$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-\mu R_L}{r_P + R_L} \qquad (16.104)$$

เครื่องหมายลบในสมการ (16.104) แสดงว่า ศักย์ไฟฟ้าออกมีเฟสต่างจากศักย์ไฟฟ้าเข้า 180 องศา การหาเกนศักย์ไฟฟ้าโดยวิธีนี้จะต้องรู้ค่า μ r_P ที่ริเวณจุดทำงานก่อนอาจหาได้จากกราฟลักษณะเฉพาะของหลอดไทรโอดหรือจากคู่มือของหลอดไทรโอด

ตัวอย่าง 16.16

จากวงจรรูป 16.51 เมื่อใช้หลอดไทรโอดที่มีค่า $\mu = 25$ $r_P = 10\text{k}\Omega$ $g_m = 2.5 \times 10^{-3}$ $R_G = 0.5\text{M}\Omega$ $V_{GG} = 4V$ $R_L = 20\text{k}\Omega$ $V_{PP} = 350V$ และให้ศักย์ไฟฟ้าเข้ามีแอมพลิจูดน้อยมาก จงหาเกนศักย์ไฟฟ้า

วิธีทำ

จากสมการ (16.104) จะได้ว่า

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-\mu R_L}{r_P + R_L}$$

$$= \frac{-25 \times 20 \times 10^{30}}{10 \times 10^3 + 20 \times 10^3}$$

$$= \frac{-50}{3} = -17$$

ดังนั้นเกนศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ –17 เท่า **ตอบ**

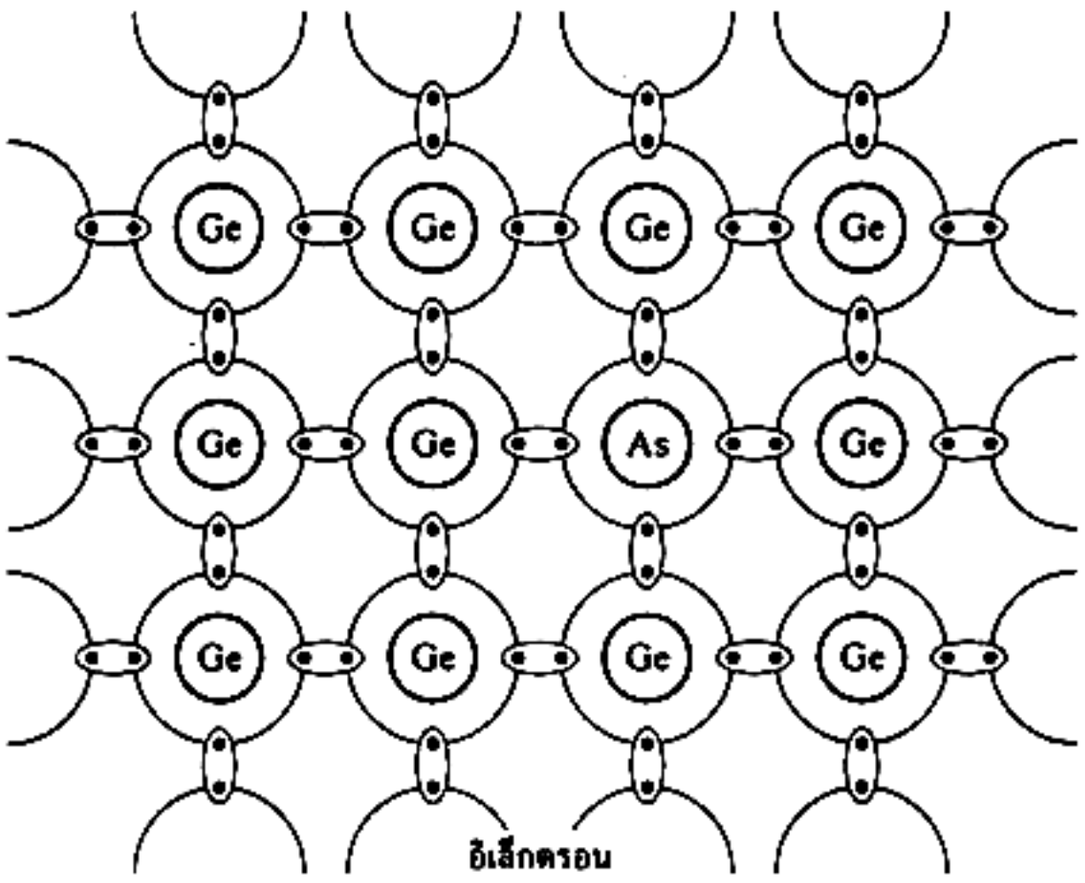
ปัจจุบันนี้งานเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์นิยมใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมากกว่าใช้หลอดสุญญากาศเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและขนาดเล็ก ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนด้วยไส้หลอด หมดปัญหาการรั่วของหลอด ทำงานที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า และมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อย อย่างไรก็ตามกรณีของหลอดสุญญากาศยังคงใช้ในงานที่ศักย์ไฟฟ้าสูง กำลังสูง และต้องการความถี่สูง ซึ่งสมบัติและอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบางอย่างจะได้กล่าวในหัวข้อต่อ ๆ ไป

16.11.4 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำผลิตจากสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำมีความต้านทานมากกว่าตัวนำแต่น้อยกว่าฉนวนนั่นเอง สารกึ่งตัวนำที่ใช้มากที่สุด ได้แก่ เจอร์เมเนียม

(Ge) และซิลิกอน (Si) ซึ่งมีจำนวนอิเล็กตรอนในวงโคจรเป็น 32 และ 14 ตามลำดับ ทำให้ธาตุทั้งสองชนิดมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ดังนั้นแต่ละอะตอมจึงจับกันแบบพันธะโคเวเลนซ์ (covalent bond) กับอะตอมที่อยู่ใกล้ๆ 4 อะตอม ที่อุณหภูมิห้อง

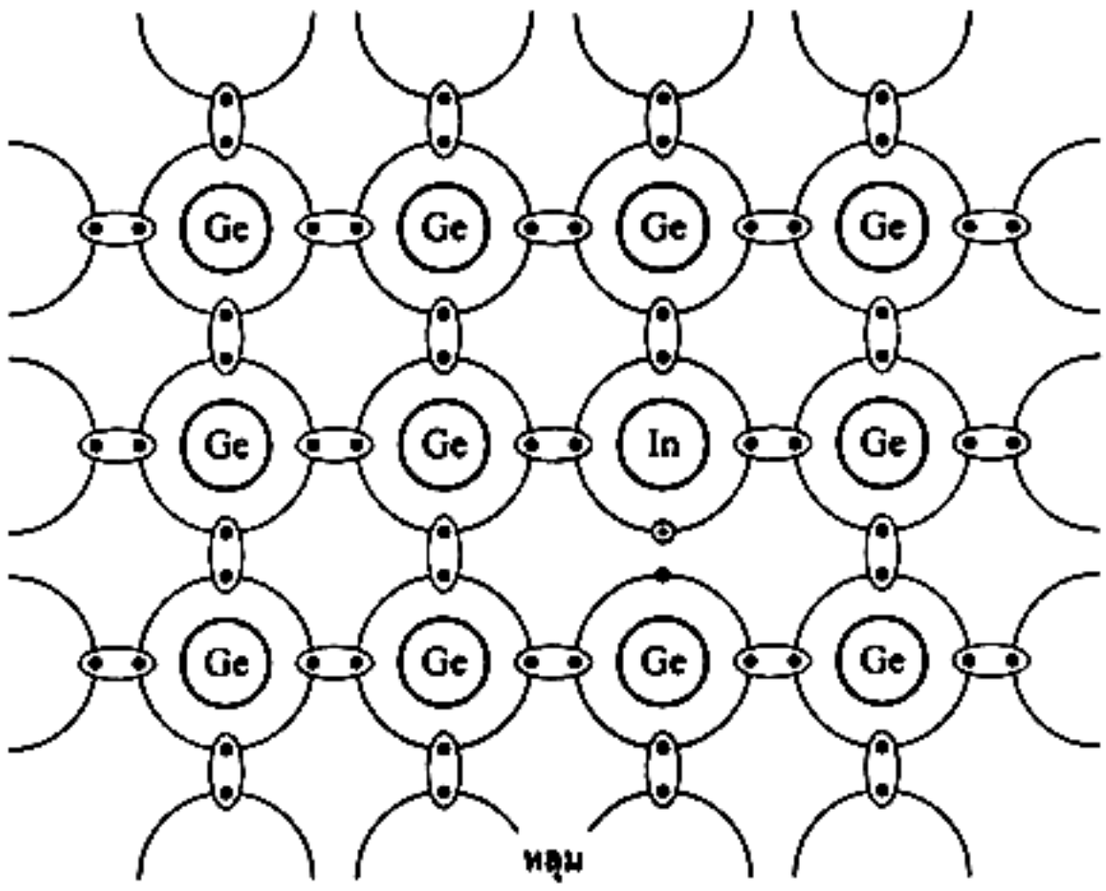
เมื่อให้พลังงานที่สูงพอบางเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานนั้นจะหลุดออกจากพันธะกลายเป็น *อิเล็กตรอนอิสระ (free electrons)* ส่วนพันธะที่ขาดอิเล็กตรอนจะเกิดสิ่งที่เรียกว่า *หลุม (hole)* และมีประจุบวก อิเล็กตรอนอิสระและหลุมดังกล่าวจะเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่กล่าวข้างต้นนี้หมายถึง **สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor)** และถ้าเราใส่สิ่งเจือปนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นนำกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งการใส่สิ่งเจือปนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำนั้นทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำได้ 2 ประเภท คือ



