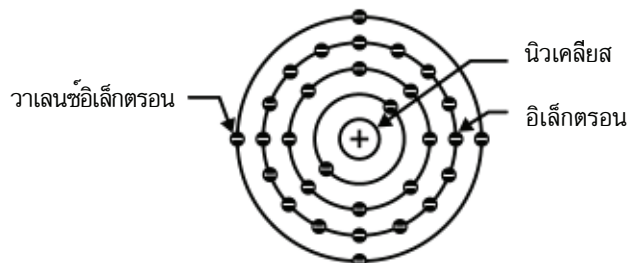


บทที่ 6

สารกึ่งตัวนำ

6.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำเป็นธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งในธาตุทุกชนิดจะประกอบไปด้วยอะตอม โดยที่ภายในอะตอมของธาตุเหล่านี้จะประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอนและอิเล็กตรอน โปรตอนกับนิวตรอนจะอยู่ภายในนิวเคลียส ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของอะตอมและมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบนอกคล้ายๆ กับวงโคจรในระบบสุริยะ โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรใกล้กับนิวเคลียสจะมีระดับพลังงานต่ำเนื่องจากนิวเคลียสสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนเหล่านี้ได้อยู่ได้ ขณะที่อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสที่อยู่ห่างไกลออกไปจะมีระดับพลังงานสูง และพร้อมที่จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระถ้าได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกอย่างเพียงพอ อิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุดของอะตอมนั้นๆ เรียกว่า *วาเลนซ์อิเล็กตรอน* ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของอะตอม

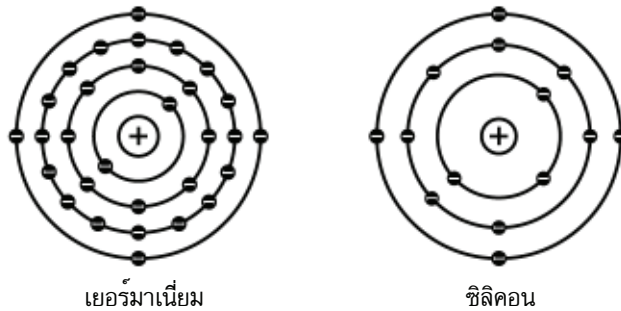
ในทางไฟฟ้านั้น เราสามารถจัดประเภทของวัสดุไฟฟ้าออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. **ฉนวน** คือ วัสดุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ยาก ทำให้ไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ วัสดุประเภทนี้ได้แก่ พลาสติก กระเบื้อง หรือแก้ว เป็นต้น
2. **ตัวนำ** คือ วัสดุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากวงโคจรเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ง่าย เมื่อเราส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าเข้าไป จึงสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ เช่น เงิน หรือทองแดง เป็นต้น
3. **สารกึ่งตัวนำ** เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติกึ่งกลางระหว่างสถานะความเป็นตัวนำและฉนวน โดยเมื่อนำเอาไปทำเป็นฉนวน ก็จะเป็นฉนวนที่ไม่ดี หรือนำเอาไปทำเป็นตัวนำก็เป็นตัวนำที่ไม่ดีเช่นกัน วัสดุประเภทนี้ได้แก่ ซิลิคอน (Si: Silicon) และเจอร์มาเนียม (Ge: Germanium) เป็นต้น

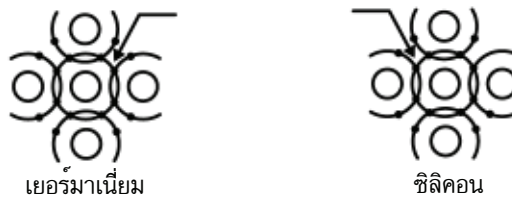
ในยุคแรกนั้นสารกึ่งตัวนำแทบไม่มีประโยชน์ต่องานทางด้านไฟฟ้าเลยจนกระทั่งได้มีการพัฒนาโดยการผ่านกระบวนการโด๊ปสารกึ่งตัวนำเหล่านี้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

6.2 การโด๊ปสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำจะเป็นสารที่มีอยู่ในตารางธาตุหมู่ที่ 4 ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนวงนอกสุดจำนวน 4 ตัว เช่น ซิลิคอน และเจอร์มาเนียมที่มีโครงสร้างอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ก เมื่ออะตอมของซิลิคอนและเจอร์มาเนียมอยู่รวมกันเป็นผลึกจะยึดกันด้วยพันธะแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) ซึ่งอะตอมจะมีเสถียรภาพถ้าจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนมีจำนวนครบ 8 ตัว ดังนั้นอะตอมของซิลิคอนและเจอร์มาเนียมจึงจับกลุ่มกันดังแสดงในรูปที่ 6.2 (ข)



(ก) ลักษณะวาเลนซ์อิเล็กตรอน



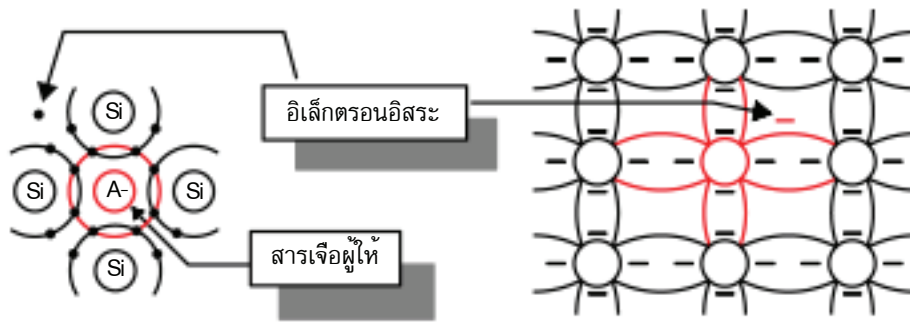
(ข) พันธะโควาเลนต์

รูปที่ 6.2 วาเลนซ์อิเล็กตรอน และพันธะโควาเลนต์ของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำที่ยังไม่มีอะตอมของสารอื่นเจือปนเลย เรียกว่า สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) ซึ่งจะนำไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่เมื่อผ่านกระบวนการโด๊ปสาร (Doping) โดยการใส่อะตอมสารเจือ (Impurity) เข้าไป จะทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic Semiconductor) ซึ่งจะให้นำไฟฟ้าได้ดี และนำไปประยุกต์ใช้งานในทางไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยการทำสารกึ่งตัวนำด้วยการโด๊ปอะตอมสารเจือเข้าปดังกล่าว ทำให้ได้สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดคือ

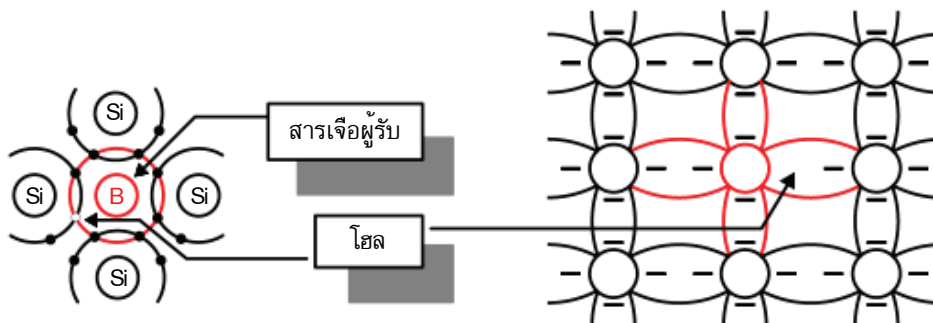
1. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor)
2. สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type Semiconductor)

การทำสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น คือการใส่อะตอมสารเจือที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวลงไป เช่น ฟอสฟอรัส (P: Phosphorus) หรือสารหนู (As: Arsenic) ซึ่งเป็นสารในตารางธาตุหมู่ที่ 5 ทำให้อะตอมของสารเจือตัวหนึ่งไปยึดเกาะกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำข้างเคียงในพันธะโควาเลนต์ เนื่องจากวาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอนมีจำนวน 4 ตัว เมื่อรวมกับจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสารเจือแล้วจะเหลืออีก 1 อิเล็กตรอนทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นมา 1 ตัว เนื่องจากไม่สามารถเข้ามาจับยึดพันธะโควาเลนต์กับอะตอมของซิลิคอนได้ อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้ก็พร้อมที่จะนำกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับการป้อนพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก สารเจือที่นำมาโด๊ปกับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์นี้จึงเรียกว่า สารเจือผู้ให้ (Donor) ทำให้สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type Semiconductor) ดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 พันธะโควาเลนต์ และอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพีนั้น สามารถทำได้โดยการใส่อะตอมสารเจือที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวลงไป เช่น โบรอน (B: Boron) ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในตารางธาตุหมู่ที่ 3 จึงทำให้พันธะโควาเลนต์ที่ยึดอะตอมของผลึกสารกึ่งตัวนำขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว ต่อ 1 อะตอมของสารเจือ ทำให้เกิดช่องว่างที่เรียกว่าโฮล (Hole) โฮลนี้จะมีสภาพของประจุไฟฟ้าที่เป็นบวก ซึ่งตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน เมื่อมีอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงเข้ามาแทนที่ในช่องว่างดังกล่าว ก็จะเปรียบเสมือนกับโฮลเคลื่อนที่ไปได้ การใส่อะตอมสารเจือของธาตุหมู่ที่ 3 นี้จะทำให้เกิดโฮล 1 ตัว เราจึงเรียกสารเจือประเภทนี้ว่า สารเจือผู้รับ (Acceptor) ทำให้สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type Semiconductor) ดังแสดงในรูปที่ 6.4

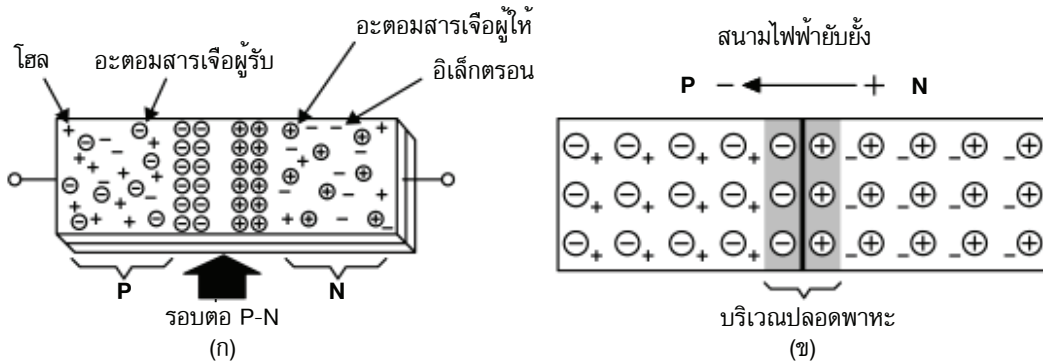


รูปที่ 6.4 พันธะโควาเลนต์ และโฮลของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

โดยสรุปแล้ว เรากล่าวได้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะเป็นสารที่ผ่านขบวนการโด๊ปสารเจือ แล้วทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าเดิม ซึ่งเป็นพาหะส่วนใหญ่ที่จะนำกระแสไฟฟ้าได้ ขณะที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีจะเป็นสารกึ่งตัวนำที่ผ่านขบวนการโด๊ปสารเจือแล้วทำให้ได้โฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่ที่ใช้นำกระแสไฟฟ้า

6.3 รอยต่อ พี-เอ็น

เมื่อเรานำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นมาต่อประกบกันดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ก) จะเกิดปรากฏการณ์แลกเปลี่ยนพาหะส่วนใหญ่ซึ่งกันและกัน โดยอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนใหญ่ในฝั่งเอ็น (N) จะเคลื่อนที่ไปยังฝั่งพี (P) ขณะเดียวกันโฮลซึ่งจะเป็นพาหะส่วนใหญ่ในฝั่งพีก็จะเคลื่อนที่ไปยังฝั่งเอ็น



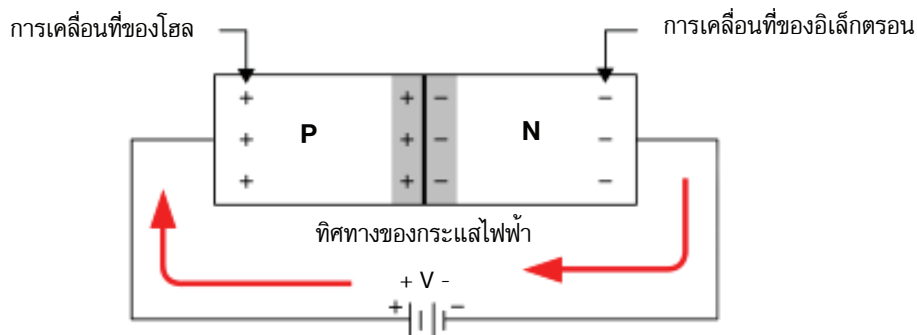
รูปที่ 6.5 (ก) การแพร่ของพาหะส่วนใหญ่ในสารกึ่งตัวนำแบบพีและเอ็น (ข) การแพร่เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล

อะตอมสารเจือผู้รับในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อสูญเสียโฮลที่เคลื่อนที่ไปยังฝั่งเอ็นก็จะเปลี่ยนเป็นประจุลบ (สัญลักษณ์ \ominus) ขณะที่อะตอมสารเจือผู้ให้ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่สูญเสียอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังฝั่งพี ก็จะเปลี่ยนเป็นประจุบวก (สัญลักษณ์ \oplus) การแพร่กันไปมาของพาหะทั้งสองฝั่งจะหยุดเมื่อประจุลบ และประจุบวกที่เกิดขึ้นดังกล่าวก่อให้เกิดแนวขวางกั้นศักย์ (Potential barrier) ทำให้พาหะทั้งสองไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ ในที่สุดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าระหว่างกันนี้จะเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium state) ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ข) โดยบริเวณตรงกลางของรอยต่อพี-เอ็น จะมีสนามไฟฟ้าที่ยับยั้งสูง จนกระทั่งพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถจะอยู่ได้ เราเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณปลอดพาหะ (Depletion region)

6.4 รอยต่อสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น ภายใต้การป้อนแรงดันไฟฟ้า

รอยต่อสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น ที่สภาวะสมดุลเมื่อได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าหรือเรียกว่าไบอัส (Bias) แรงดันไฟฟ้านั้นจะทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีการเคลื่อนที่ ซึ่งก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าผ่านสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพีและเอ็น โดยที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้า แต่ให้กระแสไฟฟ้าในทิศเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ขณะที่โฮลเคลื่อนที่และให้กระแสไฟฟ้าในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นกระแสที่ไหลในสารกึ่งตัวนำจะมีทั้งกระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและกระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโฮล โดยการไบอัสแรงดันไฟฟ้าให้กับรอยต่อสารกึ่งตัวนำ แบบพี-เอ็นนี้สามารถทำการป้อนไฟฟ้าได้สองแบบคือ

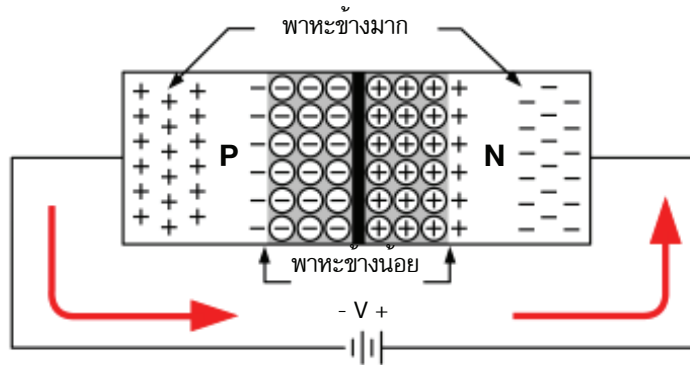
6.4.1 การไบอัสตรง (Forward Bias) การป้อนแรงดันไฟฟ้าในลักษณะนี้แสดงในรูปที่ 6.6 โดยสารกึ่งตัวนำชนิดพี ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ขณะที่ขั้วลบต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



