บทที่ 2
ทรานซิสเตอร์

2.1 บทนำ

ทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทมากในวงการอิเล็กทรอนิกส์ วิวัฒนาการของทรานซิสเตอร์มีพื้นฐานหน้าที่การใช้งานเช่นเดียวกับหลอดสุญญากาศ 3 ขั้ว หรือมากกว่าขึ้นไป เช่น หลอดไตรโอด (triode Vacuum tube) หลอดเพนโถด (pentode vacuum tube) เป็นต้น แต่จากการมีคุณสมบัติได้เปรียบกว่าอยู่หลายประการ จึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่า เช่น มีขนาดเล็กกว่า ไม่ต้องสูญเสียพลังความร้อนเพื่อเผาไส้หลอด เป็นต้น

ในช่วง พ.ศ. 2447-2490 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใช้หลอดสูญญากาศแต่ประมาณปลาย พ.ศ.2490 ได้เริ่มกำเนิดทรานซิสเตอร์แบบจุดสัมผัส (point-contact transistor) ปัจจุบัน ทรานซิสเตอร์มีมากมายหลายชนิด ทั้งนี้ การสร้างหรือออกแบบเพื่อประโยชน์ใช้งานที่เหมาะสมนั่นเอง ชื่อเรียกที่แพร่หลาย เช่น ทรานซิสเตอร์แบบ 2 รอยต่อ หรือ BJT (ย่อมาจาก Bipolar Junction Transistor) ทรานซิสเตอร์แบบฟิลด์เอฟเฟค (Field Effect Transistor) หรือ FET เป็นต้น สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ใช้ทรานซิสเตอร์แบบ BJT เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น ในบทเรียนนี้ เลือกอธิบายรายละเอียดของทรานซิสเตอร์แบบ BJT ซึ่งการทำงานขึ้นกับลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะประจุทั้งสองชนิดในสารกึ่งตัวนำ (คืออิเล็กตรอน และโฮล) และกริยาของรอยต่อ pn ทั้งสอง

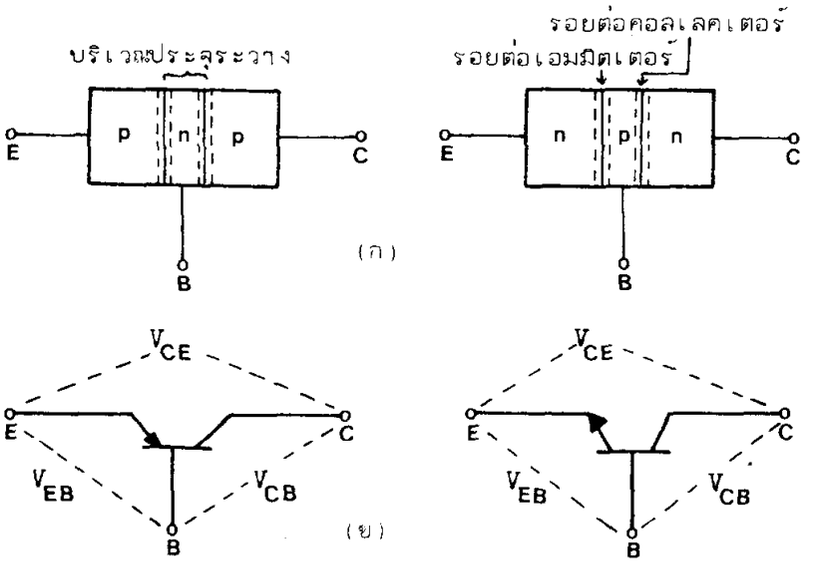
2.2 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบสองรอยต่อ

ขบวนการสร้าง BJT อาจทำได้หลายแบบแตกต่างกันไป แต่โครงสร้างทั่วไปของแต่ละแบบเป็นเช่นเดียวกัน กล่าวคือ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชิ้นบาง ๆ ที่ได้รับการโด๊ปชนิดหนึ่งอยู่ตรงกลาง และมีสารกึ่งตัวนำอีกสองชิ้นประกบอยู่ ซึ่งสารทั้งสองชิ้นนี้ถูกโด๊ปเป็นชนิดตรงข้ามกับชิ้นกลาง ดังนั้น แบ่งทรานซิสเตอร์ BJT ได้เป็น 2 ชนิดคือ

(1) ทรานซิสเตอร์ พีเอ็นพี (pnp) มีสารกึ่งตัวนำชนิด n เป็นชิ้นกลางอีกสองชิ้นที่ประกบเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p

(2) ทรานซิสเตอร์ เอ็นพีเอ็น (npn) มีส่วนประกอบตรงข้ามกับชนิดแรก

สารกึ่งตัวนำชิ้นกลางเรียกเป็นเบส (base) และอีกสองชิ้นที่ประกบเรียกชื่อเป็นเอมมิตเตอร์ (emitter) และคอลเลคเตอร์ (collector) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n หรือ p เหมือนกันทั้งเอมมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ ต่างกันที่การโด๊ป ซึ่งมีผลให้สภาพการนำไฟฟ้าของทั้งสองส่วนนั้นต่างกัน รูป 2.1 (ก) แสดงแผนภาพของทรานซิสเตอร์ทั้งสองแบบ แต่ตามความเป็นจริงแล้ว บริเวณเบสจะบางมากที่รอยตะเข็บทั้งสองของสารกึ่งตัวนำจะเกิดมีบริเวณประจุระวาง (space-charge region) ดังได้อธิบายรายละเอียดแล้วในตอน 1.5 หรือเรียกเป็นบริเวณดีเพลทชัน (depletion) ทำหน้าที่ควบคุมการเดินทางผ่านของพาหะประจุ รูป 2.1 (ข) แสดงสัญญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรไฟฟ้า ซึ่งขั้วทั้งสามของทรานซิสเตอร์ คือ (1) B แทนเบส (2) E แทนเอมมิตเตอร์ และ (3) C แทนคอลเลคเตอร์ สังเกตุว่าขั้วเอมมิตเตอร์ถูกแทนด้วยหัวลูกศร ซึ่งใช้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือบางครั้งเรียกเป็น "กระแสนิยม" (conventional current) และหัวลูกศรจะชี้เข้าสู่สารกึ่งตัวนำชนิด n เสมอ



รูป 2.1 (ก) แผนภาพโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ BJT *มีสองรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ*
(ข) สัญญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรไฟฟ้า

ทรานซิสเตอร์จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งมักนิยมเรียกทับศัพท์ภาษาอังกฤษว่า "การไบแอส" (biasing) ให้กับรอยต่อทั้งสองของทรานซิสเตอร์ ลักษณะการไบแอสมี 2 แบบ เช่นเดียวกับที่อธิบายไว้แล้วในตอน 1.6

2.3 สภาวะและการจัดวงจรของทรานซิสเตอร์

ดังได้กล่าวแล้วว่า ทรานซิสเตอร์จะทำงานได้ต่อเมื่อได้รับการไบแอส ซึ่งมี 2 แบบคือ ไบแอสตรง (forward biasing) และไบแอสกลับ (reverse biasing) ส่วนทรานซิสเตอร์มี 2 รอยต่อ ดังนั้น โอกาสในการไบแอสรอยต่อทั้งสองนั้นเป็นไปได้ 4 แบบ ดังแสดงในตาราง 2.1 ซึ่งลักษณะการไบแอสต่าง ๆ นั้น จากการศึกษาพบว่า ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะต่าง ๆ กันไป จึงเรียกลักษณะการทำงานของทรานซิสเตอร์ตามสภาวะของมัน

ตาราง 2.1 ลักษณะการไบแอสรอยต่อเอมมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ ก่อให้ทรานซิสเตอร์มีสภาวะต่าง ๆ

การไบแอสรอยต่อเอมมิเตอร์	การไบแอสรอยต่อคอลเลคเตอร์	สภาวะของทรานซิสเตอร์
แบบตรง	แบบกลับ	แอคทีฟ (active)
แบบตรง	แบบตรง	อิ่มตัว (saturate)
แบบกลับ	แบบกลับ	คัตออฟ (cutoff)
แบบกลับ	แบบตรง	กลับกัน (inverse)

พิจารณาเมื่อทรานซิสเตอร์มีสภาวะอิ่มตัว (saturated) จะประพฤติตัวเป็นวงจรลัด (short circuit) และในสภาวะคัตออฟ (cutoff) จะเป็นวงจรเปิด (open circuit) ลักษณะการประพฤติเช่นนี้ จึงถูกนำไปใช้ในวงจรปิดเปิด (switching circuit) ส่วนในสภาวะกลับกัน (inverse) จะไม่พบในการศึกษาขั้นต้นนี้

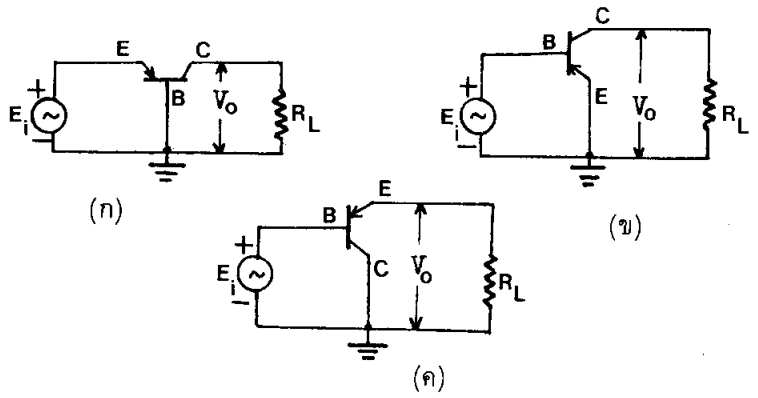
ในสภาวะแอคทีฟ (active) ทรานซิสเตอร์มีคุณสมบัติขยายสัญญาณ จึงถูกนำไปใช้ในวงจรขยาย (amplifying circuit) ซึ่งในบทเรียนนี้ จะกล่าวถึงลักษณะการทำงานเช่นนี้เป็นส่วนใหญ่

วงจรของทรานซิสเตอร์แยกได้เป็น 2 ภาค คือภาคสัญญาณเข้าหรือเรียกเป็นภาคอินพุท (input) และภาคสัญญาณออก (output) จัดโดยให้ขั้วหนึ่งเป็นขั้วร่วมระหว่าง 2 ภาค ดังนั้น จัดวงจรทรานซิสเตอร์ได้ 3 แบบคือ

- วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (common-emitter circuit)
- วงจรเบสร่วม (common-base circuit)
- วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (common-collector circuit)

โครงร่างวงจรแสดงในรูป 2.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปวงจรทั้งสามเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบซินูซอยเดิล (sinusoidal) E_i แรงดันไฟฟ้าขาออกจากวงจรคือแรงดัน

ตกคร่อมตัวต้านทานโหลด (load resistance) R_L ในรูปไม่มีการแสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับรอยต่อทรานซิสเตอร์



รูป 2.2 วงจรพื้นฐานของทรานซิสเตอร์

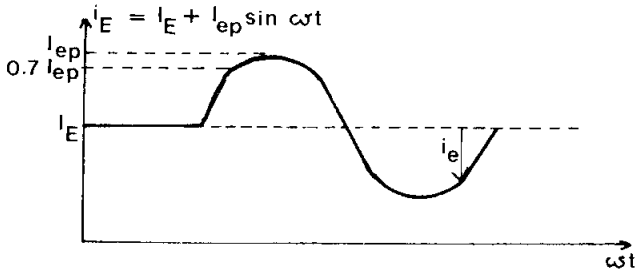
(ก) วงจรเบสร่วม (ข) วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (ค) วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม โดยทั้งสามวงจรมี E_i *เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นซายน์ และไม่แสดงถึงการไบแอสรอยต่อทั้งสองของทรานซิสเตอร์*

