

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

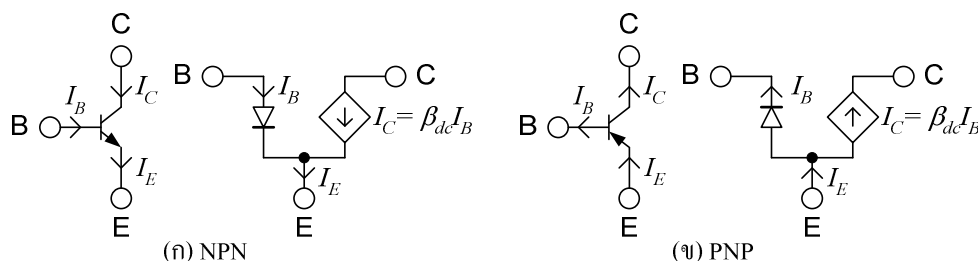
AEL-04 การทำงานของทรานซิสเตอร์ประเภท BJT เบื้องต้น**วัตถุประสงค์ของการทดลอง**

1. ศึกษาแบบจำลองทรานซิสเตอร์ประเภท BJT อย่างง่าย
2. ศึกษาการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ประเภท BJT เบื้องต้น
3. เรียนรู้การใช้ทรานซิสเตอร์ประเภท BJT ทำงานเป็นสวิตช์

ทรานซิสเตอร์ประเภท bipolar junction มีสถานะการทำงานอยู่ 3 สถานะ คือ สถานะคัทออฟ (cut-off state), สถานะแอคทีฟ (active state), และสถานะอิ่มตัว (saturation state). โดยทั่วไป สถานะคัทออฟ และสถานะอิ่มตัวจะเกิดขึ้นเมื่อทรานซิสเตอร์ถูกใช้เป็นสวิตช์ปิด/เปิด. ถ้าทรานซิสเตอร์ถูกออกแบบให้ขยายสัญญาณ ทรานซิสเตอร์จะทำงานในสถานะแอคทีฟเป็นหลัก.

4.1. แบบจำลองของทรานซิสเตอร์อย่างง่าย

แบบจำลองของทรานซิสเตอร์มีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับรายละเอียดที่ต้องการ. รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองทรานซิสเตอร์อย่างง่ายสำหรับการขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง. ในการขยายสัญญาณ emitter junction ซึ่งถูก forward biased จะถูกแทนด้วยไดโอด และ collector junction ซึ่งถูก reversed biased จะถูกแทนด้วย current-controlled current source.



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทรานซิสเตอร์ประเภท BJT อย่างง่ายสำหรับการขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง. (ทิศของกระแสที่แสดงไว้ เป็นทิศกระแสในสถานะทำงานปกติ ซึ่งมีค่าเป็นบวก.)

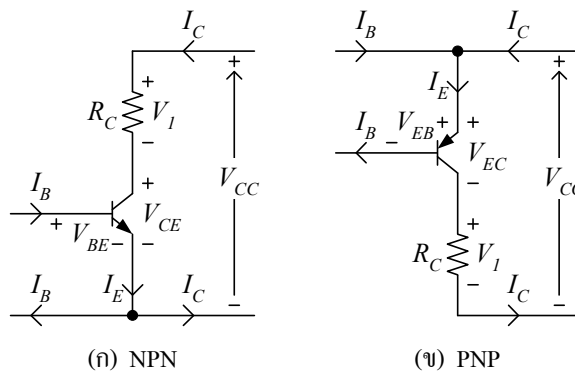
กระแสเบส (base current หรือ I_B) เป็นกระแสที่ควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ประเภท BJT. ถ้ากระแสเบสเป็นศูนย์ กระแสคอลเลกเตอร์ (collector current หรือ I_C) และกระแสเอมิเตอร์ (emitter current หรือ I_E) จะเป็นศูนย์ด้วย ซึ่งสถานะนี้เรียกว่า สถานะคัทออฟ. ถ้าให้ I_B ไหล ก็จะมี I_C และ I_E ไหลด้วย. (ทิศทางของกระแสนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของทรานซิสเตอร์ว่าเป็นชนิด NPN หรือ PNP.) อัตราส่วนของ I_C ต่อ I_B จะเป็นอัตราขยายกระแสตรงของทรานซิสเตอร์ (β_{dc} หรือ h_{FE}). ขนาดแรงดันระหว่างเบสและเอมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะมีค่าประมาณ 0.7 V (ประมาณเท่ากับ forward voltage ของไดโอด). สถานะตอนนี้ของทรานซิสเตอร์เรียกว่า สถานะแอคทีฟ. ถ้า I_C ที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้ V_{CE} ของทรานซิสเตอร์ที่ถูกใช้งานในวงจร ลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งมีค่าประมาณ 0.2 V ทรานซิสเตอร์จะเข้าสู่สถานะอิ่มตัว ซึ่งจะทำให้ $I_C <$

