

ใบความรู้ที่ 3

การจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์ (Transistor)

จุดประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของทรานซิสเตอร์
2. สามารถจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์โดยโปรแกรม PSpice

ทฤษฎีเบื้องต้น

ทรานซิสเตอร์ (Transistor) คือ สิ่งประดิษฐ์ทำจากสารกึ่งตัวนำและมีสามขา กระแสหรือแรงดันเพียงเล็กน้อยที่ขาหนึ่งจะควบคุมกระแสหรือแรงดันที่มีปริมาณมาก ที่ไหลผ่านขาทั้งสองข้างได้ หมายความว่าทรานซิสเตอร์เป็นทั้งเครื่องขยาย (Amplifier) และสวิตช์ (Switch) หากนักศึกษายังคงนึกภาพไม่ออก ให้ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ จะเป็นการพ่นสเปรย์ นักศึกษาจะสังเกตเห็นว่าแรงนิวที่เรากำลังใช้กดปุ่มที่กระป๋องนั้นจะใช้พลังงานที่น้อยมากเมื่อเทียบกับแรงที่สเปรย์ทำการพ่นออกมา การขยายคือการนำพลังงานน้อยควบคุมพลังงานมาก โดยทรานซิสเตอร์นั้นจะมีอยู่ทั้งหมดสองตระกูลใหญ่ๆ คือ ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (Bipolar) และแบบสนามไฟฟ้า (Field-Effect) โดยในบทนี้เราจะทำการเรียนรู้ถึงทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์กันก่อน

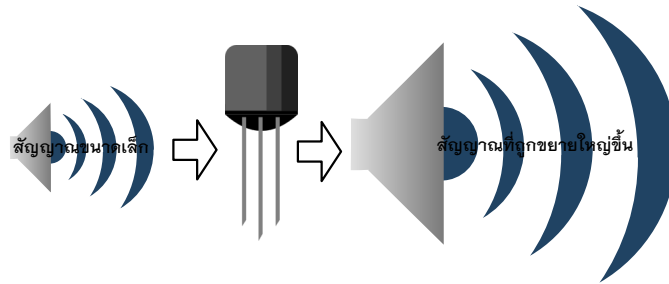


รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบการทำงานของทรานซิสเตอร์กับกระป๋องสเปรย์

3.1 การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Transistor)

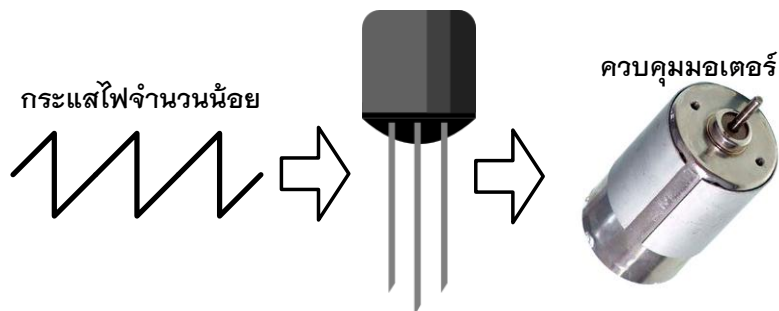
ว่าไปแล้วเจ้าตัวทรานซิสเตอร์นี้จะทำหน้าที่ เป็นตัวขยายสัญญาณ หรือ อาจจะใช้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ โดยการใช้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณดังรูป

ที่ 3.2 สังเกตว่าสัญญาณทางด้านซ้ายจะมีขนาดเล็ก แต่เมื่อผ่าน ทรานซิสเตอร์แล้วสัญญาณจะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้น ซึ่งการใช้งานแบบนี้เรามักจะเห็นในเครื่องขยายเสียงเป็นส่วนใหญ่



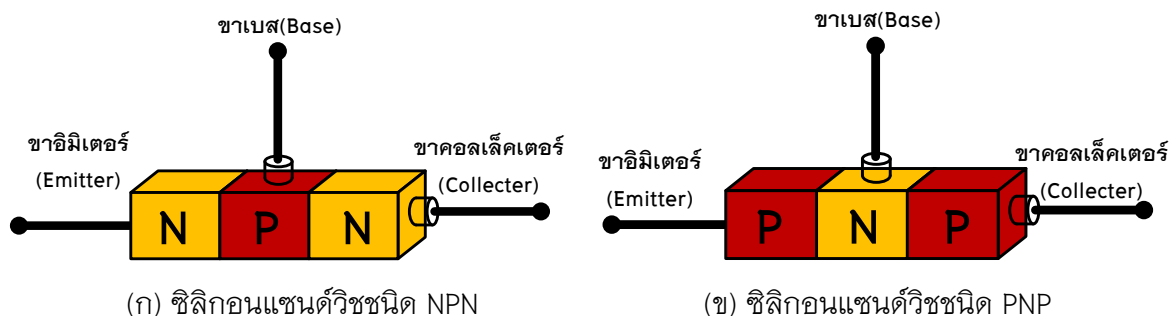
รูปที่ 3.2 การใช้ทรานซิสเตอร์ในการขยายสัญญาณ

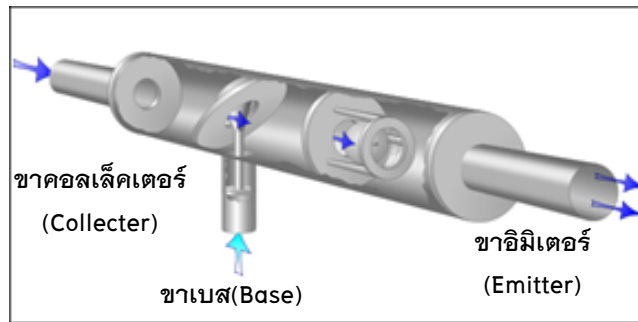
การใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์นั้นถูกใช้งานอย่างมากมาย เพราะเราสามารถใช้กระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยแต่สามารถไปทำให้มอเตอร์ หรือรีเลย์ทำงานได้



รูปที่ 3.3 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นหน้าที่แทนสวิตช์

ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Transistor) จะทำการสร้างขึ้นโดยการเพิ่มข้อต่อ (Junction) ที่สองเข้ากับ PN จังก์ชันของไดโอด (PN Junction Diode) เราจะได้ซิลิกอนที่มีหน้าตาคล้ายๆ กับแซนด์วิช (Silicon Sandwich) จำนวนทั้งหมด 3 ชั้น โดยจะแบ่งประเภทของซิลิกอนแซนด์วิชนี้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ NPN และ PNP ขึ้นอยู่กับชั้นซิลิกอนที่อยู่ตรงกลาง ทำหน้าที่คล้ายๆ กับ ก้อนน้ำ (Tap) หรือ ประตู (Gate) ที่ควบคุมการไหลของไฟฟ้า ที่ผ่านชั้นทั้งสามของซิลิกอน

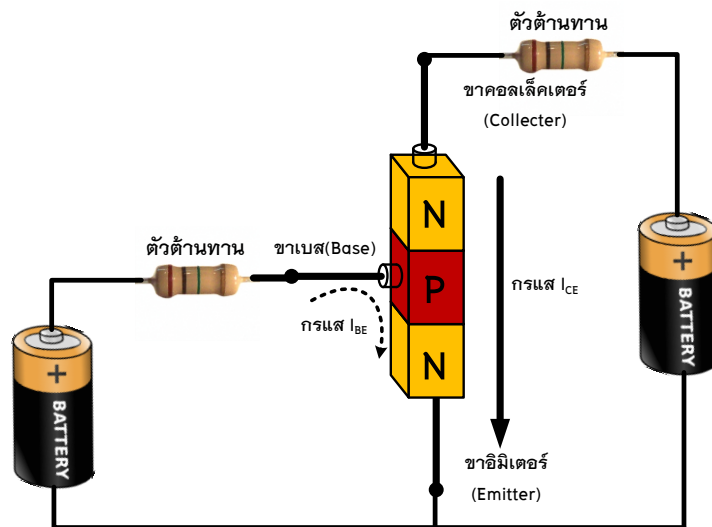




(ค) เปรียบเทียบขาของทรานซิสเตอร์กับก๊อคน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และ NPN

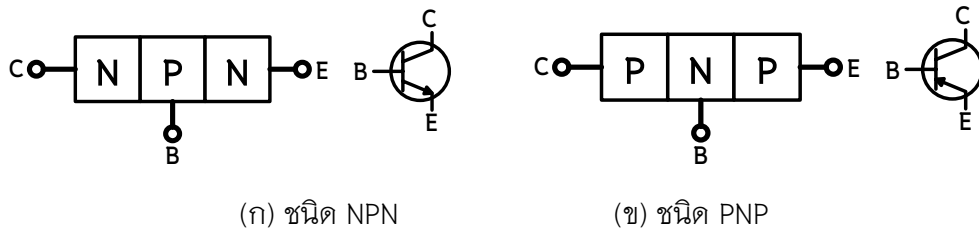
ในตัวของทรานซิสเตอร์แบ่งก๊อนซิลิกอนออกเป็นทั้งหมด 3 ส่วน คือ ก๊อนซิลิกอนที่เป็นอีมิเตอร์ (Emitter) ก๊อนซิลิกอนที่เป็นเบส (Base) และ ก๊อนซิลิกอนที่เป็นคอลเล็คเตอร์ (Collector) ส่วนที่เป็นเบสนั้นจะเป็นส่วนที่บางที่สุด โดยส่วนนี้จะถูกได้ป่นน้อยกว่าส่วนที่เป็นคอลเล็คเตอร์ และ อีมิเตอร์ โดยที่กระแสที่ไหลจากเบสไปยังอีมิเตอร์เพียงเล็กน้อย สามารถที่จะทำให้กระแสที่ไหลจากคอลเล็คเตอร์ไปยังอีมิเตอร์ไหลได้มาก ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งตัวต้านทานจะป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์มากเกินไป



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

ถึงอย่างไรก็ตาม ตัวทรานซิสเตอร์นั้นถูกสร้างโดยมีพื้นฐานมาจากตัวไดโอด ดังนั้นส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่างเบสกับอีมิเตอร์ (Base-Emitter Junction) จะไม่นำกระแสจนกว่าฟอร์เวิร์ดไบอัสจะมีค่าสูงกว่า 0.7 โวลต์ และหากกระแสที่ไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์มากเกินไป ก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์ร้อนจัด และทำงานผิดปกติได้

