



วิศวลาดกระบัง

ต้องเป็นหนึ่ง

และเป็นที่พึ่งของสังคม

มอสเฟต (MOSFET)

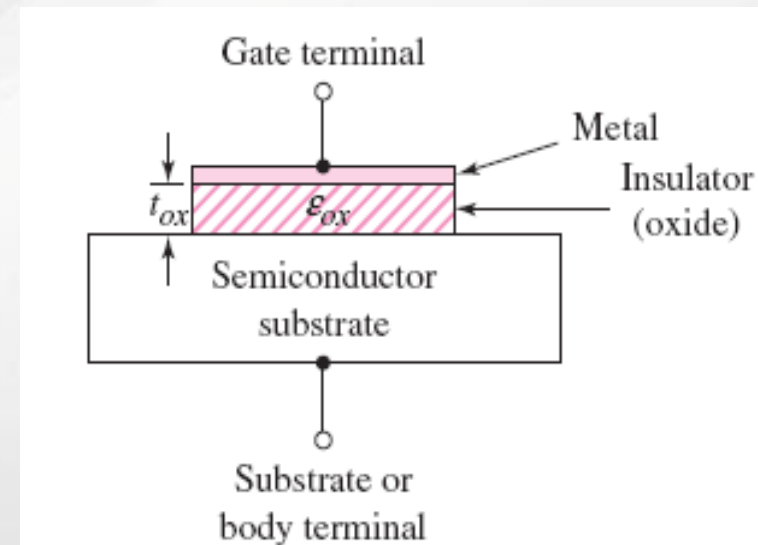
- ทรานซิสเตอร์ในยุคที่สองที่เรียกว่า “ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า” (Field effect transistors , FET) และได้มีการพัฒนาต่อไปเป็น FET ในยุคที่สอง เรียกว่า “มอสเฟต” (MOSFET) ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่นำไปสู่การสร้างวงจรรวมหรือไอซี (IC) ทำให้เกิดการปฏิวัติทางอิเล็กทรอนิกส์นำไปสู่การสร้างวงจรรวมขนาดใหญ่หรือ VLSI ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของไมโครโปรเซสเซอร์และหน่วยความจำ

มอสเฟต (MOSFET)

- “มอสเฟต” หรือ Metal oxide semiconductor field effect transistor เป็นทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นในช่วง ทศวรรษ 1970s ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ในยุคที่สองหลังจากที่ได้มีการสร้างทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ (BJT) มาก่อนหน้านี้ แล้ว MOSFET เป็นทรานซิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติดีกว่าทรานซิสเตอร์ BJT ที่สามารถสร้างได้ง่ายกว่า BJT มาก และยังสามารถลดขนาดให้เล็กลงได้ จึงทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้
- นอกจากนี้การสร้างวงจรโดยใช้ MOSFET ไม่จำเป็นต้องใช้ ตัวต้านทานหรือไดโอด ช่วยในการไบอัสวงจร เหมือนกับทรานซิสเตอร์ BJT เนื่องจาก MOSFET สามารถทำงานได้โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในการไบอัส ซึ่งต่างจากทรานซิสเตอร์ BJT ที่ต้องใช้กระแส(การป้อนกระแส ซึ่งจะทำให้เกิดกระแส I_B และ I_C ตามลำดับ)ทำให้วงจร MOSFET มีขนาดเล็กกว่าวงจรของ BJT
- ในการทำงานของมอสเฟส กระแสจะถูกควบคุมโดยการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าที่บริเวณพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำทั้งสองฝั่ง ปรากฏการณ์นี้ที่เคยมาใช้ในการมอดูเลตตัวเก็บประจุของสารกึ่งตัวนำ หรือการควบคุมกระแสในสารกึ่งตัวนำ โดยในการที่ป้อนสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับพื้นผิวนี้จะถูกเรียกว่า field effect

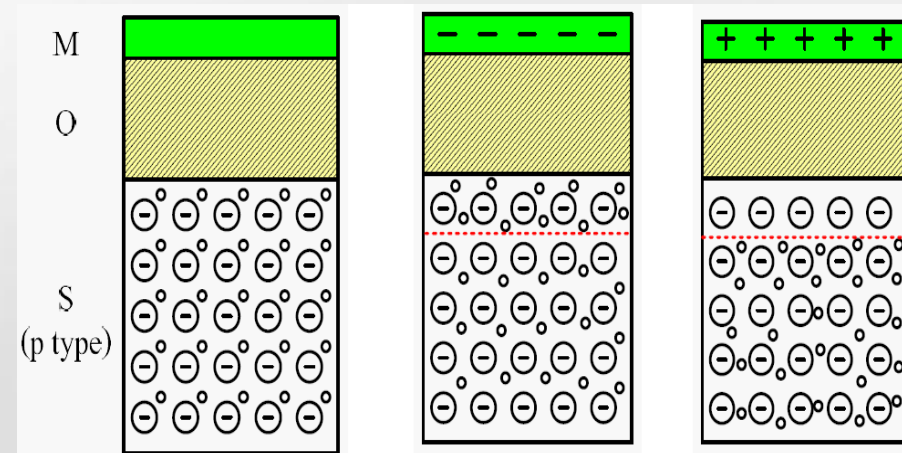
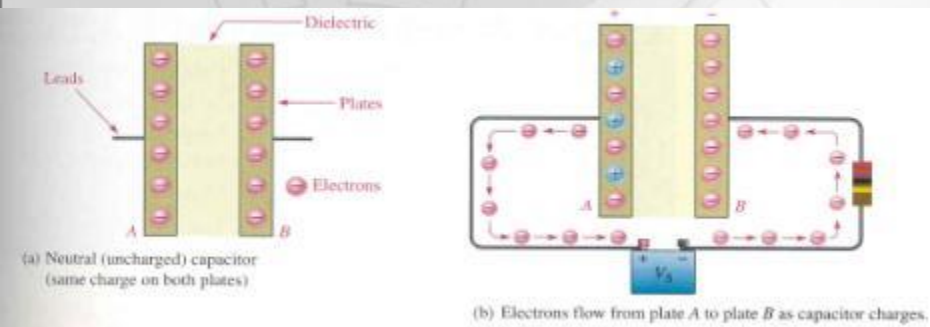
โครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุมอส (MOS capacitor)