ข้อสังเกตคือ ขั้วร่วมทั้งสามในรูป 2.2 นั้นต่อลงดิน หรือเรียกว่า กราวนด์ (ground) ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ เป็นระดับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิง (reference) สิ่งจำเป็นสิ่งหนึ่งในการศึกษาอิเล็กทรอนิกส์คือต้องรู้จักความหมายของสัญลักษณ์ตัวแปร ซึ่งแยกเป็นปริมาณไฟสลับหรือ ac (alternating current) กับปริมาณไฟตรงหรือ dc (direct current) ข้อกำหนดของ IEEE ใช้ถือเป็นมาตรฐานสากล แสดงในตาราง 2.2 และตัวอย่างสัญญลักษณ์ดังกล่าวนี้ถูกแสดงในรูป 2.3

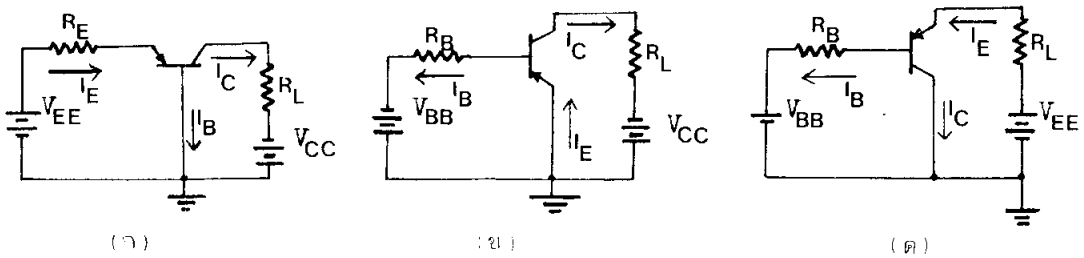
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการไบแอสรอยต่อทรานซิสเตอร์ ได้จากแหล่งจ่ายไฟตรง เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในภาวะแอคทีฟ (active) นั้น รอยต่อเอมมิตเตอร์ต้องได้รับไบแอสตรงและรอยต่อคอลเลคเตอร์ต้องได้รับไบแอสกลับ ซึ่งต้องมีค่าเหมาะสมให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ ตัวอย่างการต่อวงจรทรานซิสเตอร์แสดงในรูป 2.4 ใช้ทรานซิสเตอร์แบบ pnp ถ้าต้องการใช้ทรานซิสเตอร์แบบ npn ต้องกลับขั้วของแหล่งจ่ายไฟทั้งหมด และกลับทิศทางของกระแสนิยมด้วย

ตาราง 2.2 ความหมายของตัวแปรหรือปริมาณไฟฟ้า ตามมาตราฐาน IEEE

ตัวแปรหรือปริมาณไฟฟ้า	สัญลักษณ์ตัวอักษร, สับสคริปต์	ตัวอย่าง
dc	ตัวใหญ่, ตัวใหญ่	I_E, V_{BE}
rms	ตัวใหญ่, ตัวเล็ก	I_e, V_{be}
ac ชั่วขณะ	ตัวเล็ก, ตัวเล็ก	i_e, v_{be}
ชั่วขณะทั้งหมด	ตัวเล็ก, ตัวใหญ่	i_E, v_{BE}
ค่ายอด หรือค่าสูงสุด	ตัวใหญ่, ตัวเล็กและเพิ่ม สับสคริปต์ p หรือ m	I_{em}, V_{bem}
ธาตุของวงจร	ตัวใหญ่	R, C
พารามีเตอร์ของทรานซิสเตอร์	ตัวเล็กหรือใหญ่ เพิ่ม สับสคริปต์อักษรกรีก	r_e, $C\mu$



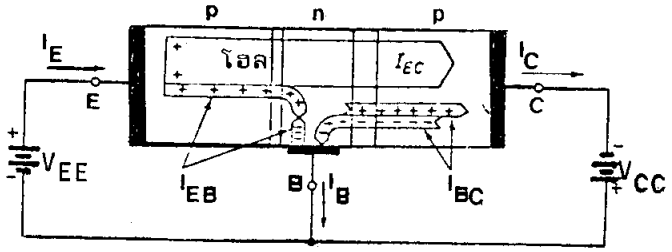
รูป 2.3 ตัวอย่างปริมาณไฟฟ้า เป็นคลื่นซายน์ แกว่งรอบแนวของไฟตรง I_E



รูป 2.4 แสดงขั้วของแหล่งจ่ายไฟให้กับทรานซิสเตอร์ pnp ซึ่งทำงานในช่วงแอคทีฟ (ก) วงจรเบสร่วม (ข) วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (ค) วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม

2.4 วงจรเบสร่วม

สำหรับวงจรเบสร่วมใช้ทรานซิสเตอร์แบบ pnp ดังแสดงในรูป 2.4 นั้น สัญญาณเข้าถูกป้อนทางขั้วเอมมิตเตอร์ แบตเตอรี V_{EE} ทำหน้าที่ป้อนไบแอสตรงให้รอยต่อเอมมิตเตอร์ ส่วน V_{CC} ทำหน้าที่ป้อนไบแอสกลับให้รอยต่อคอลเลคเตอร์ สัญญาณเอาท์พุทวัดได้จากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานโหลด R_L ภายในตัวทรานซิสเตอร์ย่อมเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะประจุ ทั้งส่วนมากและส่วนน้อย แสดงแผนภาพได้ในรูป 2.5 และยังแสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าอีกด้วย



รูป 2.5 ทรานซิสเตอร์ pnp *ต่อในวงจรเบสร่วม* V_{EE} *ทำหน้าที่ไบแอสตรงให้รอยต่อเอมมิตเตอร์* V_{CC} *ทำหน้าที่ไบแอสกลับให้รอยต่อคอลเลคเตอร์ จุดประสงค์ของแผนภาพคือเพื่อแสดงกลไกการไหลของกระแสภายในตัวทรานซิสเตอร์*

การป้อนไบแอสตรงให้รอยต่อเอมมิตเตอร์ เป็นการยิงกระแสโฮล (อย่างสม่ำเสมอ) ให้ข้ามบริเวณประจุระวางของรอยต่อเอมมิตเตอร์-เบส จากนั้นเดินทางสู่เบสโฮลเหล่านี้อาจประพฤติได้ 2 แบบ ดังนี้

(1) ถ้ามีพลังงานมาก โฮลดังกล่าวจะแพร่กระจาย (diffuse) เข้าสู่รอยต่อคอลเลคเตอร์ ขณะเมื่อมันเคลื่อนถึงบริเวณประจุระวางของรอยต่อเบส-คอลเลคเตอร์ มันจะถูกเร่งให้เคลื่อนเข้าสู่บริเวณคอลเลคเตอร์ ในรูป 2.5 กระแสนี้คือ I_{EC}

(2) อาจมีบางโฮล (ประมาณน้อยกว่า 1% ของจำนวนทั้งหมด) ปะปนอยู่ในบริเวณเบส ซึ่งจะกลายเป็นพาหะประจุส่วนน้อยของเบส และรวมตัวกับอิเล็กตรอนภายในเบส แต่บริเวณเบสจะบางมาก ทั้งยังถูกโด๊ปให้มีปริมาณอิเล็กตรอนน้อย ๆ ดังนั้น อิเล็กตรอนในเบสไม่เพียงพอต่อการรวมตัวกับทุกโฮลดังกล่าว ต้องอาศัยอิเล็กตรอน (ปริมาณน้อย ๆ) จากการป้อนเข้าสู่เบสทางขั้วเบสนั่นเอง เรียกกระแสที่เกิดจากการรวมตัวใหม่เป็น I_{EB}

นอกจากนี้ พาหะประจุยังมีโอกาสจะเดินทางเข้าสู่เอมมิตเตอร์อีกบ้าง แต่จะได้รับ

การชดเชยจนทำให้สภาพแลกเปลี่ยนพาหะประจุทำนองนี้เกิดสมดุลย์ทางไดนามิกส์ ดังนี้

(1) โฮล ซึ่งเป็นพาหะประจุส่วนน้อยในเบส อาจเคลื่อนกลับคืนสู่เอมมิตเตอร์ ซึ่งทันทีที่อยู่ในบริเวณประจุระวางของรอยต่อเบส-เอมมิตเตอร์ มันจะถูกกวาดเข้าสู่เอมมิตเตอร์ทันที แต่แรงดันจากการแพร่กระจายโฮลซึ่งจะมีจำนวนหนาแน่นมากจากเอมมิตเตอร์ จะทำหน้าที่คงสภาพฉีดโฮลเข้าสู่เบสอย่างสม่ำเสมอ

(2) อาจมีอิเล็กตรอนในเบส เคลื่อนสู่บริเวณเอมมิตเตอร์ แต่การสูญเสียปริมาณนี้ได้รับการชดเชยจากปริมาณอิเล็กตรอนป้อนเข้าทางขั้วเบส

เมื่อรอยต่อคอลเลคเตอร์ได้รับการไบแอสกลับ ทำนบศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบสลดลง เกิดการไหลของพาหะประจุ ดังนี้

(1) อิเล็กตรอน ซึ่งเป็นพาหะประจุส่วนน้อยในคอลเลคเตอร์ ไหลเข้าสู่บริเวณเบสและถูกกำจัดผ่านออกทางขั้วเบส เกิดกระแสไหลย้อนกลับ เรียกเป็น กระแสย้อนกลับอิ่มตัว (reverse-saturation current) แทนด้วย I_{BC} ในรูป 2.5

(2) อีกส่วนหนึ่ง I_{BC} เกิดจากโฮล ซึ่งเป็นพาหะประจุส่วนน้อยในเบส ไหลผ่านรอยต่อเบส-คอลเลคเตอร์ และปะปนกลายเป็นพาหะประจุส่วนใหญ่ในคอลเลคเตอร์

กระแสย้อนกลับอิ่มตัว I_{BC} บางครั้งเรียกเป็นกระแสรั่ว (leakage current) เกิดจากอิเล็กตรอนในคอลเลคเตอร์ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกหักของพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณกระแสนี้**ไม่ขึ้นกับ**ค่าไบแอสกลับที่ป้อนให้ และเป็นปริมาณที่ไม่ต้องการให้เกิดมีขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดเสถียรภาพของวงจรขยาย (รายละเอียดจะอธิบายในบทต่อไป) วิธีหนึ่งที่จะลดค่าของมันได้คือลดจำนวนอิเล็กตรอนในคอลเลคเตอร์ลง โดยเทคนิคการโด๊ป

ขั้นสุดท้าย เมื่อโฮลในคอลเลคเตอร์เคลื่อนถึงจุดสัมผัสโอห์มิค (Ohmic contact) ที่ขั้วคอลเลคเตอร์ มันจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ได้รับจากขั้วลบของแบตเตอรี V_{CC} การที่อิเล็กตรอนไหลจากขั้วลบของแบตเตอรีเข้าสู่คอลเลคเตอร์นี้ สมนัยกับกระแสนิยมที่ไหลในทิศทางตรงข้าม นั่นคือ I_C ไหลออกจากตัวทรานซิสเตอร์ที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ส่วนขั้วเอมมิเตอร์จะถูกป้อนโฮลเพื่อคงสภาพความหนาแน่นของพาหะส่วนมากในเอมมิเตอร์ และย่อมมีอิเล็กตรอนไหลออกที่จุดสัมผัสโอห์มมิคของขั้วคอลเลคเตอร์ สมนัยกับกระแส I_E ไหลเข้าสู่ทรานซิสเตอร์ที่ขั้วเอมมิตเตอร์

ในทำนองเดียวกัน ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ npn อธิบายได้โดยทำการกลับขั้วแรงดันไฟฟ้าและทิศทางของกระแสในรูป 2.5 พร้อมทั้งเปลี่ยนเครื่องหมายพาหะประจุ

อนึ่ง กระแสย้อนกลับอิ่มตัวหรือกระแสรั่ว สามารถวัดค่าโดยต่อแอมมิเตอร์ (Ammeter)

