

บทที่ 7

ทรานซิสเตอร์

และการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น



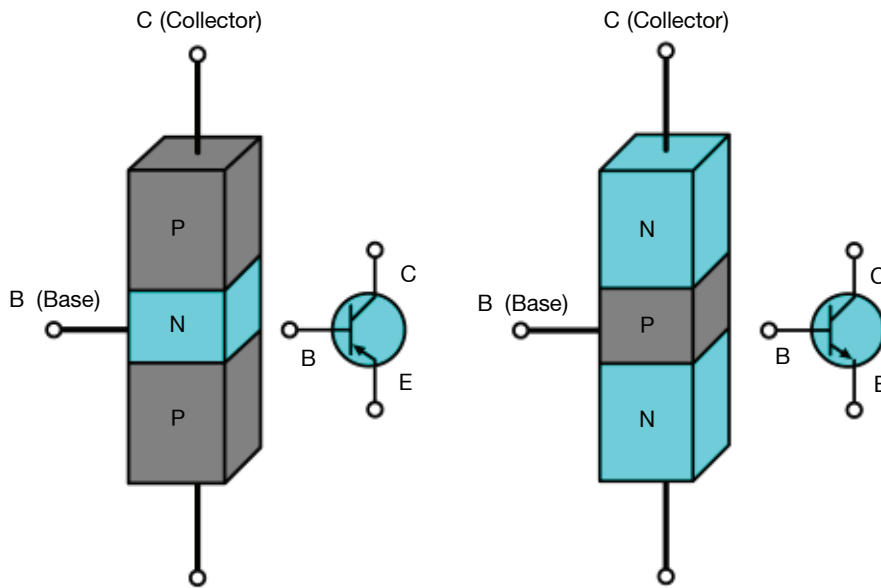
7.1 บทนำ

ทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่พบได้บ่อยที่สุดในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เนื่องจากมีการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น วงจรในวิทยุ เครื่องขยายเสียง รวมทั้งอุปกรณ์ของเล่นต่างๆ นอกจากนี้ ทรานซิสเตอร์ยังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นส่วนประกอบย่อยในวงจรรวม (Integrated Circuit หรือ IC) ชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่นักอิเล็กทรอนิกส์ทุกคนจะต้องเข้าใจการทำงานของทรานซิสเตอร์เบื้องต้น เพื่อที่จะนำไปพัฒนาออกแบบและประยุกต์ใช้งานต่างๆ ต่อไป

ทรานซิสเตอร์สำหรับวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor หรือ BJT) หรือที่เรียกว่าทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อพาหะคู่ นอกจากนี้ยังมีทรานซิสเตอร์แบบเจเฟต (Junction Field Effect Transistor หรือ JFET) ทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor หรือ MOSFET) ซึ่งใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมการทำงาน ในบทนี้จะกล่าวถึงทรานซิสเตอร์แบบมีรอยต่อพาหะคู่เท่านั้น สำหรับทรานซิสเตอร์แบบอื่นๆ สามารถศึกษาได้ในระดับสูงต่อไป

7.2 ทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อพาหะคู่ (Bipolar Junction Transistor: BJT)

ทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อพาหะคู่ (ซึ่งต่อไปจะเรียกสั้นๆ ว่า “ทรานซิสเตอร์”) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 7.1 ประกอบไปด้วยรอยต่อสารกึ่งตัวนำแบบพีและเอ็น ต่อชนกัน ดังแสดงในรูปซึ่งเปรียบเสมือนกับไดโอด 2 ตัว ต่อชนกัน ทำให้มีทรานซิสเตอร์เกิดขึ้น 2 ชนิดคือชนิดพีเอ็นพีและชนิดเอ็นพีเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 7.1 (ก) และ 7.1 (ข) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 3 ขา (ต่างจากตัวต้านทานและไดโอดที่มี 2 ขา) ขาที่อยู่ตรงกลางซึ่งจะเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาน้อยที่สุดเรียกว่า ขาเบส (Base หรือ B) ส่วนอีกสองขาที่เหลือจะเรียกว่า ขาคอลเลกเตอร์และขาอีมิเตอร์ (Collector หรือ C และ Emitter หรือ E) ตามลำดับ



(ก) แบบพีเอ็นพี

(ข) แบบเอ็นพีเอ็น

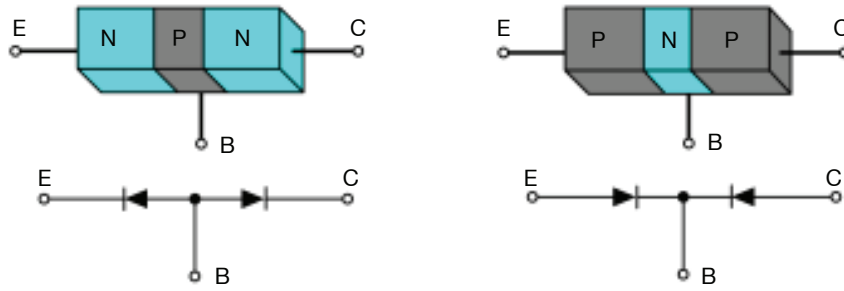
รูปที่ 7.1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพี และแบบเอ็นพีเอ็น

ถึงแม้ว่าชาคอลเล็กเตอร์และชาอิมิตเตอร์จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน แต่ก็มีคุณสมบัติที่ต่างกันตรงที่ชาอิมิตเตอร์จะมีการโด๊ปสารเจือมากกว่าที่ชาคอลเล็กเตอร์ (เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ “ + ” ในรูป) ซึ่งจากรูปดังกล่าวได้แสดงถึงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ ทั้งชนิดพีเอ็นพีและชนิดเอ็นพีเอ็นด้วย สังเกตว่าที่ชาอิมิตเตอร์เป็นขาที่แสดงทิศทางของลูกศรซึ่งหมายถึงทิศทางของกระแสที่วิ่งผ่าน อย่างเช่น ในกรณีของทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพีในรูปที่ 7.1 (ก) ชาอิมิตเตอร์จะต่อกับขาของลูกศรที่มีทิศทางพุ่งเข้าไปในทรานซิสเตอร์ นั่นหมายความว่าทิศทางของกระแสจะวิ่งจากชาอิมิตเตอร์ไปสู่ชาคอลเล็กเตอร์ ขณะที่ชนิดเอ็นพีเอ็น ในรูปที่ 7.1 (ข) ชาอิมิตเตอร์ต่อกับลูกศรที่มีทิศทางที่พุ่งออกจากตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งหมายถึงทิศทางของกระแสที่วิ่งผ่านทรานซิสเตอร์กระแสที่ไหลผ่านนี้ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสที่ขาเบส สำหรับใช้ในการควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ข้อสังเกตอย่างหนึ่งของทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อพาหะคู่ก็คือ พาหะที่ทำให้เกิดกระแสในตัวทรานซิสเตอร์จะได้จากอิเล็กตรอนและโฮล (นั่นคือที่มาของชื่อ “พาหะคู่”) โดยในทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพีจะมีโฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่ (เพราะที่ชาคอลเล็กเตอร์และชาอิมิตเตอร์ถูกโด๊ปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพี) ดังนั้นกระแสที่ผ่านทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพีจึงเกิดจากโฮลเคลื่อนที่มากกว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ขณะที่กระแสที่วิ่งผ่านทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็นจะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับกรณีของทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี

7.3 โหมดการทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดสามารถทำงานหลักๆ ได้ 3 โหมด หรือ 3 แบบ ขึ้นอยู่กับการบ่อนไฟตรงรอยต่อของทรานซิสเตอร์ว่าจะป้อนไฟตรง (DC) ให้กับทรานซิสเตอร์ดังกล่าว เพื่อกำหนดโหมดในการทำงาน นั้นเราเรียกว่า การไบอัส (bias) เนื่องจากทรานซิสเตอร์ทั้งสองแบบในรูปที่ 7.1 เปรียบเสมือนไดโอดที่ต่อชนกัน โดยมีขาเบสเป็นขาร่วมของชาแอนด (กรณีแบบเอ็นพีเอ็น) กับชาแคโทด (กรณีชนิดพีเอ็นพี) ดังแสดงในรูปที่ 7.2 ดังนั้นการไบอัสไฟตรงเพื่อให้ได้โหมดการทำงานที่ต้องการจึงขึ้นอยู่กับว่าจะป้อนไบอัสแบบตรง (forward bias) หรือไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ให้กับรอยต่อของทรานซิสเตอร์ระหว่างขาเบส-คอลเล็กเตอร์และระหว่างขาเบส-อิมิตเตอร์ ในลักษณะใด ดังแสดงในตารางที่ 7.1



(ก) ชนิดเอ็นพีเอ็น

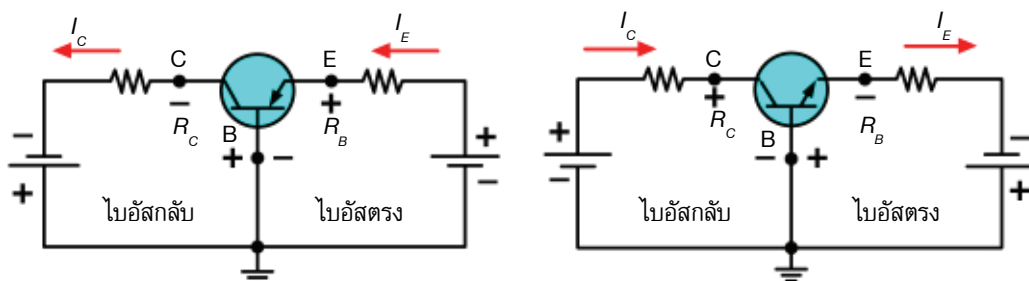
(ข) ชนิดพีเอ็นพี

รูปที่ 7.2 ลักษณะโครงสร้างของทรานซิสเตอร์เมื่อเทียบกับไดโอด

ตารางที่ 7.1 โหมดการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับการทำงานของทรานซิสเตอร์

การไบอัสรอยต่อของทรานซิสเตอร์ โหมดในการทำงาน	รอยต่อเบส - อิมิตเตอร์ (Base - Emitter Junction)	รอยต่อเบส - คอลเลกเตอร์ (Base - Collector Junction)
1. โหมดในการขยายสัญญาณ (active mode)	ไบอัสตรง	ไบอัสย้อนกลับ
2. โหมดอิ่มตัว (saturation mode)	ไบอัสตรง	ไบอัสตรง
3. โหมดคัตออฟ (cut-off mode)	ไบอัสย้อนกลับ	ไบอัสย้อนกลับ

จากตารางที่ 7.1 จะเห็นว่าการทำงานของทรานซิสเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับการทำงานของไบอัสให้เหมาะสมกับรอยต่อระหว่างขาเบส-อิมิตเตอร์ และระหว่างขาเบส-คอลเลกเตอร์ ซึ่งผลการทำงานของแต่ละโหมดจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่ในที่นี้เพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้น พิจารณารูปที่ 7.3 ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดขยายสัญญาณ ทั้งนี้เพราะที่ระหว่างขาเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะถูกไบอัสตรง ขณะที่ระหว่างขาเบส-คอลเลกเตอร์ถูกไบอัสย้อนกลับ ดังนั้น จะเห็นว่าการต่อเบตเตอร์ภายนอกเข้าสู่ขาทรานซิสเตอร์ในลักษณะต่างๆ จะกำหนดโหมดการทำงานของทรานซิสเตอร์ได้ ส่วนปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านตัวทรานซิสเตอร์จะมีความสัมพันธ์กันอย่างไรนั้น จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป



