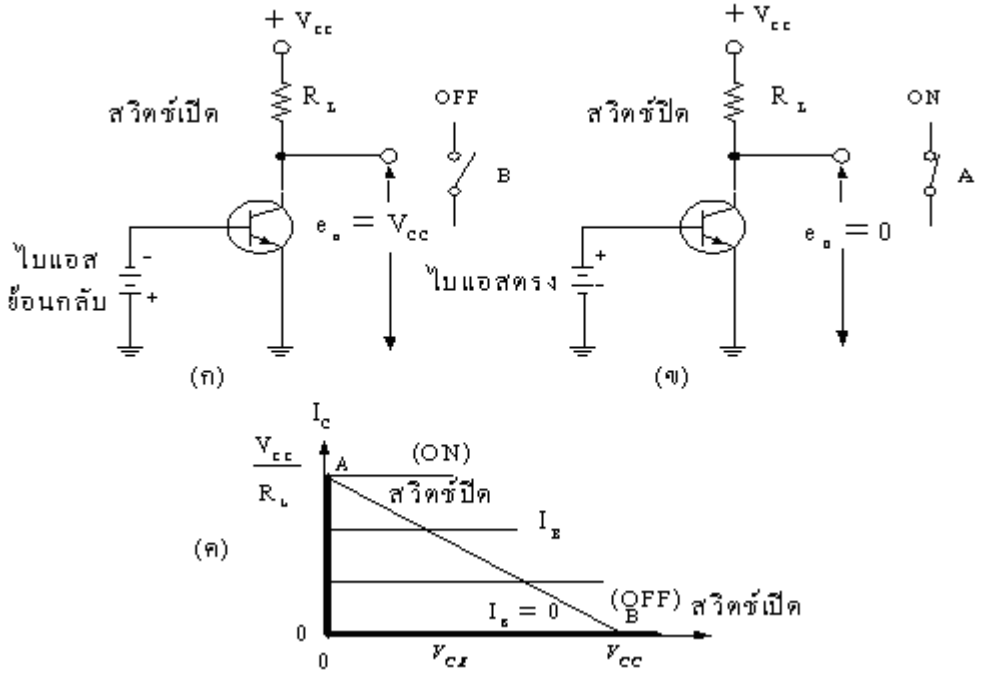
บทที่ 6
ทรานซิสเตอร์สวิตช์

4.1 คุณสมบัติของวงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์

สวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสร้างพัลส์รูปต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ล้วนแต่เป็นวงจรทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีไดโอดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทรานซิสเตอร์ ซึ่งนอกจากจะใช้สำหรับงานขยายสัญญาณไฟฟ้าแล้วยังมีคุณสมบัติสามารถทำงานในหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

4.1.1 ทรานซิสเตอร์สวิตช์ในทางอุดมคติ

ทรานซิสเตอร์สามารถนำมาใช้แทนสวิตช์ได้ กล่าวคือ ขณะที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะที่ไม่ทำงาน(ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ) ซึ่งจะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านนั้น ทรานซิสเตอร์ก็คล้ายกับเป็นสวิตช์ซึ่งเปิดออก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) ในภาวะนี้จะตรงกับตำแหน่ง B ในกราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ค) ภาวะนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์ ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับจากภายนอกทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าศูนย์ (ไม่มีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์) แต่เมื่อรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์ และเบสของทรานซิสเตอร์ได้รับแรงดันไบแอสตรงแล้ว จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ กล่าวคือ ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ และถ้าหากขนาดของแรงดันไบแอสนี้มีค่ามากพอทรานซิสเตอร์ก็จะยอมให้กระแสไหลผ่านได้มากขึ้นกระทั่งอยู่ในภาวะอิ่มตัวดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) นั่นคือกระแสคอลเลคเตอร์จะถูกกำหนดได้ด้วยขนาดค่าความต้านทานภายนอก R_L เนื่องจากในภาวะนี้ค่าความต้านทานของทรานซิสเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ (หรือน้อยมากกระทั่งพิจารณาได้ว่าเป็นศูนย์) ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์จากคอลเลคเตอร์ถึงอิมิตเตอร์ก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย และจะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสคอลเลคเตอร์ ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงกระทำตัวคล้ายกับสวิตช์ที่ปิดเพื่อให้กระแสไหลผ่านได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) และในภาวะนี้จะตรงกับตำแหน่ง A ในกราฟคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ดังในรูป 4.1 (ค)



รูปที่ 4.1 แสดงการทำงานเป็นสวิตช์ในทางอุดมคติของทรานซิสเตอร์

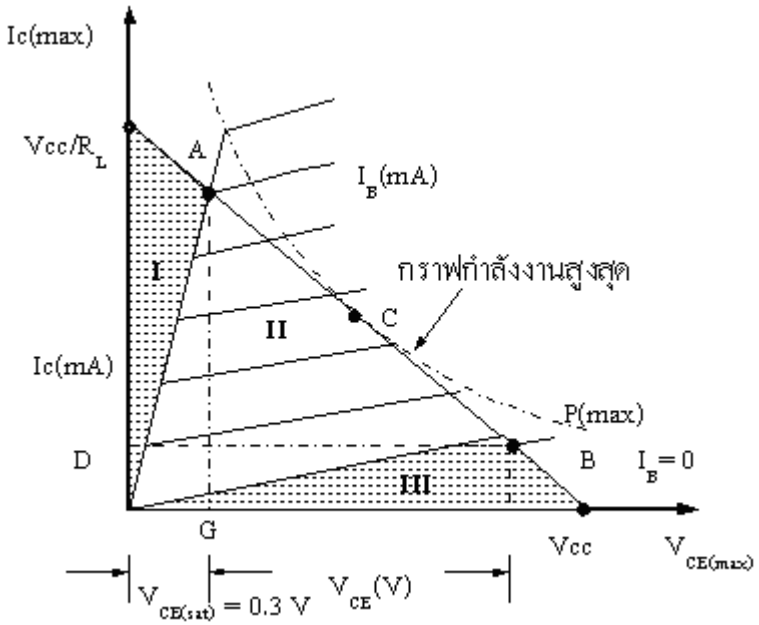
สำหรับในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ (ประเภทรอยต่อ) ถูกต่ออยู่ในวงจรลักษณะอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter) กระเบส IB จะทำหน้าที่ควบคุมขนาดของกระแสคอลเล็กเตอร์ IC ทั้งนี้โดยที่ IC = □IB (□ : อัตราการขยายของทรานซิสเตอร์) ดังนั้นในทางอุดมคติอาจกล่าวได้ว่ากระเบสขนาดเล็กน้อยอาจควบคุมให้ได้กระคอลเล็กเตอร์จำนวนมากได้ ขนาดของกระแสเบสกำหนดได้โดยแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบส เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเป็นศูนย์หรือทำให้รอยต่ออิมิตเตอร์และเบสอยู่ในลักษณะไบแอสย้อนกลับ (reverse bias) กระแสคอลเล็กเตอร์ IC จะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อแรงดันอินพุตทำให้รอยต่ออิมิตเตอร์และเบสอยู่ในลักษณะไบแอสตรง(forward bias) (จะต้องมีค่าราว 0.7 โวลต์ สำหรับทรานซิสเตอร์ที่ทำจากซิลิกอน) แล้วทรานซิสเตอร์จะทำงานและอยู่ในภาวะอิ่มตัว (saturation) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตเพียงเล็กน้อย (จาก 0 – 0.7 โวลต์ในซิลิกอนทรานซิสเตอร์) จะมีผลทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์ที่เอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากมายได้ จากรูปที่ 4.1 (ค) ที่จุด A บนเส้นโหลด (load line) กระแสคอลเล็กเตอร์จะมีค่าสูง โดยที่แรงดันซึ่งตกคร่อมระหว่างคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียกำลังงานใดๆในทรานซิสเตอร์เลย และเมื่อพิจารณาที่จุด B บนเส้นโหลดจะเห็นว่ากระแสคอลเล็กเตอร์มี ค่าเป็นศูนย์แต่แรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์มีค่าเท่ากับ V_{CC} ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียกำลังงานใดๆในทรานซิสเตอร์อีกเช่นกัน ซึ่งสำหรับทรานซิสเตอร์ในอุดมคติเมื่อมีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์กำลังงานส่วนใหญ่จะปรากฏที่โหลด R_L และทรานซิสเตอร์จะมีการสูญเสียกำลังงานเพียงเล็กน้อย และกำลังงานจะสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์เฉพาะช่วงของการเปลี่ยนแปลงภาวะการทำ งานของทรานซิสเตอร์ จากลักษณะของสวิตช์ปิด(ON)ไปเป็นลักษณะของสวิตช์เปิด (OFF) เท่านั้น

