

ฟิสิกส์ของอุปกรณ์กึ่งตัวนำ (Physics of Semiconductor Devices) [20 คะแนน]

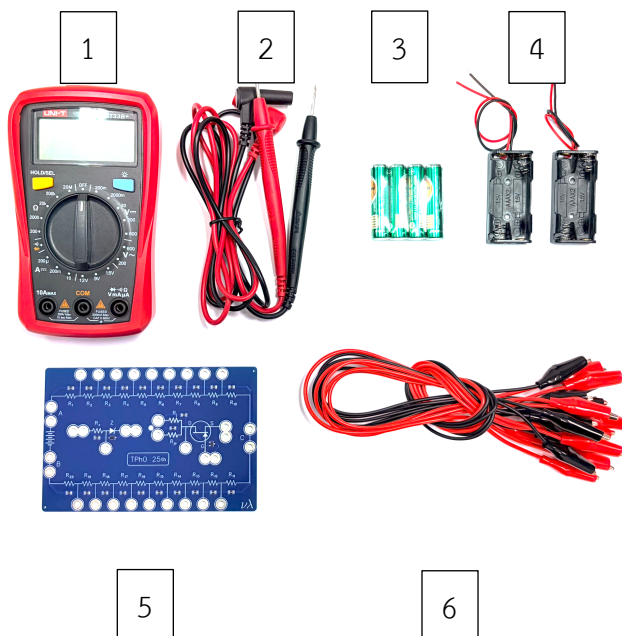
อุปกรณ์กึ่งตัวนำ (Semiconductor devices) มีความสำคัญอย่างยิ่งและถือเป็นหัวใจหลักของเทคโนโลยีในยุคปัจจุบัน เนื่องจากเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่ขาดไม่ได้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทบทุกชนิด ตั้งแต่เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป โทรศัพท์มือถือ ไปจนถึงคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง การทำความเข้าใจพฤติกรรมทางฟิสิกส์ของวัสดุกึ่งตัวนำจึงเป็นรากฐานสำคัญในการต่อยอดทางเทคโนโลยี ในการสอบปฏิบัติการนี้ เราจะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่สำคัญสองชนิด ได้แก่ ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) และ เจเฟต (Junction Field Effect Transistor หรือ JFET)

ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) เป็นไดโอดชนิดพิเศษที่ถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยเมื่อได้รับการไบแอสผกผัน (Reverse bias) จนถึงระดับความต่างศักย์ที่กำหนด ซึ่งเรียกว่า "ความต่างศักย์เบรกดาวน (Breakdown voltage หรือ Zener voltage)" หลักการทำงานที่สำคัญคือ เมื่อความต่างศักย์ไบแอสผกผันถึงจุดนี้ ซีเนอร์ไดโอดจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากในขณะที่ยังคงรักษาระดับความต่างศักย์ตกคร่อมตัวมันเองให้มีค่าคงที่ ด้วยสมบัตินี้จึงทำให้ซีเนอร์ไดโอดถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์รักษาความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage regulator) ในวงจรต่าง ๆ

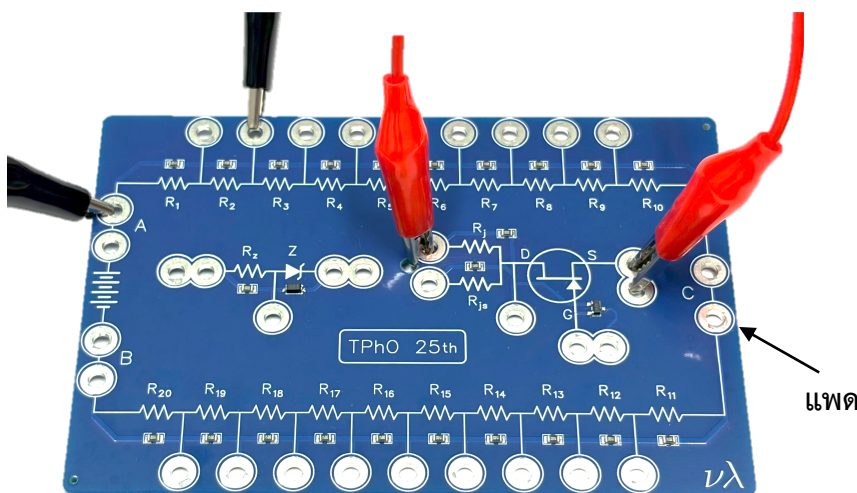
เจเฟต (JFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภทหนึ่งทำงานโดยอาศัยสนามไฟฟ้าในการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า หลักการทำงานง่าย ๆ คือ การป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วเกต (Gate) เพื่อสร้างพื้นที่ปลอดพาหะ (Depletion region) ซึ่งจะไปควบคุมขนาดความกว้างของช่องนำกระแส (Channel) ที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วเดรน (Drain) และขั้วซอร์ส (Source) เปรียบเสมือนการใช้ศักย์ไฟฟ้าเป็นวาล์วเปิด-ปิด หรือห้กระแสไฟฟ้า ทำให้ JFET เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยศักย์ไฟฟ้าและมีความต้านทานขาเข้าที่สูงมาก