เข้าในวงจรเอาท์พุท โดยต่ออยู่ระหว่างคอลเลคเตอร์กับแบตเตอรี V_{CC} เพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณกระแสที่ทำการวัดนี้ไม่ถูกรบกวนจากกระแสซึ่งเกิดจากพาหะส่วนมากจากรอยต่อเอมมิต-เตอร์ ดังนั้น เปิดวงจรที่ขั้วเอมมิเตอร์ สัญญลักษณ์ของกระแสรั่วจึงเขียนเป็น I_{CBO} ตัวห้อย "O" หมายถึง "open" กล่าวคือ ถ้าต้องการวัดกระแสรั่วของวงจรขยายใด ๆ จะทำการเปิดขั้วอินพุทของวงจรนั้น ๆ เช่น กระแสรั่วของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมคือ I_{CEO} เป็นต้น โดยทั่วไปทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม มีค่า $I_{CBO} \sim$ 2-3 μA ส่วนทรานซิสเตอร์ซิลิคอนจะลดค่าลงอีกประมาณ 10^3 เท่า ดังนั้น **ในทรานซิสเตอร์ซิลิคอนสามารถละทิ้งค่ากระแสรั่วได้** การขึ้นกับอุณหภูมิของ I_{CBO} สำหรับทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม เพิ่มค่าเป็น 2 เท่า ทุก ๆ 10°C ที่เพิ่มขึ้น และทรานซิสเตอร์ซิลิคอนเพิ่มค่า 2 เท่าทุก ๆ 6°C

ย้อนพิจารณาไดโอดเมื่อได้รับไบแอสกลับ เกิดกระแสย้อนกลับอิ่มตัวมีค่าคงที่ เป็นค่าน้อย ๆ และเป็นอิสระต่อขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแบบย้อนกลับ ลักษณะเช่นนี้จะคงอยู่ตราบเมื่อไม่มีการถล่ม (avalanche) หรือเบรคดาวน์แบบซีเนอร์ (Zener breakdown) ของอิเล็กตรอน I_{CBO} พบว่าเป็นเช่นเดียวกันนี้ ดังนั้น ในโครงร่างวงจรซึ่งใช้ในการวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์ จึงมีการแทน I_{CBO} ด้วย ต้นกำเนิดกระแสคงที่ระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์

ในทางปฏิบัติ ค่าสูงสุดของ I_{CBO} จะบ่งไว้ใน "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า" บนแผ่นข้อมูล ซึ่งสมนัยกับแต่ละค่าของ V_{BC} ถ้าไม่มีการกำหนดค่าไว้ให้ถือว่าสามารถละทิ้ง I_{CBO} ได้ (ไม่ต้องคำนึงถึงในการวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์)

2.4.1 **โมเดล** dcของวงจรเบสร่วม

เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์วงจร ได้มีการแทนโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ด้วยธาตุวงจรที่สามารถหาค่าได้ แยกพิจารณาทรานซิสเตอร์แต่ละรอยต่อ ซึ่งประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ 2 ชิ้น ลักษณะเป็นเช่นเดียวกับไดโอด คู่เอมมิเตอร์-เบสได้รับการไบแอสตรง ดังนั้น **เลือกใช้ไดโอดอุดมคติ** และ**แบตเตอรี** V_{BE} แทนแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าพอเหมาะให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน ความต้านทานของ V_{BE} มีหรือไม่? ตามความเป็นจริงต้องมี แต่ค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานของวงจรภายนอกทรานซิสเตอร์ จึงไม่แสดงไว้ในโมเดล สำหรับทรานซิสเตอร์กำลังต่ำ จะมีค่า V_{BE} = 0.3 โวลท์ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม และ V_{BE} = 0.7 โวลท์ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ซิลิคอน

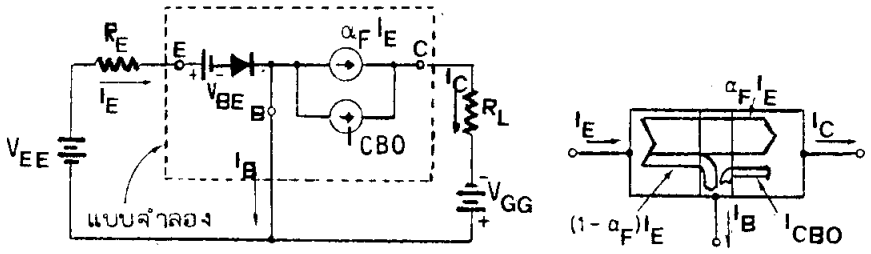
เมื่อวงจรอินพุทได้รับสัญญาณป้อนเข้า เกิดกระแส I_E ซึ่งมีบางส่วนไหลไปถึงขั้วคอลเลคเตอร์ อีกส่วนหนึ่งจะไหลเข้าสู่เบส ให้ส่วนที่ไหลไปถึงขั้วคอลเลคเตอร์มีค่าเป็น $\alpha_F I_E$

โดยนิยามให้ α_F เป็นอัตราส่วนการเคลื่อนไฟ dc ไปข้างหน้า (dc forward current-transfer ratio) นั่นคือ กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเป็น

$$I_C = I_{EC} = \alpha_F I_E$$

ในโมเดล dc แทน $\alpha_F I_E$ ด้วยต้นกำเนิดกระแสคงที่ที่ไม่เป็นอิสระ ตั้งอยู่ระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์

อีกส่วนหนึ่งของกระแสเอมมิตเตอร์ซึ่งไหลเข้าในเบสมีค่าเป็น $(1 - \alpha_F)I_E$ ค่าทั่วไปของ α_F คือ 0.91 จนถึงมากกว่า 0.99 และจะปรากฏบนแผ่นข้อมูลของทางบริษัทผู้ผลิตในสัญญลักษณ์ h_{FB} ส่วน I_{CBO} ได้กล่าวแล้วข้างต้น โมเดลนี้ถูกแสดงในรูป 2.6 ซึ่งสรุปส่วนประกอบของโมเดล dc ของทรานซิสเตอร์ได้ดังนี้



รูป 2.6 (ก) โมเดล dc ของวงจรเบสร่วม ภายในกรอบเส้นไข่ปลาคือโมเดล dc ที่แทนทรานซิสเตอร์

(ข) แสดงปริมาณกระแสที่ไหลภายในตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งสมนัยกับค่าในรูป (ก)

(1) ไดโอดอุดมคติและแบตเตอรี V_{BE} เพื่อแทนไดโอดเบส-เอมมิตเตอร์ ซึ่งอาจรวมลักษณะการขึ้นกับอุณหภูมิของค่าแรงดันพอดี (threshold) ของ V_{BE} ด้วยก็ได้

(2) $\alpha_F I_E$ แทนแหล่งผลิตกระแสที่ไม่เป็นอิสระ ซึ่งเป็นฟังค์ชันของกระแสเอมมิตเตอร์

(3) I_{CBO} แทนแหล่งผลิตกระแสคงที่ ต่อชันต์ (shunt) กับ $\alpha_F I_E$ โดยค่าของ I_{CBO} **ไม่ขึ้น** กับ V_{BC} แต่**ขึ้นกับอุณหภูมิ**

หมายเหตุ ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอน สามารถละทิ้งส่วนที่ (3) ได้

อนึ่ง V_{BE} เป็นอีกปริมาณหนึ่งที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าทรานซิสเตอร์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 1° จะทำให้ V_{BE} ลดค่าลงประมาณ 2 mv (ทั้งทรานซิสเตอร์ซิลิคอนและเจอร์มาเนียม)

พิจารณาปริมาณกระแสไหลในวงจร จากรูป 2.6 ถ้าคิดว่ากระแสไหลเข้าสู่ทรานซิสเตอร์ย่อมเท่ากับกระแสไหลออกจากตัวทรานซิสเตอร์ เขียนสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$I_E = I_B + I_C \qquad \text{.....(2.1)}$$

กระแสคอลเลคเตอร์ มี 2 ส่วน คือ I_{CBO} และ $\alpha_F I_E$ นั่นคือ

$$I_C = \alpha_F I_E + I_{CBO} \qquad \text{.....(2.2)}$$

กระแสที่ขั้วเบส เป็นผลต่างระหว่างกระแสที่เกิดจากการรวมตัวกันใหม่ (ของพาหะประจุ) คือ $(1-\alpha_F)\, I_E$ และกระแสรั่ว I_{CBO} ซึ่งเขียนเป็น

$$I_B = (1-\alpha_F)\, I_E - I_{CBO} \qquad \text{.....(2.3)}$$

ตัวอย่าง 2.1 ตามวงจรในรูป 2.6 กำหนดให้ $V_{EE} = 1.7$ v, $R_E = 1$ K, $R_L = 10$ K, $V_{CC} = 20$ v, $\alpha_F = 0.990$ ใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน จงหา (1) I_E, (2) I_C, และ (3) I_B

วิธี

(1) เขียนสมการลูปขาเข้า จากรูป 2.6 (ก)

$$V_{EE} = I_E R_E + V_{BE}$$

แทนค่า $\quad 1.7\text{ v} = I_E\,(1000\ \Omega) + 0.7\text{ v}$

$$I_E = 1\text{ mA}$$

(2) จากสมการ (2.2) สามารถละทิ้งละทิ้ง I_{CBO} ได้ เนื่องจากใช้ทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอน นั่นคือ

$$I_C = \alpha_F I_E = (0.990)\,(1\text{ mA}) = 990\ \mu\text{A}$$

(3) จากสมการ (2.3)

$$I_B = (1-\alpha_F)\, I_E = (1-0.990)\,(1\text{ mA}) = 10\ \mu\text{A}$$

ทดสอบค่าที่ได้โดยใช้สมการ (2.1)

$$I_E = 1000\ \mu\text{A} = I_B + I_C = 10 + 990\ \mu\text{A}$$

ตัวอย่าง 2.2 อาศัยข้อกำหนดต่าง ๆ ตามตัวอย่าง 2.1 ทุกประการ แต่ใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม และ $V_{EE} = 1.3$ v, $I_{CBO} = 5\ \mu$A จงหา (1) I_E (2) I_C, และ (3) I_B

วิธี

(1) ถือว่า $V_{BE} = 0.3$ v สำหรับทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม ใช้สมการลูปอินพุท เช่นเดียวกับตัวอย่าง 2.1 (1) เมื่อแทนค่าตามกำหนดของโจทย์

$$1.3\text{ v} = I_E\,(1000\ \Omega) + 0.3\text{ v}$$

$$I_E = 1\text{ mA}$$

(2) จากสมการ (2.2)

$$I_C = \alpha_F I_E + I_{CBO} = (0.990)\,(1000\ {}_m\text{A}) + 5\ {}_m\text{A} = 995\ \mu\text{A}$$

(3) จากสมการ (2.3)

$$I_B = (1 - \alpha_F)\, I_E - I_{CBO} = (0.01)\,(1000\ \mu\text{A}) - 5\ {}_m\text{A} = 5\ \mu\text{A}$$

ทดสอบค่าที่คำนวณได้โดยใช้สมการ (2.1)

$$I_E = 1000\ \mu\text{A} = I_C + I_B = 995\,\mu\text{A} + 5\ \mu\text{A}$$

2.4.2 ปริมาณอัตราขยายของวงจรเบสร่วม

หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับอัตราขยาย คือ เมื่อสัญญาณกระแสสลับถูกป้อนเข้าในวงจร กระแส I_E ซึ่งเป็นกระแสตรง จะแปรค่าไปตามสัญญาณดังกล่าว เป็นผลให้ I_C เกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จุดประสงค์คือต้องการได้สัญญาณเอาท์พุทที่ตกคร่อม R_L มีค่ามาก แต่การแปรค่าของ I_E ใกล้เคียงกับของ I_C ดังนั้น เมื่อต้องการขยายสัญญาณเอาท์พุท ต้องเลือกใช้ค่าความต้านทานโหลด R_L ให้มากกว่าความต้านทานอินพุท (คือ R_i หรือ R_E)

