



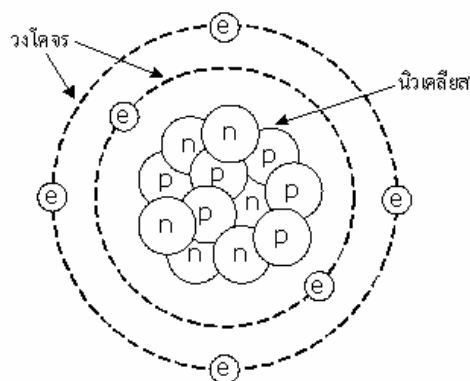
หน่วยที่ 5

อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น

บทนี้กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยเน้นที่อุปกรณ์แอ็กทีฟ (Active element) ที่เป็นไดโอด (diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) และ วงจรรวม (integrate circuit; IC) ทั้งหมดที่กล่าวถึงสร้างจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor device) ซึ่งก้ำกึ่งระหว่างฉนวนและตัวนำไฟฟ้า และนำมาประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์เป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2448 ปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอย่างแพร่หลาย

5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับธาตุ

ธาตุประกอบด้วยอนุภาค 3 ชนิด คือ นิวตรอน โปรตอน และอิเล็กตรอน นิวตรอนและโปรตอนอยู่รวมกันที่แกนกลาง เรียกว่า “นิวเคลียส” ส่วนอิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรรอบนิวเคลียส ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ธาตุมีนิวตรอนและโปรตอนอยู่รวมกันที่นิวเคลียส อิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรรอบนิวเคลียส

จำนวนโปรตอนและนิวตรอนเรียกว่า “เลขมวล” (mass number ; A) ส่วนจำนวนโปรตอนเรียกว่า “เลขอะตอม” (atomic number ; z) สัญลักษณ์ของธาตุเขียนได้เป็น ${}_zX^A$ สามารถบอกชนิดของธาตุได้ด้วยเลขอะตอม เช่น ธาตุที่มี $z = 1$ คือ ไฮโดรเจน (${}_1H^1$) , ธาตุที่มี $z = 2$ คือ ฮีเลียม (${}_2He^4$) และธาตุที่มี $z = 3$ คือ ลิเทียม (${}_3Li^6$) เป็นต้น อิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรมีจำนวนอิเล็กตรอนสูงสุดจากวงในสุดออกมาเป็น 2 , 8 , 18 , 32 , 64 , ... อิเล็กตรอนในวงโคจรสุดท้ายมีได้สูงสุด 8 ตัว วงโคจรสุดท้ายของธาตุเรียกว่า “วงโคจรวาเลนซ์” (valance orbit) อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรนี้เรียกว่า “อิเล็กตรอนวาเลนซ์” (valance electron) ธาตุต่าง ๆ สามารถนำมาเรียงเป็นตารางธาตุ (periodic table) ดังรูปที่ 5.2 พิจารณาตารางธาตุจากรูปที่ 5.2 ธาตุหมู่ที่ 1 ถึง 3 คือ โลหะ (metallic) ธาตุหมู่ที่ 5 ถึง 7 คือ อโลหะ



(non – metallic) ธาตุหมู่ที่ 8 คือ ธาตุเฉื่อย (inert) ที่น่าสนใจคือธาตุหมู่ที่ 4 หรือสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งเป็นสารที่อยู่ระหว่างโลหะและอโลหะ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของธาตุหมู่นี้ก็เป็นฉนวนที่เกือบจะนำไฟฟ้า

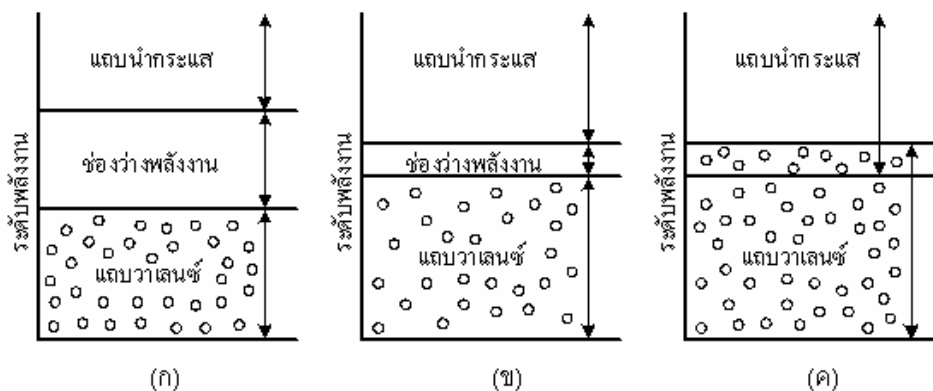
I		IIA										IIIA										IVA										VA										VIA										VIIA										VIII		IX		X		XI		XII		I3		He																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1.1	1.00797	2.0	4.00120	3.0	6.941	4.0	9.01224	5.0	10.811	6.0	12.011	7.0	14.007	8.0	15.999	9.0	18.998	10.0	20.180	11.0	22.990	12.0	24.305	13.0	26.982	14.0	28.086	15.0	30.974	16.0	32.06	17.0	35.453	18.0	39.948	19.0	44.956	20.0	49.987	21.0	54.938	22.0	59.94	23.0	63.927	24.0	68.94	25.0	72.63	26.0	75.20	27.0	78.96	28.0	81.07	29.0	84.94	30.0	88.91	31.0	92.91	32.0	96.91	33.0	100.91	34.0	104.91	35.0	108.91	36.0	112.91	37.0	116.91	38.0	120.91	39.0	124.91	40.0	128.91	41.0	132.91	42.0	136.91	43.0	140.91	44.0	144.91	45.0	148.91	46.0	152.91	47.0	156.91	48.0	160.91	49.0	164.91	50.0	168.91	51.0	172.91	52.0	176.91	53.0	180.91	54.0	184.91	55.0	188.91	56.0	192.91	57.0	196.91	58.0	200.91	59.0	204.91	60.0	208.91	61.0	212.91	62.0	216.91	63.0	220.91	64.0	224.91	65.0	228.91	66.0	232.91	67.0	236.91	68.0	240.91	69.0	244.91	70.0	248.91	71.0	252.91	72.0	256.91	73.0	260.91	74.0	264.91	75.0	268.91	76.0	272.91	77.0	276.91	78.0	280.91	79.0	284.91	80.0	288.91	81.0	292.91	82.0	296.91	83.0	300.91	84.0	304.91	85.0	308.91	86.0	312.91	87.0	316.91	88.0	320.91	89.0	324.91	90.0	328.91	91.0	332.91	92.0	336.91	93.0	340.91	94.0	344.91	95.0	348.91	96.0	352.91	97.0	356.91	98.0	360.91	99.0	364.91	100.0	368.91	101.0	372.91	102.0	376.91	103.0	380.91	104.0	384.91	105.0	388.91	106.0	392.91	107.0	396.91	108.0	400.91	109.0	404.91	110.0	408.91	111.0	412.91	112.0	416.91	113.0	420.91	114.0	424.91	115.0	428.91	116.0	432.91	117.0	436.91	118.0	440.91	119.0	444.91	120.0	448.91	121.0	452.91	122.0	456.91	123.0	460.91	124.0	464.91	125.0	468.91	126.0	472.91	127.0	476.91	128.0	480.91	129.0	484.91	130.0	488.91	131.0	492.91	132.0	496.91	133.0	500.91	134.0	504.91	135.0	508.91	136.0	512.91	137.0	516.91	138.0	520.91	139.0	524.91	140.0	528.91	141.0	532.91	142.0	536.91	143.0	540.91	144.0	544.91	145.0	548.91	146.0	552.91	147.0	556.91	148.0	560.91	149.0	564.91	150.0	568.91	151.0	572.91	152.0	576.91	153.0	580.91	154.0	584.91	155.0	588.91	156.0	592.91	157.0	596.91	158.0	600.91	159.0	604.91	160.0	608.91	161.0	612.91	162.0	616.91	163.0	620.91	164.0	624.91	165.0	628.91	166.0	632.91	167.0	636.91	168.0	640.91	169.0	644.91	170.0	648.91	171.0	652.91	172.0	656.91	173.0	660.91	174.0	664.91	175.0	668.91	176.0	672.91	177.0	676.91	178.0	680.91	179.0	684.91	180.0	688.91	181.0	692.91	182.0	696.91	183.0	700.91	184.0	704.91	185.0	708.91	186.0	712.91	187.0	716.91	188.0	720.91	189.0	724.91	190.0	728.91	191.0	732.91	192.0	736.91	193.0	740.91	194.0	744.91	195.0	748.91	196.0	752.91	197.0	756.91	198.0	760.91	199.0	764.91	200.0	768.91