4.1.2 ทรานซิสเตอร์สวิตช์ที่ใช้งาน

รูปที่ 6.2 เป็นรูปที่แสดงคุณสมบัติลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริงๆ ในวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม ซึ่งจะเห็นได้ว่าแตกต่างจากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ กล่าวคือพื้นที่ส่วนที่ I แสดงย่านที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในภาวะอิ่มตัว (Saturation region) ซึ่งในย่านนี้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส และคอลเล็กเตอร์กับเบสจะได้รับไบแอสตรง ในพื้นที่ส่วนที่ II แสดงย่านที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในภาวะแอคทีฟ (active region) ซึ่งเป็นย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายประเภท A โดยทั่วไป ซึ่งรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบแอสตรง แต่รอยต่อระหว่างคอลเล็กเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ และในส่วนที่ III ของรูปที่ 4.2 แสดงย่านคัตออฟ (cut off region) ของทรานซิสเตอร์ ในย่านนี้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสและคอลเล็กเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบแอสกลับ

นอกจากนี้เส้นกราฟ ซึ่งแสดงค่ากำลังงานสูงสุดที่จะสูญเสียในทรานซิสเตอร์ได้ (maximum power dissipation) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และเขียนแทนด้วย P_{MAX} นั้นคือค่าสูงสุดของกำลังงานที่ทรานซิสเตอร์จะทนได้ ซึ่งก็คือผลคูณของแรงดันสูงสุดระหว่างคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ $V_{CE\ MAX}$ ที่ทรานซิสเตอร์จะทนได้ กับค่ากระแสสูงสุดขดงคอลเล็กเตอร์ $I_{C\ MAX}$ ที่สามารถไหลผ่านทรานซิสเตอร์ได้ ทรานซิสเตอร์ซึ่งถูกนำไปใช้งานใดๆก็ตาม เช่นเป็นตัวขยายสัญญาณหรือทำหน้าที่สวิตช์ก็ดี ค่าของกระแส หรือแรงดัน หรือกำลังงานที่ทรานซิสเตอร์ได้รับ จะต้องมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดเหล่านี้

ในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริงและถูกต่ออยู่ในวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วมจะเห็นว่าที่จุด A บนเส้นโหลด (load line) แรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ (V_{CE}) จะไม่เป็นศูนย์เหมือนในรูปที่ 4.1 แต่จะมีค่าราว 0.3 โวลต์ แรงดันนี้เรียกว่า “**แรงดันตกคร่อมคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ในภาวะอิ่มตัว**” (collector – emitter voltage at saturation) และเขียนแทนด้วย $V_{CE\ sat}$ สำหรับซิลิกอนทรานซิสเตอร์ค่า $V_{CE\ sat}$ จะมีค่าราว 0.3 โวลต์ ซึ่งค่าที่แท้จริงของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวนั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสคอลเล็กเตอร์และอาจมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 – 0.5 โวลต์ และในเยอรมันเนียมปกติมีค่าราว 0.1 โวลต์ ที่จุด B บนเส้นโหลดของรูปที่ 4.2 ก็เช่นเดียวกัน ถึงแม้กระแสเบสซึ่งเป็นกระแสอินพุตจะมีค่าเป็นศูนย์ก็ตาม ต่ำกระแสคอลเล็กเตอร์หรือกระแสเอาต์พุตจะไม่เป็นศูนย์ กระแสคอลเล็กเตอร์ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของรอยต่อคอลเล็กเตอร์ซึ่งเขียนแทนได้ด้วย I_{CBO}



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน
ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริงและถูกต่ออยู่ในวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม

กระแสคอลเล็กเตอร์ซึ่งไหลขณะที่อิมิตเตอร์ถูกเปิดวงจรออกและรอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบสได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับนี้เราเรียกว่า “ **กระแสย้อนกลับของรอยต่อคอลเล็กเตอร์** ” (reverse collector – Saturation current) เขียนแทนได้ด้วย I_{CO} หรือ I_{CBO} กระแสนี้จะประกอบด้วยกระแสย่อยสองส่วนคือ กระแสรั่วที่เกิดขึ้นบริเวณรอบๆรอยต่อคอลเล็กเตอร์ (ไม่ไหลผ่านรอยต่อ) และกระแสอิ่มตัว ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อน สำหรับขนาดกระแสรั่วขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอสส่วนขนาดกระแสอิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นส่วนใหญ่ ในทางปฏิบัติขนาดของกระแส I_{CO} จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทุกๆ 10°C ที่เพิ่มขึ้น ในวงจรขณะที่ทรานซิสเตอร์ถูกต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วมและกระแสเบสมีค่า I_B กระแสคอลเล็กเตอร์ I_C อัตราการขยายกระแสตรงของทรานซิสเตอร์ในภาวะนี้เขียนแทนด้วย h_{FE}