รูปที่ 6.6 การไบอัสแรงดันไฟฟ้าแบบไบอัสตรง

การไบอัสตรงดังกล่าวจะมีผลทำให้บริเวณปลอดพาหะแคบลง เพราะแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะไปหักล้างกับแรงดันไฟฟ้าที่ยับยั้งที่เกิดขณะสภาวะสมดุลทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ข้ามฝั่งไปมาได้สะดวก ก่อให้เกิดกระแสไหลผ่านรอยต่อสารกึ่งตัวนำ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนมากของทั้งสองฝั่ง

6.4.2 การไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) การป้อนแรงดันไฟฟ้าในลักษณะนี้ แสดงในรูปที่ 6.7 โดยจะมีขั้วของแรงดันไฟฟ้าที่ตรงกันข้ามกับการไบอัสตรง กล่าวคือแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก จะต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่แรงดันไฟฟ้าขั้วลบจะต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

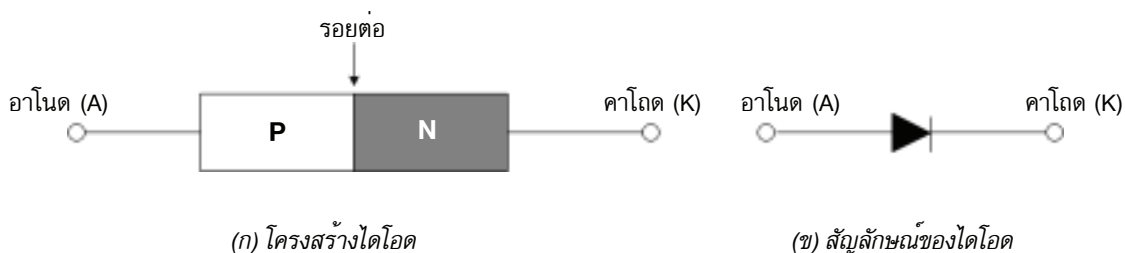


รูปที่ 6.7 การไบอัสแรงดันไฟฟ้าแบบไบอัสย้อนกลับ

การป้อนไฟฟ้าแบบไบอัสย้อนกลับนี้มีผลทำให้บริเวณปลอดพาหะมีความกว้างมากขึ้น เนื่องจากทิศทางของแรงดันไฟฟ้า อันเนื่องมาจากแบตเตอรี่จะไปเสริมทิศทางของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดภายในรอยต่อ ทำให้พาหะส่วนใหญ่อันได้แก่ อิเล็กตรอนในฝั่งเอ็นและโฮลในฝั่งพีเคลื่อนที่ข้ามฝั่งไปมาได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัสย้อนกลับนี้ จะยังคงได้จากการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อย อันได้แก่โฮลในฝั่งเอ็นและอิเล็กตรอนในฝั่งพี จึงมีค่ากระแสไหลน้อยมากจนแทบจะเป็นศูนย์ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อพี-เอ็น เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบไบอัสย้อนกลับจะทำตัวเหมือนฉนวนคือไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และถ้าเราเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสกลับมากขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง จะทำให้รอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำดังกล่าวเกิดพังทลาย (Breakdown) และเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นโดยฉับพลัน

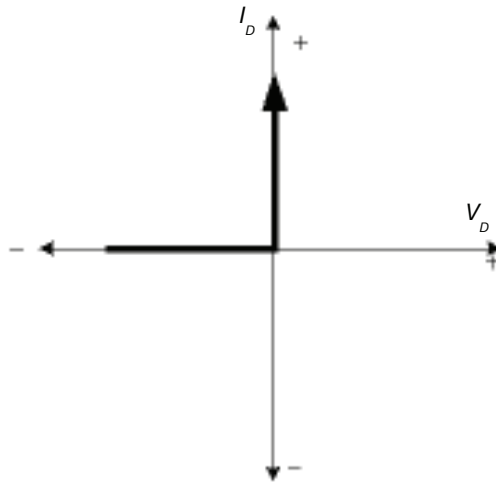
6.5 ไดโอด (Diode)

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำสองชนิดคือสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น นำมาประกบกันดังแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดโอด

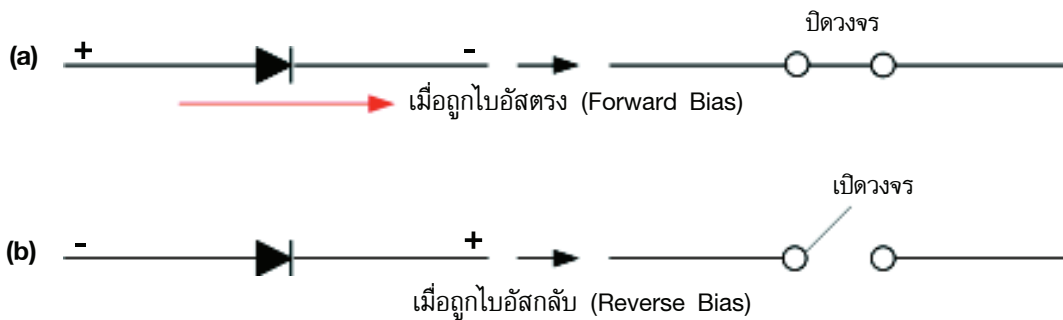
จากรูปจะเห็นว่าไดโอดจะประกอบด้วย 2 ขา คือ แอโนด (A: Anode) และแคโทด (K: Cathode) โดยที่สารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างไดโอดจะเป็นได้ทั้งซิลิคอนและเยอรมันเนียม (แต่โดยทั่วไปจะพบไดโอดที่สร้างจากซิลิคอนเป็นส่วนใหญ่) ในทางอุดมคติแล้ว ไดโอดจะมีคุณสมบัติเหมือนกับสวิตช์ที่ปิดและเปิดวงจร เมื่อทำการป้อนไฟไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 โดยกราฟคุณลักษณะระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_D) ที่ไหลผ่านไดโอด และแรงดันไฟฟ้า (V_D) ที่คร่อมไดโอดทางอุดมคติ จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอด

ตารางที่ 6.1 แสดงคุณสมบัติของไดโอดเมื่อไบอัสตรง และไบอัสกลับ

ไบอัสตรง	ไบอัสกลับ
1. ไดโอดอยู่ในสภาวะนำกระแส	1. ไดโอดอยู่ในสภาวะไม่นำกระแส
2. ไดโอดมีค่าความต้านทานต่ำ	2. ไดโอดมีค่าความต้านทานสูงมาก
3. ไดโอดมีสภาพเหมือนสวิตช์ที่ปิดวงจร	3. ไดโอดมีสภาพเหมือนสวิตช์ที่เปิดวงจร



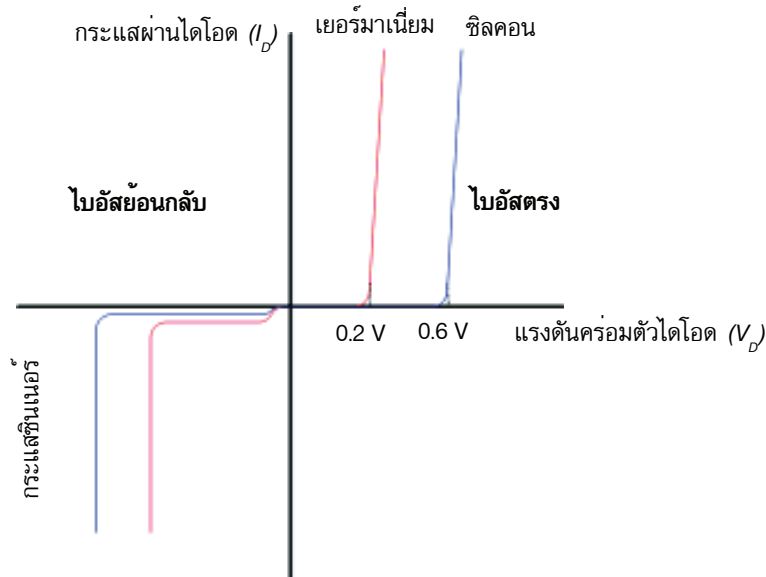
6.9 คุณสมบัติของไดโอดในทางอุดมคติ

6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอด

ในทางปฏิบัติแล้วกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_D) และแรงดันไฟฟ้า (V_D) ที่ต่อคร่อมไดโอด จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 6.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟดังกล่าวจะมีค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อไบอัสตรง ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ไดโอดเริ่มนำกระแสเราเรียกว่า *แรงดันคัทอิน* (Cutin Voltage: V_C) ซึ่งถ้าเป็นไดโอดที่ทำมาจากสารเยอรมาเนียม จะมีค่าแรงดันคัทอินนี้เท่ากับ 0.2 โวลต์ ขณะที่ไดโอดที่ทำมาจากสารซิลิคอน จะมีค่าแรงดันคัทอินเท่ากับ 0.6 โวลต์ ในทางกลับกันถ้าเราทำการบ่อนไบอัสย้อนกลับให้กับไดโอด จะมีกระแสไหลน้อยมากเนื่องจากพาหะส่วนน้อยในไดโอด เราเรียกกระแสนี้ว่า *กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ* (Reverse Saturation Current)