- หัวใจสำคัญของ MOSFET ก็คือการสร้างตัวเก็บประจุจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide semiconductor capacitor) แสดงดังรูป 5-1 โลหะที่กล่าวถึงนี้อาจเป็น อลูมิเนียม หรือสารบางอย่างที่มีความนำไฟฟ้าสูงเช่น polycrystalline silicon ก็ได้ โดย เป็นค่าเป็นความหนาของออกไซด์โลหะ t_{ox} และ ϵ_{ox} คือค่าความซึมซาบได้ของออกไซด์ (oxide permittivity)



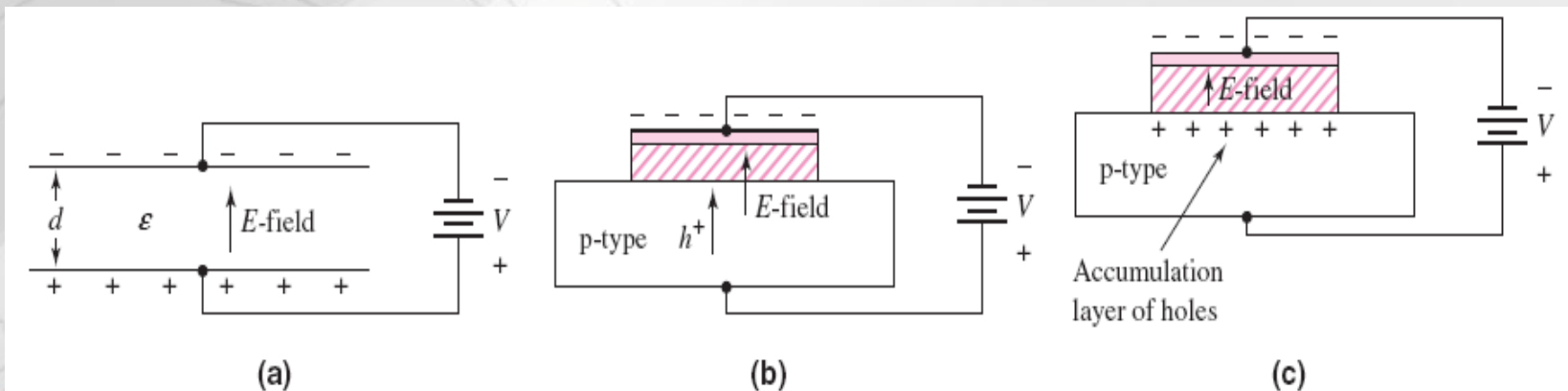
โครงสร้างของ MOS capacitor ซึ่งจำลองแบบมากจากการทำงานของตัวเก็บประจุ

- โครงสร้างทางฟิสิกส์ของมอส สามารถอธิบายอย่างง่ายได้ก็คือว่ามันจะมีโครงสร้างคล้ายกับตัวเก็บประจุ (มีแผ่นตัวนำที่ขนานกันและมีฉนวนคั่นระหว่างตัวนำทั้งสอง)