โดยที่

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \qquad \text{……..(4.1)}$$

และในช่วงของการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบส ΔI_B ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลแล็กเตอร์ ΔI_C อัตราส่วนดังกล่าวนี้จะแสดงอัตราการขยายกระแสสลับของทรานซิสเตอร์ ซึ่งเขียนแทนได้ด้วย h_{fe} โดยที่

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \qquad \text{.....(4.2)}$$

ดังนั้นจะเห็นว่าค่าของ h_{FE} ที่ตำแหน่งของ I_C ค่าต่างๆอาจมีค่าแตกต่างกันได้ เหตุนี้การกำหนดค่า h_{FE} ของแต่ละวงจรจะต้องคำนึงถึงว่ากระแสคอลเล็กเตอร์ในวงจรมีค่าเท่าใด

4.1.3 การเปิด – ปิด ของทรานซิสเตอร์สวิตช์ในทางอุดมคติ

จากวงจรของทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) ซึ่งแสดงการทำงานของทรานซิสเตอร์คล้ายกับสวิตช์ซึ่งเปิดและปิดตามลำดับ ดังนั้นถ้าหากวงจรทางด้านอินพุต มีแหล่งจ่ายแรงดันสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular voltage pulses) ต่ออยู่แทนแบตเตอร์รี่แล้วสัญญาณพัลส์อินพุตดังแสดงในรูป 4.3 (ก) นี้ก็สามารถที่จะควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์ซึ่งเปิดและปิดได้

4.1.4 การวิเคราะห์วงจรสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ

วงจรสวิตช์ของทรานซิสเตอร์อย่างง่ายๆแสดงได้ดังในรูปที่ 4.3 (ก) ถ้าหากต้องการให้ขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรเป็นดังนี้

$$e_O = 20\ V_{peak}$$

$$e_{in} = 5\ V_{peak}\ (0 \sim +5)$$

$$I_C = 20\ mA$$

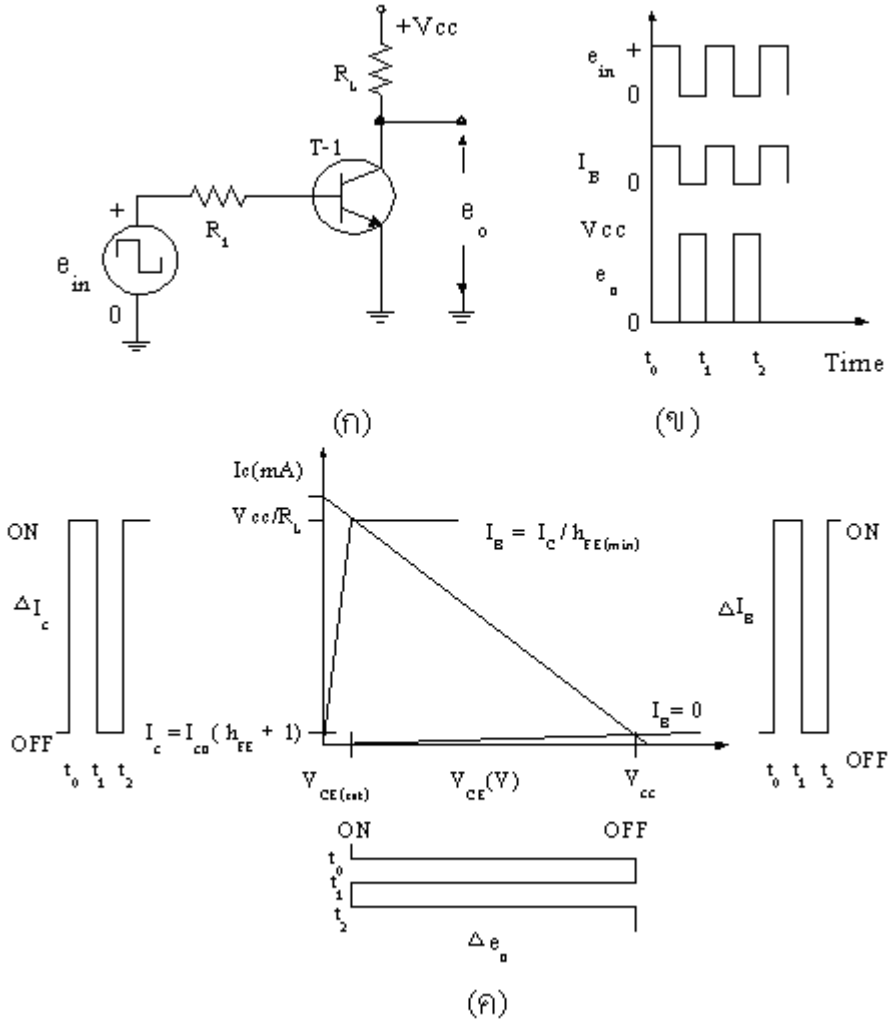
และโดยสมมติว่าทรานซิสเตอร์นี้เป็นแบบ ซิลิกอน NPN ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$h_{FE} = 40$$

$$V_{BE} = 0 \text{ (ในทางอุดมคติ)}$$

$$V_{Cesa} = 0 \text{ (ในทางอุดมคติ)}$$

$$I_{CBO} = 0 \text{ (ในทางอุดมคติ)}$$



รูปที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรในทางอุดมคติ

เนื่องจากทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ดังค่าของ V_{CC} จะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดันที่เอาต์พุต ดังนั้นค่าของ V_{CC} จะต้องเป็น +20 โวลต์

ถ้าหากค่าของกระแสคอลเล็กเตอร์ $I_C = 20$ mA ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในภาวะอิ่มตัว ค่าของความต้านทาน R_L จะต้องมีค่าดังนี้

$$R_L = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{20}{20\text{mA}} = 1\,\text{k}\Omega$$

ในภาวะอิ่มตัวกระแสคอลเล็กเตอร์ $I_C = 20$ mA และ $h_{FE} = 40$ ดังนั้นกระแสเบสที่ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะอิ่มตัวก็คือ

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{20\text{mA}}{40} = 0.5\text{ mA}$$

ดังนั้นที่เวลา t_{+0} แรงดันของสัญญาณอินพุต = +5 โวลต์ (ไบแอสตรง) จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์เมื่อพิจารณาวงจรทางด้านอินพุตจะได้ว่า

$$e_{in} = E_{R1} + V_{BE}$$
$$= I_B R_1 + V_{BE}$$

และถ้าหากสมมติว่าเป็นทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ $V_{BE} = 0$ โวลต์

