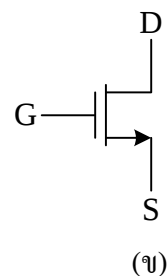
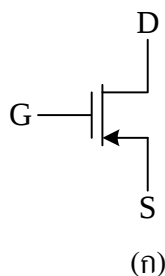


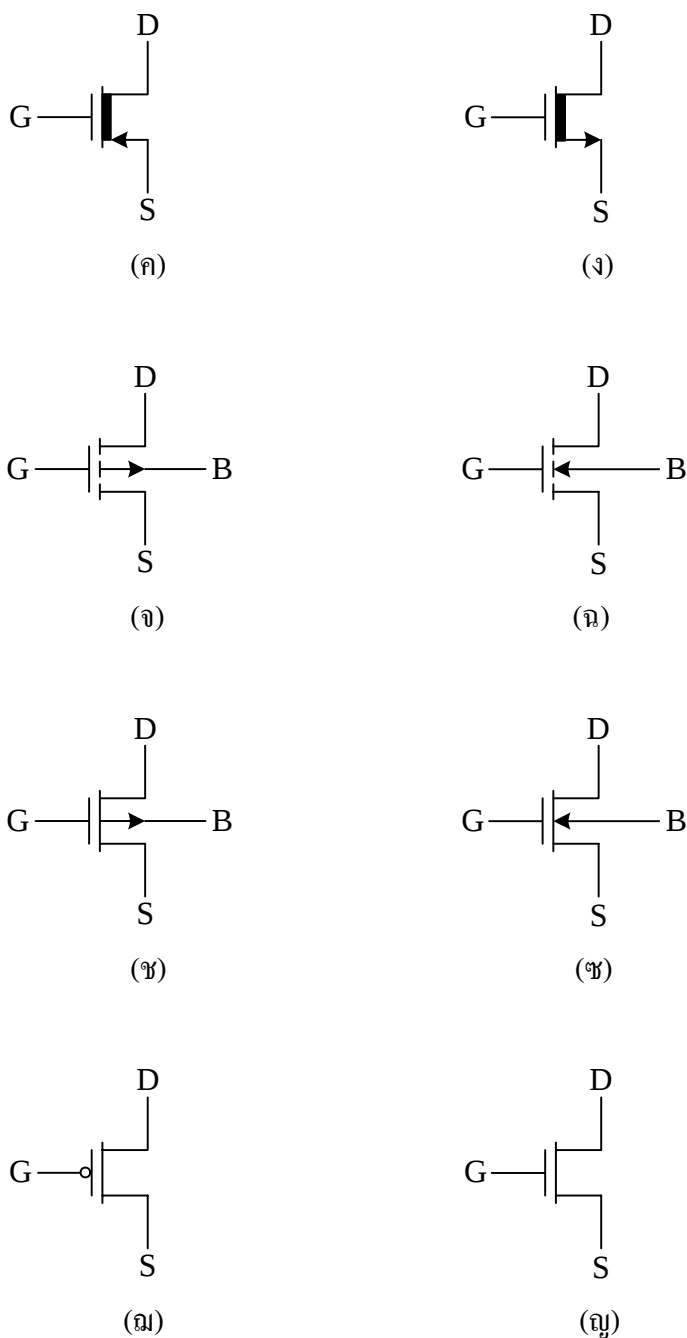
บทที่ 2

มอสทรานซิสเตอร์

2.1 บทนำ

มอสทรานซิสเตอร์ (MOS Transistor) คืออุปกรณ์ที่ใช้สนามไฟฟ้ามาควบคุมการไหลของกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน แนวความคิดเกี่ยวกับมอสทรานซิสเตอร์ได้มีการพัฒนามาก่อนการสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor) ในต้นทศวรรษ 1930 ได้มีหลักฐานแสดงถึงการจดสิทธิบัตรสำหรับอุปกรณ์ที่คล้ายกับซิลิกอนมอสทรานซิสเตอร์สมัยใหม่แต่ไม่ได้สร้างขึ้นจากซิลิกอน โดยในสมัยนั้นในกระบวนการสร้างมีความยากที่ การควบคุมรอยสัมผัสหรือรอยต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำยังมีความยุ่งยากอีกทั้งขาดความเข้าใจในกระบวนการของฉนวนและสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้อุปกรณ์ที่คล้ายมอสทรานซิสเตอร์ในสมัยนั้นไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ จนกระทั่งมีการเกิดขึ้นมาของกระบวนการ Silicon planar และเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่สามารถควบคุมรอยต่อระหว่างออกไซด์และซิลิกอนได้ดี ทำให้มอสทรานซิสเตอร์สามารถนำมาใช้งานได้จริงและเป็นที่แพร่หลายในปลายทศวรรษ 1970 จนกระทั่งถึงปัจจุบันนี้ มอสเป็นทรานซิสเตอร์ที่ทำงานโดยผลของสนามไฟฟ้าสามารถถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้หลายแบบขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่ง เช่น ถ้าแบ่งตามชนิดของพาหะที่ใช้ในการนำกระแสจะสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิด คือมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล (n-channel MOS Transistor) ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้อิเล็กตรอนในการนำกระแสและมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนล (p-channel MOS Transistor) เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้โฮลเป็นพาหะในการนำกระแส สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีและเอ็นแชนแนลแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 แต่ถ้าแบ่งมอสทรานซิสเตอร์ตามลักษณะการทำงานจะสามารถแบ่งได้สองลักษณะคือทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (Enhancement Mode Transistor) และแบบดีพลีชัน โหมด (Depletion Mode Transistor)



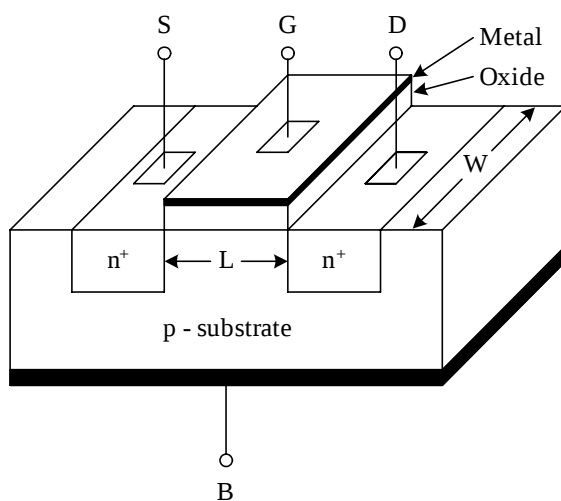


รูปที่ 2.1 มออสทรานซิสเตอร์ชนิดต่างๆ

2.2 มออสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์

มออสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์เป็นชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากกว่าชนิดดีฟลิชันเพราะสามารถสร้างได้ด้วยเทคโนโลยีซีมอสแบบมาตรฐานโดยไม่ต้องใช้วิธีการที่พิเศษ รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างมออสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์แบบเอ็นแซนแนล ส่วนของซอร์ส (Source) และเดรน (Drain) สร้างขึ้นจากการแพร่อะตอมของสารเจือชนิดเอ็น (n-Type) ที่มี

