานติดลบ ซึ่งเป็นประโยชน์มากเมื่อใช้ในวงจรบางประเภท

ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ p - n สามารถควบคุมให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านตัวมันได้ทิศทางเดียว ไดโอดประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว คือ แอโนด (Anode, A) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด p และ แคโทด (Cathode, K) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด n ลักษณะและสัญลักษณ์ของไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ลักษณะและสัญลักษณ์ของไดโอด

ไดโอดชนิดสารกึ่งตัวนำแบบใหม่ๆ มักจะใช้ผลึกสารกึ่งตัวนำจำพวกซิลิกอนที่ไม่บริสุทธิ์โดยทำการเจือสารให้เกิดฝั่งลบและฝั่งบวก โดยฝั่งลบจะมีประจุลบคืออิเล็กตรอนมากกว่าเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type semiconductor)” ส่วนฝั่งบวกจะมีประจุบวกหรือโฮลเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิด p (p-type semiconductor)” โดยไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำทำมาจากการนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้มาติดด้วยวิธีการพิเศษ โดยส่วนที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดอยู่ติดกันนั้นเรียกว่า “รอยต่อ p-n (p-n junction)” ไดโอดชนิดนี้จะยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านจากสารกึ่งตัวนำชนิด n ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด p เท่านั้น จึงเรียกฝั่งที่มีสารกึ่งตัวนำชนิด n ว่าแคโทด และฝั่งที่มีสารกึ่งตัวนำชนิด p ว่าแอโนด แต่ถ้าพูดถึงทิศทางของกระแสสมมติที่ไหลสวนทางกับกระแสอิเล็กตรอนนั้น จะเห็นว่ากระแสสมมติจะไหลจากขั้วแอโนดหรือสารกึ่งตัวนำชนิด p ไปยังขั้วแคโทดหรือสารกึ่งตัวนำชนิด n เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

จากการศึกษาตัวรับรู้ฮอลล์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างตัวรับรู้ฮอลล์แล้วนั้น ในการนำไปใช้วัดความเข้มของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำตรงและขดลวดโซลินอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น อธิบายได้ด้วยกฎของบิโอท์-ซาวาร์ท และกฎของแอมแปร์ ดังนี้

2.9 กฎของบิโอท์-ซาวาร์ท

กฎของบิโอท์-ซาวาร์ท ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กจากกระแสไหลในลวดตัวนำที่มีรูปร่างใด ๆ เช่น เส้นลวดตัวนำยาว โดยการแบ่งตัวนำเป็นเวกเตอร์ส่วนย่อย dS (ซึ่งมีทิศตามกระแสไฟฟ้า) ซึ่งตัวนำส่วนนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก $d\vec{B}$ ที่จุดที่ห่างออกไปเป็นระยะ r เขียนได้ในรูปสมการ

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{S}\times\hat{r}}{r^2} \tag{2.19}$$

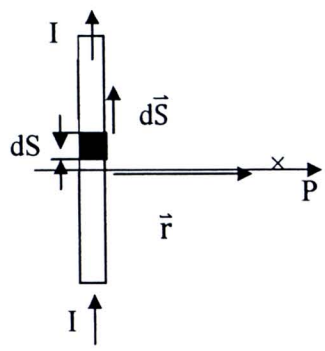
μ_0 คือค่าคงที่ มีชื่อว่า ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (Permeability of free space) มีค่า $4\pi\times10^{-7}$ T.m/A

เมื่อ $\vec{r} = r\hat{r}$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int\frac{Id\vec{S}\times\hat{r}}{r^2} \tag{2.20}$$