ดังนั้น $e_{in} = I_B R_1$

หรือ $R_1 = \frac{e_{in}}{I_B} = \frac{5v}{0.5mA} = 10\,k\Omega$

นั่นคือค่า $V_{CC} = +20$ โวลต์ , $R_L = 1\,k\Omega$, $R_1 = 10\,k\Omega$

เมื่อสัญญาณอินพุต +5 โวลต์ ทรานซิสเตอร์จะทำงานในภาวะอิ่มตัวมีกระแสไหลเต็มที่ 20 มิลลิแอมป์ ทรานซิสเตอร์จึงทำตัวคล้ายกับสวิตช์ปิด และเมื่อเวลา t_{+1} สัญญาณอินพุตจะเป็นศูนย์ทรานซิสเตอร์จะไม่ทำงาน ขณะนี้จะไม่มีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทำให้แรงดันที่เอาต์พุตมีค่าสูงสุดเป็น +20 โวลต์ ทรานซิสเตอร์จึงทำตัวคล้ายกับเป็นสวิตช์เปิด

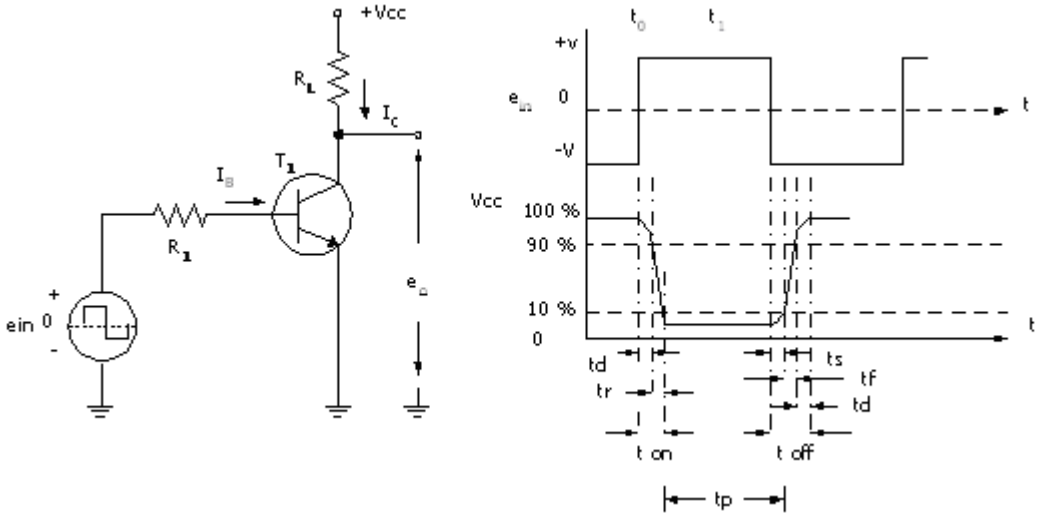
4.2 พารามิเตอร์ของวงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์

4.2.1 การเปิด – ปิด ของทรานซิสเตอร์สวิตช์ในทางปฏิบัติ

จากการพิจารณาวงจรสวิตชิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 6.4 เมื่อพัลส์ทางอินพุตถูกป้อนเข้าไปในวงจร โดยทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบแอสตรงก็ตาม แต่ทรานซิสเตอร์จะไม่สามารถทำงานได้อย่างทันทีทันใด แต่จะต้องใช้เวลาช่วงหนึ่ง ซึ่งเวลานี้เราเรียกว่า “ออนไทม์” (ON time) เขียนแทนด้วย t_{on} อีกนัยหนึ่งอาจนิยามได้ว่าช่วงเวลาออนไทม์ หมายถึงเวลาที่ใช้เพื่อให้ค่าแรงดันที่คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไป 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน V_{CC}

ช่วงเวลา t_{on} นี้พิจารณาได้ว่าประกอบด้วยเวลาส่วนย่อยสองส่วนคือ ช่วงเวลาล่าช้า (Delay time) ซึ่งเขียนแทนด้วย t_d และช่วงเวลาไต่ขึ้น(rise time) ซึ่งเขียนแทนด้วย t_r และช่วงเวลาล่าช้า t_d ก็คือเวลาที่ใช้สำหรับให้แรงดันที่เอาตพุตเปลี่ยนแปลงไป 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน V_{CC} และช่วงเวลาไต่ขึ้น t_r

ในที่นี้ก็คือช่วงเวลาที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน V_{CC} และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นรูปวงจรเสมือนของวงจรสวิตช์ในรูปที่ 6.4 จะเห็นว่า ที่เวลา t_{-0} แรงดันอินพุตจะมีค่าเป็นลบซึ่งทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ



รูปที่ 4.4 แสดงคุณสมบัติของวงจรสวิตช์ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ในทางปฏิบัติ

ดังนั้นรอยต่อนี้จึงทำตัวคล้ายกับเป็นตัวความต้านทานที่มีค่าสูงต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (ดูรูปที่ 4.5 ก) ดังนั้นในขณะนี้ตัวเก็บประจุที่รอยต่อจะทำการประจุ (charge) ผ่านตัวต้านทาน R_1

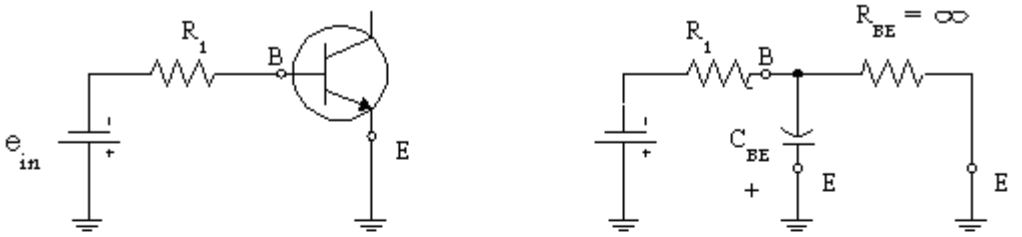
ที่เวลา t_{+0} แรงดันอินพุตจะมีค่าเป็นบวกทำให้รอยต่ออิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบแอส ตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ข อย่างไรก็ดีก่อนที่รอยต่อนี้จะได้รับแรงดันไบแอสตรงอย่างเต็มที่จะต้องกินเวลาช่วงหนึ่งซึ่งเราเรียกว่าช่วงเวลาล่าช้า t_d นั่นเอง ในรูปที่ 4.5 ค ซึ่งแสดงวงจรสวิตช์ที่เหมือนกับวงจรในรูปที่ 4.4

และวงจรเสมือนขณะที่เวลา t_{-0} จะเห็นว่าขณะนี้ทั้งรอยต่อของอิมิตเตอร์กับเบสและรอยต่อของคอลเล็กเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ ดังนั้นตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสจะทำการประจุ (charge) เพื่อให้แรงดันตกคร่อมเป็น $-e_{in}$ โวลต์ และที่รอยต่อคอลเล็กเตอร์กับเบสก็เช่นเดียวกันจะเกิดตัวเก็บประจุที่รอยต่อนี้ขึ้น และทำหน้าที่ประจุเพื่อให้มีแรงดันตกคร่อมเป็นผลรวมระหว่างค่า V_{CC} และ e_{in} เมื่อเวลาผ่านไปเป็น t_{+0} กระแสคอลเล็กเตอร์จะยังคงไม่มีจนกว่ารอยต่อที่อิมิตเตอร์กับเบสจะได้รับแรงดันไบแอสตรงอย่างเต็มที่ (ต้องใช้เวลา t_d) และกระแสคอลเล็กเตอร์จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นจนถึงภาวะอิ่มตัวอย่างทันทีทันใด เนื่องจากตัวเก็บประจุของรอยต่อของคอลเลคเตอร์กับเบสจะทำการคายประจุ โดยการแพร่ของพาหะผ่านส่วนของเบสดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์จึงค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงภาวะอิ่มตัว (ใช้เวลา t_r)