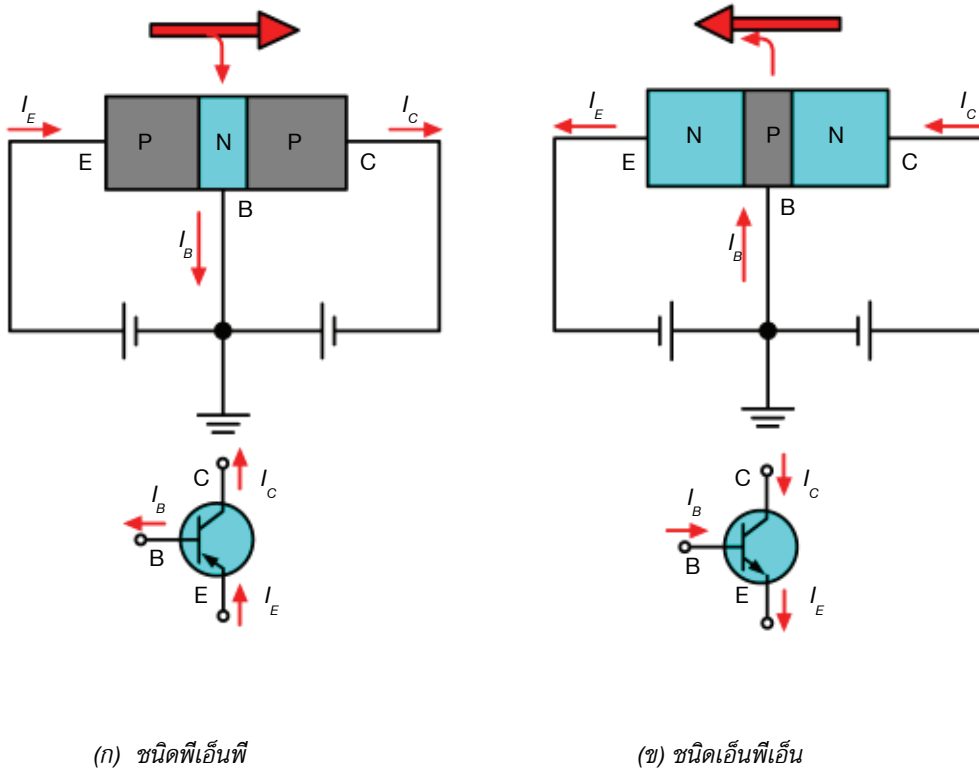
(ก) ชนิดเอ็นพีเอ็น

(ข) ชนิดเอ็นพีเอ็น

รูปที่ 7.3 การไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์

7.4 กระแสและแรงดันไฟฟ้าในทรานซิสเตอร์

เนื่องจากทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มี 3 ขา ดังนั้นจึงมีกระแสไหลผ่านแต่ละขา ดังแสดงในรูปที่ 7.4 ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสที่ขาต่างๆ ของทรานซิสเตอร์จะถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับเบอร์ของทรานซิสเตอร์ โดยดูได้จากตารางข้อมูลของทรานซิสเตอร์เบอร์นั้นๆ



(ก) ชนิดพีเอ็นพี

(ข) ชนิดเอ็นพีเอ็น

รูปที่ 7.4 ทิศทางการไหลของกระแสในทรานซิสเตอร์

เนื่องจากพาหะที่อยู่ในชั้นสารที่ขาเบสมีปริมาณน้อย (ชั้นสารที่ขาเบสมีความหนาน้อยกว่าชั้นสารที่คอลเลกเตอร์และที่ขาอิมิตเตอร์ตามลำดับ) ดังนั้นกระแสที่ขาเบสหรือ I_B จึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสที่ขาคอลเลกเตอร์ I_C ตามลำดับและกระแสที่ขาอิมิตเตอร์ I_E แต่จากรูปที่ 7.4 นี้จะเห็นว่ากระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์มีทิศทางจากขาคอลเลกเตอร์ไปยังอิมิตเตอร์ (ถ้าเป็นแบบเอ็นพีเอ็นในรูป (ข)) และมีทิศทางจากขาอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลกเตอร์ (ในแบบพีเอ็นพีในรูป (ก)) โดยมีทิศของกระแสเบสพุ่งเข้าและพุ่งออกจากตัวทรานซิสเตอร์ตามลำดับ ทำให้เราได้ความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลเข้า - ออกตัวทรานซิสเตอร์เป็น

$$I_E = I_C + I_B \quad (7.1)$$

เนื่องจาก $I_B \ll I_E$ และ I_C มากๆ โดยทั่วไปแล้วเราอาจประมาณได้ว่ากระแส I_E มีค่าเท่ากับกระแส I_C ($I_E \approx I_C$) ปริมาณกระแสในสมการที่ 7.1 นี้เป็นปริมาณกระแสตรง (DC) ซึ่งอาจจะเขียนแทนด้วยตัวพิมพ์ใหญ่และตัวห้อย (Subscript) ตัวใหญ่ ซึ่งถือเป็นปริมาณกระแสที่ใช้ในอัลตราซิสเตอร์

กระแส I_B , I_E และ I_C มีความสัมพันธ์กันด้วยค่า α และ β ดังนี้

นิยาม: 1) ค่า α เป็นอัตราส่วนของค่ากระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) ต่อกระแสอิมิตเตอร์ (I_E)

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (7.2)$$

2) ค่า β เป็นอัตราส่วนของค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ (I_C) ต่อกระแสเบส (I_B)

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (7.3)$$

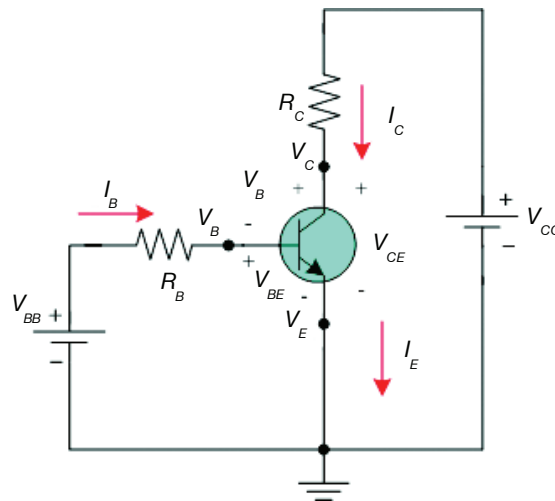
ทั้งค่า α และ β นี้จะพบได้ในตารางแสดงข้อมูล (data sheet) ของทรานซิสเตอร์เบอร์นั้นๆ โดยค่า α จะมีค่าประมาณ 1 (0.9 ถึง 0.99) ส่วนค่า β (เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าค่า h_{FE}) จะมีค่าตั้งแต่ 20-200 โดยประมาณ ค่าทั้งสองค่านี้จะใช้เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบการทำงานของทรานซิสเตอร์ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 7.2 และ 7.3 จะพบว่าอัตราส่วนของค่า α และ β ดังกล่าวก็คือ อัตราการขยายของกระแส (current gain) เพราะเป็นอัตราส่วนของปริมาณกระแสของทรานซิสเตอร์ โดยจะกล่าวอีกครั้งในหัวข้อโหมดการทำงานแบบขยายสัญญาณ

สำหรับแรงดันไฟฟ้าตรงที่ตกคร่อมตัวทรานซิสเตอร์จะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อเบสต่อที่ภายนอกกับตัวต้านทานเข้ากับทรานซิสเตอร์ ตัวอย่างเช่น ถ้าเรามีวงจรวอร์ไบอัสทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 7.5 เราสามารถหาแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ได้ดังนี้

จากรูปจะเห็นว่าที่ขาอิมิตเตอร์ต่อลงกราวด์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ขาอิมิตเตอร์เมื่อเทียบกับกราวด์จึงเท่ากับศูนย์ ($V_E = 0$) ขณะที่ขาหนึ่งของ R_C ต่อเข้ากับขั้วบวกของเบสต่อเตอร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ V_{CC} ดังนั้นเมื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม R_C ซึ่งเท่ากับ $I_C R_C$ ดังแสดงในรูปจะได้ว่า

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (7.4)$$

โดยที่ V_C คือแรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์เทียบกับกราวด์



รูปที่ 7.5 การหาค่า แรงดันไฟฟ้าที่จุด V_E , V_B และ V_C

พิจารณาการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขาเบสหรือ V_B โดยเทียบกับกราวด์ สามารถหาได้ในลักษณะเช่นเดียวกันกับ V_C จากรูปจะเห็นว่า