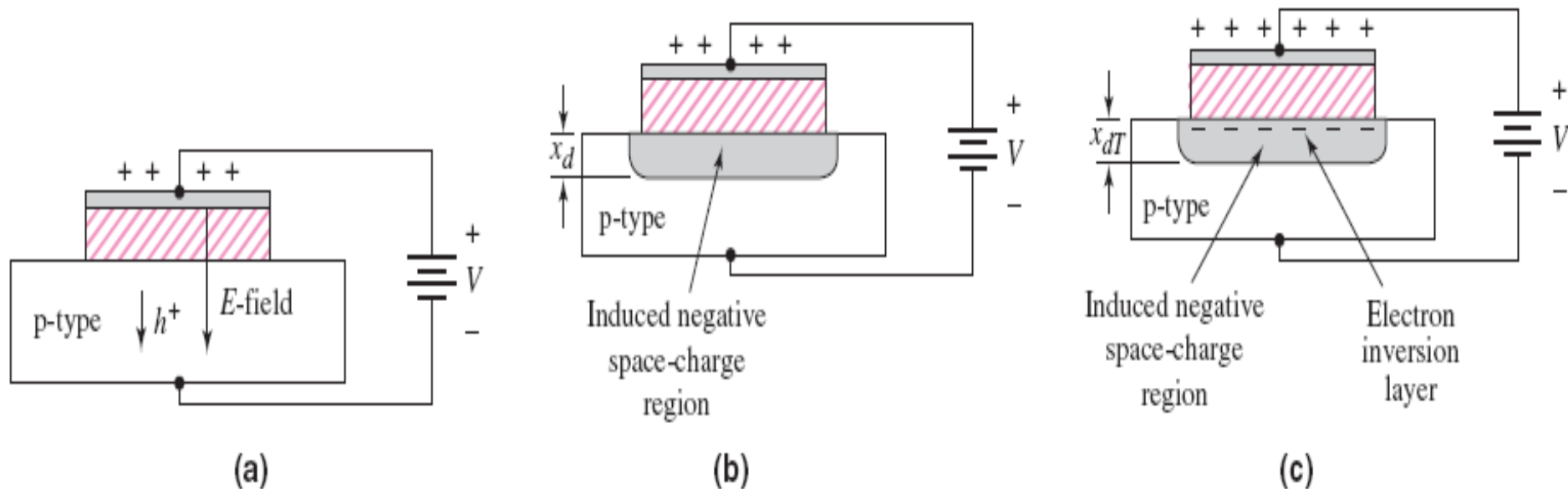


การเกิดสนามไฟฟ้าบนแผ่นตัวเก็บประจุแบบขนาน

- ฐานรองของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor substrate) ซึ่งอาจจะเป็นสาร n หรือ p ก็ได้ อย่างใดอย่างหนึ่ง และจากรูปก็สามารถสร้างให้เป็นตัวเก็บประจุได้ ในรูปที่ 3 เป็นภาพการเกิดสนามไฟฟ้า (Electric field) ภายในตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน โดยให้แผ่นด้านบนได้รับแรงดันไฟลบเมื่อเทียบกับแผ่นด้านล่าง ได้รับแรงดันไฟบวก โดยตรงกลางระหว่างแผ่นทั้งสองเป็นฉนวน (Insulator ในที่นี้คือ Oxide นั้นเอง) ซึ่งการต่อแบบนี้ก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างแผ่นทั้งสอง

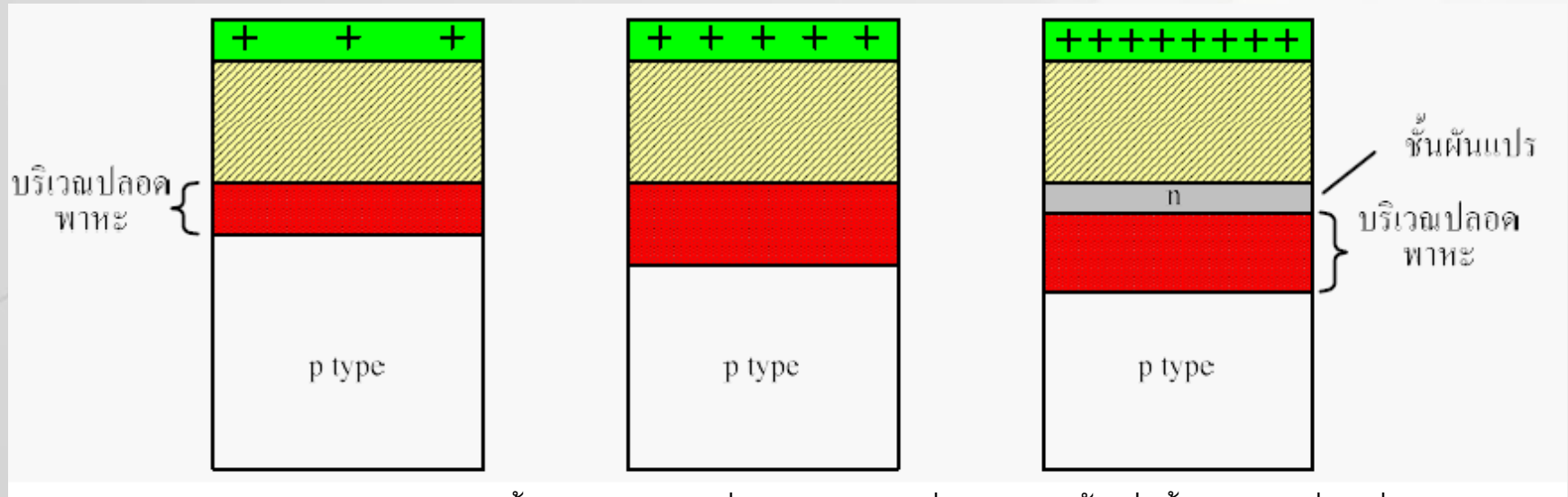


ผลของการไบอัสต์กดาวกที่ชั่วเกิด และทิศทางของ สนามไฟฟ้า



- 3 (a) แสดงผลของการไบอัสต์กดาวกที่ชั่วเกิด และทิศทางของสนามไฟฟ้า (b) แสดงการเกิดย่านปลอดประจุ (space charge region) ในตัว MOS capacitor เมื่อได้รับแรงดันไบอัสบวกค่าหนึ่ง (c) แสดงการเกิด space charge region และ electron inversion layer ในตัว MOS capacitor

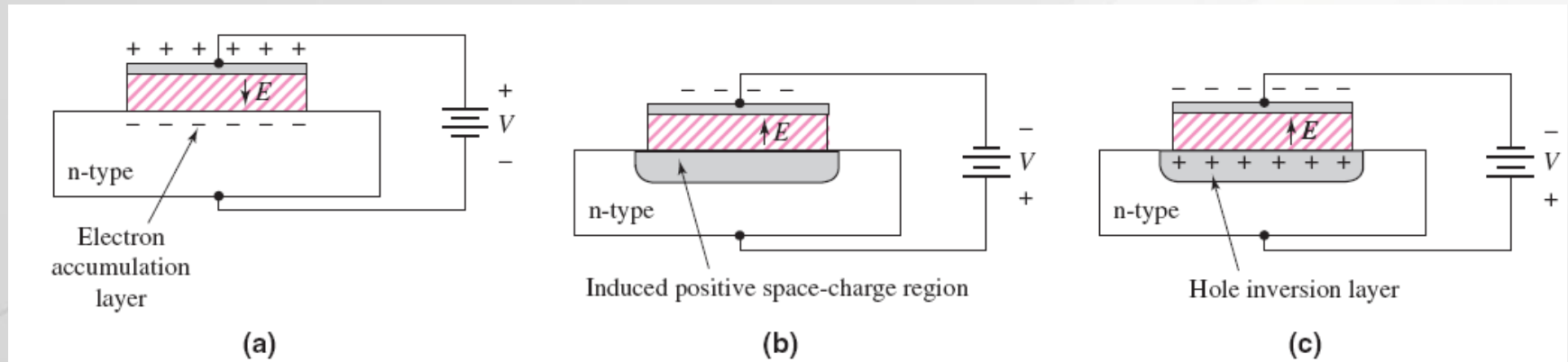
บริเวณปลอดพาหะใต้ชั้นออกไซด์ก็จะเป็นสาร n
เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเริ่มเปลี่ยน