จากรูปที่ 4.4 ขณะที่เวลา t_{+1} แรงดันอินพุตจะมีค่าเป็นลบจะทำให้รอยต่อที่อิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับอีกครั้งหนึ่ง แต่ค่าแรงดันที่เอาต์พุตจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด กล่าวคือจะยังมีกระแสคอลเล็กเตอร์ไหลอยู่ และทำให้แรงดันที่เอาต์พุตยังคงมีค่าเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่าขณะที่เวลา t_{-1} ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในภาวะอิ่มตัว กระแสคอลเล็กเตอร์ไหลเต็มที่และกำหนดได้ด้วยความต้านทาน R_L ที่อยู่ภายนอก และเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าลดลงเป็นศูนย์หรือเป็นลบแล้วก็ตาม แต่จะมีประจุพาหะอิเล็กตรอนสะสมอยู่บริเวณเบส (กรณี NPN ทรานซิสเตอร์) และตราบใดที่ประจุพาหะเหล่านี้ยังมีอยู่ จะทำให้มีกระแสคอลเล็กเตอร์ไหล

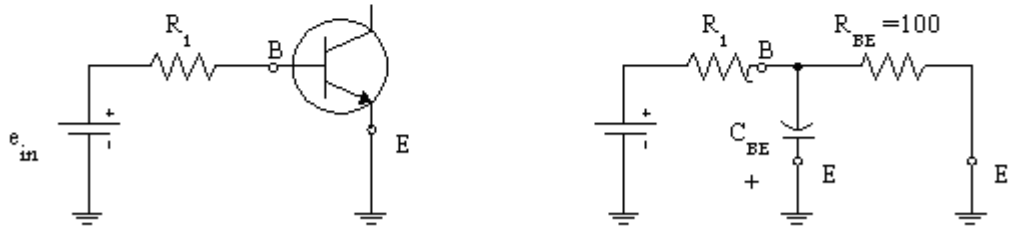
ได้ เมื่อพาหะนี้หมดไปกระแสคอลเล็กเตอร์จึงจะหยุดไหล ช่วงเวลาที่ทำให้ประจุพาหะที่เบสนี้หมดไปถูกเรียกว่า **ช่วงเวลาสะสม** (storage time) เขียนแทนด้วย t_S ดังแสดงในรูปที่ 4.4

และเนื่องจากการเกิดของ t_S นี้เองทำให้เกิดความกว้างของพัลส์ที่เอาต์พุตมีค่ามากกว่าพัลส์ที่อินพุท ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 คือช่วง t_p และภายหลังที่แรงดันอินพุตเป็นลบแล้ว ช่วงเวลาที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็น $+V_{CC}$ (ในกรณีNPN) ถูกเรียกว่าเวลา "**เวลาเทินออฟ**" (turn off) เขียนแทนด้วย t_{off} นั่นคือเวลา t_{off} ประกอบด้วยเวลาย่อยๆสามส่วนคือ t_S , t_f และ t_d ซึ่งอาจจะกล่าวสรุปได้ว่า



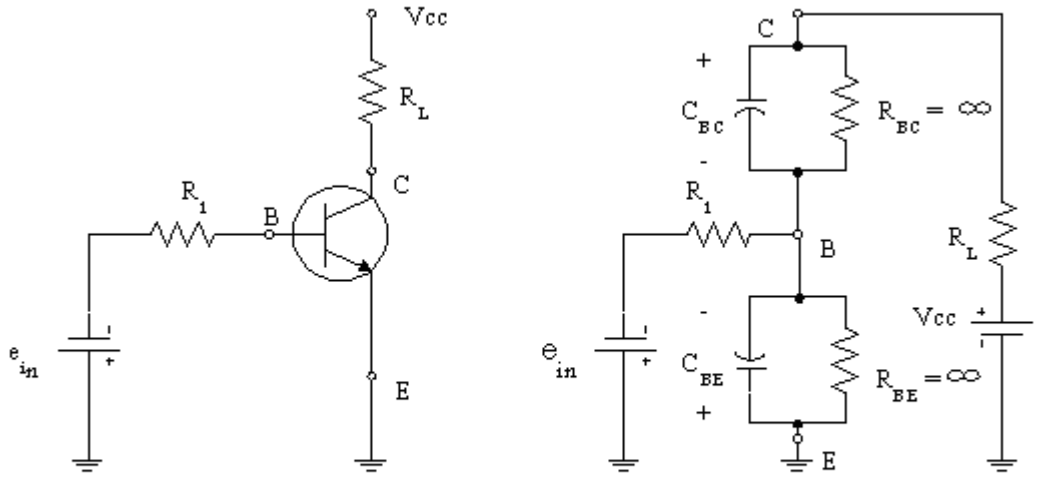
Circuit at t_{-0} time

(ก)



Circuit at t_{+0} time

(ข)



Circuit at t_{-0} time

(ค)

รูปที่ 4.5 แสดงวงจรเสมือนของวงจรสวิตช์โดย (ก) ทีเวลา t_{-0} (ข) ทีเวลา t_{+0} (ค) ทีเวลา t_{-0}

"เวลาสะสม" (storage time) t_s ก็คือเวลาที่ใช้ในการทำให้ประจุพาหะที่สะสมอยู่บริเวณเบสหมดไป โดยอาศัยขบวนการรวมตัวของพาหะ (carrier recombination process) หลังจากที่แรงดันอินพุตลดลงเป็นศูนย์โวลต์ ดังนั้นช่วงเวลา t_s จึงขึ้นอยู่กับ ขบวนการรวมตัวของพาหะและขนาดของแรงดันไบแอสย้อนกลับที่แรงดันอินพุต

"เวลาตก" (fall time) t_f ก็คือช่วงเวลาที่ใช้ในการทำให้แรงดันที่เอาต์พุต (ของทรานซิสเตอร์แบบ NPN) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดัน V_{CC} โดยที่เป็นเวลาต่อจากเวลาสะสม

"เวลาล่าช้า" (delay time) t_d ก็คือ ช่วงเวลาต่อจาก เวลาตก เพื่อทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะไม่ทำงานอย่างสมบูรณ์ กล่าวคือแรงดันที่เอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับแรงดัน V_{CC}