รูป 16.54 สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น

(ก) **สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (N-type Semiconductor)** สารกึ่งตัวนำแบบนี้เกิดจากการใส่สารเจือปนที่อะตอมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว ปนลงไป เช่น ฟอสฟอรัส แอนติโมนี หรืออาร์เซนิก เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ของอะตอมของสารเจือปนจะเข้าพันธะได้ ส่วนตัวที่ห้าจะไม่สามารถเข้าพันธะได้ จึงกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่ช่วยในการนำกระแสไฟฟ้า หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าตัวที่นำกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นได้แก่อิเล็กตรอนที่เกินจากการเข้าพันธะของอะตอมของสารเจือปนนั่นเอง อนึ่ง จำนวนอิเล็กตรอนอิสระนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเจือปนและอิเล็กตรอนกับหลุมที่เกิดจากการสลายตัวของพันธะเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นจะมีอิเล็กตรอนเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ (majority carrier) และหลุมเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าส่วนน้อย (minority carrier) ดังแสดงในรูป 16.54

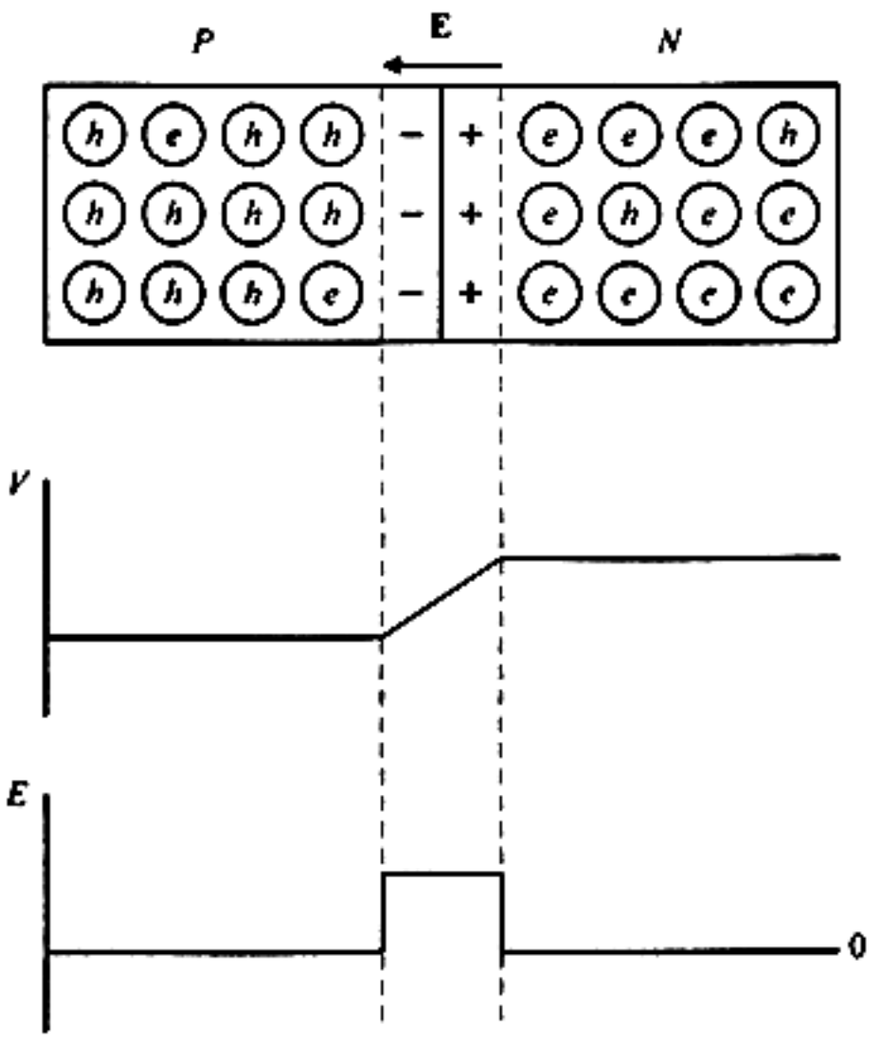
(ข) **สารกึ่งตัวนำแบบพี (P-type Semiconductor)** สารกึ่งตัวนำแบบนี้เกิดจากการใส่สารเจือปนที่อะตอมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ปนลงไป เช่น อะตอมของโบรอน อะลูมิเนียม



รูป 16.55 สารกึ่งตัวนำแบบพี

อินเดียม หรือแกลเลียม เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 3 ตัว ของอะตอมของสารเจือปนจะเข้าพันธะได้ แต่จะยังเหลือพันธะที่ขาดอิเล็กตรอนเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนไม่มีอิเล็กตรอนตัวที่สี่จึงเกิดหลุมขึ้น ซึ่งช่วยในการนำกระแสไฟฟ้า ตัวที่นำกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำแบบพี ได้แก่ หลุมที่เกิดจากการขาดอิเล็กตรอนตัวที่สี่ของอะตอมของสารเจือปนและอิเล็กตรอนกับหลุมที่เกิดจากสลายตัวของพันธะเนื่องจากอุณหภูมิ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแบบพีนี้จะมีหลุมเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่และอิเล็กตรอนเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าส่วนน้อยดังรูป 16.55