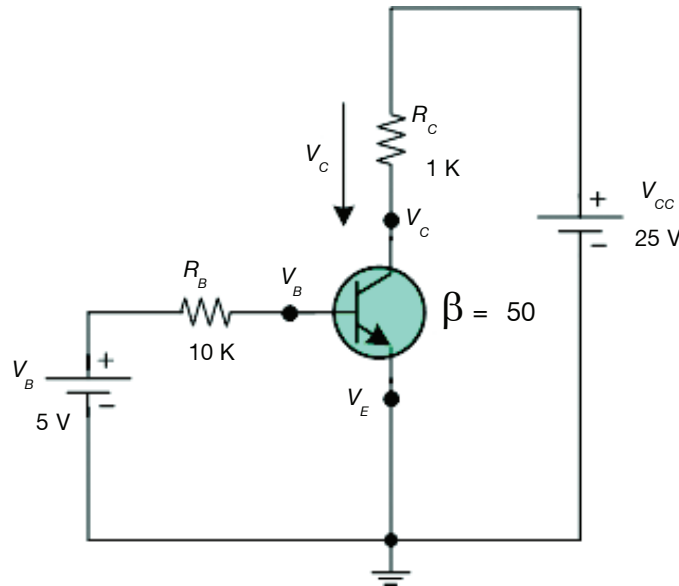
$$V_B = V_{BE} + V_E \quad (7.5)$$

ในกรณีวงจรรูปที่ 7.5 เนื่องจากไม่มีความต้านทาน R_E ต่อที่ขาอิมิตเตอร์ นั่นคือ $V_E = I_E R_E = 0$ ดังนั้นจึงได้ $V_B = V_{BE}$ และเนื่องจากรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ เป็นแบบเดียวกันกับรอยต่อพีเอ็นของไดโอด ดังนั้นเมื่อต่อขั้วเบสต่อเตอร์ V_{BB} ดังรูปที่ 7.5 จึงทำให้เกิดไบอัสตรงที่รอยต่อ ซึ่งจะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมดังนี้

$$V_{BE} = 0.7 \text{ โวลต์} \quad (7.6)$$

ค่า $V_{BE} = 0.7$ โวลต์จะเป็นค่าแรงดันคงที่ของทรานซิสเตอร์ทุกตัว (ที่ทำจากซิลิกอน) เช่นเดียวกันกับในทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี จะมีค่าดังกล่าวเป็น $V_{EB} = 0.7$ โวลต์ เช่นกัน (สังเกตการกลับขั้วแรงดันไฟฟ้า V_{EB} เทียบกับ V_{BE} ในกรณีของทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น)

ตัวอย่างที่ 7.1 จงหาค่ากระแส I_B I_C I_E V_B และ V_C ของวงจรทรานซิสเตอร์ต่อไปนี้กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ดังกล่าวมีค่า $\beta = 50$



วิธีทำ เนื่องจากทรานซิสเตอร์ในวงจรเป็นชนิดเอ็นพีเอ็น ดังนั้น $V_{BE} = 0.7$ โวลต์ และไม่มี R_E ต่อที่ขาอีมิเตอร์ จะได้ $V_B = V_{BE} = 0.7$ โวลต์ ทำให้เราได้แรงดันที่ตกคร่อม $R_B = V_{BB} - V_B$ ซึ่งสามารถหากระแสเบสได้ดังนี้

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_B}{R_B} = \frac{5\text{ V} - 0.7\text{ V}}{10\text{ K}\Omega} = 430\ \mu\text{A}$$

ซึ่งเมื่อหากระแสเบส I_B ได้แล้ว จะทำให้เราได้กระแสต่างๆ ตามนี้

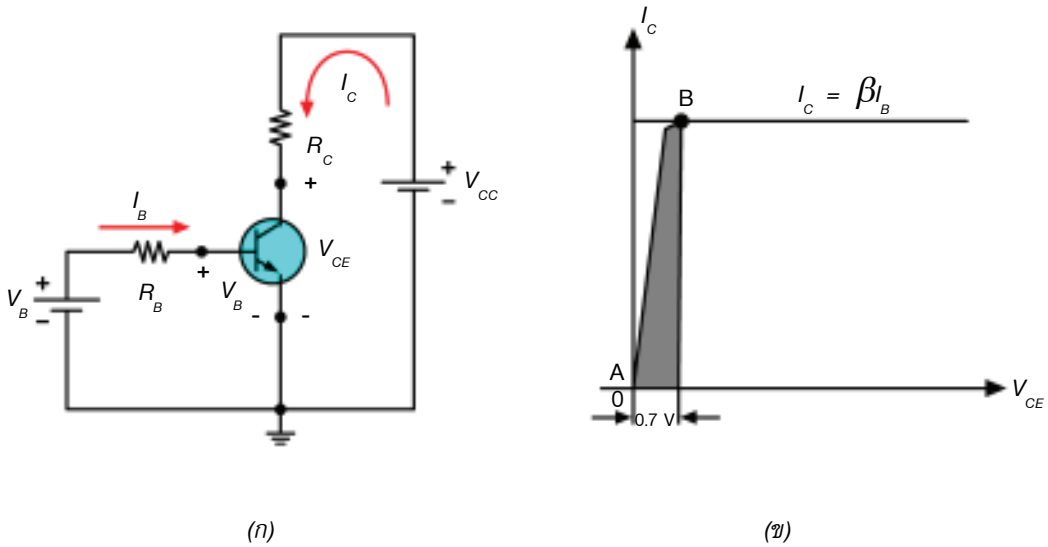
$$I_C = \beta I_B = 50 * 430\ \mu\text{A} = 21.5\ \text{mA}$$

$$I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = (\beta + 1) I_B = 51 * 430\ \mu\text{A} = 21.93\ \text{mA}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 25\ \text{V} - (21.50\ \text{mA})(1\ \text{K}\Omega) = 3.5\ \text{โวลต์}$$