อย่างไรก็ดีในความเป็นจริงแล้วช่วงเวลาเหล่านี้มีค่าน้อยมากเช่นราว 10^{-9} วินาที และโดยทั่วไปโรงงานผู้ผลิตทรานซิสเตอร์ที่เหมาะแก่การนำไปใช้งานในวงจรสวิตช์มักจะบ่งบอกคุณสมบัติค่าของ t_{on} และ t_{off} ไว้เป็นสำคัญโดยที่

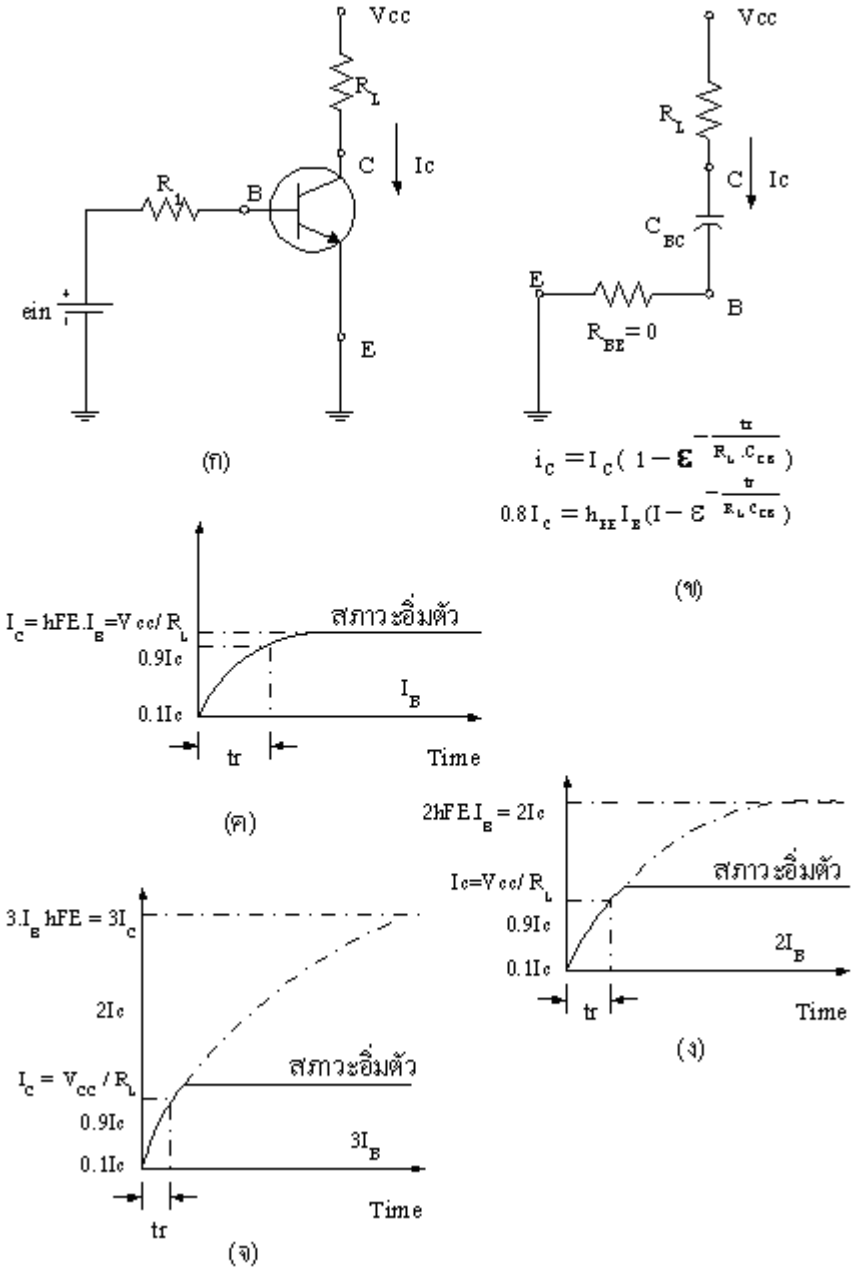
$$t_{on} = t_d + t_r \qquad \text{.....(4.3)}$$

และ

$$t_{off} = t_S + t_f + t_d \qquad \text{.....(4.4)}$$

4.2.2 การลดค่า "เวลาไต่ขึ้น" โดยเพิ่มกระแสเบส

จากในรูปที่ 4.4 ช่วงเวลาไต่ขึ้น t_r ก็คือช่วงเวลาที่ใช้ในช่วงกระแสคอลเล็กเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 10 เปอร์เซ็นต์ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของกระแสคอลเล็กเตอร์ในภาวะอิ่มตัว เมื่อทรานซิสเตอร์ OFF



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรเสมือนและคุณสมบัติของรูปที่ 4.4 ขณะเวลา t_{-0}

รอยต่อระหว่างคอลเล็กเตอร์กับเบสจะ ได้รับแรงดันย้อนกลับดังนั้นจึงกระทำตัวคล้ายกับเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor) C_{CB} ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) เมื่อพัลส์ทางด้านอินพุตถูกป้อนเข้ามาและทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสได้รับแรงดันไบแอสตรง ดังนั้นความต้านทานของรอยต่อดังกล่าวนี้จึงมีค่าน้อยมาก ($R_{BE} = 0$) ดังนั้นในวงจรของรูปที่ 4.6 (ก) ที่เวลา t_{+0} เราสามารถเขียนวงจรเสมือนได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข)

ดังนั้นกระแสคอลเล็กเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นโดยมีช่วงเวลาคงที่ค่าหนึ่ง (R_L . C_{CB}) นั่นคือ

$$i_c = I_C(1-\varepsilon^{-t/R_L.C_{CB}}) \qquad \text{.....(4.5)}$$

โดยที่กระแส $I_C = h_{FE} I_B$ หรือ $= \frac{V_{CC}}{R_L}$

จากนิยาม $t_r = t_{on} - t_d = 90\% - 10\% = 80\%$ หรือ $t_r = 0.8$

ดังนั้นในช่วง t_r จะได้ว่า

$$0.8\, I_C = h_{FE} I_B(1-\varepsilon^{-t_r/R_L.C_{CB}}),\ \tau = R_L . C_{CB}$$

$$\frac{0.8V_{CC}}{R_L} = \frac{V_{CC}}{R_L}(1-\varepsilon^{-t_r/\tau})$$

$$0.8 = 1-\varepsilon^{-t_r/\tau}$$

$$\varepsilon^{+t_r/\tau} = 5$$

$$t_r = \tau . \frac{\log_{10}^{5}}{\log_{10}^{\varepsilon}} = \tau\frac{0.699}{0.434}$$