และถ้าป้อนไฟไบอัสย้อนกลับนี้มากถึงค่าๆ หนึ่งจนรอยต่อพังทลาย เราเรียกว่า *แรงดันพังทลาย* (Breakdown Voltage: V_D) ทำให้ไดโอดเสียหายได้

ดังนั้นในทางปฏิบัติถ้าต้องการให้ไดโอดนำกระแสโดยการไบอัสตรง จะต้องให้เบตเตอรีที่ต่อจากภายนอก มีค่ามากกว่า 0.6 โวลต์ เป็นอย่างน้อย เพื่อให้มีค่าเกินกว่าค่าแรงดันคัทอินดังกล่าว และไดโอดจะอยู่ในสภาวะนำกระแส โดยจะยอมให้กระแสไหลผ่านไปในทิศทางเดียวเท่านั้น



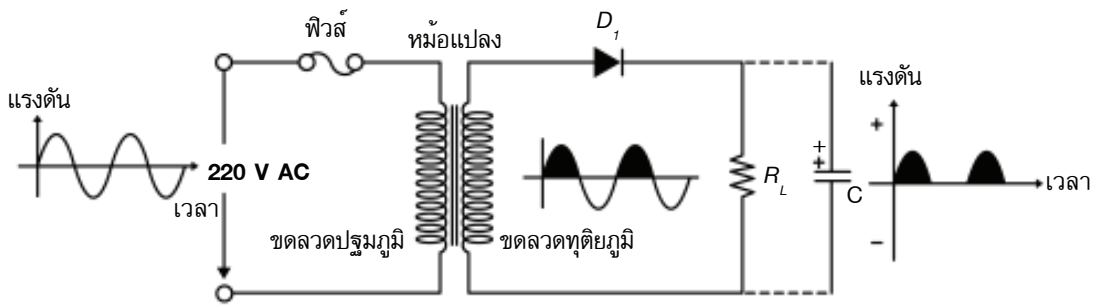
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดในทางปฏิบัติ

6.7 การประยุกต์ใช้งานไดโอด

ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญในการใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น ทั้งนี้เพราะวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกวงจรต้องมีไฟเลี้ยง ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้เลี้ยงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในวงจร โดยไฟฟ้ากระแสตรงสามารถหาได้จากเบตเตอรี เช่น ถ่านไฟฉาย แต่เมื่อพลังงานภายในเบตเตอรีหมดลง จำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานใหม่อีก ดังนั้นการที่ไดโอดยอมให้กระแสผ่านทางเดียวเมื่อทำการไบอัสตรง จึงเป็นอุปกรณ์เหมาะสมที่จะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งหาได้ง่ายเพราะมีสายส่งจ่ายตามบ้านเรือนให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ดังกล่าวนี้เรียกว่า *วงจรเรียงกระแส* หรือเรียกกันทั่วๆ ไปว่า *วงจรเรกติฟายเออร์* (Rectifier) ซึ่งการนำไดโอดไปใช้ทำเป็นวงจรเรกติฟายเออร์นี้ มีอยู่ 2 แบบ คือ

6.7.1 วงจรเรกติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier)

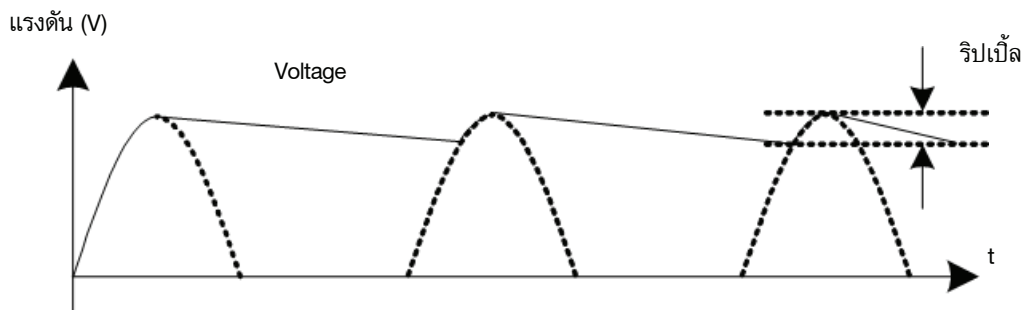
เนื่องจากไฟฟ้าที่จ่ายในบ้านเรือนมีแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงต้องต่อหม้อแปลง เพื่อลดระดับของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับลงมาก่อนนำไปเข้าวงจรเรกติฟายเออร์ โดยวงจรเรกติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่น ประกอบไปด้วยไดโอดต่ออนุกรมกับตัวต้านทานดังแสดงในรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 วงจรเรกติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่น

เมื่อแรงดันไฟฟ้าถูกป้อนเข้ามาที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะถูกเหนี่ยวนำให้มีขนาดลดลงที่ขดลวดทุติยภูมิ ในช่วงครึ่งคลื่นแรกจะได้แรงดันไฟฟ้าของขาแอนโอดเป็นบวกเมื่อเทียบกับขาแคโทด ทำให้ไดโอดได้รับการไบอัสตรง และอยู่ในสภาวะนำกระแส สัณฐานค่าแรงดันเอาต์พุตไปยังตัวต้านทาน R_L ได้ ขณะที่ในครึ่งคลื่นถัดมาแรงดันไฟฟ้าของขาแคโทดจะเป็นบวกเมื่อเทียบกับขาแอนโอด ทำให้ไดโอดได้รับการไบอัสกลับเป็นผลให้ไดโอดอยู่ในสภาวะไม่นำกระแสเปรียบเสมือนสวิตช์ที่เปิดวงจร จึงไม่มีแรงดันไฟฟ้าส่งผ่านไปให้เอาต์พุต

สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากรูปที่ 6.11 นั้นยังไม่เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ดี เพื่อที่จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีลักษณะเรียบและคงที่เหมือนคุณสมบัติของแรงดันไฟตรงเราต้องใส่ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เข้าไปอีก ตัวเก็บประจุนี้ทำหน้าที่กรองแรงดัน โดยตัวเก็บประจูดังกล่าวจะไปต่อขนานกับตัวต้านทาน R_L ดังแสดงในรูปที่ 6.11 (เส้นประ) ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เรียบขึ้นแต่ก็ยังคงมีสัญญาณที่กระเพื่อมอยู่บ้าง สัญญาณที่กระเพื่อมนี้เรียกว่า *ริปเปิ้ล* (ripple) ดังแสดงในรูปที่ 6.12 ซึ่งการทำให้แรงดันมีลักษณะเรียบและคงที่มากขึ้นทำได้โดยใส่ตัวเก็บประจุ C นี้ ให้มีค่ามากขึ้น