อัตราขยายกระแสของวงจรเบสร่วม (α_F)

$$\text{อัตราขยายกระแส} = \frac{\text{กระแสเอาท์พุท}}{\text{กระแสอินพุท}} = \frac{I_o}{I_i}$$

$$\text{แทนค่า } \alpha_F = \frac{I_C}{I_E}$$

โดยทั่วไป $\alpha_F < 1$ เสมอ (ประมาณ 0.90 – 0.99) เนื่องจาก $I_E > I_C$ เสมอ

อัตราขยายความต้านทาน (A_r)

$$\text{อัตราขยายความต้านทาน} = \frac{\text{ค.ต.ท. เอาท์พุท}}{\text{ค.ต.ท. อินพุท}}$$

โดยทั่วไป ความต้านทานอินพุทในวงจรเบสร่วมมีค่าประมาณ 100 Ω ส่วนในภาคเอาท์พุทมีค่าสูงประมาณ 10^4 Ω แทนค่า

$$A_r \sim 10^4 / 10^2 = 10^2$$

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (A_v)

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{I_o R_o}{I_i R_i} = \alpha_F A_r$$

สมมุติค่า $\alpha_F = 0.95$ และ $A_v = 10^2$ เมื่อแทนค่าจะได้

$$A_v = 0.95 \times 10^2 = 95$$

อัตราขยายกำลัง (A_p)

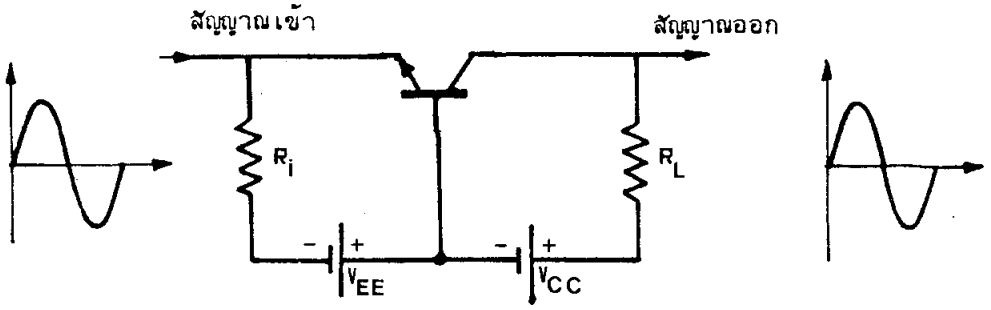
$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{I_o V_o}{I_i V_i} = \alpha_F A_v = 90.25$$

(ถ้าใช้ค่าเดิม คือ $\alpha_F = 0.95$, $A_v = 95$)

2.4.3 เฟสของวงจรเบสร่วม

พิจารณาเมื่อสัญญาณอินพุทเป็นบวก ศักย์บวกจะหักล้างกับ V_{EB} ดังนั้น กระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ได้น้อยลง ($V = IR$) นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท (เป็นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานโหลด) มีค่าลดลง แสดงว่าศักย์ไฟฟ้าที่คอลเลคเตอร์เป็นบวกมากขึ้น ($V_{CC} = V_{CE} - I_C R_L$) สรุปได้ว่า ถ้าสัญญาณอินพุทเป็นบวกสัญญาณเอาท์พุทเป็นบวกด้วย กล่าวคือ เฟสของวงจรเบสร่วมเป็นเช่นเดียวกัน ทั้งอินพุทและเอาท์พุท

ถ้าต้องการอธิบายโดยใช้ทรานซิสเตอร์ pnp ต้องกลับขั้วแบตเตอรี่และทิศทางของกระแสนิยม ส่วนขั้นตอนการพิจารณาเป็นเช่นเดียวกัน ศักย์ V_{EB} เป็นบวก



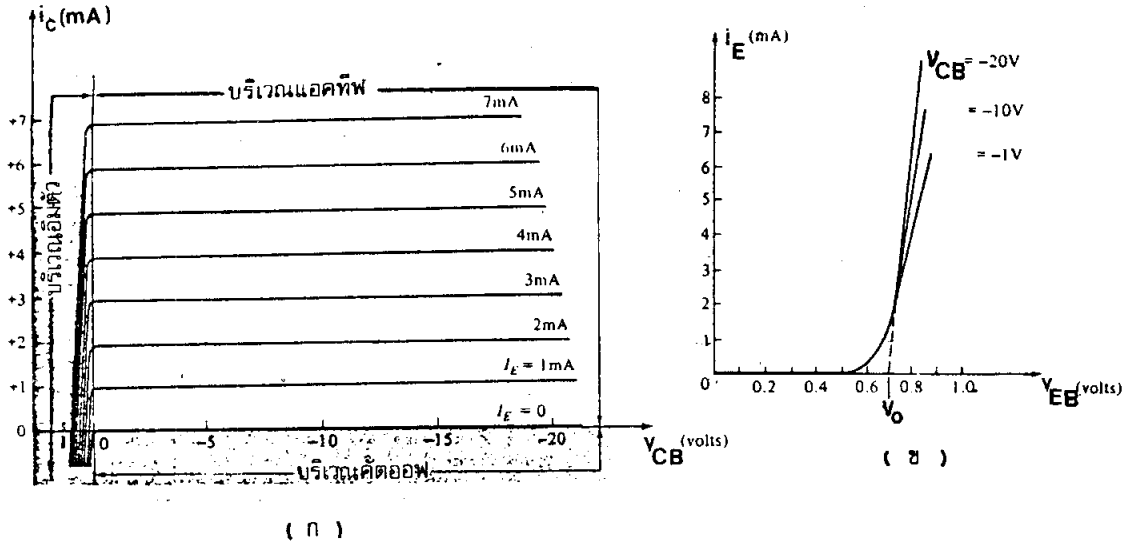
รูป 2.7 แสดงเฟสของวงจรเบสร่วม ใช้ทรานซิสเตอร์ n_{p_n}

2.4.4 กราฟแสดงลักษณะสมบัติของวงจรเบสร่วม

ในการศึกษาลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ แยกพิจารณาส่วนอินพุทและเอาท์พุท จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ 3 พารามีเตอร์ โดย

(1) กราฟด้านอินพุท ใช้ 2 พารามีเตอร์ด้านอินพุท และ 1 พารามีเตอร์ด้านเอาท์พุท

(2) กราฟด้านเอาท์พุท ใช้ 2 พารามีเตอร์ด้านเอาท์พุท และ 1 พารามีเตอร์ด้านอินพุท



รูป 2.8 (ก) เส้นกราฟแสดงลักษณะสมบัติของวงจรเบสร่วม ด้านเอาท์พุท ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ เรียกชื่อตามสภาวะการทำงานของทรานซิสเตอร์ (ข) เส้นกราฟด้านอินพุท

2.5 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม

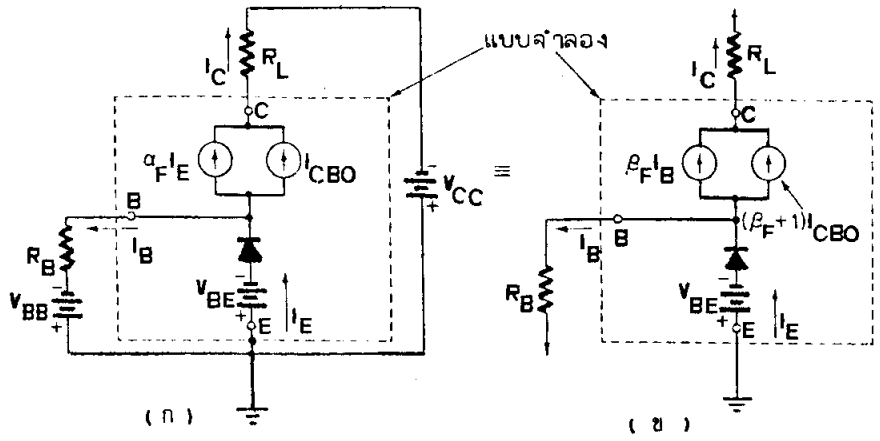
ลักษณะการจัดวงจรแบบง่าย ๆ ได้แสดงไว้แล้วในรูป 2.4 (ข) มีเอมมิตเตอร์เป็นขั้วร่วมระหว่างวงจรอินพุทกับเอาท์พุท การจัดวงจรเช่นนี้สามารถประยุกต์ได้โดยตรงกับวงจรสมมูล dc จากรูป 2.6 (ก) เป็นรูป 2.9 (ก) โดยมี I_E เป็นตัวควบคุมแหล่งผลิตกระแสที่ไม่เป็นอิสระ (คือ $\alpha_F I_E$) แต่ตามความเป็นจริงแล้ววงจรเอมมิตเตอร์ร่วมมีกระแสเบส I_B เป็นตัวควบคุมแหล่งผลิตกระแสดังกล่าว จึงต้องปรับปรุงพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับวงจร เริ่มด้วยนิยาม β_F เป็นอัตราส่วนการเคลื่อนกระแสตรงไปข้างหน้า (โดยไม่คำนึงถึง I_{BC} หรือ I_{CBO})

$$\beta_F = \frac{I_{EC}}{I_{EB}} = \frac{\alpha_F I_E}{(1-\alpha_F) I_E} = \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F} \qquad \text{.....(2.4)}$$

บวก 1 ทั้งสองข้างของสมการ

$$\beta_F + 1 = \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F} + 1 = \frac{1}{1-\alpha_F} \qquad \text{.....(2.5)}$$

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} \qquad \text{.....(2.6)}$$



รูป 2.9 (ก) โมเดลวงจรสมมูล dc *ของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม เขียนโดยอาศัยพื้นฐานจากวงจรในรูป 2.6 (ก) โดยตรง แล้วทำการจัดวงจรใหม่ โดยให้เอมมิตเตอร์เป็นขั้วร่วม มี* I_F *เป็นตัวควบคุมแหล่งผลิตกระแสที่ไม่เป็นอิสระ (ข) วงจรสมมูล* dc *ของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมเช่นกัน แต่มี* I_B *เป็นตัวควบคุมแหล่งผลิตกระแสที่ไม่เป็นอิสระแทน*

จากความสัมพันธ์ใน (2.1) $I_E = I_B + I_C$

และใน (2.2) $I_C = \alpha_F I_E + I_{CBO}$

แทนค่าจาก (2.1) ลงใน (2.2)

$$I_C = \alpha_F (I_B + I_C) + I_{CBO} \qquad \text{.....(2.7)}$$

$$(1 - \alpha_F) I_C = \alpha_F I_B + I_{CBO}$$

$$I_C = \left(\frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}\right) I_B + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha_F} \qquad \text{.....(2.8)}$$

เขียน I_C ในสมการ (2.8) ให้อยู่ในรูปของ β_F โดยแทนค่าจาก (2.4) และ (2.5)

$$I_C = \beta_F I_B + (\beta_F + 1) I_{CBO} \qquad \text{.....(2.9)}$$

แทนค่าจาก (2.9) ลงใน (2.1)

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B + (\beta_F + 1) I_{CBO} \qquad \text{.....(2.10)}$$

จากสมการ (2.9) แสดงว่า I_C สามารถใช้แหล่งผลิตกระแสที่ไม่เป็นอิสระ คือ $\beta_F I_B$ (ซึ่งขึ้นกับกระแสเบส) บวกกับกระแสรั่วซึ่งมีค่ามากกว่า I_{CBO} แทนได้ ค่าทั่วไปของ β_F จะแปรอยู่ระหว่าง 30 ถึง 600 โมเดล dc ที่เขียนขึ้นโดยอาศัยสมการ (2.9) และ (2.10) จะเป็นดังรูป 2.9 (ข)

ถ้าเปิดขั้วเบสกระแสเบสควรจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น ค่า $\beta_F I_B$ เป็นศูนย์ด้วย กระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่าเป็น $(\beta_F + 1)\ I_{CBO}$