$\beta_{dc} I_B$. ขนาดของแรงดันระหว่างเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเป็น 0.8 V โดยประมาณ.

ทรานซิสเตอร์ประเภท BJT เป็นอุปกรณ์ที่ไวต่ออุณหภูมิ. ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น β จะมีค่าสูงขึ้น และ V_{BE} จะมีค่าเปลี่ยนไปประมาณ $-2.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. นอกจากนี้ แรงดัน breakdown ที่ collector junction จะต่ำลงด้วย. ทรานซิสเตอร์ประเภท BJT จึงเสี่ยงต่อความเสียหายแบบ secondary breakdown ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลไม่เท่ากันตลอดพื้นที่ของ junction. จุดใดที่มีกระแสไหลมาก จะมีความร้อนมาก ซึ่งทำให้ค่า β ที่จุดนั้น มีค่าสูงขึ้น. β ที่สูงขึ้น ยิ่งทำให้กระแสไหลไปรวมที่จุดนั้นมากขึ้นไปอีก และทำให้จุดนั้นยิ่งร้อนขึ้นไปอีก. ถ้าอุณหภูมิที่จุดนั้นสูงเกินไป แรงดัน breakdown ที่จุดนั้นจะต่ำลง ทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัว ทรานซิสเตอร์ได้.

4.2. การทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์เบื้องต้น

เมื่อนำทรานซิสเตอร์ชนิด NPN มาต่อในวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.2 ก ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่จุดต่างๆของวงจร ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.1.



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบการทำงานของทรานซิสเตอร์ประเภท BJT.

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของวงจรในรูปที่ 4.2 ก.

สถานะ	V_{BE}	I_C	V_{CE}	V_I
คัทออฟ ($I_{B0} = 0$)	$< 0.5 \text{ V}$	$= 0 \text{ A}$	$= V_{CC}$	$= 0 \text{ V}$
แอคทีฟ ($I_{Ba} > 0$)	$0.6 - 0.7 \text{ V}$	$= \beta_{dc} I_B$	$= V_{CC} - I_C R_C$	$= I_C R_C$
อิ่มตัว ($I_{Bs} > I_{Ba} > 0$)	0.8 V	$\approx (V_{CC} - 0.2 \text{ V}) / R_C$ $< \beta_{dc} I_B$	$\approx 0.2 \text{ V}$	$\approx V_{CC} - 0.2 \text{ V}$

สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP เมื่อนำมาต่อในวงจรที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ข ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่จุดต่างๆของวงจร ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.2. ไม่ว่าจะเป็นทรานซิสเตอร์แบบ NPN หรือ PNP ก็ตาม การเปลี่ยนจากสถานะคัทออฟเป็นอิ่มตัว หรือกลับกัน จะต้องผ่านสถานะแอคทีฟเสมอ.

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของวงจรในรูปที่ 4.2 ข.