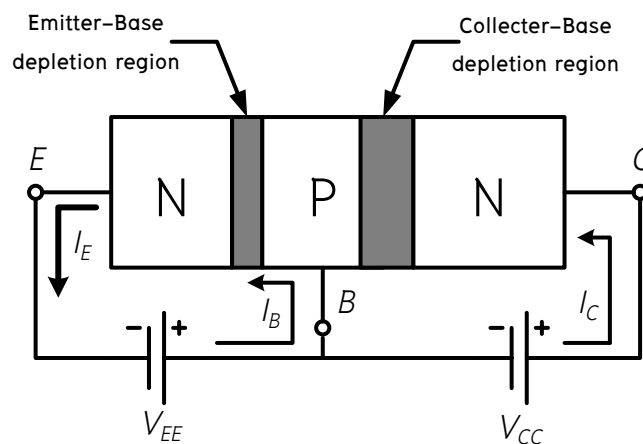
โดยทั่วไปแล้วทรานซิสเตอร์จะมีโครงสร้าง 2 แบบ คือ แบบ NPN และ PNP การที่เรียกชื่อแบบนี้เพราะโครงสร้างภายในของทรานซิสเตอร์ถูกผลิตขึ้นแบบนี้ ดังนั้นในการเลือกใช้งานทรานซิสเตอร์ต้องเลือกใช้งานให้ถูกต้องด้วยขาของทรานซิสเตอร์มี 3 ขา และมีชื่อเรียกคือ ขาเบส(B) ขาคอนเลเตอร์ (C) และ ขาอีมิเตอร์ (E) โดยสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์แบบ NPN และ PNP ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 (ก) และ 3.6 (ข) ซึ่งโครงสร้างแบบ NPN สังเกตว่าสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์หัวลูกศรจะพุ่งออก และโครงสร้างแบบ PNP สังเกตว่าสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์หัวลูกศรจะพุ่งเข้า



รูปที่ 3.6 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์

3.2 พารามิเตอร์สำคัญของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ชนิด npn โดยทั่วไปบริเวณรอยต่อขั้วอีมิเตอร์ (Emitter) กับ เบส (Base) มีการฟอร์เวิร์ดไบอัส และบริเวณรอยต่อขั้วคอลเลกเตอร์ (Collector) กับเบส มีการไบอัสย้อนกลับดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด npn

จากกระบวนการผลิตทรานซิสเตอร์ชนิด npn สารกึ่งตัวนำชนิด n ของอีมิเตอร์มีการโด๊ปสารในปริมาณที่สูง และสารกึ่งตัวนำชนิด p ของเบส มีการโด๊ปสารที่ต่ำ ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด n ของคอลเลกเตอร์มีการเจือสารปานกลาง โดยจากรูปที่ 3.7 สามารถอธิบายได้ดังนี้

จากการไบอัสไปข้างหน้าของแรงดัน V_{EE} ระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส ทำให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด n ของอิมิตเตอร์เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณเบสซึ่งมีพื้นที่ขนาดเล็ก ดังนั้นจึงมีอิเล็กตรอนจำนวนมากที่ไหลผ่านเบสไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด n ของคอลเล็กเตอร์ และจากการที่อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด n ของอิมิตเตอร์เคลื่อนที่ไปสู่เบสน้อย ทำให้มีกระแสค่าน้อยๆ ไหลจากเบสไปยังอิมิตเตอร์ เรียกว่ากระแสเบส (I_B) ส่วนอิเล็กตรอนจำนวนมากที่ไหลผ่านเบสไปยังสารกึ่งตัวนำ n ของคอลเล็กเตอร์ ทำให้มีกระแสไหลจากคอลเล็กเตอร์ไปยังอิมิตเตอร์ เราเรียกว่ากระแสคอลเล็กเตอร์ (I_C) ส่วนกระแสที่ไหลจากขาอิมิตเตอร์ไปยังขั้วลบของแหล่งจ่าย V_{EE} เรียกว่ากระแสอิมิตเตอร์ (I_E) ค่ากระแสอิมิตเตอร์สามารถหาได้จากสมการ 3.1

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

การทำงานของทรานซิสเตอร์ เกิดจากกระแสส่วนน้อยไปควบคุมกระแสส่วนใหญ่ เพราะฉะนั้น ทรานซิสเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่ทำงาน โดยการควบคุมของกระแส (Current Control Device) นั่นเอง

อัตราส่วนของ I_C และ I_E และ อัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์นั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ในรูปแบบของ α (Alpha) เป็นอัตราส่วนทางด้านสัญญาณไฟตรงระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์ (I_C) และกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\alpha \approx \frac{I_C}{I_E} \quad (3.2)$$

นอกจากสมการที่ 3.2 แล้ว ทรานซิสเตอร์ก็ยังมีรูปแบบของ β (Beta) ซึ่งเป็นอัตราขยายกระแส ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.3

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (3.3)$$

การแสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ บางครั้งค่า β อาจบอกค่าในรูปของ h_{FE} ซึ่ง h เป็นตัวย่อของวงจรสมมูลไฮบริดจ์ (Hydride equivalent circuit) และ FE หมายถึงการกระขยายกระแสฟอว์เวิร์ด (Forward Current Amplification) ของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter Configuration) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C และแรงดัน V_{BE} เป็นดังสมการที่ 3.4

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad (3.4)$$

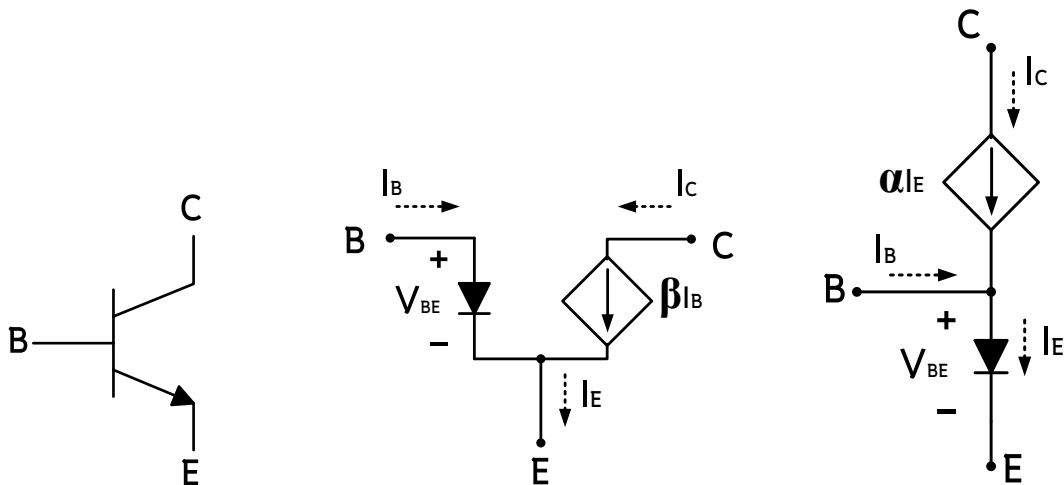
และความสัมพันธ์ระหว่าง β และ α คือ

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (3.5)$$

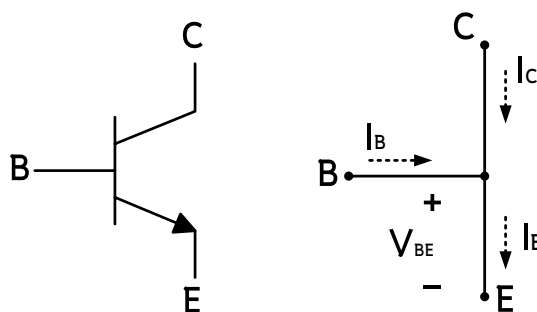
3.3 การไบอัสทรานซิสเตอร์และจุดทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยการนำสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N มาต่อรวมกัน โดยจะส่งผลให้เกิดรอยต่อระหว่างเนื้อสารขึ้นสองรอยต่อ ดังนั้นในการใช้งานทรานซิสเตอร์จึงจำเป็นต้องกำหนดแรงดันที่เหมาะสมให้กับเนื้อสารของรอยต่อทั้งสองเพื่อให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน หรือที่เราเรียกการกระทำแบบนี้ว่าการไบอัส และเนื่องจากทรานซิสเตอร์จะประกอบไปด้วยรอยต่อ P-N สองจุดด้วยกัน เราจึงสามารถจัดการไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ทำงานได้ 3 สภาวะด้วยกันคือ

สภาวะแอ็กทีฟ (Active Mode) ทรานซิสเตอร์จะสามารถทำงานในสภาวะนี้ได้ เมื่อให้ไบอัสฟอร์เวิร์ดให้กับรอยต่อที่ขา B และ ขา E และให้รีเวิร์สไบอัสให้กับขา C และ ขา B ซึ่งวิธีการนี้เป็นการไบอัสให้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นวงจขยายสัญญาณตามปกติ



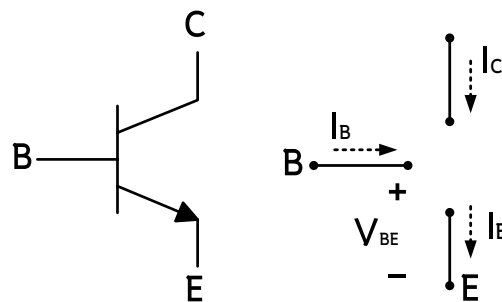
รูปที่ 3.8 แบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ในสภาวะแอ็กทีฟ



รูปที่ 3.9 แบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ในสภาวะอิมิต์

สถานะอิ่มตัว (Saturation Mode) ทρανซิสเตอร์จะสามารถทำงานในสถานะนี้ได้ เมื่อเราป้อนฟอร์เวิร์ดไบอัสให้กับขา B และ ขา E พร้อมทั้งป้อนรีเวิร์ดไบอัสให้กับขา C และ ขา B ของตัว ทรานซิสเตอร์ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองสัญญาณได้ดังนี้

สถานะคัตออฟ (Cutoff Mode) ทรานซิสเตอร์จะสามารถทำงานสถานะนี้ได้ เมื่อเราป้อนรีเวิร์ดไบอัสให้กับขา B และ ขา E พร้อมทั้งป้อนรีเวิร์ดไบอัสให้กับขา C และ ขา B ของตัว ทรานซิสเตอร์ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองสัญญาณได้ดังนี้