สมบัติและพฤติกรรมของอุปกรณ์กึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้ สามารถศึกษาและทำความเข้าใจได้จากการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมอุปกรณ์ หรือที่เรียกว่า กราฟ I-V (Current-Voltage curve) ในการสร้างกราฟดังกล่าว จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเราสามารถใช้อุปกรณ์โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) ในการทำหน้าที่นี้ การทำงานของโพเทนชิโอมิเตอร์สามารถอธิบายได้ง่าย ๆ ด้วยหลักการของวงจรแบ่งความต่างศักย์ (Voltage divider circuit) ดังนั้น ในข้อสอบปฏิบัติการนี้ นักเรียนจะได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาทำความเข้าใจหลักการของวงจรแบ่งความต่างศักย์ ซีเนอร์ไดโอด และเจเฟต อย่างเป็นลำดับขั้นตอน

อุปกรณ์



1. มัลติมิเตอร์
2. สายโพรบของมัลติมิเตอร์ ซึ่งมีจุกสีดำเสียบไว้ให้นักเรียนดึงจุกออกก่อนเสียบเข้ากับมัลติมิเตอร์
3. ถ่านไฟฉายขนาด AAA 4 ก้อน
4. รางถ่าน 2 ราง
5. แผงวงจรที่ใช้ในการทดลอง
6. สายไฟ 10 เส้น



ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับแผงวงจรที่ใช้ในการทดลอง: นักเรียนสามารถทำความเข้าใจตำแหน่งของอุปกรณ์บนแผงวงจรและการเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์ได้จากแผนภาพที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์สีขาว โดยไม่ต้องสนใจว่าตำแหน่งจริง ๆ ของอุปกรณ์อยู่ที่ใดและต่อกันอย่างไร เส้นแผนภาพวงจรสีขาวแทนวงจรเหมือนกับแผนภาพในหนังสือและในข้อสอบนี้ทุกประการ รูปร่างกลมที่ล้อมรอบด้วยตัวนำสีเงินเรียกว่า "แพด" (pad) ใช้สำหรับต่อกับสายไฟและเป็นตำแหน่งที่สามารถนำโพรบของมัลติมิเตอร์มาแตะเพื่อทำการวัด ตัวอย่างการต่อสายไฟเข้ากับแพดแสดงเป็นตัวอย่างในรูปด้านบน

ตอนที่ 0 ตรวจสอบอุปกรณ์

[0.5 คะแนน]

แนวปฏิบัติที่ดีในการทำการทดลองเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าคือการตรวจสอบวัสดุอุปกรณ์ทุกชิ้นว่าสามารถใช้งานได้ดีหรือไม่ก่อนเริ่มทำการทดลอง

คำสั่ง

ให้นักเรียนวัดปริมาณดังต่อไปนี้โดยไม่ต้องรายงานค่าคลาดเคลื่อน

1. ความต้านทานของสายไฟทั้ง 10 เส้น แล้วบันทึกค่าที่วัดได้ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง หากมีเส้นใดเส้นหนึ่งที่ค่าความต้านทานเกิน 10 โอห์ม ให้ยกมือแจ้งกรรมการคุมสอบเพื่อขอเปลี่ยน
2. บรรจุถ่านไฟฉายไปในรางถ่าน แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมปลายสายไฟทั้งสองเส้นของรางถ่าน แล้วบันทึกค่าที่วัดได้ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง ถ้าได้ค่าน้อยกว่า 3 โวลต์ ให้แจ้งกรรมการคุมสอบเพื่อขอเปลี่ยน
3. วัดค่าความต้านทานระหว่างจุด A และ จุด B บนแผงวงจร แล้วรายงานค่าที่ได้ในกระดาษคำตอบ