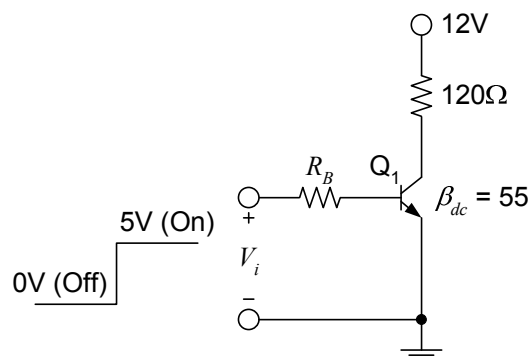
สถานะ	V_{EB}	I_C	V_{EC}	V_I
คัทออฟ ($I_{B0} = 0$)	$< 0.5 \text{ V}$	$= 0$	$= V_{CC}$	$= 0$
แอคทีฟ ($I_{Ba} > 0$)	$0.6 - 0.7 \text{ V}$	$= \beta_{dc} I_B$	$= V_{CC} - I_C R_C$	$= I_C R_C$
อิ่มตัว ($I_{Bs} > I_{Ba} > 0$)	0.8 V	$\approx (V_{CC} - 0.2) / R_C$ $< \beta_{dc} I_B$	$\approx 0.2 \text{ V}$	$\approx V_{CC} - 0.2$

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวทรานซิสเตอร์ส่วนใหญ่ สามารถประมาณได้จากผลคูณของกระแส I_C และ $|V_{CE}|$. สถานะคัทออฟและสถานะอิ่มตัวเป็นสถานะที่มีกำลังงานสูญเสียในตัวทรานซิสเตอร์ต่ำ เนื่องจากสถานะคัทออฟมีกระแส I_C ประมาณศูนย์ ส่วนสถานะอิ่มตัวมี $|V_{CE}|$ ต่ำประมาณ 0.2 V. ในทางตรงกันข้าม สถานะแอคทีฟเป็นสถานะที่มีกำลังงานสูญเสียในตัวทรานซิสเตอร์สูง และจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $|V_{CE}|$ เท่ากับ $0.5V_{CC}$ ซึ่งจะมีค่ากำลังงานสูญเสียเท่ากับ $(0.5V_{CC})^2 / R_C$.

4.3. การออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์

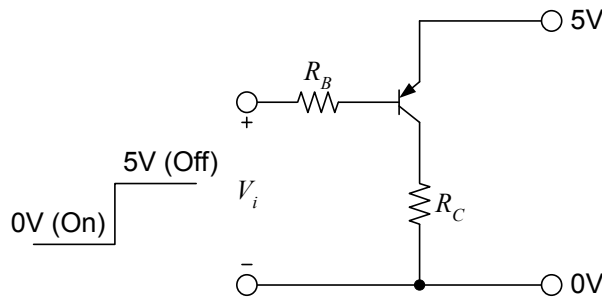
ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นสวิตช์ จะอยู่ในสถานะคัทออฟหรือสถานะอิ่มตัว เป็นหลัก. สถานะคัทออฟเทียบได้กับสวิตช์ที่ Off ซึ่งไม่มีกระแสไหล. วิธีที่ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะนี้ สามารถทำได้โดยให้ I_B เป็นศูนย์(ทั้ง emitter junction และ collector junction ถูก reverse biased). ส่วนสถานะอิ่มตัวเทียบได้กับสวิตช์ที่ On มีกระแสไหลได้ โดยมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ต่ำประมาณ 0.2 V. วิธีที่ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะอิ่มตัวนี้ สามารถทำได้โดยเพิ่มกระแส I_B ไปเรื่อยๆ จนกว่า $\beta_{dc} I_B > I_C$ ซึ่ง I_C จะประมาณเท่ากับ $(V_{CC} - 0.2) / R_C$.