บริเวณปลอดพาหะใต้ชั้นออกไซด์ก็จะเป็นสาร n เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเริ่มเปลี่ยน

เมื่อเพิ่มแรงดันตกคร่อม MOS Capacitor มากขึ้น สนามไฟฟ้าที่คร่อมชั้น oxide จะแรงขึ้นทำให้โฮล ถูกผลักลงไปตามด้านล่างมากขึ้น ส่งผลให้บริเวณปลอดพาหะ ที่ใต้ชั้น oxide มีความหนาแน่นมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนถึงจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) บริเวณปลอดพาหะใต้ชั้นออกไซด์ก็จะเป็นสาร n เรียกว่าชั้นผั้แปร (inversion layer) แสดงดังรูป

โครงสร้างของ MOS capacitor ที่มีฐานรอง เป็นสารชนิด n



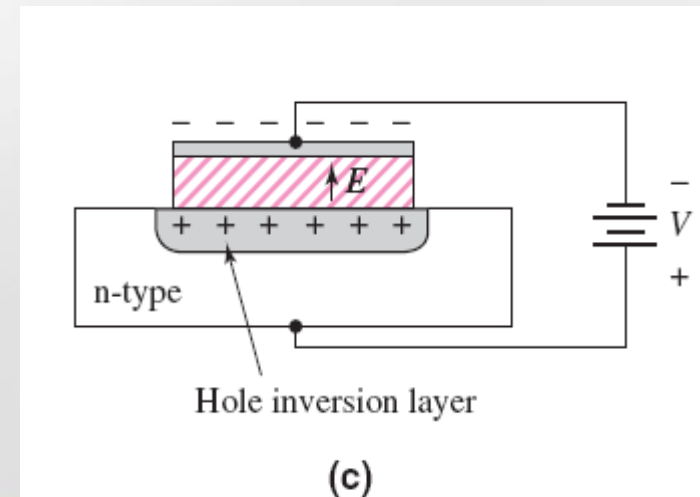
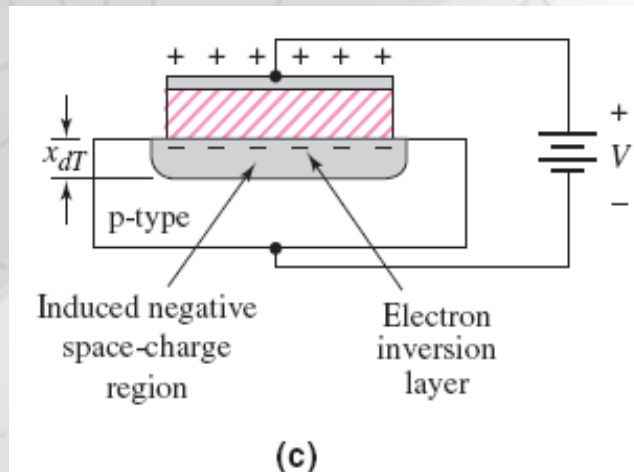
(a) แสดงผลของการไบอัสศักดาบวกที่ชั่วเกิด ของ MOS capacitor ที่ฐานรองเป็นสารชนิด n

(b) แสดงการเกิดย่านปลอดประจุ (space charge region) ในตัว MOS capacitor เมื่อได้รับแรงดันไบอัสลบค่าหนึ่ง

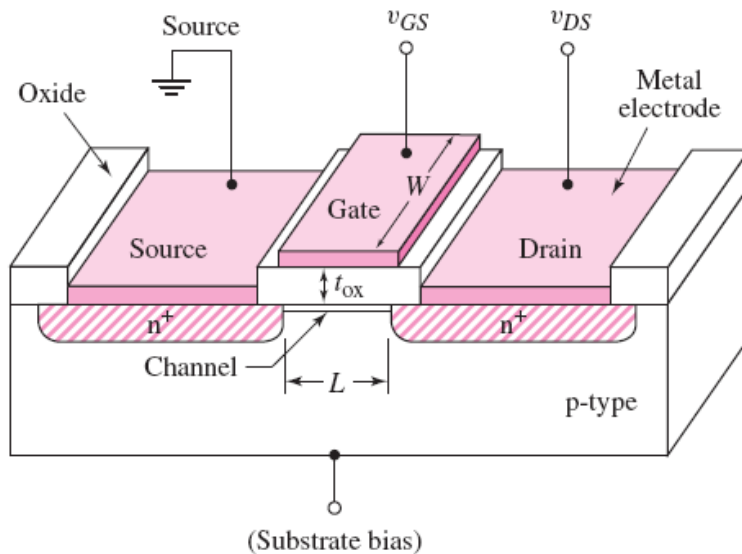
(c) แสดงการเกิด space charge region และ hole inversion layer ในตัว MOS capacitor