ขั้นต่อไปคือ พิจารณารอยต่อคอลเลคเตอร์ซึ่งได้รับไบแอสกลับ ดังนั้น เกิด I_{CBO} ที่รอยต่อคอลเลคเตอร์ ไหลจากรอยต่อคอลเลคเตอร์ไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ แบตเตอรี่ V_{CC} และเข้าสู่ขั้วขั้วเอมมิตเตอร์ เพื่อให้ครบวงจรเอาท์พุท จากรูป 2.5 I_{EB} คือ I_{CBO} ไหลข้ามจากเอมมิตเตอร์ไปยังเบส ถ้าผู้สังเกตอยู่ในบริเวณเอมมิตเตอร์ จะมองเห็นว่ากระแสนี้คือโฮลที่ถูกป้อนเข้าในเบสและรวมตัวกันใหม่กับอิเล็กตรอนในเบส เมื่อผ่านรอยตะเข็บเอมมิตเตอร์ I_{CBO} จะถูกเพิ่มปริมาณเป็น $\beta_F I_{CBO}$ (ตามคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์) จากรูป 2.6 (ข) I_{EB} สมนัยกับ $(1 - \alpha_F)\ I_E$ ดังนั้น สรุปได้ว่า

$$I_{EB} = I_{CBO} = (1 - \alpha_F)\ I_E$$

กระแสที่เกิดจากการรวมตัวกันใหม่ มีค่าเป็น

$$I_{CBO} + \beta_F I_{CBO} = (1 + \beta_F)\ I_{CBO} = I_E$$

กระแสที่ไหลไปคอลเลคเตอร์ คือ $\alpha_F I_E$ ถ้าเริ่มจากความสัมพันธ์

$$I_{CBO} = (1 - \alpha_F)\ I_E$$

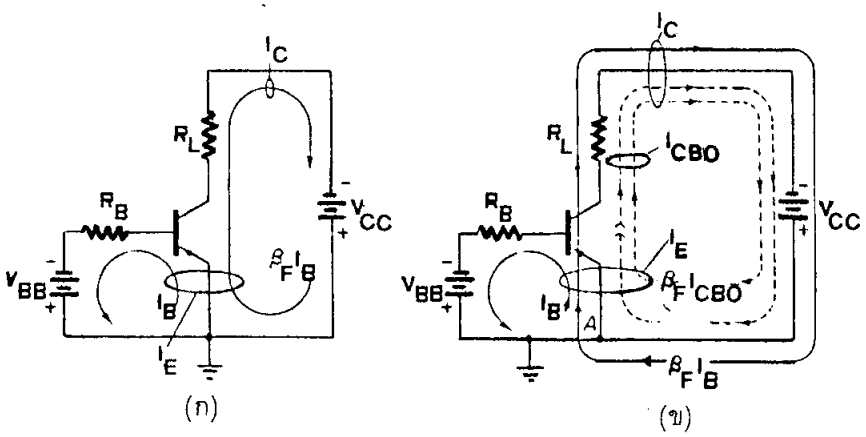
เขียนให้อยู่ในรูปของ I_E คือ $I_E = \dfrac{I_{CBO}}{(1 - \alpha_F)}$

$$I_E = \frac{I_{CBO}}{(1 - \alpha_F)} = (\beta_F + 1)\ I_{CBO} = I_C \qquad \text{.....(2.11)}$$

ถ้าเบสเป็นขั้วเปิด กระแสรั่วเขียนได้เป็น I_{CEO} และ $I_E = I_C$ ดังนั้น เขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$I_{CEO} = I_E = \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha_F} = (\beta_F + 1)\ I_{CBO} = I_C \qquad \text{.....(2.12)}$$

จากแนวความคิดดังกล่าวข้างต้น จึงมีการเสนอวิธีการวางซ้อน (super-position) กล่าวคือ ลากแนวทิศทางการไหลของปริมาณกระแสในวงจร เพื่อทำการวิเคราะห์วงจร ซึ่งเป็นการแยกกระแสจากพาหะประจุส่วนมาก กับกระแสจากพาหะประจุส่วนน้อย (กระแสรั่ว) ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอนสามารถละทิ้งกระแสรั่วได้ ตัวอย่างของวิธีการดังกล่าวนี้แสดงอยู่ในรูป 2.10 (ก) เป็นวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน ทิศทางการไหลของกระแสเกิดจากพาหะประจุส่วนมากทั้งสิ้น I_{CBO} ในสมการ (2.9) และ (2.10) มีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม จำเป็นต้องคำนึงถึงกระแสรั่วซึ่งแสดงในรูป 2.10 (ข) เป็นการวาดแนวกระแสซ้อนลงในวงจรรูป (ก) เห็นได้ว่า กระแสคอลเลคเตอร์แยกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้



รูป 2.10 (ก) แสดงทิศทางกระแสที่เกิดจากพาหะประจุส่วนมากของทรานซิสเตอร์ซึ่งต่อในวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (ข) แสดงทิศทางของกระแสจากทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม ซึ่งได้เพิ่มปริมาณของกระแสรั่ว

(1) กระแส $I_C = \beta_F I_B$ จากเบส

(2) I_{CBO} เกิดที่รอยต่อคอลเลคเตอร์ จากนั้นไหลออกจากขั้วคอลเลคเตอร์ไปยังโหลด R_L ผ่านแบตเตอรี่ V_{CC} ไปยังจุดเชื่อม A และไหลเข้าสู่รอยต่อเอมมิตเตอร์

(3) เมื่อ I_{CBO} ไหลผ่านรอยต่อเอมมิตเตอร์ จะก่อให้เกิดกระแสปริมาณ $\beta_F I_{CBO}$ (เป็นคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์) ไหลในวงจรเอาท์พุท

นั่นคือ กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งหมด = (1) + (2) + (3)

หรือกล่าวได้อีกแบบหนึ่งว่า วิธีการวางซ้อนกระแสทำโดยซ้อนกระแสที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่ไม่เป็นอิสระ ลงบนกระแสที่เกิดจากต้นกำเนิดกระแสที่เป็นอิสระ (รำลึกเสมอว่า $\alpha_F I_E$ และ $\beta_F I_B$ เป็นต้นกำเนิดกระแสไม่อิสระ) ซึ่งกระแสนี้ถูกกระตุ้นให้เกิดมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่านรอยต่อเอมมิตเตอร์

ตัวอย่าง 2.3 ในวงจรรูป 2.10 (ก) มีรายละเอียดดังนี้

ใช้ทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอน $R_B = 100$ K, $R_L = 10$ K, $\alpha_F = 0.990$

$V_{BB} = 1.7$ v, $V_{CC} = 20$ v

จงหา (1) I_B, (2) I_C และ (3) I_E

วิธี

(1) ใช้สมการ (2.4) หาค่า β_F

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F} = \frac{0.990}{0.010} = 99$$

หา I_B จากลูปอินพุทในรูป 2.10 (ก)

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE}$$

$$1.7\ \text{v} = I_B\ (10^5\ \Omega) + 0.7\ \text{v}$$

$$I_B = 10\ \mu\text{A}$$

(2) ถือว่า $I_{CBO} = 0$, ใช้สมการ (2.9) หาค่า I_C

$$I_C = \beta_F I_B = 99\ (10\ \mu\text{A}) = 990\ \mu\text{A}$$

(3) หาค่า I_E จากสมการ (2.10)

$$I_E = (\beta_F + 1)\ I_B = 100\ (10\ {}_m\text{A}) = 990\ \mu\text{A}$$

ตรวจสอบคำตอบโดยใช้สมการ (2.1)

$$I_E = 1000\ \mu\text{A} = I_C + I_B = 990 + 10\ \mu\text{A}$$

หมายเหตุ ควรเปรียบเทียบกับตัวอย่าง 2.1 เพื่อพิจารณาข้อแตกต่างหรือข้อเหมือนของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม กับวงจรเบสร่วม

ตัวอย่าง 2.4 กำหนดปริมาณค่าเช่นเดียวกับในตัวอย่าง 2.3 แต่ใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม และ $V_{BB} = 1.3$ v, $I_{CBO} = 5\ \mu\text{A}$ จงหา (1) I_B, (2) I_C, (3) I_E, (4) เปรียบเทียบค่ากับตัวอย่าง 2.3, I_C และ I_E เพิ่มขึ้นเท่าไร

วิธี

(1) หาค่า I_B จากลูปอินพุทในรูป 2.10 (ข)

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE}$$

$$1.3\ \text{v} = I_B\ (10^5\ \Omega) + 0.3\ \text{v}$$

$$I_B = 10\mu\text{A}$$

(2) จากสมการ (2.9), $I_C = \beta_F I_B + (\beta_F + 1) I_{CBO}$

β_F หาค่าเช่นเดียวกับตัวอย่าง 2.3 ซึ่งได้ค่า $\beta_F = 99$

$$\therefore I_C = 99\ (10\ \mu A) + (100)\ (5\ \mu A) = 1.49\ mA$$

(3) จากสมการ (2.10),

$$I_E = (\beta_F + 1)\ I_B + (\beta_F + 1)\ I_{CBO}$$
$$= 100\ (10\ \mu A) + 100\ (5\ \mu A)$$
$$= 1.5\ mA$$

(4) จากสมการ (2.12),

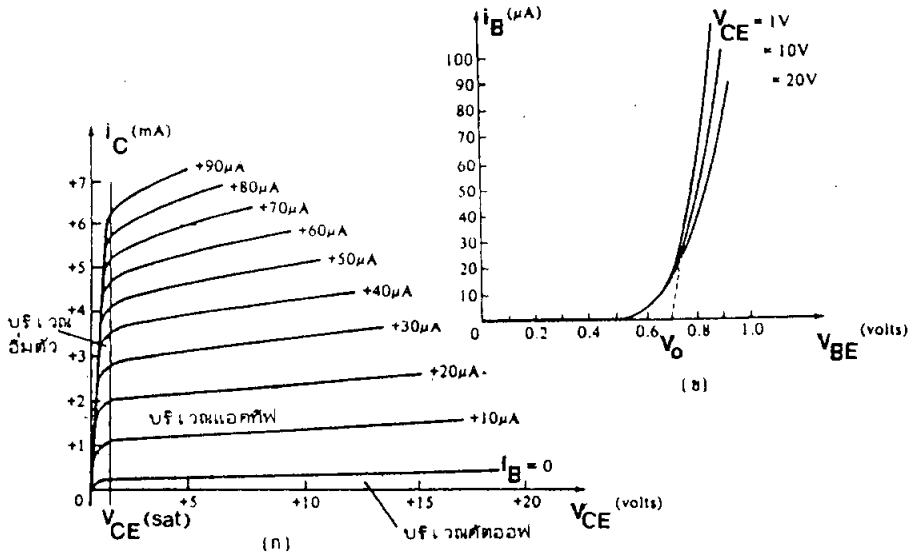
$$I_{CEO} = (\beta_F + 1)\ I_{CBO} = 100\ (5\ \mu A) = 0.5\ mA$$

เป็นสาเหตุให้ค่า I_C และ I_E เพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง 2.3 โดยประมาณ 50%

2.5.1 กราฟแสดงลักษณะสมบัติของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม

สำหรับวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม มีขั้วเอมมิตเตอร์เป็นขั้วร่วมของด้านอินพุท (คือขั้วเบส) กับด้านเอาท์พุท (คือ ขั้วคอลเลคเตอร์) ย้อนพิจารณารูป 2.4 (ก) และ (ข) ถ้าตัดวงจรเอาท์พุท คือ R_L และ V_{CC} จะเห็นได้ว่า วงจรทั้งสองมีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือ ไดโอดเบส-เอมมิตเตอร์ ได้รับการไบแอสตรงจากแบตเตอรี่ตัวเดียว ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน กระแสอินพุทจะไหลโดยมีค่าเป็นไปตามสมการไดโอด กล่าวคือ I_B หรือ I_E มีค่าขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าไดโอด V_{BE} หรืออีกนัยหนึ่ง คือ I_B หรือ I_E มีค่าขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าอินพุทแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential) ยกเว้นเมื่อต่อตัวต้านทานค่ามาก ๆ แบบอนุกรมในวงจรอินพุท ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมกระแสอินพุท

อย่างไรก็ตาม เพื่อศึกษาลักษณะการประพฤติของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม จำต้องอธิบายโดยอาศัยเส้นกราฟลักษณะสมบัติ ดังแสดงในรูป 2.11 (ก) และ (ข) ในรูป 2.11 (ก) เป็นเส้นกราฟลักษณะสมบัติด้านเอาท์พุท แกนตั้งเป็นค่ากระแสเอาท์พุท (i_C) แกนนอนเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท (v_{CE}) เส้นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ของกระแสเอาท์พุทกับแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท เมื่อกระแสอินพุท (I_B) มีค่าคงที่ตามแต่จะกำหนดขึ้น



รูป 2.11 (ก) เส้นกราฟลักษณะสมบัติค้านเอาท์พุทของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ซึ่งแบ่งส่วนใหญ่ ๆ ได้ 3 บริเวณ เช่นเดียวกับของวงจรเบสร่วม (ข) ลักษณะสมบัติด้านอินพุทของวงจรเดียวกับรูป (ก)

สังเกตว่า I_B อยู่ในหน่วย μA แต่ i_C อยู่ในหน่วย mA แสดงว่าการขยายกระแสมีค่าสูง ต่างกับค่าในวงจรเบสร่วมซึ่งมีกระแสอินพุทอยู่ในหน่วยเดียวกับกระแสเอาท์พุท คือ mA และเส้นกราฟกระแสอินพุทของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ไม่เป็นแนวขนานกับแกนนอน ซึ่งของวงจรเบสร่วมมักอยู่ในแนวขนาน ลักษณะเช่นนี้แสดงว่า แรงดันไฟฟ้า V_{CE} มีอิทธิพลต่อขนาดของกระแสคอลเลคเตอร์มาก

การแบ่งบริเวณในกลุ่มเส้นกราฟเป็นเช่นเดียวกับของวงจรเบสร่วม คือ เป็นบริเวณอิ่มตัว คัตออฟ และแอคทีฟ และที่ค่า $I_B = 0$ จะมีค่า $I_C \neq 0$ ซึ่งต่างกับกรณีของวงจรเบสร่วม

2.5.2 ปริมาณอัตราขยายของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม

อัตราขยายกระแสของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (β_F)

จากคำจำกัดความ เขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้เป็น $\beta_F = I_C/I_B$ สมมุติ กระแสเอมมิตเตอร์มีค่า 6 mA และกระแสเบสมีค่า 0.1 mA ส่วนกระแสคอลเลคเตอร์มีค่า 5.9 mA แทนค่าลงในสมการข้างต้น จะได้ค่า $\beta_F = 59$

เห็นได้ว่า อัตราขยายกระแสของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมมีค่าค่อนข้างสูง แตกต่างจากวงจรเบสร่วมซึ่งมีอัตราขยายกระแสน้อยกว่าหนึ่ง อธิบายได้ว่า เมื่อกระแสเบส (อินพุท) มีการแปรค่าเพียงเล็กน้อย จะก่อให้เกิดการแปรค่าของกระแสคอลเลคเตอร์ (เอาท์พุท) ได้อย่างมาก

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (A_v)

ถ้าความต้านทานอินพุท (R_i) มีค่า 3,000 โอห์ม และตัวต้านทานโหลด (R_L) มีค่า 12,000 โอห์ม หาค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v) ดังนี้

$$A_v = A_i \cdot A_r = \frac{I_C}{I_B} \cdot \frac{R_L}{R_i} = 236$$

ทั้งนี้ ยังคงค่า I_C และ I_B เช่นเดิม (คือ 5.9 และ 0.1 mA ตามลำดับ) ข้อสังเกตคือ อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมมีค่ามากกว่าของวงจรเบสร่วม อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปอาจถือว่าไม่แตกต่างกันมากนัก

อัตราขยายกำลังของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (A_p)

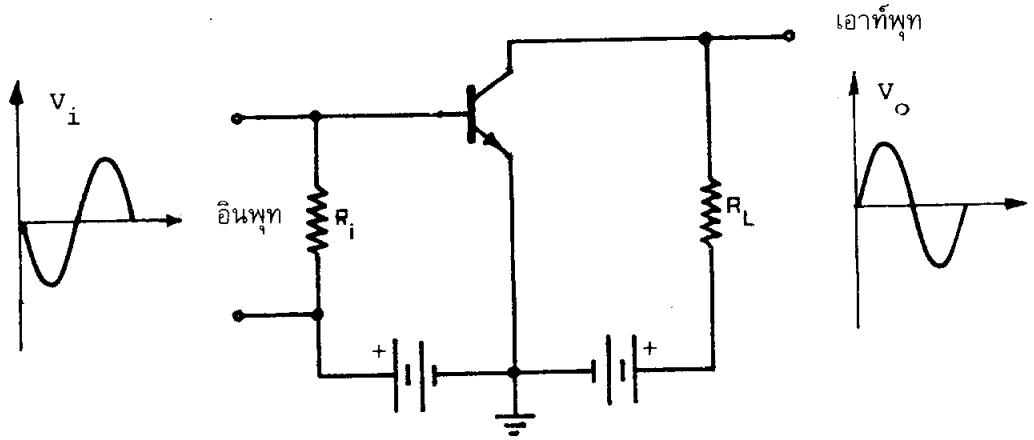
$$A_p = P_o/P_i = \beta_F A_v = 59 \times 236 = 13924$$

อัตราขยายกำลังมีค่าสูง ดังนั้น นิยมใช้วงจรเอมมิตเตอร์ร่วมกันมาก เนื่องจากคุณสมบัติในการขยายกระแสและกำลัง

2.5.3 เฟสของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม

พิจารณาวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมในรูป 2.12 เมื่อสัญญาณอินพุทอยู่ในช่วงลบ จะทำให้ไบแอสระหว่างเอมมิตเตอร์-เบสลดลง กระแสไหลผ่านเบสจะมีปริมาณน้อย ส่งผลถึงกระแสคอลเลคเตอร์ให้มีค่าลดลง ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานโหลดลดค่าลง แสดงว่าศักย์ไฟฟ้าที่คอลเลคเตอร์จะเป็นบวกมากขึ้น (เมื่อเทียบกับกราวนด์)

เมื่อสัญญาณอินพุทอยู่ในช่วงบวก ไบแอสระหว่างเอมมิตเตอร์-เบสเพิ่มขึ้น จึงทำให้เพิ่มปริมาณกระแสที่ไหลผ่านเอมมิตเตอร์ ไปยังคอลเลคเตอร์และตัวต้านทานโหลด นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานโหลดมีค่ามากขึ้น ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่คอลเลคเตอร์ลดค่าลง (เมื่อเทียบกับกราวนด์) สรุปได้ว่า ในวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมมีเฟสของสัญญาณเอาท์พุทต่างจากเฟสของสัญญาณอินพุท 180°



รูป 2.12 แสดงเฟสของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ใช้ทรานซิสเตอร์แบบ npn

2.6 วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม

สำหรับวงจรขยายแบบคอลเลคเตอร์ร่วม เป็นการต่อขั้วคอลเลคเตอร์ร่วมระหว่างภาคอินพุทและเอาท์พุท โดยปกติมักไม่ต่อขั้วคอลเลคเตอร์ลงกราวนด์โดยตรง แต่จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร การลงกราวนด์ของขั้วคอลเลคเตอร์ต้องเป็นภาวะกระแสสลับ คือ ลัดผ่านแบตเตอรี่ V_{CC} เบสเป็นขั้วอินพุท เอมมิตเตอร์เป็นขั้วเอาท์พุท บางครั้งเรียกชื่อเป็น "วงจรเอมมิตเตอร์ตาม" (emitter follower) เนื่องจากสัญญาณเอาท์พุทที่ขั้วเอมมิตเตอร์จะมีขนาดประมาณเท่ากับสัญญาณอินพุทที่เบส หรือกล่าวว่า สัญญาณเอาท์พุทมีลักษณะ**ตาม** สัญญาณอินพุท

ตัวอย่างการต่อวงจรขยายลักษณะเช่นนี้ ได้แสดงไว้แล้วในรูป 2.4 (ค) โดยทั่วไปนิยมใช้วงจรนี้เป็นตัวปรับอิมพีแดนซ์ การกำหนดค่าของพารามิเตอร์อาจทำโดยใช้เส้นกราฟลักษณะสมบัติของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ข้อสังเกตคือ แรงดันเอาท์พุทของวงจรทั้งสองนี้มีเครื่องหมายกลับกัน คือ $V_{EC} = -V_{CE}$ และจากที่กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าใกล้เคียงกระแสเอมมิตเตอร์ ดังนั้นสามารถใช้ค่า I_C แทน I_E ได้โดยตรงในเส้นกราฟลักษณะสมบัติ

2.6.1 ปริมาณอัตราขยายของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม

อัตราขยายกระแสของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (A_i)

$$A_i = I_C/I_B = (I_C + I_B) / I_B = (I_C/I_B) + 1 = \beta_E + 1$$

สรุปได้ว่า อัตราขยายกระแสของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วมมีค่ามากกว่าของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมเล็กน้อย

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (A_v)

$$A_v = V_E/V_B = V_E / (V_E + V_{BE}) \sim 1$$

เห็นได้ว่า อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรนี้ มีค่าประมาณ 1 เสมอ เนื่องจาก V_{BE} มีค่าน้อย

อัตราขยายกำลังของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (A_p)

$$A_p = \frac{(V_E \cdot I_E)}{(V_B \cdot I_B)} = A_v \cdot A_i \sim A_i$$

อัตราขยายกำลังของวงจรนี้มีค่าไม่มากนัก เนื่องจากอัตราขยายแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อย

2.6.2 เฟสของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม

เฟสของสัญญาณออกเป็นเช่นเดียวกับเฟสของสัญญาณเข้า ดังได้กล่าวแล้วว่า สัญญาณออกที่เอมมิตเตอร์มีขนาดแรงดันไฟฟ้าตามสัญญาณเข้าที่เบส จากความสัมพันธ์

$$V_B = V_E + V_{BE}$$

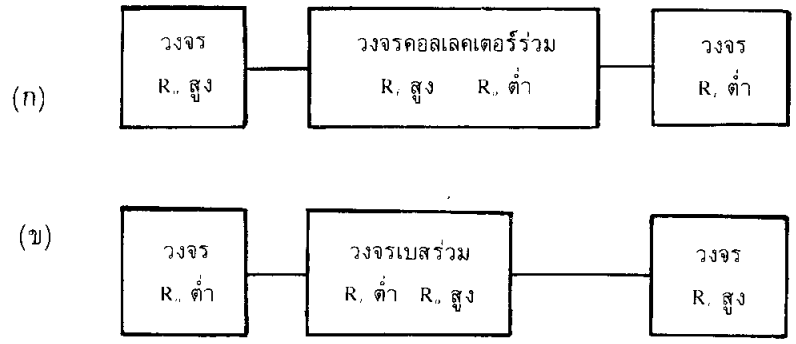
V_{BE} มีค่าเกือบคงที่ ดังนั้น เมื่อ V_B เพิ่ม (หรือลด) V_E จะเพิ่ม (หรือลด) ตามไปด้วย

2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของวงจรทรานซิสเตอร์ทั้งสามแบบ

ในตาราง 2.3 ได้สรุปคุณสมบัติพื้นฐานของวงจรขยายทั้งสามแบบ ซึ่งนำมาจากรายละเอียดในตอน 2.4, 2.5, และ 2.6 เห็นได้ว่า วงจรคอลเลคเตอร์ร่วมเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวปรับอิมพีแดนซ์ กล่าวคือ เป็นวงจรต่อระหว่างวงจรความต้านทานเอาท์พุทมีค่าสูง กับวงจรที่มีความต้านทานอินพุทต่ำ บางครั้งอาจเรียกชื่อเป็น "วงจรบัฟเฟอร์" (buffer) เนื่องจากทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้การต่อโหลดมีผลต่อวงจรที่จะต่อโหลด ส่วนวงจรเบสร่วมเหมาะสำหรับต่อคั่นระหว่างวงจรที่มีความต้านทานเอาท์พุทต่ำมาก ๆ และโหลดที่มีความต้านทานสูงมาก ๆ สุดท้าย คือวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม มีลักษณะปานกลางระหว่างวงจรเบสร่วมและคอลเลคเตอร์ร่วม มีอัตราขยายกระแสและแรงดันไฟฟ้ามากกว่าหนึ่ง ดังนั้น นิยมใช้ในวงจรขยายสัญญาณ