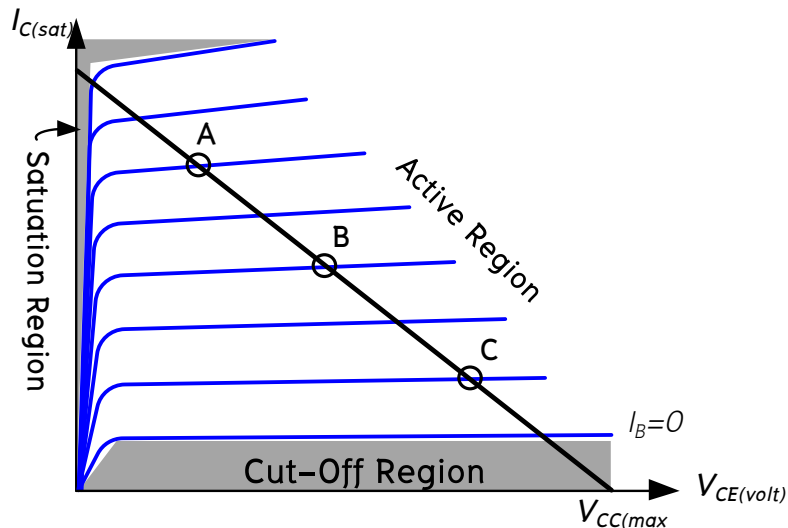
รูปที่ 3.10 แบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ในสถานะคัตออฟ จากวิธีการไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ทั้ง 3 สถานะนั้น เราสามารถเขียนเป็นตารางที่ 3.1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สถานะการทำงานของทรานซิสเตอร์

สถานะ	รอยต่อระหว่างขา B และขา E	รอยต่อระหว่างขา C และขา B
คัตออฟ	Reverse	Reverse
แอ็กทีฟ	Forward	Reverse
อิ่มตัว	Forward	Forward

การใช้งานของทรานซิสเตอร์ สิ่งที่สำคัญก็คือการไบอัส (Bias) จุดประสงค์ของการไบอัส คือ การทำให้กระแสไหลได้คงที่ที่แรงดันไฟตรงค่าหนึ่ง ซึ่งจุดนี้เรียกว่าจุดปฏิบัติการ (Operating Point) หรือจุดกระแสสงบ (Quiescent Point)

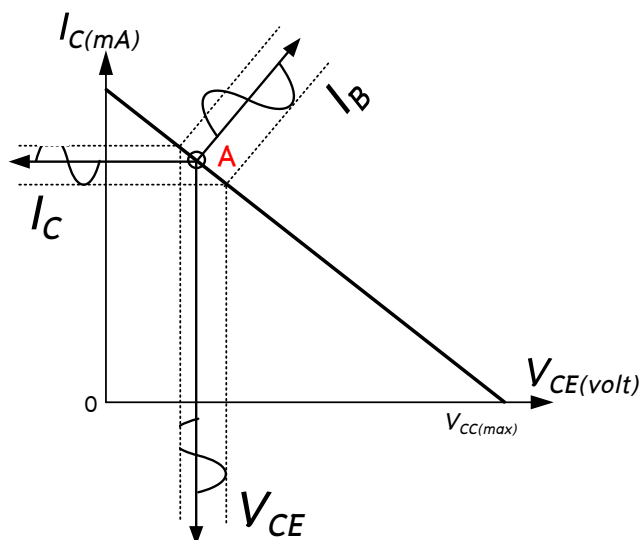
การจัดวงจรในรูปที่ 3.7 สามารถหาคุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C กับแรงดัน V_{CE} ที่กระแส I_B ค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เส้นคุณสมบัติทางด้านขาออก พร้อมจุดไบอัส

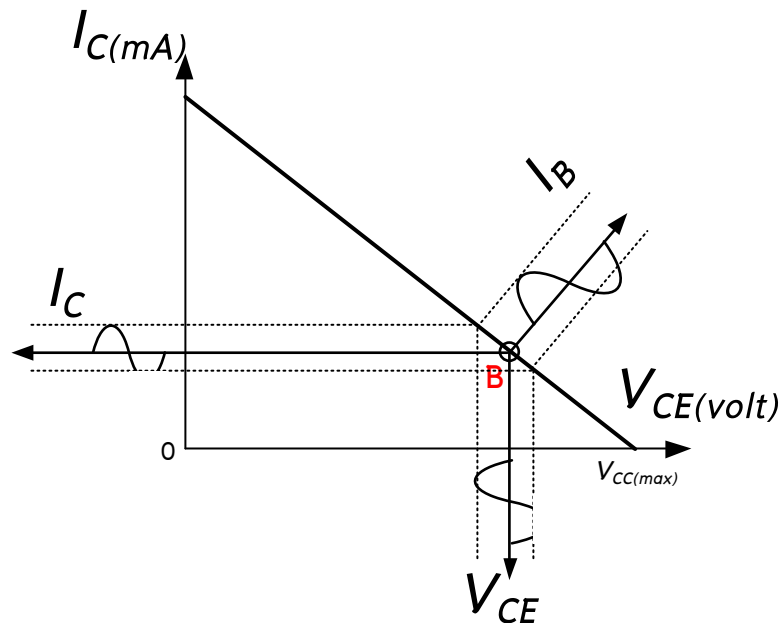
จากรูปที่ 3.11 สังเกตเห็นได้ว่าช่วงการทำงานของทรานซิสเตอร์ สามารถแบ่งออกเป็นบริเวณ (Region) ต่างๆ ดังนี้คือ บริเวณอิ่มตัว (Saturation Region) บริเวณแอ็กทีฟ (Active Region) และ บริเวณคัทออฟ (Cut-off Region) การเลือกจุดไบอัสให้แก่ทรานซิสเตอร์นั้น สามารถพิจารณาได้จากเส้นแสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ โดยยกตัวอย่างการกำหนดจุดไบอัส ให้ทรานซิสเตอร์อยู่ 3 จุด คือ A, B และ C ซึ่งความแตกต่างของจุดเหล่านี้จะมีผลต่อการทำงานของวงจรด้วย ซึ่งในกรณี สัญญาณที่เข้าเป็น I_B จุดไบอัสจะมีผลต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์โดย

- **จุด A** ซึ่งอยู่ใกล้กับช่วงอิ่มตัว ทำให้สัญญาณด้านออก (V_{CE}) มีการคลิปป (Clipping) ของยอดสัญญาณ ในช่วงลบ ดังรูปที่ 3.12



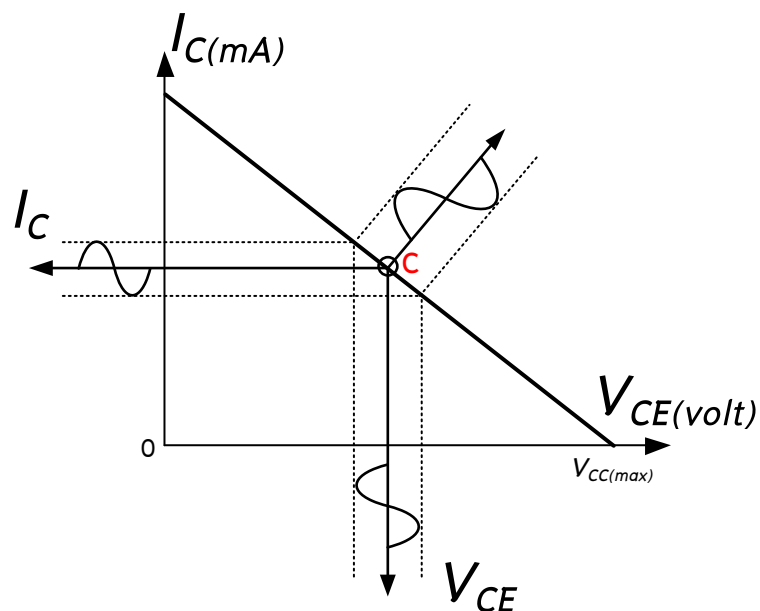
รูปที่ 3.12 จุดทำงานใกล้ช่วงอิ่มตัว ทำให้เกิดการคลิปปทางด้านลบของสัญญาณด้านขาออก

- **จุด B** ซึ่งอยู่ใกล้กับช่วงคัทออฟ ทำให้สัญญาณด้านออก (V_{CE}) มีการขลิบ (Clipping) ของยอดสัญญาณในช่วงบวก ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 จุดทำงานใกล้ช่วงคัทออฟ ทำให้เกิดการขลิบทางด้านบวกของสัญญาณด้านขาออก

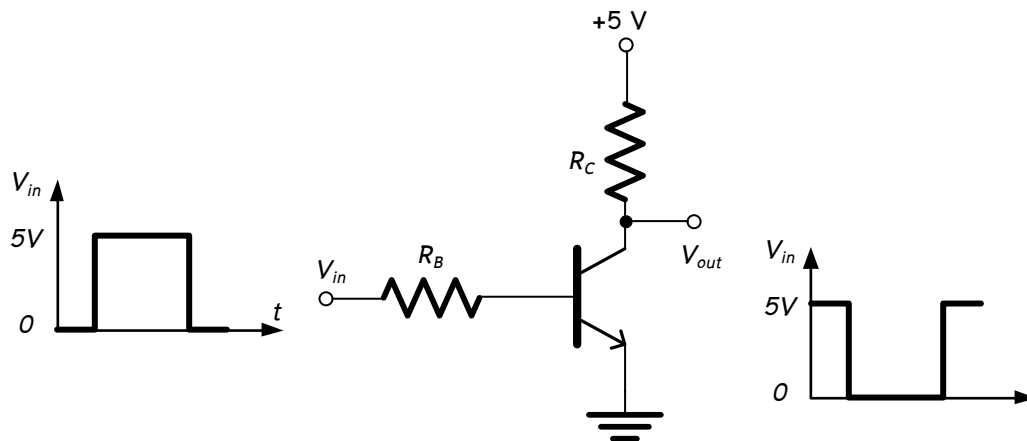
- **จุด C** ซึ่งอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่วงแอ็กทีฟ ทำให้สัญญาณด้านขาออกของวงจรไม่มีการขลิบ ของยอดสัญญาณในช่วงบวกและลบ แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณด้านขาเข้า (I_B) ต้องมีขนาดไม่มากจนเกินไป ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 จุดทำงานอยู่ในจุดที่เหมาะสม สัญญาณด้านออกไม่เกิดการขลิบ เนื่องจากจุดทำงานเหมาะสม

3.4 คุณสมบัติทางด้านการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์

นอกเหนือไปจากการนำเอาทรานซิสเตอร์ไปใช้งานด้านการขยายสัญญาณแล้ว ทรานซิสเตอร์ยังถูกไปใช้งานด้านการสวิตช์ โดยอาศัยคุณสมบัติทางด้านช่วงอิ่มตัวและทางคัทออฟของทรานซิสเตอร์เป็นสำคัญ ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การใช้งานทรานซิสเตอร์ทางด้านการสวิตช์