ตัวอย่างเช่น วงจรในรูปที่ 4.3 ให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ โดยรับแรงดัน V_i มาจากวงจรอื่น. ถ้า V_i มีค่าเท่ากับศูนย์ ให้สวิตช์อยู่ในสถานะ Off. แต่ถ้า V_i มีค่าเป็น 5V ให้สวิตช์อยู่ในสถานะ On และให้มีกระแสผ่าน R_C เท่ากับ 100 mA. ถ้ากำหนดให้ β_{dc} ของ Q_1 เท่ากับ 55 ค่า R_B ที่เหมาะสมจะต้องน้อยกว่า $\frac{5 - 0.8}{100 \times 10^{-3}} \times 55$ ซึ่งเท่ากับ 2310 Ω . เลือก R_B เท่ากับ 2.2 k Ω . ค่า β_{dc} ของทรานซิสเตอร์ จะต้องดูจาก datasheet ของเบอร์ที่จะใช้งาน และจะต้องทราบย่านกระแส I_C ที่จะใช้งานด้วย.



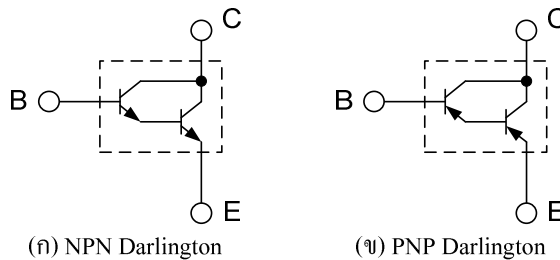
รูปที่ 4.3 วงจรทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทำหน้าที่เป็นสวิตช์.

ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP สามารถนำมาใช้งานเป็นสวิตช์ได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งจะมีการทำงานตรงข้ามกับวงจรในรูปที่ 4.3. เมื่อ V_i เท่ากับศูนย์ สวิตช์จะ On. แต่ถ้า V_i เท่ากับ 5 V สวิตช์จะ Off.



รูปที่ 4.4 วงจรทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ทำหน้าที่เป็นสวิตช์.

ถ้า I_C มีค่าสูง ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียวมีอัตราขยายกระแสไม่พอ เราสามารถต่อทรานซิสเตอร์แบบ Darlington ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อให้ช่วยขยายกระแสให้ได้มากขึ้น. อัตราขยายกระแสรวมของทรานซิสเตอร์แบบ Darlington นี้มีค่ามากกว่า 1000 เท่า. ทรานซิสเตอร์บางเบอร์มีการต่อเป็นแบบ Darlington ไว้ภายในแล้ว. ถ้า I_C ของทรานซิสเตอร์มีขนาดหลายสิบถึงหลายร้อยแอมป์ อาจมีการใช้ทรานซิสเตอร์มากกว่าสองตัวต่อพ่วงกันแบบ Darlington นี้ เพื่อช่วยกันขยายกระแส.

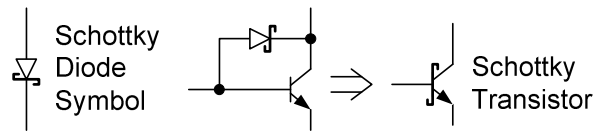


รูปที่ 4.5 ทรานซิสเตอร์แบบ Darlington.

แรงดันระหว่างขา base และ emitter ของทรานซิสเตอร์แบบ Darlington จะเพิ่มขึ้นเป็น 1.4 V และแรงดัน V_{CE} ในสถานะอิ่มตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.9 V โดยประมาณ.

4.4. การทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์ได้เร็วขึ้นโดยการต่อ Schottky Diode