Electron vs. Hole inversion layer

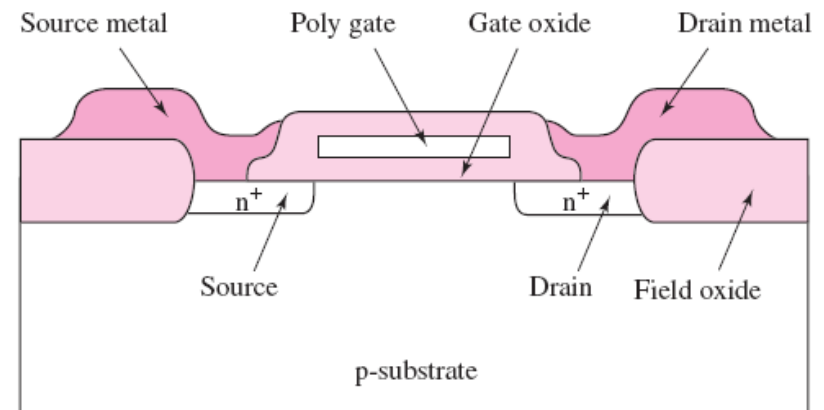
- โดยสรุปก็คือว่า Mos capacitor โดยมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดสาร P แรงดันไฟฟ้าบวกจะต้องป้อนเข้าที่ขาคาท เพื่อสร้าง electron inversion layer
- แต่ในทางกลับกัน Mos capacitor โดยมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดสาร n แรงดันไฟฟ้าลบจะต้องป้อนเข้าที่ขาคาท เพื่อสร้าง hole inversion layer



n-Channel Enhancement-Mode MOSFET



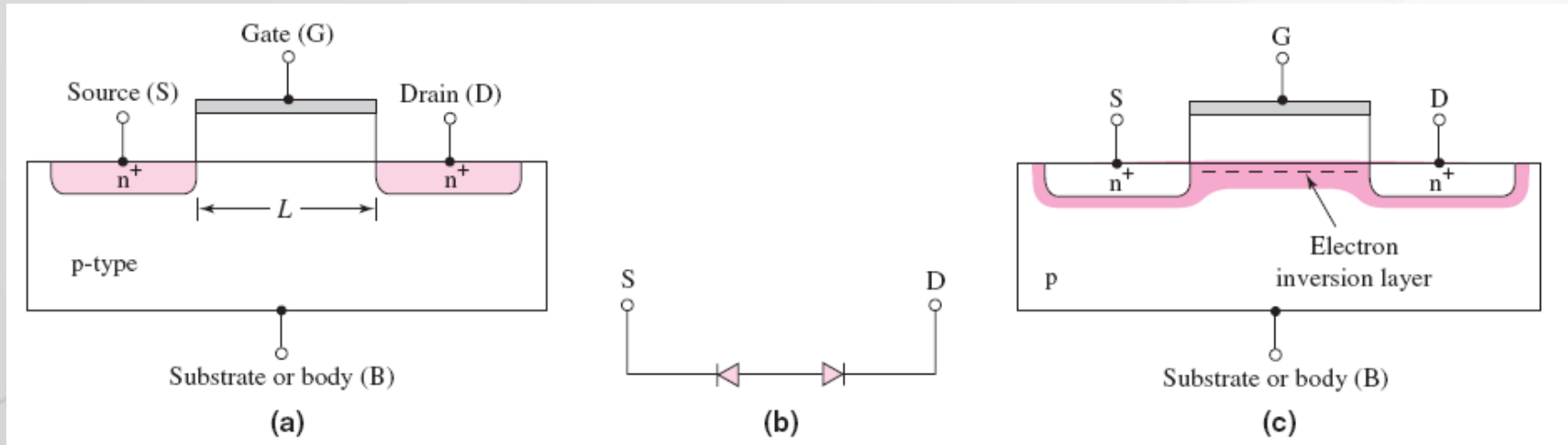
(a)



(b)

แผนผังโครงสร้างของ n-channel enhancement-mode MOSFET (b) n-channel MOSFET
แสดงโลหะออกไซด์และ polysilicon gate

การทำงานของมอสเฟตทรานซิสเตอร์เบื้องต้น

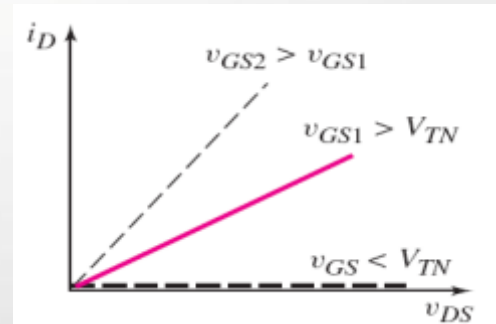
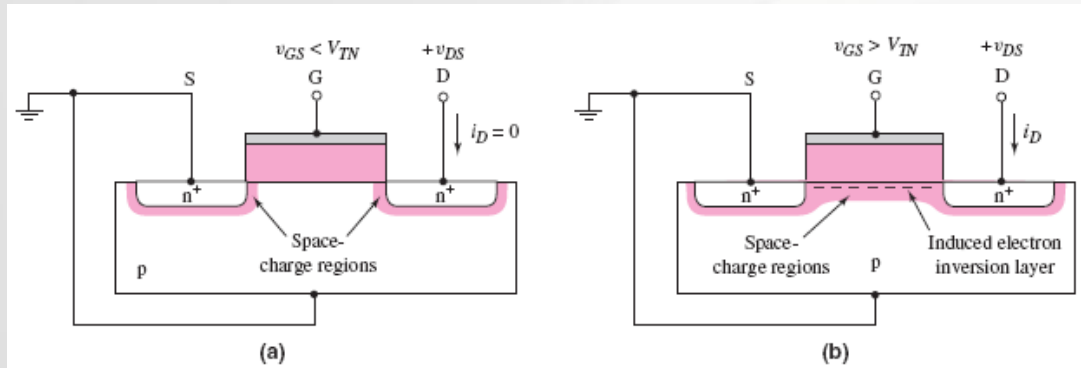