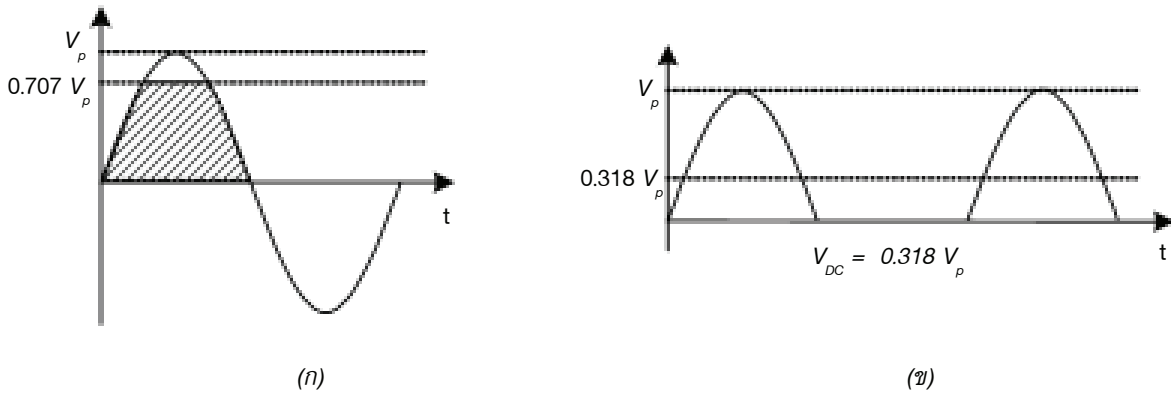


รูปที่ 6.12 แรงดันไฟฟ้าที่มีริปเปิ้ล

ค่าของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้นั้นจะเป็นค่าเฉลี่ย ถ้าให้สัญญาณไฟฟ้าสลับมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Peak Voltage) เท่ากับ V_p เราจะได้ค่าอาร์เอ็มเอส (rms: roots mean square) มีค่าเท่ากับ 0.707 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด กล่าวคือ

$$V_{rms} = 0.707 V_p$$

ดังแสดงในรูปที่ 6.13 (ก)



รูปที่ 6.13 แสดงค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟสลับ

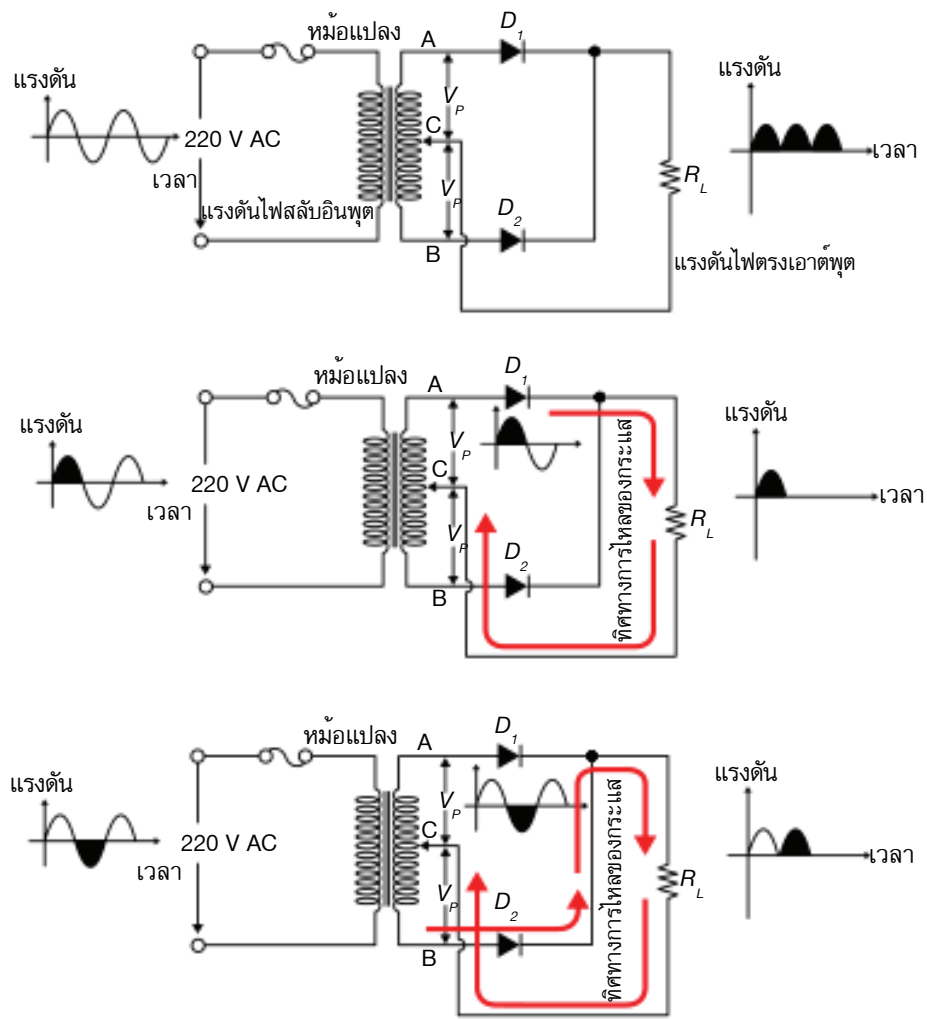
สำหรับวงจรเรกติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่นนั้นถ้ายังไม่มี C ฟิลเตอร์ต่ออยู่จะวัดค่าแรงดันเฉลี่ยทั้งหมดออกมาเท่ากับ 0.318 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V_p ดังแสดงในรูปที่ 6.13 (ข)

6.7.2 วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น (Full Wave Rectifier)

ถึงแม้ว่าวงจรเรกติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่นจะเป็นวงจรที่ง่าย และมีอุปกรณ์ในวงจรน้อย แต่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้ก็ยังไม่สมบูรณ์เสียทีเดียว เพราะยังมีสัญญาณรบกวนเบิ้ลอยู่มาก ดังนั้นจึงได้มีวงจรเรกติฟายเออร์อีกแบบที่สามารถ จัดเรียงแรงดันไฟกระแสสลับให้ได้เป็นแรงดันไฟกระแสตรงได้เต็มรูปคลื่น เราจะเรียกวงจรเรกติฟายเออร์นี้ว่า วงจรเรกติฟายเออร์แบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ

(ก) วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นแบบแท็ปกลาง (Center-Tap Full Wave Rectifier)

วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นแบบแท็ปกลางมีแสดงดังในรูปที่ 6.14 (ก) ซึ่งประกอบไปด้วย ไดโอด 2 ตัว ต่อกับโหลด R_L โดยไดโอด D_1 และ D_2 ในรูปจะสลับกันทำงานในสภาวะนำกระแสตัวละครึ่งคลื่นกล่าวคือ ในช่วงเวลา t_0 ถึง t_1 ในรูป (ข) ไดโอด D_1 จะนำกระแส ขณะที่ไดโอด D_2 ไม่นำกระแส ทำให้ได้กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุต R_L ที่มีทิศทางดังรูป ขณะในรูปที่ (ค) ในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 ไดโอด D_1 จะไม่นำกระแส แต่ไดโอด D_2 จะนำกระแสและได้แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุต R_L มีลักษณะเช่นเดียวกับครึ่งคลื่นก่อนหน้านี้