$$t_r = 1.61\,\tau$$

นั่นคือช่วงเวลาไต่ขึ้น t_r จะขึ้นอยู่กับค่า τ ซึ่งเป็นผลคูณของค่า R_L และ C_{CB} แต่อย่างไรก็ดีในกรณีที่ต้องการให้ค่า t_r มีค่าน้อยลงโดยที่ค่า R_L , C_{CB} และ h_{FE} ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ อาจจะทำได้โดยการพิจารณาจากรูปที่ 4.6 (ง) และ (จ) ซึ่งค่า I_C มีค่ามากกว่าเดิมจะเห็นว่าในกรณีที่กระแส I_C เพิ่มขึ้นเป็น 2 I_C เวลาไต่ขึ้น t_r จะมีค่าน้อยลงกว่าเดิมโดย

$$i_C = I_C . (1-\varepsilon^{-t_r/\tau})$$

$$\frac{0.8V_{CC}}{R_L} = 2\, h_{FE} I_B(1-\varepsilon^{-t_r/\tau})$$

$$\frac{0.8V_{CC}}{R_L} = 2\frac{V_{CC}}{R_L}(1-\varepsilon^{-t_r/\tau})$$

$$6^{+t_r/\tau} = 1.67$$

$$t_r = \tau . \frac{\log 10^{1.67}}{\log 10^{\varepsilon}} = \tau\frac{0.222}{0.434} = 0.511\,\tau$$

ดังนั้น $t_r = 0.511\,\tau$

หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อกระแสเบสมีค่า I_B ค่าเวลาไต่ขึ้น $t_r = 1.61\,\tau$

และเมื่อกระแสเบสมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 I_B ค่าเวลาไต่ขึ้น $t_r = 1.61\,\tau$

ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อกระแสเบสเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็นสองเท่า ค่าของเวลาไต่ขึ้น t_r จะลดลงเหลือ $\frac{0.511}{1.61} = \frac{1}{3}$ เท่าของเวลาไต่ขึ้น

หรือถ้าหากว่าพิจารณากระแสเบส I_B เพิ่มขึ้นอีกเป็น $3I_B$ จะได้ว่า

$$\frac{0.8V_{CC}}{R_L} = 3\, h_{FE} I_B(1-\varepsilon^{-t_r/\tau})$$

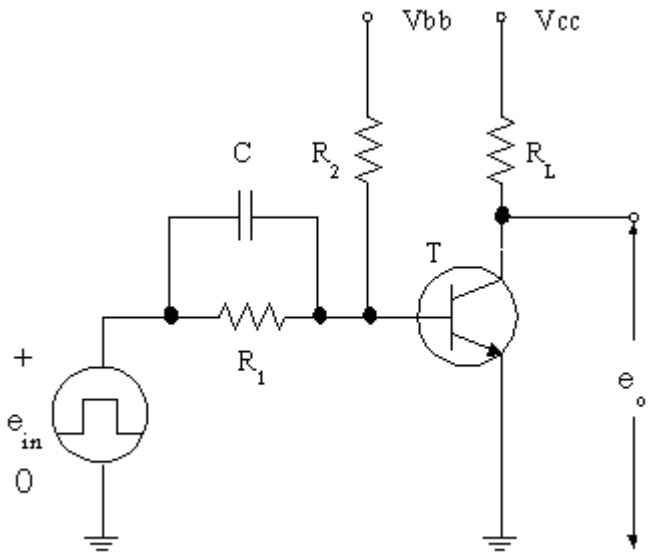
$$\frac{0.8V_{CC}}{R_L} = 3\frac{V_{CC}}{R_L}(1-\varepsilon^{-t_r/\tau})$$

$$t_r = 0.309\,\tau$$

ซึ่งอาจสรุปได้ว่าเมื่อกระแสเบสเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็นสามเท่า ค่าของเวลาไต่ขึ้น t_r จะลดลงเหลือ $\frac{0.309}{1.61} = \frac{1}{5}$ เท่าของเวลาไต่ขึ้นเดิม ในทางปฏิบัติเมื่อการลดค่าของเวลาไต่ขึ้น t_r ของวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ก็กระทำได้โดยการลดค่า R1 ในวงจรรูปที่ 4.6 (ก) เพื่อให้ค่ากระแสเบส I_B เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ดีการลดค่าของ t_r ด้วยวิธีนี้จะทำให้ “เวลาสะสม” (storage time , t_S) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเสียอย่างหนึ่ง

4.2.3 สปีดอัพคาปาซิเตอร์

ในการลดค่าเวลาไต่ขึ้น โดยการเพิ่มกระแสเบส เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน ON ได้อย่างรวดเร็วดังที่กล่าวมาแล้วนั้น นอกจากนี้แล้วการลดค่าเวลาไต่ขึ้น ยังสามารถทำได้โดยการเพิ่มตัวเก็บประจุ C เข้าไปในวงจรโดยต่อขนานอยู่กับตัวความต้านทาน R_L ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ตัวเก็บประจุนี้ถูกเรียกว่า “ สปีดอัพคาปาซิเตอร์ ”



รูปที่ 4.7 แสดงวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ซึ่งมีสปีดอัพคาปาซิสเตอร์

ในขณะที่ทางอินพุตมีพัลส์เข้ามา กระแสเบสจะทำการประจุผ่านตัวเก็บประจุนี้ ดังนั้นจะเห็นว่ากระแสเบสประกอบด้วยกระแสย่อยสองกระแสคือ ส่วนหนึ่งเป็นกระแสที่ประจุผ่านตัวเก็บประจุ C และอีกส่วนหนึ่งเป็นกระแสปกติซึ่งไหลผ่านตัวความต้านทาน R_1 ผลของตัวเก็บประจุ C และ R_1 ที่มีต่อกระแสเบส I_B แยกเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยที่รูปที่ 4.8 (ก) แสดงผลของการประจุของตัวเก็บประจุ C ทำให้เกิดกระแสเบส I_B ส่วนหนึ่ง โดยสมมติว่าค่าความต้านทานของรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสมีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อพัลส์ทางอินพุตถูกป้อนเข้ามาที่เวลา t_{+0} (ดูรูปที่ 4.8 ก) แรงดันจากอินพุตทั้งหมดจะปรากฏตกคร่อมที่รอยต่ออิมิตเตอร์และเบส (V_{BE}) เมื่อเวลาผ่านไปตัวเก็บประจุ C จะทำการประจุทำให้มีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น(e_C) ขณะที่มีการประจุกระแสเบส I_B จะมีค่าลดลงในที่สุดจะมีค่าเป็นศูนย์ ที่เวลา t_{+1} พัลส์อินพุตจะมีค่าแรงดันเป็นศูนย์ ดังนั้นตัวเก็บประจุ C จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน และทำให้รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ แรงดันไบแอสย้อนกลับดังกล่าวนี้จะช่วยทำให้ช่วงเวลาสะสม(storage time) มีค่าน้อยลง ดังนั้นจึงเห็นชัดว่าการประจุของตัวเก็บประจุ “สปีดอัพคาปาซิเตอร์” นี้จะช่วยเพิ่มกระแสเบสซึ่งจะมีผลให้เวลาไต่ขึ้นมีค่าน้อยลง และเมื่อประจุแล้วจะมีผลช่วยทำให้ช่วงเวลาสะสมลดน้อยลง ดังในรูปที่ 4.8(ก)