เมื่อแรงดัน V_{in} เท่ากับ 0 โวลต์ ทำให้ไม่มีกระแสไหลไปยังขาเบส (I_B) และในทำนองเดียวกัน ทำให้ไม่มีกระแสไหลไปยังขาคอลเล็กเตอร์ (I_C) จากวงจรดังรูปที่ 3.15 นั้นสามารถหาค่า V_{out} หรือ V_{CE} ได้จากสมการที่ 3.6

$$V_{CE} = 5 - I_C R_C \quad (3.6)$$

ถ้าแทนค่ากระแส I_C เท่ากับศูนย์แล้ว แรงดัน V_{CE} มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ ในทางกลับกัน ถ้าแรงดัน V_{in} เท่ากับ 5 โวลต์ ทำให้มีกระแส I_B และกระแส I_C สูงมาก จากสมการที่ 3.6 เมื่อ I_C มีค่าสูงมาก จะได้ V_{CE} มีค่าต่ำ การทำงานของวงจรนี้สามารถแทนอุปกรณ์ทางลอจิกดิจิทัลได้ คืออุปกรณ์กลับสัญญาณ (Not Gate) นั่นคือเมื่ออินพุตมีค่าต่ำ (Low) ทางด้านเอาต์พุตจะได้ค่าสูง (High) และเมื่ออินพุตมีค่าสูง เอาต์พุตจะมีค่าต่ำ

3.5 การใช้โปรแกรม PSpice จำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ในโปรแกรม PSpice จะมีชื่อขึ้นต้นด้วยของอุปกรณ์ คือ Q โดยการเรียกอุปกรณ์ ทรานซิสเตอร์ในโปรแกรม PSpice เพื่อใช้งานนั้นสามารถเรียกได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ

การเรียกชื่อเบอร์ของทรานซิสเตอร์โดยตรงที่มีอยู่ในไลบรารีของโปรแกรม PSpice โดย ทรานซิสเตอร์ที่เป็นชนิด NPN นั้นจะมีอยู่ 2 เบอร์คือ Q2N3904 และ Q2N2222 และ ทรานซิสเตอร์ที่เป็นชนิด PNP นั้นจะมีอีก 2 เบอร์คือ Q2N3906 และ Q2N2907A

การเรียกทรานซิสเตอร์โดยการกำหนดโมเดลให้กับทรานซิสเตอร์โดยตรง เราสามารถกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับตัวทรานซิสเตอร์ของเราได้โดยตรง โดยโมเดลทรานซิสเตอร์ที่โปรแกรม PSpice มีให้เรานั้นก็จะมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN จะมีชื่อว่า QbreakN และ ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP จะมีชื่อว่า QbreakP ซึ่งจะมีรูปแบบคำสั่งดังนี้

.Model BJT_model_name NPN(parameter_name=value ...)

.Model BJT_model_name PNP(parameter_name=value ...)

โดยค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญของทรานซิสเตอร์

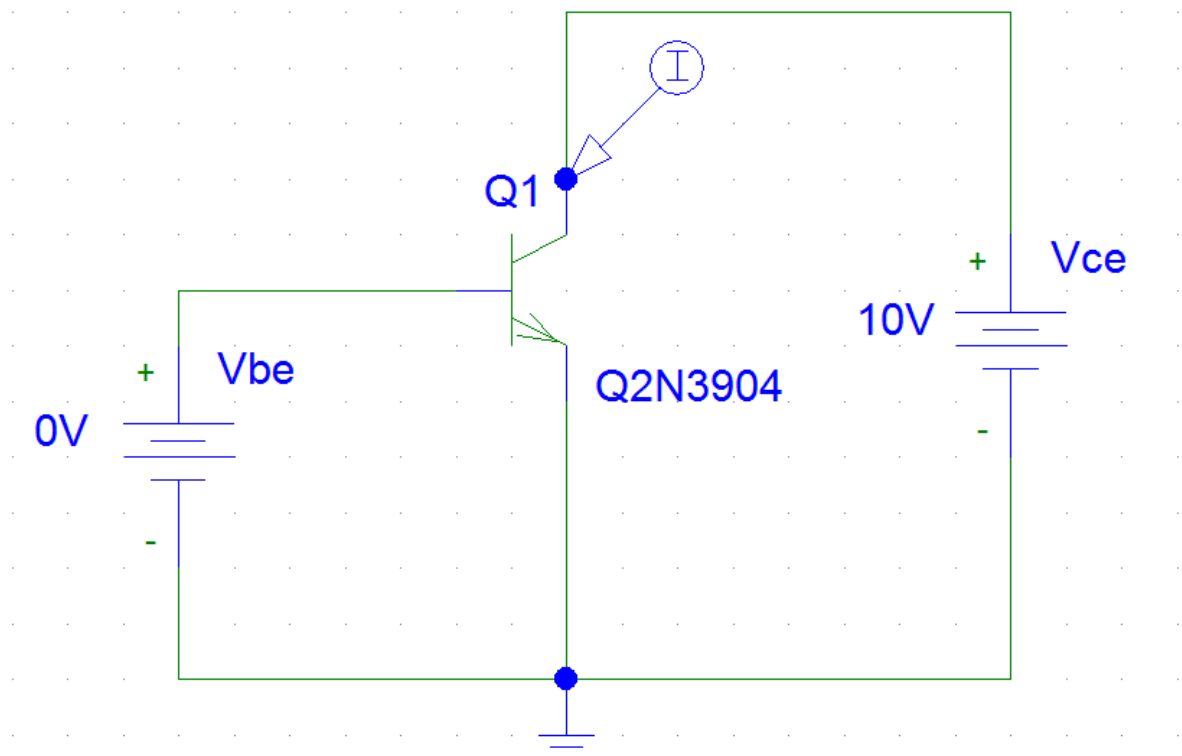
ตัวแปร	ชื่อ	ความหมาย	หน่วย	ค่าที่กำหนด
I_S	IS	กระแสอิ่มตัว	A	1.0E-16
β	Bf	ค่าอัตราขยาย	-	100
		กระแส		
V_A	VAf	แรงดันเออร์ลี	V	∞

3.5.1 คุณสมบัติไฟฟ้ากระแสตรงของทรานซิสเตอร์ระหว่างแรงดันและกระแส

ในหัวข้อนี้เราจะมาศึกษาคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN เป็นหลัก โดยเราจะมุ่งเน้นการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานทรานซิสเตอร์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อที่จะทราบถึงกราฟคุณลักษณะหรือสภาวะการทำงานของทรานซิสเตอร์ เช่น การดูกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ทางไฟฟ้า กระแสตรงระหว่างแรงดัน V_{BE} และกระแส I_C การดูกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ทางไฟฟ้า กระแสตรงระหว่างแรงดัน V_{CE} และกระแส I_C การดูกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้โปรแกรม PSpice เพื่อทำการวิเคราะห์ว่าทรานซิสเตอร์กำลังทำงานอยู่ที่สภาวะใด โดยสามารถทำตามขั้นตอนได้ดังนี้

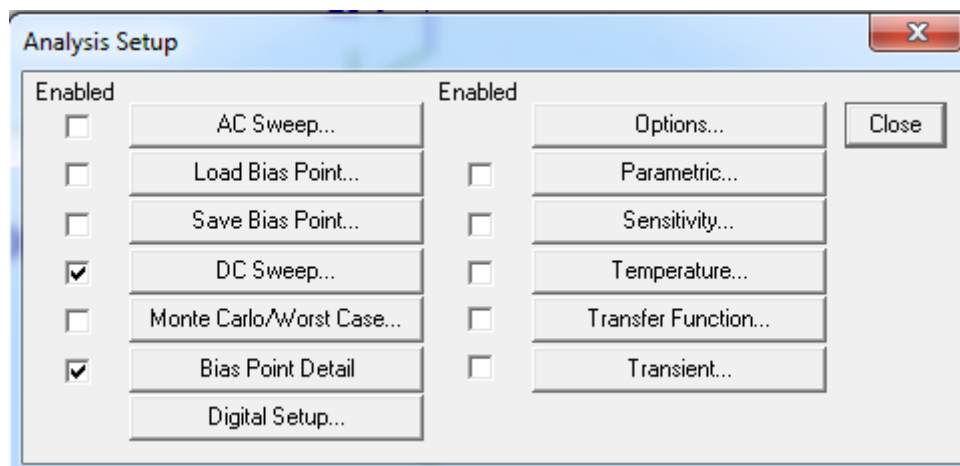
การดูกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ทางไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างแรงดัน V_{BE} และกระแส I_C

1. ทำการวาดรูปวงจร PSpice ดังรูปที่ 3.16



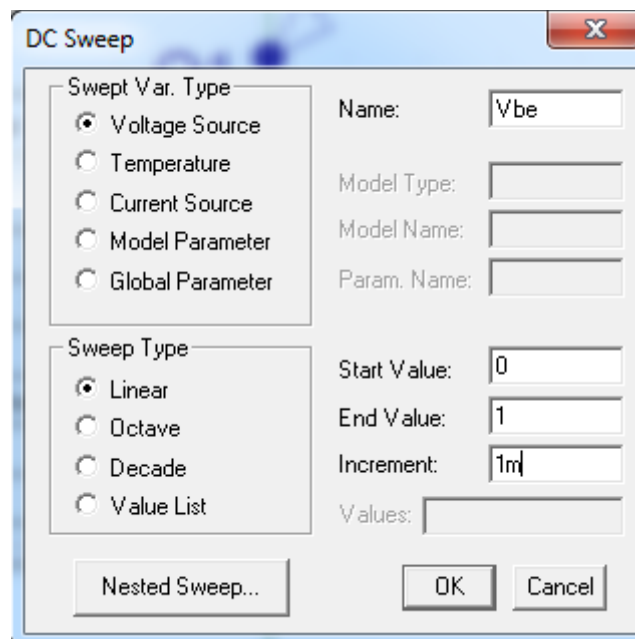
รูปที่ 3.16

2. เมื่อทำการวาดรูปวงจรที่ 3.16 เรียบร้อยแล้วให้ทำการกด  **Setup Analysis** การกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการจำลองการทำงาน โดยเราจะเลือก DC Sweep ดังรูปที่ 3.17



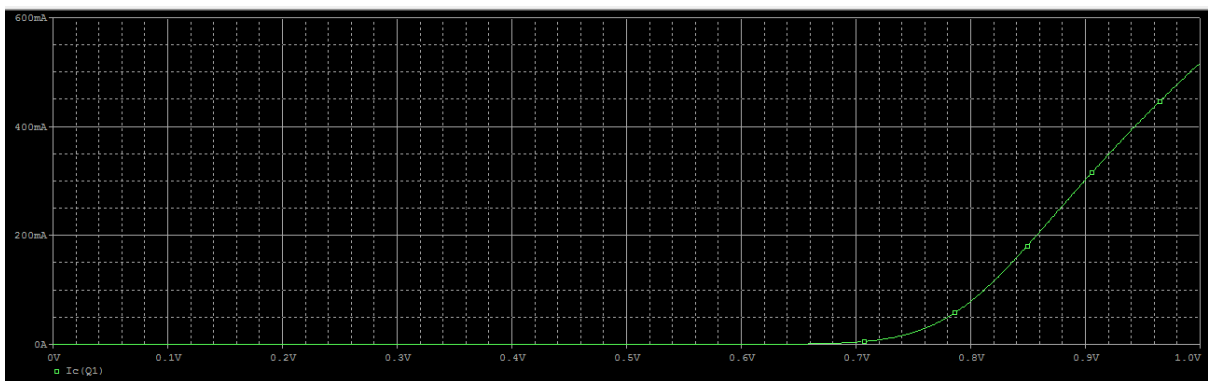
รูปที่ 3.17

3. จากนั้นให้เราทำการกำหนดค่าต่างๆ ภายใน DC Sweep ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18

