

## แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5 การทดลองคุณลักษณะมอสเฟต และวงจรมอสเฟต

### หัวข้อเนื้อหา

1. มอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: MOSFET)
2. โครงสร้างของมอสเฟต
3. การไบอัสมอสเฟต
4. โหมดการทำงานของมอสเฟต
5. การทดลองคุณลักษณะมอสเฟต และวงจรมอสเฟต

### วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อทดลองหาคุณลักษณะของมอสเฟต
2. เพื่อทดลองวงจรมอสเฟต

### วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. วิธีสอน
  - 1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย
  - 1.2 วิธีสอนแบบอภิปราย
  - 1.3 วิธีสอนแบบปฏิบัติการ
  - 1.4 วิธีสอนแบบเน้นการเรียนรู้ด้วยตนเอง
2. กิจกรรมการเรียนการสอน
  - 2.1 อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอสเฟต
  - 2.2 อธิบายขั้นตอนการทดลองหาคุณสมบัติของมอสเฟต
  - 2.3 อธิบายการบันทึกผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง
  - 2.4 นักศึกษาทำการทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และตอบคำถาม

ท้ายการทดลอง

### สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 1
2. ใบประกอบ
3. แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

### การวัดผลและการประเมินผล

1. การเข้าเรียน
2. เอกสารปฏิบัติการ
3. สอบกลางภาค

#### 4. สอบปลายภาค

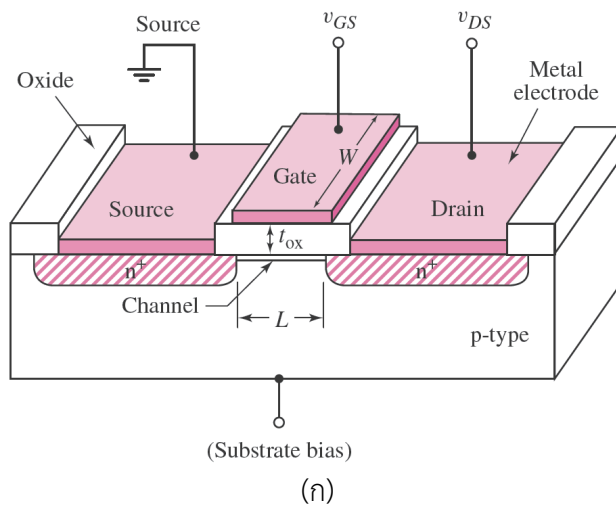
## บทที่ 5

### การทดลองคุณลักษณะมอสเฟต และวงจรไบอัส

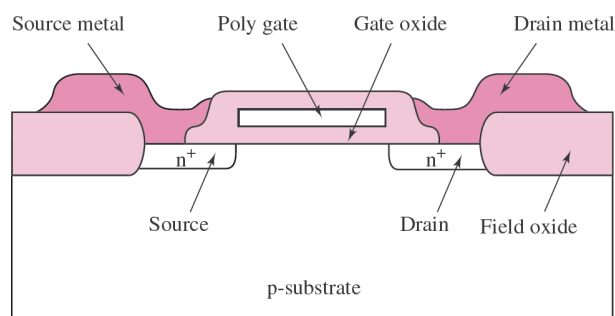
#### 5.1 มอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: MOSFET)

มอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: MOSFET) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีการทำงานในลักษณะที่แปลงแรงดันเป็นกระแส กระแสที่ได้เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนหรือโฮล ซึ่งเป็นพาหะข้างมาก (Majority Carrier) ขึ้นอยู่กับว่าอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นมอสเฟตชนิดเอ็น (NMOS) หรือมอสเฟตชนิดพี (PMOS)

มอสเฟตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ มอสเฟตแบบดีพลีชัน (Depletion) และมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ (Enhancement) มอสเฟตแต่ละประเภทยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิด คือ มอสเฟตชนิดเอ็น (NMOS) ซึ่งมีประจุพาหะอิเล็กตรอนเป็นตัวนำกระแส และมอสเฟตชนิดพี (PMOS) ซึ่งมีประจุพาหะโฮลเป็นตัวนำกระแส



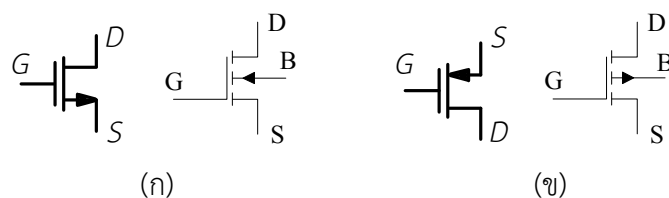
(ก)



(ข)

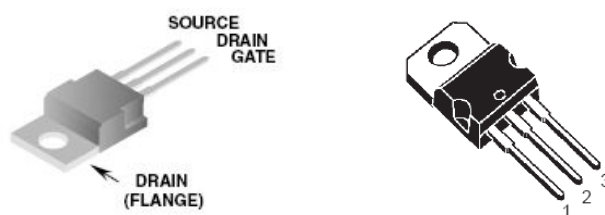
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็น (ก) ภาพ 3 มิติ และ (ข) ภาพหน้าตัด (Donald A. Neamen)

รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์มีนัชนิดเอ็น (NMOS) ขั้วซอส (Source) และขั้วเดรน (Drain) ถูกสร้างขึ้นโดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นมาก (Heavily Doped N-Type Region) เข้าไปในฐานรอง (Substrate) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นแผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยว (Single-Crystal) ที่มีความหนาแน่นน้อย (Lightly Doped P-Type Substrate) ขั้วเกต (Gate) จะเป็นส่วนของโลหะ (Metal) หรือชั้นของโพลีซิลิกอน (Poly-Silicon) ซ้อนอยู่บนชั้นของออกไซด์ระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอส โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองเป็นความยาวของมอสเฟต (Channel Length;  $L$ ) และมีระยะทางด้านข้าง (Side-Wall) เป็นความกว้างของมอสเฟต (Channel Width;  $W$ ) โครงสร้างของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์มีนัชนิดพี (PMOS) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์มีนัชนิดเอ็น (NMOS) แต่จะสลับกัน คือ มอสเฟตชนิดพีจะประกอบด้วยผลึกฐานรองชนิดเอ็น (N-Type) ที่มีความหนาแน่นน้อยและการแพร่อะตอมสารเจือชนิดพีที่มีความหนาแน่นมากเข้าไปฐานรองเพื่อเป็นขั้วซอสและขั้วเดรน รูปที่ 5.2 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์มีนัที่วาดมาจากการอ้างอิงโครงสร้างมอสเฟต



รูปที่ 5.2 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์มีนัชนิด (ก) NMOS และ (ข) PMOS

รูปที่ 5.3 แสดงอุปกรณ์ภาพมอสเฟตที่ถูกนำไปใช้ในวงจรขยายของเพาเวอร์แอมป์ปริ๊พรีล์ และ วงจรสวิตซ์ชิง คอนเวอร์เตอร์ ตัวอุปกรณ์มอสเฟตสามารถมีกระแสไหลผ่านจำนวนมากได้

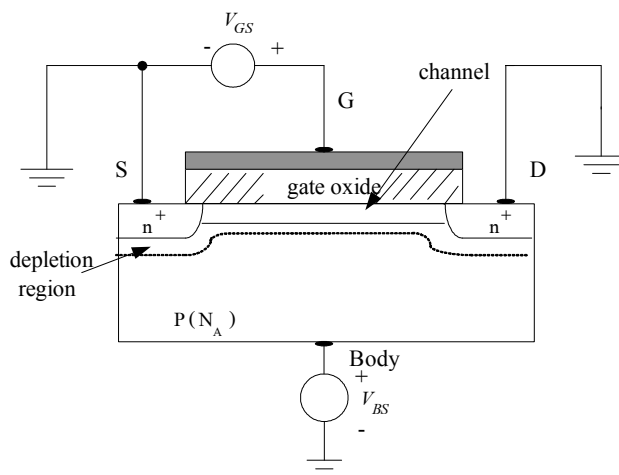


รูปที่ 5.3 อุปกรณ์มอสเฟต

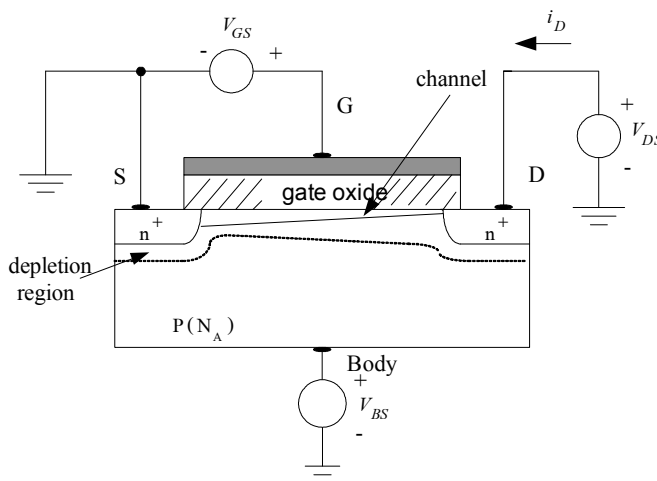
## 5.2 การไบอัสมอสเฟตนำกระแส (Donald A. Neamen)

รูปที่ 5.4 แสดงการบ่อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขาเกตเทียบกับขาซอส ( $V_{GS}$ ) ซึ่งแรงดัน  $V_{GS}$  มีขนาดเพียงพอจะทำให้เกิดช่องทางเดินของกระแสระหว่างขาซอส และขาเดรน ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดช่องทางเดินของกระแสนี้เรียกว่า แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage :  $V_T$ ) กระแสไหลผ่านช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างขาเดรนและขาซอสมีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับการเกิดของช่องทางเดินกระแสในมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์มีนัชนิดพี (PMOS) สามารถทำได้โดยบ่อนแรงดันค่าลบเข้าที่เกตเทียบกับซอสให้มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม

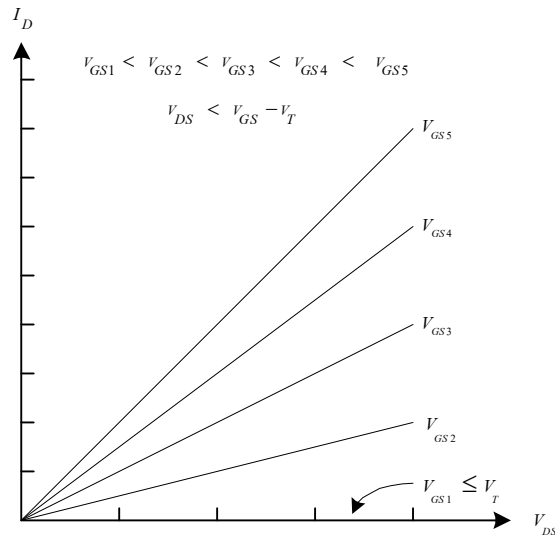
เมื่อป้อนแรงดันบวกระหว่างขาเกตเทียบกับขาซอสให้มีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม และป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขาเดรนเทียบกับขาซอส ดังที่แสดงในรูปที่ 5.5 ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง ( $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ ) กระแสเดรนจะไหลผ่านช่องทางเดินกระแสจากขาเดรนไปยังขาซอส โดยคุณสมบัติของกระแสเดรน ( $I_D$ ) เมื่อเทียบกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเดรนและซอส ( $V_{DS}$ ) ดังที่แสดงในรูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเดรน และซอสจะเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Region) ลักษณะการทำงานของมอสเฟตช่วงนี้มีลักษณะเป็นความต้านทานเชิงเส้นที่ถูกควบคุมโดยแรงดันที่ขาเกตเทียบกับขาซอส