ภาพตัดขวางของ n-channel MOSFET ก่อนที่จะมีการสร้างชั้นผิวนแปร (inversion layer), (b) วงจรสมมูลของ n-channel MOSFET ที่ประกอบไปด้วยไดโอดสองตัวต่อกันหลังชนกันระหว่างขาเกตกับขาเดรนเมื่อมอสเฟตหยุดทำงาน (cutoff) และ (c) ภาพตัดขวางหลังจากที่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับมอสเฟตและมีการสร้างชั้นผิวนแปรขึ้น

Ideal MOSFET Current–Voltage Characteristics—MOS

Device

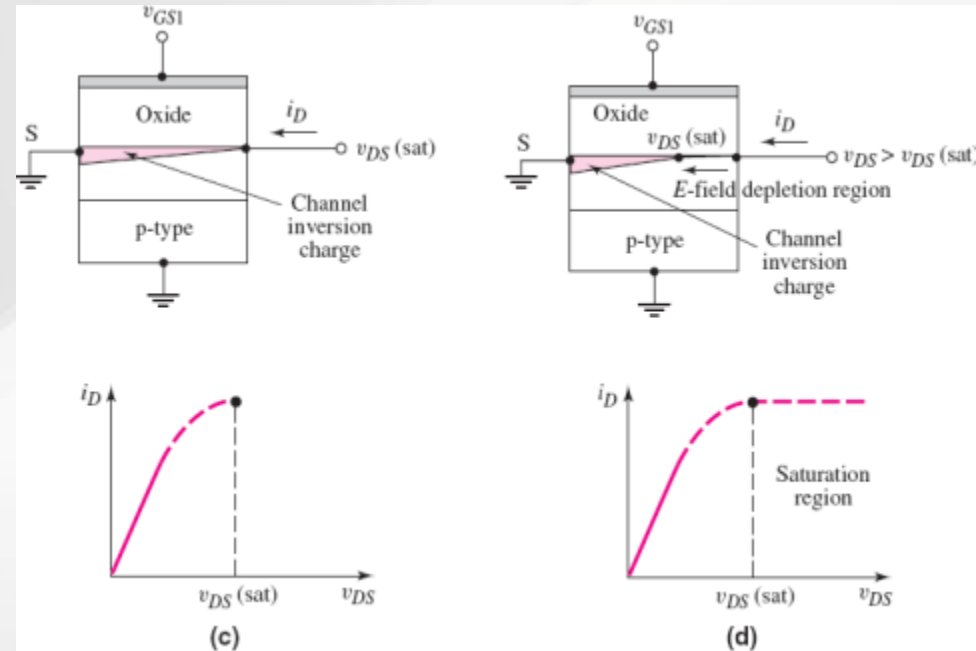
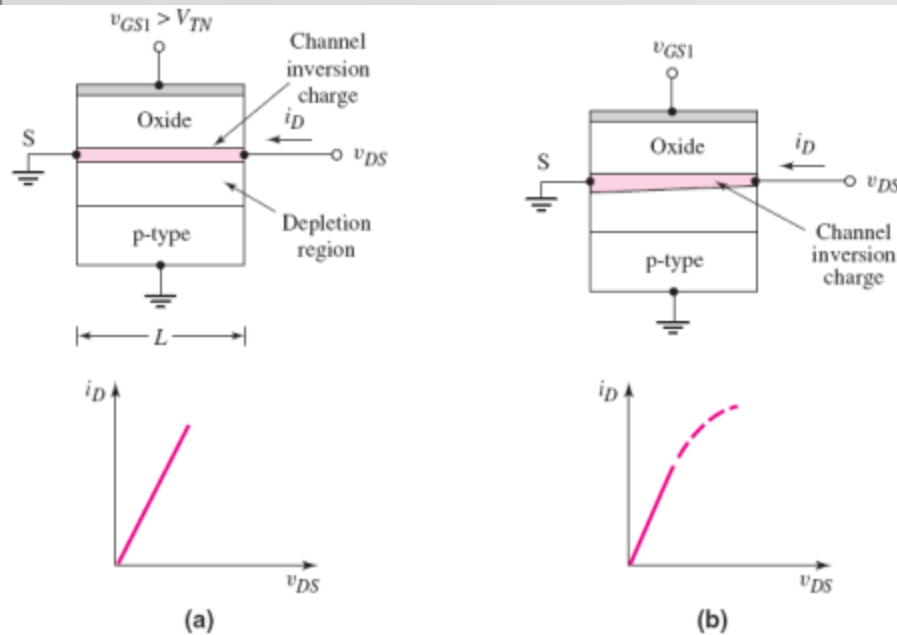
ในกรณีที่ V_{DS} มีค่าน้อยดังแสดง
ในรูปที่ 9 เมื่อ $V_{GS} < V_{TN}$ กระแส
ที่ชาเดรนจะเป็นศูนย์ เมื่อ $V_{GS} >$
 V_{TN} แชนแนลของประจุผันแปรจะ
ถูกสร้างขึ้นและกระแสที่ชาเดรน
จะเพิ่มขึ้นโดย ด้วยค่าแรงดันที่
ชาเกตที่สูงมากกว่า ความ
หนาแน่นของประจุผันแปรก็จะมี
จำนวนมากขึ้นด้วย และกระแส
เดรนก็จะมีจำนวนมากตามค่า
แรงดัน V_{DS} ที่ป้อน



$$v_{GS} - v_{DS(sat)} = V_{TN}$$

$$v_{DS(sat)} = v_{GS} - V_{TN}$$

”ย่านอิ่มตัว” (saturation region)



- กระแสเดรนจะมีค่าคงที่เมื่อ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ ย่านนี้ของคุณสมบัติระหว่าง i_D กับ V_{DS} เรียกว่า ”ย่านอิ่มตัว” (saturation region) แสดงดังรูป