รูปที่ 5.2 ตารางธาตุ



อาจจำแนกธาตุจากคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยพิจารณาจากความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า อาจเรียกธาตุว่าผลึกสถานะของแข็งเนื่องจากพิจารณาเฉพาะธาตุในสถานะของแข็ง ตัวนำมีการยึดตัวกันระหว่างอะตอมด้วยพันธะโลหะ (Metallic bond) ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงนัก ดังนั้นตัวนำจึงมีอิเล็กตรอนอิสระ⁽¹⁾ เป็นจำนวนมาก การใช้พลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างง่ายดาย⁽²⁾ ในทางตรงข้าม ฉนวนมีการยึดตัวกันระหว่างอะตอมด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalence bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก ดังนั้นฉนวนจึงมีอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนน้อย และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี

คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของผลึกสถานะของแข็งอาจพิจารณาได้จากแบบจำลองระดับพลังงาน เรียกว่า “ทฤษฎีแถบพลังงาน” โดยแบ่งแถบพลังงานเป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 เป็นแถบพลังงานต่ำเรียกว่า “แถบวาเลนซ์” (valance band) อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในแถบพลังงานนี้คืออิเล็กตรอนยึดเหนี่ยว⁽³⁾ ซึ่งถูกยึดไว้โดยอะตอมใด ๆ ดังนั้นอิเล็กตรอน ณ แถบพลังงานนี้จึงมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวสูง แต่มีพลังงานจลน์น้อย ถัดจากแถบวาเลนซ์คือ “แถบช่องว่างพลังงาน” (energy gap band) ช่องว่างนี้คือที่ว่างระหว่างวงโคจรวาเลนซ์กับภายนอกอะตอม เนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งวนรอบอะตอมเป็นวงโคจร และอิเล็กตรอนต้องอยู่ ณ วงโคจรใด ๆ ดังนั้นอิเล็กตรอนใด ๆ จึงไม่สามารถเข้ามาอยู่ภายในแถบช่องว่างพลังงานได้ แถบพลังงานช่วงที่ 3 เป็นแถบพลังงานสูง เรียกว่า “แถบนำกระแส” (conduction band) อิเล็กตรอนที่อยู่ ณ แถบพลังงานนี้เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกมาจากการยึดเหนี่ยวของอะตอม และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ดังนั้น อิเล็กตรอน ณ แถบพลังงานนี้จึงมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวต่ำมาก และมีพลังงานจลน์สูง การกระตุ้นด้วยพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ แถบพลังงานของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ เป็นดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 (ก) แถบพลังงานของฉนวน (ข) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (ค) แถบพลังงานของตัวนำ

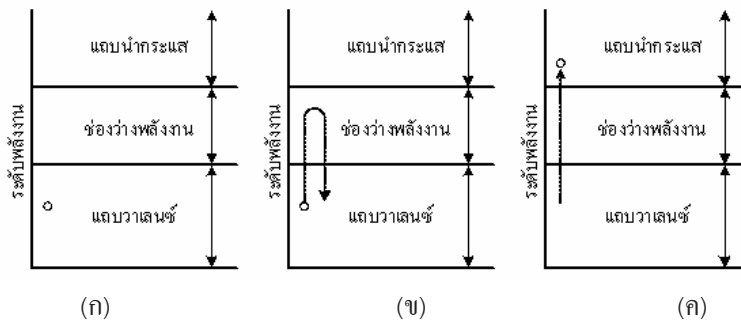
(1) อิเล็กตรอนอิสระ (free electron) คือ อิเล็กตรอนที่ไม่ถูกยึดเหนี่ยวไว้โดยอะตอมใด ๆ และมีอิสระในการเคลื่อนย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อย)

(2) กระแสไฟฟ้าเกิดจากการไหลของกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระผ่านพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา

(3) อิเล็กตรอนยึดเหนี่ยว (bond electron) คือ อิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวไว้ในวงโคจรรอบอะตอมใด ๆ



รูปวงกลมที่อยู่ในรูปที่ 5.3 เป็นสัญลักษณ์แทนอิเล็กตรอน รูปที่ 5.3 (ก) คือแถบพลังงานของฉนวน ช่องว่างพลังงานของฉนวนกว้างมาก ดังนั้น ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการยกระดับอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงในแถบวาเลนซ์⁽¹⁾ ให้ข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบนำกระแสได้



รูปที่ 5.4 (ก) ฉนวนที่มี 1 อิเล็กตรอน
(ข) พลังงานที่จ่ายให้อิเล็กตรอนไม่มากพอที่จะข้ามช่องว่างพลังงาน
(ค) พลังงานที่จ่ายให้อิเล็กตรอนมากพอที่จะข้ามช่องว่างพลังงาน

พิจารณารูปที่ 5.4 (ก) สมมติให้ฉนวนมี 1 อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ถ้าใส่พลังงานให้อิเล็กตรอนดังกล่าว อิเล็กตรอนก็จะเปลี่ยนระดับพลังงาน ถ้าพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงาน อิเล็กตรอนจะปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับออกสู่สิ่งแวดล้อม อาจอยู่ในรูปของแสง ความร้อน ฯลฯ แล้วกลับเข้ามาสู่ระดับพลังงานเดิม ดังรูปที่ 5.4 (ข) ในกรณีนี้ไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า รูปที่ 5.4 (ค) อิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากเพียงพอที่จะข้ามช่องว่างพลังงาน ดังนั้น อิเล็กตรอนจึงเปลี่ยนระดับพลังงานเข้าไปสู่แถบนำกระแส และเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า เนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานของฉนวนกว้างมาก การทำให้อิเล็กตรอนเกิดการนำกระแสไฟฟ้าจึงต้องใช้พลังงานสูงมาก เช่น อากาศต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 30 kV ถึง 50 kV⁽²⁾ จึงทำให้เกิดการนำกระแสในช่วงระยะทาง 1 เซนติเมตร ในวัตถุแข็งแรงดันพังทลายจะเป็นตัวการทำให้อิเล็กตรอนเกิดการนำกระแสและสูญเสียสภาพดั้งเดิมของของแข็งไปเมื่อเล็กลงแล้ว ถ้าแรงดันพังทลายเกิดขึ้นในลูกถ้วยที่รองรับสายส่งไฟฟ้าตามเสา ก็ต้องเปลี่ยนลูกถ้วยนั้น เนื่องจากลูกถ้วยสูญเสียสภาพไปแล้วนั่นเอง ในกรณีนี้มักเกิดขึ้นเมื่อมีฟ้าผ่าใกล้ ๆ เสาไฟฟ้า รูปที่ 5.3 (ข) คือแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำมีอะตอมยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจึงใกล้เคียงกับฉนวน ในสถานะที่ยังไม่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน อิเล็กตรอนอยู่ที่แถบวาเลนซ์ ในสถานะปกติสารกึ่งตัวนำจึงไม่นำไฟฟ้า หรือมีสภาพเป็นฉนวน ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำแคบมากประมาณ 1–3 eV⁽³⁾ การกระตุ้นด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อยจึงสามารถทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงาน

(1) อิเล็กตรอนยึดเหนี่ยวที่อยู่ใกล้ขอบบนของแถบวาเลนซ์

(2) ระดับแรงดันนี้เรียกว่าแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศ



$$^{(3)} 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ไปสู่แถบนำกระแสได้และเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำแปรตามอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูง ช่องว่างพลังงานจะแคบลง ตารางที่ 5.1 แสดงช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำบางชนิด ที่อุณหภูมิ 0 K และ 300 K

ตารางที่ 5.1 ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำบางชนิด ที่อุณหภูมิ 0 K และ 300 K

สารกึ่งตัวนำ	ช่องว่างพลังงาน (0 K) (eV)	ช่องว่างพลังงาน (300 K) (eV)
Ge	0.7437	0.6630
Si	1.1700	0.1250
GaAs	1.5190	0.4220

รูปที่ 5.3 (ค) คือแถบพลังงานของตัวนำ แถบวาเลนซ์และแถบนำกระแสเหลื่อมกัน และไม่มีช่องว่างพลังงาน ดังนั้น อิเล็กตรอนบางส่วนของแถบวาเลนซ์จึงเป็นอิเล็กตรอนในแถบนำกระแสด้วย อิเล็กตรอนกลุ่มนี้พร้อมที่จะเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย ตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ง่าย

5.2 วัสดุสารกึ่งตัวนำ (semiconductor device)

สารกึ่งตัวนำเป็นสิ่งประดิษฐ์สถานะของแข็ง (solid state device) ทำขึ้นจากสารที่เป็นเฟสของแข็ง ปัจจุบัน สารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พลังงานน้อย มีประสิทธิภาพสูง และเป็นที่ยอมรับใช้อย่างกว้างขวาง สารกึ่งตัวนำมีหลายประเภท แต่ละประเภทก่อให้เกิดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม สารกึ่งตัวนำแต่ละประเภทก็มีหลักการทำงานคล้ายกัน หลักการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ คือ การทำให้เกิดพาหะทางไฟฟ้า 2 ชนิด คือ โฮล (hole) และ อิเล็กตรอน (electron) เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในผลึกของสารกึ่งตัวนำ ตำราเล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำและการประยุกต์ใช้บางประการเท่านั้น