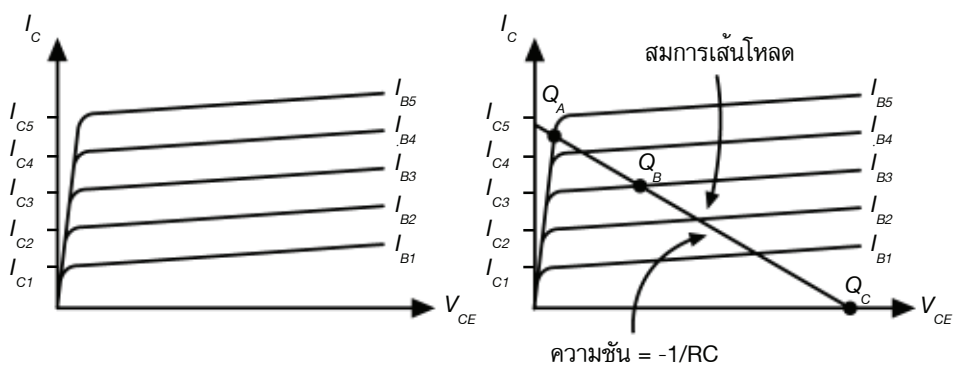
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C และแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ของทรานซิสเตอร์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตารางที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดขยายสัญญาณ เราจะต้องทำการไบอัสแรงดันไฟตรงให้รอยต่อเบส-อีมิเตอร์เป็นไบอัสตรง และรอยต่อเบส-คอลเล็กเตอร์เป็นไบอัสย้อนกลับ เมื่อพิจารณาทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 7.6 (ก) จะเห็นว่าเราได้ไบอัสเบตเตอรี่ที่ปรับค่าได้ที่ขาเบสเป็น V_{BB} และที่ขาคอลเล็กเตอร์เป็น V_{CC} โดยการปรับค่า V_{BB} หนึ่งๆ จะได้ค่ากระแสเบส I_B หนึ่งค่า ซึ่งจะส่งผลให้ได้กระแสคอลเล็กเตอร์ที่สัมพันธ์กับกระแสเบสค่านั้นๆ ด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 7.3 ($I_C = \beta I_B$) เมื่อเราหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมคอลเล็กเตอร์-อีมิเตอร์ V_{CE} จะได้ดังรูปที่ 7.6 (ข)



รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้า V_{CE}

พิจารณาในรูปที่ 7.6 (ข) ขณะที่เราปรับค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{BB} = 0$ จะได้กระแส $I_B = 0$ ด้วยเป็นผลทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทรานซิสเตอร์ $V_{CE} = 0$ จึงได้คู่ลำดับ (V_{CE}, I_C) อยู่ที่จุดเริ่มต้น $(0,0)$ จุด A แต่เมื่อปรับค่า V_{BB} ไว้คงที่ค่าหนึ่ง จะเกิดกระแส I_B ไหลผ่านรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ และเมื่อเริ่มทำการปรับแรงดันไฟฟ้า V_{CC} ให้กระแส I_C ไหล กระแส I_C จะไหลผ่านทรานซิสเตอร์มีปริมาณจากจุด A ถึงจุด B ในรูป (ข) ซึ่งเป็นจุดที่ $I_C = \beta I_B$ แต่เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้า V_{CC} ต่อไปอีกจนได้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อคอลเล็กเตอร์อิมิตเตอร์ V_{CE} มากกว่า 0.7 โวลต์ จะส่งผลให้รอยต่อเบส-คอลเล็กเตอร์เริ่มเข้าสู่การไบอัสย้อนกลับและ I_C เริ่มคงที่กล่าวคือ กระแสคอลเล็กเตอร์ I_C เริ่มเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ถึงแม้ว่า จะปรับค่าแรงดันไฟฟ้า V_{CE} เพิ่มขึ้นอีกเท่าไร กระแส I_C ก็จะไม่มากไปกว่านี้แล้ว ทรานซิสเตอร์จึงเริ่มทำงานในโหมดขยายสัญญาณ ดังนั้นจะเห็นว่าค่ากระแส I_B หนึ่งๆ ซึ่งได้จากการปรับแรงดันไฟฟ้า V_{BB} จะมีกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 7.6 (ข) ซึ่งถ้าเราปรับค่าแรงดันไฟฟ้า V_{BB} ให้ได้กระแสเบส I_B หลายๆ ค่า จะไดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C และแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ดังแสดงในรูปที่ 7.7 (ก)



(ก) $I_{B1} < I_{B2} < \dots < I_{B5}$

(ข) แสดงสมการเส้นโหลด

รูปที่ 7.7 กระแส I_B ต่างๆ รวมทั้งสมการเส้นโหลด

เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 7.6 (ก) อีกครั้ง จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้า V_{CC} จะมีค่าเป็น

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

ซึ่งเมื่อทำการจัดรูปใหม่จะได้

$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{1}{R_C} V_{CC} \quad (7.7)$$

สมการที่ 7.7 นี้เป็นสมการเส้นตรง เมื่อเทียบกับสมการเส้นตรง $y = mx - c$ จะเห็นว่าค่า $-\frac{1}{R_C}$ ในสมการที่ 7.7 จะเป็นค่าความชันจากความต้านทาน R_C ในวงจรรูปที่ 7.6 (ก) เปรียบ R_C เสมือนโหลดของวงจรทรานซิสเตอร์ ดังนั้นสมการที่ 7.7 นี้ จึงเรียกว่าสมการเส้นโหลด (load line equation) ซึ่งนำไปเขียนได้ดังรูปที่ 7.7 (ข) จะเห็นว่าความชัน (slope) ของสมการเส้นโหลดนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าโหลด R_C เมื่อลากสมการเส้นโหลดนี้ไปตัดกับกระแสเบส I_B ต่างๆ จะได้จุดที่เราเรียกว่า “จุดทำงาน” (Quiescent) หรือ Q-point ซึ่งเป็นจุดที่กำหนดว่าทรานซิสเตอร์ จะทำงานในโหมดใด ในรูปที่ 7.7 (ข) ได้แสดงจุด Q ดังกล่าวไว้ 3 จุดด้วยกัน คือ จุด Q_A เป็นจุดที่เส้นโหลดตัดกับกระแสเบส I_B (ซึ่งมีค่าสูงสุดในวงจรรูปนี้) จุดทำงานที่ Q_A นี้ ยังเป็นจุดที่รอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์ถูกไบอัสตรงอยู่ ดังนั้นถ้าเราออกแบบวงจรให้มีจุดทำงานของวงจรอยู่บริเวณจุด Q_A ดังแสดงในรูปที่ 7.7 (ข) จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดอิ่มตัว (saturation mode) แต่ถ้าเราปรับแรงดันไฟฟ้า V_{BB} ให้ได้กระแสเบส I_B มาตัดกับสมการ เส้นโหลดบริเวณกึ่งกลางของกราฟ (แถวๆ จุด Q_B) จะทำให้ V_{CE} มากกว่า 0.7 โวลต์ ซึ่งนั่นคือแรงดันที่รอยต่อระหว่างเบส-คอลเลกเตอร์ได้ถูกไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นจุดทำงานบริเวณแถวๆ Q_B จะเป็นจุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดขยายสัญญาณ (active mode) ขณะที่จุดทำงานจุดสุดท้ายในรูป คือบริเวณจุด Q_C ซึ่งจะมีกระแสเบสไหลน้อยมาก จนแทบกล่าวได้ว่า $I_B \approx 0$ เป็นจุดที่เปรียบเสมือนกับว่าเป็นการปรับค่า $V_{BB} \approx 0$ ทำให้ไม่มีกระแสเบส I_B จึงส่งผลให้ไม่มีกระแสคอลเลกเตอร์ นั่นคือ $I_C = \beta I_B \approx 0$ โดยการเลือกจุดทำงานบริเวณจุด Q_C นี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์ถูกไบอัสย้อนกลับบริเวณรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ กล่าวคือ $V_{BE} < 0.7$ โวลต์ ทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่อยู่ในสภาวะนำกระแสได้ เรียกโหมดการทำงานบริเวณจุดทำงาน Q_C ว่า คัดออฟโหมด (cut-off)