4. เมื่อทำการใส่ค่าพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3.18 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการบันทึกไฟล์วงจร ( Save File เป็นปุ่มที่ใช้บันทึกไฟล์) แล้วทำการจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์ ( Simulate เป็นปุ่มที่ให้โปรแกรมทำการจำลองการทำงานของวงจร) โดยจะได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.19

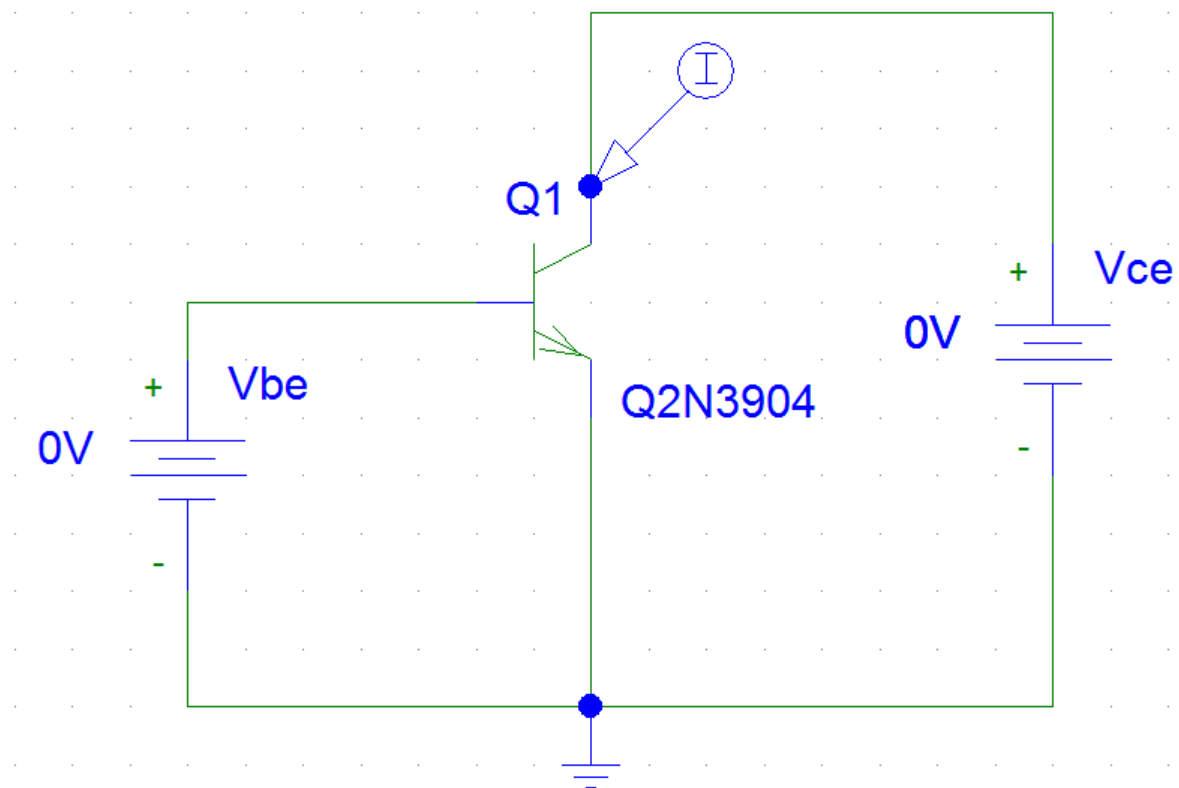


รูปที่ 3.19

จากรูปที่ 3.19 เป็นการแสดงผลการทดสอบวงจรที่ได้จากการจำลองการทำงานของ ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะทำให้เห็นว่าค่าของกระแส I_c นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดัน V_{BE} เป็นแบบ ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล

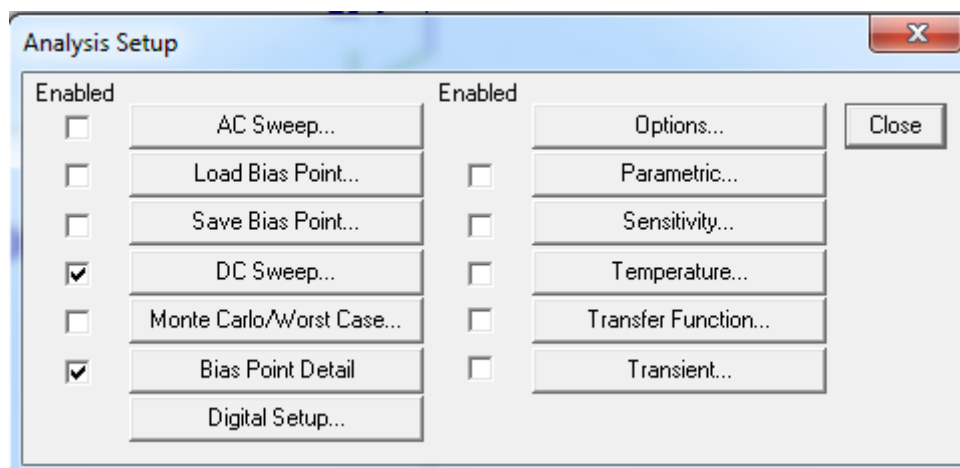
การดูกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ทางไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างแรงดัน V_{CE} และกระแส I_C

1. ทำการวาดรูปวงจร PSpice ดังรูปที่ 3.20



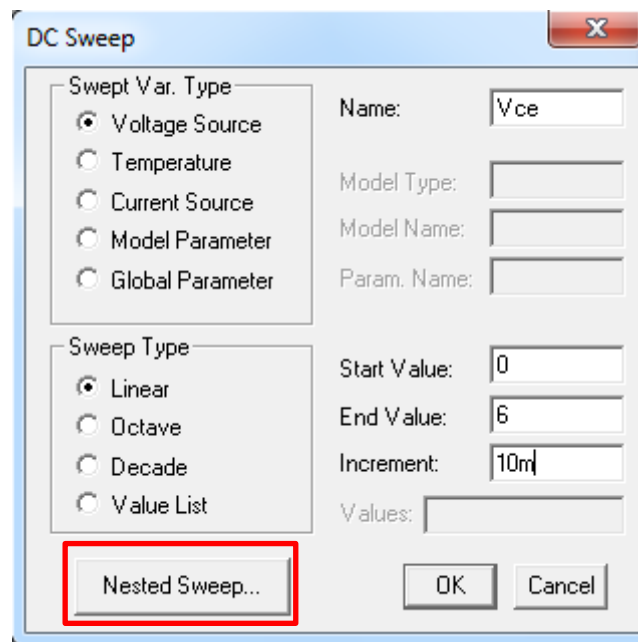
รูปที่ 3.20

2. เมื่อทำการวาดรูปวงจรที่ 3.20 เรียบร้อยแล้วให้ทำการกด  **Setup Analysis** การกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการจำลองการทำงาน โดยเราจะเลือก DC Sweep ดังรูปที่ 3.21



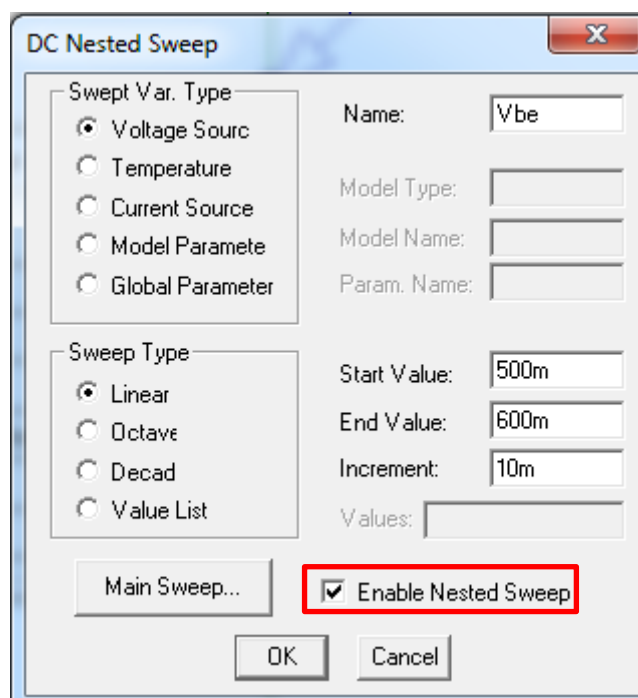
รูปที่ 3.21

3. จากนั้นให้เราทำการกำหนดค่าต่างๆ ภายใน DC Sweep ดังรูปที่ 3.22 สำหรับแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CE} และทำการกดปุ่ม Nested Sweep เพื่อทำการเปิดการทำงานของ Nested Sweep



รูปที่ 3.22

4. ทำการกำหนดค่าของ Nested Sweep ดังรูปที่ 3.23

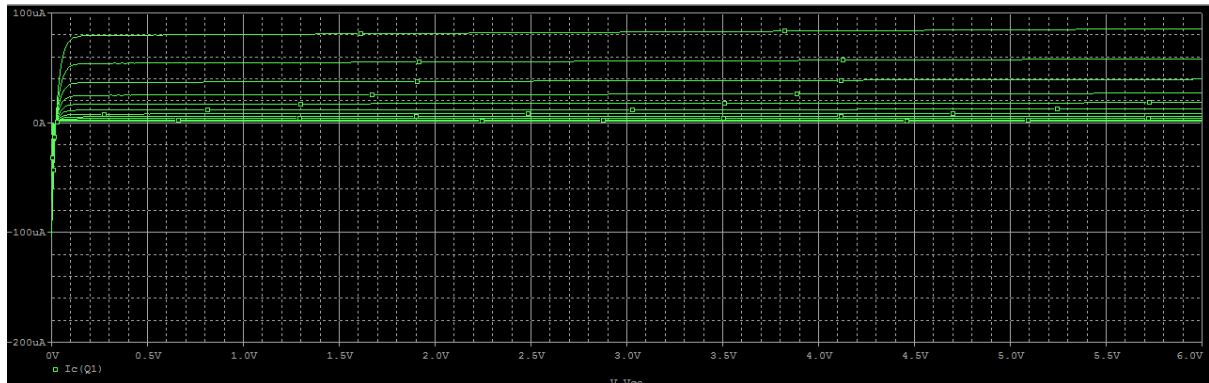


รูปที่ 3.23

5. เมื่อทำการใส่ค่าพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3.22 และ 3.23 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการบันทึกไฟล์วงจร