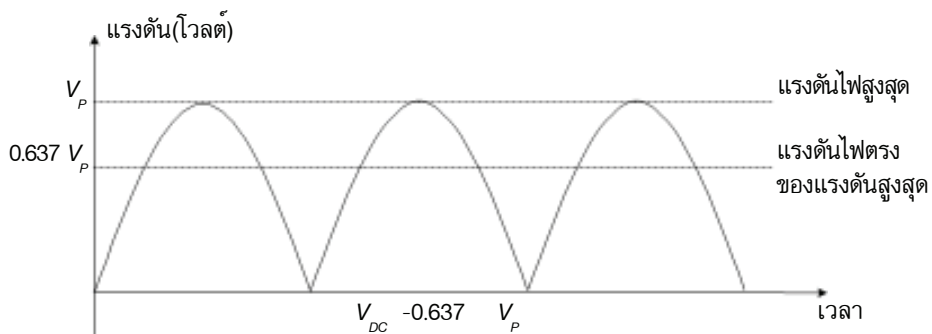


รูปที่ 6.14 วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นแบบแท็ปกลาง

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 6.15 ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

$$V_{(DC)} = 0.637 V_p$$

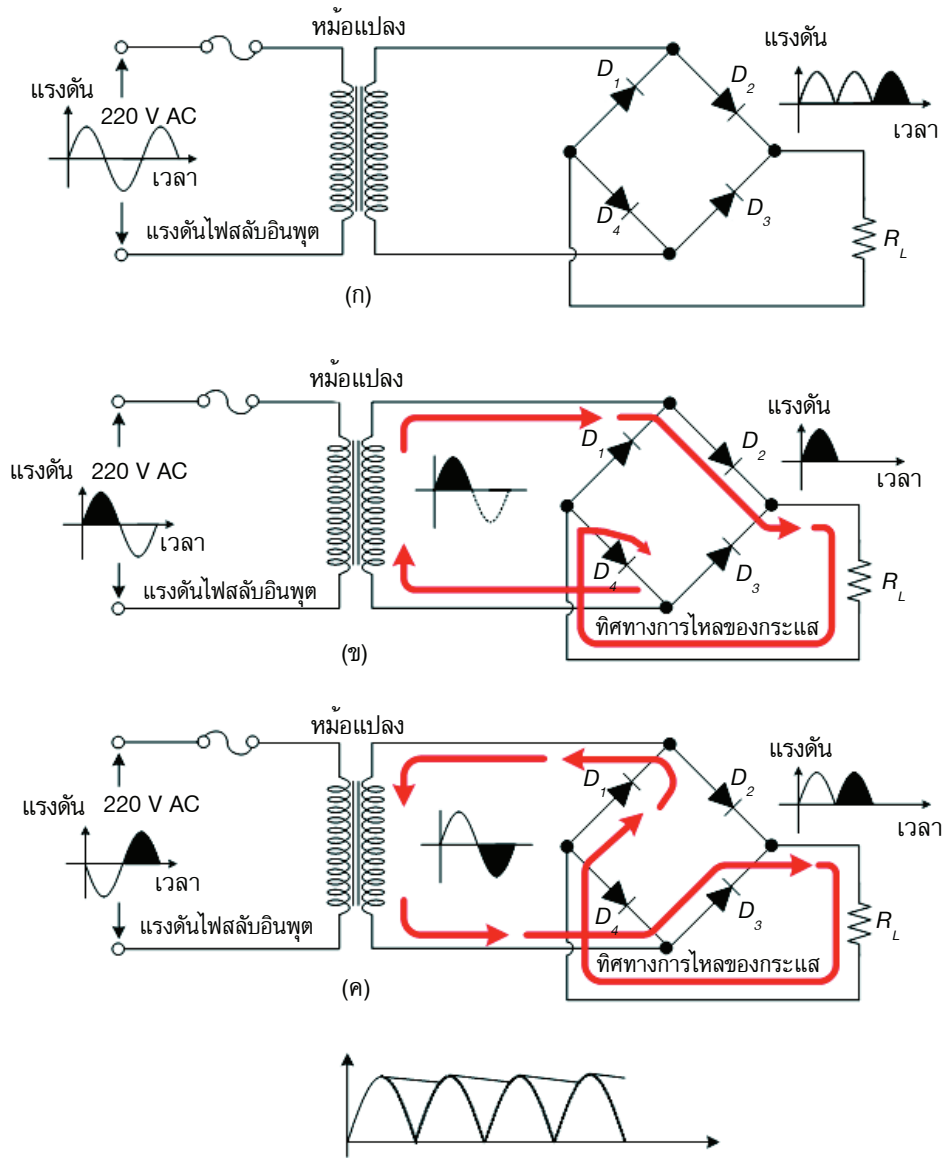
เมื่อ V_p คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 6.15 แรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นแบบแท็ปกลาง

(ข) วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Full Wave Rectifier)

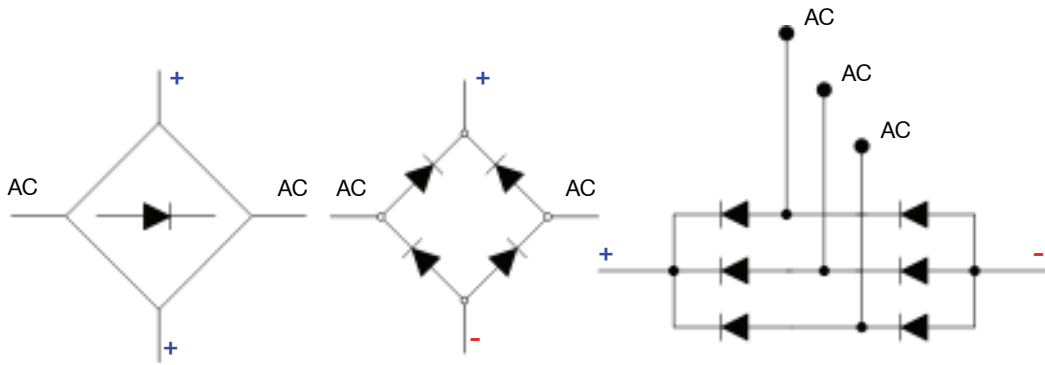
วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นแบบบริดจ์ เป็นวงจรที่พบมากที่สุด ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยจะมีลักษณะของวงจรแสดงดังรูปที่ 6.16 (ก) ซึ่งประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว สลับกันทำงานในช่วงนำกระแสเป็นคู่ๆ กล่าวคือ ในขณะที่ไดโอด D_2 และ D_4 อยู่ในสภาวะนำกระแสแสดงในรูป (ข) ไดโอด D_1 และ D_3 จะอยู่ในสภาวะไม่นำกระแสทำให้แรงดันไฟฟ้าจากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงส่งค่าแรงดันไฟฟ้าไปยังโหลด R_L มีทิศทางดังรูป ขณะที่ในครึ่งลูกคลื่นถัดมาไดโอด D_1 และ D_3 อยู่ในสภาวะนำกระแสบ้างและไดโอด D_2 และ D_4 จะอยู่ในสภาวะไม่นำกระแสแสดงในรูป (ค) ก็ยังจะได้แรงดันไฟฟ้าที่โหลด R_L ที่ต่อที่เอาต์พุตมีลักษณะเดียวกับรูป (ข) ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตเต็มลูกคลื่น ซึ่งค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเช่นเดียวกับกับของวงจรเรกติฟายเออร์แบบแท็ปกลาง แต่ในทางปฏิบัติมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะต้องหักลบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแสจำนวน 2 ตัว ซึ่งเท่ากับ $2 \times 0.6 = 1.2$ โวลต์ ขณะที่ของวงจรแบบแท็ปกลางจะหักลบออกเพียง 0.6 โวลต์ เพราะมีไดโอดอยู่ในสภาวะนำกระแสเพียง 1 ตัว เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปผ่านตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดัน จะทำให้ได้กราฟของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเรียบมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.16 (ง) ซึ่งค่าสัญญาณแรงดันไฟตรงที่ได้จะมีค่าประมาณ $0.636 V_p$



(ง) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรบริดจ์ที่ผ่านตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดัน

รูปที่ 6.16 วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่นแบบบริดจ์

ในรูปที่ 6.17 แสดงให้เห็นถึงสัญลักษณ์ของวงจรรีกติฟายเออร์เต็มคลื่นแบบบริดจ์ที่พบในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป รวมทั้งตัวอย่างเบอร์ไดโอดที่ใช้ในวงจรรีกติฟายเออร์ ดังแสดงในตารางที่ 6.2