16.11.5 พีเอ็นจังก์ชันไดโอด

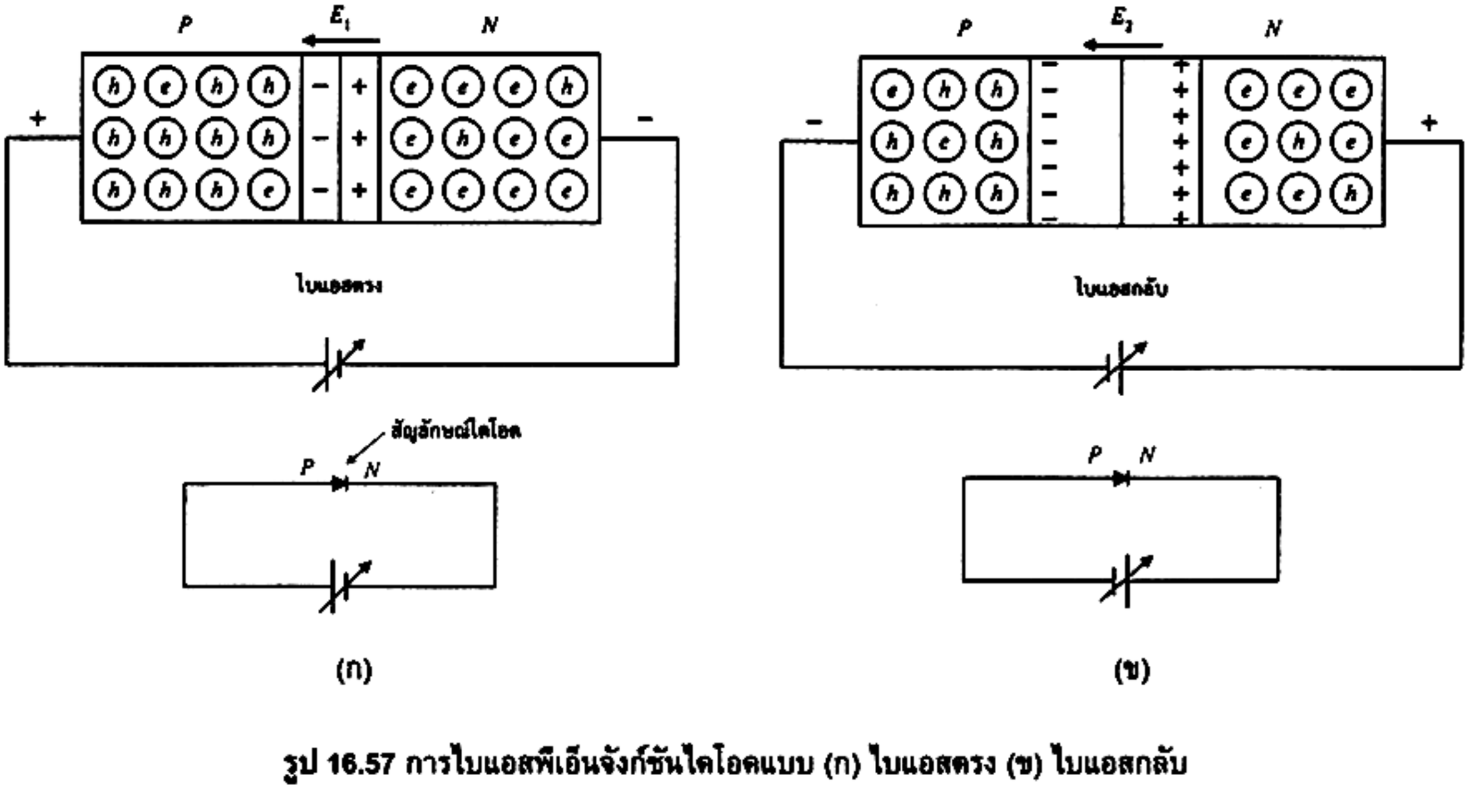


รูป 16.56 พีเอ็นจังก์ชันไดโอด

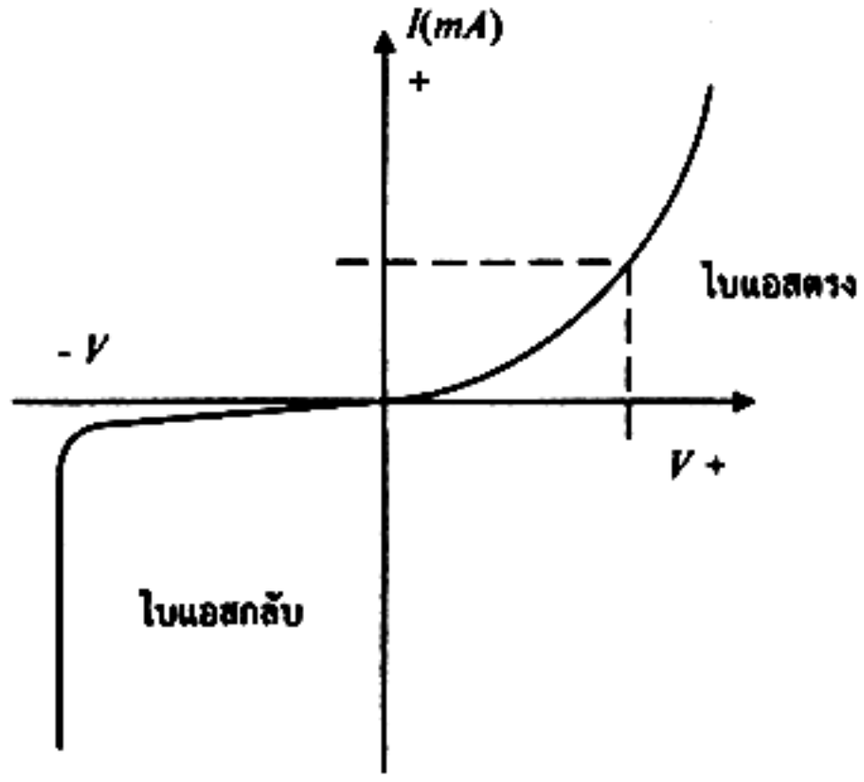
ไดโอดที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำแบบพีข้างหนึ่งและแบบเอ็นอีกข้างหนึ่งมาต่อกันเรียกว่า พีเอ็นจังก์ชันไดโอด (P-N junction diode) ตรงรอยต่อระหว่างพีกับเอ็นจะเกิดการแพร่กระจายของหลุมข้ามจากพีไปเอ็นและอิเล็กตรอนอิสระจากเอ็นเข้ามายังพี กระแสไฟฟ้าที่มีทิศจากพีไปเอ็นโดยการแลกเปลี่ยนนี้จะทำให้ด้านเอ็นที่ติดกับรอยต่อมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกและทางด้านพีที่ติดกับรอยต่อมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเกิดเป็นสนามไฟฟ้าขึ้นในบริเวณนี้ โดยมีทิศจากเอ็นไปพีและเอ็นมีศักย์สูงกว่าพีดังรูป 16.56 สนามไฟฟ้านี้จะมีทิศต้านการข้ามของหลุมในพีและของอิเล็กตรอนอิสระในเอ็น ในทำนองเดียวกันสนามไฟฟ้านี้จะดึงอิเล็กตรอนส่วนน้อยในพีและหลุมส่วนน้อยในเอ็นให้ข้ามรอยต่อนี้ได้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากหลุมส่วนใหญ่ในพีและอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ในเอ็นผ่านรอยต่อกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนส่วนน้อยในพีและหลุมส่วนน้อยในเอ็นผ่านรอยต่อมีทิศทางสวนกัน ดังนั้นถ้าไดโอดไม่ได้ต่อกับความต่างศักย์ภายนอก พบว่ากระแสไฟฟ้าทั้งสองเท่ากันนั่นคือไดโอดอยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งที่สภาวะสมดุลนี้ความต่างศักย์ตรงรอยต่อระหว่างเอ็นกับพีสำหรับเจอร์เมเนียมมีค่าประมาณ 0.36 โวลต์ และสำหรับซิลิกอนมีค่าประมาณ 0.7 โวลต์ สัญลักษณ์ของพีเอ็นจังก์ชันไดโอดแสดงได้ดังรูป 16.57 ถ้าต่อแบตเตอรี่ให้ขั้วบวกเข้าทางด้านพีและขั้วลบเข้าทางด้านเอ็นจะเป็นการลดความต่างศักย์ตรงรอยต่อระหว่างเอ็นกับพี ทำให้เกิดการแพร่กระจายข้ามรอยต่อมากขึ้นหรือเรียกว่ารอยต่อถูก *ไบแอสตรง (forward bias)* ซึ่งกระแสไฟฟ้าในวงจรจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ขึ้น แต่ถ้าเรากลับขั้วแบตเตอรี่รอยต่อจะถูก *ไบแอสกลับ (reverse bias)* ทำให้ความต่างศักย์ตรงรอยต่อระหว่างเอ็นกับพีสูงขึ้นจะเป็นการลดกระแส

ไฟฟ้าเนื่องจากหลุมส่วนใหญ่ในพีและอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ในเอ็น ซึ่งการไบแอสตรงและการไบแอสกลับแสดงได้ดังรูป 16.57



รูป 16.57 การไบแอสพีเอ็นจังก์ชันไดโอดแบบ (ก) ไบแอสตรง (ข) ไบแอสกลับ

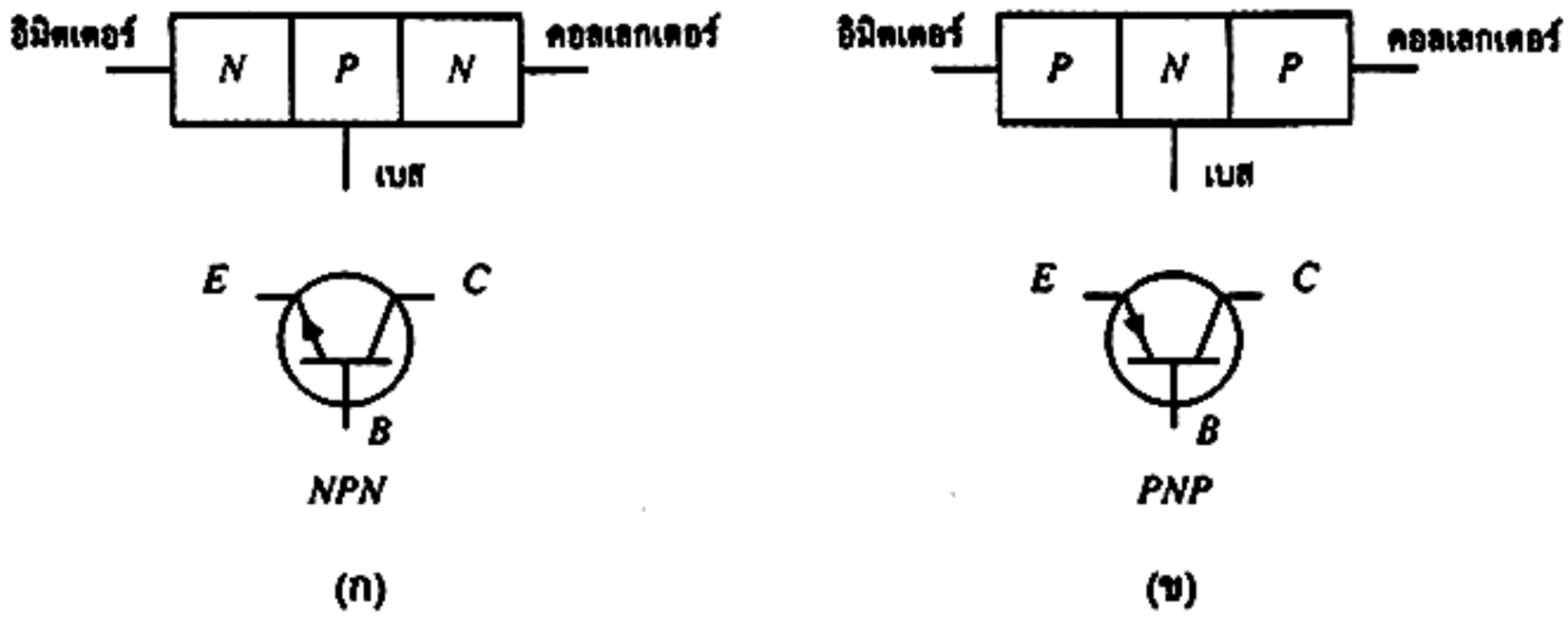


รูป 16.58 ลักษณะเฉพาะของพีเอ็นจังก์ชันไดโอด

ถ้าการไบแอสกลับนี้ไบแอสกลับด้วยความต่างศักย์ภายนอกสูงมากจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อแรงมาก ซึ่งสามารถทำให้อิเล็กตรอนส่วนน้อยในพีและหลุมส่วนน้อยในเอ็นถูกเร่งด้วยพลังงานสูงมาก เมื่อข้ามรอยต่อแล้วจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนในอะตอมทำให้เกิดอิเล็กตรอนและหลุมเพิ่มมากขึ้น ไดโอดจึงกลายเป็นมีความต้านทานต่ำและกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านมากถึงแม้จะถูกไบแอสกลับก็ตาม ซึ่งแสดงเป็นกราฟลักษณะเฉพาะของพีเอ็นจังก์ชันไดโอดได้ดังรูป 16.58