หมายเหตุ นักเรียนต้องขอเปลี่ยนอุปกรณ์ที่กล่าวไว้ภายใน 30 นาทีแรกของการสอบเท่านั้น หลังจากนั้นนักเรียนจะไม่สามารถขอเปลี่ยนอุปกรณ์ใด ๆ ได้อีก

สิ่งสำคัญที่ต้องทราบก่อนทำการทดลอง

1. ถ่านไฟฉายไม่สามารถเปลี่ยนหรือขอใหม่ได้ ดังนั้นนักเรียนต้องระวังไม่ต่อลัดวงจร และถอดรางถ่านออกจากวงจรทุกครั้งหลังทำการวัดในแต่ละตอนเสร็จ
2. นักเรียนมีหน้าที่เลือกช่วงการวัดของมัลติมิเตอร์ด้วยตนเอง โดยตั้งแต่ตอนที่ 1 เป็นต้นไป นักเรียนต้องเลือกช่วงของมัลติมิเตอร์ที่ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดมีนัยสำคัญอย่างน้อย 3 ตัว สำหรับทุกค่าความต่างศักย์ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 10.0 mV
3. ความต้านทานของสายโพรบของมัลติมิเตอร์น้อยมากจนสามารถถือว่าเป็นศูนย์ได้

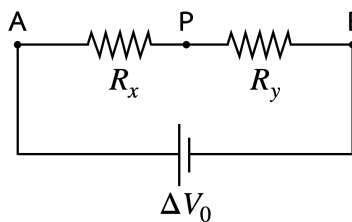
ตอนที่ 1 วงจรแบ่งความต่างศักย์ (Voltage Divider Circuit)

[1.5 คะแนน]

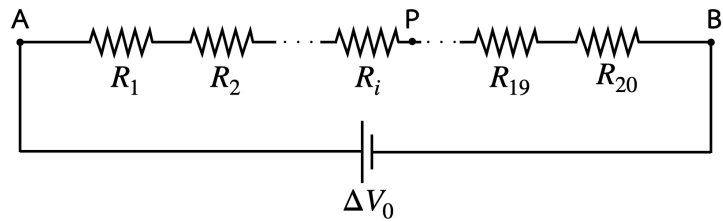
วงจรแบ่งความต่างศักย์เป็นวงจรที่ใช้ลดความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟให้ได้ค่าน้อยลงตามที่ต้องการ วงจรนี้ประกอบไปด้วยตัวต้านทานซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้า R_x และ R_y ต่ออนุกรมกัน แล้วต่อเข้ากับแบตเตอรี่ซึ่งมีความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองเท่ากับ ΔV_0 ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งทำให้ความต่างศักย์ระหว่างจุด P กับจุด B (หรือศักย์ไฟฟ้าของจุด P เทียบกับจุด B) ในวงจรมีค่าเป็น

$$\Delta V_{PB} = \frac{R_y}{R_x + R_y} \Delta V_0 \quad (1.1)$$

ในการทดลองนี้เราจะใช้ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกัน 20 ตัว รอบ ๆ แผงวงจรทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานในวงจรแบ่งความต่างศักย์ โดยให้ $R_x = R_1 + \dots + R_i$ และให้ $R_y = R_{i+1} + \dots + R_{20}$ ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้เราสามารถปรับ ΔV_{PB} ได้ด้วยการเลื่อนจุด P ไปยังจุดต่าง ๆ ตั้งแต่จุด A ถึงจุด B



รูปที่ 1 วงจร voltage divider



รูปที่ 2 วงจร voltage divider ในแผงวงจรที่ใช้ในการทดลอง

คำสั่ง

- ใช้รางถ่านหนึ่งอันต่อสายสีแดง (ขั้วบวก) เข้ากับแพด A และต่อสายสีดำ (ขั้วลบ) เข้ากับแพด B บนแผงวงจร แล้ววัดค่าความต่างศักย์พร้อมค่าคลาดเคลื่อน ณ จุดต่าง ๆ บนวงจรตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกันโดยเริ่มจาก ΔV_{AB} แล้วตามด้วย ΔV_{1B} , ΔV_{2B} , ΔV_{3B} , ..., ΔV_{iB} จนถึง ΔV_{19B} เมื่อ i ใน ΔV_{iB} หมายถึงลำดับแพดที่อยู่ถัดจากตัวต้านทาน R_i ในทิศตามเข็มนาฬิกา