ถ้าให้ I_B เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในสถานะอิ่มตัวมากเกินไป ทรานซิสเตอร์จะ Off ได้ช้า เนื่องจากมีประจุในบริเวณ junction มากเกินไป. วิธีหนึ่งที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ Off ได้เร็วขึ้น คือ การต่อ Schottky diode ระหว่างขา base และ collector ดังแสดงในรูปที่ 4.6. Schottky diode เป็น diode ที่มี forward voltage ต่ำประมาณ 0.2-0.3 V และทำงานได้เร็วมาก. ในสภาวะการทำงานปกติ Schottky diode จะถูก reversed bias ทำให้ไม่มีกระแสไหล. แต่ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_1 จะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว แรงดันที่ขา base จะสูงกว่าขา collector ทำให้ Schottky diode นำกระแส. แรงดัน V_{CE} ของทรานซิสเตอร์จะไม่ลดต่ำถึงประมาณ 0.2 V เพราะการนำกระแสของ Schottky diode. ทรานซิสเตอร์จึงไม่เข้าสู่สถานะอิ่มตัว แต่จะเป็นสถานะแอกทีฟที่เกือบจะเป็นสถานะอิ่มตัว. การทำงานของทรานซิสเตอร์จะเร็วขึ้นกว่าที่เข้าสู่สถานะอิ่มตัวไปแล้ว. ทรานซิสเตอร์ที่มีการต่อ Schottky diode ไว้ภายใน จึงเรียกว่า Schottky transistor.

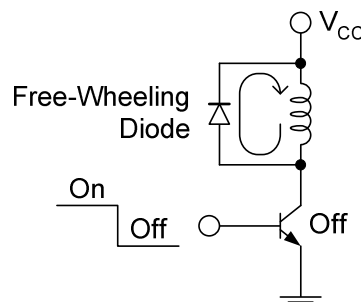


รูปที่ 4.6 การต่อ Schottky diode เข้ากับทรานซิสเตอร์เพื่อให้ทำงานได้เร็วขึ้น.

Standard digital IC ได้มีการนำ Schottky diode ไปใช้อย่างแพร่หลาย. ถ้าเบอร์ของ IC เหล่านี้มีตัวอักษร S อยู่ เช่น 74S00, 74LS00 แสดงว่ามีการใช้ Schottky diode อยู่ภายในด้วย.

4.5. การควบคุมกระแสของโหลดที่เป็นขดลวด

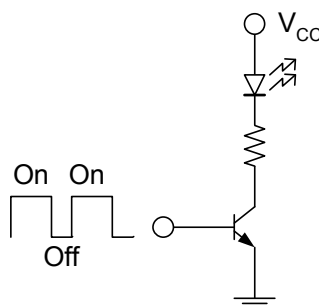
ถ้าโหลดที่จะถูกควบคุมกระแสเป็นขดลวด เช่น รีเลย์ (relay) หรือ มอเตอร์ การหยุดไม่ให้กระแสไหลในขดลวด จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงในขดลวด ซึ่งสามารถทำลายทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ได้. เราสามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับทรานซิสเตอร์ โดยการต่อ diode ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7. ไดโอดนี้เป็น power diode ก็ได้ ทำหน้าที่เป็น free-wheeling diode คือ เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส กระแสในขดลวดยังคงไหลต่อผ่านไดโอดตัวนี้อีกชั่วครู่หนึ่ง จนกระทั่งพลังงานสะสมในขดลวดและกระแสในขดลวดลดลงเป็นศูนย์. ในสภาวะการทำงานปกติ ไดโอดจะถูก reverse biased ทำให้ไม่มีกระแสไหล.



รูปที่ 4.7 การต่อ power diode ให้ทำหน้าที่เป็น free-wheeling diode เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์ สำหรับโหลดที่เป็นขดลวด.

4.6. การควบคุมแบบ Pulse-Width Modulation

ถึงแม้ว่าทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นสวิตช์จะอยู่ในสถานะคัทออฟหรือสถานะอิ่มตัวเป็นหลัก แต่ถ้าเราให้สวิตช์เหล่านี้ทำงานที่ความถี่สูง แล้วควบคุมความกว้างของการ On และ Off จะทำให้สามารถกำลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ที่ถูกควบคุม ค่อยๆ เปลี่ยนอย่างต่อเนื่องได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.8. การควบคุมแบบนี้ เรียกว่า pulse-width modulation.



รูปที่ 4.8 การควบคุมแบบ pulse-width modulation.