5.2.1 ประเภทของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

- สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว (element semiconductor)
- สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบ (compound semiconductor)
- สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยด์ (alloy semiconductor)



5.2.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว

สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวคือสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในธาตุหมู่ 4 เช่น คาร์บอน (C) , ซิลิกอน (Si) , เยอรมันเนียม (Ge) , ดีบุก (Sn) , ตะกั่ว (Pb) เป็นต้น ธาตุเหล่านี้มีอิเล็กตรอนในวงโคจรวาเลนซ์เท่ากันจำนวน 4 อิเล็กตรอน ดังนั้น สารกึ่งตัวนำจะเสถียรภาพก็ต่อเมื่อมีอิเล็กตรอนอีก 4 ตัวเข้ามาอยู่ในวงโคจรดังกล่าวนี้ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบันคือซิลิกอน เนื่องจากได้หาง่ายเพราะเป็นส่วนหนึ่งของทรายที่มีอยู่ทั่วไป สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวเป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างวงจรรวม

5.2.1.2 สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบ

สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบเกิดจากสารประกอบของ 2 ธาตุ สารกึ่งตัวนำประเภทนี้มีคุณสมบัติพิเศษในการดูดกลืนหรือปลดปล่อยแสง จึงนิยมสร้างเป็น “อุปกรณ์แสง” (opto – devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode ; LED) หรือ ไดโอดเลเซอร์ (laser diode) เป็นต้น กลุ่มย่อยของสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบมีดังนี้

- สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบกลุ่ม 2 – 6 เป็นธาตุประกอบที่เกิดจากธาตุหมู่ 2 และ 6 เช่น แคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride ; CdTe) ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) เป็นต้น
- สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบกลุ่ม 3 – 5 เป็นธาตุประกอบที่เกิดจากธาตุหมู่ 3 และ 5 เช่น อะลูมิเนียมอาเซไนด์ (aluminium arsenide ; AlAs) แกลเลียมไนไตรด์ (gallium nitride) เป็นต้น
- สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบกลุ่ม 4 – 4 เป็นธาตุประกอบที่เกิดจาก 2 ธาตุในหมู่ 4 เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide ; SiC) เป็นต้น
- สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบกลุ่ม 4 – 6 เป็นธาตุประกอบที่เกิดจาก 4 ธาตุหมู่ 4 และ 6 เช่น ลีดซีลีไนด์ (Lead selenide ; PbSe) ลีดเทลลูไรด์ (lead telluride ; PbTe) เป็นต้น

5.2.1.3 สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยด์

สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยด์เกิดจากอัลลอยด์ของธาตุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่น อัลลอยด์ของอะลูมิเนียม แกลเลียม สารหนู และ พลวง เป็น $Al_aGa_{1-a}As_bSb_{1-b}$ โดย a และ b มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 เช่น $Al_{0.4}Ga_{0.6}As_{0.3}Sb_{0.7}$ หมายความว่า อัลลอยด์นี้ประกอบด้วยอะลูมิเนียม 4 อะตอม แกลเลียม 6 อะตอม สารหนู 3 อะตอม และ พลวง 7 อะตอม สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยด์อื่น เช่น $Si_{1-a}Ge_a$, $GaAs_{1-a}P_a$, $GaIn_{1-a}As$, $Al_aGa_{1-a}As$, $GaIn_{1-a}As_{1-b}P_b$ เป็นต้น

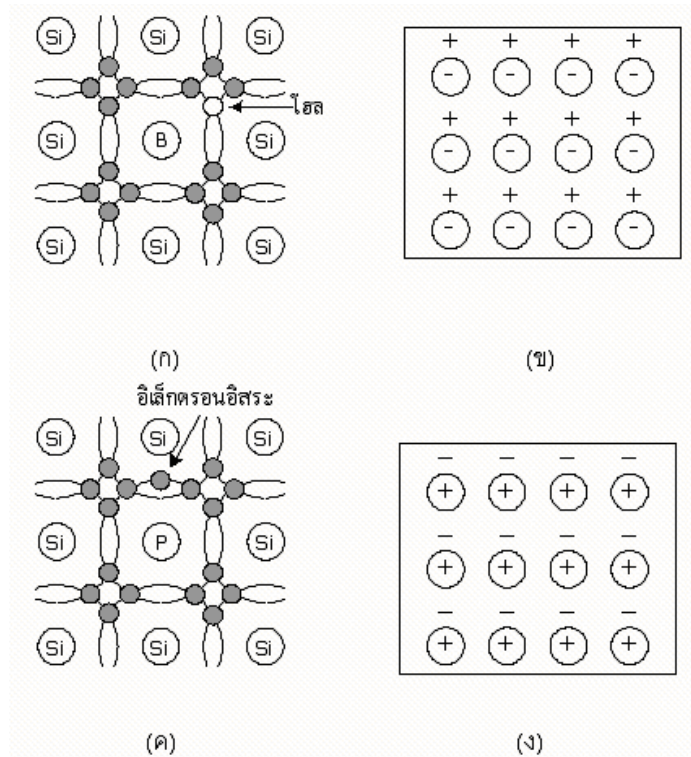


5.3 การสร้างพาหะบนสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ซิลิกอน (silicon; Si) หรือเจอร์มันเนียม (germanium; Ge) มีอิเล็กตรอนในวงโคจรสุดท้ายเท่ากับ 4 จับตัวกันเป็นผลึกโดยใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำมาเจือปนกับโลหะ เช่น โบรอน (boron; B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนในวงโคจรสุดท้ายเท่ากับ 3 ส่งผลให้อิเล็กตรอนในบางวงโคจรมีไม่ครบ 8 ตัว ตำแหน่งที่อิเล็กตรอนหายไปเรียกว่า “โฮล” (hole) มีลักษณะเป็นประจุบวกเสมือน สารผสมนี้มีชื่อเรียกเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P ดังรูปที่ 5.5 (ก) ภาพเสมือนของสารกึ่งตัวนำชนิด P เป็นดังรูปที่ 5.5 (ข) เครื่องหมาย + หมายถึง โฮล วงกลมที่มีเครื่องหมายลบอยู่ภายในคืออะตอมที่มีโฮลอยู่โดยรอบ ถ้าโฮลสูญหายไป อะตอมจะมีศักย์เป็นลบ

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำมาเจือปนกับอโลหะ เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) ซึ่งมีอิเล็กตรอนในวงโคจรสุดท้ายเท่ากับ 5 เนื่องจากมีอิเล็กตรอนมากกว่าที่จะจับคู่ในวงโคจรสุดท้าย ส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนอิสระมีประจุไฟฟ้าลบ สารผสมนี้มีชื่อเรียกเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N ดังรูปที่ 5.5 (ค) ภาพเสมือนของสารกึ่งตัวนำชนิด N เป็นดังรูปที่ 5.5 (ง) เครื่องหมาย - หมายถึง อิเล็กตรอนอิสระ วงกลมที่มีเครื่องหมายบวกอยู่ภายในคืออะตอมที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่โดยรอบ ถ้าอิเล็กตรอนอิสระสูญหายไป อะตอมจะมีศักย์เป็นบวก



รูปที่ 5.5 (ก) สารกึ่งตัวนำชนิด P

(ข) ภาพเสมือนสารกึ่งตัวนำชนิด P

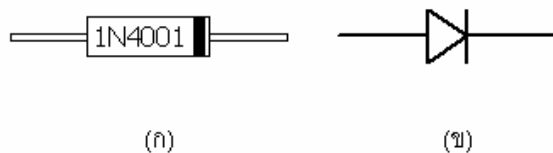
(ค) สารกึ่งตัวนำชนิด N

(ง) ภาพเสมือนสารกึ่งตัวนำชนิด N



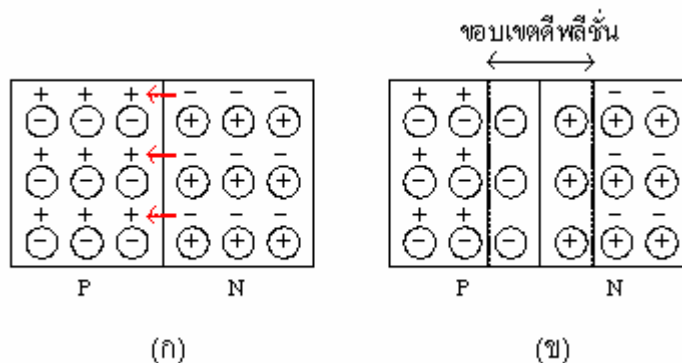
5.4 ไดโอดแบบรอยต่อ P – N (P – N junction diode)