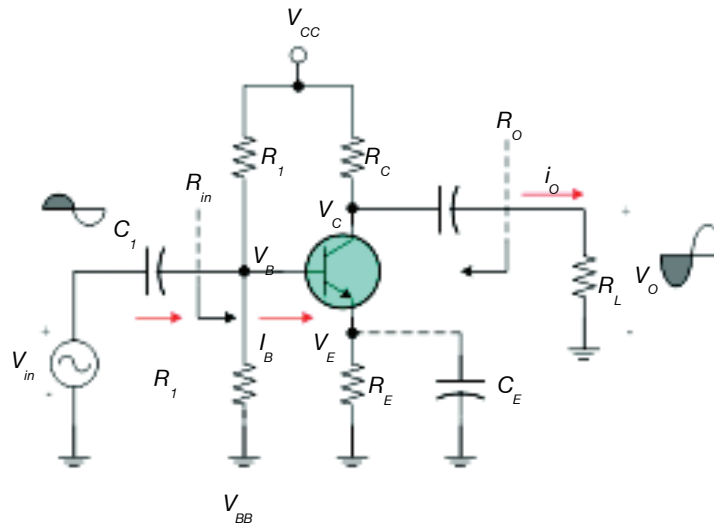
ที่กล่าวมาจะเห็นว่าทรานซิสเตอร์สามารถทำงานในโหมดที่ต่างๆ กันได้ ขึ้นอยู่กับการเลือกจุดทำงานหรือ Q-point ว่าอยู่บริเวณใดของกราฟ $I_C - V_{CE}$ ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงคุณสมบัติของการทำงานในแต่ละโหมด โดยจะเน้นโหมดขยายสัญญาณ เพราะเป็นโหมดทำงานที่พบบ่อยสุด เช่นในวงจรเครื่องเสียง เป็นต้น

7.6 การทำงานในโหมดขยายสัญญาณของทรานซิสเตอร์

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่า การเลือกจุดทำงานบริเวณกึ่งกลางของสมการเส้นโหลดในกราฟระหว่าง $I_C - V_{CE}$ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดขยายสัญญาณ ซึ่งคำว่า “ขยายสัญญาณ” นั้น หมายความว่าวงจรจะทำให้เกิดอัตราขยาย (gain) โดยที่เป็นอัตราขยายแรงดัน (voltage gain) หรือเป็นอัตราขยายกระแส (current gain) ก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรและการนำสัญญาณออกไปใช้ว่าจะเป็นกระแสหรือแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากการคำนวณและสมการต่างๆ ในหัวข้อนี้ค่อนข้างยุ่งยาก จึงขอกล่าวเฉพาะประเด็นสำคัญและสรุปสำหรับวงจรขยายแบบต่างๆ รวมถึงคุณสมบัติของวงจรขยายเหล่านั้นด้วย โดยอาจจะละเว้นที่มาของสมการเหล่านั้น

ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในโหมดขยายสัญญาณนั้น (ไม่ว่าจะเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็นหรือชนิดพีเอ็นพี) มีวงจรหลักๆ อยู่สามแบบ ดังนี้คือ

7.6.1 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter)



รูปที่ 7.8 วงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม

วงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมแสดงในรูปที่ 7.8 มีการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขาเบส (เมื่อเทียบกับอิมิตเตอร์ที่ต่อลงกราวด์) และดึงสัญญาณเอาต์พุตออกที่ขาคอลเลกเตอร์ (เทียบกับขาอิมิตเตอร์) เนื่องจากสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณเอาต์พุต V_o วัดเทียบกับขาอิมิตเตอร์ร่วมกันสองด้าน ดังนั้นวงจรนี้จึงเรียกว่าวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วม ซึ่งวงจรขยายสัญญาณแบบที่เหลือนี้ก็มีแนวทางการเรียกชื่อวงจรเช่นเดียวกันกับอิมิตเตอร์ร่วม R_1 และ R_2 ในวงจรทำหน้าที่สร้างแรงดันไบอัส V_B เพื่อทำให้เกิดกระแสเบส I_B ในการพิจารณาวงจรไบอัส ซึ่งเป็นไฟฟ้กระแสตรง (DC) capacitor หรือตัวเก็บประจุทุกตัวจะถูกเปิดวงจร (open circuit) แต่ขณะที่วงจรทำงานในสัญญาณไฟสลับ (AC) สัญญาณอินพุต V_{in} จะถูกป้อนจากขาเบสและขยายออกเป็นแรงดันไฟฟ้า V_o ที่ขาคอลเลกเตอร์ ซึ่งเป็นขาเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมนี้จะพบบ้อยสุดในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป อัตราการขยายแรงดัน (voltage gain หรือ A_v) และอัตราขยายกระแส (current gain หรือ A_i) ของวงจรนี้มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 คุณสมบัติของวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม

อัตราการขยายแรงดันไฟฟ้า (voltage gain A_v)	อัตราการขยายกระแส (current gain: A_i)	ความต้านทานทางฝั่งอินพุต (R_i)	ความต้านทานทางฝั่งเอาต์พุต (R_o)	ลักษณะเฟสของสัญญาณ
				กลับเฟส

จากตารางที่ 7.2 จะเห็นว่าค่าบางค่าซึ่งเป็นค่าที่ยังไม่ได้กล่าวถึงมาก่อน ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง จึงขอละที่มาของสมการแต่ละสมการ โดยตัวแปรต่างๆ จะมีคำอธิบายดังนี้

$$\beta = \text{อัตราส่วนระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ } I_C \text{ กับกระแสเบส } (I_B) \text{ (สมการที่ 7.3)}$$

$$r_{\pi} = \text{ค่าความต้านทานที่ของวงจรขยาย ขึ้นอยู่กับการไบอัสกระแสคอลเลกเตอร์ โดยที่}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta V_T}{I_C}$$

โดยที่ $I_C = \beta I_B$ และ $V_T = 26 \text{ mV}$ ที่อุณหภูมิ 300K (อุณหภูมิห้อง) ถือเป็นค่าคงที่อีกตัวของวงจรขยายแบบทรานซิสเตอร์

R_i = ค่าความต้านทานที่มองจากทางฝั่งอินพุต (ขาเบส) เข้าไปในวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมมีค่าค่อนข้างปานกลางเท่าไร (ดูรูปประกอบ)

R_o = ค่าความต้านทานที่มองจากทางฝั่งเอาต์พุต (ขาคอลเลกเตอร์) เข้าไป ซึ่งมีค่าขึ้นกับค่า R_C ค่าว่าลักษณะเฟสของสัญญาณ หมายถึง สัญญาณไฟกระแสสลับ (AC) ที่มีมุมเฟสที่ต่างๆ กัน ซึ่งจะเป็นได้ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ในวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมนั้นจะมีเฟสสัญญาณเอาต์พุตกลับเฟสกับของสัญญาณอินพุต กล่าวคือถ้าใส่สัญญาณด้านฝั่งบวกไป จะได้สัญญาณเอาต์พุตออกทางด้านฝั่งลบ (จึงเรียกว่า กลับเฟส)

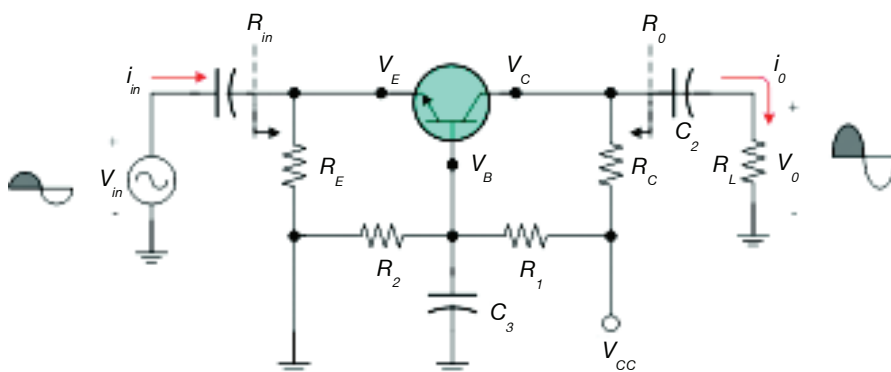
สำหรับตัวเก็บประจุ C_E ในรูปจะใส่หรือไม่ใส่ก็ได้ ถ้าใส่ C_E ดังรูป จะเป็นวงจรขยายแบบบายพาสหมด (fully bypass) ซึ่งจะทำให้เทอม $(\beta + 1) R_E$ ในตารางที่ 7.2 เป็นศูนย์ เป็นผลทำให้วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมนี้มีค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น แต่สัญญาณจะไม่มีเสถียรภาพถ้าไม่ใส่ C_E ในรูปที่ 7.8 จะเป็นวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมแบบไม่บายพาส (unbypassed) ซึ่งจะมีค่าต่างๆ ดังตารางที่ 7.2

วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมนี้จะพบได้ในวงจรเครื่องเสียงหรือวงจรขยายสัญญาณต่างๆ บ่อยมาก เพราะสามารถขยายทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า วงจรขยายแบบนี้จะทำงานที่ความถี่สูงปานกลาง เมื่อพิจารณาจากสมการแสดงอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้า (voltage gain)

$$A_V = \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{R_E + (\beta + 1) R_E}$$

จะเห็นว่าถ้าอยากทำให้มีอัตราการขยายเพิ่มขึ้นสามารถใส่ R_L มากขึ้น หรือลดค่า R_E ลง ซึ่งเราจะได้ทดลองในห้องปฏิบัติการต่อไป

7.6.2 วงจรขยายแบบเบสร่วม (Common Base)



รูปที่ 7.9 วงจรแบบเบสร่วม

รูปที่ 7.9 เป็นวงจรขยายแบบเบสร่วม (common base) ซึ่งมีสัญญาณอินพุตป้อนเข้าที่ขาอิมิตเตอร์และสัญญาณเอาต์พุตถูกดึงออกจากขาคอลเลกเตอร์ โดยมีขาเบสเป็นขาที่ถูกใช้เทียบแรงดันไฟฟ้าร่วมกันทั้งสองฝั่งวงจรขยายแบบเบสร่วม มีอัตราการขยายกระแสไม่เต็ม (current gain $A_i \approx 1$) และอัตราการขยายแรงดัน (voltage gain หรือ A_v) ค่อนข้างสูง สัญญาณเอาต์พุตจะเป็นเฟสเดียวกันกับสัญญาณอินพุต คุณสมบัติต่างๆ ของวงจรขยายแบบเบสร่วม มีแสดงดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 คุณสมบัติของวงจรขยายแบบเบสร่วม

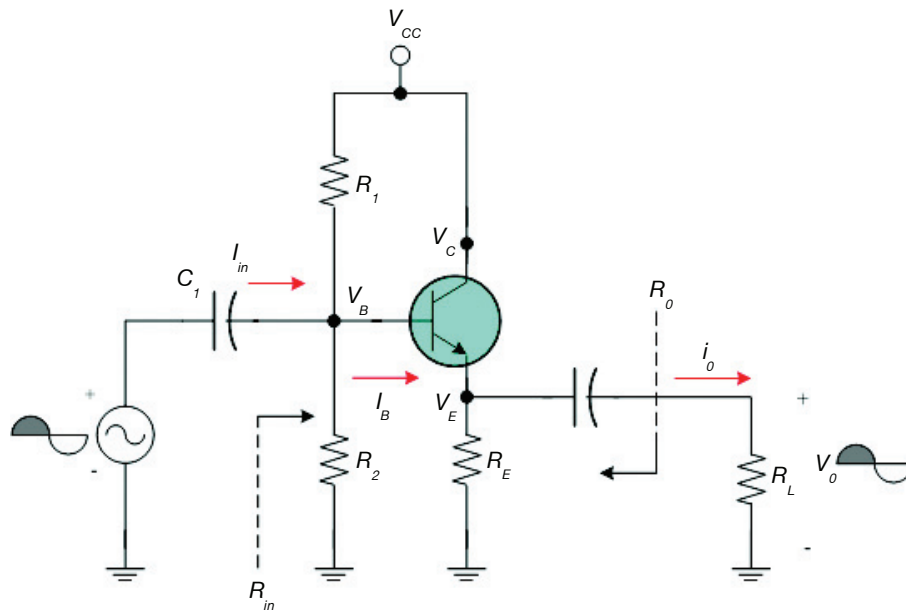
อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า	อัตราขยายกระแส	ความต้านทานทางฝั่งอินพุต (R_i)	ความต้านทานทางฝั่งเอาต์พุต (R_o)	ลักษณะเฟสของสัญญาณ
			$R_o = (R_C // R_L)$	ไม่กลับเฟส

จากตารางที่ 7.3 จะเห็นว่ามีค่า R_E เป็นค่าคงที่ของวงจรแบบเบสร่วมซึ่งค่า R_E นี้จะมีค่าเท่ากับ $\frac{V_T}{I_E}$ เมื่อ $\alpha = \frac{I_C}{I_B}$ (สมการที่ 7.2) และ $V_T = 26 \text{ mv}$ ที่อุณหภูมิ 300 K โดยความสัมพันธ์ระหว่าง α และ β จะเป็น

$$\alpha = \left[\frac{\beta}{\beta + 1} \right]$$

จากสมการที่ 7.10 จะเห็นว่าวงจรขยายแบบเบสร่วมจะมีค่า R_E น้อยมาก (ไม่เกิน 100 Ω) ทำให้วงจรขยายแบบเบสร่วมนี้ มีค่าความต้านทานที่มองจากทางด้านอินพุต (R_i) ค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นวงจรขยายแรงดันมากนัก แต่อย่างไรก็ตาม วงจรขยายแบบเบสร่วมสามารถทำงานที่ความถี่สูงๆ ได้ดี ซึ่งจะพบได้ในวงจรภาคแรกๆ ของเครื่องรับวิทยุทั่วไป

7.6.3 วงจรขยายแบบคอลเลกเตอร์ร่วม (Common Collector หรือ Emitter follower)



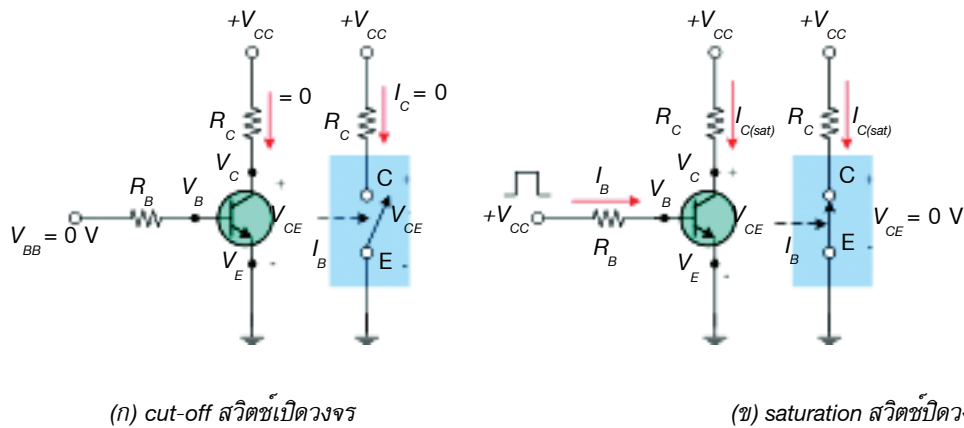
รูปที่ 7.10 วงจรขยายแบบคอลเลกเตอร์ร่วม

ในรูปที่ 7.10 เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบคอลเลกเตอร์ร่วม ซึ่งมีการป้อนสัญญาณอินพุต V_{in} เข้าที่ขาเบสและดึงสัญญาณเอาต์พุตออกจากขาอีมิเตอร์ สัญญาณทั้งสองจะถูกวัดเทียบกับขาคอลเลกเตอร์ ซึ่งจะต่อลงกราวด์ ขณะที่วงจรทำงานในสภาวะกระแสสลับ (AC) คุณสมบัติหลักๆ ของวงจรขยายแบบนี้จะพบว่า แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตจะเท่ากับที่สัญญาณอินพุตป้อนให้ กล่าวคือ ค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (voltage gain หรือ A_v) จะมีค่าสูงปานกลาง เนื่องจากวงจรขยายชนิดนี้มีการดึงสัญญาณออกจากขาอีมิเตอร์ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วงจรขยายสัญญาณแบบตามอีมิเตอร์ (emitter follower)

คุณสมบัติเด่นของวงจรขยายแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมก็คือ มีค่าความต้านทานที่มองจากฝั่งอินพุตสูง ขณะที่ค่าความต้านทานที่มองจากทางฝั่งเอาต์พุตค่อนข้างต่ำ และเนื่องจากมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ประมาณเท่ากับ 1 จึงเหมาะที่จะนำมาเป็นวงจรกันชน (buffer) สำหรับแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้แยกส่วนวงจรออกจากกันได้ดี

7.6 การทำงานเป็นสวิตช์ของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์นอกจากจะทำงานในโหมดขยายสัญญาณ ซึ่งมีวงจรแบบต่างๆ ดังในหัวข้อที่ 7.6 แล้วยังสามารถทำหน้าที่เหมือนสวิตช์เปิด-ปิดวงจรได้ด้วย การทำงานลักษณะดังกล่าวคือการประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์ในโหมดอิ่มตัว (saturation mode) และโหมดคัตออฟ (cut-off mode) ดังแสดงในรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 วงจรทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นสวิตช์

ในรูปที่ 7.11 (ก) เป็นการ工作在สภาวะสวิตช์ที่เปิดวงจร (open circuit) ซึ่งทำได้โดยการให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ V_{BE} น้อยกว่า 0.7 โวลต์ เป็นผลให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดคัตออฟ ทำให้วงจรเป็นเสมือนสวิตช์ที่เปิดวงจรและ $I_C = 0$ โดยที่แรงดันไฟฟ้าระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์อันเปรียบเสมือนหน้าสัมผัสของสวิตช์มีค่าเป็น

$$V_{CE} \text{ (cut-off)} = V_{CC}$$

ซึ่งเท่ากับไฟเลี้ยงวงจรทรานซิสเตอร์นั้นคือ V_{CC}

ส่วนในรูปที่ 7.11 (ข) ถ้าเราป้อนสัญญาณอินพุต V_{BB} มากพอที่จะทำให้กระแสเบส I_B มีค่ามากจนได้ $I_C = \beta I_B =$ ค่ากระแสอิ่มตัวที่ขาคอลเล็กเตอร์แล้ว จะได้ว่าทรานซิสเตอร์จะเข้าสู่โหมดการทำงานแบบอิ่มตัว (saturation mode) ทำให้วงจรทรานซิสเตอร์เป็นเสมือนสวิตช์ที่ปิดวงจรและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขาคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ $V_{CE} = 0$ ดังนั้นจึงมีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ในสภาวะสวิตช์ที่ปิดวงจรนี้เป็น $I_C(\text{sat}) = \frac{V_{CC}}{R_C}$

$$\text{ซึ่งค่ากระแสเบส } I_B \text{ อย่างน้อยที่จะทำให้เกิดสภาวะอิ่มตัวจะเท่ากับ } I_B(\text{min}) = \frac{I_C(\text{sat})}{\beta}$$

จะเห็นว่ากระแสเบสจะมากหรือน้อยนั้นสามารถกำหนดโหมดการทำงานของทรานซิสเตอร์ในแต่ละแบบได้ เนื่องจากโหมดการขยายสัญญาณจะเป็นโหมดการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่พบได้บ่อยที่สุด ดังนั้นในบทต่อไปเราจะศึกษาวงจรขยายสัญญาณแบบต่างๆ โดยใช้พื้นฐานจากหัวข้อที่ 7.6 เป็นหลัก