( **Save File** เป็นปุ่มที่ใช้บันทึกไฟล์) แล้วทำการจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์ (

Simulate เป็นปุ่มที่ให้โปรแกรมทำการจำลองการทำงานของวงจร) โดยจะได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.24



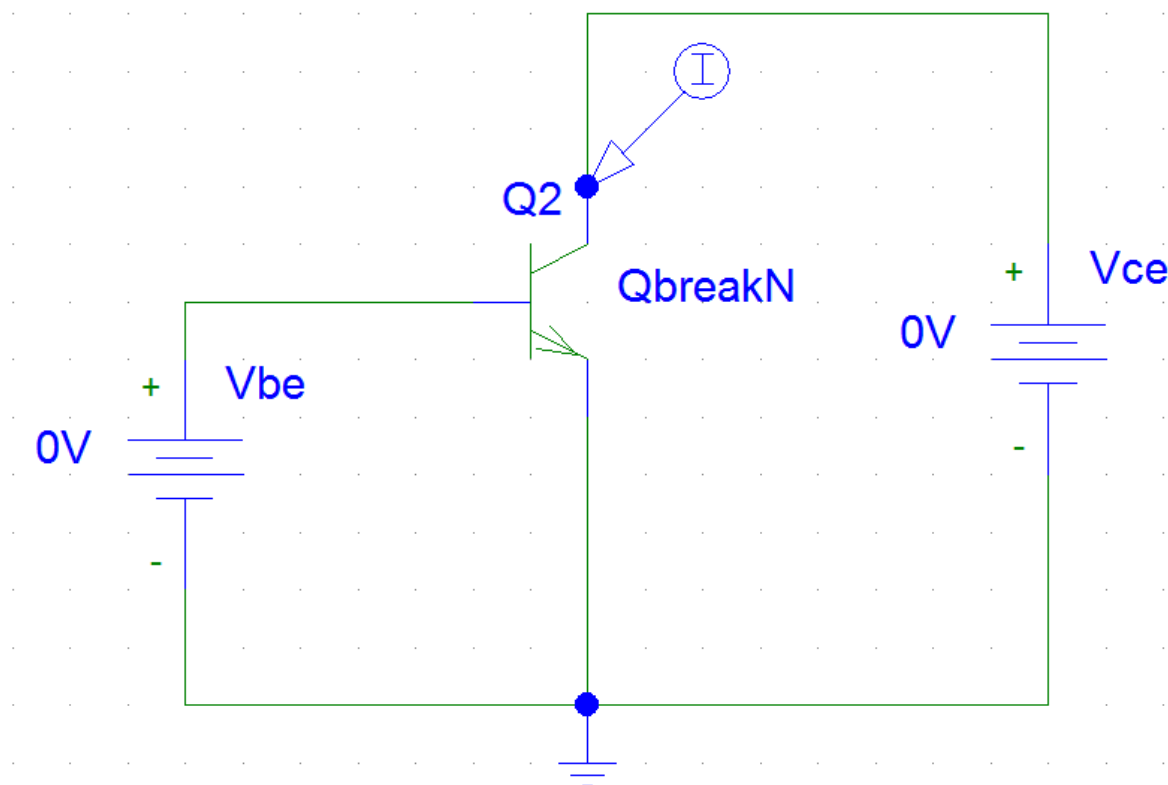
รูปที่ 3.24

จากรูปที่ 3.24 เป็นการแสดงผลการทดสอบวงจรที่ได้จากการจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะทำให้เห็นว่าค่าของกระแส I_C นั้นจะเป็นเส้นขนานกับแกนของแรงดัน V_{CE} โดยเราจะสามารถสรุปการทดลองนี้ได้ว่า ค่าแรงดัน V_{CE} ไม่มีผลกับการไหลของกระแส I_C โดยที่ค่าของกระแส I_C จะไหลมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับแรงดัน V_{BE} เพียงอย่างเดียว

3.5.2 คุณสมบัติไฟฟ้ากระแสตรงของทรานซิสเตอร์ระหว่างแรงดันและกระแสโดยวิธีการกำหนดพารามิเตอร์ให้กับทรานซิสเตอร์

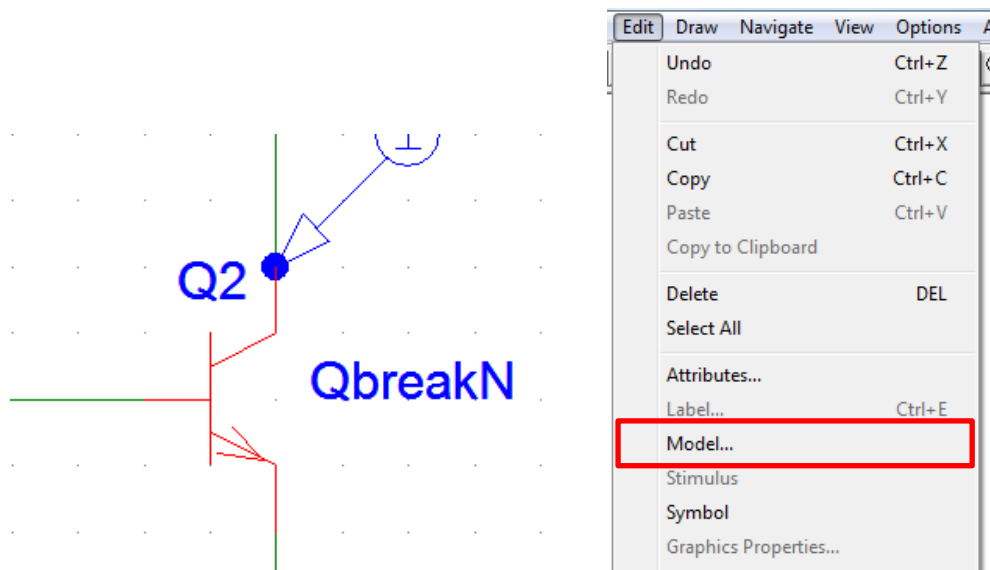
การใช้โปรแกรม PSpice เพื่อดูกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ โดยการดูกราฟทางไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างแรงดัน V_{CE} และกระแส I_C สามารถทำได้ดังนี้

1. ทำการวาดรูปวงจร PSpice ดังรูปที่ 3.25



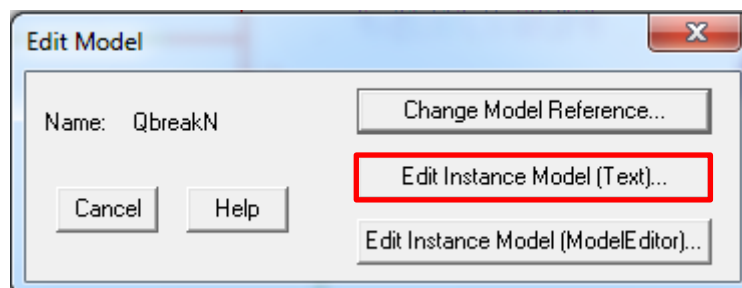
รูปที่ 3.25

2. ทำการคลิกตัวทรานซิสเตอร์ แล้วทำการเลือกเมนู Edit -> Model ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26

3. ทำการเลือกปุ่ม Edit Instance Model (Text)... ที่หน้าต่าง Edit Model



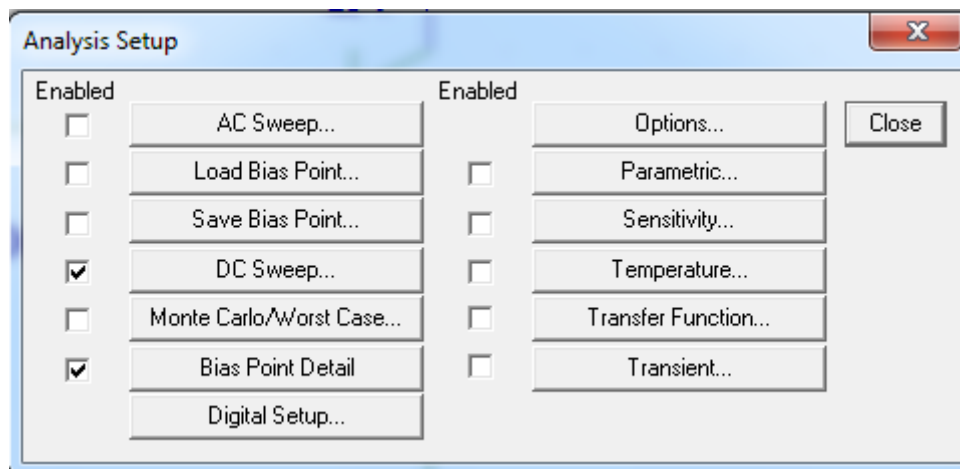
รูปที่ 3.27

4. ทำการใส่ค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 3.28

```
.model Qbreakn NPN  
Is=1.8104E-15  
Bf=250  
Vaf=35  
*$
```

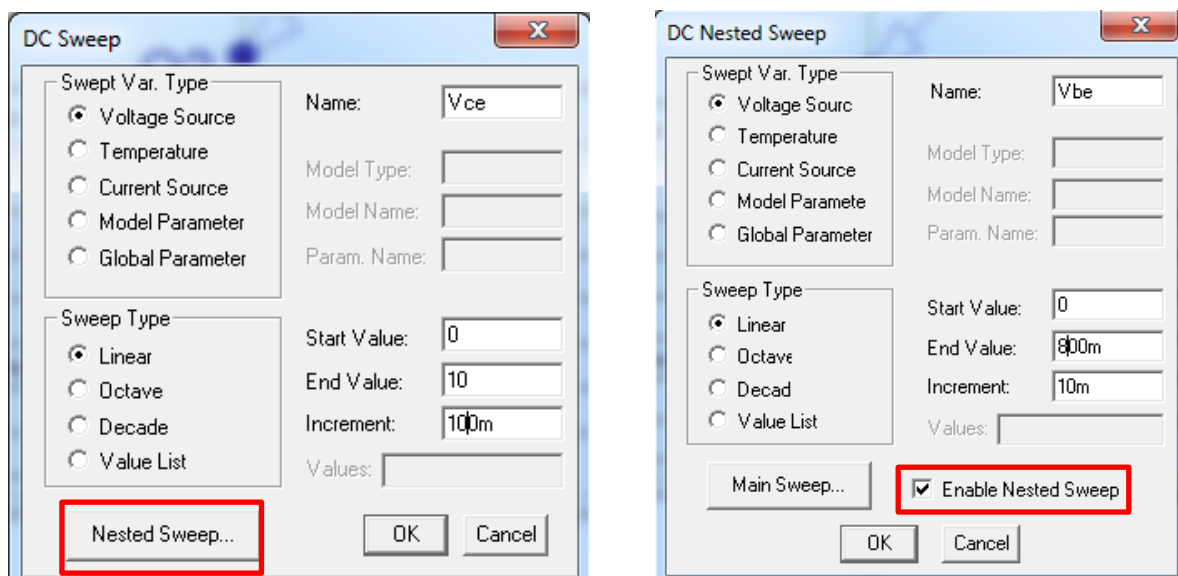
รูปที่ 3.28

5. เมื่อทำการกำหนดค่าตามรูปที่ 3.28 เรียบร้อยแล้วให้ทำการกด  **Setup Analysis** การกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการจำลองการทำงาน โดยเราจะเลือก DC Sweep ดังรูปที่ 3.29