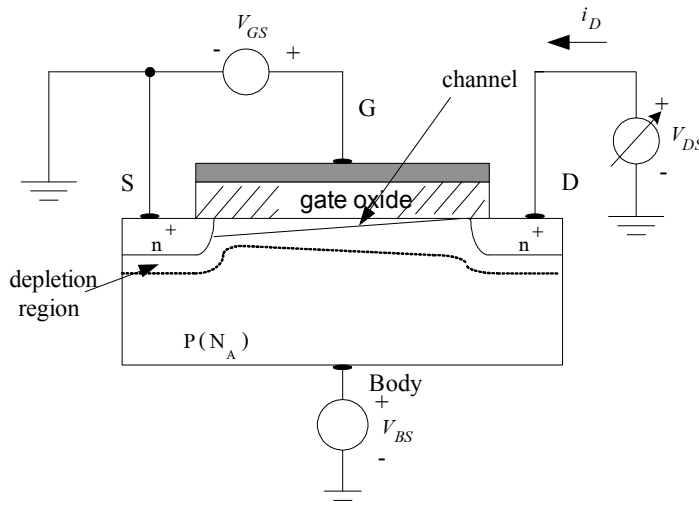
รูปที่ 5.4 การสร้างช่องทางเดินกระแสให้กับมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เม้นท์ชนิดเอ็น



รูปที่ 5.5 การกำหนดจุดการทำงานให้มอสเฟต เมื่อ  $V_{GS} > V_T$  และ  $V_{DS}$  มีค่าน้อย



รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดัน  $V_{DS}$  ที่มีค่าน้อย



รูปที่ 5.7 การกำหนดจุดการทำงานให้มอสเฟต เมื่อ  $V_{GS} > V_T$  และปรับค่า  $V_{DS}$  มีค่ามากกว่า  $V_{GS} - V_T$

เมื่อปรับแรงดัน  $V_{DS}$  ให้มีค่ามากขึ้นจนกระทั่ง  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$  ดังรูปที่ 5.7 ลักษณะของช่องทางเดินกระแสจะมีลักษณะที่ลาดเอียงไปทางส่วนของเดรนจนถึงจุดที่เรียกว่าจุดพินชออฟ (Pinched Off) ศักย์ตาไฟฟ้าที่จุดพินชออฟนี้จะมีค่าเท่ากับ  $V_{DSAT} = V_{GS} - V_T$  สภาวะดังกล่าวมอสเฟตจะทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation Region)

### 5.3 ย่านการทำงานของมอสเฟต (Donald A. Neamen)

การแบ่งย่านการทำงานของมอสเฟตพิจารณาจากการจัดไบอัสของมอสเฟตซึ่งได้แก่ แรงดัน  $V_{GS}$   $V_{DS}$  และ  $V_T$  สามารถแบ่งช่วงการทำงานออกได้เป็น 3 ย่าน (Region) ดังต่อไปนี้

### 5.3.1 ช่วงคัทออฟ (Cutoff Region); ( $V_{GS} < V_T$ )

ช่วงคัทออฟ คือช่วงที่มอสเฟตไม่ทำงาน กรณีนี้จะไม่มีความดันครีโอสเฟต จึงทำให้มอสเฟตไม่สามารถนำกระแสเดรน ( $I_D$ ) ได้

$$I_D = 0 \tag{5.1}$$

### 5.3.2 ช่วงเชิงเส้น (Linear Region); ( $V_{DS} < V_{GS} < V_T$ )

ช่วงเชิงเส้น เป็นช่วงที่แรงดันไบอัสที่ขาเกต และขาซอสมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} > V_T$ ) และแรงดันระหว่าง  $V_{DS}$  มีค่าน้อยกว่า  $V_{GS} - V_T$  โดยสามารถหากระแส  $I_D$  ได้ดังนี้

$$I_D = k \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \tag{5.2}$$

### 5.3.3 ช่วงอิ่มตัว (Saturation Region); ( $V_{DS} \geq V_{GS} < V_T$ )

ช่วงอิ่มตัวเป็นช่วงที่แรงดันที่ขาเกต และขาซอสมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} > V_T$ ) และแรงดัน  $V_{DS}$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $V_{GS} - V_T$  สามารถหากระแส  $I_D$  ได้ดังนี้

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \tag{5.3}$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความนำ (Transconductance Parameter) มีค่าเท่ากับ  $\mu_0 C_{OX} W/L$  ( $AV^2$ )

$\mu_0$  คือ สภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron Mobility) ( $cm^2/V\text{-sec}$ )

$C_{OX}$  คือ ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของเกตออกไซด์ (Oxide Capacitance) ( $F/cm^2$ )

$I_D$  คือ the drain current (A)

$W$  คือ the *channel width* of the MOSFET (units of cm)

