2102384

Electronics Laboratory

ชื่อ-สกุล.....

เลขประจำตัว.....

เลขประจำตัวผู้ร่วมงาน 1.....

เลขประจำตัวผู้ร่วมงาน 2.....

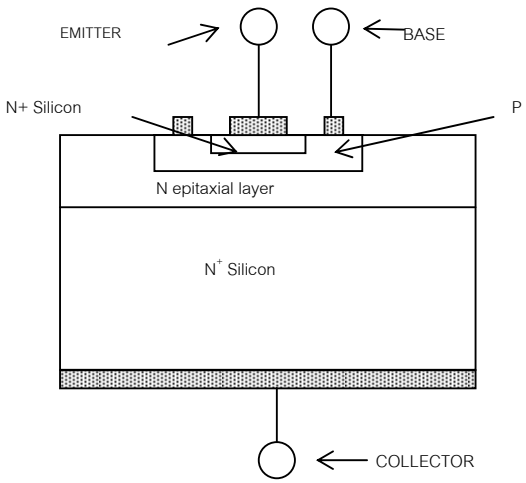
วันที่ทำการทดลอง.....

อาจารย์ผู้ควบคุม.....

ทรานซิสเตอร์ (Transistors, TRA)

ทรานซิสเตอร์ในหัวข้อการทดลองนี้มีอยู่ 2 ชนิด คือ ทรานซิสเตอร์แบบสองหัวต่อ หรือที่เรียกกันว่า BJT (Bipolar Junction Transistors) และทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า หรือที่เรียกกันว่า FET (Field Effect Transistors) ทรานซิสเตอร์เริ่มเป็นที่รู้จักและนำมาใช้งานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2491 แทนที่หลอดสุญญากาศ เนื่องจากทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กกินไฟน้อย และมีราคาถูก ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เป็นเหตุให้มีการค้นคว้าและพัฒนาด้านการผลิตอย่างรีบด่วนและจริงจัง ปัจจุบันนี้ผู้ผลิตสามารถบรรจุทรานซิสเตอร์จำนวนมหาศาลลงในชิ้นสารกึ่งตัวนำเล็กๆ ซึ่งเรียกว่า วงจรรวม (Integrated Circuits) ได้ อย่างไรก็ตามทรานซิสเตอร์ชนิดเดี่ยว ๆ ก็ยังคงมีการใช้งานอย่างแพร่หลายอยู่ทั่วไป

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ให้นิสิตมีความคุ้นเคยกับทรานซิสเตอร์ และเข้าใจการทำงานพื้นฐานของมันเพื่อเป็นแนวทางที่จะหาความรู้เพิ่มเติมในภายหน้า ทฤษฎีที่จะกล่าวต่อไปเป็นการบรรยายโดยสรุป เพื่อทบทวนความรู้ก่อนทำการปฏิบัติการเท่านั้น



รูปที่ 1. โครงสร้างแบบง่ายของทรานซิสเตอร์แบบ BJT

1. ทรานซิสเตอร์แบบสองหัวต่อ (Bipolar Junction Transistor: BJT)

ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี เรียงสลับกันอยู่ซึ่งอาจเป็นแบบ NPN หรือ PNP ก็ได้ ชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ตรงกลางมีชื่อว่าเบส (base) ส่วนชั้นสารกึ่งตัวนำที่อยู่หัวและท้าย มีชื่อว่า อิมิตเตอร์ (emitter) และคอลเลคเตอร์ (collector) ตามลำดับ (ดูรูปที่ 1) เพื่อให้อัตราขยายกระแสมีค่าสูง ชั้นเบสจะมีขนาดบางมาก เมื่อเทียบกับความยาวแพร่ซึมของพาหะ และความเข้มข้นของสารเจือปนในชั้นคอลเลคเตอร์จะต่ำกว่าในชั้นเบสเพื่อให้ breakdown voltage ของหัวต่อคอลเลคเตอร์มีค่าสูง ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์ใช้กับแหล่งกำเนิดไฟตรง (DC supply) ค่าสูงได้ ดังนั้นถ้าเราต่อขั้วอิมิตเตอร์สลับกับขั้วคอลเลคเตอร์ ทรานซิสเตอร์ของเราจะมีอัตราขยายกระแสต่ำ และมี breakdown voltage ที่ขั้วออกค่าต่ำไปด้วย

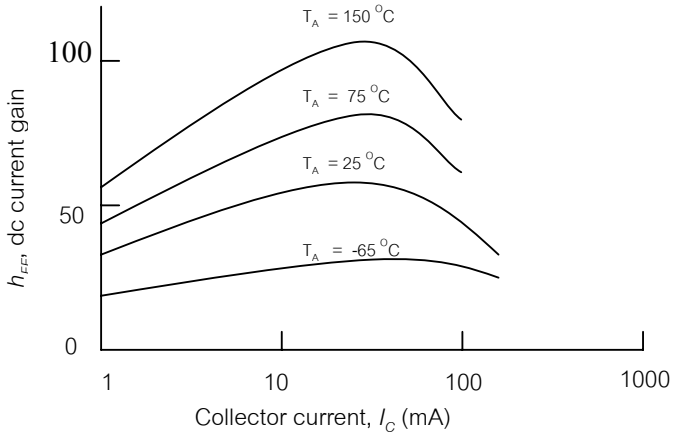
1.1 การทำงานของ BJT

เราสามารถแบ่งย่านการทำงานของ BJT ออกเป็น 3 ย่าน คือ

1. ย่านไวงาน (active region) กรณีนี้หัวต่ออิมิตเตอร์จะถูกไบแอสตาม ส่วนหัวต่อคอลเลคเตอร์จะถูกไบแอสย้อน กระแสที่ผ่านทางขั้วอิมิตเตอร์จะสามารถข้ามย่านเบสไปออกทางขั้วคอลเลคเตอร์ได้เกือบทั้งหมด ทำให้กระแสเบส (I_b) มีค่าน้อยกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) มาก อัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ต่อกระแสเบส เรียกว่า β หรือ h_{FE} เมื่อต้องการใช้ทรานซิสเตอร์ในการขยายสัญญาณเราจะไบแอสให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านนี้

2. ย่านอิ่มตัว (saturation region) กรณีนี้ทั้งหัวต่ออิมิตเตอร์และหัวต่อคอลเลคเตอร์จะอยู่ในสภาวะไบแอสตาม ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าคร่อมขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วอิมิตเตอร์จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันกำเนิดไฟตรงที่ให้แก่วงจร ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์จะขึ้นกับความต้านทานโหลด (R_L) และแรงดันจากแหล่งกำเนิดไฟตรง เราจะถือว่าทรานซิสเตอร์เริ่มเข้าสู่ย่านอิ่มตัวเมื่อแรงดันไบแอสคร่อมหัวต่อคอลเลคเตอร์ลดค่าจากไบแอสย้อนลงมาเป็นศูนย์

3. ย่าน cut-off กรณีนี้ทั้งหัวต่ออิมิตเตอร์และหัวต่อคอลเลคเตอร์จะอยู่ในสภาวะไบแอสย้อน ทำให้ I_C มีค่าประมาณศูนย์ อย่างไรก็ตามกรณีที่หัวต่ออิมิตเตอร์เป็นวงจรเปิด I_C จะมีค่าเท่ากับ I_{CEO} ซึ่งมีค่าน้อยมาก กรณีนี้จะถือว่าทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาพ cut-off ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง h_{FE} กับ I_C ของทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