การอ่านค่าคลาดเคลื่อนจากมัลติมิเตอร์

ในเอกสารคู่มือของมัลติมิเตอร์แสดงค่าคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าในรูปแบบ $\pm(0.7\% + 3)$ ซึ่งแปลว่าค่าคลาดเคลื่อนในการวัดครั้งนั้นให้คิดจาก 0.7% ของค่าที่วัดได้ บวกกับ 3 เท่าของความละเอียด (resolution) ในการวัดครั้งนั้น เช่นหากเลือกวัดค่าความต่างศักย์โดยตั้งช่วงการวัดที่ 200 mV แล้วหน้าจอแสดงผล 83.5 mV ค่าคลาดเคลื่อนของการวัดครั้งนี้สามารถคำนวณได้เป็น $\pm((83.5 \times 0.7\%) + (3 \times 0.1)) = \pm 0.9 \text{ mV}$

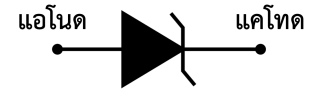
ช่วงการวัด	ความละเอียด	ค่าคลาดเคลื่อน
200 mV	0.1 mV	$\pm(0.7\% + 3)$
2000 mV	1 mV	$\pm(0.5\% + 2)$
20.00 V	0.01 V	$\pm(0.7\% + 3)$

ตารางที่ 1 แสดงค่าคลาดเคลื่อนในการวัดความต่างศักย์ของมัลติมิเตอร์ที่ใช้ในการสอบ

ตอนที่ 2 สมบัติของซีเนอร์ไดโอด (Characteristics of Zener Diode)

[7.0 คะแนน]

ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) ซึ่งมีสัญลักษณ์ในวงจรไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3 เป็นไดโอดชนิดพิเศษที่มีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อวงจรหรือไบแอส (Bias) เมื่อนำซีเนอร์ไดโอดมาต่อแบบไบแอสตรง (Forward bias) ซึ่งคือการต่อให้ขั้วแอโนดมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้วแคโทดมันจะประพฤติตัวเหมือนกับไดโอด



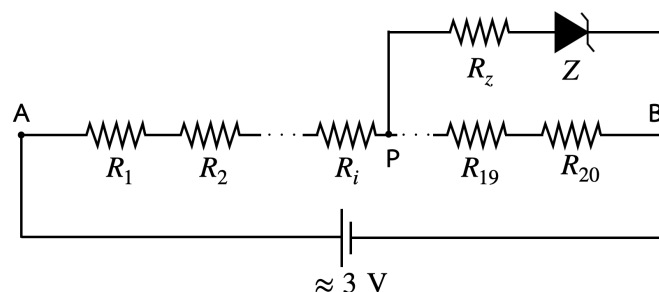
รูปที่ 3 สัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด

แบบรอยต่อพีเอ็น (p-n junction diode) ทั่วไป โดยยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้เมื่อความต่างศักย์ตกคร่อมมีค่ามากกว่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม (Threshold voltage) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) และความต่างศักย์คร่อมไดโอด (V_d) ในสภาวะนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการไดโอด (Diode equation) ดังนี้

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV_d}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

โดยที่ I_s คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current), q คือขนาดประจุของอิเล็กตรอน, k_B คือค่าคงตัวของบ็อลท์ซมันน์ (Boltzmann constant), T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยเคลวิน และ n คือ Ideality factor ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

ในทางกลับกัน เมื่อนำซีเนอร์ไดโอดมาต่อแบบไบแอสผกผัน (Reverse bias) ในช่วงแรกจะมีเพียงกระแสรั่วไหลค่าน้อย ๆ ไหลผ่านวงจรคล้ายไดโอดทั่วไป แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสผกผันจนถึงระดับที่กำหนด ซึ่งเรียกว่า ความต่างศักย์เบรกดาวน์ (Breakdown voltage หรือ Zener voltage, V_Z) จะเกิดปรากฏการณ์ที่ทำให้ซีเนอร์ไดโอดยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากอย่างฉับพลัน โดยที่ตัวอุปกรณ์ถูกออกแบบมาให้รองรับกระแสส่วนนี้ได้อย่างปลอดภัย ในขณะที่เดียวกันความต่างศักย์ตกคร่อมตัวไดโอดจะถูกรักษาให้มีค่าเกือบคงที่