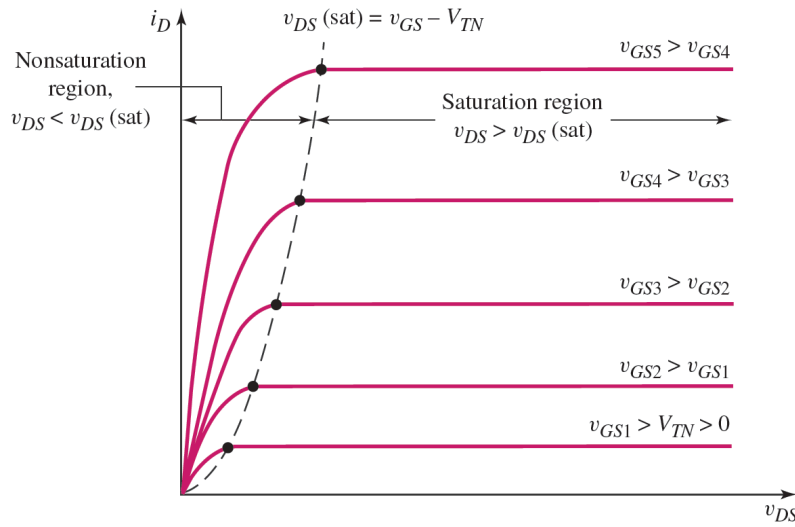
$L$  คือ the *channel length* of the MOSFET (cm)

$V_{GS}$  คือ the gate-to-source voltage (V)

$V_{TH}$  คือ the *threshold voltage* (V)

$V_{DS}$  คือ the drain-to-source voltage (V)

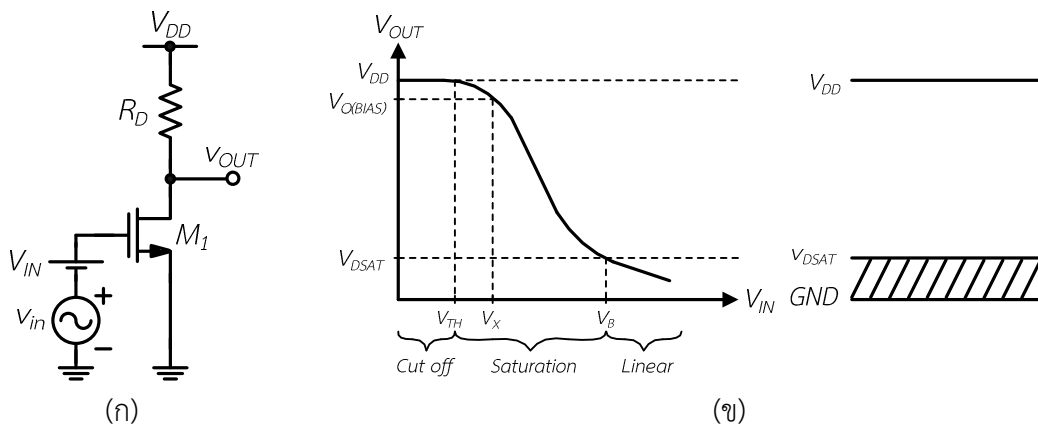
$\lambda$  คือ แชนแนล เลนจ์ มอดูเลชัน (Channel Length Modulation) ( $V^{-1}$ )



รูปที่ 5.8 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของมอสเฟตชนิด NMOS (Donald A. Neamen)

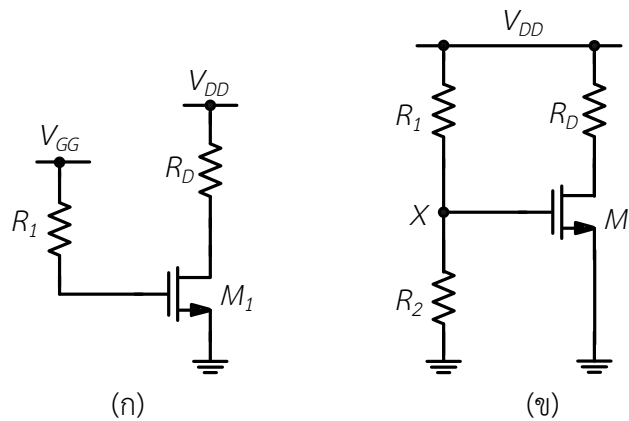
### 5.4 การไบอัสวงจรรขยายมอสเฟต (Donald A. Neamen)

การนำมอสเฟตไปใช้เป็นวงจรรขยายสัญญาณหรือวงจรรอื่นจะต้องทำการไบอัสมอสเฟตให้ทำงานในย่านอิมิตัว รูปที่ 5.9 (ก) แสดงวงจรรเทียบเคียงวงจรรขยายที่ถูกไบอัสด้วยแรงดันดีซี ( $V_{IN}$ ) และมีกรบบ้อนสัญญาณขนาดเล็ก ( $v_{in}$ ) รูปที่ 5.9 (ข) แสดงกราฟคุณลักษณะทางดีซี เมื่อทำการไบอัสแรงดันดีซีเข้าที่ขาเกตของมอสเฟตมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ มอสเฟตไม่นำกระแส ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ  $V_{DD}$  เมื่อทำการปรับแรงดันเพิ่มมากขึ้นแต่น้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม มอสเฟตยังไม่นำกระแส ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตยังคงเท่ากับ  $V_{DD}$  ช่วงนี้มอสเฟตทำงานในย่านคัทออฟ เมื่อป้อนแรงดันที่ขาเกตมากกว่าแรงดันขีดเริ่ม มอสเฟตเริ่มนำกระแส ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุต เมื่อแรงดันไบอัสในช่วง  $V_{TH} < V_{IN} < V_B$  กระแส  $I_D$  ไหลมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตลดลงเนื่องจากแรงดันส่วนมากจะไปตกคร่อมที่ตัวต้านทาน  $R_D$  ช่วงนี้มอสเฟตทำงานในย่านอิมิตัว และเมื่อแรงดันไบอัสในช่วง  $V_B < V_{IN}$  ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตลดลงน้อยกว่าแรงดัน  $V_{DSAT}$  ช่วงนี้มอสเฟตทำงานในย่านเชิงเส้น