ค่า h_{FE} จะขึ้นกับขนาดของกระแสคอลเลคเตอร์ ขึ้นกับขนาดของแรงดันไบแอสย้อนคร่อมหัวต่อคอลเลคเตอร์ และขึ้นกับอุณหภูมิ รูปที่ 2. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับค่า h_{FE} ของทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่ง การที่ h_{FE} มีค่าต่ำที่ I_C ค่าต่ำเป็นเพราะ ผลของการรวมตัวของพาหะในย่านปลอดพาหะที่หัวต่ออิมิตเตอร์ซึ่งมีอิทธิพลมากเมื่อกระแสซึ่งไหลผ่านอิมิตเตอร์มีค่าต่ำ ส่วนการที่ h_{FE} มีค่าลดลงขณะที่ I_C มีค่าสูงขึ้นเป็นเพราะกรณีนี้พาหะในย่านเบสจะมีค่ามากซึ่งทำให้ความนำไฟฟ้าจำเพาะในย่านเบสมีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพการฉีดพาหะของหัวต่ออิมิตเตอร์มีค่าลดลงซึ่งเป็นผลให้ h_{FE} มีค่าลดลงจากรูปที่ 2 เราจะเห็นด้วยว่า h_{FE} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นทั้งนี้เพราะค่าช่วงชีวิตของพาหะเพิ่มขึ้นจึงทำให้ h_{FE} มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนการที่ h_{FE} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไบแอสที่หัวต่อคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเพราะย่านปลอดพาหะของหัวต่อคอลเลคเตอร์ขยายตัวเข้าไปในย่านเบสมากขึ้น จึงทำให้ความกว้างของย่านเบสมีขนาดลดลงเป็นผลให้ h_{FE} มีค่าเพิ่มขึ้นปรากฏการณ์เช่นนี้ มีชื่อเรียกว่า Early effect

ลักษณะโครงสร้างโดยละเอียดของทรานซิสเตอร์จะมีผลต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์ด้วย ดังนั้นผู้ผลิตจึงสามารถออกแบบทรานซิสเตอร์ไว้ให้ผู้ใช้เลือกทรานซิสเตอร์ไปใช้ให้เหมาะสมกับงานได้

1.2 ค่าขีดจำกัดทางไฟฟ้า

ค่าขีดจำกัดทางไฟฟ้าที่ผู้ผลิตมักจะบอกมาให้ได้แก่ แรงดัน BV_{CEO} , BV_{CBO} , BV_{EBO} , $I_{C\ (max)}$, Power Dissipation ที่อุณหภูมิห้อง = $25^{O}C$ และที่อุณหภูมิตัวทรานซิสเตอร์ = $25^{O}C$ ค่า $I_{C\ (max)}$ ที่กำหนดให้จะเป็นค่าที่ V_{CE} มีค่าต่ำและอุณหภูมิตัวทรานซิสเตอร์ = $25^{O}C$ ส่วน BV หมายถึง breakdown voltage ส่วนตัวห้อยท้าย 3 ตัว สองตัวแรกหมายถึงขั้วที่เรากำลังพิจารณา ส่วนตัวที่สามหมายถึงสถานะของของขั้วที่สาม ตัวอย่างเช่น BV_{CEO} หมายถึง breakdown voltage ระหว่างขั้ว collector กับ emitter เมื่อขั้ว base อยู่ในสถานะ open circuit

นอกจากค่าขีดจำกัดทางไฟฟ้าแล้ว ผู้ผลิตจะบอกลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์มาให้อีก เช่นค่า h_{FE}, C_{ob} (Common-Base Output Capacitance), f_T (ความถี่ที่ h_{FE} ลดค่าลงเหลือเท่ากับ 1), $V_{CE\ (SAT)}$, $V_{BE\ (SAT)}$ และยังมีพารามิเตอร์อื่น ๆ อีกมากขึ้นกับชนิดของทรานซิสเตอร์ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์จะมีค่าขึ้นกับกระแสและแรงดันไฟฟ้าใช้งาน

2. ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า (Field-Effect Transistors: FET)

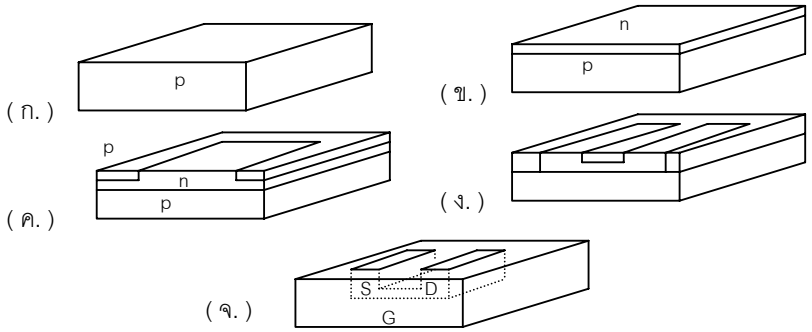
ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าเริ่มเป็นที่รู้จักกันตั้งแต่ปี พ.ศ.2468 โดยที่ J . E . Lilenfeld เป็นผู้ยื่นสิทธิบัตร ส่วนทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้านั้น Schockley เป็นผู้อธิบายไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ.2495 ในยุคแรกทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกว่า "unipolar transistor" ทั้งนี้เพราะว่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์แบบนี้ประกอบด้วยพาหะข้างมากเพียงชนิดเดียว ซึ่งต่างจากทรานซิสเตอร์แบบสองหัวต่อซึ่งกระแสของมันประกอบด้วยพาหะข้างมากและพาหะข้างน้อย

ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้านี้สามารถถูกนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง แต่ก็ไม่ได้หมายความว่ามันจะใช้งานแทนทรานซิสเตอร์แบบสองหัวต่อได้ทุกกรณีไป เนื่องจากลักษณะสมบัติของ FET แตกต่างจากของ BJT มาก ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท การใช้ FET จะทำให้วงจรง่ายขึ้น หรือมีคุณสมบัติดีขึ้น เทคโนโลยีด้าน FET ในปัจจุบันสามารถทำให้ FET มีขนาดเล็กมากได้ ซึ่งจะเห็นได้จากวงจรประเภท LSI จะมี FET มากกว่า 1000 ตัวอยู่ในพื้นที่ขนาด 0.25 ตารางเซนติเมตรเท่านั้น ส่วนวงจรรวมประเภท VLSI จะประกอบไปด้วยFET อยู่กันอย่างหนาแน่นกว่านี้ขึ้นไปอีก

FET สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ 1. JFET (Junction Field Effect Transistor) 2. MESFET (Metal-Semiconductor Field Effect Transistor) 3. Insulated Gate หรือ MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor). FET ที่เป็นองค์ประกอบเดี่ยว ๆ มักเป็น JFET ส่วน MOSFET มักเป็นองค์ประกอบย่อยอยู่ในวงจรรวม ปัจจุบัน MOSFET ที่เป็นองค์ประกอบเดี่ยว ๆ ก็มีขายในท้องตลาดแล้ว ซึ่งมักอยู่ในรูปของ Power MOSFET ข้อควรระวังของ MOSFET ก็คือไฟฟ้าสถิตย์จากตัวคนอาจทำให้ชั้นออกไซด์ซึ่งคั่นเกท เสียหายได้ ความเสียหายดังกล่าว เกิดจาก electrostatic discharge (ESD) ดังนั้นจึงต้องหลีกเลี่ยงการจับขาของสิ่งประดิษฐ์ประเภทนี้โดยไม่มีการป้องกัน ส่วน MESFET นั้นเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจาก GaAs และใช้กับงานแบบพิเศษ โดยเฉพาะในวงจรที่มีความสามารถในการตอบสนองสัญญานที่ความถี่สูง