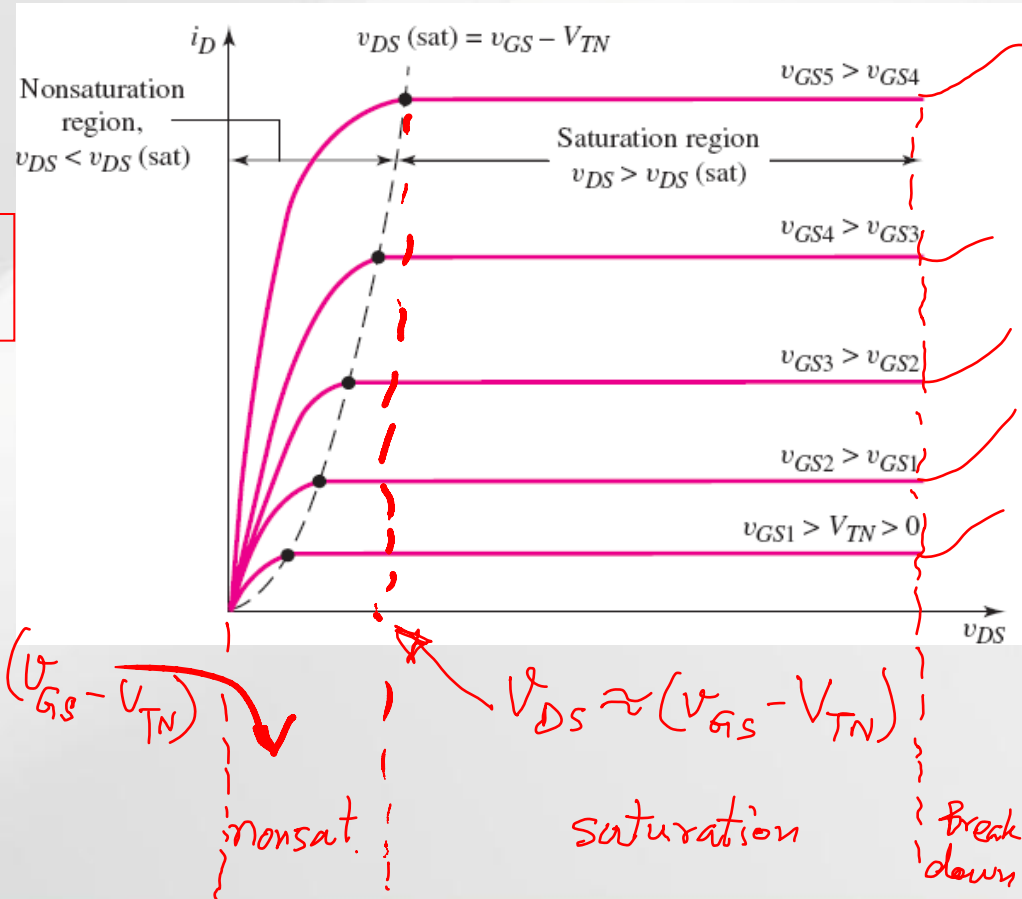
กราฟสำหรับ n-channel enhancement mode MOSFET

ในย่าน nonsaturation หรือ triode region

$$i_D = K_n \left[2(v_{GS} - v_{TN})v_{DS} - v_{DS}^2 \right]$$

ในย่านอิ่มตัว คุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อ $V_{GS} > V_{TN}$ ได้ถูกอธิบายโดยสมการดังนี้