4.7. อุปกรณ์

Transistors 2N4401, 2N4403 อย่างละ	1 ตัว
R 1/4W 5% ค่า 27kΩ, 120Ω อย่างละ	1 ตัว
R 2W 5% ค่า 100Ω	1 ตัว
Digital Multimeters	2 ตัว
Function Generator	1 ตัว
DC Power Supply	1 ตัว

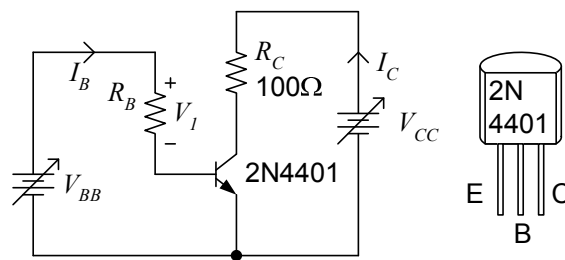
4.8. การทดลอง

4.8.1. การทดลองวงจรทรานซิสเตอร์เบื้องต้น

ต่อวงจรตามรูปที่ 4.9 กำหนดให้ R_B เป็นความต้านทาน 27 kΩ 5% และ V_{CC} มีค่าเท่ากับ 5 V. เปลี่ยนแรงดัน V_{BB} เพื่อให้กระแส I_B และแรงดัน V_{CE} เปลี่ยนตาม. บันทึกผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.3. ให้ใช้การวัดแรงดันคร่อม R_B และ R_C แล้วแปลงมาเป็น I_B และ I_C แทนการวัดกระแสโดยตรง.

วัดค่าความต้านทาน R_B ได้ = _____ Ω (เพื่อใช้ในการคำนวณ I_B).

วัดค่าความต้านทาน R_C ได้ = _____ Ω (เพื่อใช้ในการคำนวณ I_C).



รูปที่ 4.9 วงจรทดสอบการทำงานของทรานซิสเตอร์

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการทดลองวงจรในรูปที่ 4.9 โดยมีแรงดัน V_{CC} เท่ากับ 5 V.

V_{CE} (V)	V_{RC} (V)	I_C (mA)	V_{BE} (V)	V_I (V)	I_B (mA)	I_C/I_B
4						
3						
2.5						
2						
1						
0.4						
0.3						
0.2						

ในรายงานให้เขียนอภิปรายความสามารถในการใช้ I_B ควบคุม I_C ในช่วงที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะแอกทีฟ เปรียบเทียบกับช่วงที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะอิ่มตัว.

ต่อไปให้ใช้แรงดัน V_{CC} เป็น 10 V. เปลี่ยนแรงดัน V_{BB} เพื่อให้กระแส I_B และแรงดัน V_{CE} เปลี่ยนตาม. บันทึกผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.4.

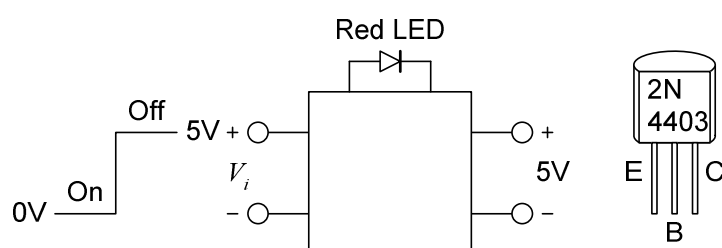
ตารางที่ 4.4 บันทึกผลการทดลองวงจรในรูปที่ 4.9 โดยมีแรงดัน V_{CC} เท่ากับ 10 V.

V_{CE} (V)	V_{RC} (V)	I_C (mA)	V_{BE} (V)	V_i (V)	I_B (mA)	I_C/I_B
8						
6						
5						
4						
2						
0.4						
0.3						
0.2						

ในรายงานให้เขียนอภิปรายความสามารถในการใช้ I_B ควบคุม I_C ในช่วงที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะแอกทีฟ เปรียบเทียบกับช่วงที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะอิ่มตัว ที่แรงดัน V_{CC} เท่ากับ 10 V นี้ และให้เขียนอภิปรายเปรียบเทียบค่า I_C/I_B ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ในช่วงที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะแอกทีฟ.