ในรูปที่ 4.8 (ข) แสดงวงจรทางอินพุตของวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ โดยสมมติว่าค่าความต้านทานของรอยต่ออิมิตเตอร์และเบสมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง r_{BE} ดังนั้นวงจรอินพุตจึงมีลักษณะคล้ายกับวงจรแบ่งแรงดัน (voltage divider) และลักษณะของแรงดัน V_{BE} และกระแสเบส I_B แสดงดังในรูป

ดังนั้นเมื่อพิจารณาวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ซึ่งมีสปีดอัพคาปาซิเตอร์จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ค ซึ่งแสดงลักษณะของกระแสเบสทั้งทางทฤษฎีซึ่งสมมติว่าค่าความจุไฟฟ้า ของรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสมีค่าน้อยมากจนไม่นำมาพิจารณา และกระแสเบสในทางปฏิบัติการกำหนดค่าของสปีดอัพคาปาซิเตอร์ทำได้โดย

$$I = \frac{Q}{t} \text{ และ } Q = C.E$$

$$\text{ดังนั้น } I = \frac{C.E}{t}$$

$$\text{และ } C = \frac{It}{E}$$

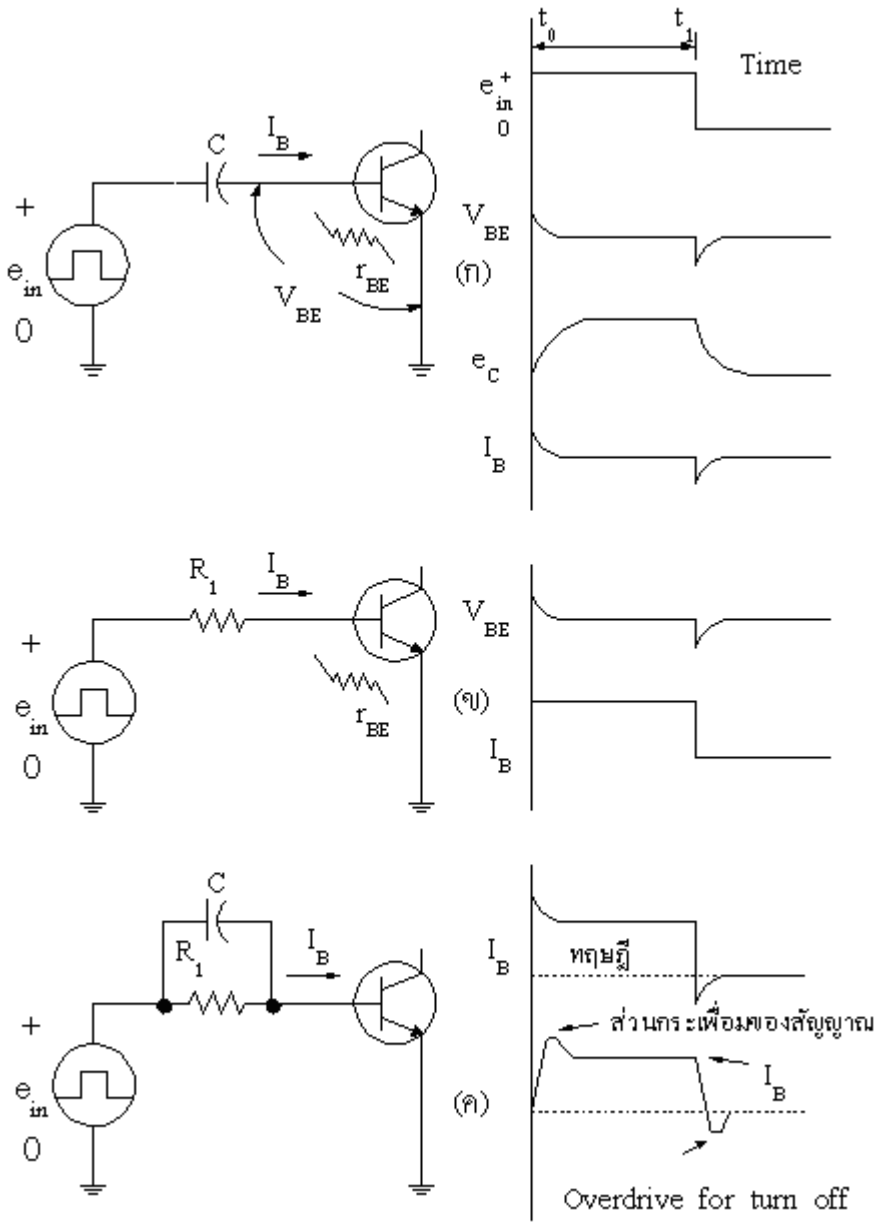
โดยที่ Q คือ ปริมาณของประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)

I คือ I_B ซึ่งเป็นกระแสเบสส่วนเกินค่าปกติ (แอมแปร์)

t คือ t_r ซึ่งเป็นเวลาไต่ขึ้น (วินาที)

E คือ ขนาดของแรงดันของพัลส์ที่อินพุท (โวลต์)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสปีดอัพคาปาซิเตอร์ (ฟาหรัด)



รูปที่ 4.8 แสดงผลของสปีดอัพคาปาซิเตอร์ในวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์

ตัวอย่าง ถ้าหากต้องการออกแบบวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเดิมไม่มีสปีดอัพคาปาซิเตอร์มีเวลาไต่ขึ้น $t_r = 3\ \mu sec$ ให้มีค่าลดลงเป็น $t_r = 1\ \mu sec$ โดยใช้สปีดอัพคาปาซิเตอร์จะต้องใช้ตัวเก็บประจุซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าเท่าใด

จาก $I_C = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{20V}{1k\Omega} = 20\ mA$

$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{20mA}{40} = 0.5\ mA$

เนื่องจาก $I_{B\ รวม} = I_{B\ ปกติ} + I_{B\ ที่เกินค่าปกติ}$

$2\ mA = 0.5\ mA + I_{B\ ที่เกินค่าปกติ}$

$\therefore I_{B\ ที่เกินค่าปกติ} = 1.5\ mA$

จาก $C = \frac{I_B.t_r}{e_{in}} = \frac{1.5\times10^{-3}mA\times1\times10^{-6}S}{5V}$

ดังนั้น $C = 300\ \mu F$

นั่นคือต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้า 300 μF มาต่อร่วมในวงจร

จบเนื้อหา บทที่ 6 ทรานซิสเตอร์สวิตช์