(ก) สัญลักษณ์ไดโอดบริดจ์ของระบบไฟฟ้าแบบเฟสเดียว

(ข) สัญลักษณ์ไดโอดบริดจ์ของระบบไฟฟ้าสามเฟส

รูปที่ 6.17 สัญลักษณ์ของไดโอดที่ต่อแบบบริดจ์ในวงจรรีกติฟายเออร์

ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด

ไดโอดเรกติฟายเออร์

เบอร์ไดโอด	วัสดุ	V_R (v)	I_F (A)	ชนิดการใช้งาน
BYX98/300	ซิลิคอน	300	10.0	เรกติฟายเออร์
MR100	ซิลิคอน	100	10.0	เรกติฟายเออร์
MR410	ซิลิคอน	400	10.0	เรกติฟายเออร์
1N4002	ซิลิคอน	100	1.0	เรกติฟายเออร์
1N4004	ซิลิคอน	400	1.0	เรกติฟายเออร์
1N4007	ซิลิคอน	1,000	1.0	เรกติฟายเออร์
BY229-400	ซิลิคอน	400	7.0	สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย
1N4936	ซิลิคอน	400	1.0	สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย
1N5404	ซิลิคอน	400	3.0	เรกติฟายเออร์
1N5408	ซิลิคอน	1,000	3.0	เรกติฟายเออร์
PB40	ซิลิคอน	400	25	บริดจ์เรกติฟายเออร์กำลังสูง
3504	ซิลิคอน	400	35	บริดจ์เรกติฟายเออร์กระแสสูง
PO4	ซิลิคอน	400	400	6.0 บริดจ์เรกติฟายเออร์กำลังต่ำ
WO4	ซิลิคอน	400	1.5	บริดจ์เรกติฟายเออร์ขนาดเล็ก

ไดโอดขนาดเล็ก

เบอร์ไดโอด	วัสดุ	V_R (v)	I_F (A)	C_d (pF)	ชนิดการใช้งาน
OA47	เยอรมาเนียม	25	110	3.5	วงจรสวิตซ์แรงดันต่ำ
OA90	เยอรมาเนียม	20	45	N/A	เป็นไดโอดแบบจุดสัมผัส
OA91	เยอรมาเนียม	90	50	N/A	เป็นไดโอดแบบจุดสัมผัส
DSOA91	เยอรมาเนียม	50	30	1	ใช้งานทั่วไป
1N60	เยอรมาเนียม	40	30	1	AM/FM detector
OA95	เยอรมาเนียม	90	50	N/A	เป็นไดโอดแบบจุดสัมผัส
BA102	ซิลิคอน	20	N/A	20-45	วาริแคปไดโอด
BA234/4	ซิลิคอน	20	100	<2	สวิตซ์ย่าน UHF
BAW62	ซิลิคอน	75	200	2	สวิตซ์ความเร็วสูง
BB119	ซิลิคอน	15	N/A	20-25	วาริแคปไดโอดใช้แทน BA102
BB122	ซิลิคอน	30	N/A	12	วาริแคปไดโอดย่าน UHF
BB212	ซิลิคอน	12	N/A	500-620	AM วาริแคปแบบไดโอดคู่
1N914A	ซิลิคอน	75	75	4	สวิตซ์สัญญาณขนาดเล็กใช้แทน 1N4148
1N4148	ซิลิคอน	75	200	4	สวิตซ์สัญญาณขนาดเล็ก ใช้แทน 1N914A
1N4448	ซิลิคอน	75	300	4	สวิตซ์สัญญาณขนาดเล็ก ใช้แทน 1N4148

หมายเหตุ :

V_R	=	แรงดันไบอัสย้อนกลับสูงสุดที่ไดโอดทนได้
I_F	=	กระแสไบอัสตรงสูงสุดที่ไดโอดทนได้
C_d	=	ค่าความจุไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นบนรอยต่อพี-เอ็น
N/A	=	ไม่มีข้อมูลคุณสมบัติของไดโอดเบอร์นั้นๆ

การตรวจสอบไดโอด

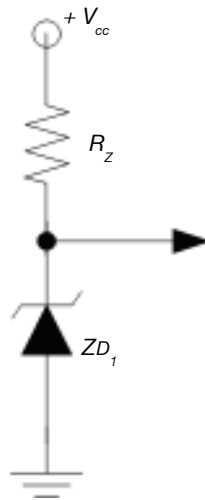
เราสามารถใช่มัลติมิเตอร์ตรวจสอบได้ว่าไดโอดดีหรือเสีย โดยตั้งการวัดของมัลติมิเตอร์เป็นโอห์มมิเตอร์ จะใช้ย่านการวัด X10, X100, X1K ก็ได้ จากนั้นนำสายมิเตอร์ขั้วลบมาต่อกับขั้วแคโทดและขั้วบวกมาต่อแคโนด ถ้าไดโอดใช้ได้ มัลติมิเตอร์แสดงค่าความต้านทานออกมาค่าหนึ่ง การวัดแบบนี้เหมือนกับเป็นการไบอัสตรงแก่ไดโอด เพราะว่าเมื่อเลือกการวัดของมัลติมิเตอร์เป็นโอห์มมิเตอร์ที่จุดวัดหรือปลายสายของขั้วมิเตอร์จะมีแรงดันจากแบตเตอรี่ภายในออกมา โดยสายลบจะมีแรงดันขั้วบวกและสายบวกจะมีแรงดันขั้วลบ แต่มีมิเตอร์บางรุ่นที่สายลบจะมีแรงดันขั้วลบและสายบวกจะมีแรงดันขั้วบวก ดังนั้นก่อนการวัดควรตรวจสอบให้แน่ใจเสียก่อน

6.8 ไดโอดชนิดอื่นๆ

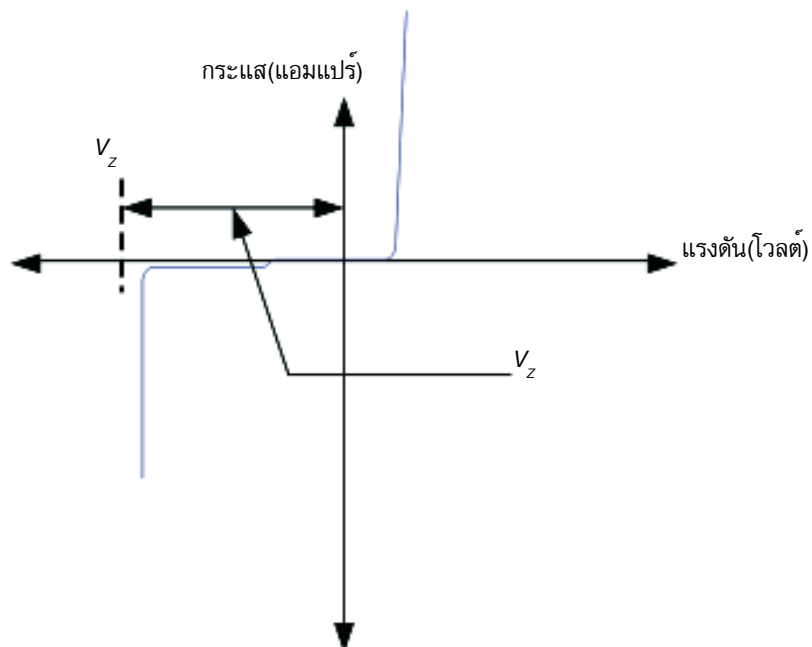
นอกจากไดโอดที่ทำงานแบบเรกติฟายเออร์แล้วยังมีไดโอดอีกหลายชนิดที่ทำงานเฉพาะด้าน ในที่นี้จะยกตัวอย่างไดโอดบางประเภทที่พบบ่อยๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังนี้

6.8.1 ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode)

เป็นไดโอดที่สามารถทำงานได้ในช่วงการบ่อนไบอัสย้อนกลับ แต่ถ้าหากให้ไบอัสตรงเมื่อใด ซีเนอร์ไดโอดก็จะกลายเป็นไดโอดธรรมดาตัวหนึ่ง ส่วนการทดสอบก็ทำเหมือนกับไดโอดธรรมดา ซีเนอร์ไดโอดมีสัญลักษณ์และวงจรใช้งานเบื้องต้นดังรูปที่ 6.18 ส่วนกราฟคุณลักษณะแสดงดังในรูปที่ 6.19 ซีเนอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดัน (regulate) ไฟฟ้าให้คงที่ โดยปกติเมื่อใช้งานจะต้องต่อตัวต้านทานเพื่อจำกัด กระแสได้ เนื่องจากซีเนอร์ไดโอดทนกระแสไม่สูงมากนัก โดยกระแสจะอยู่ระหว่าง 5-10 มิลลิแอมป์ และมี เงื่อนไขว่าแรงดันไฟเลี้ยง V_{cc} จะต้องมากกว่าแรงดันซีเนอร์ V_z อย่างน้อย 1 โวลต์ ซีเนอร์ไดโอดถึงจะทำงานได้