รูปที่ 5.9 (ก) วงจรรเทียบเคียงกาไบอัสแรงดันดีซี และการบ้อนสัญญาณอินพุต และ (ข) แสดงกราฟคุณลักษณะทางดีซี (วรากร เกษมสุวรรณ)





รูปที่ 5.10 วงจรไบอัสมอสเฟต (ก) ไบอัสด้วย  $V_{GG}$  และ (ข) ไบอัสด้วย  $V_{DD}$

การไบอัสมอสเฟตให้ทำงานในย่านอิ่มตัวสามารถทำได้ 2 วงจร ดังแสดงในรูปที่ 5.10 เนื่องจากแรงดัน  $V_X = V_{GS}$  ดังนั้น แรงดัน  $V_{DS}$  เท่ากับ

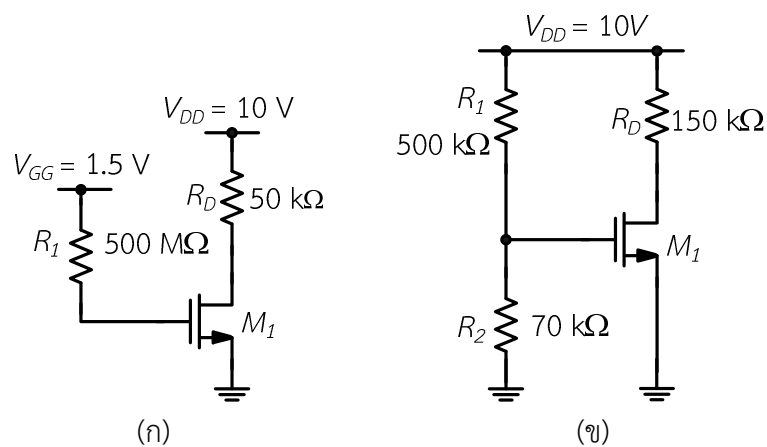
$$V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} \quad (5.4)$$

กระแส  $I_D$  มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (5.5)$$

เราสามารถหาค่าแรงดัน  $V_{DS}$  ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \quad (5.6)$$



รูปที่ 5.11 วงจรไบอัสมอสเฟต (ก) ไบอัสด้วย  $V_{GG}$  และ (ข) ไบอัสด้วย  $V_{DD}$

**ตัวอย่างที่ 5.1** รูปที่ 5.11 (ก) แสดงวงจรไบอัสมอสเฟต กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี  $V_{TH} = 0.7 \text{ V}$   $K_N = 0.1 \text{ mA/V}^2$  และ  $\lambda = 0$  ให้หาค่า  $V_{GS}$   $I_D$  และ  $V_{DS}$  และมอสเฟตทำงานย่านใด

**วิธีทำ** เนื่องจากกระแส  $I_G = 0 \text{ A}$  แรงดัน  $V_{GS}$  เท่ากับ

$$V_{GS} = V_{GG} = 1.5 \text{ V} \quad (5.7)$$

กระแส  $I_D$  มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (5.8)$$

$$I_D = 0.1 \text{ mA/V}^2 (1.5 \text{ V} - 0.7 \text{ V})^2 \quad (5.9)$$

$$I_D = 64 \text{ } \mu\text{A}$$

เราสามารถหาค่าแรงดัน  $V_{DS}$  ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \quad (5.10)$$

$$= 10 \text{ V} - (64 \text{ } \mu\text{A} \times 50 \text{ k}\Omega) \quad (5.11)$$

$$= 6.8 \text{ V}$$

เนื่องจากแรงดัน  $V_{DS} = 6.8 \text{ V}$  ซึ่งมากกว่า  $V_{GS} - V_{TH}$  ดังนั้น มอสเฟตทำงานย่านอิ่มตัว

**ตัวอย่างที่ 5.2** รูปที่ 5.11 (ข) แสดงวงจรไบอัสมอสเฟตแบบแบ่งแรงดัน สมมติให้  $V_{TH} = 0.7 \text{ V}$   $K_N = 0.1 \text{ mA/V}^2$  และ  $\lambda = 0$  จงคำนวณหาค่า  $V_{GS}$   $I_D$  และ  $V_{DS}$  และมอสเฟตทำงานย่านใด

**วิธีทำ** คำนวณหาค่าแรงดัน  $V_G$  ได้ว่า

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} \quad (5.12)$$

$$= \frac{70 \text{ k}\Omega}{70 \text{ k}\Omega + 500 \text{ k}\Omega} \times 10 \text{ V} \quad (5.13)$$

$$= 1.23 \text{ V}$$

เมื่อแทนค่าแรงดัน  $V_{GS} = 1.23 \text{ V}$  ในสมการกระแส  $I_D$  กระแส  $I_D$  มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (5.14)$$

$$I_D = 0.1 \text{ mA/V}^2 (1.23 \text{ V} - 0.7 \text{ V})^2 \quad (5.15)$$

$$I_D = 28 \text{ } \mu\text{A}$$

เราสามารถหาค่าแรงดัน  $V_{DS}$  ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \quad (5.16)$$

$$= 10 \text{ V} - (28 \text{ } \mu\text{A} \times 150 \text{ k}\Omega) \quad (5.17)$$

$$= 5.8 \text{ V}$$

เนื่องจากแรงดัน  $V_{DS} = 5.8 \text{ V}$  ซึ่งมากกว่า  $V_{GS} - V_{TH}$  ดังนั้น มอสเฟตทำงานย่านอิ่มตัว