2.1 Junction Field Effect Transistor (JFET)

JFET ทำจากสารกึ่งตัวนำ (มักเป็นซิลิคอน) ซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะสูงและมีช่องให้พาหะข้างมากไหล ขนาดของกระแสจะถูกควบคุมโดยแรงดันไฟฟ้าที่ให้แก่เกทซึ่งปรกติจะเป็นแบบไบแอสย้อน ดังนั้นความต้านทานขาเข้าของ FET จึงมีค่าสูงมาก กรณีที่ช่องนำไฟฟ้าทำจากสารชนิดเอ็น เราเรียกว่า JFET แบบนี้ว่าเป็นแบบช่องเอ็น (N-Channel) แต่ถ้าช่องนำไฟฟ้าทำจากสารชนิดพี JFET ก็เป็นแบบช่องพี (P-Channel) ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับปลายช่องนำไฟฟ้าทั้งสองด้านเรียกว่า Source และ Drain ตามลำดับ โดยที่ Source จะเป็นขั้วที่พาหะไหลเข้าสู่ช่องนำไฟฟ้า ส่วน Drain เป็นขั้วที่พาหะไหลออกจากช่องนำไฟฟ้านั้นคือกรณี JFET แบบช่องพี กระแสจะไหลเข้า FET ทางขั้ว Source ส่วนกรณี JFET แบบช่องเอ็น กระแสจะไหลเข้า FET ทางขั้ว Drain อย่างไรก็ตามสำหรับ JFET ส่วนมาก เราสามารถใช้ขั้ว Source และขั้ว Drain สลับที่กันได้ ยกเว้นในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท เช่น การขยายสัญญาณ FET ประเภทนี้จะถูกออกแบบไว้เป็นแบบไม่สมมาตรเพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าของ FET มีค่าต่ำลงมาเมื่อใช้ขา Source และขา Drain ตามที่กำหนดไว้ ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ FET ดีขึ้น ดังนั้น FET ประเภทนี้จึงไม่ควรใช้ขา Source และขา Drain ที่สลับกัน



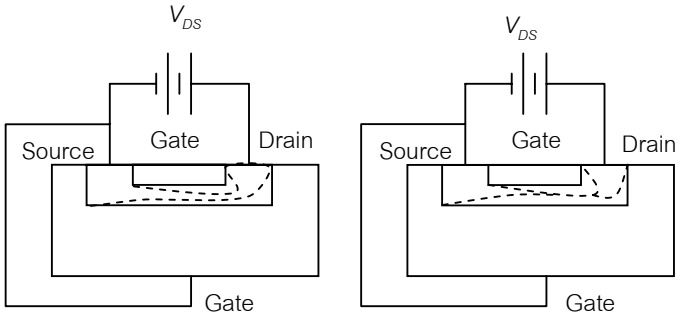
รูปที่ 3 ขั้นตอนพื้นฐานในการทำ JFET แบบช่องเอ็น

รูปที่ 3 เป็นการแสดงขั้นตอนพื้นฐานในการทำ JFET แบบช่องเอ็น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเราเริ่มจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิด P (รูปที่ 3 ก.) จากนั้นก็ปลูกชั้นผลึกแบบ epitaxy ชนิด N ทับลงไป (รูปที่ 3 ข) จากนั้นก็แพร่ซึมสารเจือปนชนิด P ลงบนสาร N โดยเว้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆไว้ตรงกลาง (รูปที่ 3 ค) จากนั้นก็แพร่ซึมสารเจือปนชนิด P ทับลงไปอีกครั้ง โดยปล่อยช่องด้านปลายของพื้นที่สี่เหลี่ยมทิ้งไว้สองช่อง (รูปที่ 3 ง) สารเจือปนชนิด P ที่แพร่ซึมไว้ครั้งแรก จะแพร่ซึม

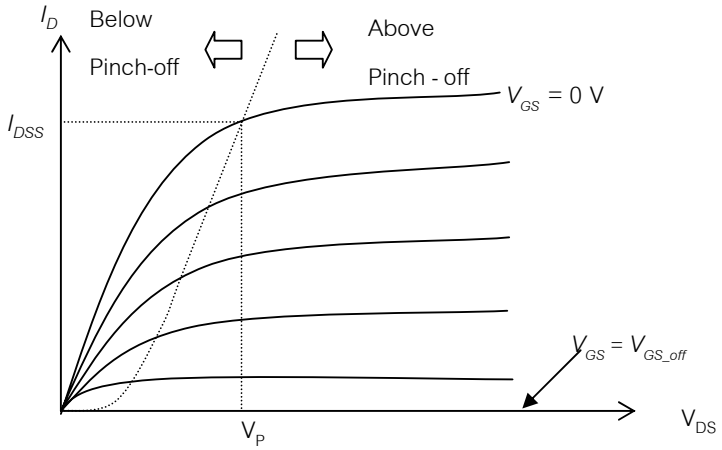
ต่อไปจนถึงขั้นฐานซึ่งเป็นซิลิกอนชนิด P ส่วนสารเจือปนชนิด P ที่แพร่ซึมตามไปที่หลังจะแพร่ซึมไปไม่ถึงขั้นฐาน ดังนั้น สาร N จึงมีลักษณะคล้ายกับตัวอักษร U ที่ฝังอยู่ในสารพี (รูปที่ 3 จ) สาร N ที่ฝังอยู่ในสาร P จะทำหน้าที่เป็นช่องนำไฟฟ้า ส่วนสาร N ที่โผล่ออกมาจะเป็นขั้วของ Source และ Drain ส่วนสาร P ก็จะกลายเป็น Gate ไป โครงสร้างของ FET ใช้งานจริงมักจะทำเป็นรูปแบบ interdigitated geometry เพื่อลดค่าความจุไฟฟ้า รูปที่ 4 เป็นโครงสร้างแบบง่าย ๆ ของ JFET แบบช่องเอ็น

การทำงานของ JFET

เริ่มด้วยการสมมติว่าเราลัดวงจรระหว่างขั้ว Gate และขั้ว Source เมื่อเราให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว Drain และขั้ว Source จะเกิดความต่างศักย์คร่อมช่องนำไฟฟ้า ส่วนในย่าน Gate เนื่องจากไม่มีกระแสไหล ศักย์ไฟฟ้าที่ Gate จึงมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่ง



(ก) ก่อนเกิดการ Pinch - off (ข) เกิดการ Pinch - off แล้ว



(ค) กราฟลักษณะสมบัติขาออกของ JFET แบบ ช่อง N

รูปที่ 4 โครงสร้างและลักษณะสมบัติขาออกของ JFET แบบช่อง N

เมื่อ V_{DS} (แรงดันคร่อม Drain และ Source) มีค่าต่ำ ช่องนำไฟฟ้าจะทำตัวคล้ายกับเป็นความต้านทาน นั่นคือ I_D จะแปรผันตรงกับ V_{DS} เมื่อ V_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้น แรงดัน ไบแอสย้อนระหว่าง Drain กับ Source จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ย่านปลอดพาหะที่บริเวณนี้มีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ช่องนำไฟฟ้าที่บริเวณนี้มีขนาดลดลง ดังนั้นความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเราพิจารณาจากเส้นลักษณะสมบัติ (รูป 4 ค) จะเห็นว่าเมื่อ V_{DS} เพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง เส้นลักษณะสมบัติจะเปลี่ยนจากเส้นตรงเป็นเส้นโค้ง จนกระทั่งเมื่อย่านปลอดพาหะที่ Gate-Drain เพิ่มขนาดจนมาปิดกั้นช่องนำไฟฟ้าที่