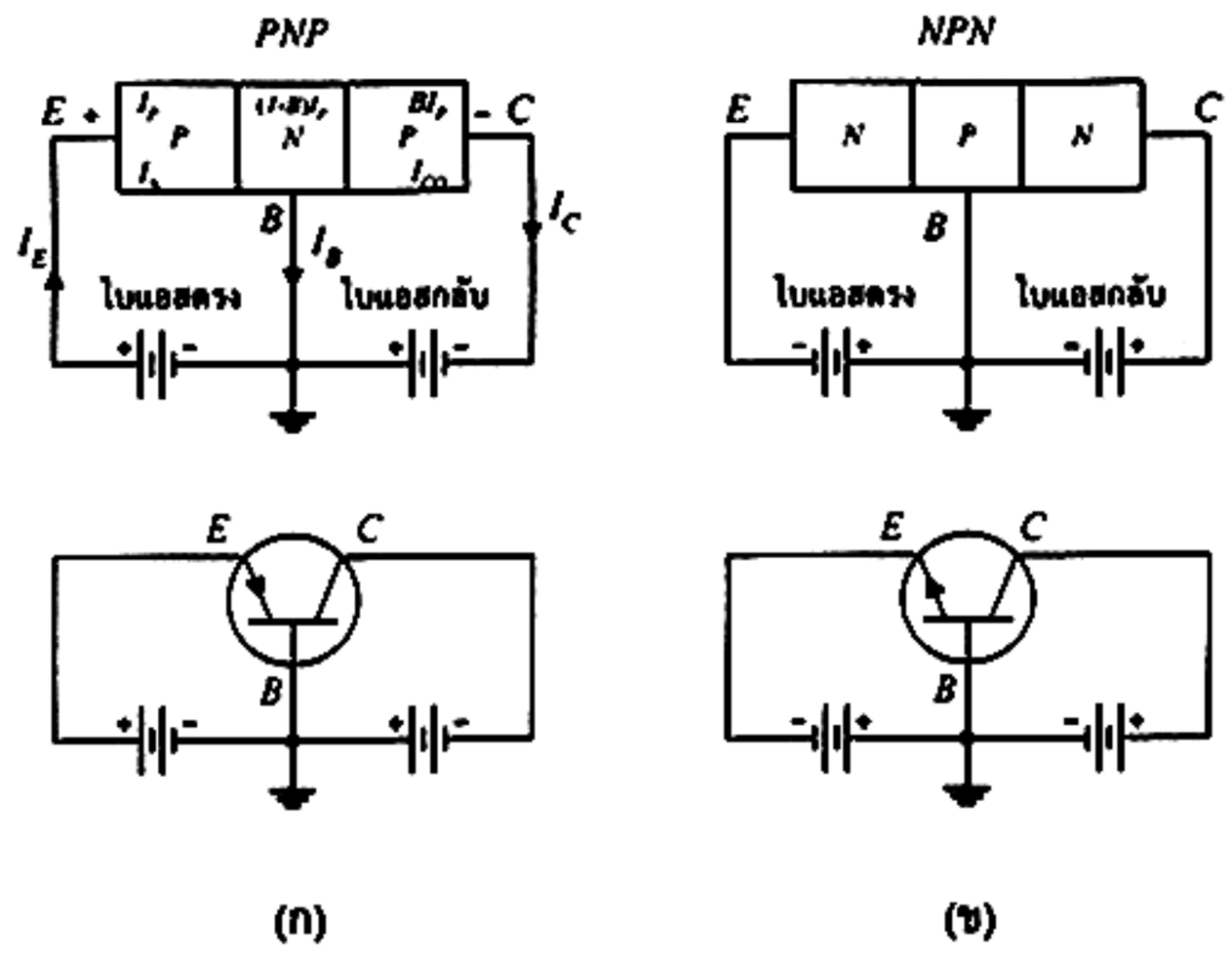
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า พีเอ็นจังก์ชันไดโอดกับหลอดสุญญากาศไดโอดมีลักษณะเฉพาะที่คล้ายกัน คือ มีความต้านทานต่ำขณะไบแอสตรงและมีความต้านทานสูงขณะไบแอสกลับ ดังนั้นเราจึงใช้ประโยชน์จากพีเอ็นจังก์ชันไดโอดในทำนองเดียวกันกับหลอดสุญญากาศไดโอดคือใช้ในวงจรตัวทำกระแสตรง สำหรับการใช้ไดโอดในวงจรอื่น ๆ ยังมีอีกหลายอย่างแต่ยังจะไม่กล่าวในบทนี้

16.11.6 จังก์ชันทรานซิสเตอร์



รูป 16.59 จังก์ชันทรานซิสเตอร์และสัญลักษณ์แบบ (ก) *NPN* และ (ข) *PNP*

จังก์ชันทรานซิสเตอร์ (junction transistor) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำแบบพีและเอ็นมาประกอบกัน โดยส่วนนอกทั้งสองส่วนทำด้วยสารกึ่งตัวนำแบบเดียวกันเรียกว่า อิมิตเตอร์ (emitter, E) และ คอลเลกเตอร์ (collector, C) ส่วนกลางทำด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดตรงกันข้ามกับส่วนนอกเรียกว่า เบส (base, B) ดังนั้นจังก์ชันทรานซิสเตอร์จึงมีสองแบบ คือ แบบ PNP และ NPN ดังรูป 16.59 ซึ่งส่วนประกอบทั้งสามส่วนนี้ส่วนที่เป็นเบสจะบางและมีความเข้มข้นของสารเจือปนน้อยมากเมื่อเทียบกับในอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ และพื้นที่ผิวของคอลเลกเตอร์จะมากกว่าของอิมิตเตอร์เพราะในขณะทำงานปกติพลังงานจะสูญเสียที่คอลเลกเตอร์มาก ดังนั้นจึงต้องสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี ทรานซิสเตอร์จะทำงานปกติเมื่อไบแอสตรงระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสและไบแอสกลับระหว่างคอลเลกเตอร์กับเบสดังรูป 16.60



รูป 16.60 การไบแอสทรานซิสเตอร์แบบปกติสำหรับ (ก) *NPN* และ (ข) *PNP*

เมื่อพิจารณาทรานซิสเตอร์แบบ *PNP* ที่อิมิตเตอร์-เบสถูกไบแอสตรงดังรูป 16.60 (ก) จะทำให้เกิดการแพร่กระจายข้ามรอยต่อของหลุมจากอิมิตเตอร์ไปเบสได้กระแสไฟฟ้า (I_P) และอิเล็กตรอนข้ามจากเบสไปอิมิตเตอร์ได้กระแสไฟฟ้า (I_N) ซึ่งเป็นกระแสที่น้อยกว่า I_P มาก เนื่องจากมีปริมาณของอิเล็กตรอนในเบสต่ำเมื่อเทียบกับหลุมในอิมิตเตอร์ กระแสไฟฟ้า I_N มีทิศทางจากอิมิตเตอร์ไปเบสเช่นเดียวกับ I_P ส่วนที่คอลเลกเตอร์-เบสจะถูกไบแอสกลับ สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อทิศจากเบสในคอลเลกเตอร์มีค่าสูงและกว้างขึ้น เมื่อหลุมข้ามจากอิมิตเตอร์ไปเบสจะรวมกับอิเล็กตรอนในเบสส่วนน้อยเกิดกระแสไฟฟ้าที่เบส หลุมส่วนใหญ่จะถูกสนามไฟฟ้าผลักให้ข้ามจากเบสไปคอลเลกเตอร์ได้กระแสไฟฟ้ามีค่าเกือบเท่า I_P โดยให้เท่ากับ BI_P เมื่อ B เรียกว่า *แฟกเตอร์ของการส่งผ่าน (transport factor)* และมีค่าเข้าใกล้ 1 และจะเหลือกระแสไฟฟ้าที่หลุมข้ามจากอิมิตเตอร์ไปรวมกับอิเล็กตรอนในเบสเท่ากับ $(1-B)I_P$ ระหว่างคอลเลกเตอร์กับเบสซึ่งถูกไบแอสกลับจะมีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากหลุมส่วนน้อยข้ามจากเบสไปคอลเลกเตอร์และอิเล็กตรอนส่วนน้อยจากคอลเลกเตอร์ข้ามไปเบส (I_{CO}) กระแสไฟฟ้า I_{CO} นี้มีค่าน้อยมากแต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นถ้าให้กระแสไฟฟ้ารวมที่ผ่านอิมิตเตอร์เป็น I_E กระแสไฟฟ้ารวมที่ผ่านคอลเลกเตอร์เป็น I_C และกระแสไฟฟ้ารวมที่ผ่านเบสเป็น I_B จะได้ว่า