รูปที่ 4 วงจรไฟฟ้าสำหรับการทดลอง

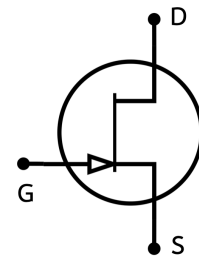
คำสั่ง

1. ศึกษาสมบัติของซีเนอร์ไดโอดเมื่อต่อแบบไบแอสตรง ด้วยการต่อวงจรดังรูปที่ 4 การปรับค่าความต่างศักย์คร่อมไดโอด (V_d) สามารถทำได้โดยเลื่อนจุดเชื่อมต่อ **P** จากจุด **A** ไปตามเข็มนาฬิกาจนถึงจุดระหว่าง R_{19} กับ R_{20} ค่ากระแสไฟฟ้าผ่านไดโอดสามารถคำนวณได้จากค่าความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน $R_z = 100 \pm 1 \, \Omega$ ซึ่งจะแทนค่าความต่างศักย์นี้ด้วยตัวแปร V_R บันทึกค่า V_d และ V_R พร้อมค่าคลาดเคลื่อนลงในกระดาษคำตอบ
2. วาดกราฟเส้นตรงที่เหมาะสมด้วยการแปลงสมการ 2.1 ให้เป็นสมการเส้นตรง เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่า n พร้อมค่าคลาดเคลื่อน ให้ใช้ค่า $V_d > 700 \, \text{mV}$ ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ $e^{\frac{qV_d}{k_B T}} \gg 1$ ค่าคงที่ที่ต้องใช้มีดังนี้ $q = 1.602 \times 10^{-19} \, \text{C}$, $k_B = 1.381 \times 10^{-23} \, \text{JK}^{-1}$ และให้ใช้อุณหภูมิ $T = 298.2 \, \text{K}$
3. ปรับวงจรในรูปที่ 4 เพื่อศึกษาสมบัติของซีเนอร์ไดโอดเมื่อต่อแบบไบแอสผกกลับ บันทึกค่า V_d และ V_R พร้อมค่าคลาดเคลื่อนลงในกระดาษคำตอบ วาดกราฟระหว่างกระแสผ่านไดโอด (แกนตั้ง) เทียบกับความต่างศักย์คร่อมไดโอด (แกนนอน) โดยให้บันทึกผลและวาดเฉพาะจุดข้อมูลที่กระแสไฟฟ้าผ่านไดโอดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $0.2 \, \text{mA}$
4. จากกราฟในข้อที่ 3. ให้คำนวณหาค่า dynamic resistance $R_d \equiv \frac{\Delta V}{\Delta I}$ ของซีเนอร์ไดโอดพร้อมค่าคลาดเคลื่อนจากจุดข้อมูลในกราฟสองจุดที่มีค่าความต่างศักย์คร่อมไดโอดสูงที่สุด

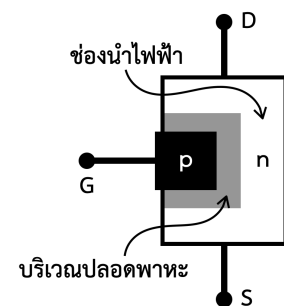
ตอนที่ 3 สมบัติของ JFET (Characteristics of JFET)

[11 คะแนน]

JFET (Junction Field Effect Transistor) ชนิด n-channel เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage-controlled device) โดยอาศัยการไหลของอิเล็กตรอนในช่องนำไฟฟ้าชนิดเอ็น (n-type channel) สัญลักษณ์ของ JFET ในวงจรไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงขาทั้งสามอันได้แก่ Drain (D), Source (S) และ Gate (G) ในสภาวะการทำงานปกติ จะมีการให้ความต่างศักย์ $V_{DS} > 0$ (V_{DS} แทนศักย์ไฟฟ้าที่ขา D เทียบกับขา S หรือ $V_D - V_S$) เพื่อให้เกิดกระแส I_{DS} ซึ่งไหลจากขา D ไปขา S ผ่านช่องนำไฟฟ้า (พิจารณารูปที่ 6 ประกอบ) และใช้ความต่างศักย์ไบแอสผันกลับ $V_{GS} \leq 0$ ที่ขา Gate เพื่อควบคุมปริมาณกระแส เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นลบมากขึ้น บริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) ที่รอยต่อ p-n จะแผ่ขยายเข้าไปใน n-channel ทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องนำไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นและกระแส I_{DS} ลดลงตามลำดับ จนกระทั่ง V_{GS} มีค่าติดลบถึงจุดที่เรียกว่า "ความต่างศักย์พินช์ออฟ (Pinch-off potential)" (V_P) บริเวณปลอดพาหะจะขยายจนทำให้ช่องนำไฟฟ้าถูกปิดกั้นและกระแส I_{DS} จะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 5 สัญลักษณ์ของ JFET