บริเวณนี้จนหมด กระแส I_D จะมีค่าคงที่แทบจะไม่ขึ้นกับ V_{DS} อีกต่อไป กระแส I_D ค่านี้มีชื่อเรียกว่า I_{DSS} ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการเกิด Pinch-off และแรงดัน V_{DS} ที่ทำให้ I_D เริ่มมีค่าเท่ากับ I_{DSS} เรียกว่า Pinch-off Voltage (V_P) ในทางปฏิบัติเนื่องจากช่องนำไฟฟ้ามีขนาดสั้นมาก ดังนั้น I_D หลังจากเกิด Pinch-off แล้วจะยังคงมีค่าเพิ่มได้อีก ทั้งนี้เพราะความยาวประสิทธิผลของช่องนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อ V_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้น

ส่วนกรณีที่มีการไบแอสย้อนระหว่าง Gate กับ Source ช่องนำไฟฟ้าจะมีพื้นที่นำกระแสน้อยกว่ากรณีที่ลัดวงจรระหว่าง Gate กับ Source ดังนั้นเมื่อ V_{DS} มีค่าน้อย ความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าก็จะมีค่ามากกว่ากรณี $V_{GS} = O$ ซึ่งสังเกตได้ว่าเส้นลักษณะสมบัติที่ได้จะมีความชันน้อยกว่า และเมื่อเกิดการ pinch-off กระแส I_D อิ่มตัว ก็จะมีค่าน้อยกว่าตามไปด้วย กรณีนี้จะได้ V_{DS} ที่ทำให้เกิด pinch-off มีค่าต่ำกว่า V_P เพราะรอยต่อ PN จะถูกไบแอสย้อนโดยแรงดัน V_{GS} อยู่ก่อนแล้ว

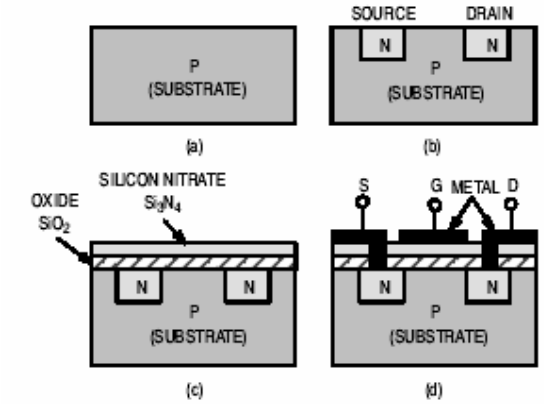
จะเห็นได้ว่าถ้าเราให้ V_{GS} เพิ่มขึ้น กระแส I_D อิ่มตัวจะมีค่าลดลง ซึ่งถ้าเราเพิ่มค่า V_{GS} ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนทำให้พื้นที่ช่องนำไฟฟ้าลดขนาดเป็นศูนย์ แม้ว่าจะให้ $V_{DS}= O$ ก็ตาม ก็จะทำให้ FET ไม่สามารถนำกระแสได้ V_{GS} ค่านี้เรียกว่า V_{GS} (Off) ซึ่งจะมี ขนาดเท่ากับ V_P แต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม ปัจจุบันนี้เรานิยมใช้ V_{GS}(off) มากกว่า V_P เพราะสามารถขจัดความสับสนระหว่าง gate cut-off และ drain pinch-off ออกไปได้

จากรูปลักษณะสมบัติขาออกของ FET เราจะเห็นว่าในย่าน above pinch-off กระแส I_D จะไม่ขึ้นกับ V_{DS} ดังนั้นเราสามารถใช้ FET ในการขยายสัญญาณได้ ส่วนในย่าน below pinch-off กระแส I_D จะขึ้นกับ V_{DS} และ V_{GS} ถ้าเราเลือกย่านที่ I_D แปรผันตรงกับ V_{DS} FET จะสามารถทำหน้าที่ เป็นความต้านทานซึ่งแปรค่าได้ตามแรงดัน V_{GS} ซึ่งก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้เช่นกัน

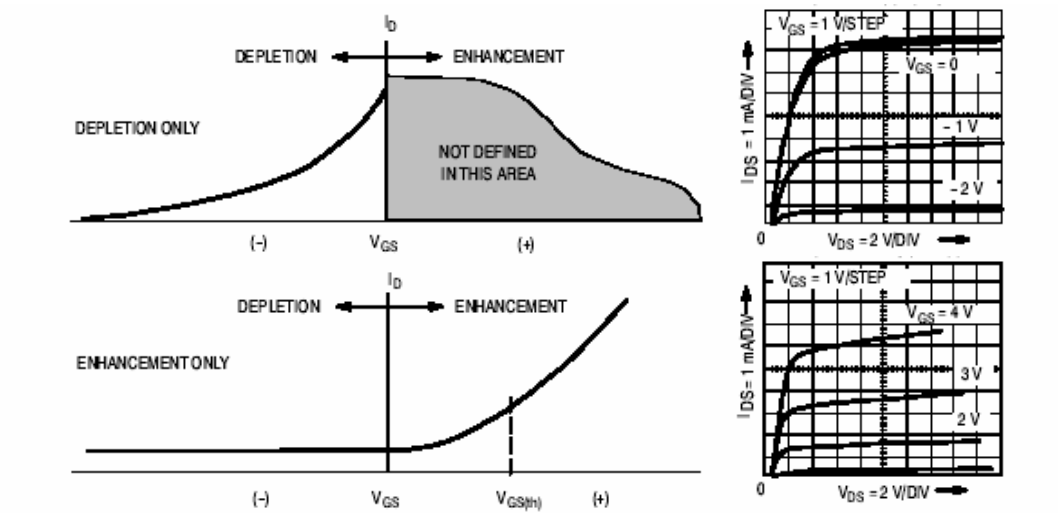
2.2 Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)

MOSFET เป็นทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งก็คือ สามารถควบคุมขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน MOSFET ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้ว Gate แต่โครงสร้างของ MOSFET จะแตกต่างจาก JFET เล็กน้อย โดยโครงสร้างหลักนั้นจะมีชั้นออกไซด์บาง ๆ คั่นอยู่ระหว่างขั้ว Gate และช่องนำกระแส (channel) ในรูปที่ 5 แสดงขั้นตอนในการประดิษฐ์ MOSFET แบบช่องเอ็นชนิด enhancement ซึ่งจะเริ่มต้นจากแว่นผลึกซิลิกอนชนิด P (รูปที่ 5 (a)) จากนั้นจะทำการแพร่ซึมสารเจือปนชนิด N ลงไปในแผ่นฐาน P เพื่อสร้างให้เป็น Source และ Drain (รูปที่ 5 (b)) จากนั้นจะทำการปลูกชั้นของซิลิกอนออกไซด์บาง ๆ โดยทั่วไปแล้วนอกจากจะมีการปลูกชั้นของซิลิกอนไนไตร์ดคลุมชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์อีกทีหนึ่งเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของขั้นออกไซด์ต่อสารปนเปื้อนภายนอก (รูปที่ 5 (c)) ชั้นออกไซด์และไนไตร์ดบริเวณที่อยู่เหนือ Source และ Drain จะถูกทำการกัดออก และทำการเคลือบชั้นโลหะเพื่อทำขั้วโลหะสำหรับขั้ว Gate Source และ Drain