**ตัวอย่างที่ 5.3** กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี  $V_{TH} = 1 \text{ V}$   $K_N = 1 \text{ mA/V}^2$  และ  $\lambda = 0$  ให้หาค่า  $I_D$  และ  $V_{DS}$

**วิธีทำ** ทำการหาค่าแรงดัน  $V_{R1}$  ได้ว่า

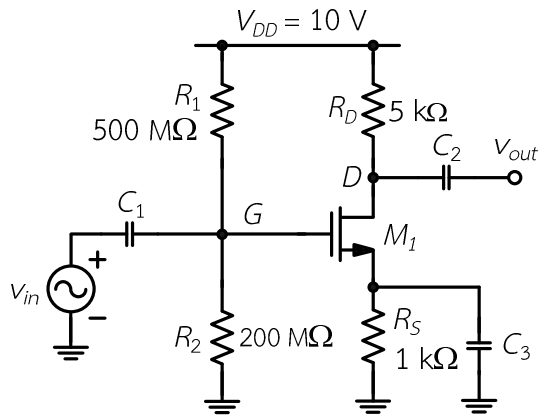
$$V_G = V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD} \quad (5.18)$$

$$= \frac{200 \text{ M}\Omega}{200 \text{ M}\Omega + 500 \text{ M}\Omega} \times 10 \text{ V} \quad (5.19)$$

$$= 2.86 \text{ V}$$

เมื่อแทนค่าแรงดัน  $V_G = 2.86 \text{ V}$  ในสมการกระแส  $I_D$  กระแส  $I_D$  มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_N (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (5.20)$$



รูปที่ 5.12 วงจรขยายแบบซอสร่วม

$$I_D = K_N (V_G - I_D R_S - V_{TH})^2 \quad (5.21)$$

$$= 1 \text{ mA/V}^2 (2.86 \text{ V} - I_D - 1 \text{ V})^2 \quad (5.22)$$

$$= (1.86 \text{ V} - I_D)^2 \text{ mA} \quad (5.23)$$

$$I_D = 3.46 - 3.72 I_D + I_D^2 \quad (5.24)$$

$$I_D^2 - 4.72 I_D + 3.46 = 0 \quad (5.25)$$

$$I_D = \frac{-b \pm \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a} \quad (5.26)$$

$$I_D = \frac{4.72 \pm \sqrt{(-4.72)^2 - (4 \times 3.46)}}{2} \quad (5.27)$$

$$I_D = 3.81 \text{ mA}, 0.91 \text{ mA}$$

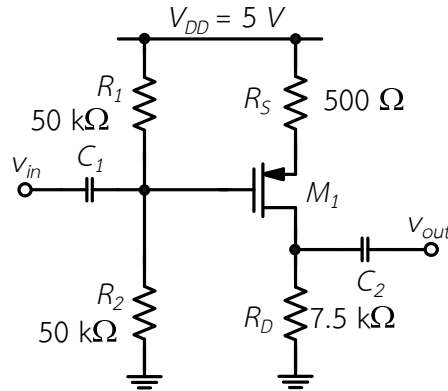
เลือกค่ากระแส  $I_D = 0.91 \text{ mA}$  เนื่องจากแทนค่า  $V_{GS} = V_G - I_D R_S$  แล้วมากกว่า  $V_{TH}$  นำค่ากระแส  $I_D$  มาหาค่าแรงดัน  $V_{DS}$  ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \quad (5.28)$$

$$= 10 \text{ V} - (0.91 \text{ mA} \times 6 \text{ k}\Omega) \quad (5.29)$$

$$= 5.46 \text{ V}$$

ตัวอย่างที่ 5.4 กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี  $V_{TH} = 0.8 \text{ V}$   $K_P = 0.2 \text{ mA/V}^2$  และ  $\lambda = 0$  ให้หาค่า  $V_{SG}$   $I_D$  และ  $V_{SD}$



รูปที่ 5.13 วงจรขยายแบบซอสร์วม

วิธีทำ ทำการหาค่าแรงดัน  $V_{R1}$  ได้ว่า

$$V_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DD} \tag{5.30}$$

$$= \frac{50\text{k}\Omega}{50\text{k}\Omega + 50\text{k}\Omega} \times 5\text{V} \tag{5.31}$$

$$= 2.5 \text{ V}$$

เมื่อแทนค่าแรงดัน  $V_{R1} = 2.5 \text{ V}$  ในสมการกระแส  $I_D$  กระแส  $I_D$  มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_P (V_{SG} - V_{TH})^2 \tag{5.32}$$

$$I_D = K_P (V_{R1} - I_D R_S - V_{TH})^2 \tag{5.33}$$

$$= 0.2\text{mA/V}^2 (2.5\text{V} - 500I_D - 0.8\text{V})^2 \tag{5.34}$$

$$= (0.34 - 0.1I_D)^2 \text{ mA} \tag{5.35}$$

$$I_D = 0.1156 - 0.068I_D + 0.01I_D^2 \tag{5.36}$$

$$0.01I_D^2 - 1.068I_D + 0.1156 = 0 \tag{5.37}$$

$$I_D = \frac{-b \pm \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a} \tag{5.38}$$

$$I_D = \frac{1.068 \pm \sqrt{(-1.068)^2 - (4 \times 0.01 \times 0.1156)}}{0.02} \tag{5.39}$$