สนามแม่เหล็กรวม สามารถหาได้จากการอินทิเกรตเวกเตอร์เข้าด้วยกันทั้งหมด

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{2.21}$$



รูปที่ 2.24 สนามแม่เหล็กเกิดจากลวดตัวนำตรงตามกฎของบิโอท์-ซาวาร์ท

2.10 กฎของแอมแปร์

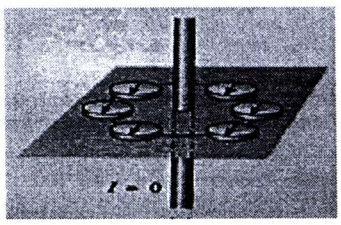
กฎของแอมแปร์ใช้ในการคำนวณสนามแม่เหล็ก เนื่องจากเส้นลวดยาวอนันต์และขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน มีลักษณะและแนวคิดคล้ายกฎของเกาส์ที่ใช้หาสนามไฟฟ้า กล่าวคือ การอินทิเกรตสนามแม่เหล็กรอบเส้นทางปิดใดๆ (ซึ่งเทียบกับพื้นผิวของเกาส์) จะได้ปริมาณซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กนั้นๆ (เทียบได้กับประจุที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้า) เขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 I \qquad (2.22)$$

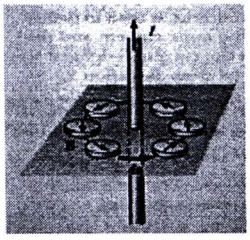
กฎของแอมแปร์ใช้ได้เมื่อกระแสคงที่ และมีสมมาตรในระบบสูง (เช่นเดียวกับกฎของเกาส์)

1) สนามแม่เหล็กของเส้นลวดที่ยาวอนันต์

เส้นลวดตัวนำจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีกระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำนั้น ซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็ก (B) หาได้จากกฎมือขวา โดยนิ้วหัวแม่มือชี้ทิศของกระแสไฟฟ้า และนิ้วทั้งสี่ชี้ทิศของสนามแม่เหล็ก ในการทดสอบหาทิศทางของสนามแม่เหล็กอาจจะใช้เข็มทิศวางรอบ ๆ เส้นลวดตัวนำ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะทำให้เข็มทิศเบนแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.25



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.25 ทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลในลวดตัวนำตรง (ก) เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำตรง และ (ข) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำตรง

จากรูปที่ 2.25 (ก) สนามแม่เหล็กรอบๆ เส้นลวดตัวนำเป็นศูนย์เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ ทำให้เข็มทิศไปทางขั้วโลกเหนือ รูปที่ 2.25 (ข) เข็มทิศจะเกิดการเบนเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำแสดงทิศของสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหล ก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กของเส้นลวดตัวนำนี้ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก B ได้จากกฎของแอมแปร์

เริ่มต้นจากการสร้างเส้นทางปิดสมมติ เป็นวงกลมรัศมี r พิจารณา สนามแม่เหล็กว่ามีทิศเดียวกับเวกเตอร์ $d\vec{S}$ ตลอดเส้นทางปิด ผลการอินทิเกรตจะได้

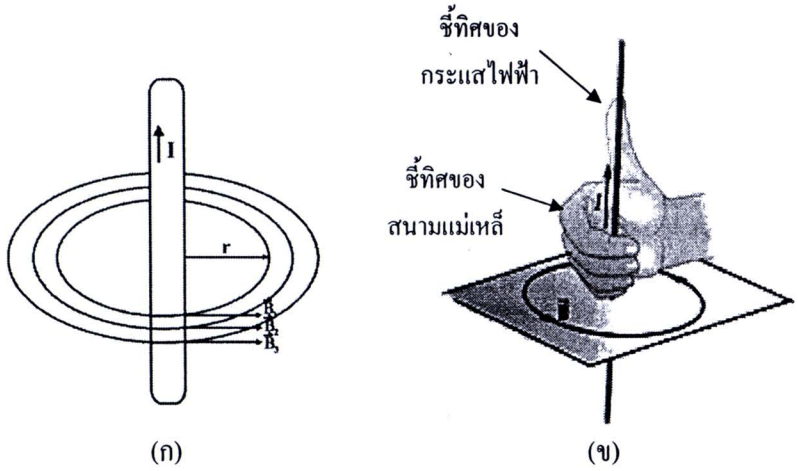
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 I$$

$$\oint B dS \cos 0^\circ = \mu_0 I \qquad (2.23)$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 I \qquad (2.24)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \qquad (2.25)$$