$$I_E = I_P + I_N$$

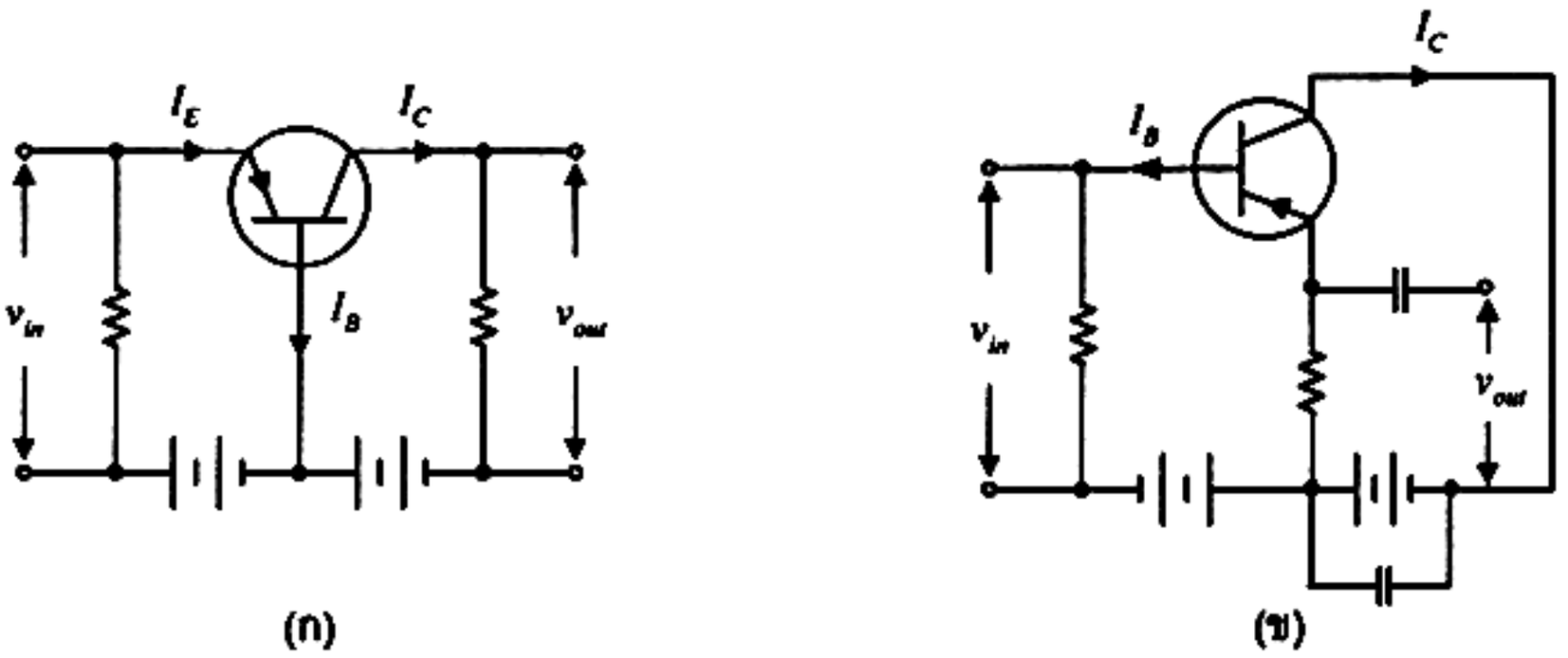
$$I_C = BI_P + I_{CO}$$

$$I_B = (1-B)I_P + I_N - I_{CO}$$

และ

$$I_E = I_B + I_C$$

การใช้ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณมีวิธีต่อวงจร 3 แบบ ได้แก่ การต่อวงจรแบบเบสร่วม (common base amplifier) การต่อวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter amplifier) และการต่อวงจรแบบคอลเลกเตอร์ร่วม (common collector amplifier)



รูป 16.61 วงจรขยายสัญญาณต่อแบบ (ก) เบสร่วม และ (ข) คอลเลกเตอร์ร่วม

การต่อวงจรแบบเบสร่วมแสดงได้ดังรูป 16.61 (ก) ซึ่งการต่อวงจรดังกล่าวจะให้เกนศักย์ไฟฟ้าสูง แต่เกนกระแสต่ำ โดยที่แฟกเตอร์ของการขยายกระแสไฟฟ้าในกรณีนี้ $(\alpha) = \frac{I_C}{I_E}$ หรือ

$$I_C = \alpha I_E$$

ส่วนการต่อวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วมแสดงได้ดังรูปที่ 16.62 ซึ่งการต่อวงจรแบบนี้จะให้เกนศักย์ไฟฟ้าสูง แต่เกนกระแสไฟฟ้าสูง โดยที่แฟกเตอร์ของการขยายกระแสไฟฟ้าในกรณีนี้ $(\beta) = \frac{I_C}{I_B}$ แต่จาก

$$I_E = I_B + I_C$$

$$\frac{I_C}{\alpha} = \frac{I_C}{\beta} + I_C$$

$$\alpha = \frac{\beta}{(\beta+1)} \quad \text{และ} \quad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

หรือ

$$I_C = \beta I_B = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) I_B$$

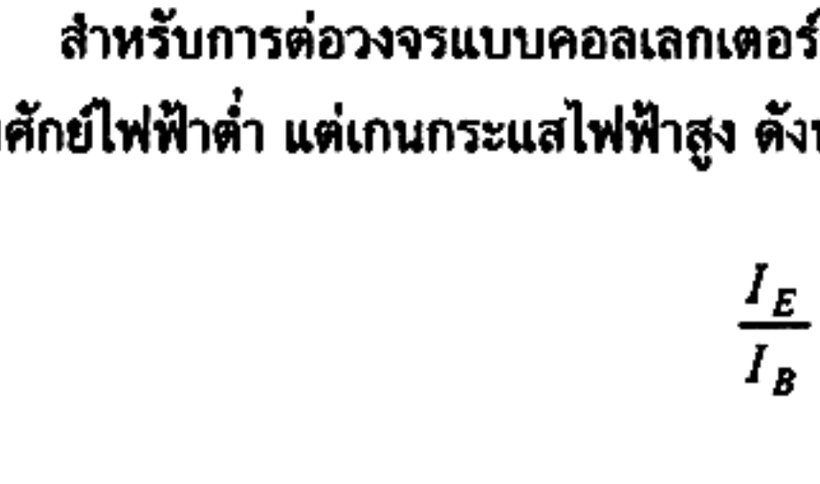
สำหรับการต่อวงจรแบบคอลเลกเตอร์ร่วมแสดงได้ดังรูป 16.61 (ข) ซึ่งการต่อวงจรในลักษณะนี้จะให้เกนศักย์ไฟฟ้าต่ำ แต่เกนกระแสไฟฟ้าสูง ดังนั้นจาก

$$\frac{I_E}{I_B} = \frac{I_C}{\alpha} \cdot \frac{\beta}{I_C} = \frac{\beta}{\alpha}$$