ความหนาแน่นสูง (n^+) เข้าไปในแผ่นผลึกฐานรอง (Body หรือ Substrate) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-Type) ซึ่งเป็นแผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยว ส่วนของเกต (Gate) จะเป็นโลหะหรือชั้นของโพลีซิลิกอนที่ซ้อนอยู่บนชั้นของออกไซด์โดยมีโลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วต่อไฟฟ้า การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลที่โดยอธิบายเทียบกับทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลสามารถพิจารณาได้ตามโครงสร้างรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงถึงการทำงานในช่วงต่างๆ ของ V_{DS} และ V_{GS} จากรูป 2.3(ก) ซอร์ส เคนและฐานต่อลงกราวด์ ในกรณีนี้มีผลทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานคล้ายกับตัวเก็บประจุโดยเกตและผิวของซิลิกอนได้ฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ทำหน้าที่เสมือนแผ่นระนาบ (Plate) ของตัวเก็บประจุ ซึ่งมีซิลิกอนไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นฉนวนคั่นระหว่างกลาง ถ้า V_{GS} มีค่าเป็นลบ ประจุพาหะชนิดบวกหรือโฮล (Hole) จะถูกดูดเข้ามาสะสมบริเวณแชนแนลมีผลให้บริเวณแชนแนลกลายเป็น p^+ และเรียกว่า “แชนแนลสะสม” (Accumulate Channel) บริเวณซอร์สและเคนที่เป็น n^+ ถูกแยกจากกันด้วยแชนแนล p^+ เมื่อมองในลักษณะวงจรสมมูลย์แล้วจะพบว่า มีลักษณะของไดโอดสองตัวต่อกันหลังชนกัน ดังนั้นถ้าจะเกิดกระแสไหลได้แรงดันที่ซอร์สและเคนจะต้องมีค่ามากๆ ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นจะเป็นกระแสรั่วไหลหรือกรณีที่แรงดันเคนซอร์สมีค่ามากๆ จะทำให้ทรานซิสเตอร์เบรกดาวน์ ในกรณีที่แรงดันเกตมีค่าเป็นบวกไม่มาก ประจุบวกข้างใต้เกตจะถูกผลักออกไปทำให้แชนแนลเปลี่ยนไปเป็น p^- และเป็นบริเวณปลดพาหะ (Depletion region) ในที่สุด เมื่อแรงดันที่เกตเพิ่มมากขึ้นประจุลบหรืออิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดเข้ามาที่บริเวณแชนแนลและแชนแนลจะแปรสภาพเป็นบริเวณ n ตามรูป 2.3(ข) ซึ่งเชื่อมต่อบริเวณซอร์สและเคนเข้าด้วยกันและเรียกว่า แชนแนลกลับ (Inverted Channel) แรงดันเกตซอร์สที่ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนใต้เกตมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของโฮลบริเวณฐานรองเป็นนิยามของแรงดันแทรชโฮล (Threshold voltage) ของมอสทรานซิสเตอร์ใช้สัญลักษณ์ V_T



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล

เมื่อแรงดันเกตชอล์กส์มีค่ามากกว่า V_T จะมีเซนแนลชนิดเอ็นเกิดขึ้นและสามารถเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างเดรนและซอร์สได้ สำหรับกรณีค่าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สน้อยกว่า V_T ปกติจะสมมติว่าทรานซิสเตอร์ไม่ทำงานและไม่มีการแสไหลระหว่างซอร์สและเดรน อย่างไรก็ตามสมมติว่าไม่มีการแสไหลระหว่างซอร์สและเดรนระหว่างที่ทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแส นั่นเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น ในความเป็นจริงสำหรับแรงดันที่เกตมีค่าใกล้เคียง V_T จะไม่ใช่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างทันทีทันใดแต่จะเกิดกระแสต่ำกว่าแทรชโฮล (Subthreshold Current) สามารถไหลได้ในปริมาณเล็กน้อยซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

เมื่อแรงดันระหว่างเกตและซอร์ส V_{GS} มีค่ามากกว่า V_T จะทำให้เซนแนลเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อ V_{GS} เพิ่มขึ้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเซนแนลก็จะเพิ่มขึ้นด้วยและสรุปได้ว่าความหนาแน่นของประจุพาหะจะแปรผันตาม $V_{GS} - V_T$ ซึ่งนิยามเป็นแรงดันระหว่างเกตและซอร์สประสิทธิภาพซึ่งใช้สัญลักษณ์คือ “ V_{eff} ” ซึ่งค่าความหนาแน่นของประจุอิเล็กตรอนกำหนดได้คือ

$$Q = C_{ox}(V_{GS} - V_T) = C_{ox}V_{eff} \quad (2.1)$$

เมื่อ C_{ox} เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เมื่อแรงดันที่เดรนมีค่ามากกว่าศูนย์โวลต์เล็กน้อยทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างซอร์สและเดรน มีผลให้เกิดกระแสไหลจากเดรนไปซอร์ส ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} และกระแส I_D จะเหมือนกับกรณีของความต้านทานซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น

$$I_D = \mu Q \frac{W}{L} V_{DS} \quad (2.2)$$

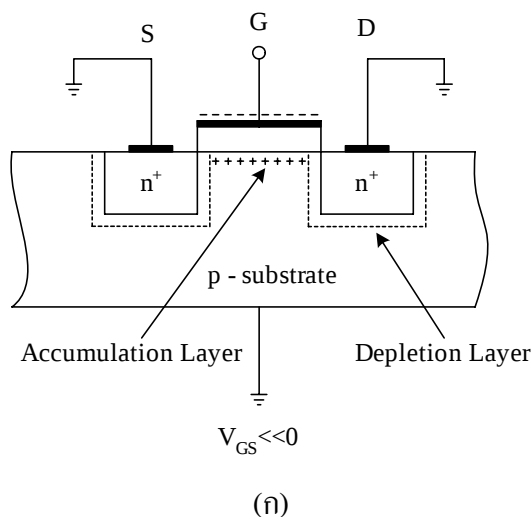
ในขณะที่ μ เป็นค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิวซิลิกอนและ Q เป็นค่าความหนาแน่นของประจุในเซนแนลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะได้ว่า

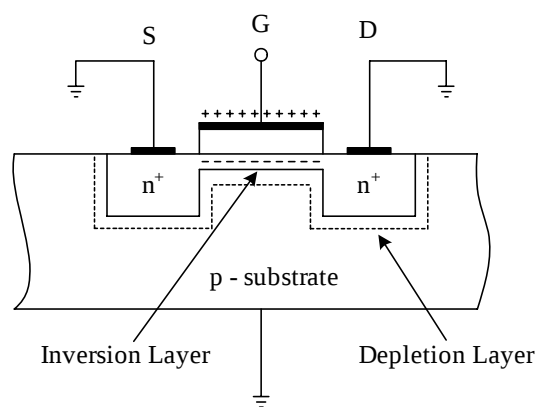
$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad (2.3)$$