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในของ n-channel JFET

ในช่วงที่ความต่างศักย์ V_{DS} มีค่าต่ำหรืออยู่ภายใต้เงื่อนไข $V_{DS} < V_{GS} - V_P$ JFET จะทำงานอยู่ในย่านโอห์มมิก (Ohmic หรือ Triode region) ซึ่งในย่านนี้ กระแส I_{DS} จะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ V_{DS} ทำให้ JFET มีพฤติกรรมเสมือนเป็นตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage-controlled resistor) ความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าในย่านนี้ หรือ R_{DS} สามารถคำนวณได้จากสมการ:

$$R_{DS} = \frac{R_0}{1 - \frac{V_{GS}}{V_P}} \quad (3.1)$$

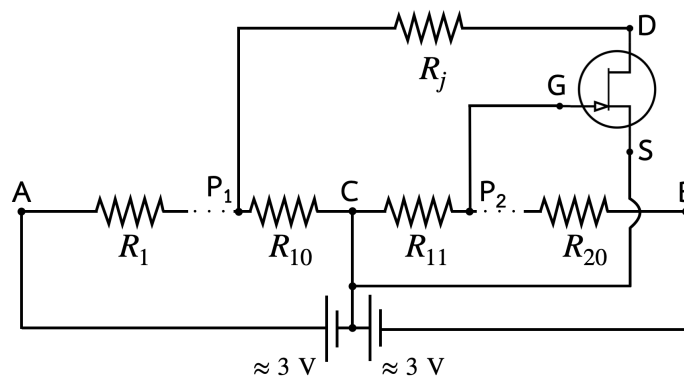
โดยที่ R_0 คือความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าขณะที่ $V_{GS} = 0$ V

เมื่อมีการเพิ่ม V_{DS} จนเข้าสู่เงื่อนไข $V_{DS} \geq V_{GS} - V_P$ อุปกรณ์จะเข้าสู่ย่านอิ่มตัว (Saturation หรือ Active region) ในย่านนี้ กระแส I_{DS} จะไม่แปรผันตาม V_{DS} อีกต่อไป แต่จะมีค่าคงที่และถูกควบคุมด้วยความต่างศักย์ V_{GS} เพียงอย่างเดียว ทำให้ JFET ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ควบคุมด้วยความต่างศักย์ ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้ออกแบบวงจรขยายสัญญาณ ปริมาณกระแสไฟฟ้าในย่านอิ่มตัวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของชอกลีย์ (Shockley's equation) ดังนี้:

$$I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \quad (3.2)$$

โดยที่ I_{DSS} คือค่ากระแสอิ่มตัวสูงสุดที่สามารถไหลผ่าน JFET ได้เมื่อกำหนดให้ $V_{GS} = 0$ V

พฤติกรรมการทำงานทั้งหมดของ JFET สามารถสรุปได้ผ่านกราฟคุณลักษณะ (Characteristic curves) สองรูปแบบหลัก ได้แก่ กราฟคุณลักษณะเอาต์พุต (Output characteristics) และ กราฟคุณลักษณะการถ่ายโอน (Transfer characteristics) กราฟคุณลักษณะเอาต์พุตจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} (แกน Y) และความต่างศักย์ V_{DS} (แกน X) เมื่อกำหนดให้ความต่างศักย์ V_{GS} มีค่าคงที่ในแต่ละเส้นกราฟ ซึ่งช่วยให้เห็นพฤติกรรมในย่านโอห์มมิกที่มีความชันและย่านอิ่มตัวที่กราฟขนานไปกับแกนความต่างศักย์ ส่วนกราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} และความต่างศักย์ V_{GS} ในขณะที่ JFET ทำงานอยู่ในย่านอิ่มตัว กราฟนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งพาราโบลาตามสมการของ Shockley โดยมีจุดตัดแกนตั้งที่ค่า I_{DSS} และจุดตัดแกนนอนที่ค่าแรงดันพินชออฟ V_P ซึ่งค่าจากกราฟทั้งสองนี้ล้วนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์และออกแบบวงจร