รูปที่ 6.18 วงจรใช้งานพื้นฐานของซีเนอร์ไดโอด



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงการทำงานของซีเนอร์ไดโอด

ข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด

ในตารางที่ 6.3 เป็นข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ต่างๆ ซึ่งแต่ละเบอร์จะมีแรงดันซีเนอร์ V_z ต่างกัน และมีอัตราการทำงานกระแสที่ต่างกันด้วย โดยที่

I_{ZT} = กระแสซีเนอร์สูงสุด (เมื่อทำการทดสอบ สภาวะหนึ่ง)

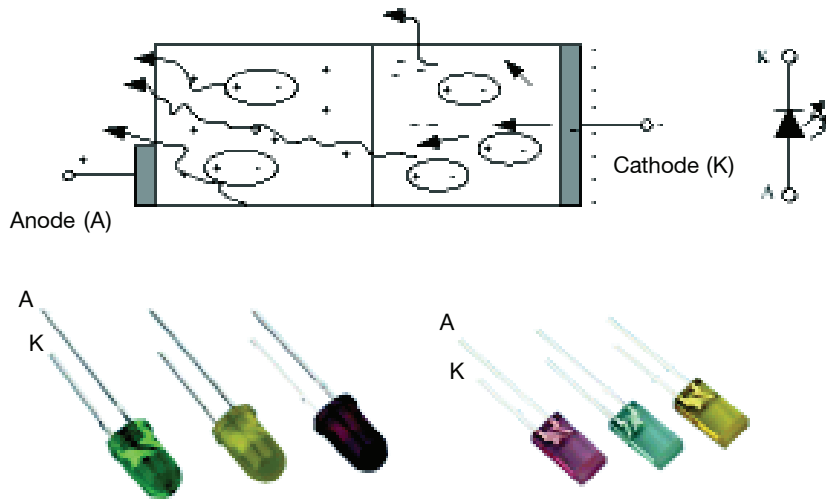
V_z = แรงดันซีเนอร์สูงสุด (เมื่อทำการทดสอบ สภาวะหนึ่ง)

ตารางที่ 6.3 ข้อมูลของซีเนอร์

V_z (v)	ขนาด 400 mW		ขนาด 1 W	
	เบอร์	I_{ZT}	เบอร์	I_{ZT}
3.3	1N746	20.0	1N4728	-
3.6	1N747	20.0	1N4729	-
3.9	1N748	20.0	1N4730	-
4.7	1N750	20.0	1N4732	53.0
5.1	1N751	20.0	1N4733	49.0
5.6	1N752	20.0	1N4734	45.0
6.2	1N753	20.0	1N4735	41.0
6.8	1N754,1N957	18.5	1N4736	37.0
7.5	1N755,1N958	16.5	1N4737	34.0
8.2	1N756,1N959	15.0	1N4738	31.0
9.1	1N757,1N960	14.0	1N4739	28.0
10.0	1N758,1N961	14.0	1N4740	25.0
11.0	1N962	12.5	1N4741	23.0
12.0	1N759,1N963	11.5	1N4742	21.0
13.0	1N964	10.5	1N4743	19.0
15.0	1N965	9.5	1N4744	17.0
16.0	1N966	8.5	1N4745	15.5
18.0	1N967,1N4112	7.8	1N4746	14.0
20.0	1N968	7.0	1N4747	12.5
22.0	1N969	6.2	1N4748	11.5
24.0	1N970	5.6	1N4749	10.5
27.0	1N971	5.3	1N4750	9.5
30.0	1N972	5.3	1N4751	8.5
33.0	1N973	5.2	1N4752	7.5

6.8.2 ไดโอดเปล่งแสงหรือ แอลอีดี (LED: Light - Emitted Diode)

เป็นไดโอดที่สามารถเปล่งแสงสว่างออกมาด้วยคลื่นความถี่เดียวและมีเฟสต่อเนื่องได้เมื่อได้รับการไบอัสตรง ซึ่งต่างไปจากแสงสว่างธรรมดาที่คนเรามองเห็น ซึ่งประกอบไปด้วยคลื่นที่มีความถี่และเฟสต่างๆ มารวมกันลักษณะโครงสร้างของ LED มีแสดงดังรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของแอลอีดี

เมื่อเราทำการไบอัสตรงให้แก่ LED จะทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีพลังงานสูงขึ้นจนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ และจะคายพลังงานในรูปแบบของ “โฟตอน” ซึ่งเป็นอนุภาคของแสงออกมา

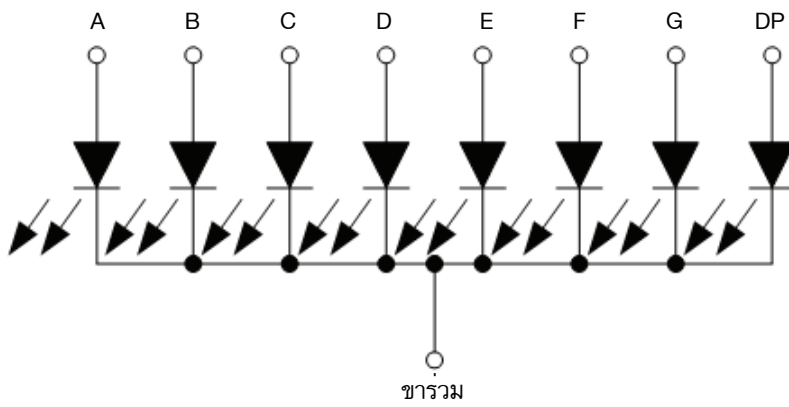
3. ไดโอดเปล่งแสงแบบ 7 ส่วน (LED 7-Segment Display)



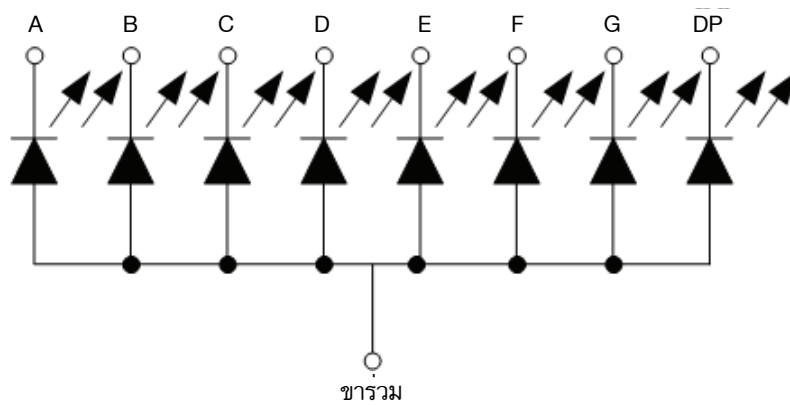
รูปที่ 6.21 ไดโอดเปล่งแสงแบบ 7 ส่วน

มีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 6.21 ซึ่งจะประกอบด้วยส่วน a, b, c, d, e, f และ g โดยที่ไดโอดเปล่งแสงแบบ 7 ส่วน มีสองชนิด คือ ชนิดแอโนดร่วม (Common Anode) โดยจะให้ขาแอโนดของ LED แต่ละตัวต่อร่วมกัน และชนิดแคโทดร่วม (Common Cathode) ซึ่งจะมีขาแคโทดต่อร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.22 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ในปัจจุบันจะมี LED ที่มีแสงสองสีอยู่ในตัวเดียวกัน เราเรียก LED ประเภทนี้ว่า Two-lead LED เมื่อเราป้อนไฟไบโอสถกลับกัน ในแต่ละครั้งจะมีสีสั่นแตกต่างกันออกไป เช่น ครั้งแรกเป็นสีเขียว และเมื่อกลับขั้วไบโอสถจะเป็นสีแดง เป็นต้น



(ก) แบบแคโทดร่วม



(ข) แบบแอโนดร่วม

รูปที่ 6.22 ไดโอดเปล่งแสงแบบ 7 ส่วนชนิดแอโนดร่วมและแคโทดร่วม