สมการ (2.3) เป็นความสัมพันธ์ที่สามารถใช้ได้เพียงกรณีแรงดันระหว่างเดรนและซอร์สมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ในเชิงโครงสร้างอธิบายได้ตามรูปที่ 2.3(ข) โดยเมื่อ V_{GS} มากกว่า V_T และ $V_{DS}=0V$ ซึ่งขณะนี้เซนแนลถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นแต่ไม่มีการแสไหลเนื่องจากแรงดันระหว่างซอร์สและเดรนมีค่าเป็นศูนย์โวลต์และเมื่อให้แรงดัน V_{GS} ค่าน้อยๆ กำหนด

จะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านแซนแนลได้ ซึ่งการทำงานของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้เสมือนเป็นตัวต้านทานมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ (2.3) และแสดงได้ด้วยกราฟในรูปที่ 2.3(ข) และจะเห็นว่า I_D และ V_{DS} สัมพันธ์กันอย่างสิ้นเชิงสำหรับค่า V_{GS} น้อยๆ

เมื่อแรงดันระหว่างเกตและซอร์สเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของประจุพาหะที่แซนแนลจะลดลงตามแนวแซนแนลจากซอร์สไปเดรนตามรูปที่ 2.3(ค) การลดลงของประจุพาหะในแซนแนลนี้มีผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมแซนแนลที่ตำแหน่งต่างๆ ไม่เท่ากัน กล่าวคือสมมติว่าแรงดันที่เดรนมีค่ามากกว่าแรงดันที่ซอร์ส จะมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันจากซอร์สไปเดรนอย่างต่อเนื่องภายในแซนแนล มีผลทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างเกตและแซนแนลจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ V_{GS} ที่ตำแหน่งด้านซอร์สและแรงดันเกตแซนแนลมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งปลายด้านเดรนและแรงดันเกตที่ทำให้เกิดแซนแนลคือ $V_G = V_{GS} - V_T$ เมื่อ $V_{GS} < V_T$ กระแสจะไม่ไหลและไม่มีแซนแนลเกิดขึ้นเพื่อที่จะทำให้แซนแนลเกิดขึ้นได้เป็นแนวยาวไปจนถึงสุดปลายด้านเดรน แรงดันเกตจะต้องมีค่ามากกว่า V_{DS} นั่นคือ $V_G > V_{DS}$ หรือ $V_{GS} - V_T > V_{DS}$ ซึ่งหมายถึงแรงดันที่เกตเมื่อเปรียบเทียบกับทุกจุดในแนวแซนแนลจะต้องมีศักย์เป็นบวกจึงจะทำให้เกิดแซนแนล โดยในขณะนี้ทรานซิสเตอร์ทำงานและอยู่ในช่วงอิ่มตัว กระแสเดรน I_D จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของแรงดัน V_{DS} อย่างไม่เป็นเชิงเส้นตามกราฟในรูปที่ 2.3(ค) การทำงานของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้ $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ เรียกว่า ช่วงไม่อิ่มตัว (Non-saturation region) เมื่อ V_{DS} มีค่ามากขึ้น จนกระทั่งค่า $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ ทรานซิสเตอร์เริ่มเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวและลักษณะโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้แสดงได้ดังรูป 2.3(ค)

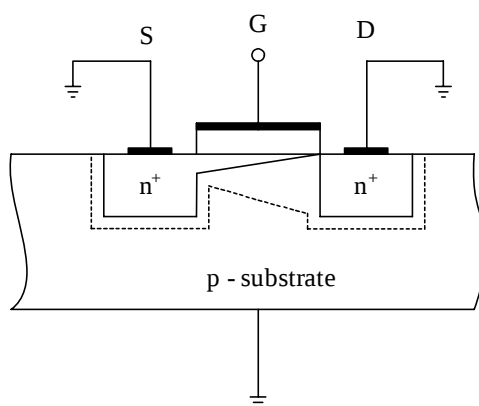




$$V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} = 0$$

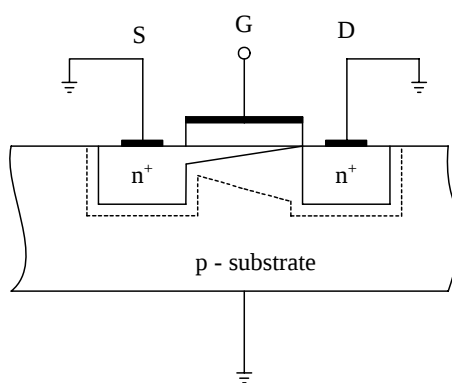
(จ)



$$V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

(ข)



$$V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

(ค)

รูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ในช่วงต่างๆ

และเมื่อค่าของแรงดัน V_{DS} เพิ่มขึ้นไปอีกจนกระทั่ง $V_{GS} > V_{DS} - V_T$ ในกรณีนี้แรงดันที่ตกคร่อมแซนแนลที่ปลายด้านเดรนมีค่าสูงกว่า $V_{GS} - V_{DS}$ ดังนั้นจะทำให้เกิดภาวะพินช์ออฟ (Pinch off) กล่าวคือ แซนแนลซึ่งเป็นช่องทางเดินกระแสจะขาดออก เริ่มจากบริเวณด้านเดรน ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าซึ่งจะมาเหนี่ยวนำให้มีการสะสมของประจุลบ เพื่อทำหน้าที่เป็นแซนแนล ดังนั้นช่องทางเดินกระแสจึงขาดออกจากกันดังแสดงดังรูป 2.3(ง) และจะมีกระแสแพร่ (Diffusion current) จากส่วนของซอร์สไปยังเดรน ช่องทางเดินกระแสจะแสดงคุณสมบัติความต้านทานสูงและคล้ายกับเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ กระแสเดรนในภาวะนี้จึงมีค่าคงที่แม้ว่า V_{DS} จะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตามแสดงในกราฟตามรูปที่ 2.3(ง) การทำงานของทรานซิสเตอร์ในย่านนี้เรียกว่าช่วงอิ่มตัว (Saturation region) คุณสมบัติการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์จะพิจารณาได้จากแบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่ (Large-signal model) ดังรูปที่ 2.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันสำหรับมอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัวสามารถแสดงได้คือ

$$I_D = K \left[(V_{GS} - V_T) - \left(\frac{V_{DS}}{2} \right) \right] V_{DS} (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2.4)$$