รูปที่ 7 วงจรไฟฟ้าสำหรับใช้ศึกษาสมบัติของ n-channel JFET

คำสั่ง

1. ต่อรางถ่านสองรางอนุกรมกัน แล้วต่อจุดที่สายไฟจากรางถ่านทั้งสองเชื่อมกันเข้ากับจุด C ซึ่งเป็นแพดที่อยู่ระหว่าง R_{10} และ R_{11} ในแผงวงจร แล้วต่อวงจรตามรูปที่ 7 โดยที่จุด P_1 สามารถเปลี่ยนจากการต่อกับแพดด้านซ้ายของ R_{10} ไปจนถึงจุด A ส่วนจุด P_2 สามารถเปลี่ยนจากการต่อกับแพด C ไปจนถึงจุด B จากวงจรนี้จะเห็นได้ว่าขา S ของ JFET ต่อกับจุด C ในวงจร ดังนั้นค่า V_{GS} และ V_{DS} จะเป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าเทียบกับจุด C ส่วน $R_j = 100 \pm 1 \Omega$ เป็นตัวต้านทานที่ช่วยให้เราสามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้า I_{DS} ได้จากความต่างศักย์คร่อม R_j

หมายเหตุ : กระแสไฟฟ้าผ่านขา G ของ JFET มีค่าน้อยมาก จนสามารถสมมติให้เป็นศูนย์ได้
การวัดและวิเคราะห์ต่อจากนี้ไม่ต้องคิดค่าคลาดเคลื่อน

- ที่ค่าความต่างศักย์ $V_{GS} = 0$ V ให้ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลและวาดกราฟคุณลักษณะเอาต์พุต และคำนวณค่า R_0 จากกราฟในย่านโอห์มมิก
- ที่ค่าความต่างศักย์ $V_{GS} < 0$ V ให้ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลและวาดกราฟคุณลักษณะเอาต์พุต สำหรับค่า V_{GS} แต่ละค่า โดยเริ่มจากค่า V_{GS} ที่ใกล้ศูนย์โวลต์ที่สุด จนไปถึงค่า V_{GS} ที่ทำให้ $I_{DS} < 0.5$ mA ไม่ว่าค่า V_{DS} จะเป็นเท่าไรก็ตาม ให้เก็บข้อมูลและวาดกราฟเฉพาะกรณีที่ $V_{DS} < 1600$ mV สามารถวาดกราฟได้ไม่เกิน 3 ชุดบนแกนเดียวกัน โดยทำให้สัญลักษณ์ของจุดข้อมูลแต่ละชุดมีรูปร่างต่างกัน
- จากกราฟในข้อ 3. ให้นักเรียนคำนวณหาค่า R_{DS} จากจุดข้อมูลที่อยู่ในย่านโอห์มมิก สำหรับ V_{GS} แต่ละค่า โดยให้วิเคราะห์สำหรับเส้นกราฟที่มีจุดข้อมูลอยู่ในย่านโอห์มมิกมากกว่าหรือเท่ากับสามจุดเท่านั้น จากนั้นนำผลที่ได้จากข้อนี้และข้อ 2. ไปวิเคราะห์หาค่า V_P และ R_0 โดยใช้กราฟเส้นตรงที่ได้จากการจัดรูปสมการ (3.1) ให้เป็นสมการเส้นตรงด้วยการให้ $\frac{1}{R_{DS}}$ เป็นค่าในแกนตั้ง และ V_{GS} เป็นค่าในแกนนอน
- เพื่อศึกษาสมบัติของ JFET ในย่านอิ่มตัว ให้เปลี่ยน R_j ในวงจรเป็น $R_{js} = 10.0 \pm 0.1 \Omega$ และให้จุด **P1** อยู่ที่จุด **A** จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาว่าค่า I_{DS} ที่ V_{GS} ต่าง ๆ พร้อมค่าคลาดเคลื่อน แล้วแปลงสมการที่ (3.2) ให้เป็นเส้นตรงด้วยการให้ $\sqrt{I_{DS}}$ เป็นค่าในแกนตั้ง และ V_{GS} เป็นค่าในแกนนอน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาว่าค่า I_{DSS} และ V_P จากกราฟเส้นตรง