$$= \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{1}{(1-\alpha)}$$

หรือ

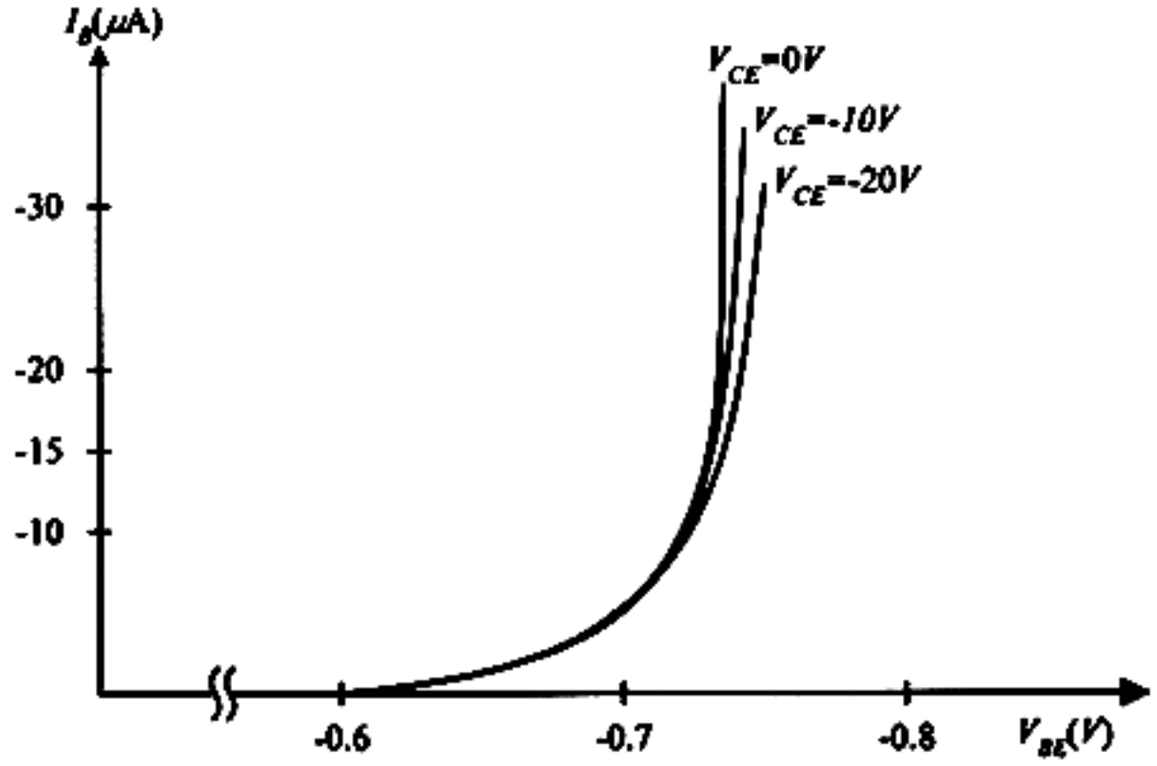
$$I_E = \frac{1}{(1-\alpha)} I_B$$



รูป 16.62 วงจรขยายสัญญาณต่อแบบอิมิเตอร์ร่วม

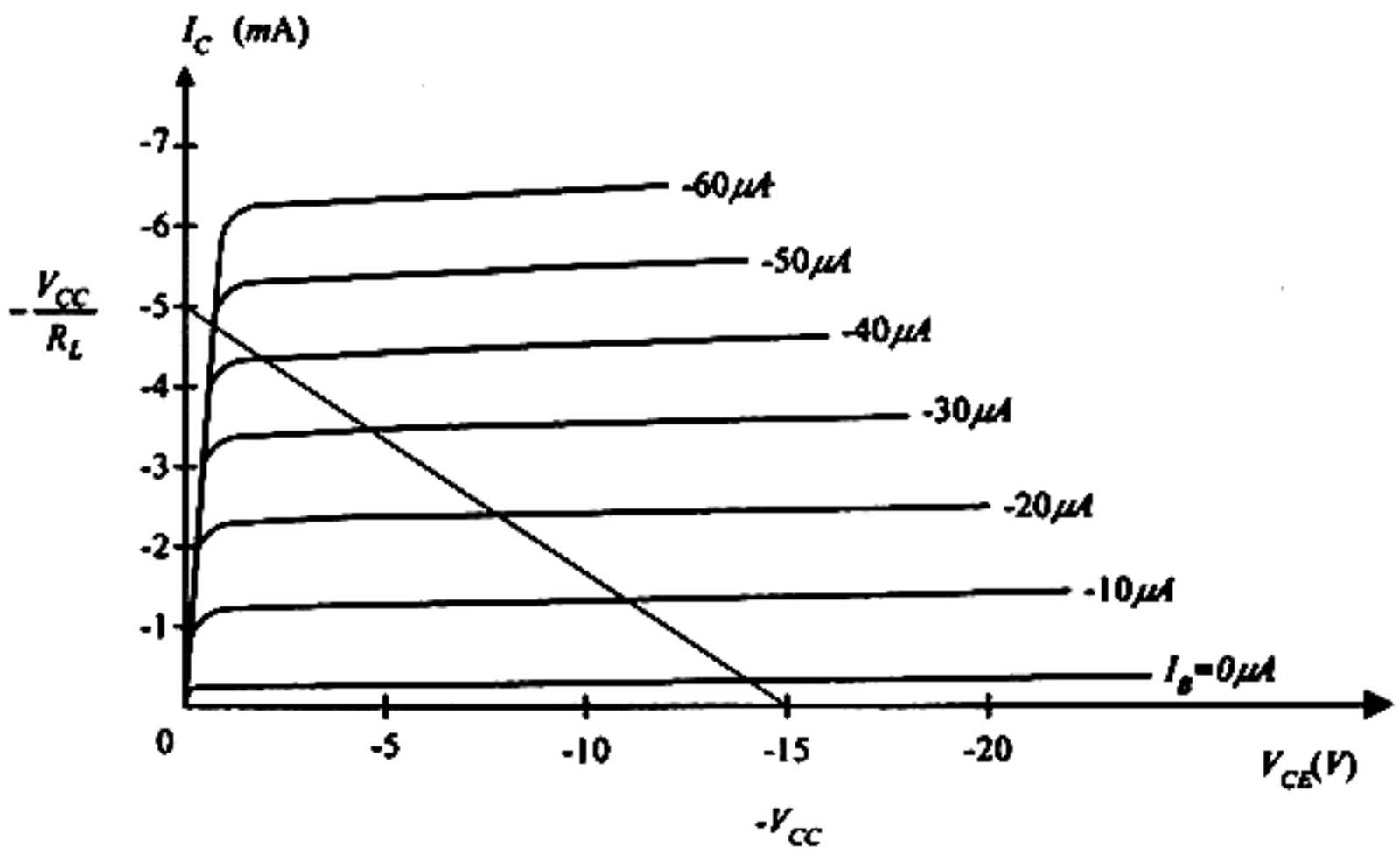
แต่วงจรขยายสัญญาณที่นิยมใช้กันมากและจะใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาในบทนี้ คือ วงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม

เมื่อพิจารณาวงจรในรูป 16.62 โดยกำหนดให้ I_C I_E และ I_B เป็นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านคอลเลกเตอร์ อิมิตเตอร์ และเบสตามลำดับ โดยกระแสทั้งสามมีทิศทางดังรูป 16.62 และให้กระแสไฟฟ้าเข้าทรานซิสเตอร์เป็นบวกและออก



รูป 16.63 กราฟลักษณะเฉพาะเข้าของวงจรขยายสัญญาณต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วม

เป็นลบ ถ้า V_{CE} เป็นศักย์ไฟฟ้าของคอลเลกเตอร์เทียบกับอิมิตเตอร์ และ V_{BE} เป็นศักย์ไฟฟ้าของเบสเทียบกับอิมิตเตอร์ จะได้กราฟลักษณะเฉพาะเข้า (input characteristics) ของวงจรดังรูป 16.63 และกราฟลักษณะเฉพาะออก (output characteristics) ดังรูป 16.64



รูป 16.64 กราฟลักษณะเฉพาะออกของวงจรขยายสัญญาณต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วม

จากรูป 16.62 เมื่อพิจารณาวงจรวงที่ 1 พบว่า

$$V_{BB} = V_{EB} - I_B R_B = -V_{BE} - I_B R_B$$

$$-I_B = \frac{(V_{BE})}{R_B} + \frac{V_{BB}}{R_B} \qquad (16.105)$$

สมการ (16.105) เรียกว่า สมการของโหลดไลน์เข้า (input load line) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างตำแหน่ง ($V_{BE} = 0, I_B = -\frac{V_{BB}}{R_B}$) กับตำแหน่ง ($I_B = 0, V_{BE} = -V_{BB}$)

เมื่อพิจารณาวงจรวงที่ 2 จะได้ว่า

$$V_{CC} = V_{EC} - I_C R_L = -V_{CE} - I_C R_L$$

$$(-I_C) = \frac{(V_{CE})}{R_L} + \frac{V_{CC}}{R_L} \qquad (16.106)$$

สมการ (16.106) เรียกว่า สมการของโหลดไลน์ออก (output load line) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงที่เชื่อมตำแหน่ง ($V_{CE} = 0, I_C = -\frac{V_{CC}}{R_L}$) กับตำแหน่ง ($I_C = 0, V_{CE} = -V_{CC}$) ดังรูป 16.64

ถ้าต้องการหาจุดทำงานของรูป 16.63 ต้องรู้ค่า V_{CE} ก่อน ในทำนองเดียวกันถ้าต้องการหาจุดทำงานจากรูป 16.64 ก็จะต้องรู้ค่า I_B ก่อน ซึ่งวิธีหาจุดทำงานทั้งสองรูปทำได้โดยหาความสัมพันธ์ระหว่าง I_B กับ V_{CE} จากรูป 16.64 แล้วนำความสัมพันธ์นี้ไปเขียนกราฟ ซึ่งค่านี้ I_B หาได้จากกราฟในรูป 16.63 โดยจุดตัดระหว่างกราฟกับโหลดไลน์เข้าก็คือจุดทำงานของรูป 16.63 นั่นเอง และค่า I_B ที่ได้นี้เมื่อนำไปพิจารณาในกราฟรูป 16.64 พบว่า เส้นกราฟของ I_B ที่เราหาค่าได้ที่ตัดกับเส้นโหลดไลน์ออกในรูป 16.64 ก็คือจุดทำงานของรูป 16.64 นั่นเอง เมื่อต่อสัญญาณที่ต้องการจะขยายหรือ v_{in} เข้าระหว่าง $B - E$ v_{in} นี้จะทำให้ V_{BE} เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของ I_B ได้จากรูป 16.63 และเมื่อนำการเปลี่ยนแปลงของ I_B นี้มาใช้ในรูป 16.64 ก็จะได้การเปลี่ยนแปลงของ V_{CE} และ I_C ตามลำดับ