ตาราง 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรทรานซิสเตอร์ทั้งสามแบบ

ปริมาณ	เบสร่วม	เอมมิตเตอร์ร่วม	คอลเลคเตอร์ร่วม
อัตราขยายกระแส	< 1 (~ 0.9)	> 1	สูงสุด
อัตราขยายแรงดัน	มากที่สุด	> 1	$\leqslant 1$
อัตราขยายกำลัง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
ความต้านทานอินพุท	ต่ำที่สุด (ไม่กี่โอห์ม)	ปานกลาง (~ 10 K)	สูงสุด
ความต้านทานเอาท์พุท	สูงสุด ($\sim$ หลายร้อยกิโลโอห์ม)	ปานกลาง (~ 10 K)	ต่ำสุด



รูป 2.13 แผนผังการใช้งานทั่วไป (ก) ของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (ข) ของวงจรเบสร่วม

2.8 คำจำกัดความที่แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

2.8.1 อัตราทนได้สูงสุดของทรานซิสเตอร์

ปริมาณต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ เช่น กำลังงานสูญเสีย อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้มีค่าได้ เป็นต้น ซึ่งถูกกำหนดขึ้นตามชนิดและโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ ผู้ใช้ต้องระวังไม่ให้เกินขีดจำกัดดังกล่าว มิฉะนั้นจะเกิดความเสียหายแก่ทรานซิสเตอร์

2.8.2 กระแสรั่ว หรือกระแสย้อนกลับอิ่มตัว

ปริมาณกระแสรั่วมีเกิดขึ้นเสมอในทรานซิสเตอร์ แต่สำหรับซิลิคอนมีปริมาณกระแสรั่วน้อย ๆ จึงสามารถละทิ้งได้ ลักษณะการเกิดของกระแสรั่วได้อธิบายแล้วในตอน 2.4 สิ่งที่น่าสนใจคือการเปรียบเทียบปริมาณกระแสรั่วในวงจรเบสร่วม (I_{CBO}) กับค่าในวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (I_{CEO}) ขั้นตอนการพิจารณามีดังนี้

กระแสคอลเลคเตอร์ในวงจรเบสร่วม, $I_C = \alpha_F I_E + I_{CBO}$

แทนค่า $I_E = I_C + I_B$, $\therefore I_C = \alpha_F (I_C + I_B) + I_{CBO}$

$$= \alpha_F I_C + \alpha_F I_B + I_{CBO}$$

$$(1 - \alpha_F) I_C = \alpha_F I_B + I_{CBO}$$

$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha_F}$$

$$= \beta_F I_B + (1 + \beta_F) I_{CBO} \quad \text{.....(i)}$$

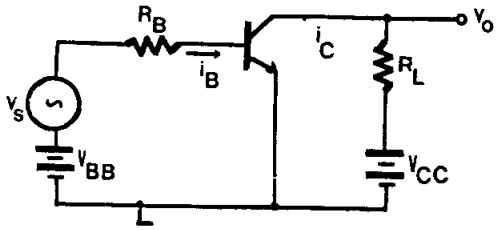
สำหรับวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม, $I_C = \beta_F I_B + I_{CEO}$ .....(ii)

(i) = (ii), $\therefore I_{CEO} = (1 + \beta_F) I_{CBO}$

แสดงว่า I_{CEO} มีค่ามากกว่า I_{CBO} ดังนั้น วงจรเอมมิตเตอร์ร่วมจึงมีลักษณะขึ้นกับอุณหภูมิมากกว่า เนื่องจาก I_{CEO} เป็นกระแสเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะรอง และจำนวนพาหะรองขึ้นกับอุณหภูมิ โดยทั่วไป กระแสรั่วจะเพิ่มเป็น 2 เท่า ทุก ๆ การเพิ่มขึ้น 10°C หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 7% ต่อ 1°C

2.8.3 กำลังสูญเสียสูงสุด

การทำงานของอุปกรณ์อีเลคทรอนิคส์จะมีกำลังสูญเสียในตัวมันเข้ามาเกี่ยวข้อง มักอยู่ในรูปของ **ความร้อนต่อหน่วยเวลา** ความร้อนคือพลังงาน และค่าพลังงานต่อหน่วยเวลา คือ กำลังงาน ถ้ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อย แสดงว่าเกิดความร้อน (ต่อหน่วยเวลา) ปริมาณน้อย ย่อมมีการถ่ายเทความร้อนได้ทันเวลา ในทางตรงข้าม ถ้าถ่ายเทความร้อนไม่ทัน ผลคือ จะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิ และถ้าการเพิ่มค่าดังกล่าวมีค่าสูงเกินไป ย่อมทำให้อุปกรณ์เสียหาย จึงได้มีการกำหนด "ค่ากำลังสูญเสียสูงสุด" ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นค่าที่เกิดขึ้นแล้วยังทำให้อุปกรณ์ไม่เสียหายนั่นเอง สรุปได้ว่า อายุการใช้งานของทรานซิสเตอร์แบบสองรอยต่อขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากรูป 2.14 สามารถอธิบายกำลังสูญเสียของทรานซิสเตอร์ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังนี้



รูป 2.14 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม แสดงทั้งแหล่งจ่ายไฟตรงและไฟสลับ

$$\left.\begin{aligned} i_C &= I_C + i_c \\ \text{และ} \quad v_{CE} &= V_{CE} + v_{ce} \end{aligned}\right\} \qquad \text{.....(2.13)}$$

โดย I_C และ V_{CE} เป็นปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตามลำดับ

i_c และ v_{ce} เป็นปริมาณของกระแสสลับ ซึ่งแปรค่าตามเวลาและมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์

กำลังที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟที่คอลเลคเตอร์ในแต่ละช่วงเวลา มีค่าดังนี้

$$p_{CC} = V_{CC} i_C = V_{CC}(I_C + i_c) = V_{CC} I_C \qquad \text{.....(2.14)}$$

เนื่องจาก V_{CC} เป็นค่าคงที่ แต่ i_c มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ $V_{CC}i_c$ จึงเป็นศูนย์ ถ้าไม่คำนึงถึงการเพี้ยน (distortion) ของสัญญาณ ทั้ง I_C และ p_{CC} เป็นค่าคงที่ ต่างเป็นอิสระต่ออำพน (amplitude) ของสัญญาณ

กำลังที่ถูกดูดกลืนโดยตัวต้านทาน R_c ในแต่ละชั่วขณะคือ

$$p_R = R_c i_c^2 = R_c (I_C + i_c)^2 = R_c I_C^2 + R_c i_c^2 \quad \text{.....(2.15)}$$

เห็นได้ว่าพจน์ $2R_c I_C i_c = O$ เนื่องจากปริมาณ $2R_c I_C$ คงที่ แต่ค่าเฉลี่ยของ $i_c = O$ กล่าวได้ว่า กำลังเฉลี่ยที่ถูกดูดกลืนโดย R_c คือ

$$P_R = R_c I_C^2 + R_c (i_c^2)_{av}$$
$$= R_c I_C^2 + R_c (i_{c,rms})^2 \quad \text{.....(2.16)}$$

กำลังสูญเสียโดยทรานซิสเตอร์ในแต่ละชั่วขณะคือ

$$p_T = v_{CE} i_C + v_{BE} i_B \quad \text{.....(2.17)}$$

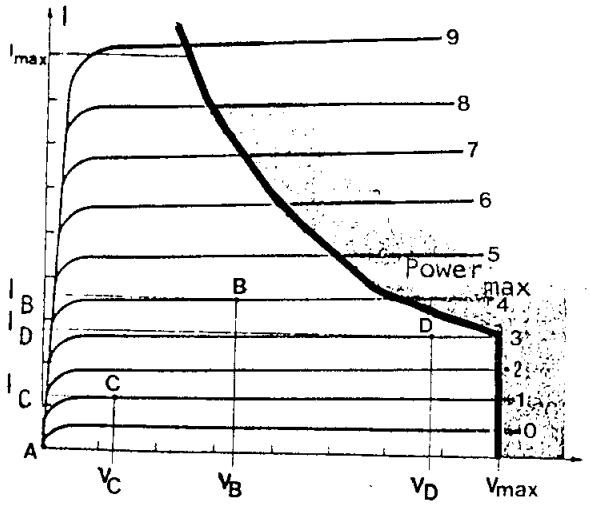
พจน์ที่สองทางด้านขวามีค่าน้อยกว่าพจน์แรกมาก เนื่องจาก (1) $i_B = i_C/\beta_o$ และ (2) $v_{BE} \ll v_{CE}$ จึงละทิ้งได้ ดังนั้น

$$p_T = v_{CE} i_C = (V_{CC} - i_c R_c) i_C = V_{CC} i_C - i_C^2 R_c \quad \text{.....(2.18)}$$
$$= p_{CC} - p_R \quad \text{.....(2.19)}$$

โดยความสัมพันธ์ $v_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$ ได้จากลูปเอาท์พุทของรูป 2.14 และเขียนปริมาณค่าเฉลี่ยของกำลังสูญเสียโดยทรานซิสเตอร์ ดังนี้

$$p_T = P_{CC} - P_R \quad \text{.....(2.20)}$$

และจากความสัมพันธ์ในสมการ (2.18) คือ $p_T = v_{CE} i_C$ แสดงในรูป 2.15 โดยสมมุติให้ p_T เป็นค่ากำลังสูญเสียสูงสุด จุดทำงานของวงจรขยายจะต้องอยู่บนหรือต่ำกว่าแนวไฮเปอร์โบลา (hyperbola) จึงจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในภาวะสงบ ถ้าอยู่ตำแหน่งสูงกว่าแนวนี้ย่อมก่อให้เกิดความร้อนสูงเกินกว่าทรานซิสเตอร์จะทนได้



รูป 2.15 แสดงค่ากำลังสูญเสียสูงสุด

2.8.4 ความต้านทานความร้อน (thermal resistance)

เมื่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น) มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น วิธีแก้ไขวิธีหนึ่งคือออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อนซึ่งเรียกชื่อทั่วไปว่า "ฮีทซิงค์" (heat sink) ส่วนเทคนิคการวัดปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านจากส่วนประกอบหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่ง อาจเลือกได้ 2 ปริมาณ ดังนี้

(1) วัดค่าความนำความร้อน (thermal conductance)

(2) วัดค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistance)

โดยทั่วไปนิยมวัดปริมาณหลัง ซึ่งเป็นการวัดว่าตัวกลางจะต้านการไหลของความร้อนได้มากหรือน้อยเพียงใด ใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ θ มีหน่วยเป็น °C/W การพิจารณาความต้านทานความร้อนจากรอยต่อของสารกึ่งตัวนำไปยังบรรยากาศ ยังต้องคำนึงถึงความต้านทานจากรอยต่อไปยังอุปกรณ์ห่อหุ้ม ความต้านทานจากอุปกรณ์ห่อหุ้มไปยังฮีทซิงค์ และจากฮีทซิงค์ไปยังบรรยากาศภายนอกอุปกรณ์นั่นเอง ซึ่งความต้านทานความร้อนเหล่านี้ต่อกันอยู่อย่างอนุกรม ถ้ากำหนดสัญลักษณ์ดังนี้

θ_{JC}	แทนความต้านทานความร้อนจากรอยต่อไปยังอุปกรณ์ห่อหุ้ม
θ_{CS}	แทนความต้านทานความร้อนจากอุปกรณ์ห่อหุ้มไปยังฮีทซิงค์
θ_{SA}	แทนความต้านทานความร้อนจากฮีทซิงค์ไปยังบรรยากาศ
θ_{JA}	แทนความต้านทานความร้อนจากรอยต่อไปยังบรรยากาศ

เขียนสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็น

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA} \quad \text{.....(°C/W)}$$