$$I_D = 0.11 \text{ mA}$$

เราสามารถหาค่าแรงดัน  $V_{DS}$  ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \tag{5.40}$$

$$= 5 \text{ V} - (0.11 \text{ mA} \times 8 \text{ k}\Omega) \tag{5.41}$$

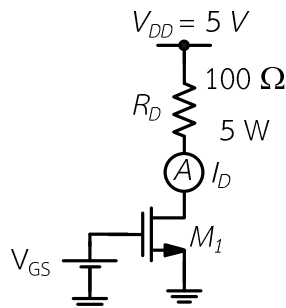
$$= 4.12 \text{ V}$$

เนื่องจากแรงดัน  $V_{DS} = 4.12 \text{ V}$  ซึ่งมากกว่า  $V_{GS} - V_{TH}$  ดังนั้น มอสเฟตทำงานย่านอิ่มตัว

## 5.5 การทดลองคุณลักษณะมอสเฟต และวงจรไบอัส

### 5.5.1 การทดสอบหาแรงดัน $V_{th}$ ของมอสเฟต

5.5.1.1 ให้ต่อวงจรตามรูปที่ 5.15 กำหนดให้ใช้ MOSFET เบอร์ IRFZ2807 มี



รูปที่ 5.14 วงจรทดลองหาค่า  $V_{th}$  มอสเฟต



ตารางที่ 5.5 เมื่อ  $V_{GS} = 3\text{ V}$

$V_{DS}$	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	4	V
$I_D$											

5.5.1.2 ให้นำค่าที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 5.1 5.2 5.3 และ 5.4 ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{DS}$  กับ  $I_D$

5.5.1.3 สรุปผลการทดลอง

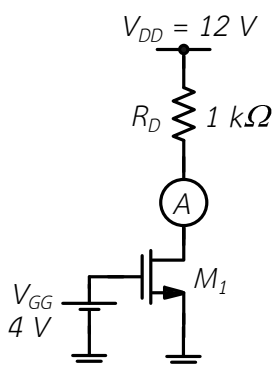
.....

.....

.....

5.5.3. การไบอัสมอสเฟต

5.5.3.1 ให้ต่อวงจรในรูปที่ 5.17 วัดกระแส  $I_D$ , วัดแรงดัน  $V_{GS}$  และวัดแรงดัน  $V_{DS}$  พร้อมบันทึกผลการทดลอง

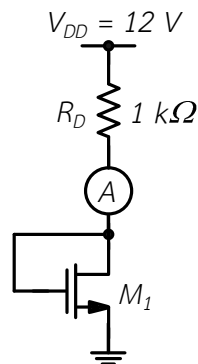


รูปที่ 5.16 วงจรไบอัสมอสเฟต

$I_D = \dots\dots\dots$        $V_{DS} = \dots\dots\dots$

5.5.3.2 ให้ต่อวงจรในรูปที่ 5.18 วัดกระแส  $I_D$  และวัดแรงดัน  $V_{DS}$  พร้อมบันทึกผลการทดลอง

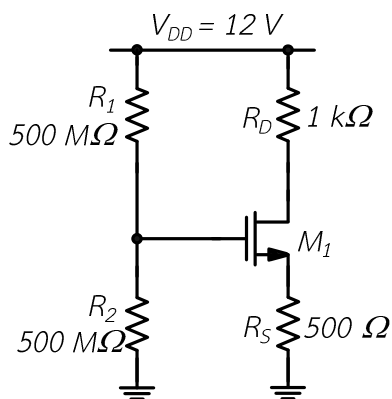




รูปที่ 5.17 วงจรไบอัสมอสเฟต

$V_{GS} = V_{DS} = \dots\dots\dots I_D = \dots\dots\dots$

5.5.3.3 ให้ต่อวงจรไบอัสมอสเฟตในรูปที่ 5.19 โดยที่มอสเฟตทำงานในย่านอิ่มตัว และ  
 วงจรมีกระแส  $I_D$  และมีแรงดัน  $V_{DS}$  กำหนดให้ใช้ค่า  $K_n = \frac{k' W}{2 L}$  ที่ได้จากการทดลองที่ 5.5.1.1



รูปที่ 5.18 วงจรไบอัสมอสเฟต

$V_{GS} = \dots\dots\dots I_D = \dots\dots\dots V_{DS} = \dots\dots\dots$

5.5.3.4 สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

5.6 บทสรุป

มอสเฟต คืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ถูกลำนำไปต่อเป็นวงจรขยายสัญญาณ และวงจรสวิตช์  
 อิเล็กทรอนิกส์ กระแสที่ไหลผ่านตัวมอสเฟตจะถูกควบคุมด้วยแรงดัน  $V_{GS}$  เมื่อป้อนแรงดัน  $V_{GS}$