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีรูปร่างดังรูปที่ 5.6 (ก) เบอร์ของไดโอดพิมพ์ที่ด้านข้าง ด้านพิมพ์สีคือด้านที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N สัญลักษณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ดังรูปที่ 5.6 (ข)



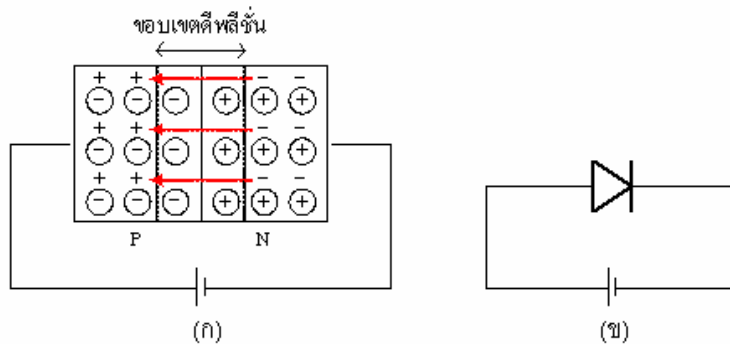
รูปที่ 5.6 (ก) ภาพจริงของไดโอด (ข) สัญลักษณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของไดโอด

ไดโอดแบบรอยต่อ P – N สร้างจากการนำเอาสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N มาประกบกัน โสลและอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อจะรวมตัวกันเป็นชั้นฟิล์มที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เรียกว่า “ขอบเขตดีพลีชัน” (depletion region) ดังรูปที่ 5.7 ขอบเขตดีพลีชันมีความต่างศักย์มากพอที่จะกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลทั้งสองด้านไหลเข้ารวมกัน ที่อุณหภูมิ 25 °C ไดโอดชนิดเยอรมันเนียมมีความต่างศักย์ที่รอยต่อ 0.2 โวลต์ ในขณะที่ ไดโอดชนิดซิลิกอนมีความต่างศักย์ที่รอยต่อ 0.7 โวลต์ ไดโอดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า 2 ประการคือ ไบอัสตรง (forward bias) และ ไบอัสกลับ (reverse bias)



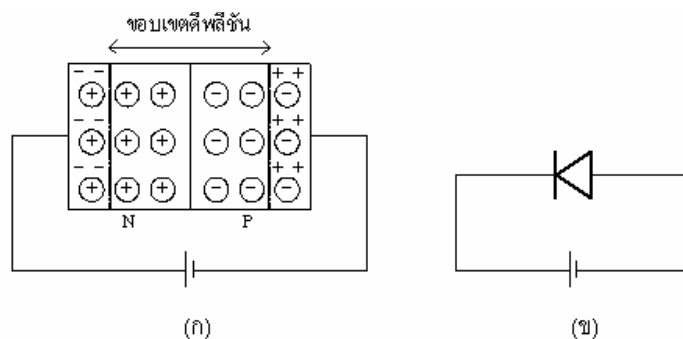
รูปที่ 5.7 (ก) อิเล็กตรอนไหลข้ามรอยต่อ (ข) เกิดขอบเขตดีพลีชันที่รอยต่อ

5.4.1. **ไบอัสตรง** ต่อขั้วบวกและลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้ว P และ N ของไดโอดตามลำดับ ดังรูปที่ 5.8 ผลก็คือ อิเล็กตรอนอิสระทางด้าน N ถูกขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าผลักข้ามรอยต่อดีพลีชันไปยังขั้ว P ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า กราฟแรงดัน – กระแสของการไบอัสตรงเป็นรูปพาราโบลา ดังรูปที่ 5.10 จุดเปลี่ยนโค้งของพาราโบลา (knee point) ตรงกับแรงดันที่รอยต่อพอดี ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ไดโอดจะไหม้เพราะทนอัตรากำลังไม่ไหว จุดนี้เรียกว่า burnout ไดโอดจะเสียหาย

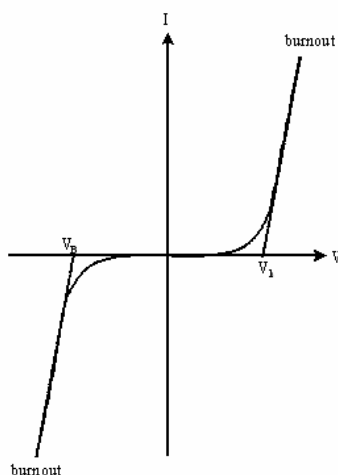


รูปที่ 5.8 (ก) ภาพเสมือนของการไบอัสตรง (ข) การต่อวงจรไบอัสตรง

5.4.2. ไบอัสกลับ ต่อขั้วบวกและลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้ว N และ P ของไดโอดตามลำดับ ดังรูปที่ 5.9 ผลก็คือ อิเล็กตรอนอิสระทางด้าน N ถูกขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าดึงดูด ในขณะที่ขั้ว P ก็ถูกขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันดึงดูด ดังนั้นขอบเขตดีพลีชันจึงกว้างมากขึ้น กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดได้น้อยมาก ถ้าเพิ่มแรงดันไปเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่งกระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลอย่างทันทีทันใด จุดนี้เรียกว่า breakdown voltage ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปอีกจนถึงจุดหนึ่ง ไดโอดจะไหม้เพราะทนอัตรากำลังไม่ไหว จุดนี้เรียกว่า burnout ไดโอดจะเสียหาย



รูปที่ 5.9 (ก) ภาพเสมือนของการไบอัสกลับ (ข) การต่อวงจรไบอัสกลับ



รูปที่ 5.10 กราฟแรงดัน – กระแสของไดโอด

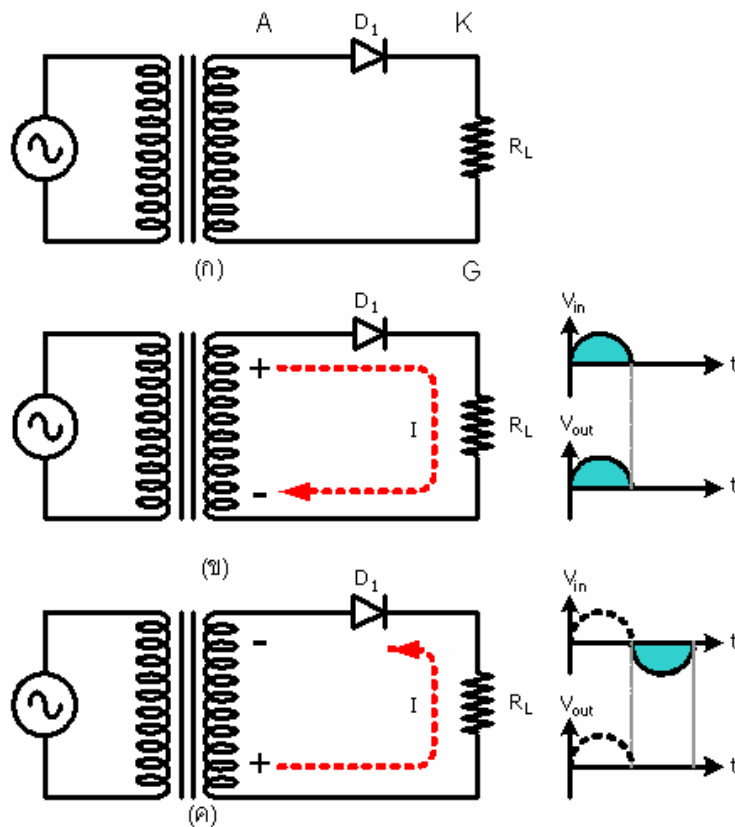


5.5 วงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (rectifier circuit)

วงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีอีกชื่อหนึ่ง คือ “วงจรเรียงกระแส” วงจรเรียงกระแสมี 3 ประเภท คือ

- วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half – wave rectifier)
- วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full – wave rectifier)
- วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (bridge rectifier)

5.5.1. วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น คือวงจรดังรูปที่ 5.11 (ก) พิจารณารูปที่ 5.11 (ข) ถ้าอินพุต เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก กระแสไหลจากขั้ว + ผ่านไดโอดแบบไบอัสตรงไปถึงขั้วลบ ดังนั้นสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ พิจารณารูปที่ 5.11 (ค) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ กระแสไหลจากขั้ว + ผ่านไดโอดแบบไบอัสกลับ ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลไปถึงขั้วลบ ดังนั้นจึงไม่สามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นมีแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 0.47 เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