MOSFET นั้นมีการแบ่งชนิดของอุปกรณ์ตามลักษณะของช่องนำไฟฟ้าเหมือนในกรณีของ JFET คือ แบบช่องเอ็น และ ช่องพี นอกจากการแบ่งในลักษณะดังกล่าวแล้ว MOSFET จะมีการแบ่งชนิดของอุปกรณ์ตามโหมด (mode of operation) ของการทำงานออกเป็น 2 โหมด คือ depletion และ enhancement โหมด (JFET ทำงานใน depletion โหมดเท่านั้น) ในการทำงานแบบ depletion โหมดนั้น MOSFET จะยอมให้กระแสไหลได้ที่แรงดัน $V_{GS} = 0$ และค่ากระแสเดรนจะมีค่าลดลงเมื่อมีการป้อน V_{GS} ให้ในลักษณะที่ลดช่องนำไฟฟ้า ส่วนในการทำงานแบบ enhancement โหมดนั้นจะไม่มีกระแสไหลหรือไหลได้น้อยมากเมื่อ $V_{GS} = 0$ และค่ากระแสเดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการป้อน V_{GS} ให้ในลักษณะที่เพิ่มช่องนำไฟฟ้า



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้าง MOSFET แบบช่องเอ็นชนิด enhancement



รูปที่ 6 ลักษณะสมบัติถ่ายโอนของ MOSFET ชนิด Depletion และ Enhancement

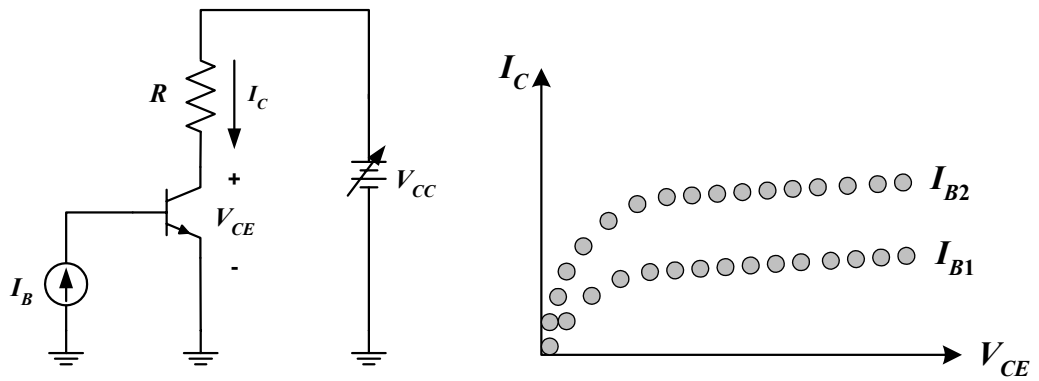
สำหรับหลักการทำงานของ MOSFET สามารถอธิบายได้ดังนี้ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการทำงานใน enhancement โหมดเท่านั้น รายละเอียดของการทำงานใน depletion โหมด สามารถหาอ่านได้จากหนังสือฟิสิคัดอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปได้ โดยพิจารณา MOSFET แบบช่องเอ็นในรูปที่ 5 ที่แรงดัน V_{GS} = 0 หรือมีค่าต่ำ กระแสเดรนจะไหลได้น้อยมาก ในกรณีนี้เนื่องจากระหว่าง Source และ Drain ซึ่งเป็นสาร N มีแผ่นฐานซึ่งเป็นสาร P กั้นอยู่ ซึ่งเปรียบเสมือนไดโอด 2 ตัวต่อหัวชนกัน หรือกล่าวอีกในนัยหนึ่งคือ ยังไม่มีช่องนำกระแสภายใต้ Gate ถ้าเราเพิ่มแรงดัน V_{GS} ให้มีค่าสูงขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นของประจุลบในเนื้อสาร P ที่อยู่ใต้ขั้ว Gate ถ้าเราเพิ่มแรงดัน V_{GS} ให้มีค่าสูงพอจะทำให้ชั้นของประจุลบเชื่อมเต็มระหว่าง Source ถึง Drain ทำให้เกิดช่องนำไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าได้ดี กระแสเดรนจึงไหลได้ดีถ้าแรงดัน V_{GS} มีค่าสูงเกินค่าๆหนึ่ง ซึ่งเราเรียกค่าแรงดันนี้ว่า แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage)

3. การวัดลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์โดยใช้ Curve tracer

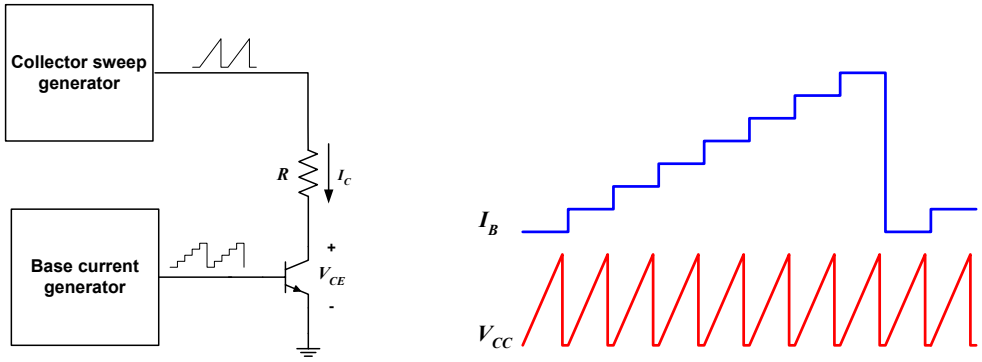
Curve tracer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดลักษณะสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่าง ๆ ได้ เช่น ทรานซิสเตอร์ FET เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว Curve tracer จะใช้งานร่วมกับออสซิโลสโคป (Cathode ray tube oscilloscope: CRO) เพื่อที่จะแสดงผลของลักษณะสมบัติที่วัดได้บนจอของ CRO สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถวัดลักษณะสมบัติได้ด้วย Curve tracer ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ไดโอด, BJT ชนิด PNP และ NPN, JFET ชนิด N-channel และ P-channel, MOSFET แบบ Enhancement และแบบ Depletion ชนิด N-channel และ P-channel

หลักการวัดลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์

พิจารณาการวัดลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งกราฟลักษณะสมบัติจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสคอลเล็กเตอร์และแรงดันคอลเล็กเตอร์-อิมิตเตอร์ (I_C-V_{CE}) ที่กระแสเบส (I_B) ค่าต่างๆ (เส้นกราฟแต่ละเส้นจะมีค่ากระแสเบสกำกับอยู่) ดังนั้นในทางปฏิบัติวิธีการที่ง่ายที่สุด คือ ป้อนกระแสเบสที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วทำการปรับค่าแรงดันของแหล่งจ่ายทางด้านคอลเล็กเตอร์เพิ่มขึ้นทีละเล็กน้อยตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าที่เราสนใจ ทำการวัดค่ากระแสคอลเล็กเตอร์และแรงดันคอลเล็กเตอร์อิมิตเตอร์ในแต่ละช่วง เราจะได้กราฟของ I_C-V_{CE} มา 1 เส้นที่ I_B ค่าหนึ่ง เพื่อที่จะให้ได้เส้นกราฟที่ I_B ค่าต่างๆ เราต้องทำการตั้งค่ากระแสเบสเป็นค่าใหม่และทำการปรับค่าแรงดันทางด้านคอลเล็กเตอร์ แล้วจึงทำการวัดค่า I_C และ V_{CE} อีกครั้ง ส่วนในกรณีของ Curve tracer นั้นจะทำให้เราสามารถวัดกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ได้ง่ายและสะดวกขึ้นโดยใช้หลักการที่กล่าวมา คือ ภายในตัว Curve tracer จะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตั้งค่ากระแสเบสให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ขณะที่มีการกวาด (sweep) แรงดันทางด้านคอลเล็กเตอร์ตั้งแต่ศูนย์โวลต์จนถึงค่าที่ได้ตั้งไว้ หลังจากนั้น Curve tracer จะเพิ่มค่ากระแสเบสไปที่ค่าใหม่แล้วจึงทำการกวาดค่าแรงดันทางด้านคอลเล็กเตอร์ กระบวนนี้จะเกิดซ้ำไปซ้ำมาเราจึงสามารถเห็นรูปกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์หยุดนิ่งบนจอ CRO ได้ โดยที่ขนาดของการเพิ่มของกระแสเบสสามารถปรับหน้าจากได้จากปุ่มบนตัวเครื่อง จำนวนขั้นของกระแสเบสนั้นจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ Curve tracer นั้นได้ออกแบบมาอย่างไร โดยปกติแล้วจะมีประมาณ 6-7 ขั้น รูปที่ 8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Curve tracer และสัญญาณที่ขั้วเบสและแรงดันทางด้านดอลเล็กเตอร์ในเชิงเวลา ส่วนการวัดลักษณะสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่ง เช่น JFET MOSFET สามารถกระทำได้ในทำนองเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนจากกระแสเบสเป็นแรงดันเกท และแรงดันที่คอลเล็กเตอร์ เป็นแรงดันที่เดรนแทน



รูปที่ 7 การวัดลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 8 หลักการอย่างง่ายของ Curve tracer และสัญญาณที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติทรานซิสตอร์

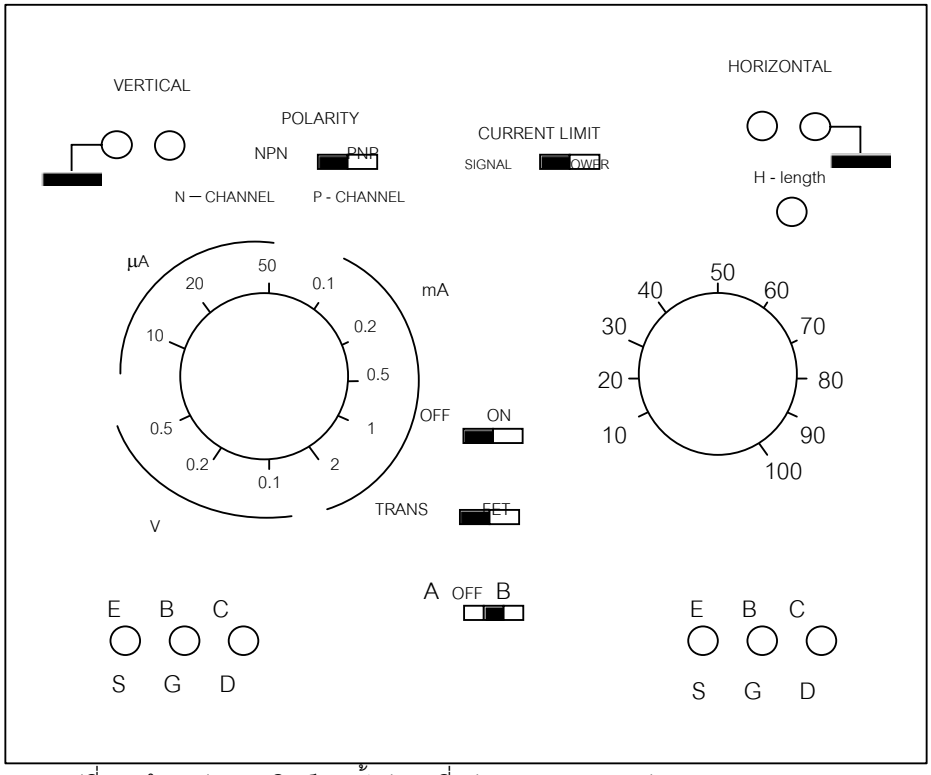
4. **การใช้งาน** Curve tracer (มี 2 รุ่นกระจายแบบสุ่มตามโต๊ะทดลอง)

4.1 Curve tracer **รุ่น** LTC-905 (LEADER)

Curve tracer ดังกล่าวจะมีลักษณะของปุ่มต่าง ๆ ดังแสดงในรูป

1. ต่อสายสโคปจาก CRO เข้ามาที่ VERTICAL และ HORIZONTAL
2. ตั้งสวิตช์ POLARITY ตามชนิดของ BJT และ FET
3. กรณี BJT เลือกไบแอสในช่วง μA หรือ mA (ส่วนกรณี FET เลือกไบแอสในช่วง V) สมมติว่าเราตั้ง สวิตช์ไว้ที่ 10 μA เครื่องจะป้อนกระแส I_B ให้กับทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนเท่าของ 10 μA เป็นจำนวน 6 ค่า คือ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 μA เป็นต้น แต่ถ้าเราตั้งสวิตช์ไว้ที่ 0.1 V เครื่องจะป้อนแรงดัน V_{GS} ให้กับเกทของ FET 8 ค่า คือ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, และ 0.7 โวลต์ ทิศทางของ V_{GS} และ I_B จะขึ้นกับสวิตช์ POLARITY เนื่องจาก BJT นั้น กระแส I_C จะแปรตาม I_B ดังนั้น I_B สูงสุด จะได้ I_C สูงสุด ส่วน JFET นั้นเราป้อนไบแอสย้อนให้กับ Gate ดังนั้น V_{GS} = O โวลต์ จะได้กระแส I_D สูงสุด ส่วน MOSFET นั้นต้องพิจารณาว่าเป็น MOSFET ชนิด enhancement หรือ depletion
4. ปุ่ม H. length ให้บิดไปตามเข็มนาฬิกาจนสุด จะได้แรงดันบนจอ CRO ตรงกับแรงดัน V_{CE} หรือ V_{DS} คร่อม BJT หรือ FET
5. สวิตช์ CURRENT LIMIT เมื่อตั้งไว้ที่ SIGNAL ตัวต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสจะมีค่า 100 โอห์ม ซึ่งแรงดัน VERTICAL จะวัดคร่อมตัวต้านทานตัวนี้ นั่นคือแรงดันบนแกน VERTICAL ค่า 1 โวลต์ จะหมายถึงกระแส I_C หรือ I_D ค่า 10 mA แต่เมื่อตั้งไว้ที่ POWER ตัวต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสมีค่า 10 โอห์ม นั่นคือแรงดันบนแกน HORIZONTAL ค่า 1 โวลต์ จะหมายถึงกระแส I_C หรือ I_D ค่า 100 mA
6. ปุ่มกำหนดค่า V_{CE} สูงสุด เมื่อตั้งสวิตช์ไว้ที่ 10, 20, ... หมายถึงเครื่องสามารถให้แรงดัน V_{CE} แก่ BJT หรือ FET ได้สูงสุด 10 , 20 , ...โวลต์ตามลำดับ (ค่าดังกล่าวคือ peak ของแรงดันรูปซายน์ครึ่งคลื่นที่ป้อนกับ BJT หรือ FET)
7. สวิตช์ TRANS - FET ให้เลือกตั้งตามชนิดของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ว่าเป็นแบบ BJT หรือแบบ FET โดยดูตารางที่ A1 ประกอบ
8. สวิตช์ A ─ OFF - B ปรกติให้ตั้งไว้ที่ OFF ถ้าจะวัดทางด้าน A หรือ B ก็ให้เลื่อนสวิตช์ไปด้าน A หรือด้าน B ตามต้องการ
9. สวิตช์ OFF-ON ใช้ในการปิดหรือเปิดเครื่อง curve tracer