โดยที่ $K = K' W/L$

$$K' = \mu_0 C_{ox}$$

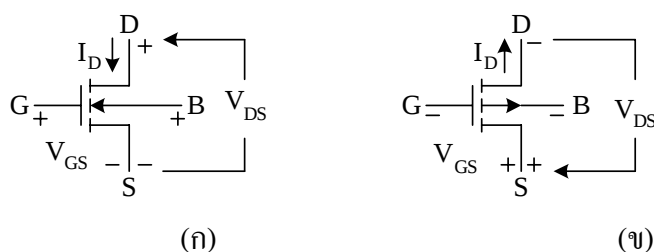
μ_0 คือค่าความคล่องตัวของพาหะในช่องทางเดินกระแส ($\text{cm}^2/\text{volt} \cdot \text{second}$)

$C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$ คือค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของเกตออกไซด์ (F/cm^2)

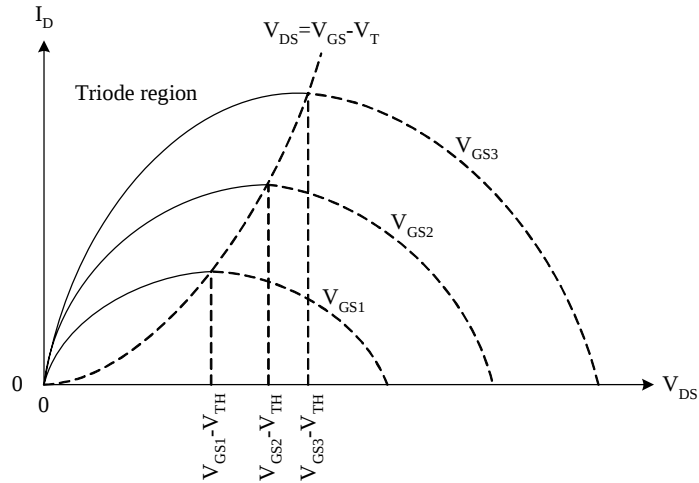
W คือความกว้างประสิทธิผลของแซนแนล

L คือความยาวประสิทธิผลของแซนแนล (Effective channel length)

λ คือ Channel length modulation parameter (volt^{-1})



รูปที่ 2.4 การไบอัสมอสทรานซิสเตอร์ (ก) NMOS (ข) PMOS



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_{DS} เมื่อ $\lambda=0$

แรงดันแทชโวลต์กำหนดได้คือ

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{2|\phi_F| + V_{SB}} - \sqrt{2|\phi_F|} \right) \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.4) สามารถทำงานได้ในช่วงต่างๆ ขึ้นกับค่า $V_{GS} - V_T$ ถ้าค่า $V_{GS} - V_T$ เป็นศูนย์หรือลบ มอสทรานซิสเตอร์จะอยู่ในช่วงคัทออฟซึ่งแน่นอนจะมีพฤติกรรมเหมือนเปิดวงจรซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้เป็น

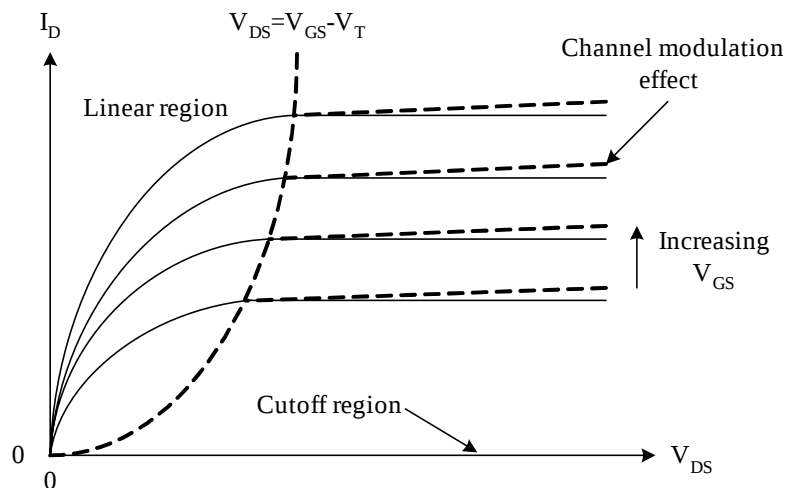
$$I_D = 0 \text{ เมื่อ } (V_{GS} - V_T) \leq 0 \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.4) สมมติให้ $\lambda=0$ นำมาเขียนกราฟได้ตามรูปที่ 2.5 สำหรับค่า $V_{GS} - V_T$ ค่าต่างๆ จุดสูงสุดของกราฟแต่ละเส้นเรียกว่าจุดอิ่มตัว โดยค่าต่างๆ ของ V_{DS} ที่เกิดขึ้นที่ค่านี้เรียกว่าแรงดันอิ่มตัว

$$V_{DS(sat)} = V_{GS} - V_T \quad (2.7)$$

$V_{DS(sat)}$ เป็นค่าที่แบ่งขอบเขตการทำงานโดยค่า V_{DS} น้อยกว่า $V_{DS(sat)}$ แล้วมอสทรานซิสเตอร์จะทำงานในช่วงไม่อิ่มตัวตามสมการ (2.4) และมีเงื่อนไขว่า

$$0 < V_{DS} \leq (V_{GS} - V_T) \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติทางเอาต์พุตของมอสทรานซิสเตอร์

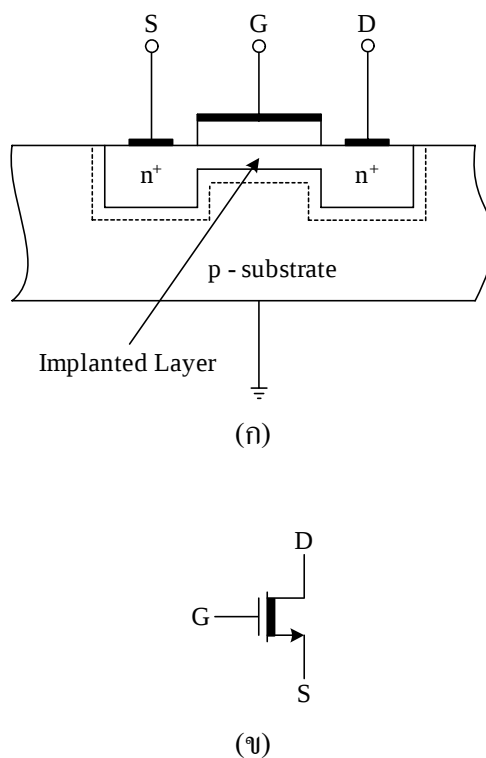
เมื่อ V_{DS} มีค่ามากกว่า $V_{DS(sat)}$ ช่วงนี้เรียกว่าช่วงอิ่มตัว ช่วงนี้กระแส I_D ไม่ขึ้นกับ V_{DS} ถ้าสมมุติว่าไม่พิจารณาผลของ λ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ตามสมการคือ

$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) ; 0 < (V_{GS} - V_T) \leq V_{DS} \quad (2.9)$$