ในลวดตัวนำ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดนั้น ทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตัวนำตรงยาว แสดงดังรูปที่ 2.26



(ก) (ข)

รูปที่ 2.26 (ก) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตัวนำตรง และ (ข) แสดงการหาทิศของสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา [14]

เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำตรง จะเกิดสนามแม่เหล็กโดยรอบตัวนำนั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นวงกลมในระนาบตั้งฉากกับเส้นลวดโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่แกนลวด และทิศของเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นไปตามกฎมือขวาโดยใช้มือขวากำรอบเส้นลวดตัวนำ ให้หัวแม่มือทาบเส้นลวดและชี้ตามทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า ปลายนิ้วทั้งสี่จะแสดงทิศของสนามแม่เหล็ก จากกฎแอมแปร์ (เป็นกฎที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (B) และกระแสไฟฟ้าคงตัว (I)) [15]

สามารถหาขนาดสนามแม่เหล็ก (magnetic flux density) ซึ่งมีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตรหรือเทสลา (Wb/m^2 หรือ Tesla) ณ จุดใดๆ ซึ่งอยู่ห่างจากลวดยาวตรง เป็นระยะ r ได้ตามสมการที่ (2.25)

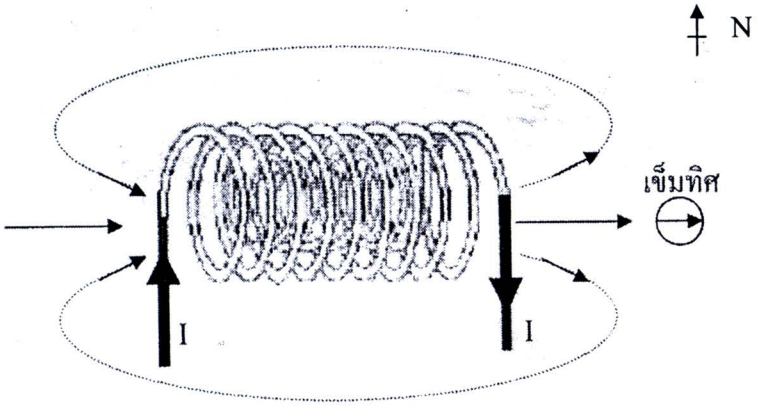
จากสมการที่ (2.25) $$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

โดย μ_0 เป็นค่าคงตัวที่เรียกว่า ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T · m/A (หรือ H/m)

2) สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์

แม่เหล็กมี 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือและขั้วใต้ โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กมีทิศจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นแต่ไม่ทราบว่าสนามแม่เหล็กนั้นมีทิศทางใด สามารถทดสอบได้โดยใช้เข็มทิศ ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์

จากรูปที่ 2.27 สามารถใช้กระแสไฟฟ้าผลิตสนามแม่เหล็กได้ โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบขดลวดนั้น สนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดขึ้นจากขดลวดโซลินอยด์ในอุดมคติที่มีจำนวน N รอบ ความยาว L เมตร และมีกระแส I แอมแปร์ ไหลผ่านมีค่าดังสมการที่ 2.26

$$H = \frac{NI}{L} \quad \text{(แอมแปร์/เมตร)} \qquad (2.26)$$

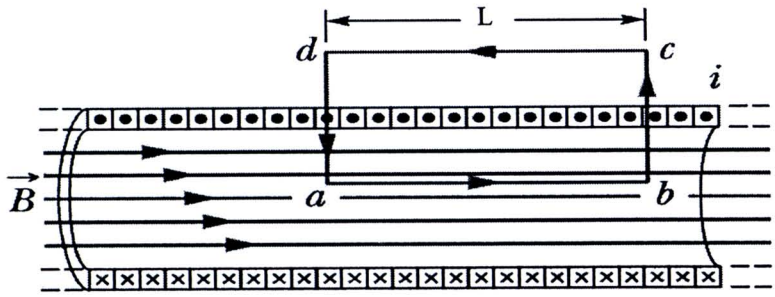
สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) ที่เกิดขึ้นในแกนขดลวดโซลินอยด์ซึ่งเป็นแกนอากาศมีความเข้มดังสมการที่ (2.27)

$$B = \mu_0 H \quad \text{(เทสลา)} \tag{2.27}$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad \text{(เทสลา)} \tag{2.28}$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กในแกนอากาศ ($4\pi \times 10^{-7}$ เทสลาเมตร/แอมแปร์หรือ 1.257×10^{-6} เทสลา เมตร/ แอมแปร์)