10. SOCKET (E, B, C, หรือ S, G, D) ใช้สำหรับต่อสายจาก BJT หรือ FET เพื่อทำการวัดลักษณะสมบัติขาออกแบบ common emitter หรือแบบ common source ตามลำดับ



รูปที่ A1 ตำแหน่งของสวิตช์และขั้วต่างๆ ที่อยู่บน Curve trace รุ่น LTC-905 (LEADER)

ตารางที่ A1 การตั้งค่าสวิทช์ที่อยู่บน Curve trace รุ่น LTC-905 (LEADER)

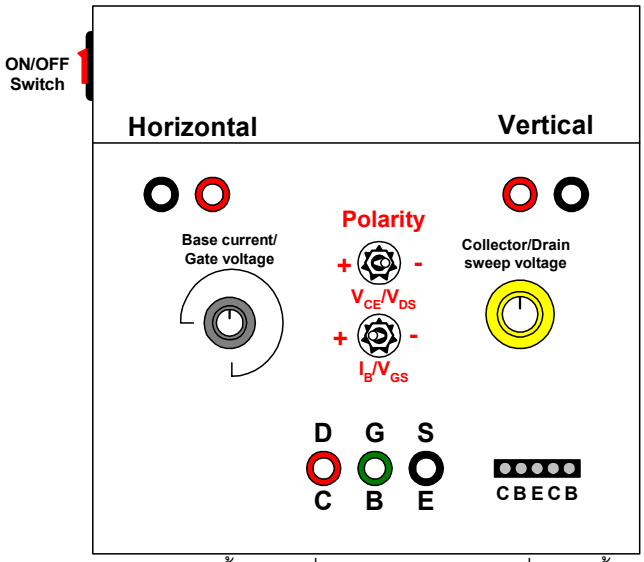
สิ่งประดิษฐ์		Switch position	
		NPN – PNP N-Channel – P-Channel	TRANS - FET
BJT	NPN	NPN	TRANS
	PNP	PNP	TRANS
JFET	N-channel	N-Channel	FET
	P-channel	P-Channel	FET
Enhancement MOSFET	N-channel	N-Channel	TRANS
	P-channel	P-Channel	TRANS
Depletion MOSFET	N-channel	N-Channel	FET
	P-channel	P-Channel	FET

4.2 Curve Tracer ที่พัฒนาขึ้น (สีขาว)

ตำแหน่งของสวิตช์บนตัวเครื่องแสดงไว้ในรูปที่ A2 ตารางที่ A2 แสดงการตั้งค่า polarity เพื่อทำการวัดลักษณะสมบัติทางด้านขาออกสิ่งประดิษฐ์ชนิดต่างๆ ขั้นตอนการใช้งาน Curve tracer โดยสังเขปมีดังนี้

1. ต่อ CRO เข้ากับ Curve trace ดังแสดงในรูป ปรับ CRO ให้แสดงผลในรูปของ X-Y (รายละเอียดของการปรับศึกษาได้จากคู่มือของ CRO)
2. ตั้งสวิตช์ Polarity ตามชนิดของสิ่งประดิษฐ์ที่ต้องการวัด (ดูตารางที่ 1 ประกอบ)
3. ตั้งปุ่ม Base current/ Gate voltage กรณีของ BJT เลือกไบแอสในช่วง μA หรือ mA ส่วน FET เลือกไบแอสในช่วง V (ข้อแนะนำถ้าไม่ทราบว่าควรตั้งปุ่ม Base current/ Gate voltage ไว้ที่ช่วงไหนให้ปรับไปที่ค่าต่ำสุดเสมอ) สมมุติว่า เราตั้งสวิตช์ไว้ที่ 10 μA เครื่องจะป้อนกระแส I_B ให้กับทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนเท่าของ 10 μA จำนวน 7 ค่า คือ 0, 10, 20, … และ 60 μA เป็นต้น แต่ถ้าเราตั้งสวิตช์ไว้ที่ 0.1 V เครื่องจะป้อนแรงดัน V_{GS} ให้กับเกทของ FET 8 ค่า คือ 0, 0.1, 0.2, … และ 0.7 V ตามลำดับ
4. ปรับปุ่ม Collector/Drain Sweep voltage ไว้ที่ค่าต่ำสุด (หมุนทวนเข็มนาฬิกาจนสุด)
5. ต่อสิ่งประดิษฐ์ที่ต้องการวัดเข้ากับ Curve tracer เปิดสวิตช์ ON เครื่อง
6. ตั้ง CRO ให้อยู่ใน X-Y mode (รายละเอียดศึกษาจากคู่มือของ CRO)
7. ปรับปุ่ม Collector/Drain Sweep voltage ไปที่ค่าแรงดันที่ต้องการทดลอง (หมุนตามเข็มนาฬิกา)
8. ปรับปุ่ม Base current/ Gate voltage และตั้งสเกลแกน X และ Y บนหน้าจอ CRO ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้รูปกราฟที่สวยงาม
9. ก่อนเลิกใช้งานควรปรับปุ่ม Collector/Drain Sweep voltage และปุ่ม Base current/ Gate voltage ไปที่ค่าต่ำสุด จึงปลดสิ่งประดิษฐ์ที่วัดอยู่แล้วจึงใส่สิ่งประดิษฐ์ที่ต้องการวัดเข้าไปใหม่

หมายเหตุ ค่าแรงดันบนแกน Y ของ CRO มาจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 100 Ω ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับสิ่งประดิษฐ์ เราสามารถหาค่ากระแสที่ไหลผ่านสิ่งประดิษฐ์ได้โดยนำค่าความต้านทานไปหารค่าแรงดันบนแกน Y



รูปที่ A2 ตำแหน่งของสวิตช์และขั้วต่างๆ ที่อยู่บน Curve tracer ที่พัฒนาขึ้น (สีขาว)

ตารางที่ A2 การตั้งค่าสวิทช์ที่อยู่บน Curve trace ที่พัฒนาขึ้น (สีขาว)

สิ่งประดิษฐ์		Polarity	
		I_B/V_{GS}	V_{CE}/V_{DS}
BJT	NPN	+	+
	PNP	-	-
JFET	N-channel	-	+
	P-channel	+	-
Enhancement MOSFET	N-channel	+	+
	P-channel	-	-
Depletion MOSFET	N-channel	-	+
	P-channel	+	-

คุณสมบัติโดยทั่วไปของ Curve tracer ที่พัฒนาขึ้น

Collector/Drain Sweep	สำหรับกวาดแรงดันคอลเลคเตอร์หรือแรงดันเดรน
ความถี่ของการกวาด	สัญญาณสามเหลี่ยม 100-500 Hz
แรงดันของการกวาด	ปรับได้อย่างต่อเนื่อง $\pm$15 V
กระแสคอลเล็กเตอร์/เดรนสูงสุด	40 mA (ค่ากระแสลัดวงจรของออปแอมป์ LM324)
Step Generator	สำหรับจ่ายกระแสเบสหรือแรงดันเกท
จำนวนของขั้น	6 ขั้นสำหรับกระแสเบส 7 ขั้นสำหรับแรงดันเกท
กระแสเบส	10, 20, 50 μA; 0.1, 2 mA
แรงดันเกท	0.1, 0.2 และ 0.5 V
Power supply	220 V 50 Hz
Device current	วัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 100 Ω ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อ-สกุล..... เลขประจำตัว.....