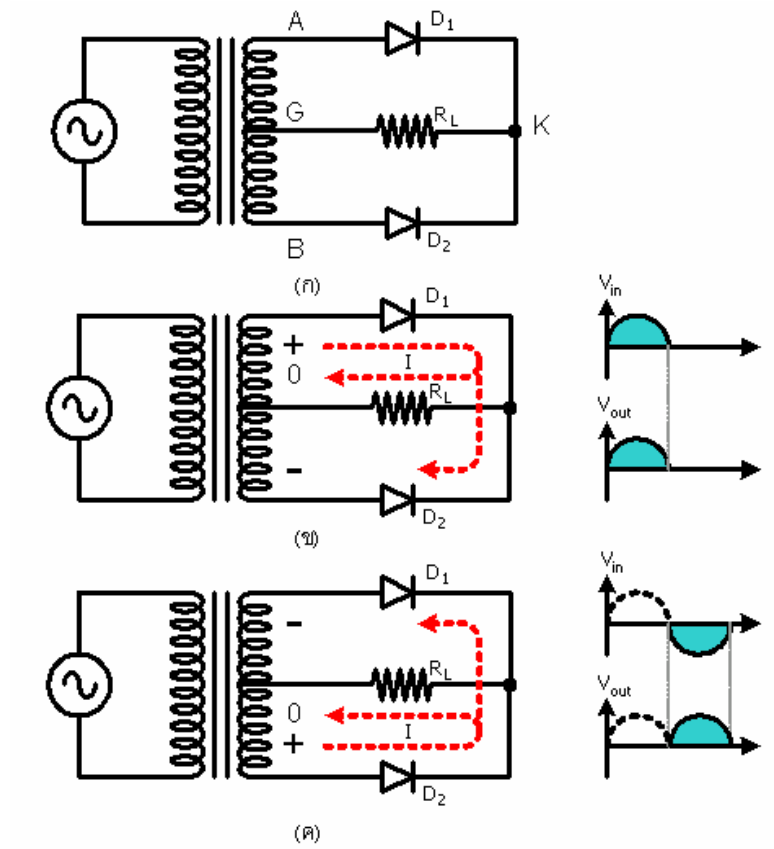
รูปที่ 5.11 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

(ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก

(ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ



5.5.2. วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น คือวงจรดังรูปที่ 5.12 (ก) พิจารณารูปที่ 5.12 (ข) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก กระแสไหลจากขั้ว + ผ่านไดโอด D_1 แบบไบอัสตรงไปถึงกราวด์ ขณะที่กระแสไม่สามารถผ่านไดโอด D_2 ได้ เนื่องจากเป็นไบอัสกลับ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ ด้านขวาของ R_L เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย พิจารณารูปที่ 5.12 (ค) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ กระแสไหลจากขั้ว + ผ่านไดโอด D_2 แบบไบอัสตรงไปถึงกราวด์ ขณะที่กระแสไม่สามารถผ่านไดโอด D_1 ได้ เนื่องจากเป็นไบอัสกลับ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ ด้านขวาของ R_L เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้ายเช่นเดียวกัน ไม่ว่าขั้วของไฟฟ้ากระแสสลับจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม ทางด้านขวาของตัวต้านทาน R_L เป็นบวกเสมอเมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก R_L จึงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นมีแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 0.25 เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



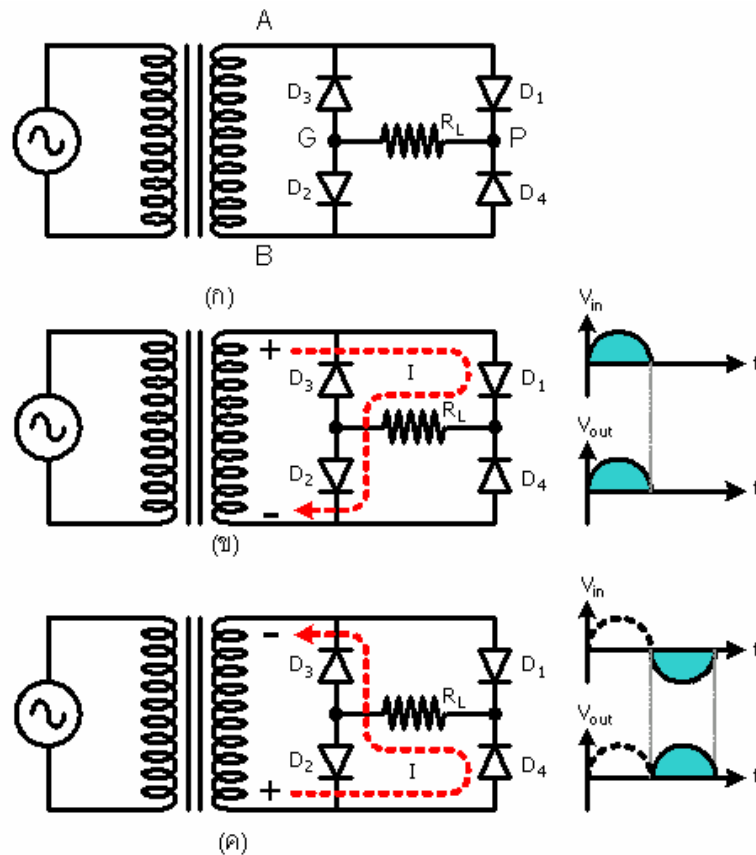
รูปที่ 5.12 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

(ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก

(ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ



5.5.3. วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ คือวงจรดังรูปที่ 5.13 (ก) พิจารณารูปที่ 5.13 (ข) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก กระแสไหลจากขั้ว + ไปยังตรงผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ไปยังขั้วลบ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ ด้านขวาของ R_L เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย พิจารณารูปที่ 5.13 (ค) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ กระแสไหลจากขั้ว + ไปยังตรงผ่านไดโอด D_4 และ D_3 ไปยังขั้วลบ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ ด้านขวาของ R_L เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้ายเช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าขั้วของไฟฟ้ากระแสสลับจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม ทางด้านขวาของตัวต้านทาน R_L เป็นบวกเสมอเมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก R_L จึงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์มีแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 0.43 เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 5.13 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

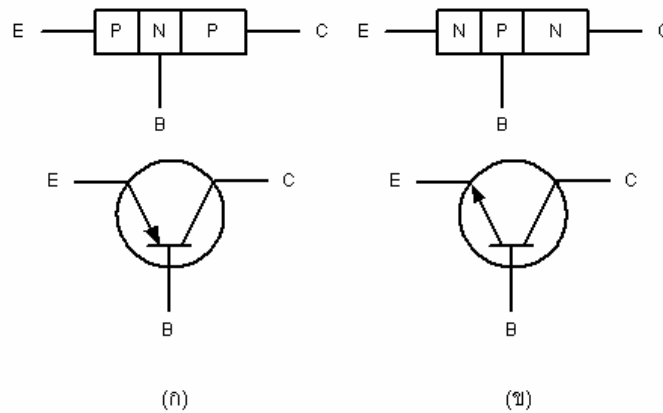
(ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก

(ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ



5.6 ทรานซิสเตอร์ (transistor)

ทรานซิสเตอร์เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้นมาประกบกัน ส่วนประกบด้านนอกทั้ง 2 ด้านทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน เรียกว่า “อิมิตเตอร์” (emitter ; E) และ “คอลเล็กเตอร์” (Collector ; C) ส่วนกลางทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม เรียกว่า “เบส” (base ; B) การประกบกันของสารกึ่งตัวนำทำได้โดยการโด๊ป (dope) สารกึ่งตัวนำที่ขา E มีความหนาของการโด๊ปน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำที่ขา C ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้น คุณสมบัติทางไฟฟ้าของขา E และ C จึงไม่เท่ากัน ทรานซิสเตอร์มี 2 ชนิด ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 (ก) ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP (ข) ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

5.6.1 การต่อวงจรทรานซิสเตอร์

การต่อวงจรทรานซิสเตอร์ทำได้ 3 แบบ คือ

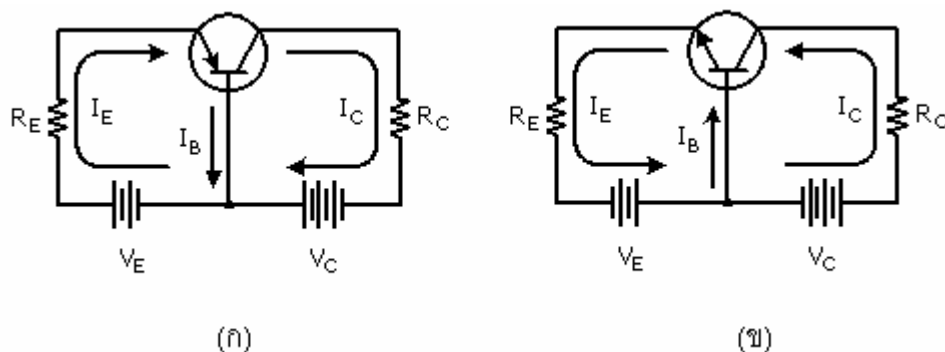
- วงจรเบสร่วม (common base circuit)
- วงจรคอลเล็กเตอร์ร่วม (common collector circuit)
- วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter circuit)