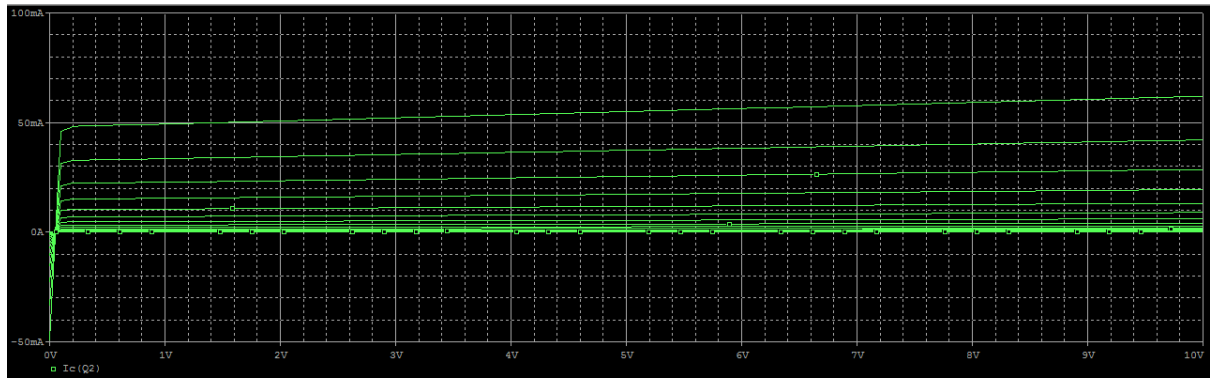
รูปที่ 3.29

6. จากนั้นให้เราทำการกำหนดค่าต่างๆ ภายใน DC Sweep สำหรับแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CE} และทำการกดปุ่ม Nested Sweep เพื่อทำการเปิดการทำงานของ Nested Sweep แล้วทำการกำหนดค่าตามรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30

7. เมื่อทำการใส่ค่าพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3.30 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการบันทึกไฟล์วงจร ( **Save File** เป็นปุ่มที่ใช้บันทึกไฟล์) แล้วทำการจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์ ( **Simulate** เป็นปุ่มที่ให้โปรแกรมทำการจำลองการทำงานของวงจร) โดยจะได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.31

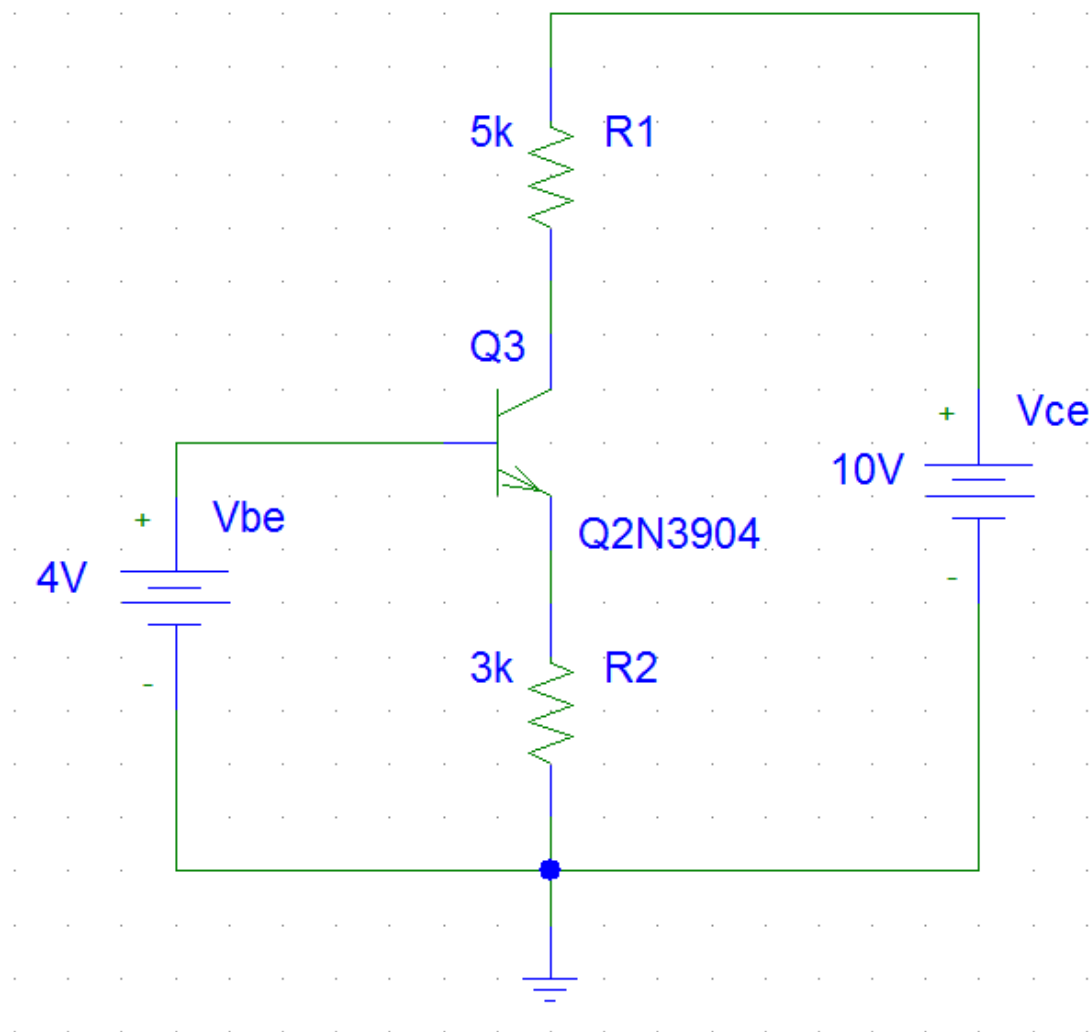


รูปที่ 3.31

3.5.3 จำลองย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์โดยใช้โปรแกรม PSpice

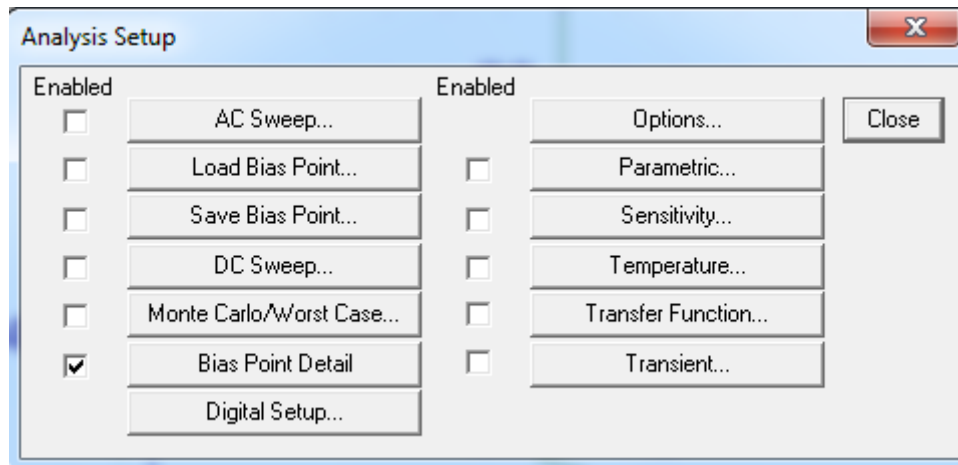
การใช้โปรแกรม PSpice เพื่อทำการวิเคราะห์การทำงานของทรานซิสเตอร์ว่าทำงานอยู่ในสถานะใด สามารถทำได้ดังนี้

1. ทำการวาดวงจรดังรูปที่ 3.32



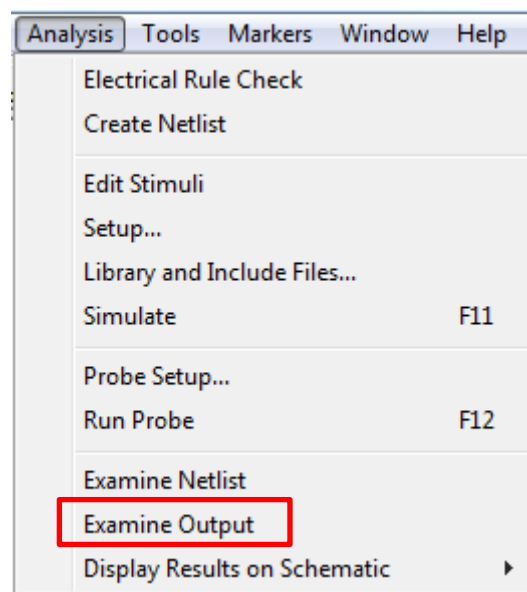
รูปที่ 3.32

2. ทำการบันทึกวงจร วงจร ( **Save File** เป็นปุ่มที่ใช้บันทึกไฟล์)
3. จากนั้นให้ทำการกำหนดค่าใน Analysis Setup โดยทำการเลือก Bias Point Detail ซึ่งการเลือกในลักษณะนี้จะเป็นการทำให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์วงจรทุกครั้งเมื่อเราทำการวิเคราะห์วงจรหรือ Simulate นั้นเอง



รูปที่ 3.33

4. จากนั้นเมื่อเราทำการกดปุ่ม Simulate เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการเลือกเมนู Analysis -> Examine Output เพื่อดูผลการทดลองวงจรว่ามีค่ากระแส I_C แรงดัน V_{BE} และแรงดัน V_{CE} ว่ามีค่าเท่ากับเท่าใด