ความสัมพันธ์ของ θ_{JA} กับอุณหภูมิของรอยต่อสารกึ่งตัวนำ คือ

$$T_J = P\theta_{JA} + T_A \quad \text{.....(°C)}$$

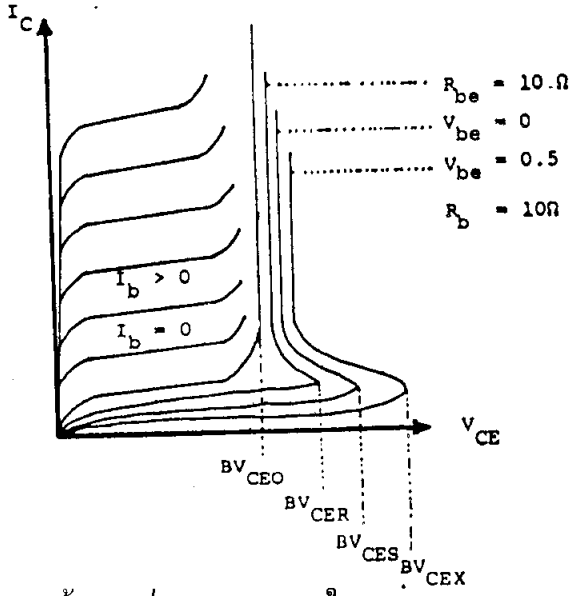
โดย T_J แทนอุณหภูมิของรอยต่อสารกึ่งตัวนำ

T_A แทนอุณหภูมิของบรรยากาศ

P แทนกำลังสูญเสีย

2.8.5 แรงดันพัง (Breakdown voltage)

แรงดันพัง เป็นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (ทั้งไดโอด ทรานซิสเตอร์ และไอซี (IC) ต่าง ๆ) สามารถรับได้โดยไม่เกิดการพังหรือเสียหาย ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ แรงดันพังวัดระหว่าง 2 ขั้ว โดยอีกขั้วที่เหลือมีสภาพเป็นวงจรเปิด (open circuit) เช่น BV_{EBO} หมายถึงแรงดันพัง V_{EB} โดยมีคอลเลคเตอร์เป็นวงจรเปิด หรือ BV_{CER} เป็นแรงดันพังเมื่อต่อตัวต้านระหว่างเบสและเอมมิตเตอร์ หรือ BV_{CES} เป็นแรงดันพังเมื่อลัดวงจรระหว่างเบสและเอมมิตเตอร์ และ BV_{CEV} เป็นแรงดันพังเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าแบบย้อนกลับระหว่างขั้วเบสไปยังเอมมิตเตอร์ เป็นต้น ความหมายและสัญญลักษณ์ของปริมาณแรงดันพังในกรณีต่าง ๆ ยังแสดงถึงวิธีการวัดค่าของมันด้วย อย่างไรก็ตาม ในแผ่นข้อมูลที่บริษัทผู้ผลิตแจ้งปริมาณแรงดันพังไว้ ควรเลือกใช้ค่าต่ำกว่าที่แจ้ง เพื่อความปลอดภัยในการใช้อุปกรณ์



รูป 2.16 แสดงเส้นกราฟของกระแสเบสในระนาบของกระแสคอลเลคเตอร์ และแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์-เอมมิตเตอร์ เมื่อแรงดันพังมีกรณีต่าง ๆ กัน

2.9 การตรวจสอบทรานซิสเตอร์

จุดประสงค์ของการตรวจสอบทรานซิสเตอร์อาจเพื่อดูสภาวะของทรานซิสเตอร์ หรือเพื่อตรวจหาขั้วทั้งสาม และชนิดของทรานซิสเตอร์ สำหรับการตรวจหาขั้วทั้งสามนั้น ทำได้ 2 วิธี คือเทียบดูจากคู่มือทรานซิสเตอร์ของทางบริษัทผู้ผลิต หรือวัดโดยใช้โอห์มมีเตอร์ ดังนี้

(1) ถ้าทราบขั้วและชนิดของทรานซิสเตอร์ (pnp หรือ npn) ต้องการทดสอบว่าอุปกรณ์อยู่ในภาวะวงจรลัดหรือวงจรเปิด ถ้าเป็นชนิด pnp ขั้วลบ (สีดำ) ต่อกับขาเบส อีกขั้วหนึ่งของมาตรวัดต่อที่ขาเอมมิตเตอร์ครั้งหนึ่ง จากนั้นนำไปต่อที่ขาคอลเลคเตอร์อีกครั้งหนึ่ง ผลปรากฏบนมาตรถ้าแสดงค่าต่ำ แสดงว่าอุปกรณ์อยู่ในภาวะวงจรลัด ถ้าค่าสูง แสดงว่าอุปกรณ์อยู่ในภาวะวงจรเปิด ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ npn มาตรอ่านตรงกันข้าม

(2) ต้องการหาขาเบส โดยไม่ทราบชนิดว่าเป็น pnp หรือ npn

(2.1) ใช้ขั้วบวก (สีแดง) ของมาตรจับที่ขาใดขาหนึ่งของทรานซิสเตอร์เป็นหลัก จากนั้นต่อขั้วลบ (สีดำ) ของมาตรกับอีกขาหนึ่งของทรานซิสเตอร์เช่นเดียวกับกรณี (1) ถ้ามาตรวัดความต้านทานปรากฏค่ามาก แสดงว่าขาที่ขั้วบวกจับอยู่นั้นคือขาเบสและทรานซิสเตอร์เป็นชนิด pnp

(2.2) ถ้าผลไม่เป็นตาม (2.1) ให้ย้ายขั้วบวกไปจับขาอื่นของทรานซิสเตอร์แล้วย้อนปฏิบัติขั้น (2.1) อีกครั้งหนึ่ง จนปรากฏผลดังกล่าวในตอน (2.1) สรุปผลคือสามารถทราบขาเบสได้

(2.3) ถ้าจับขั้วบวกของมาตรวัดจนครบทั้ง 3 ขาของทรานซิสเตอร์แล้ว แต่ไม่ได้ผลดังอธิบายในขั้วตอน (2.1) แสดงว่าทรานซิสเตอร์นั้นเป็นชนิด npn ต้องเปลี่ยนเป็นใช้ขั้วลบแทน (ขั้วบวก) จากนั้นย้อนกลับทำตามขั้นตอน (2.1) อีก ถ้าผลปรากฏได้ค่าสูง แสดงว่าที่ขั้วลบจับอยู่นั้นเป็นขาเบส

(3) ต้องการหาขาเอมมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ (ต่อจากกรณี (2)) ให้ทำการวัดทั้ง 2 ขาที่เหลือของทรานซิสเตอร์โดยใช้ทั้งสองขั้วสลับกัน (ต้องทำการวัด 2 ครั้ง) ถ้าค่าสูงครั้งหนึ่งและค่าต่ำอีกครั้งหนึ่ง แยกอธิบายสำหรับผลปรากฏได้ค่าสูง ดังนี้

(3.1) แสดงว่าขั้วบวกจับที่ขาคอลเลคเตอร์ และขั้วลบย่อมเป็นเอมมิตเตอร์ ทรานซิสเตอร์เป็นชนิด pnp

(3.2) ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ npn ขั้วบวกจะจับที่ขาเอมมิตเตอร์ ส่วนขั้วลบจับที่ขาคอลเลคเตอร์

(4) เกี่ยวเนื่องกับขั้นตอนลำดับที่ (3) ถ้าใช้มาตร RxlK วัดทั้งสองครั้น แต่เข็มของมาตรวัดไม่กระดิกขึ้นเลย แสดงว่าทรานซิสเตอร์นั้นทำจากซิลิคอน ต้องเปลี่ยนขนาดเป็น

RxlOK และดำเนินการทดสอบตามขั้นตอนที่ (3) ใหม่ ผลจะสลับกับ (3.1) และ (3.2) ดังนี้

(4.1) ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ pnp ขั้วบวกคือเอมมิตเตอร์

(4.2) ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ npn ขั้วบวกคือคอลเลคเตอร์

2.10 บทสรุป

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับทรานซิสเตอร์แบบ 2 รอยต่อได้ถูกรวบรวมไว้ในบทนี้ ซึ่งสรุปได้ว่า ชนิดของทรานซิสเตอร์แบบ 2 รอยต่อแยกเป็น

(1) แบบ npn

(2) แบบ pnp

ซึ่งชิ้นส่วนของสารกึ่งตัวนำทั้งสามมีชื่อเรียกเป็นเอมมิตเตอร์ เบส และคอลเลคเตอร์ ต่างได้รับการโด๊ปด้วยปริมาณสารเจือที่แตกต่างกัน ประโยชน์ที่ถูกนำไปใช้คือต่อเป็นวงจรเบสร่วม เอมมิตเตอร์ร่วม และคอลเลคเตอร์ร่วม ถ้าต้องการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขยายต้องไบแอสตรงให้รอยต่อเอมมิตเตอร์ และไบแอสกลับให้รอยต่อคอลเลคเตอร์

ในการวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์ เพื่อสะดวกและง่ายในการศึกษาได้มีการสร้างแบบจำลองหรือโมเดลวงจรเทียบเท่าเพื่อใช้แทนกลไกการทำงานภายในตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งบทนี้ได้เสนอโมเดล dc และได้มีการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรทรานซิสเตอร์ทั้งสาม เช่น อัตราขยายต่าง ๆ เฟสของวงจร กลุ่มเส้นกราฟแสดงลักษณะสมบัติ เป็นต้น ตาราง 2.3 ได้สรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรทรานซิสเตอร์ทั้งสาม

คุณสมบัติพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับทรานซิสเตอร์ดังอธิบายในตอน 2.8 นั้น จะปรากฏค่าในแผ่นข้อมูลซึ่งถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติจำเพาะ (specification) ของทรานซิสเตอร์แต่ละเบอร์ของแต่ละบริษัทผู้ผลิต

แบบฝึกหัดบทที่ 2

2.1 ข้อแตกต่างของทรานซิสเตอร์แบบ npn และ pnp มีอะไรบ้าง?

2.2 แหล่งกำเนิดของกระแสย้อนกลับอิ่มตัวในทรานซิสเตอร์ คืออะไร?

2.3 อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุทั้งหมดในตัวทรานซิสเตอร์ชนิด pnp ทั้งกรณี (ก) ไม่มีการไบแอสรอยต่อ (ข) มีการไบแอสรอยต่อทั้งสอง

2.4 ถ้าทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งมีค่าแอลฟา 0.98 และกระแสคอลเลคเตอร์แปรค่าไป 2 mA จงคำนวณการแปรค่าของกระแสเอมมิตเตอร์

2.5 ตามแบบจำลองในรูป 2.6 (ก) ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ซิลิคอนสามารถละทิ้ง I_{CBO} ได้ เนื่องจากอะไร?

2.6 จากตัวอย่าง 2-1 ถ้าแอลฟาแปรค่าเป็น 0.95 จงคำนวณหา I_C และ I_B ใหม่

2.7 จงหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของแอลฟาและเบตาในวงจรทรานซิสเตอร์

2.8 วงจรเอมมิตเตอร์ในรูป 2.10 (ก) ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียมแบบ npn จงร่างแบบจำลองในรูป 2.10 (ข) ใหม่

2.9 จงคำนวณค่า β_F ในรูป 2.11 (ก) ถ้า $V_{CE} = 5$ v

2.10 จากคำถามข้อ 2.9 จงคำนวณ α_F ที่สมนัยกัน

2.11 ตามความคิดของท่าน ถ้านำไดโอดเหมือนกันทุกประการ 2 ตัววางติดกัน เพื่อให้เกิด 3 ขั้วเช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์ จะได้ลักษณะการทำงานเป็นเช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์หรือไม่ เพราะเหตุใด?

2.12 อาศัยกราฟลักษณะสมบัติในรูป 2.8 จงหาบริเวณใช้งานของทรานซิสเตอร์ ถ้า $I_{Cmax} = 6$ mA, $V_{CBmax} = -15$ v และ $P_{Cmax} = 30$ mW