5.6.1.1 วงจรเบสร่วม

รูปที่ 5.15 เป็นการต่อวงจรทรานซิสเตอร์แบบเบสร่วม พิจารณารูปที่ 5.15 (ก) เป็นทรานซิสเตอร์ชนิด PNP แรงดัน V_E ไบอัสตรงระหว่างขา E และ B อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่ขา B วิ่งข้ามรอยต่อ P - N ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด P ที่ขา E ในทางกลับกัน โฮลจากสารกึ่งตัวนำชนิด P ที่ขา E วิ่งข้ามรอยต่อ P - N ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่ขา B เกิดกระแสอิมิตเตอร์ I_E ในขณะเดียวกัน แรงดัน V_C ซึ่งสูงกว่าแรงดัน V_E ไบอัสกลับระหว่างขา B และขา C ดังนั้น จึงมีโฮลบางส่วนถูกผลักดันให้ข้ามรอยต่อ P - N ไปยังขาคอลเล็กเตอร์ เกิดเป็นกระแสคอลเล็กเตอร์ I_C โดย



$$I_E - I_C = I_B \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.15 (ก) ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ต่อเป็นวงจรเบสร่วม

(ข) ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ต่อเป็นวงจรเบสร่วม

ทรานซิสเตอร์ที่มีคุณภาพสูงจะมีกระแส I_B น้อยมาก อัตราขยายกระแสของวงจรทรานซิสเตอร์

แบบเบสร่วมคือ

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (5.2)$$

แทน $I_C = I_E - I_B$ จากสามกที่ 5.1 ลงในสมการที่ 5.2 เป็น

$$\alpha = \frac{I_E - I_B}{I_E} = 1 - \frac{I_B}{I_E} \quad (5.3)$$

เนื่องจากกระแส I_B มีค่าน้อยมาก ดังนั้น α จึงมีค่าเกือบเท่ากับ 1 ในทางปฏิบัติ α มีค่าระหว่าง 0.9 ถึง 1 ทรานซิสเตอร์ที่มี α ใกล้เคียง 1 เป็นทรานซิสเตอร์ที่มีคุณภาพสูง อัตราขยายแรงดันแบบเบสร่วมคือ

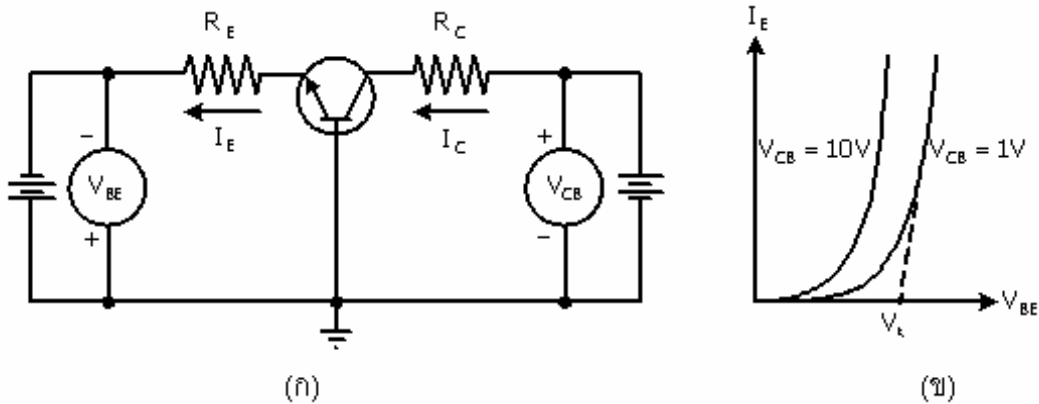
$$A_V = \frac{I_C R_C}{I_E R_E} = \alpha \frac{R_C}{R_E} \quad (5.4)$$

พิจารณารูปที่ 5.15 (ข) เป็นทรานซิสเตอร์ชนิด NPN แรงดัน V_E ไบอัสตรงระหว่างขา B และ E อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่ขา E วิ่งข้ามรอยต่อ P - N ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด P ที่ขา B ในทางกลับกัน โฮลจากสารกึ่งตัวนำชนิด P ที่ขา B วิ่งข้ามรอยต่อ P - N ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่ขา E เกิดกระแสอิมิตเตอร์ I_E ในขณะเดียวกัน แรงดัน V_C ซึ่งสูงกว่าแรงดัน V_E ไบอัสกลับระหว่างขา C และขา B ดังนั้น จึงมีโฮลบางส่วนถูกผลักดันให้ข้ามรอยต่อ P - N ไปยังขาคอลเล็กเตอร์ เกิดเป็น



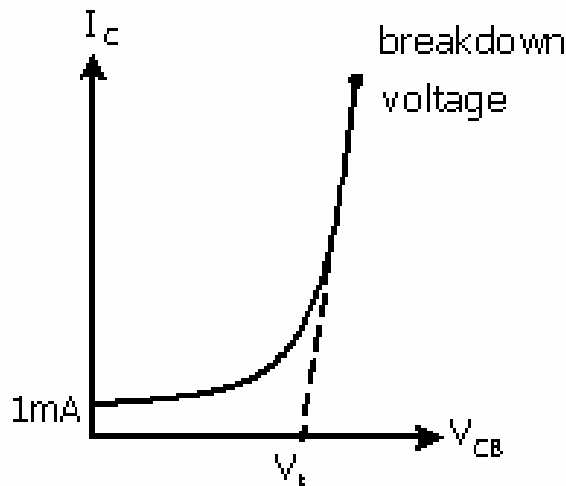
กระแสคอลเล็กเตอร์ I_C จะเห็นได้ว่าวงจรทรานซิสเตอร์แบบเบสร่วมที่ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และ NPN มีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน แต่ใช้แรงดันลึ่วงจรกลับขั้วซึ่งกันและกัน ดังนั้น สมการที่ 5.1 ถึง 5.4 สามารถใช้ได้กับวงจรทรานซิสเตอร์แบบเบสร่วมชนิด NPN เช่นเดียวกัน

ในการทดลองประกอบวงจรดังรูปที่ 5.16 (ก) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.16 (ข) เริ่มแรกกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) น้อยมาก จนกระทั่งถึงจุด knee (V_k) กราฟชันมากเช่นเดียวกับกราฟที่ได้จากไดโอด V_k เท่ากับ 0.2 โวลต์เมื่อทรานซิสเตอร์สร้างจากเจอร์มันเนียม และเท่ากับ 0.7 โวลต์ เมื่อทรานซิสเตอร์สร้างขึ้นจากซิลิกอน สำหรับวงจรเบสร่วมกระแสคอลเล็กเตอร์เกือบเท่ากับกระแสอิมิตเตอร์ ดังรูปที่ 5.17 ถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จนถึงขอบเขตพังทลาย (breakdown region) กระแส I_C จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนทรานซิสเตอร์เสียหาย ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ที่จุดต่ำกว่าขอบเขตพังทลาย



รูปที่ 5.16 (ก) วงจรเบสร่วม

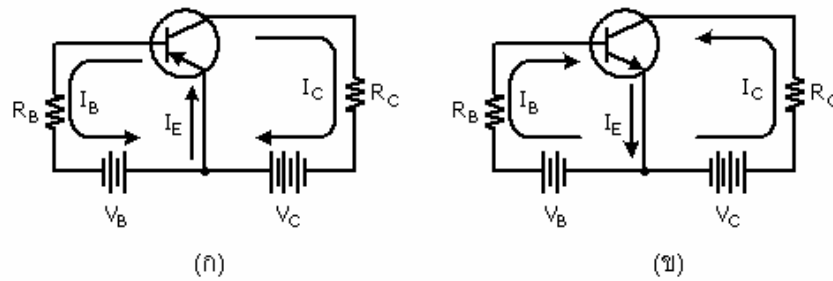
(ข) กราฟระหว่าง I_E และ V_{BE}



รูปที่ 5.17 กราฟระหว่าง I_C และ V_{CB}



5.6.1.2 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม



รูปที่ 5.18 (ก) ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ต่อเป็นวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

(ข) ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ต่อเป็นวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

รูปที่ 5.18 เป็นการต่อวงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม พิจารณารูปที่ 5.18 (ก) เป็นการต่อ วงจรด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด PNP แรงดัน V_B ไปอัสตรงระหว่างขา E และ B เกิดกระแส I_E ที่ขาอิมิตเตอร์ ขณะเดียวกัน แรงดัน V_C ซึ่งสูงกว่าแรงดัน V_B ไปอัสกลับระหว่างขา B และขา C ดังนั้น จึงมีโฮลบางส่วนถูกผลักดันให้ข้ามรอยต่อ P - N ไปยังขาคลอเล็กเตอร์ เกิดเป็นกระแสคลอเล็กเตอร์ I_C จะเห็นได้ว่า I_C และ I_B ผลักดันให้ I_E มีค่าสูง และเนื่องจาก V_C ซึ่งสูงกว่าแรงดัน V_B ดังนั้น I_B จึงมีค่าต่ำมาก ความสัมพันธ์ของกระแสคือ

$$I_E - I_C = I_B \quad (5.5)$$

สมการที่ 5.5 เป็นเช่นเดียวกับสมการที่ 5.1 และสมการนี้จะเป็นจริงในการต่อวงจรแบบคลอเล็กเตอร์ร่วมด้วยเช่นเดียวกัน อัตราขยายกระแสของวงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมคือ

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (5.6)$$

แทน $I_B = I_E - I_C$ จากสมการที่ 5.5 ลงในสมการที่ 5.6 เป็น

$$\beta = \frac{I_C}{I_E - I_C} \quad (5.7)$$

กลับเศษส่วนของสมการที่ 5.7 เป็น

$$\frac{1}{\beta} = \frac{I_E - I_C}{I_C} = \frac{I_E}{I_C} - 1 = \frac{1}{\alpha} - 1 = \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$

ดังนั้น

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (5.8)$$



เนื่องจาก α มีค่าระหว่าง 0.9 ถึง 1.0 ดังนั้น $1 - \alpha$ ในสมการที่ 5.8 จึงมีค่าน้อยมาก β จึงมีค่าสูงมาก ทรานซิสเตอร์ที่มีขายในท้องตลาดมีค่าอัตราขยายกระแส β ประมาณ 20 - 200 เท่า อัตราขยายแรงดันแบบอิมิตเตอร์ร่วม คือ

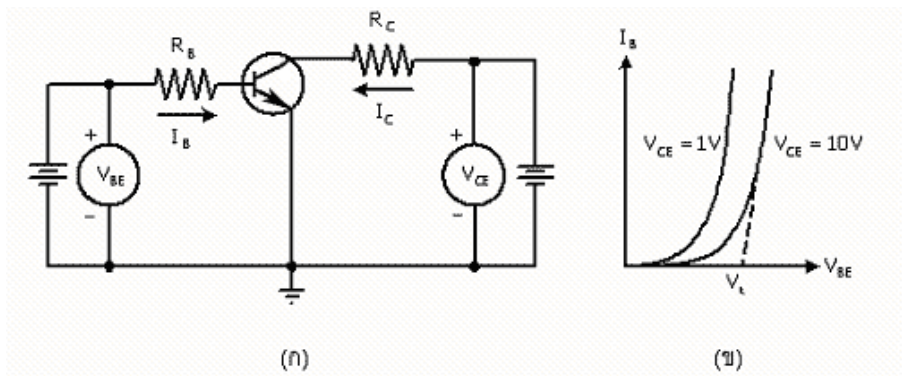
$$A_v = \frac{I_C R_C}{I_B R_B} = \beta \frac{R_C}{R_B} \quad (5.9)$$

สมการที่ 5.8 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (5.10)$$

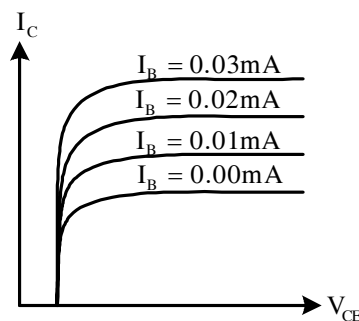
รูปที่ 5.18 (ข) เป็นการต่อวงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับวงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมที่ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP แต่ใช้แรงดันเลี้ยงวงจรกลับขั้วซึ่งกันและกัน ดังนั้น สมการที่ 5.5 ถึง 5.9 สามารถใช้ได้กับวงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมชนิด NPN เช่นเดียวกัน

เมื่อทำการทดลองโดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.19 (ก) จากพาหะของอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเล็กเตอร์จนเกือบหมด มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ไปยังเบส ถ้ากระแสที่เบสเปลี่ยนแปลง กระแสที่คอลเล็กเตอร์ก็เปลี่ยนไปด้วย ดังรูปที่ 5.19 (ข) เมื่อ I_B เป็น 0 กระแสคอลเล็กเตอร์ยังคงไหลอยู่เนื่องจากกระแสเวิร์สของคอลเล็กเตอร์ไดโอด ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.19 (ก) วงจรอิมิตเตอร์ร่วม

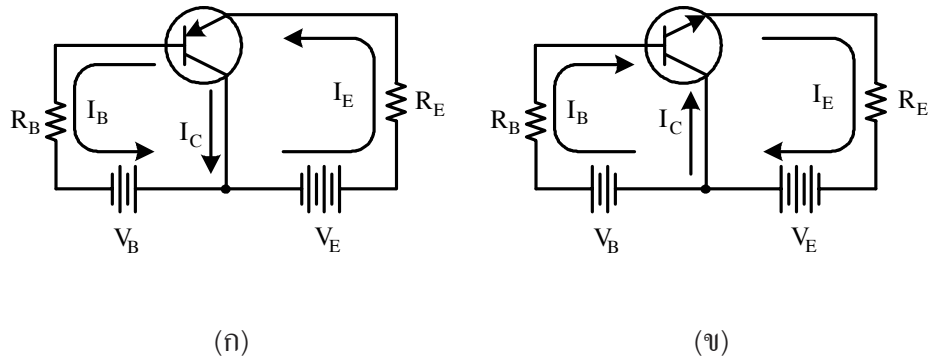
(ข) กราฟระหว่าง I_B และ V_{BE}



รูปที่ 5.20 กราฟระหว่าง I_C และ V_{CE}



5.6.1.3 วงจรคลอเล็กเตอร์ร่วม



รูปที่ 5.21 (ก) ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ต่อเป็นวงจรคลอเล็กเตอร์ร่วม

(ข) ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ต่อเป็นวงจรคลอเล็กเตอร์ร่วม

รูปที่ 5.21 เป็นการต่อวงจรวงจรทรานซิสเตอร์แบบคลอเล็กเตอร์ร่วม อัตราขยายกระแสของวงจรทรานซิสเตอร์แบบคลอเล็กเตอร์ร่วมคือ

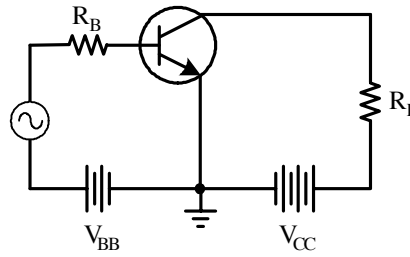
$$\gamma = \frac{I_E}{I_B} \quad (5.11)$$

โดย
$$\gamma = 1 + \beta = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (5.12)$$

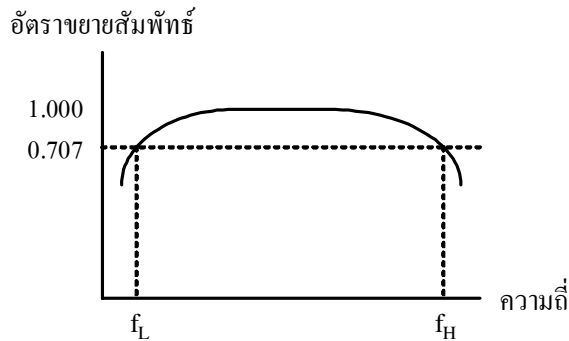
อัตราขยายแรงดันแบบคลอเล็กเตอร์ร่วม คือ

$$A_V = \frac{I_E R_E}{I_B R_B} = (1 + \beta) \frac{R_E}{R_B} \quad (5.13)$$

วงจรทรานซิสเตอร์แบบคลอเล็กเตอร์ร่วมไม่เป็นที่นิยมในการใช้งาน การต่อวงจรทรานซิสเตอร์มักนิยมใช้วงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม หรือวงจรทรานซิสเตอร์แบบเบสร่วม พิจารณาจากรูปที่ 5.15 , 5.18 และ 5.21 ในรูปที่ 5.15 I_E และ I_C มีการวนลูปในทิศเดียวกัน รูปที่ 5.18 I_B และ I_C มีการวนลูปสวนทิศกัน และ รูปที่ 5.21 I_E และ I_B มีการวนลูปในทิศเดียวกัน ดังนั้น การใช้วงจรทรานซิสเตอร์เป็นวงจรรายแรงดัน วงจรทรานซิสเตอร์แบบเบสร่วมและวงจรทรานซิสเตอร์แบบคลอเล็กเตอร์ร่วมจึงมีเฟสของเอาต์พุตเช่นเดียวกับเฟสของอินพุต ในขณะที่วงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมมีเฟสของเอาต์พุตตรงข้ามกับเฟสของอินพุต ตัวอย่างการนำวงจรทรานซิสเตอร์ไปใช้เป็นวงจรรายแรงดันเป็นดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 วงจรขยายแรงดันแบบอิมิตเตอร์ร่วม