4.8.2. การใช้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์

ให้ออกแบบวงจรใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ เพื่อให้ LED ติด เมื่อแรงดันอินพุต V_i เป็น 0 V และดับเมื่อ V_i เป็น 5 V. รูปที่ 4.10 แสดงการทำงานของวงจรที่ต้องการ. เมื่อออกแบบเสร็จแล้วให้ต่อวงจรเพื่อทดสอบ และบันทึกค่ากระแส I_C และแรงดัน V_{CE} ขณะที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะอิ่มตัว.

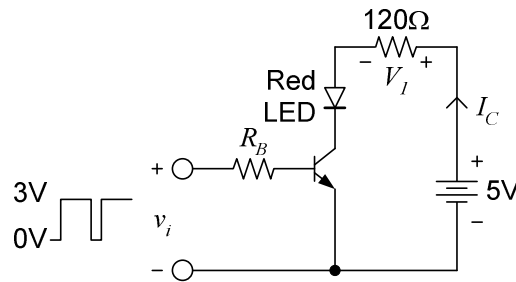


รูปที่ 4.10 Block diagram แสดงการทำงานของวงจรที่ต้องการ.

ในรายงานให้เขียนอธิบายการออกแบบวงจรอย่างละเอียด และเปรียบเทียบกระแส I_C และแรงดัน V_{CE} ที่วัดได้ขณะที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะอิ่มตัว กับค่าที่ใช้ในการออกแบบ.

4.8.3. การควบคุมแบบ Pulse-Width Modulation

ต่อวงจรตามรูปที่ 4.11 ในหน้าถัดไป. คำนวณค่า R_B ที่เหมาะสม สำหรับแรงดันอินพุต v_i ระหว่าง 0 - 3 V.



รูปที่ 4.11 วงจรสำหรับการทดลอง pulse-width modulation

ค่า R_B ที่เหมาะสมตามทฤษฎี = _____ Ω

ค่า R_B ที่เลือกใช้ = _____ Ω

ใช้ function generator ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีแรงดันในช่วง 0 - 3 V มี duty cycle ประมาณ 50 % และมีความถี่ต่ำๆ เพื่อหาว่าความถี่ต่ำเท่าใด จึงจะเริ่มเห็นภาพติดตา ไม่กระพริบ.

ความถี่ต่ำที่สุดที่ทำให้เห็นภาพติดตา = _____ Hz

ใช้ function generator ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีแรงดันในช่วง 0 - 3 V และมีความถี่ประมาณ 1 kHz. ให้ปรับ duty cycle ของสัญญาณตามค่าในคอลัมน์ซ้ายมือของตารางที่ 4.5. ใช้มัลติมิเตอร์วัดค่า $I_{C\ dc}$ และ $V_{I\ dc}$ เพื่อบันทึกลงในตารางที่ 4.5 นี้. สังเกตความสว่างของ LED ที่มองเห็นด้วยตา เพื่อเขียนในรายงานด้วย.

ตารางที่ 4.5 บันทึกผลการทดลอง pulse-width modulation.

Duty Cycle (%) ของ v_i	$I_{C\ dc}$ (mA)	$V_{I\ dc}$ (V)
20		
32		
44		
56		
68		
80		

ในรายงานให้แสดงการคำนวณค่า R_B ที่เหมาะสม สำหรับ v_i ระหว่าง 0 - 3 V และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง duty cycle กับค่า $I_{C\ dc}$ และ $V_{I\ dc}$ รวมทั้งความสว่างของ LED ด้วย.

4.9. สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

ให้สรุปสิ่งที่เรียนรู้ทั้งหมดจากการทดลองแยกเป็นอีกหัวข้อหนึ่งในท้ายรายงาน โดยสรุปเรียงตามลำดับเรื่องที่ทดลอง.