ชื่อ-สกุล..... เลขประจำตัว.....

ชื่อ-สกุล..... เลขประจำตัว.....

วันที่ทำการทดลอง..... อาจารย์ผู้ควบคุม.....

ทรานซิสเตอร์ (Transistors, TRA)

การทดลองมี 2 ส่วน ได้แก่

การทดลองที่ 1 การหาชนิดและขาของทรานซิสเตอร์

เราสามารถใช้การวัดค่าความต้านทานด้วย VOM เพื่อหาชนิดและขาของทรานซิสเตอร์ได้ ทำการวัดค่าความต้านทานระหว่างขาของทรานซิสเตอร์ที่กำหนดให้ โดยใช้ VOM บันทึกค่าที่ได้ลงในตาราง

หมายเหตุ เมื่อทำการเปลี่ยนย่านการวัดค่าความต้านทานของ VOM ต้องทำการปรับศูนย์ทุกครั้ง

1.1 ทรานซิสเตอร์แบบ BJT เบอร์ _____

ขั้วบวก - ขั้วลบของโอหม์มิเตอร์		ค่าความต้านทาน
B	E	
E	B	
C	E	
E	C	
B	C	
C	B	

ทรานซิสเตอร์ เป็น BJT ชนิด _____

หมายเหตุ อักษรตัวแรกหมายถึง ขั้วบวกของโอห์มมิเตอร์ต่ออยู่กับขั้วดังกล่าว

ในกรณีของ BJT ให้ตั้งสเกลของ VOM ไว้ที่ ×1 และวัดความต้านทานระหว่างขั้วทั้ง 3 ของทรานซิสเตอร์ โดยใช้ขั้ว + ของ VOM ต่อเข้าขั้ว B ครั้งหนึ่ง และใช้ขั้ว - ของ VOM ต่อเข้าขั้ว B ครั้งหนึ่ง บันทึกค่าความต้านทานที่ได้ (กรณีความต้านทานไม่เป็น infinity) กรณีที่ความต้านทานเป็น infinity ให้เพิ่มสเกลของ VOM เป็น ×10 K ความต้านทานระหว่างขั้ว B และ C จะยังคงเป็น infinity ส่วนความต้านทานระหว่างขั้ว B และ E จะมีค่าซึ่งอ่านได้เพราะว่าเกิด breakdown ที่หัวต่อ อิมิตเตอร์ ดังนั้นการใช้ VOM จะสามารถรู้ได้ว่าทรานซิสเตอร์ดีหรือเสีย เป็นแบบ npn หรือ pnp ตลอดจนรู้ว่าขาทั้ง 3 ของทรานซิสเตอร์ขาไหนเป็น B, E, หรือ C

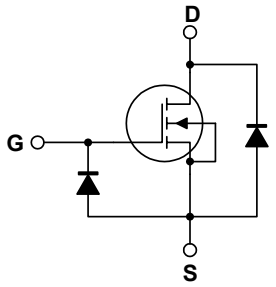
1.2 **ทรานซิสเตอร์แบบ JFET เบอร์** _____

ขั้วบวก - ขั้วลบของโอหม์มิเตอร์		ค่าความต้านทาน
G	S	
S	G	
D	S	
S	D	
G	D	
D	G	

ทรานซิสเตอร์ เป็น JFET ชนิด_____

1.3 **ทรานซิสเตอร์แบบ MOSFET เบอร์** _____

ขั้วบวก - ขั้วลบของโอหม์มิเตอร์		ค่าความต้านทาน
G	S	
S	G	
D	S	
S	D	
G	D	
D	G	



วงจรสมมูลย์ของ MOSFET ที่ใช้ในการทดลอง

MOSFET ที่ใช้เป็นแบบ enhancement

การทดลองที่ 2 การวัดลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์

<u>หมายเหตุ</u> *Curve tracer ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ฯ มีอยู่ 2 รุ่น คือ รุ่น LTC-605 ของ LEADER และรุ่นที่พัฒนาขึ้นมาเอง*

2.1 **ทรานซิสเตอร์แบบ BJT เบอร์** _____

ก) ใช้ curve tracer วัดลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์ และบันทึกรูปไว้ โดยตั้งสวิตช์ V_{CE} ไว้ที่ 10 V พยายามปรับค่า I_B และ V_{CE} เพื่อให้ได้รูปที่สวยงาม (เขียนค่า I_B และสเกลของแกน V_{CE} กับ I_C ด้วย)

ข) ปรับสวิตช์ V_{CE} ไปจนเกิดการ breakdown จะสังเกตเห็นว่า เมื่อ I_B มีค่ามาก ทรานซิสเตอร์จะเริ่ม breakdown ก่อนกรณีที่ I_B มีค่าน้อย และการ breakdown จะเป็นแบบค่อย ๆ เกิด (soft knee breakdown) *<u>ไม่ต้องบันทึกรูปและควรรีบทำเพราะอาจทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้</u>*

ค) ตั้งสวิตช์ V_{CE} ไว้ที่ 10 V สลับขา emitter กับขา collector แล้ววัดลักษณะสมบัติขาออก และบันทึกรูปไว้ พยายามปรับค่า I_B ให้ได้รูปที่สวยงาม (เขียนค่า I_B และสเกลของแกน V_{CE} กับ I_C ด้วย)

2.2 ทรานซิสเตอร์แบบ JFET เบอร์ _____

ก) ใช้ curve tracer ดูลักษณะสมบัติขาออกของ JFET และบันทึกรูปไว้ พยายามปรับค่าแรงดัน V_{GS} และ V_{DS} เพื่อให้ได้รูปที่สวยงาม (เขียนค่า V_{GS} และสเกลของแกน V_{DS} กับ I_D ด้วย)

ข) สลับขา Source และ Drain และใช้ curve tracer ดูลักษณะสมบัติขาออกของ JFET เหมือนข้อ ก) หรือไม่? (ไม่ต้องบันทึกรูป) ตอบ _____

ค) ปรับสวิตช์ V_{DS} ไปจนเกิดการ breakdown สังเกตดูว่าลักษณะ breakdown เหมือนกรณี BJT หรือไม่ ? (ไม่ต้องบันทึกรูป) ตอบ _____

2.3 ทรานซิสเตอร์แบบ MOSFET เบอร์ _____

ก) ใช้ curve tracer ดูลักษณะสมบัติขาออกของ MOSFET และบันทึกรูปไว้ พยายามปรับค่าแรงดัน V_{GS} และ V_{DS} เพื่อให้ได้รูปที่สวยงาม (เขียนค่า V_{GS} และสเกลของแกน V_{DS} กับ I_D ด้วย)

ข) สลับขา Source และ Drain และใช้ curve tracer ดูลักษณะสมบัติขาออกของ MOSFET เหมือนข้อ ก) หรือไม่ ? (ไม่ต้องบันทึกรูป) ตอบ _____

มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร 2528, 2542
อาภรณ์ ธีรมงคลรัศมี (rev) พ.ย. 2546, มิ.ย. 2550
ทรงพล กาญจนชูชัย (rev) ก.พ. 2543, พค 2551

หมายเหตุ นิสิตควรบันทึกข้อมูลในกระดาษกราฟ (เตรียมมาเอง) แต่ในกรณีที่ไม่ได้เตรียมมา ให้ใช้กราฟข้างล่างแทนได้ (แต่ไม่แนะนำเนื่องจากกราฟข้างล่างไม่ละเอียดพอที่นิสิตจะวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการสอบท้ายการทดลองได้อย่างแม่นยำ)