ในกรณีที่ v_{in} มีค่าน้อย ๆ การหาเกนศักย์ไฟฟ้าและเกนกระแสไฟฟ้าสามารถใช้วิธีคำนวณโดย เอช พารามิเตอร์ (Hybrid or h-parameters) ได้ โดยที่

$$h_{ie} = \left[\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right]_{V_{CE}} = \left[\frac{v_{be}}{i_b}\right]_{v_{ce}} \qquad (16.107)$$

$$h_{fe} = \left[\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right]_{V_{CE}} = \left[\frac{i_c}{i_b}\right]_{v_{ce}} \qquad (16.108)$$

$$h_{re} = \left[\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}\right]_{I_B} = \left[\frac{v_{be}}{v_{ce}}\right]_{i_b} \qquad (16.109)$$

$$h_{oe} = \left[\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\right]_{I_B} = \left[\frac{i_c}{v_{ce}}\right]_{i_b} \qquad (16.110)$$

เมื่อ h_{ie} คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของ V_{BE} ต่อการเปลี่ยนแปลงของ I_B เมื่อ V_{CE} คงตัว

h_{fe} คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของ I_C ต่อการเปลี่ยนแปลงของ I_B เมื่อ V_{CE} คงตัว

h_{re} คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของ V_{BE} ต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{CE} เมื่อ I_B คงตัว

และ h_{oe} คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของ I_C ต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{CE} เมื่อ I_B คงตัว

จากสมการ (16.107) และ (16.109) จะได้

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \tag{16.111}$$

และจากสมการ (16.108) และ (16.110) จะได้

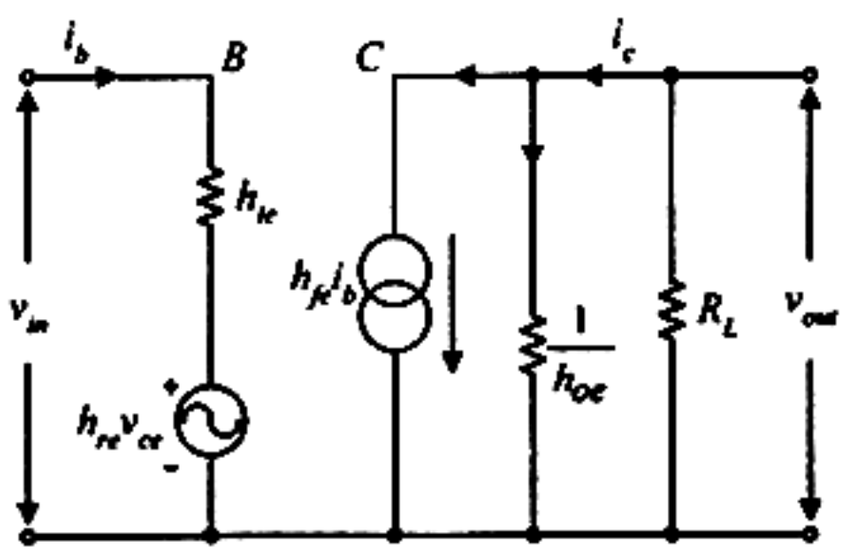
$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \tag{16.112}$$

เมื่อพิจารณาจากรูป 16.62 พบว่า

$$v_{in} = v_{be} \tag{16.113}$$

$$v_{out} = v_{ce} = -i_c R_L \tag{16.114}$$

ซึ่งวงจรที่สอดคล้องกับสมการ (16.111) (16.112) (16.113) และ (16.114) เขียนได้ดังรูป 16.65 ซึ่งเรียกว่า *วงจรเทียบเท่าของอิมิตเตอร์ร่วม*



รูป 16.65 วงจรเทียบเท่าของอิมิตเตอร์ร่วม

จากสมการ (16.112) และสมการ (16.114) จะได้

$$\frac{-v_{ce}}{R_L} = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$

$$v_{ce} = \frac{-h_{fe} i_b}{\left(h_{oe} + \frac{1}{R_L}\right)} \tag{16.115}$$

เมื่อแทนค่าสมการ (16.115) ลงในสมการ (16.111) จะได้

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} \frac{\left(-h_{fe} i_b\right)}{\left(h_{oe} + \frac{1}{R_L}\right)} = \left\{ h_{ie} - \frac{h_{re} h_{fe}}{\left(h_{oe} + \frac{1}{R_L}\right)} \right\} i_b \tag{16.116}$$

เมื่อหารสมการ (16.115) ด้วยสมการ (16.116) จะได้

$$\frac{v_{ce}}{v_{be}} = \frac{1}{h_{re} - \frac{h_{ie}}{h_{fe}}\left(\frac{1+h_{oe}R_L}{R_L}\right)} = \frac{h_{fe}R_L}{R_L\left(h_{re}h_{fe} - h_{oe}h_{ie}\right) - h_{ie}} \qquad (16.117)$$

ซึ่งสมการ (16.117) ที่ได้ก็คือสมการการหาเกนศักย์ไฟฟ้านั่นเอง และจากสมการ (16.112) และ (16.114) จะได้

$$i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}\left(-i_c R_L\right)$$

$$\frac{i_c}{i_b} = \frac{h_{fe}}{1+h_{oe}R_L} \qquad (16.118)$$

โดยที่สมการ (16.118) ก็คือสมการการหาเกนกระแสไฟฟ้านั่นเอง ดังนั้นจากสมการ (16.117) และ (16.118) ทำให้ทราบว่า เราสามารถหาเกนศักย์ไฟฟ้าและเกนกระแสไฟฟ้าได้โดยต้องรู้ค่า h_{ie} h_{fe} h_{re} และ h_{oe} ซึ่งเป็นค่าคงตัว ซึ่งค่าเหล่านี้อาจหาได้จากกราฟลักษณะเฉพาะของทรานซิสเตอร์

ตัวอย่าง 16.17

วงจรขยายสัญญาณของจังก์ชันทรานซิสเตอร์ที่ต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วมดังรูป 16.62 มีกราฟลักษณะเฉพาะเข้าและกราฟลักษณะเฉพาะออกของจังก์ชันทรานซิสเตอร์ดังรูป 16.63 และ 16.64 ตามลำดับ ถ้าปรับวงจรให้ I_B คงตัวเท่ากับ -15 ไมโครแอมแปร์ $V_{CC} = 15$ โวลต์ และ $R_L = 3$ กิโลโอห์ม จงหาค่าเอซพารามิเตอร์