จากรูปที่ 2.6 แสดงถึงคุณสมบัติทางเอาต์พุตของมอสทรานซิสเตอร์ที่ได้จากสมการที่ (2.4) (2.6), (2.7) (2.8) และ (2.9) โดยที่เส้นทึบคือกราฟที่ไม่พิจารณาถึงผลของ λ ($\lambda=0$) ส่วนเส้นประคือกราฟที่พิจารณาผลของ λ ($\lambda \neq 0$) รวมอยู่ด้วย

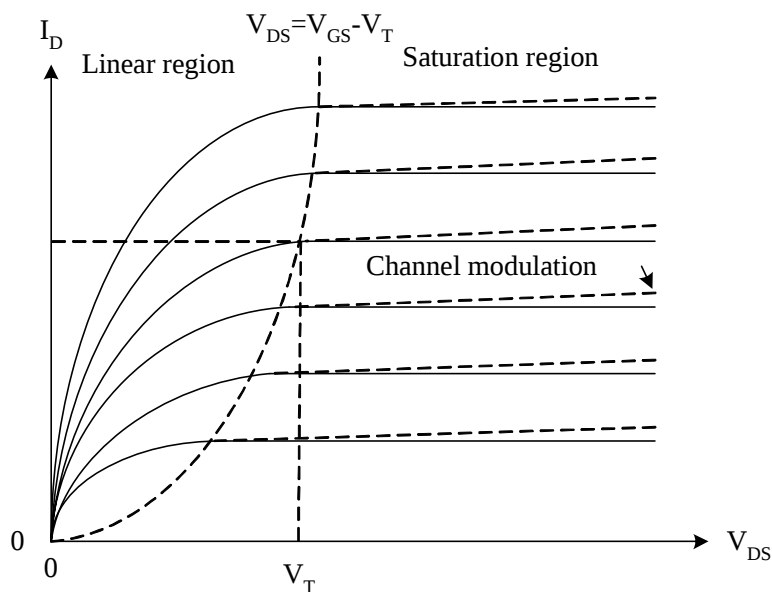
2.3 มอสทรานซิสเตอร์ชนิดดีฟลิชัน

ดีฟลิชันมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลมีลักษณะโครงสร้างและสัญลักษณ์แสดงตามรูปที่ 2.7 โดยส่วนของซอร์สและเดรนจะถูกสร้างขึ้นโดยการแพร่อะตอมของสารเจือชนิดเอ็นซึ่งมีความหนาแน่นสูงเข้าไปในแผ่นผลึกฐานรองของสารกึ่งตัวนำชนิดพี หลังจากนั้นส่วนของแชนแนลจะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการอิมพลานเตชัน ซึ่งเป็นวิธีการยิงอะตอมสารเจือเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ส่วนลักษณะโครงสร้างอื่นๆ ของทรานซิสเตอร์แบบนี้จะเหมือนกับแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ทุกประการ

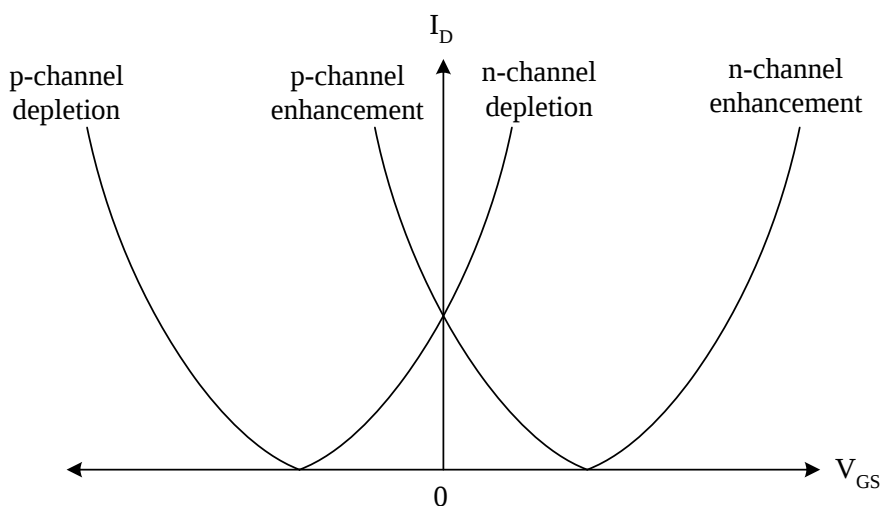


รูป 2.7 คีพลีชันมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนล (ก) โครงสร้าง (ข) สัญลักษณ์

จากลักษณะโครงสร้างในรูปที่ 2.7(ก) จะเห็นว่าขณะที่แรงดันเกตเป็นศูนย์และแรงดันซอร์สเดรน V_{DS} มีค่าๆ หนึ่งก็จะมีกระแสเดรนเกิดขึ้น นั่นคือแม้ว่าไม่มีแรงดันที่เกต กระแสก็สามารถไหลผ่านแชนแนลได้ เนื่องจากแชนแนลได้ถูกสร้างขึ้นมาก่อนแล้ว ซึ่งต่างจากกรณีเอ็นฮานซ์เมนต์ที่จำเป็นต้องให้แรงดันที่เกตมีค่าๆ หนึ่งเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนล การนำไฟฟ้าและความลึกของแชนแนลจะถูกควบคุมด้วย V_{DS} เหมือนกับกรณีของเอ็นฮานซ์เมนต์ เมื่อให้ค่า V_{GS} เป็นบวกจะทำให้ความกว้างขึ้น โดยการดึงอิเล็กตรอนเข้ามาสะสมที่แชนแนลและทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น เมื่อค่า V_{GS} เป็นลบอิเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากแชนแนล ทำให้แชนแนลแคบลง และการนำไฟฟ้าลดลงในการทำงานขณะที่ V_{GS} เป็นลบนั่นเรียกว่า การทำงานในช่วงคิพลีชันโหมด เมื่อ V_{GS} เป็นลบมากขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักออกไปจากแชนแนลจนหมดและแชนแนลหายไปทำให้กระแส I_D มีค่าเป็นศูนย์แม้ว่า V_{DS} ไม่เป็นศูนย์ก็ตาม โดยค่าที่เป็นลบของ V_{GS} ที่นำไปให้แชนแนลหายไปนั่นก็คือค่าแรงดันเทรชโฮลด์ของมอสทรานซิสเตอร์แบบคิพลีชันชนิดเอ็นแชนแนล



รูปที่ 2.8 คุณสมบัติ I_D - V_{DS} ของมอสทรานซิสเตอร์แบบดีฟิชั่นชนิดเอ็นแชนแนล



รูปที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติ I_D - V_{GS} ของมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมด

จากรูปที่ 2.8 ได้แสดงถึงคุณสมบัติ I_D - V_{DS} ของมอสทรานซิสเตอร์แบบดีฟิชั่นชนิดเอ็นแชนแนล ซึ่งคล้ายกับกรณีของเอ็นฮานซ์เมนต์ ยกเว้นค่า V_T มีค่าเป็นลบสำหรับ NMOS และเป็นบวกสำหรับ PMOS และสามารถทำงานเป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดได้ โดยการให้ค่า V_{GS} มีค่าเป็นบวก กราฟ I_D - V_{GS} ตามรูปที่ 2.9 เป็นการสรุปคุณสมบัติ I_D - V_{GS} ของมอสทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดและดีฟิชั่นโหมดและชนิดช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นและชนิดพี

2.4 วงจรสมมูลย์ของมอสทรานซิสเตอร์

วงจรสมมูลย์ (Small-signal equivalent circuit) ของมอสทรานซิสเตอร์เป็นการแทนอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์ด้วยวงจรไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองหรือพฤติกรรมของสัญญาณขนาดเล็กโดยพิจารณาแยกกับการวิเคราะห์สัญญาณขนาดใหญ่ซึ่งพิจารณาเป็นปริมาณทางไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งได้กล่าวก่อนหน้านี้ มอสทรานซิสเตอร์มีพฤติกรรมเป็นแรงดันควบคุมแหล่งกำเนิดกระแส (Voltage-controlled current source) โดยเป็นการให้สัญญาณ v_{gs} และทำให้เกิดกระแส $g_m v_{gs}$ ที่ปลายด้านเดรน ความต้านทานที่ทางอินพุตมีค่าสูงมากในทางปฏิบัติ ซึ่งในทางอุดมคติถือว่ามีค่าเป็นอนันต์ความต้านทานที่ทางออก (ความต้านทานที่มองเข้าไปที่ปลายด้านเดรน) มีค่าสูง ในการพิจารณาอย่างง่าย ๆ จะสมมุติว่ามีค่าเป็นอนันต์ตามรูปที่ 2.10(ก) ข้อเสียของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กในรูป 2.10(ก) ก็จะเป็นการสมมุติว่ากระแสเดรนจะอยู่ในช่วงอิ่มตัวและไม่ขึ้นกับแรงดันเดรน ซึ่งจากหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ในช่วงอิ่มตัวนั้นจริงๆ แล้วขึ้นอยู่กับ V_{DS} ในลักษณะเชิงเส้น ทำให้แบบจำลองได้เปลี่ยนไปเป็นรูป 2.10(ข) โดยมีตัวต้านทาน r_o มาต่ออยู่ระหว่างเดรนและซอร์สซึ่งมีค่าประมาณ

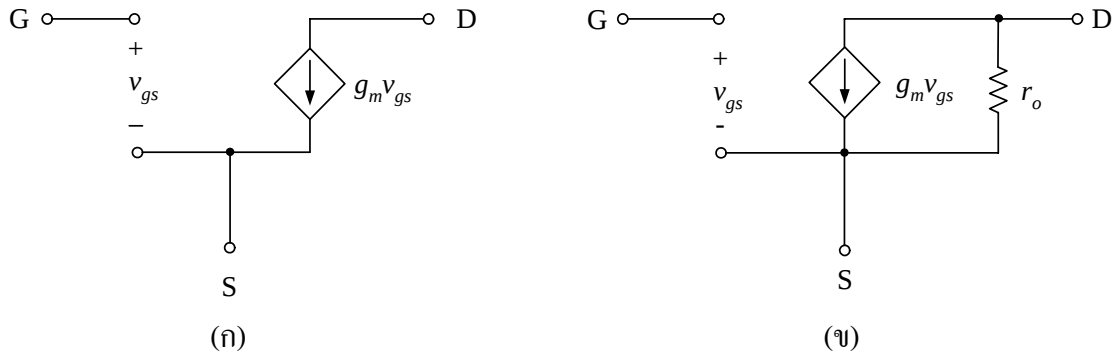
$$r_o \cong \frac{|V_A|}{I_D} \quad (2.10)$$

ขณะที่ $V_A = 1/\lambda$ โดยทั่วไปค่า r_o อยู่ในช่วง 10 ถึง 1000 k Ω ค่า r_o ที่พิจารณาข้างต้นเป็นการพิจารณาโมสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงอิ่มตัว ซึ่งให้ค่าความต้านทานที่ทางออกมีค่ามาก (แซนแนลขาดออกจากกันระหว่างซอร์สและเดรน) แต่ขณะที่มอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัวนั้นค่าความต้านทานที่ทางออกจะมีค่าเป็น

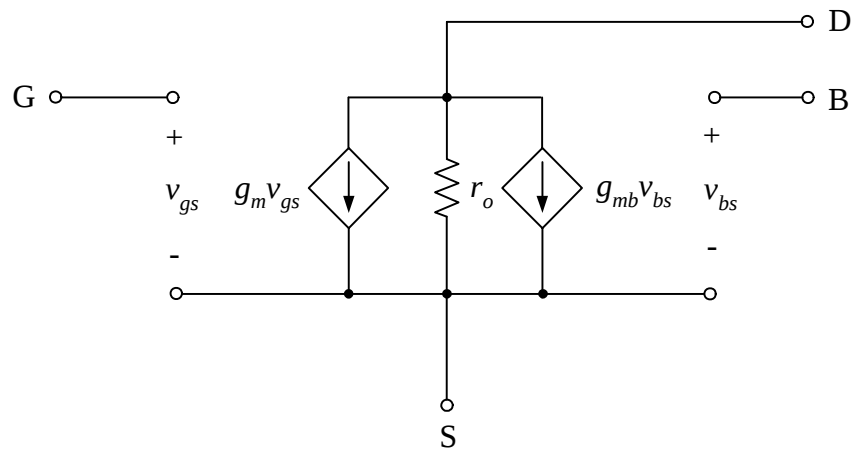
$$r_o = \frac{1}{g_{ds}} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_D} \cong \frac{1}{K(V_{GS} - V_T - V_{DS})} \quad (2.11)$$

เราจะพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กคือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m ซึ่งมีค่าคือ

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{gs}} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.10 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์ (ก) ไม่พิจารณาผลของ λ ขณะทำงานในช่วงอิ่มตัว (ข) พิจารณาผลของ λ โดยเพิ่มความต้านทานที่ทางออก



รูปที่ 2.11 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์กรณีที่ฐานรองไม่ต่ออยู่กับซอร์ส

ในกรณีที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัว จากสมการ (2.12) จะได้

$$g_m = \sqrt{\frac{2K'W}{L}|I_D|(1 + \lambda V_{DS})} \cong \sqrt{\frac{2K'W}{L}|I_D|} \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.13) พบว่าค่าของ g_m ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของสัญญาณขนาดเล็ก ขึ้นอยู่กับค่ากระแสเดรน I_D เป็นเงื่อนไขการทำงานของสัญญาณขนาดใหญ่และในกรณีที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัวจะได้

$$g_m = \frac{K'W}{L}V_{DS}(1 + \lambda V_{DS}) \cong \frac{K'W}{L}V_{DS} \quad (2.14)$$

แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่ได้กล่าวถึงข้างต้นเป็นแบบจำลองที่ยังไม่พิจารณาผลของฐานรอง (Body effect) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อฐานรองไม่ได้ต่ออยู่กับปลายด้านซอร์สและทำให้เกิด v_{bs} ขึ้น แสดงตาม รูปที่ 2.11 สัญญาณ v_{bs} จะทำให้เกิดกระแสเดรน $g_m v_{bs}$ โดย g_{mb} เป็นค่าทรานคอนดักแตนซ์ที่ฐานรอง

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{sb}} \right|_{v_{gs} = \text{constant}} \quad (2.15)$$

กรณีมอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิ่มตัวจะได้

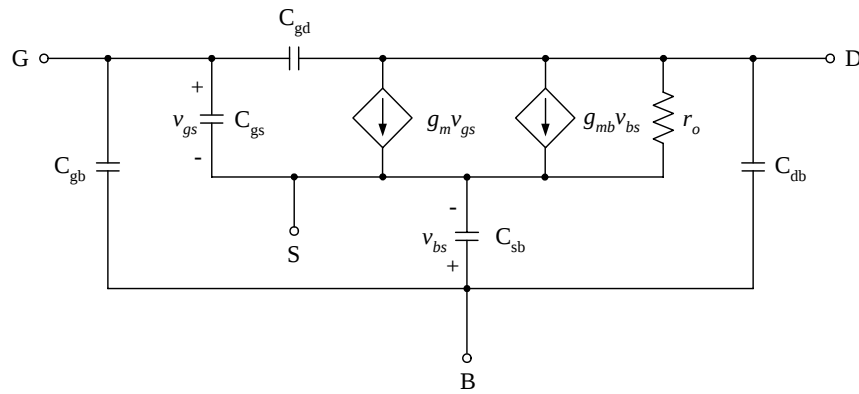
$$g_{mbs} = g_m \frac{\gamma}{2(2|\phi_F| + V_{SB})^{\frac{1}{2}}} = \eta g_m \quad (2.16)$$

กรณีที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัวจะได้

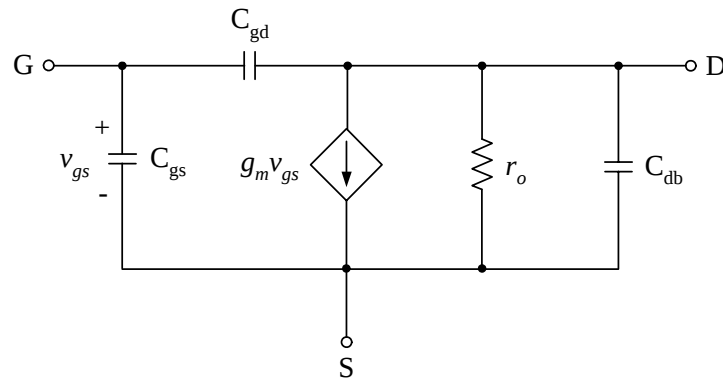
$$g_{mbs} = \frac{K\gamma\mathcal{W}_{DS}}{2(2|\phi_F| + V_{SB})^{\frac{1}{2}}} \quad (2.17)$$

2.5 ผลตอบสนองความถี่

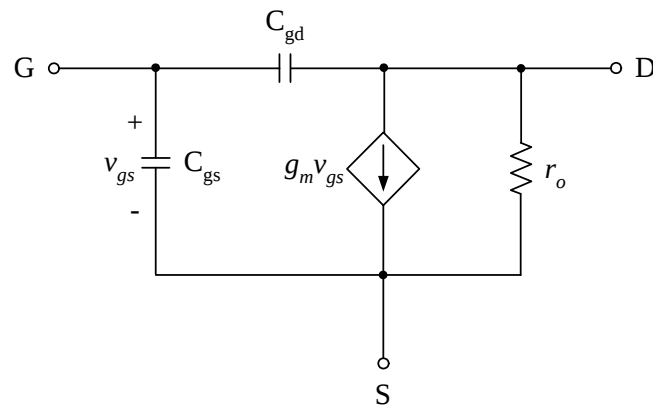
จากหัวข้อที่แล้วซึ่งได้กล่าวถึงวงจรสมมูลหรือแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์ ในหัวข้อนี้จะได้เสนอถึงแบบจำลองวงจรสมมูลของมอสทรานซิสเตอร์ที่ได้รวมเอาค่าความจุไฟฟ้ามาพิจารณาด้วย รูปที่ 2.12(ก) แสดงแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์ซึ่งรวมค่าความจุไฟฟ้าจำนวนห้าตัวคือ C_{gs} , C_{gd} , C_{gb} , C_{sb} และ C_{db} อย่างไรก็ตามวงจรนี้ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยมือแต่เหมาะสำหรับในการวิเคราะห์การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ รูปที่ 2.12(ข) แสดงวงจรสมมูลกรณีที่ซอร์สเชื่อมต่อกับฐานรอง ซึ่งวงจรที่ได้มีความสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่าวงจรในรูป 2.12(ก) มากแต่อย่างไรก็ตามวงจรในรูป 2.12(ก) คือวงจรที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ด้วยมือมากที่สุดโดยพิจารณาค่าความจุ C_{db} มีค่าน้อยมากๆ ซึ่งจะทำให้วงจรที่วิเคราะห์ได้ง่ายมากขึ้น ค่าความจุทั้งห้าที่ได้กล่าวถึงข้างต้นมีเพียงค่าความจุที่เกทซอร์ส C_{gs} เท่านั้นที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในบรรดาค่าความจุทั้งห้า และเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์และพิจารณาที่ความถี่สูง ขณะที่ค่าความจุ C_{sb} และ C_{db} เป็นค่าความจุแฝงในย่านดีฟิซิชั่นระหว่างฐานรองกับซอร์สและฐานรองกับเดรนตามลำดับ และมีค่าเป็น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.12 (ก) แบบจำลองวงจรสมมูลย์ของมอสทรานซิสเตอร์ที่ความถี่สูง (ข) วงจรสมมูลย์สำหรับกรณีที่ซอร์สต่อกับฐานรอง (ค) วงจรสมมูลย์ตามรูป (ข) กรณีที่ C_{db} มีค่าน้อยมากๆ

ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างเกตและฐานรอง (C_{gb}) เป็นค่าความจุไฟฟ้าแฝงของออกไซด์ (Parasitic oxide capacitance) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างชั้นสารทางด้านเกต (โลหะหรือโพลีซิลิกอน) กับฐานรอง โดยค่าความจุไฟฟ้า C_{gb} มีค่าคงที่ แต่จริงๆ แล้วค่าความจุไฟฟ้าแฝงชนิดนี้จะวางตัวตามแนวโพลีซิลิกอนและโลหะบนแผ่นชิพและจะถูกพิจารณาเฉพาะการจำลองและการคำนวณของวงจรและคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่มีความถี่สูง โดยใช้คอมพิวเตอร์ค่าโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับความหนาของ

ออกไซด์และมีความอยู่ในช่วง 0.04fF ถึง 0.15fF ต่อตารางไมครอนของรอยต่อที่เชื่อมลั้กัน ค่าความจุไฟฟ้า C_{gs} และ C_{gd} เกิดจากเกทกับซอสและเกทกับเดรน ตามลำดับ โดยที่ C_{ox} เป็นค่าความจุออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จากเกทถึงเซนแนล ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมดข้างได้เกทมีค่าเท่ากับ $C_{ox}WL$ ซึ่งค่านี้เป็นค่าโดยแท้จริงของการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์และเป็นรูปแบบการใช้งานในการควบคุมให้เกิดการนำไฟฟ้าที่เซนแนลขณะที่ช่วงที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงไม่อิ่มตัว ค่าความจุไฟฟ้านี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กันระหว่างซอสและเดรนจะได้

$$C_{gs} = C_{gd} = \frac{1}{2} C_{ox} WL \quad (2.18)$$

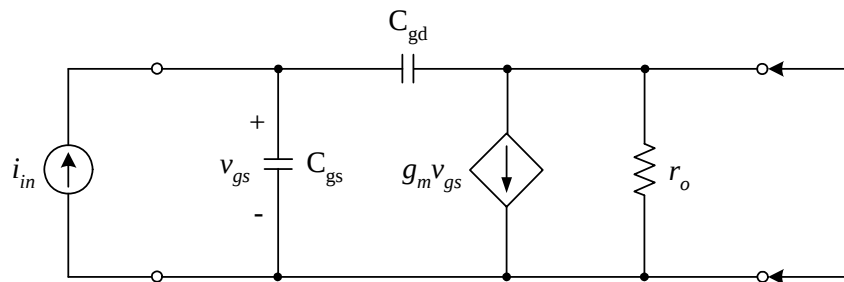
ขณะที่มอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิ่มตัว เซนแนลจะหดรัดแคบลงจนขาดออกที่ปลายด้านเดรน ซึ่งทำให้แรงดันเดรนมีผลเพียงเล็กน้อยต่อทั้งเซนแนลและประจุที่เกท ดังนั้นส่วนหนึ่งของค่า C_{gd} โดยทั่วไปแล้วมีค่าเป็นศูนย์ในช่วงการทำงานอิ่มตัว ขณะที่อีกส่วนซึ่งเกิดจากค่าความจุแฝงที่ออกไซด์เนื่องจากบางส่วนของเกทซ้อนทับกับบางส่วนของเดรน โดยค่า C_{gd} มีค่าอยู่ในระดับ 1fF ถึง 10fF ในการคำนวณค่า C_{gs} ในช่วงอิ่มตัวเราจะต้องคำนวณค่าจำนวนประจุทั้งหมด Q_T ที่อยู่ในเซนแนล จะได้

$$Q_T = \frac{2}{3} WLC_{ox}(V_{GT} - V_T) \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$C_{gs} = \frac{\partial Q_T}{\partial V_{gs}} = \frac{2}{3} WLC_{ox} \quad (2.20)$$

นอกจากนี้ค่าความจุ C_{gs} ยังต้องกรรวมกับส่วนที่เกิดจากค่าความจุออกไซด์เนื่องจากพื้นที่บางส่วนของเกทซ้อนทับพื้นที่บางส่วนของซอร์ส



รูปที่ 2.13 การหาอัตราขยายกระแสขณะปัดวงจร

คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการทำงานที่ความถี่สูงของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็น วงจรขยายคือความถี่ที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง (Unity-gain frequency) คือ f_T โดยมีนิยามว่าเป็น ความถี่ที่อัตราขยายกระแสของมอสทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในรูปแบบวงจรคอมมอนซอร์สที่มีค่าเป็น หนึ่งขณะที่ปัดวงจร รูปที่ 2.13 แสดงแบบจำลองแบบ Hybrid- π ของมอสทรานซิสเตอร์ในลักษณะ คอมมอนซอร์สระหว่างขั้วอินพุตและขั้วเอาต์พุต ในการหาอัตราขยายกระแสขณะปัดวงจร จะต้องทำการป้อนกระแส i_i ที่อินพุตและที่เอาต์พุตปัดวงจร กระแสที่เอาต์พุตสามารถเขียนได้คือ

$$i_o = g_m v_{gs} - sC_{gd} v_{gs} \quad (2.21)$$

เนื่องจากค่า C_{gd} มีค่าน้อยมาก ทำให้พจน์หลังของสมการ (2.21) มีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นสมการที่ (2.21) สามารถประมาณได้คือ

$$i_o \cong g_m v_{gs} \quad (2.22)$$

จากรูปที่ 2.13 สามารถแสดงค่า v_{gs} ในพจน์ของกระแสอินพุต i_i ได้คือ

$$v_{gs} = \frac{i_i}{s(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.22) และ (2.23) จะได้อัตราขยายกระแสขณะปัดวงจรได้เป็น

$$\frac{i_o}{i_i} = \frac{g_m}{s(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2.24)$$

เมื่อ $s=j\omega$ จะได้อัตราขยายกระแสเท่ากับหนึ่งที่ความถี่

$$\omega_T = g_m / (C_{gs} + C_{gd}) \quad (2.24)$$

ดังนั้นความถี่ที่อัตราขยายเท่ากับหนึ่ง ค่า f_T คือ

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) จะเห็นว่าค่า f_T แปรผันตามค่า g_m และแปรผกผันกับค่าความจุไฟฟ้าภายในตัวมอสทรานซิสเตอร์ เมื่อแทนค่า g_m ลงในสมการที่ (2.26) เราจะได้พบว่าค่า f_T จะขึ้นอยู่กับกระแสเดรน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากระแสเดรนมีส่วนในการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ที่ความถี่สูง โดยทั่วไปค่าของ f_T จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 100MHz สำหรับเทคโนโลยีแบบเก่า เช่น เทคโนโลยีซีมอสขนาด 5 μ m แต่ถ้าเป็นเทคโนโลยีความเร็วสูงที่ใหม่กว่า เช่น เทคโนโลยีซีมอสขนาด 0.8 μ m จะมีค่า f_T อยู่ในช่วงหลายๆ GHz

2.6 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ โดยได้แบ่งมอสทรานซิสเตอร์ออกเป็น 2 ชนิด คือ มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์และชนิดดีฟลิชัน โครงสร้าง การเกิดช่องทางเดินกระแส แบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่และขนาดเล็กของมอสทรานซิสเตอร์คือเนื้อหาที่ได้กล่าวถึง แบบจำลองทั้งสองแบบของมอสทรานซิสเตอร์จะถูกใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรที่จะนำเสนอ