ขดลวดโซลินอยด์คือลวดตัวนำที่พันกันเป็นรูปเกลียว การพันลวดเป็นรูปนี้สามารถก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูงภายในขดลวด โดยสนามแม่เหล็กคือผลรวมเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กย่อย ๆ ของแต่ละเกลียวเข้าด้วยกันทั้งหมด ภาพแสดงเส้นแรงสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง และสม่ำเสมอ [16] ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ภาพตัดขวางของขดลวดโซลินอยด์

จากรูปที่ 2.28 แสดงเส้นแรงสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์ ค่อนข้างเป็นเส้นตรง สม่ำเสมอ และไม่สามารถตัดกันได้ การคำนวณขนาดสนามแม่เหล็กใช้กฎของแอมแปร์ และกำหนดเส้นทางของการอินทิเกรตเชิงเส้น แบ่งเส้นทางปิด (Closed Path) ออกเป็น 4 ส่วน พิจารณาจาก เส้นทางที่ bc, cd และ da จะได้ $\vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$ ดังนั้น

ใช้กฎของแอมแปร์

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_{ab} \vec{B} \cdot d\vec{S} = B \int_{ab} dS = BL \tag{2.29}$$

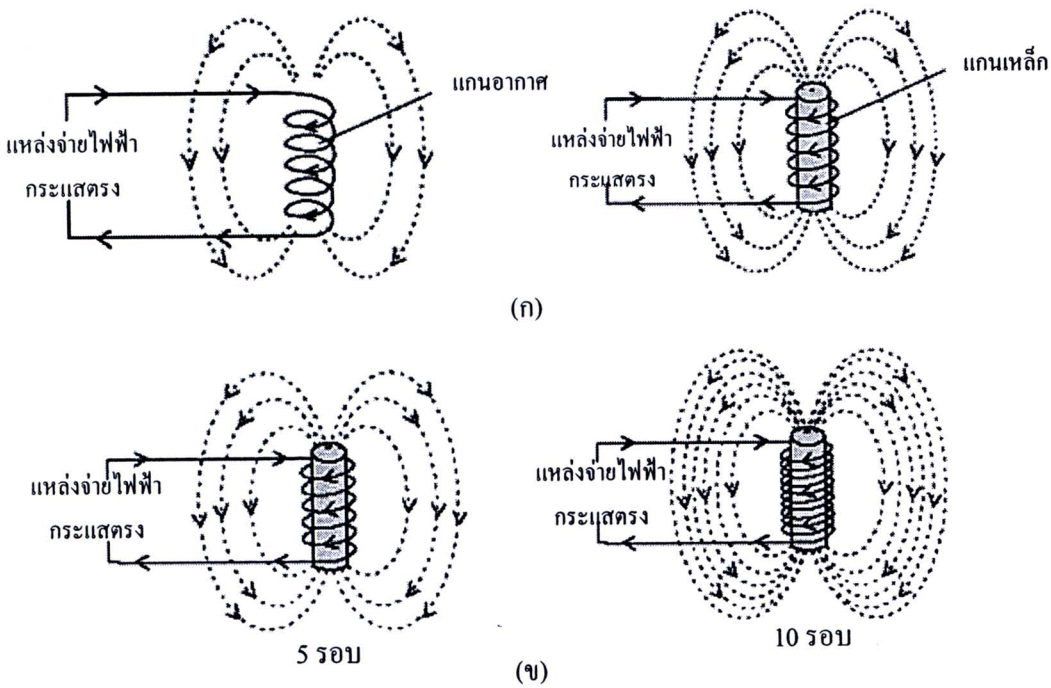
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = BL = \mu_0 NI \tag{2.30}$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \tag{2.31}$$

$$B = \mu_0 nI \tag{2.32}$$

โดยที่ N คือจำนวนรอบ ดังนั้น NI คือ กระแสทั้งหมดภายในเส้นทางปิด และ n = N/L คือ จำนวนรอบต่อความยาว

ขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศกับขดลวดโซลินอยด์แกนวัสดุต่างๆ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นแกนของขดลวด มีผลทำให้ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) และค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ การวัดสนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์แกนวัสดุต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.29



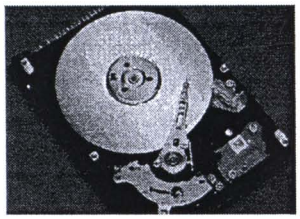
รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์ (ก) เมื่อแกนต่างกัน และ (ข) เมื่อจำนวนรอบของขดลวดที่พันไม่เท่ากัน

จากรูปที่ 2.29 เป็นการเปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์ รูปที่ 2.29 (ก) เมื่อจำนวนรอบของขดลวดโซลินอยด์เท่ากันแต่แกนของขดลวดโซลินอยด์แตกต่างกัน คือ แกนเหล็กและ

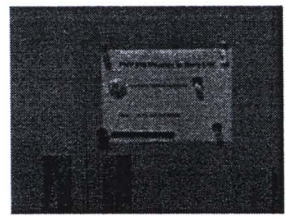
แกนอากาศ จะมีความเข้มสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน ขดลวดโซลินอยด์ที่มีเหล็กเป็นแกนจะมีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ โดยพิจารณาจากจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น และจากรูปที่ 2.29 (ข) เมื่อแกนของขดลวดโซลินอยด์เป็นแกนเหล็กชนิดเดียวกันขนาดเท่ากัน แต่จำนวนรอบของขดลวดแตกต่างกัน ความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าแตกต่างกัน จำนวนรอบของขดลวดมากจะมีความเข้มสนามแม่เหล็กมาก พิจารณาจากจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดและวัสดุที่เป็นแกนของขดลวดโซลินอยด์

2.11 สนามแม่เหล็กในชีวิตประจำวัน

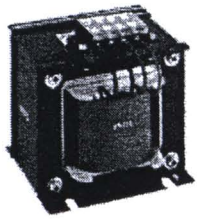
ในชีวิตประจำวันมีการนำแม่เหล็กไปประยุกต์ใช้อย่างมากและหลากหลาย ขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน ทำให้แม่เหล็กมีบทบาทต่อเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก ตัวอย่างการนำแม่เหล็กไปประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น ฮาร์ดดิสก์เก็บข้อมูล แม่เหล็กยึดติดอเนกประสงค์ หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เทปบันทึกเสียง รถไฟวิ่งเหนือรางความเร็วสูง บัตรแถบแม่เหล็ก เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.30



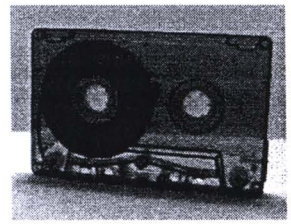
ฮาร์ดดิสก์เก็บข้อมูล



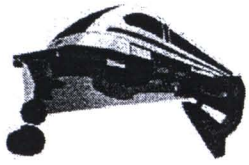
แม่เหล็กยึดติดอเนกประสงค์



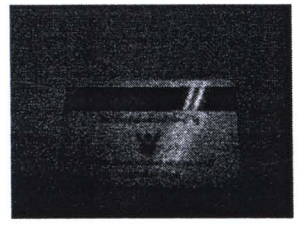
หม้อแปลงไฟฟ้า



เทปบันทึกเสียง



รถไฟวิ่งเหนือรางความเร็วสูง



บัตรแถบแม่เหล็ก

รูปที่ 2.30 การนำแม่เหล็กไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน