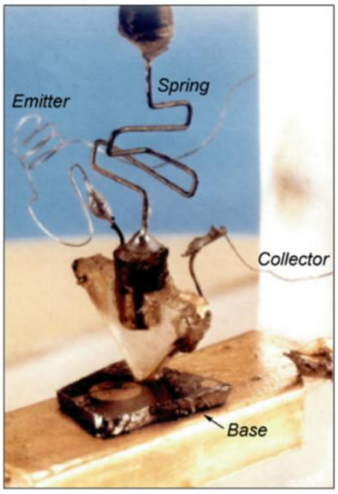
บทที่ 3
ทรานซิสเตอร์

วัตถุประสงค์

1. บอกความแตกต่างด้านโครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP ได้
2. อธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์ ในสภาวะอิ่มตัว สภาวะคัตออฟ และสภาวะขยายสัญญาณได้
3. คำนวณเบื้องต้นเกี่ยวกับวงจรทรานซิสเตอร์ชนิด NPN แบบอิมิตเตอร์ร่วมได้
4. หาค่าต่างๆ จากเส้นโหลดและกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้
5. อธิบายพฤติกรรมการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์ได้

3.1 ทรานซิสเตอร์สองรอยต่อ

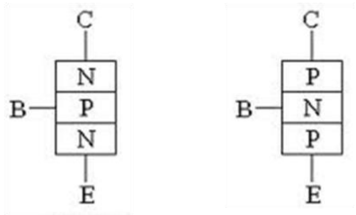


ทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อถูกค้นพบครั้งแรกโดยคณะทำงานของห้องปฏิบัติการของบริษัท เบลเทเลโฟน ในปี พ.ศ. 2490 นับได้ว่าเป็นการเปิดโลกของวิวัฒนาการการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ครั้งสำคัญของโลก ทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อเรียกว่า BJT (Bipolar junction Transistor) ทรานซิสเตอร์เหล่านี้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น วงจรขยายในเครื่องรับวิทยุและเครื่องโทรทัศน์ หรือนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ เช่น เปิด-ปิดรีเลย์เพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ เป็นต้น กลุ่มผู้ค้นพบทรานซิสเตอร์ตัวแรกของโลกประกอบด้วย John Bardeen, Walter Brattain, and William Shockley.

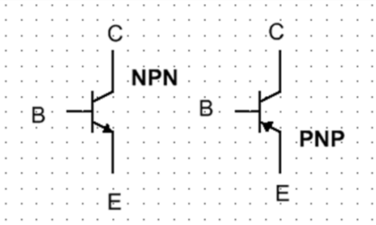
รูปที่ 3.1 ทรานซิสเตอร์ตัวแรกของโลกที่ Bell Laboratory, New Jersey ในปี พ.ศ. 2490
ที่มา: Historical materials are courtesy of AT&T Bell Laboratory

3.1.1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์

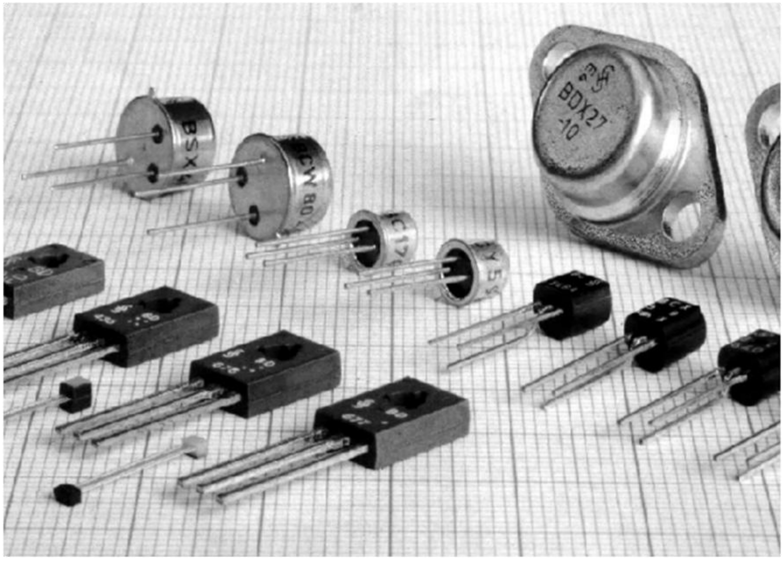
ทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อ หรือ BJT นี้ ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นต่อกัน โดย จำนวน 3 ชั้น ทำให้เกิดรอยต่อขึ้น จำนวน 2 รอยต่อ การสร้างทรานซิสเตอร์จึงสร้างได้ 2 ชนิด คือชนิดที่มีสารชนิดเอ็น 2 ชั้น หรือเรียกว่า ชนิด NPN และชนิดที่มีสารชนิดพี 2 ชั้น หรือเรียกว่า ชนิด PNP โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ดังรูป 3.2 (ก) และชนิด PNP ดังรูป 3.2 (ข)



รูป 3.2 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ NPN/PNP



รูป 3.3 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ NPN/PNP

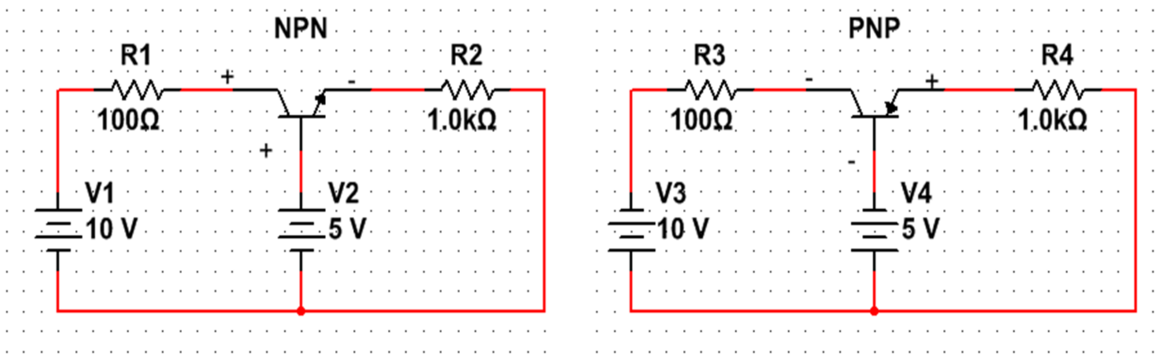


ที่มา : http://www.mikroe.com/old/books/keu/04.htm

3.1.2 การทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN และชนิด PNP เมื่อนำไปใช้งานไม่ว่าจะใช้ในวงจรขยายสัญญาณ หรือทำงานเป็นสวิตซ์ จะต้องทำการไบแอสให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ โดยใช้หลักการไบแอส ดังนี้

1. ไบแอสตรงให้กับรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส
2. ไบแอสกลับให้กับรอยต่อระหว่างคอลเลกเตอร์กับเบส

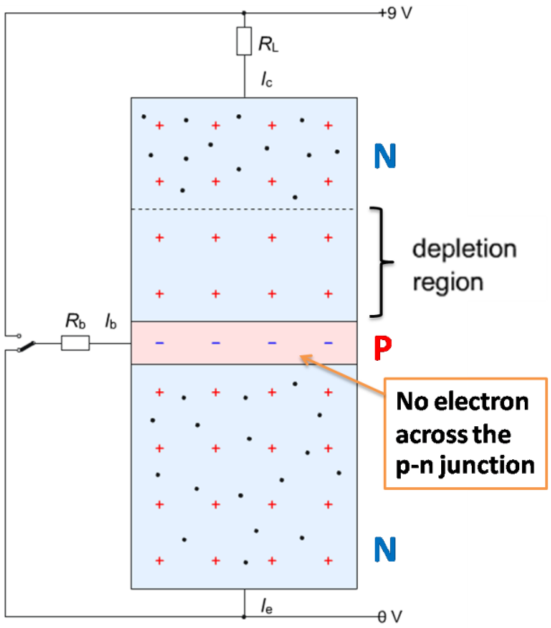


(ก) วงจรไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN (ข) วงจรไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

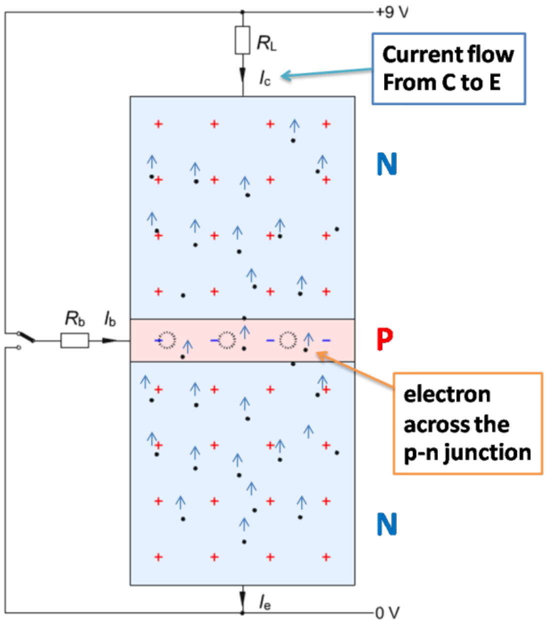
รูปที่ 3.4 การไบแอสทรานซิสเตอร์

เมื่อพิจารณาไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ดังรูป 3.4(ก) จะเห็นว่าทำการไบแอสตรงให้กับรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส โดยให้แรงดันบวกกับเบส (เพราะเบสเป็น P) และให้แรงดันลบกับอิมิตเตอร์ (เพราะอิมิตเตอร์เป็น N) เช่นเดียวกันจะต้องให้ไบแอสกลับกับรอยต่อคอลเลกเตอร์-เบส โดยให้แรงดันบวกกับคอลเลกเตอร์ (เพราะคอลเลกเตอร์เป็น N) และให้แรงดันลบกับเบส (เพราะเบสเป็น P) คือ การไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ที่ถูกต้องตามเงื่อนไข 2 ข้อที่กำหนดไว้

การไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ก็กระทำเช่นเดียวกันดังรูป 3.4(ข) จะขอยกตัวอย่างโครงสร้างภายในของทรานซิสเตอร์เพียงชนิดเดียว คือ ชนิด NPN เพื่อให้เห็นปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และ โฮล ระหว่างรอยต่อต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์เมื่อได้รับไบแอส ดังรูป 3.5 (ก), (ข)



(ก)



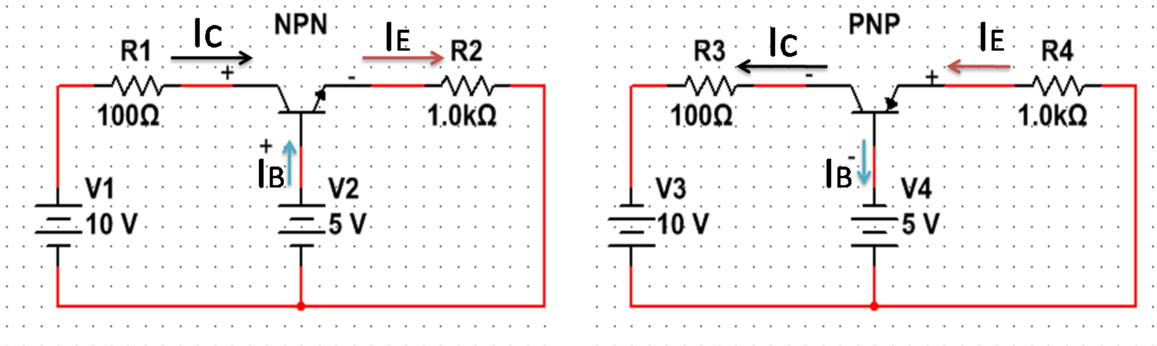
(ข)

รูปที่ 3.5 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในรอยต่อของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN เมื่อได้รับไบแอส

พิจารณาการทำงานของทรานซิสเตอร์ในรูป 3.5 (ข) เมื่อให้ไบแอสตรงกับรอยต่อเบสและอิมิตเตอร์ จะทำให้บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ B-E แคบลง และที่รอยต่อระหว่างคอลเลกเตอร์กับเบสได้ไบแอสกลับ จะทำให้บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ B-C มีความกว้างมากขึ้น จึงเกิดกระแสจำนวนเล็กน้อยไหลข้ามรอยต่อ B-E กระแสนี้เรียกว่ากระแสเบส (I_B) เป็นผลให้มีอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่อยู่ในรอยต่อ B-E ในขณะเดียวกับที่คอลเลกเตอร์บริเวณรอยต่อ B-C จะมีประจุพาหะบวกอยู่เป็นจำนวนมาก จะพยายามดึงดูดอิเล็กตรอนที่เบสข้ามรอยต่อ B-C ทำให้เกิดกระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) ไหลเป็นจำนวนมากและไหลออกจากคอลเลกเตอร์มารวมกับกระแสเบส (I_E) เป็นไปตามสมการ (3.1)

$$I_E \quad = \quad I_C + I_B \qquad .... (3.1)$$

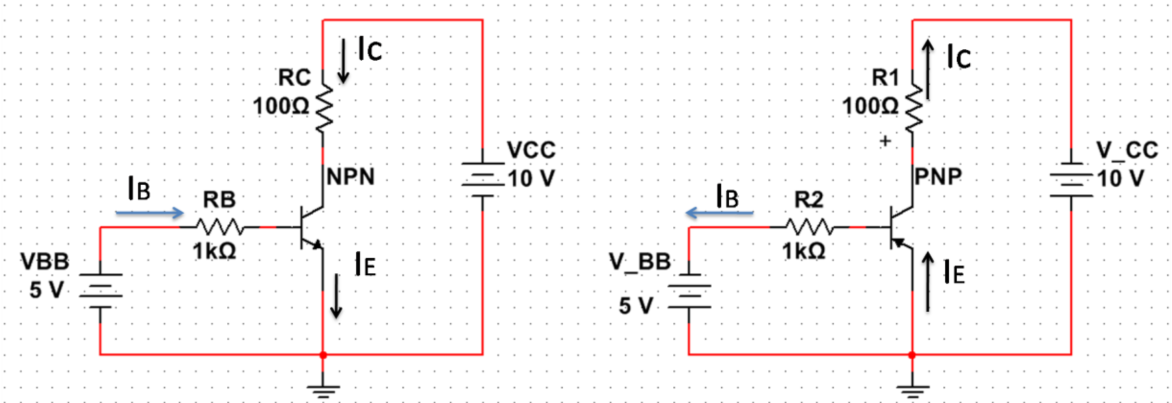
เมื่อนำทิศทางการไหลของกระแสระหว่างรอยต่อต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN และ PNP (กระแสนิยมจะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสอิเล็กตรอนที่อธิบายในรูป 3.5 (ก) และ (ข) สามารถเขียนได้ดังรูป 3-6



รูปที่ 3.6 แสดงโมเดลของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP และ
ทิศทางของกระแส I_E, I_C, I_B ที่เกิดจากการไบแอสที่ถูกต้อง

3.2 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม

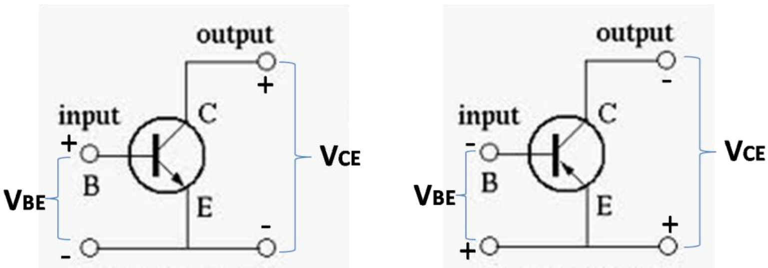
วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter Circuit หรือ CE) เป็นการต่อชุดอิมิตเตอร์ลงกับจุดดิน ดังรูป 3.7(ก) สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และรูป 3.7 (ข) สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP การไบแอสวงจรอิมิตเตอร์ร่วมก็เช่นเดียวกับวงจรเบสร่วม คือ ไบแอสอินพุตด้วยไบแอสตรงแบะไบแอสเอาต์พุตด้วยไบแอสกลับ โดยแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตไบแอส คือ V_{BB}และแหล่งจ่ายแรงดันเอาต์พุตไบแอส คือ V_{CC}



(ก) ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN (ข) ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

รูปที่ 3.7 แสดงวงจรไบแอสทรานซิสเตอร์ในวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

ดังนั้นลักษณะการเกิดขั้วแรงดันตกคร่อมที่ขา B C และ E รวมทั้งทิศทางการไหลของกระแสอินพุต (I_B) และกระแสเอาต์พุต (I_C) ดังรูป 3.8 (ก) สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วม และรูป 3.8 (ข) สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วม



(ก) NPN (ข) PNP

รูปที่ 3.8 แสดงขั้วแรงดันอินพุต เอาต์พุต และกระแสอินพุตและเอาต์พุตในวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

3.3.1 ค่าดีซี เบตา (β) และค่าดีซีแอลฟา (α)

ค่าเบตาหรือ β หมายถึง อัตราส่วนระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์(I_C) กับกระแสเบส (I_B) หรืออัตราส่วนระหว่างกระแสเอาต์พุต กับอินพุต หรือ เรียกว่าอัตราขยายทางกระแส(Current gain) ดังสมการ 3.2

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \qquad \text{...... } (3.2)$$

ทรานซิสเตอร์โดยทั่วไปจะมีค่า β อยู่ระหว่าง 20-200 หรือมากกว่า จากคู่มือของทรานซิสเตอร์อาจเรียกค่า β ว่า h_{fe} ส่วนค่า α ซึ่งหมายความถึงสัดส่วนระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์(I_C) กับกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) ในวงจรอิมิตเตอร์ร่วมปกติจะมีค่าไม่เกิน 1 คือ มีค่าระหว่าง 0.95-0.99 ดังสมการ *3.3*

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \qquad \text{...... } (3.3)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α และ β

เมื่อกำหนดให้ $I_E = I_C + I_B$ (หารตลอดด้วย I_C)

ดังนั้น $$\frac{I_E}{I_C} = \frac{I_C}{I_C} + \frac{I_B}{I_C}$$

$$\frac{I_E}{I_C} = 1 + \frac{I_B}{I_C}$$

แต่ $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ และ $\alpha = \frac{I_C}{I_E}$ ดังนั้น

$$\frac{1}{\alpha} = 1 + \frac{1}{\beta}$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\beta + 1}{\beta}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \qquad \text{...... } (3.4)$$

จากสมการ (3.3) เราสามารถหาค่า α ได้เมื่อรู้ค่า β ในทำนองเดียวกันสามารถหาค่าβ ได้จากค่า α ตามสมการ (*3.4*)

$$\alpha(\beta+1) = \beta$$

$$\alpha \cdot \beta + \alpha = \beta$$

$$\alpha = \beta - \alpha \cdot \beta$$

$$\beta(1-\alpha) = \alpha$$

$$\therefore \beta = \frac{\alpha}{1+\alpha} \qquad \text{..... } (3.5)$$

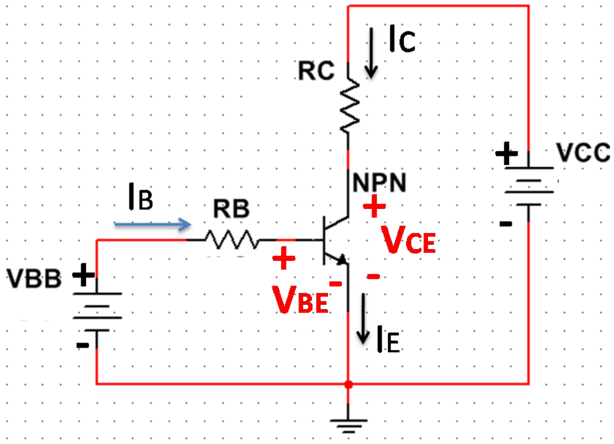
ตัวอย่าง *3.1* คำนวณหาค่า β และ α ของทรานซิสเตอร์เมื่อกระแส $I_B = 100\mu A$ และ $I_C = 8\ mA$

วิธีทำ $$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{8mA}{100\mu A} = 80$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} = \frac{80}{81} = 0.987$$

ตอบ β = 80 และ α = 0.987

การวิเคราะห์วงจรไฟตรง วงจรไบแอสทรานซิสเตอร์เมื่อวิเคราะห์แบบไฟตรง ดังรูป 3.10 พารามิเตอร์สำคัญที่ต้องพิจารณาคือ กระแส I_B , I_E , I_C และแรงดัน V_{BE}, V_{CB} และ V_{CE}



รูปที่ 3.9 แสดงการไบแอสทรานซิสเตอร์ NPN การกำหนดกระแสและแรงดันในวงจร

การกำหนดชื่อแหล่งจ่ายไบแอส นิยมกำหนด V_{BB} เป็นแหล่งจ่ายไบแอสตรงระหว่างเบสและอิมิตเตอร์ สำหรับ V_{CC} นิยมกำหนดเป็นแหล่งจ่ายไบแอสกลับให้กับรอยต่อคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์ จากรูป 3.9 จะเห็นว่า เมื่อเบสและอิมิตเตอร์ได้รับไบแอสตรงจะเกิดแรงดันตกคร่อมรอยต่อดังนี้

$$V_{BE} = 0.7\ V \qquad ....(3.6)$$

แรงดันตกคร่อม R_B คือ

$$V_{RB} = V_{BB} - V_{BE}$$

และ $$V_{RB} = I_B R_B$$

ดังนั้น $$I_B R_B = V_{BB} - V_{BE}$$

หรือ $$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \qquad ....(3.7)$$

จากสมการ (3.3) หาค่า I_E ได้จาก

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha}$$

จากสมการ (3.2) หาค่า I_C ได้จาก

$$I_C = \beta I_B$$

ดังนั้นแรงดันตกคร่อม R_C คือ

$$V_{RC} = I_C R_C$$

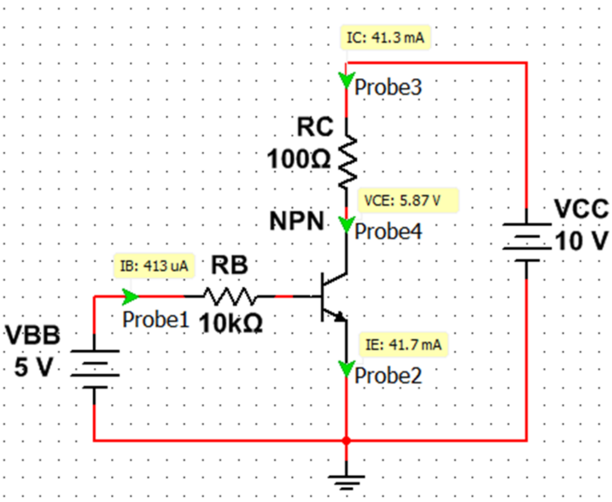
แรงดันตกคร่อมรอยต่อคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์ คือ

$$V_{CE} = V_{\alpha} - I_C R_C \qquad ....(3.8)$$

แรงดันตกคร่อมรอยต่อคอลเลกเตอร์กับเบส คือ

$$V_{CB} = V_{CC} - V_{BE} \qquad ....(4.9)$$

ตัวอย่าง 3-2 จากวงจรในรูป 3-10 จงหาค่า*ของ* $I_B, I_C, I_E, \alpha, V_{CE}$ และ V_{CB} ถ้าทรานซิสเตอร์ในวงจรมีค่า β*= 100*



รูป *3-10*

วิธีทำ

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$= \frac{5V - 0.7V}{10k\Omega} = 430\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$= (100)(430\ \mu A) = 43\ mA$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$= \frac{100}{101} = 0.99$$

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha}$$

$$= \frac{43mA}{0.99} = 43.43\ mA$$

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

$$= 10V - (43mA)(100\Omega)$$

$$= 10V - 43V = 5.7V$$

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$

$$= 5.7V - 0.7V = 5V$$

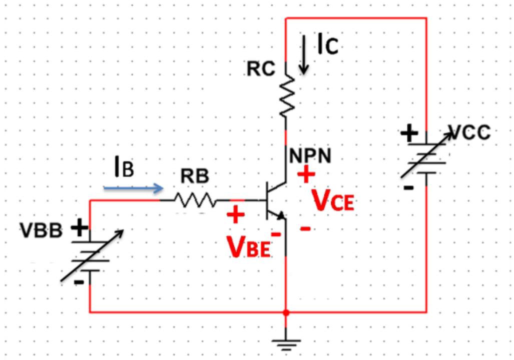
ตอบ $I_B = 430\ \mu A$, $I_C = mA$, $I_E = 43.43\ mA$, $\alpha = 0.99$, $V_{CE} = 5.7V$, $V_{CE} = 5V$

3.3.2 คุณลักษณะทางเอาต์พุตของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

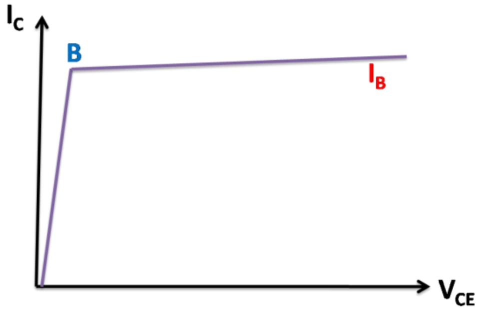
เส้นกราฟนี้จะแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันที่คอลเลกเตอร์โดยที่มีกระแสเบส เป็นตัวควบคุมตามความสัมพันธ์ของสมการ ซึ่งเป็นสมการที่สภาวะ **แอ็คตีฟ (Active region) คือ สภาวะขยายสัญญาณ**

$$I_C = \beta\ I_B$$

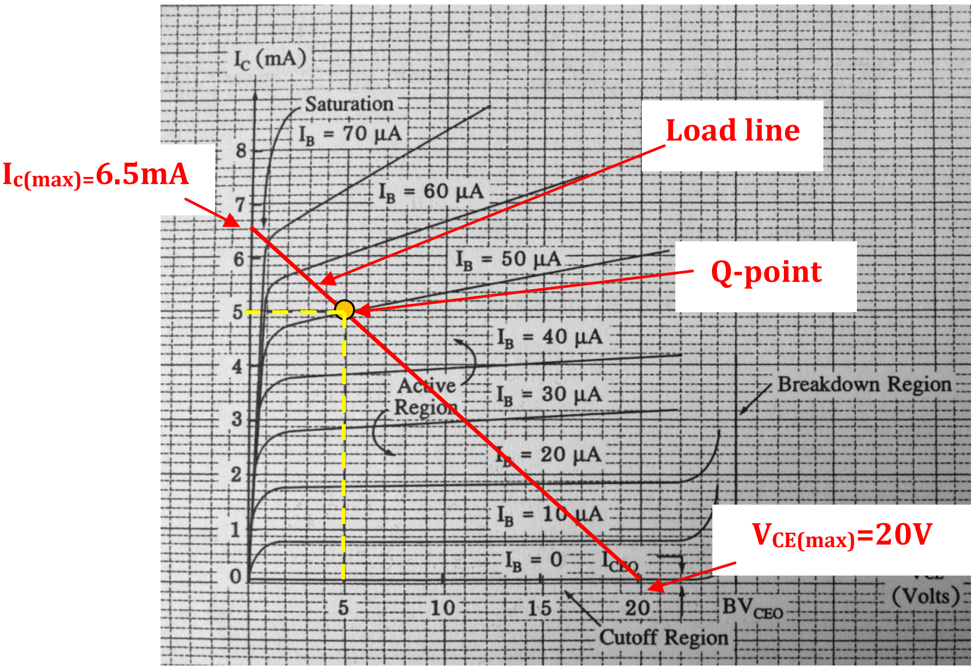
พิจารณาจากวงจรในรูป 3.11 (ก) ให้แหล่งจ่าย V_{BB} เป็นแหล่งจ่ายปรับค่าได้ไบแอสตรงให้กับรอยต่อ B และ E การปรับค่าของกระแส I_B ถ้าปรับค่าของกระแส I_B ให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่ง $I_B>0$ และค่อย ๆ ปรับค่าแรงดัน V_{CC} เพิ่มมากขึ้นจาก 0 V จะปรากฏว่า I_C ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุด B ในรูป 3-11 (ข) ค่า กระแสไฟฟ้าคงที่และเป็นไปตามสมการ $I_C = \beta \cdot I_B$



(ก) วงจรไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด PNP



(ข) กราฟแสดง I_C เมื่อ I_B มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และแรงดัน V_{CE}เปลี่ยนแปลงไป



(ค) กราฟแสดงคุณลักษณะทางเอาต์พุตของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

รูปที่ 3.11 แสดงการหากราฟคุณลักษณะทางเอาต์พุตของยวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

เมื่อกระแสอินพุต (I_B) เป็นศูนย์ คือ ย่านคัตออฟ เพราะว่ากระแสเอาต์พุต (I_C) จะเป็นศูนย์ด้วย แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดกระแสรั่วไหลที่รอยต่อคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์ (I_{CEO}) จำนวนเล็กน้อย เมื่อเพิ่ม I_B ขึ้นเป็น 10 µA I_C จะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.8 mA และที่ย่านอิ่มตัว คือ ย่านที่แรงดัน V_{CE} ใกล้เคียงกับ 0V ดังรูป 3-11 (ค)

จุดทำงานของทรานซิสเตอร์(Q-Point) คือจุดที่บอกว่าขณะที่ทรานซิสเตอร์กำลังทำงานอยู่นี้ค่าของ I_B I_C และ V_{CE} มีค่าเท่าไร โดยการพิจารณาค่าเหล่านี้จากกราฟ รูปที่ 3-11 (ค) เส้นที่ตัดระหว่างแกนกระแส กับแรงดัน เรียกว่าเส้นโหลด(Load Line) เป็นเส้นที่แสดงทางเดินของจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ เมื่อวงจรนี้มีค่าแรงดัน V_{CE} สูงสุดเท่ากับ 20V และค่า I_C สูงสุดคือ 5mA

ตัวอย่าง 3-3 จากกราฟคุณลักษณะทางเอาต์พุตของวงจรอิมิตเตอร์ร่วมในรูป 3-11 (ค) จะใช้เป็นข้อมูลในการหาค่าของ

ก. ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า β เมื่อ V_{CE} เปลี่ยนจาก 2.5V-10V ขณะที่ I_B คงที่เท่ากับ 40μA

ข. ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า β เมื่อ I_B เปลี่ยนจาก 10 μA เป็น 50 μA ขณะที่ V_{CE} คงที่ 7.5V

วิธีทำ ก. จากกราฟ ที่ $V_{CE} = 2.5V, I_B = 40\mu A$ จะได้ค่า

$$I_C = 3.8\ mA$$

$$\beta = \frac{I_c}{I_B} = \frac{3.8mA}{40\,\mu A} = 95$$

ที่ $V_{CE} = 10V, I_B = 40\mu A$ จะหาค่า I_C ได้เท่ากับ

$$I_C = 4.2\ mA$$

$$\beta = \frac{4.2mA}{40\mu A} = 105$$

ร้อยละการเปลี่ยนแปลง β คือ

$$\left(\frac{105-95}{95}\right) \times 100\% = 10.53\%$$

ตอบ β มีการเปลี่ยนแปลง 10.53%

ข. จากกราฟรูปเดิมที่ $V_{CE} = 7.5V$ และ $I_B = 10\mu A$

หาค่า $I_C = 0.8\ mA$

$$\therefore \beta = \frac{0.8mA}{10\mu A} = 80$$

ที่ $V_{CE} = 7.5V$ และ $I_B = 50\mu A$

หาค่า $I_C = 5.2\ mA$

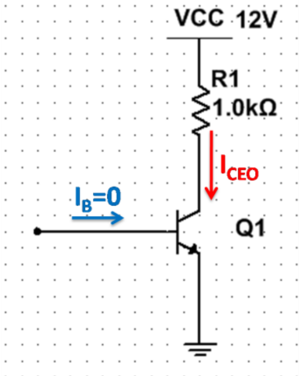
$$\therefore \beta = \frac{5.2mA}{50\mu A} = 104$$

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ β คือ

$$\left(\frac{104-80}{80}\right) \times 100\% = 30\%$$

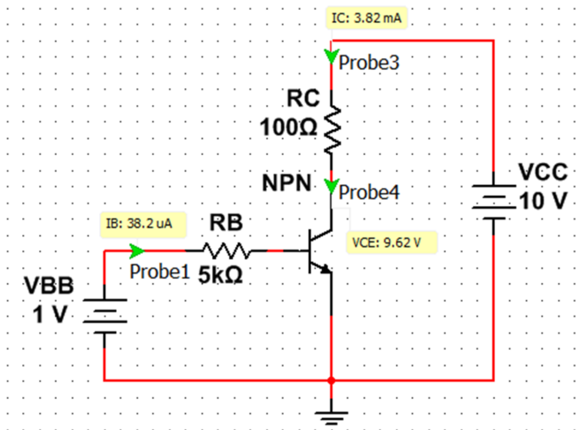
ตอบ β มีการเปลี่ยนแปลง 30%

ย่านคัตออฟ (Cut-off region) เมื่อให้กระแสเบส $I_B = 0$ ทรานซิสเตอร์จะไม่ทำงาน (Open Circuit) หรือคัตออฟ นั่นคือ ไม่มีกระแสคอลเลกเตอร์ไหลจาก V_{CC} ไปสู่อิมิตเตอร์ แต่เมื่อพิจารณาวงจรในรูป 3-12 อย่างรอบคอบ จะเห็นว่าจะเกิดกระแสรั่วไหลระหว่างรอยต่อคอลเลกเตอร์ไปสู่อิมิตเตอร์เรียกว่า I_{CEO} ซึ่งมีค่าน้อยมาก (ปกติจะมีปริมาณเป็น μA เท่านั้น)

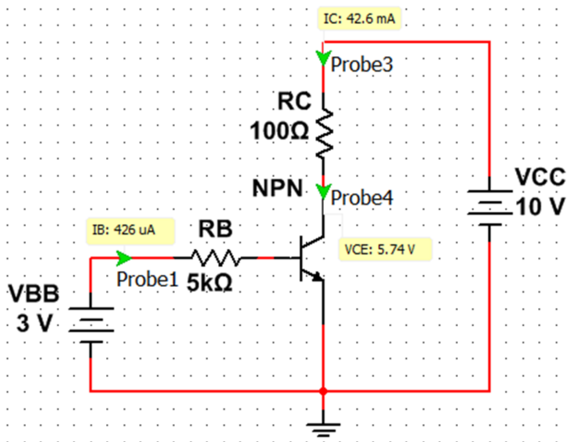


รูป 3-12 แสดงการรั่วไหลที่คอลเลกเตอร์ (I_{CEO}) ในสภาวะคัตออฟ

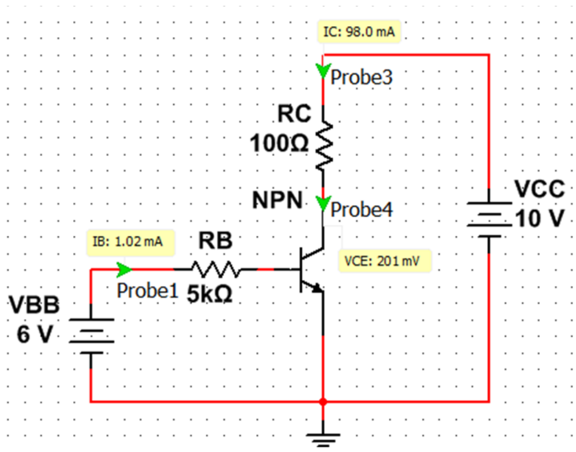
ย่านอิ่มตัว (Saturation Region) หมายถึง สภาวะที่มีกระแสคอลเลกเตอร์ไหลผ่านอิมิตเตอร์ จนทำให้แรงดันตกคร่อมรอยต่อระหว่าง C กับ E มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งน้อยมาก เรียกว่าแรงดันอิ่มตัว $V_{CE(sat)}$ในกรณีซิลิคอนทรานซิสเตอร์ ค่าแรงดันจุดอิ่มตัวระหว่างรอยต่อ C กับ E คือ $V_{CE(sat)}<=0.2V$ พิจารณาจากรูป (ก),(ข) และ (ค) เมื่อเพิ่มกระแสเบสทางอินพุต กระแสคอลเลกเตอร์จะเพิ่มขึ้น แต่แรงดัน V_{CE} จะลดลง จะกระทั่งกระแสเบส (I_B)เพิ่มขึ้นจุดหนึ่ง แรงดัน V_{CE} จะมีค่าคงที่ ที่จุดอิ่มตัว และค่ากระแส I_C จะมีค่าคงที่ที่ค่าจำกัดตามค่าความต้านทานที่ต่ออยู่กับคอลเลกเตอร์ เมื่อนำมาเขียนเส้นแสดงลักษณะสมบัติของคอลเลกเตอร์ จะได้ดังรูป 4-12(ง) บริเวณที่แรเงา คือ บริเวณจุดอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.2V (กรณีซิลิคอนทรานซิสเตอร์) หรือต่ำกว่า



(ก) กระแสเบส 38.2 μA ต่ำมาก**ทรานซิสเตอร์ทำงานย่านคัตออฟ** $V_{CE} \approx V_{CC} = 9.62V$

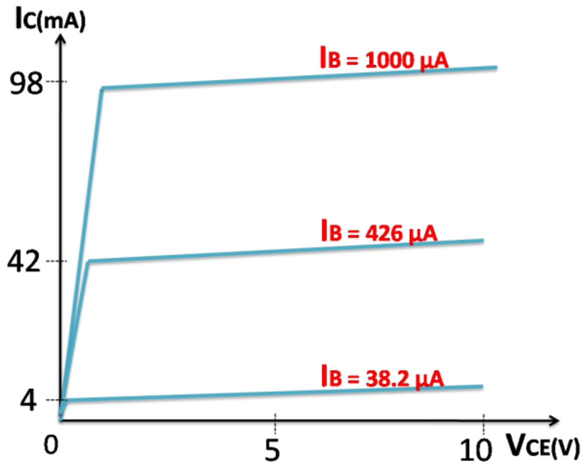


(ข) กระแสเบสเพิ่มขึ้นเท่ากับ 426μA ทรานซิสเตอร์เริ่มทำงาน กระแสคอลเลกเตอร์เพิ่มขึ้นเท่ากับ 42.6mA แรงดัน V_{CE} ลดลง, V_{CE} = 5.74V **ทรานซิสเตอร์ทำงานย่านแอ็คตีฟ**



(ค) **ทรานซิสเตอร์ทำงานที่จุดอิ่มตัว** V_{CE} จะคงที่ที่ 0.2V เมื่อปรับ V_{BB}= 6V จะทำให้

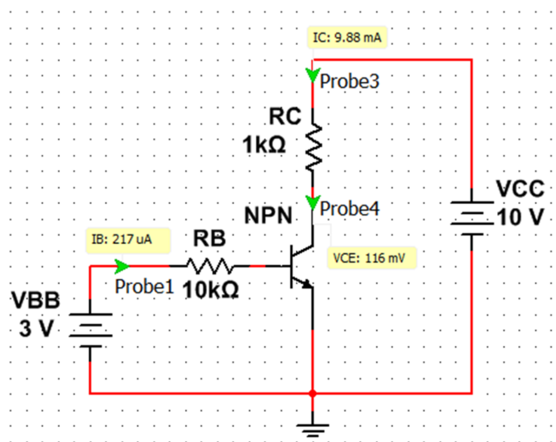
I_B = 1.02 mA , I_C=98mA



(ง) กราฟคุณลักษณะทางกระแสไฟฟ้าของวงจรอิมิตเตอร์ร่วมที่สภาวะต่าง ๆ

รูปที่ 3-12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแส I_C, I_B และแรงดัน V_{CE} ของทรานซิสเตอร์ ในสภาวะต่างๆ และเส้นแสดงลักษณะสมบัติของคอลเลกเตอร์

ตัวอย่าง 3-4 จากวงจรทรานซิสเตอร์ในรูป 3-13จงคำนวณหาค่า $I_{C(sat)}$ และ I_Bเมื่อกำหนดให้ $V_{CE(sat)}$เท่ากับ 0.2V



รูป 3-13

วิธีทำ

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C}$$

$$= \frac{10V - 0.2V}{1K\Omega}$$

$$= \frac{9.8V}{1K\Omega} = 9.8mA$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$= \frac{3V - 0.7V}{10K\Omega}$$

$$= \frac{2.3V}{10K\Omega} = 0.23mA$$

ตอบ ค่า $I_{C(sat)} = 9.8mA$ และ $I_B = 0.23mA$

กำลังไฟฟ้าสูญเสีย(Power Dissipation) ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีขีดจำกัดในการทำงานเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ซึ่งขีดจำกัดเหล่านี้จะอธิบายไว้ในคู่มือของบริษัทผู้ผลิต โดยกำหนดเป็นค่าใช้งานทั่วไป และค่าพิกัดสูงสุด

ค่าพิกัดสูงสุดที่สำคัญของทรานซิสเตอร์ มีดังนี้

V_{CE} : แรงดันระหว่างรอยต่อคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์

V_{CB} : แรงดันระหว่างรอยต่อคอลเลกเตอร์กับเบส

V_{EB} : แรงดันระหว่างรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบส

I_C : กระแสคอลเลกเตอร์

P_D : กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

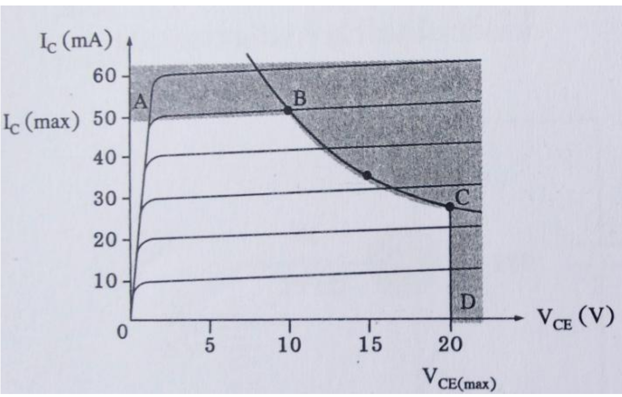
เช่น ค่าพิกัดกระแสคอลเลกเตอร์สูงสุด $I_{C(max)}$ หาได้จากสมการ

$$I_{C(max)} = \frac{P_{D(max)}}{V_{CE}} \qquad \text{... (3-10)}$$

หรือถ้าทราบค่า $I_{C(max)}$ ก็อาจหาค่า V_{CE} ได้จากสมการ

$$V_{CE} = \frac{P_{D(max)}}{I_{C(max)}} \qquad \text{... (3-11)}$$

เส้นแสดงลักษณะสมบัติของ $P_{D(max)}$ สามารถเขียนจากเส้นแสดงลักษณะสมบัติของคอลเลกเตอร์ คือ เส้นกราฟ BC ในรูป 3-14 (ก) ที่จุด A $I_{C(max)}$= 50 mA อ่านค่าของ V_{CE} = 10V ดังนั้น $P_{D(max)}$= 50mA× 10V = 0.5W และค่าของ $P_{DC(max)}$ นี้จะเท่ากันทุกค่าของ $I_{C(max)} \times V_{CE}$ สามารถคำนวณหาค่า V_{CE} และ I_C ได้ดังตารางในรูป 3-14 (ข)

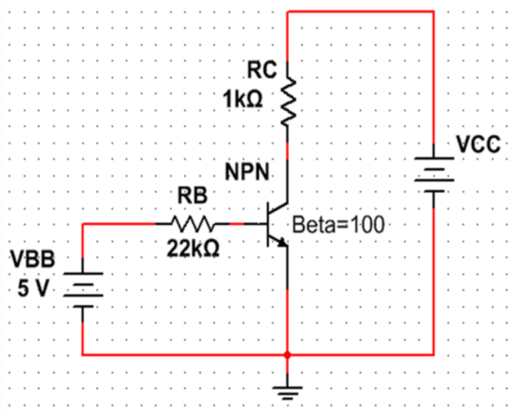


$P_{D(max)}$	V_{CE}	I_c
0.5 W	5 V	100 mA
0.5 W	10 V	100 mA
0.5 W	15 V	100 mA
0.5 W	20 V	100 mA

รูป 3-14 เส้นแสดงลักษณะสมบัติของกำลังไฟฟ้าสูงสุด $P_{D(max)}$ของทรานซิสเตอร์

สรุป เมื่อพิจารณาจากกราฟรูป 3-14(ก) จะเห็นว่าค่าของ $I_{C(max)}$ จะถูกจำกัดระหว่างเส้น A และ B ส่วนค่า $P_{D(max)}$ จะถูกจำกัดระหว่างเส้น B และ C และ $V_{CE(max)}$จะถูกจำกัดอยู่ระหว่างเส้นกราฟ C, D

ตัวอย่างที่ 3-5 จากวงจรรูปที่ 3-15 กำหนดให้ $P_{D(max)}$=0.8W, $V_{CE(max)}$ = 15V, $I_{C(max)}$ = 100mA, จงหาค่า V_{CC} และ P_D ของวงจรทรานซิสเตอร์นี้



รูปที่ 3-15

วิธีทำ

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$= \frac{5V - 0.7V}{22K\Omega} = 195.5\mu A$$

$$I_C = \beta\, I_B$$

$$= 100(195.5\mu A) = 19.55mA$$

$$V_{RC} = I_C\, R_C$$

$$= (19.55mA)1k\Omega = 19.55V$$

$$V_{CC} = V_{CE(max)} + V_{RC}$$

$$= 15V + 19.55V = 34.55V$$

$$P_D = V_{CE(max)}\,(I_C)$$

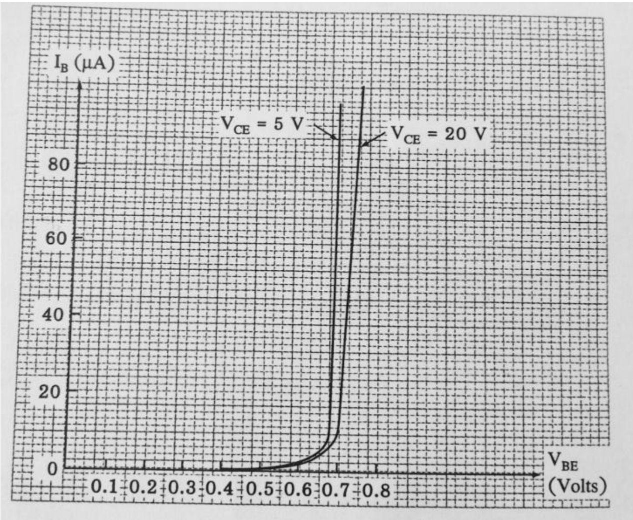
$$= 15V(19.55mA) = 0.293W$$

ตอบ ค่า $P_D = 0.293W$ ไม่เกินค่า $P_{D(max)}$ ของทรานซิสเตอร์

3.3.3 คุณลักษณะทางอินพุตของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม

เมื่อพิจารณาวงจรไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ที่ต่อวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุต(I_B) และแรงดันอินพุต(V_{BE}) เมื่อแรงดันเอาต์พุต(V_{CE}) คงที่ เมื่อปรับแรงดันเอาต์พุต V_{CE}= V และค่อย ๆ ปรับแหล่งจ่ายอินพุต (V_{EE}) จะได้กราฟความสัมพันธ์ของ I_B และ V_{BE}

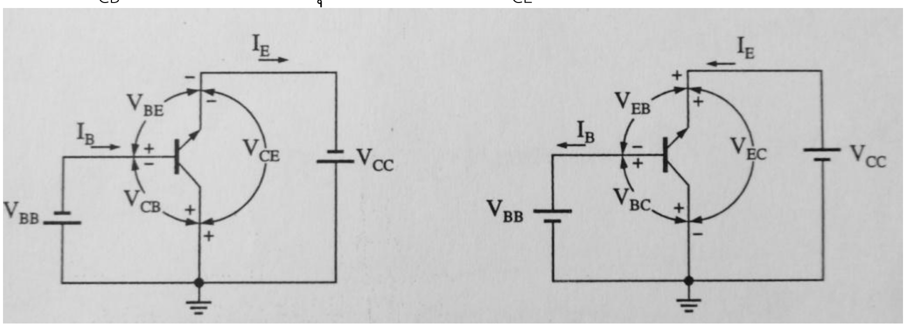
ดังรูป ในทำนองเดียวกันเมื่อเปลี่ยนค่า V_{CE} เป็น 20V จะได้กราฟคุณลักษณะทางอินพุตที่ใกล้เคียงกัน จากกราฟคุณลักษณะทางอินพุตนี้ หากทราบค่า β ของทรานซิสเตอร์ จะสามารถหาค่ากระแสเอาต์พุตได้ เพราะว่าสามารถใช้ค่า I_B จากกราฟได้



รูป 3-16 กราฟแสดงคุณลักษณะทางอินพุตของทรานซิสเตอร์ NPN
ต่อวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม แสดงค่า I_B และ V_{BE} เมื่อ V_{CE} คงที่

3.4 วงจรคอลเลกเตอร์ร่วม

วงจรคอลเลกเตอร์ร่วม (Common Collector หรือ CC) เป็นวงจรไบแอสทรานซิสเตอร์อีกวิธีหนึ่ง ที่ต่อคอลเลกเตอร์ลงจุดดินของแหล่งจ่าย โดยมีเบสเป็นอินพุต และอิมิตเตอร์เป็นเอาต์พุต สำหรับวงจรของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ดังรูป 3-17(ก) และสำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ดังรูป 3-17 (ข) สำหรับวงจรทรานซิสเตอร์ชนิด NPN จะเห็นว่ากระแสอินพุตของวงจร คือ I_B กระแสเอาต์พุตของวงจร คือ I_E แรงดันอินพุตของวงจรคือ V_{CB} และแรงดันเอาต์พุตของวงจร คือ V_{CE}



(ก) NPN (ข) PNP

รูปที่ 3-17 วงจรไบแอสทรานซิสเตอร์แบบคอลเลกเตอร์ร่วม

เมื่อพิจารณารูปด้านบนจะพบว่า สภาวะแรงดันของวงจรคือ

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \quad \text{... (3-12)}$$

ถ้า $V_{CE} = V_{CC}$ และ $V_{CB} = V_{BB}$

จะได้ว่า $V_{BB} = V_{CC} - V_{BE}$

หรือ $V_{BB} = V_{CC} - 0.7V$ ... (3-13)

3-5 สรุปคุณลักษณะการทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์นั้นทำงานได้ใน 3 ย่าน คือ

1. ย่านอิ่มตัว (Saturation)

2. ย่านคัตออฟ (Cutoff)

3. ย่านแอ็คตีฟ (Active or Linear region)

คุณลักษณะที่สำคัญและควรจดจำของทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในสภาวะการทำงาน 3 นั้น ประกอบไปด้วย V_{BE} ,V_{CE}, I_C, I_B และ P_D ดังแสดงในตารางสรุปต่อไปนี้

และสมการค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ หาได้จาก

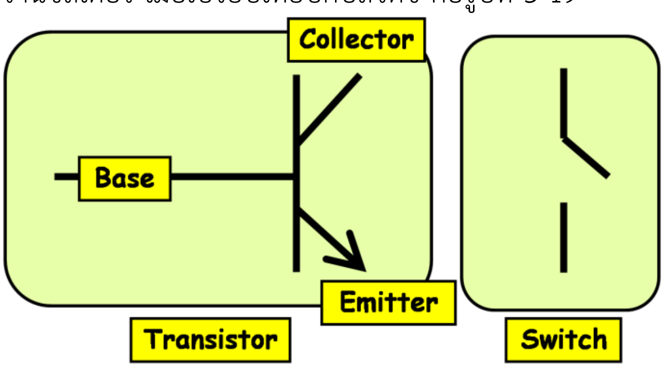
$$P_D = V_{CE} I_C + V_{BE} I_B \qquad \text{...... (3-14)}$$

ตารางที่ 3-1 BJT Characteristic comparison.

Items	*Cutoff*	*Saturation*	*Active (linear)*
V_{BE}	< 0.7 V	≈ 0.7 V	≈ 0.7 V
V_{BE}	≥ 0V	≈ 0.2 V	>0.2 V
V_{BE}	0A	$> I_C/\beta$	$= I_C/\beta$
V_{BE}	0A	$< \beta I_B$	$= \beta I_B$
V_{BE}	0W	≈ 0W	>0W
C and E	*Switch*	*Switch*	-
behavior	*Open*	*Closed*	*Power*

3-6 ทรานซิสเตอร์สวิตซ์(Transistors as a switch)

ทรานซิสเตอร์ สามารถทำงานเป็นสวิตซ์ได้ โดยใช้ขั้ว C และ E เป็นเอาต์พุต ที่ควบคุมการเปิด-ปิดของโหลด และขั้ว B คือ ขั้วที่รับสัญญาณ หรือกระแสไฟฟ้าเข้ามาเพื่อควบคุมการปิด-เปิด สวิตซ์ ของทรานซิสเตอร์ รูปของทรานซิสเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับสวิตซ์ คือรูปที่ 3-19



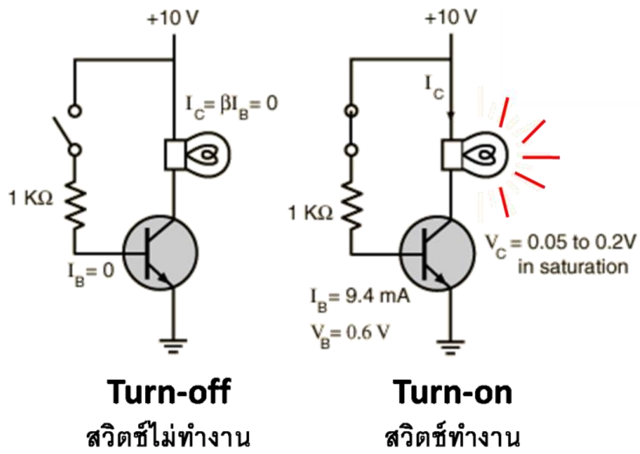
รูปที่ 3-19 การเปรียบเทียบทรานซิสเตอร์และสวิตซ์

การทำงาน

ทรานซิสเตอร์สวิตซ์จะทำงานใน 2 สภาวะ คือ (1) สภาวะคัตออฟ และ (2) สภาวะอิ่มตัว อธิบายการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์สวิตซ์ ได้ดังนี้

[1] เมื่อ $V_{BE} > 0.7$V ทรานซิสเตอร์ ทำงาน (turn on) หลอดไฟจะติดสว่าง

[2] เมื่อ $V_{BE} < 0.7$V ทรานซิสเตอร์ **ไม่ทำงาน** (turn off) หลอดไฟจะ**ดับ**



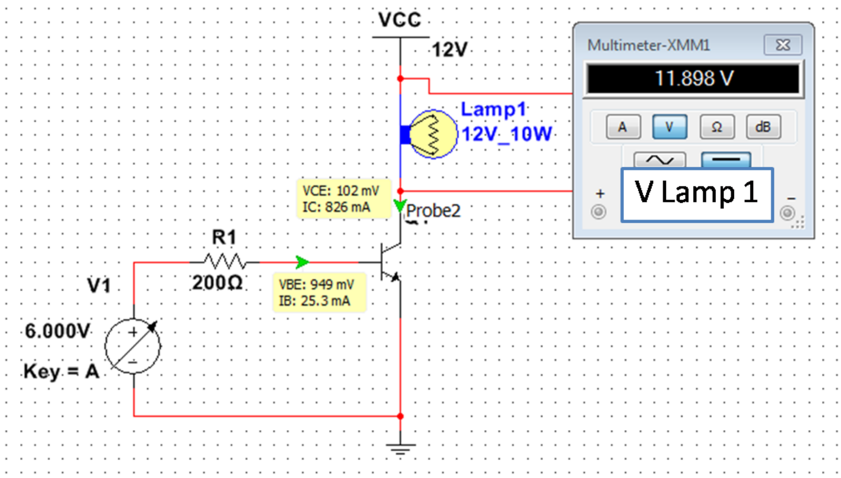
รูปที่ 3-20 วงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์

ตารางที่ 3-2 แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์สวิตช์

Switch	*C-E*	I_C	I_B	V_{BE}	V_{CE}	การทำงาน	I_C
Turn-on	*Closed*	$>0A$	$>0A$	$>0.7V$	$\leq 0.2V$	อิ่มตัว	$>\beta I_B$
Turn-off	*Open*	$= 0A$	$0A$	$<0.7V$	$>0.2V$	คัตออฟ	$= 0A$

การทำงานของทรานซิสเตอร์สวิตช์ สามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 3-2 ซึ่งผู้เรียนจะต้องศึกษาและเปรียบเทียบกับตัวอย่างต่าง ๆ จะได้เกิดความเข้าใจที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

ตัวอย่างที่ 3-6 วงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์ ต่อกับหลอดไฟฟ้า 12W 10W ดังรูปที่ 3-21 ถ้าปรับค่าแรงดันอินพุต V_1=6V จงคำนวณหาค่า I_B, I_C, $V_{Lamp1.}$ และ P_D ทรานซิสเตอร์ (เมื่อ ß = 100)



รูปที่ 3-21

วิธีทำ (1) เขียนสมการ KVL ที่อินพุต ดังนี้

$$V_1 = I_B R_1 + V_{BE} \qquad .....(1)$$

$$I_B = \frac{V_1 - V_{BE}}{R_1} = \frac{6.0V - 0.7V}{200\Omega} = 26.5 \text{ mA}$$

(2) หาค่า I_C

$$I_C = \frac{P_{lamp1}}{V_{Lamp1}} = \frac{10W}{12V} = 833\ mA$$

(3) สภาวะอิ่มตัว ค่า $V_{CE(sat)}$, $\leq 0.2V$ ดังนั้น

$$V_{Lamp1} = V_{CC} - V_{CE} = 12V - 0.2V = 11.8\ V$$

(4) $$P_D = V_{CE}\, I_C + V_{BE}\, I_B$$

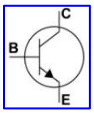
$$= (0.2V \times 833\ mA) + (0.7V \times 26.5\ mA)$$

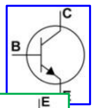
$$= 166\ mW + 18.5\ mW$$

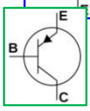
$$= 184.5\ mW$$

แบบฝึกหัดบทที่ 3

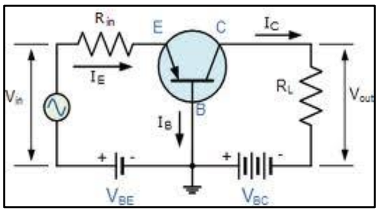
จงเติมคำลงในช่องว่างให้ถูกต้อง

1. ทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อ มีโครงสร้าง 2 ชนิด คือ ชนิด.................... และชนิด......................
2. ทรานซิสเตอร์ที่มีสัญลักษณ์ 

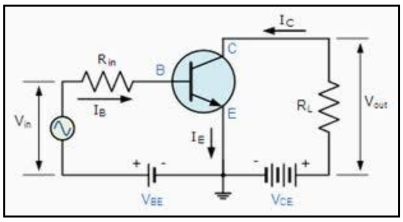
คือทรานซิสเตอร์ชนิด..............................
3. ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP มี เบสจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด.................................
4. การไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิด 

ที่เบส จะต้องไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าขั้ว................
   ....
5. การไบแอสทรานซิสเตอร์ 

ชนิดที่เบสจะต้องไบแอสด้วยแรงดัน......................
   ....และที่คอลเลกเตอร์ จะต้องไปแอส ด้วยแรงดัน........................
6. วงจรขยายต่อไปนี้เป็นวงจรขยาย ชื่อ...

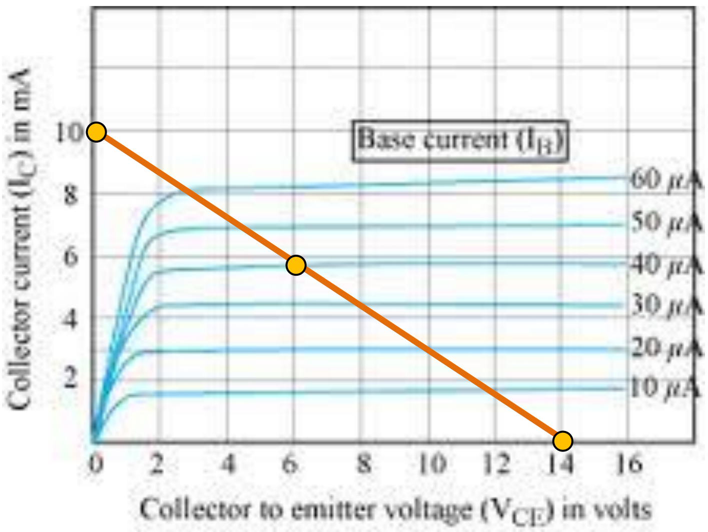


รูปข้อ 6



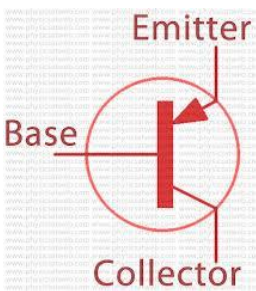
รูปข้อ 7

7. วงจรขยายต่อไปนี้เป็นวงจรขยาย ชื่อ...
8. ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ 3 สภาวะ คือ (1) สภาวะคัตออฟ (2) สภาวะ.............และ
   (3) สภาวะ...
9. เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์ ขั้วใดคืออินพุต (ขั้ว.........)ขั้วใดคือเอาต์พุต (ขั้ว.......)
10. เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์ เปิด (turn-on) กระแสโหลดจะไหลผ่านทรานซิสเตอร์ระหว่าง ขั้ว.......และ ขั้ว.............
11. เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์เปิด (turn-off) กระแสเบสจะมีค่าเท่ากับ.................A



จากรูปกราฟคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันนี้ใช้ตอบคำถามข้อ 12-15

12. ที่กระแสเบส 20 µA กระแสคอลเลกเตอร์ เท่ากับ................mA
13. แรงดันไบแอสระหว่างคอลเลกเตอร์กับอิมิเตอร์ เท่ากับ..........V



14. ที่จุดทำงาน (Q-point) กระแส I_B = ...μA, I_C = ...mA และ V_{CE} = ...V

15. เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานใน **สภาวะแอกตีฟ** สมการของ I_C = ...

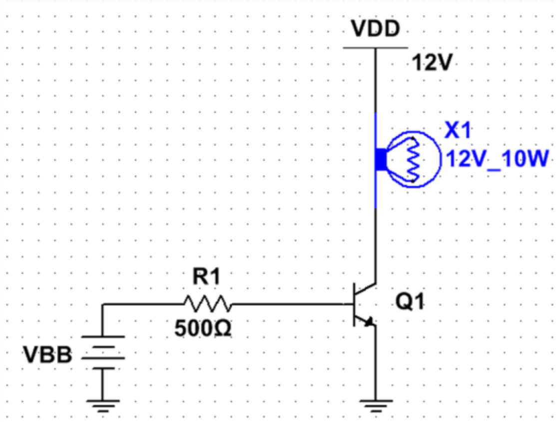
แรงดัน V_{BE} = ...V และแรงดัน V_{CE} > V

16. เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานใน **สภาวะอิ่มตัว** สมการของ I_B = ...

แรงดัน $V_{BE(sat)}$ = ...V และแรงดัน $V_{CE(sat)}$ ≤ V

17. วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม (ทรานซิสเตอร์) ทำงานใน **สภาวะแอกตีฟ** ถ้ากระแสเบสเท่ากับ 1 mA และ β = 100 ค่ากระแสคอลเลกเตอร์ เท่ากับ ....mA

จากรูปต่อไปนี้ ใช้ตอบคำถามข้อ 18-21



18. หลอดไฟฟ้าจะติดสว่างได้ เมื่อแรงดัน V_{BB} ....

19. *ถ้าแรงดัน* $V_{BB} < 0.7V$ *จะเป็นอย่างไร* ....

20. วงจรทรานซิสเตอร์ลักษณะนี้ มีชื่อเฉพาะว่า วงจร...

21. ถ้าทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะอิ่มตัว *กระแส* I_C =...........A และ V_{CE} = ...V

22. จากตารางข้อมูลของทรานซิสเตอร์ต่อไปนี้ ทรานซิสเตอร์ข้อใดที่มีอัตราขยายกระแสสูงสุด

ก) BFY50 ข) BFY51 ค) BFY52 ง) BFX85

Device	Volts(max)		Icmax	Ptot (mW)	h_{FE}(min) @Ic(mA)
	V_{CB}	V_{CE}			
BFY50	80	35	1A	800	30@150
BFY51	60	30	1A	800	40@150
BFY52	40	20	1A	800	60@150
BFX85	100	60	1A	800	70@150