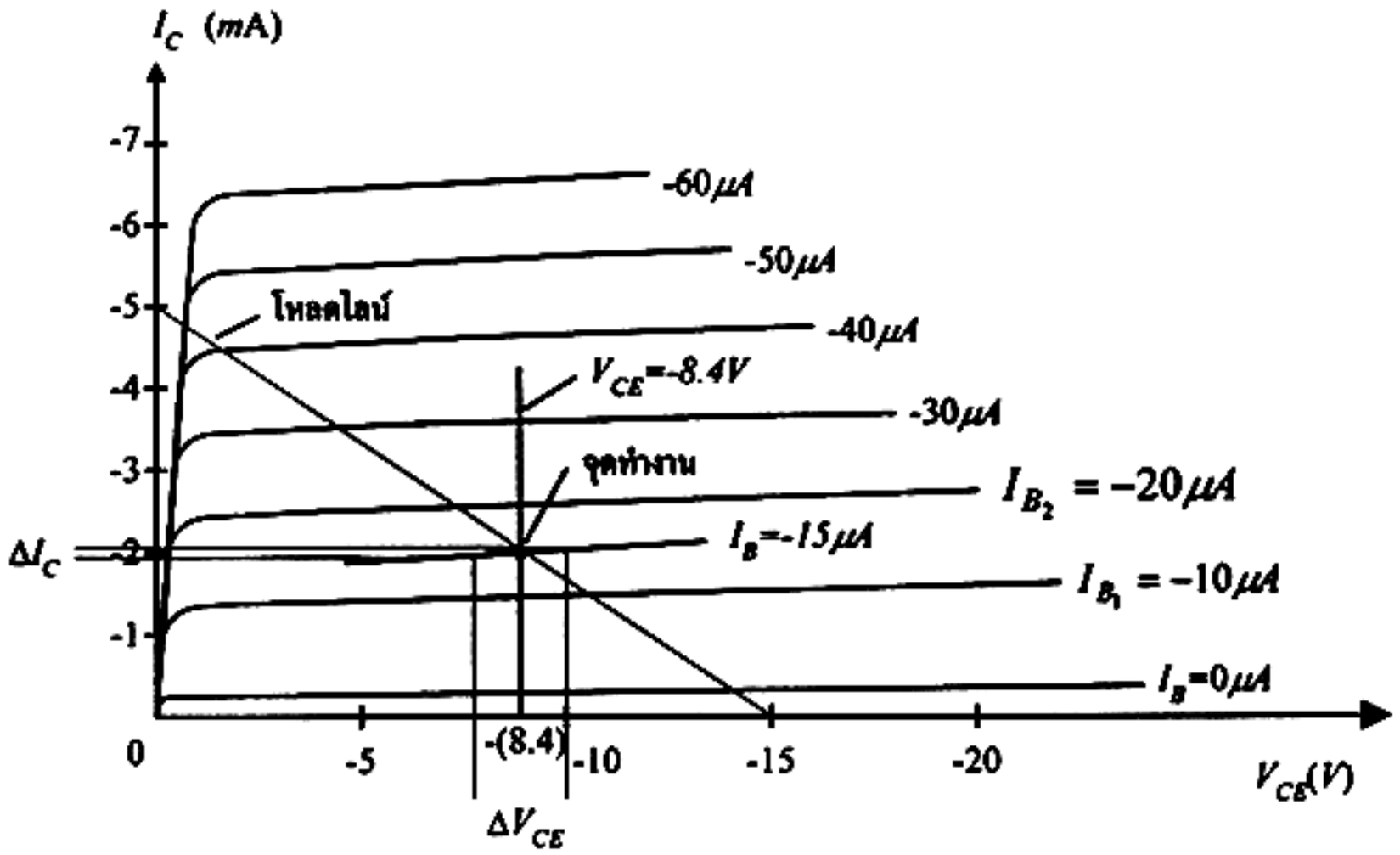
วิธีทำ

จากรูป 16.64 จะหาโหลดไลน์ได้จาก

$$I_C = \frac{-V_{CC}}{R_L} = \frac{15}{3\times10^3} = -5\ mA$$

และ $$V_{CE} = -V_{CC} = -15\ V$$

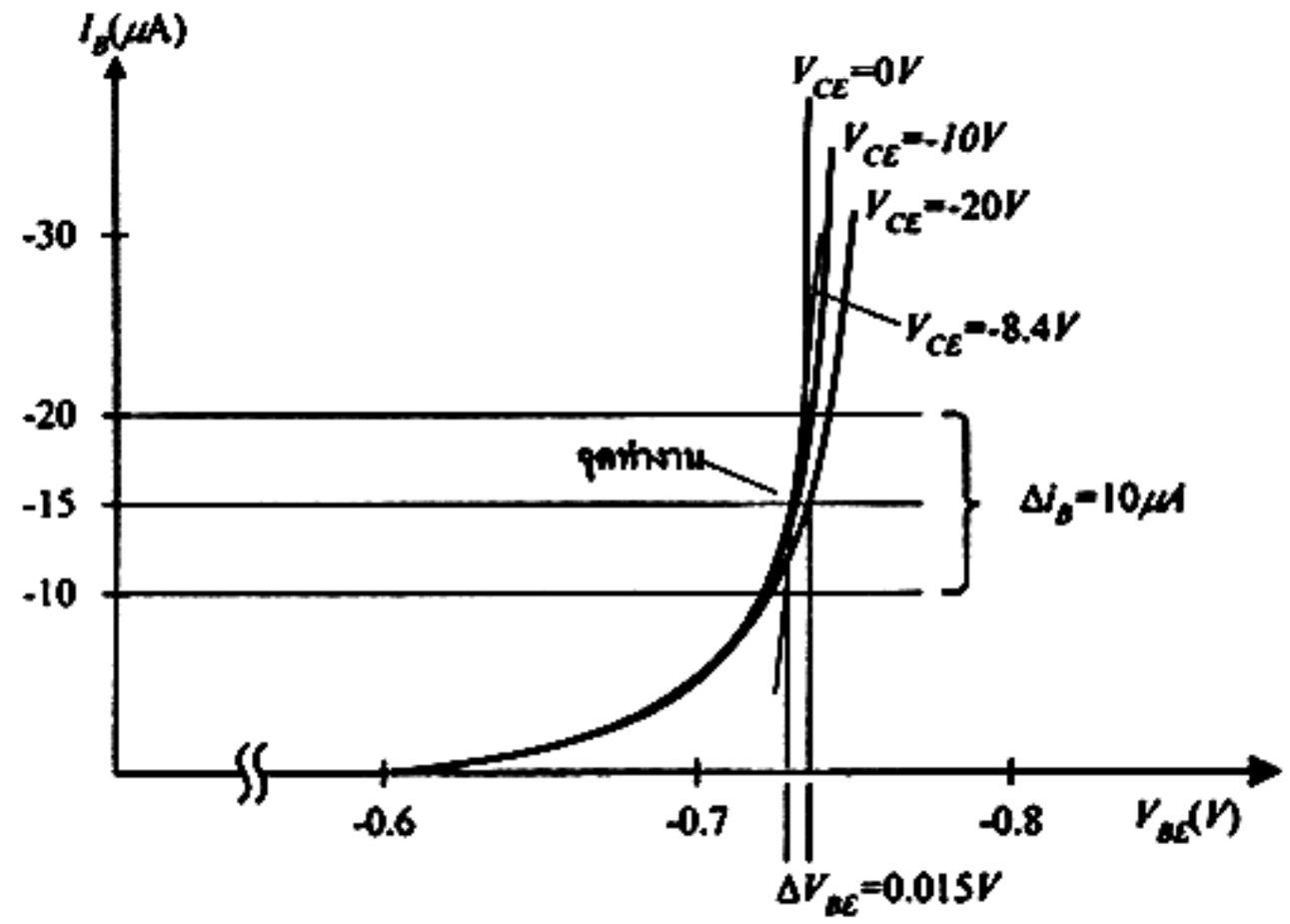
โดยโหลดไลน์ตัดกับ I_B ดังรูป 16.67 ที่ $I_B = -15$ แอมแปร์ จะได้จุดทำงาน ซึ่งมี $V_{CE} = -8.4$ โวลต์ ทำให้หาค่า h_{fe} และ h_{oe} ได้เป็น



รูป 16.66 การหาค่า h_{fe} และ h_{oe}

$$h_{fe} = \left[\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right]_{V_{CE}} = \left[\frac{(2.7-1.7)\times10^{-3}\ A}{(20-10)\times10^{-6}\ A}\right]_{V_{CE}=-8.4V} = 100$$

$$h_{oe} = \left[\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\right]_{I_B} = \left[\frac{(2.2-2.1)\times10^{-3}\ A}{(10-7)V}\right]_{I_B=-15\mu A} = 33\ \mu A/V$$



รูป 16.67 การหาค่า h_{ie} และ h_{re}

และจากรูป 16.67 จะได้

$$h_{ie} = \left[\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right]_{V_{CE}} = \left[\frac{15\times10^{-3}\ V}{(20-10)\times10^{-6}\ A}\right]_{V_{CE}=-8.4V} = 1.6\ k\Omega$$

$$h_{re} = \left[\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}\right]_{I_B} = \left[\frac{8\times10^{-3}}{20-0}\right]_{I_b=-15\,\mu A} = 4\times10^{-4}$$

ดังนั้นค่าเอชพารามิเตอร์สำหรับวงจรนี้มีค่า $h_{fe} = 100$ $h_{oe} = 33$ ไมโครแอมแปร์/โวลต์ $h_{ie} = 1.6$ กิโลโอห์ม และ $h_{re} = 4\times10^{-4}$ ตอบ

ประโยชน์ของทรานซิสเตอร์ นอกจากจะใช้ขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแล้ว ยังมีประโยชน์อีกหลายอย่าง เช่น ใช้ในวงจรขยายสัญญาณกระแสตรง วงจรผลิตกระแสสลับที่มีความถี่ต่างๆ วงจรเปิดปิด และวงจรโลจิกที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ นอกจากทรานซิสเตอร์ที่กล่าวมาแล้วยังมีอีกหลายชนิดขึ้นอยู่กับเทคนิคของการผลิตและการใช้งาน ในการย่อวงจรให้มีขนาดเล็กลงเรียกว่า วงจรรวม (integrated circuit) สร้างโดยใช้ชิลิกอนชิ้นเล็กๆ ซึ่งในนั้นอาจเป็นวงจรที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์และความต้านทานหลายตัว ปัจจุบันวงจรรวมมีประโยชน์มากเพราะมีขนาดเล็กและใช้มากในเครื่องคอมพิวเตอร์

บรรณานุกรม

Alonso, M., and Finn, E. J., ***Physics***, Addison-Wesley, 1992.

Anderson, E. P., ***Electrical Power Calculation.***, D. B. Taraporevala Son & Co., 1969.

Boylestad, R., and Nashelsky, L., ***Electronic Device and Circuit Theory.***, Prentice-Hall, 1978.

Brophy, J. J., ***Basic Electronic for Scientists.***, McGraw-Hill, 1972.

Gerrish, H. H., ***Transistor Electronics.***, Goodheart-Willcox, 1969.

Gronner, A. D., ***Transistor Circuit Analysis.***, Simon and Schuster, 1970.

Halliday, D., Resnick, R., and Walker, J., ***Fundamentals of Physics : Extended.***, 5th ed., John Wiley & Sons, 1997.

Jacobwitz, H., ***Electricity and Electronics.***, D. B. Taraporevala Son & Co., 1970.

Serway, R. A., ***Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics.***, 4th ed., Saunders College, 1996.

Siskind, C. S., ***Electrical Circuits.***, McGraw-Hill, 1965.