รูปที่ 5.23 ความถี่ตอบสนองของวงจรขยายแรงดัน

วงจรถ่ายไม่สามารถขยายสัญญาณเกินกว่าความถี่สูงสุด ความถี่ในช่วงกลางสามารถขยายได้สูง ในขณะที่ความถี่ต่ำและความถี่สูงมีอัตราขยายลดลง ถ้าอัตราขยายสัมพัทธ์คืออัตราส่วนของอัตราขยายที่ย่านความถี่ใด ๆ ต่ออัตราขยายที่ย่านความถี่กลาง อัตราขยายสัมพัทธ์ที่ย่านความถี่กลางจึงเป็น 1 เสมอ หรือเท่ากับ 0 เดซิเบล (0dB) มีนิยามเป็น

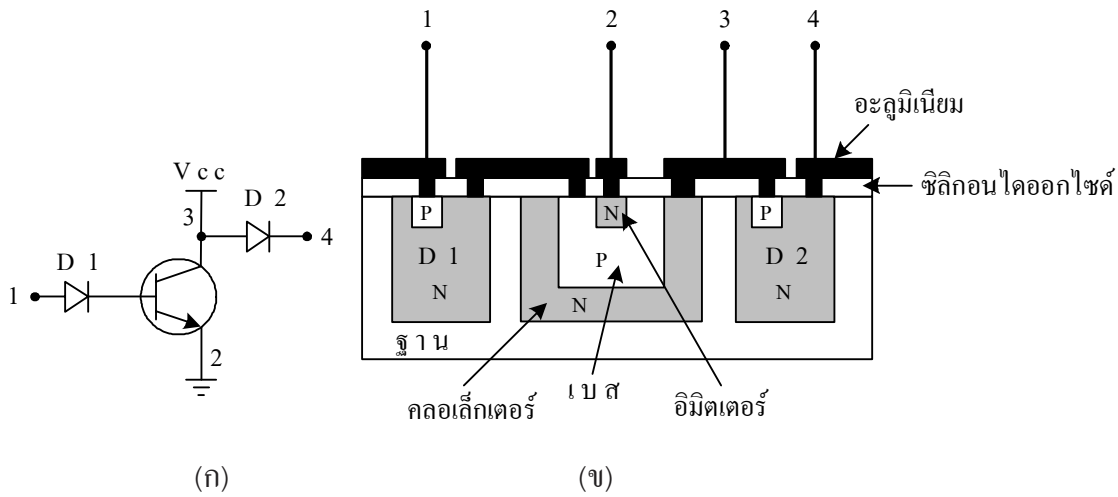
$$\text{dB} = 20 \log \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = 10 \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (5.14)$$

ที่ 0 dB การขยายสัญญาณที่เอาต์พุตไม่ผิดเพี้ยนไปจากอินพุต ถ้า dB เป็น + แสดงว่าสัญญาณที่เอาต์พุตเพิ่มขึ้นจากอินพุต ค่าความถี่ตอบสนองด้านต่ำ (f_L) และค่าความถี่ตอบสนองด้านสูง (f_H) อยู่ที่อัตราขยายสัมพัทธ์ 0.707 หรือ -3 dB ช่วงกว้างระหว่าง f_L และ f_H เรียกว่าแบนวิดท์ของการขยาย (band width of amplifier) เครื่องขยายเสียงที่ดีต้องมี $f_L = 20 \text{ Hz}$ และ $f_H = 20 \text{ kHz}$ จึงสามารถครอบคลุมย่านความถี่ที่หูมนุษย์สามารถรับฟังได้

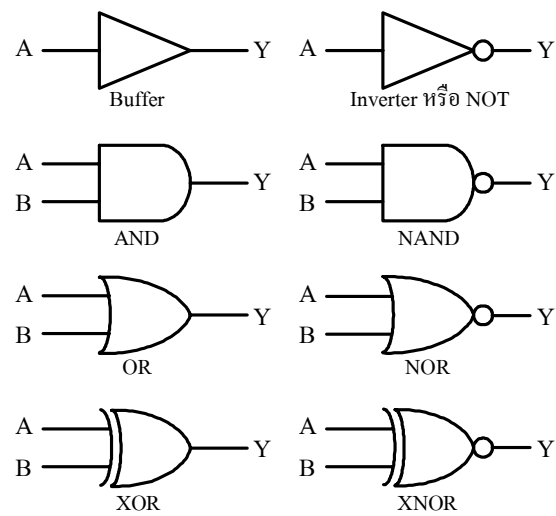


5.7 วงจรรวมเบื้องต้น

วงจรรวมหรือไอซี (IC) สร้างขึ้นจากผลึกเดี่ยวของซิลิกอน และจัดรูปให้เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์ หลาย ๆ ตัว ส่วนดีของวงจรรวมก็คือนีมีขนาดเล็ก กินกระแสต่ำ และมีความน่าเชื่อถือสูง สมมติว่าต้องการสร้าง IC เป็นวงจรรวมอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 5.24 (ก) สามารถแพร่ส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.24 (ข) ปกติแล้วไอซีอินเวอร์เตอร์ เช่น 74LS04 มีอินเวอร์เตอร์อยู่ 6 ชุดในตัวถึงเดียวกัน รูปที่ 5.24 ยกตัวอย่างอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียวเท่านั้น



รูปที่ 5.24 (ก) วงจรรวมอินเวอร์เตอร์
(ข) การแพร่สารกึ่งตัวนำภายในตัวถังไอซี



รูปที่ 5.25 สัญลักษณ์ของเกตพื้นฐาน



B	Y=Buffer B
0	0
1	1

B	Y=NOT B
0	1
1	0

A	B	Y=A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

A	B	Y=A NAND B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	Y=A OR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

A	B	Y=A NOR B
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

A	B	Y=A XOR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	Y=A XNOR B
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

รูปที่ 5.26 สถานะลอจิกของแต่ละเกต

ไอซีแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ TTL และ CMOS โดย TTL เป็นไอซีชนิดทรานซิสเตอร์ รูปที่ 5.24 คือไอซีชนิดนี้ ส่วน CMOS เป็นไอซีชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า TTL มีข้อดีคือสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง แต่จะกินกระแสมาก และทำงานได้ที่แรงดัน 5 V เท่านั้น ปกติ TTL สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงสุดประมาณ 42 MHz ไอซี CMOS กินกระแสต่ำ และมีช่วงแรงดันใช้งานกว้างตั้งแต่ 3 V ถึง 15 V แต่ทำงานได้ที่ความถี่สูงไม่สูงนัก ปกติ CMOS สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงสุดประมาณ 30 MHz เกตพื้นฐานของไอซีมีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 5.25 ถ้ากำหนดให้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์คือลอจิก 1 และแรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์คือลอจิก 0 เมื่อกำหนดให้ A และ B คืออินพุต และ Y คือเอาต์พุต สถานะลอจิกของแต่ละเกตเป็นดังรูปที่ 5.26 รูปที่ 2.25 สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ทางพีชคณิตดังนี้

$Y = \text{Buffer } B$	สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ	$Y = B$
$Y = \text{NOT } B$	สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ	$Y = \bar{B}$
$Y = A \text{ AND } B$	สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ	$Y = A \bullet B$



$Y = A \text{ NAND } B$	สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ	$Y = \overline{A \bullet B}$
$Y = A \text{ OR } B$	สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ	$Y = A + B$
$Y = A \text{ NOR } B$	สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ	$Y = \overline{A + B}$
$Y = A \text{ XOR } B$	สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ	$Y = A \oplus B$
$Y = A \text{ XNOR } B$	สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ	$Y = \overline{A \oplus B}$

แบบฝึกหัดหน่วยที่ 5

อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น

- 5.1 จงเขียนวงจรไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด PNP แบบอิมิตเตอร์ร่วม
- 5.2 จงเขียนวงจรไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN แบบอิมิตเตอร์ร่วม
- 5.3 จงอธิบายความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Output และ Input ของการขยายสัญญาณชนิดเบสร่วม
- 5.4 วงจรขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ ชนิดที่ให้ Power gain สูงสุด เป็นเช่นนั้นเพราะอะไร
- 5.5 วงจรเรกติไฟเออร์ต่าง ๆ ใช้กับหม้อแปลงไฟที่มีขดลวดทุติยภูมิ มีปุ่ม 100-0-100 (มีปุ่มกลาง แบ่งไฟออกเป็น 2 ส่วน ส่วนละ 100 V_{rms}) สมมติไม่มี load rectifier หม้อแปลงเป็นแบบอุดมคติ จงบอกค่าความต่างศักย์เอาต์พุตสูงสุด (Maximum output voltage) ของเรกติไฟเออร์ต่อไปนี้ที่มีตัวเก็บประจุเป็นตัวกรอง
 - ก. ครึ่งคลื่น
 - ข. เต็มคลื่น
 - ค. เต็มคลื่นแบบบริดจ์
- 5.6 วงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่นดังรูป จงหาค่า Peak voltage, Peak forward current rating, และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า (rectification efficiency) ถ้ากำหนด R = 10 โอห์ม