รูปที่ 3.34

5. โปรแกรมจะทำการเปิด Notepad ขึ้นมาเพื่อแสดงค่าแรงดันที่จุดต่างๆ ดังรูปที่ 3.35

NAME	Q_Q3
MODEL	Q2N3904
IB	8.15E-06
IC	1.10E-03
VBE	6.68E-01
VBC	-4.88E-01
VCE	1.16E+00
BETADC	1.35E+02
GM	4.19E-02
RPI	3.68E+03
RX	1.00E+01
RO	6.76E+04
CBE	1.91E-11
CBC	3.12E-12
CJS	0.00E+00
BETAAC	1.54E+02
CBX/CBX2	0.00E+00
FT/FT2	3.00E+08

รูปที่ 3.35

6. ให้นำค่าตามรูปที่ 3.35 มาเปรียบเทียบกับตารางที่ 3.3 เพื่อดูว่าทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในสภาวะใด
ตารางที่ 3.3 แสดงสภาวะการทำงานของทรานซิสเตอร์

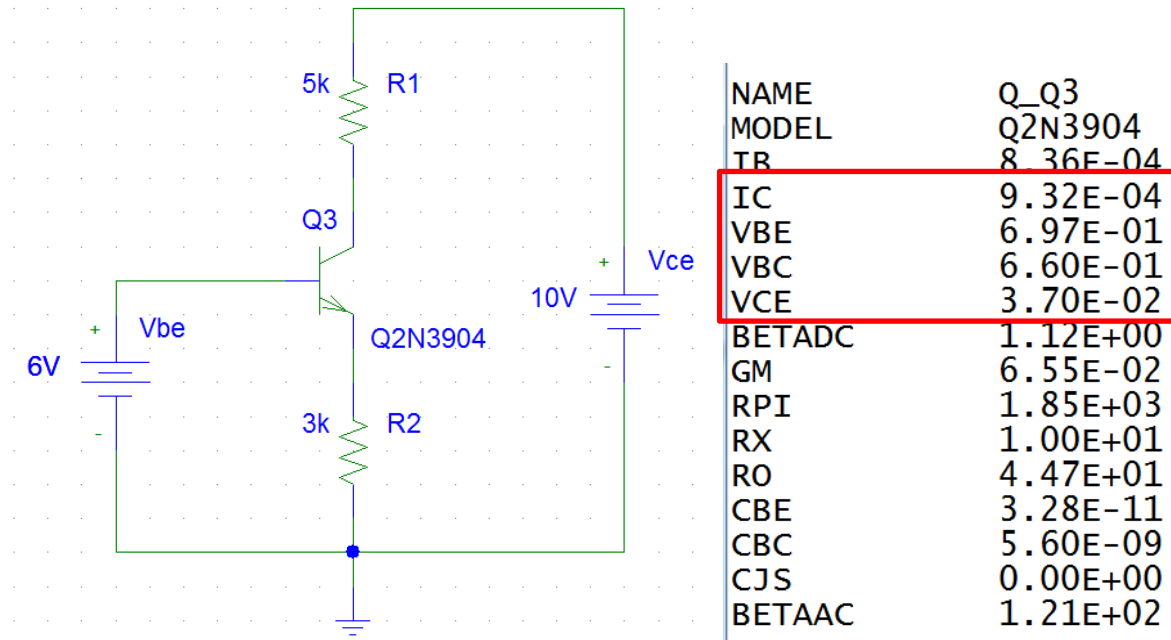
สภาวะการทำงาน	แรงดัน V_{BE}	แรงดัน V_{BC}
คัตออฟ	ไบอัสย้อนกลับ (-)	ไบอัสย้อนกลับ (-)
แอ็กทีฟ	ไบอัสไปข้างหน้า (+)	ไบอัสย้อนกลับ (-)
อิ่มตัว	ไบอัสไปข้างหน้า (+)	ไบอัสไปข้างหน้า (+)

ผลการทดลองวงจรที่ได้จากโปรแกรม PSpice จะบอกถึงค่าต่างๆ ที่จะนำมาใช้พิจารณาว่า
ทรานซิสเตอร์นั้นทำงานอยู่ในสภาวะใด คือ

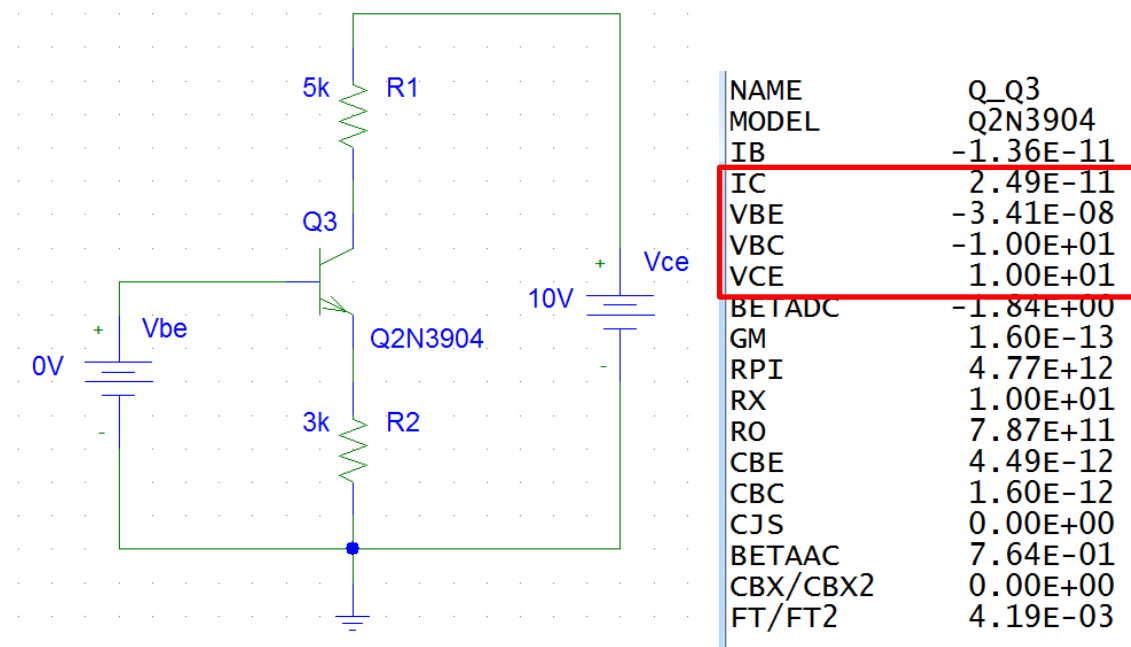
กระแส I_C มีค่าเท่ากับ 1.1mA แรงดัน V_{BE} มีค่าเท่ากับ 0.668V แรงดัน V_{BC} มีค่าเท่ากับ -0.488V

ดังนั้นสรุปได้ว่าทรานซิสเตอร์ตัวนี้ทำงานอยู่ในสถานะแอ็กทีฟ

7. จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าแหล่งจ่าย V_{BE} ให้มีค่าเท่ากับ 6V และ 0V ผลที่ได้จากการจำลองจะมีค่าดังรูปที่ 3.36 และ รูปที่ 3.37



รูปที่ 3.36

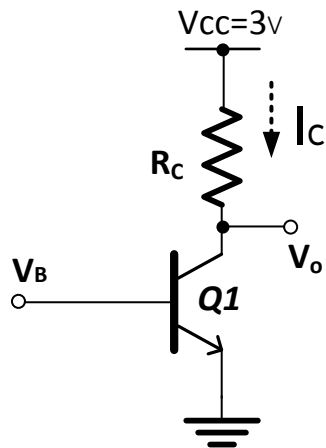


รูปที่ 3.37

การทดลองที่ 3

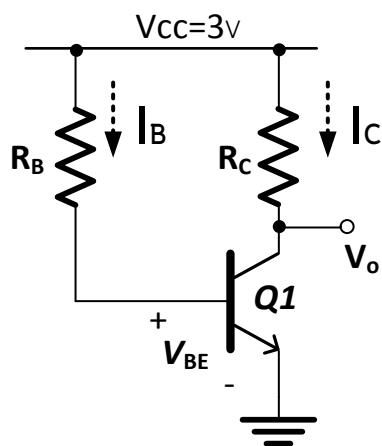
ทรานซิสเตอร์ (Transistor)

การทดลองที่ 1 จากวงจรทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 3.38 กำหนดให้ $I_C = 100 \mu A$ จงออกแบบให้มี $V_o = 2V$ โดยกำหนดให้ทรานซิสเตอร์มีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ $I_S = 1.8104E-15$ และ $\beta = 100$



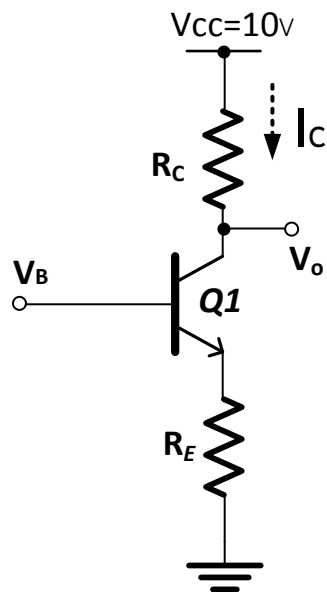
รูปที่ 3.38

การทดลองที่ 2 จากวงจรทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 3.39 กำหนดให้ $I_C = 100 \mu A$ จงออกแบบให้มี $V_o = 2V$ โดยกำหนดให้ทรานซิสเตอร์มีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ $I_S = 1.8104E-15$ และ $\beta = 100$



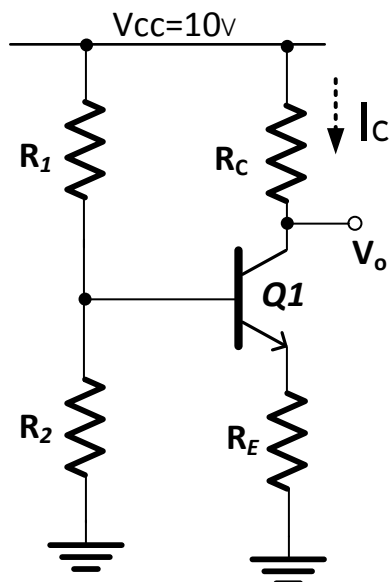
รูปที่ 3.39

การทดลองที่ 3 จากวงจรทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 3.40 กำหนดให้ $I_C = 1\text{mA}$ จงออกแบบให้มี $V_o = 8\text{V}$
โดยกำหนดให้ทรานซิสเตอร์มีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ $I_S = 1.8104\text{E-}15$ และ $\beta = 100$



รูปที่ 3.40

การทดลองที่ 4 จากวงจรทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 3.41 กำหนดให้ $I_C = 1\text{mA}$ จงออกแบบให้มี $V_o = 8\text{V}$
โดยกำหนดให้ทรานซิสเตอร์มีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ $I_S = 1.8104\text{E-}15$ และ $\beta = 100$



รูปที่ 3.41