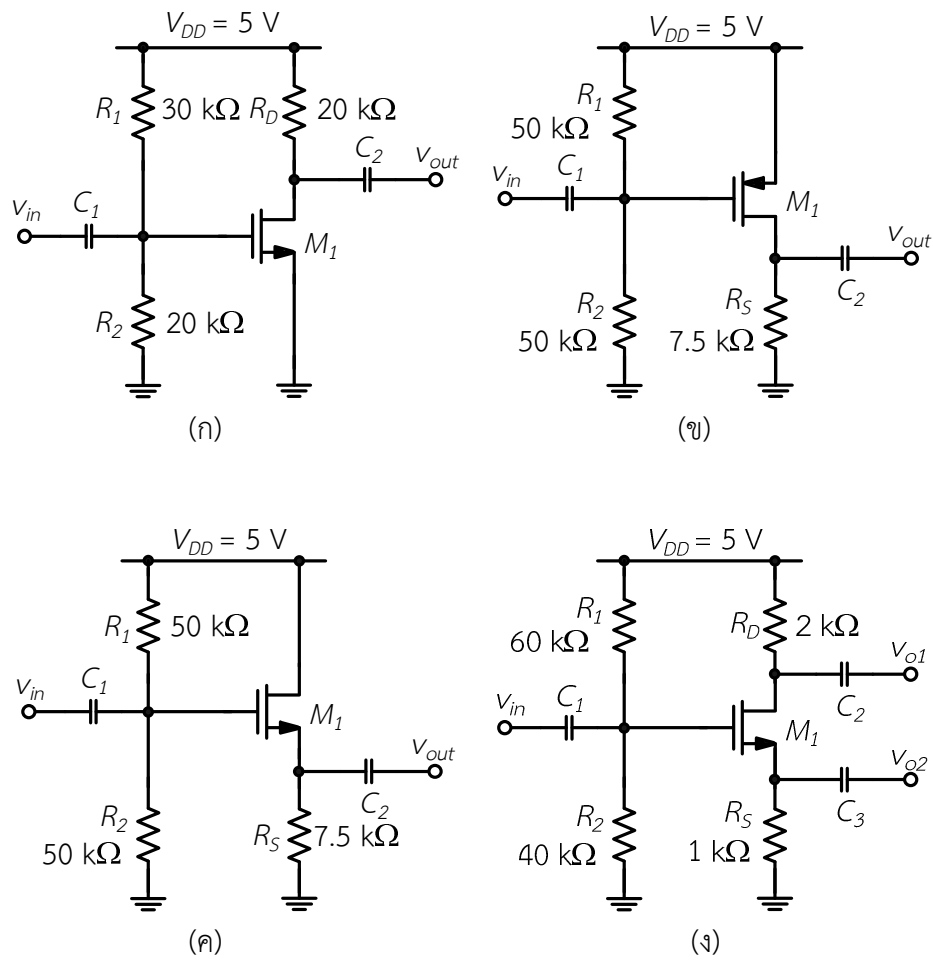
มากกว่าแรงดันขีดเริ่มมอสเฟตจึงจะมีกระแสไหล และไหลคงที่เมื่อมอสเฟตทำงานในย่านอิ่มตัว การนำมอสเฟตไปต่อเป็นวงจรขยายจะต้องถูกไบอัสให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้วงจรขยายสัญญาณผิดเพี้ยน การไบอัสมอสเฟตแบบแบ่งแรงดันจะใช้ตัวต้านทานแบ่งแรงดันเพื่อไบอัสให้กับมอสเฟต การไบอัสคงที่จะใช้ตัวต้านทานต่อระหว่างแรงดันไบอัสกับขาเกต นักศึกษาสามารถนำวิธีการทดลองหาคุณลักษณะของมอสเฟตไปประยุกต์ใช้หาค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตเบอร์อื่น ๆ ได้ การทดลองต่อวงจรไบอัสมอสเฟตจะเป็นการฝึกทักษะการต่อวงจร และรู้ถึงการไบอัสแรงดันที่เหมาะสมให้กับมอสเฟต

### คำถามหลังการทดลอง

1. ทำไมแรงดัน  $I_D$  เพิ่มขึ้น
2. ทำไมแรงดัน  $V_{DS}$  ลดลง
3. จากผลการทดลองที่ 5.7.1 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่าไร
4. กราฟคุณลักษณะของมอสเฟตบอกอะไรบ้าง และนำไปใช้ประโยชน์อย่างไร
5. แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ของมอสเฟตมีค่าเท่าไร
6. วงจรในรูปที่ 5.17, 5.18 และ 5.19 ทำงานในโหมดใด และทราบได้อย่างไร
7. จากวงจรที่ได้ออกแบบในรูปที่ 5.19 กระแส  $I_D$ , แรงดัน  $V_{GS}$  และแรงดัน  $V_{DS}$  ที่วัดได้แตกต่างจากที่ได้คำนวณหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันเนื่องจากสาเหตุอะไร

### แบบฝึกหัดท้ายบท

1. รูปที่ 5.19 (ก) แสดงวงจรขยายขอสรรวม กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี  $K_N = 0.1 \text{ mA/V}^2$  และ  $V_{TH} = 1 \text{ V}$  ให้หาค่า  $V_{GS}$ ,  $I_D$  และ  $V_{DS}$
2. รูปที่ 5.19 (ข) แสดงวงจรขยายขอสรรวม กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี  $K_P = 0.2 \text{ mA/V}^2$  และ  $V_{TH} = -1.2 \text{ V}$  ให้หาค่า  $V_{GS}$ ,  $I_D$  และ  $V_{DS}$
3. กำหนดให้วงจรรูปที่ 5.19 (ค) วงจรตามแรงดัน กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี  $K_N = 0.5 \text{ mA/V}^2$  และ  $V_{TH} = 1 \text{ V}$  ให้หาค่า  $V_{GS}$ ,  $I_D$  และ  $V_{DS}$
4. รูปที่ 5.19 (ง) แสดงวงจรขยาย กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี  $K_N = 0.5 \text{ mA/V}^2$  และ  $V_{TH} = 1 \text{ V}$  ให้หาค่า  $V_{GS}$ ,  $I_D$  และ  $V_{DS}$



รูปที่ 5.19 (ก) วงจรขยายข้อสร่วมชนิด N-channel MOSFET (ข) วงจรขยายข้อสร่วมชนิด P-channel MOSFET (ค) วงจรตามแรงดัน และ (ง) วงจรไบอัสมอสเฟต