$$i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$$



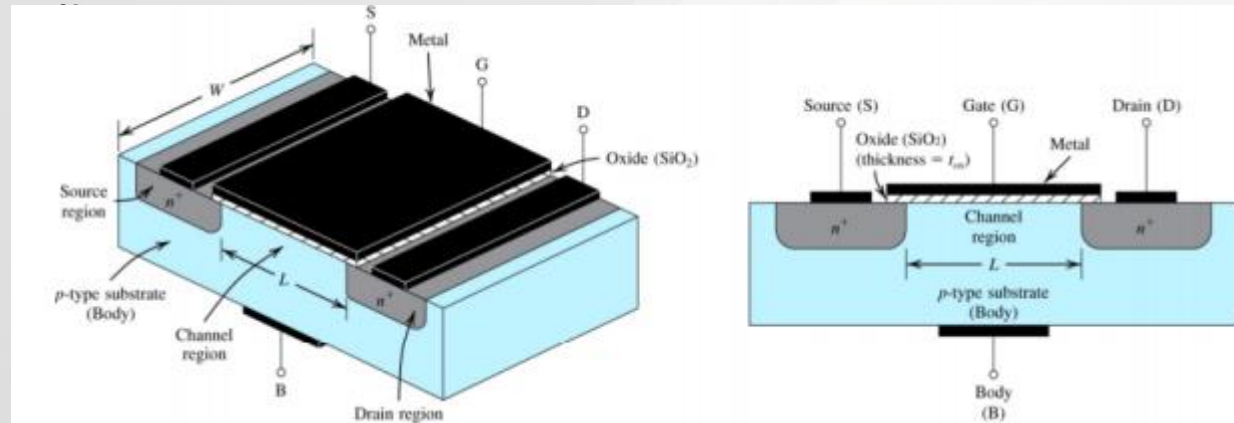
พารามิเตอร์ transconduction

- พารามิเตอร์ K_n จะถูกเรียกว่าพารามิเตอร์ transconduction

$$K_n = \frac{W \mu_n C_{ox}}{2L}$$

$$K_n = \frac{k'_n}{2} \cdot \frac{W}{L} \Big|_{k'_n = \mu_n C_{ox}}$$

k'_n คือ Process conduction parameter

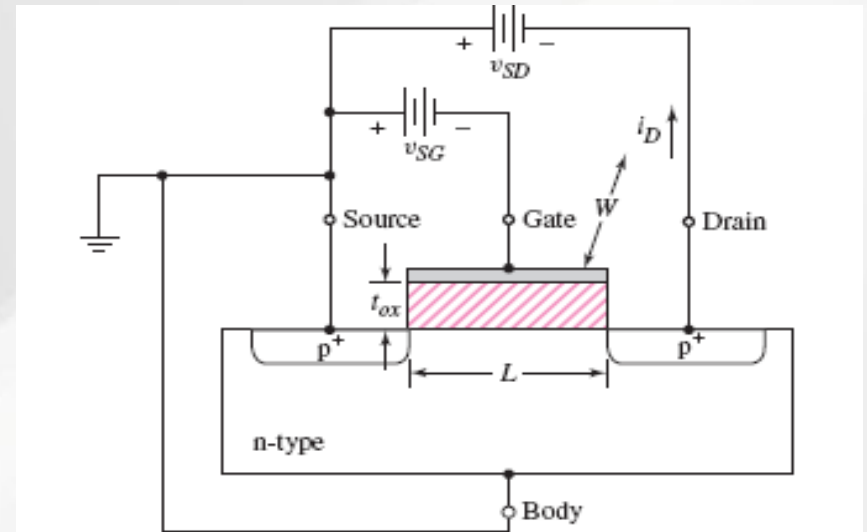


โดย μ_n เป็นค่าคงที่เรียกว่า “ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน” C_{ox} เป็นค่าความจุไฟฟ้าของสารออกไซด์ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ ซึ่งมาจากสมการเดิมคือ $C_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox}$ โดยที่ t_{ox} เป็นความหนาของออกไซด์ และ ϵ_{ox} ค่าความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้าหรือ ค่าความสามารถเก็บประจุซึ่งสำหรับสุญญากาศแล้ว $\epsilon_0 = (3.9)(8.85 \times 10^{-14})$ ฟารัดต่อเมตร พารามิเตอร์ μ_n นี้คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้นผิวนำ ส่วนค่าของ W และ L คือความกว้างและความยาวของแชนแนลตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6(a)

รูปตัดขวางของ p-channel enhancement-mode MOSFET

ตรวจสอบจุดอิ่มตัว

$$V_{SD}(sat) = V_{SG} + V_{TP}$$



เมื่อมอสเฟตทำงานในย่าน **nonsaturation**

$$i_D = k_p [2(V_{SG} + V_{TP})V_{SD} - V_{SD}^2]$$

มอสเฟตทำงานในย่าน saturation

โดยที่ W = ความกว้างของท่อนทรานซิสเตอร์

L = ความยาวของท่อนทรานซิสเตอร์

$$I_D = K_p (V_{SD} + V_{TP})^2$$

$$K_p = \frac{W_{up} C_{ox}}{2L}$$

C_{ox} = ค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่

μ_p = ค่าความคล่องตัวของโฮลในชั้นแผ่นพอรของซิลิคอน

สำหรับ p-channel MOSFET เมื่อ $V_{SD} > V_{SD}(sat)$ ในย่านอิ่มตัว

เราจะได้ว่า

$$V_{SD} > V_{SD}(sat) = V_{SD} + V_{TP}$$

สรุปการทำงานของ MOSFET

Table 3.1

Summary of the MOSFET current-voltage relationships

NMOS

Nonsaturation region ($v_{DS} < v_{DS}(\text{sat})$)

$$i_D = K_n[2(v_{GS} - V_{TN})v_{DS} - v_{DS}^2]$$

Saturation region ($v_{DS} > v_{DS}(\text{sat})$)

$$i_D = K_n(v_{GS} - V_{TN})^2$$

Transition point

$$v_{DS}(\text{sat}) = v_{GS} - V_{TN}$$

Enhancement mode

$$V_{TN} > 0$$

Depletion mode

$$V_{TN} < 0$$

PMOS

Nonsaturation region ($v_{SD} < v_{SD}(\text{sat})$)

$$i_D = K_p[2(v_{SG} + V_{TP})v_{SD} - v_{SD}^2]$$

Saturation region ($v_{SD} > v_{SD}(\text{sat})$)

$$i_D = K_p(v_{SG} + V_{TP})^2$$

Transition point

$$v_{SD}(\text{sat}) = v_{SG} + V_{TP}$$

Enhancement mode

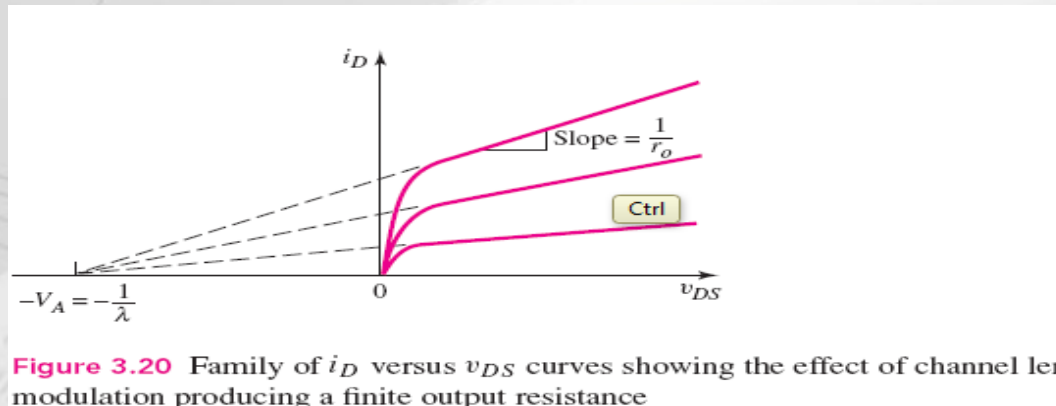
$$V_{TP} < 0$$


Depletion mode

$$V_{TP} > 0$$

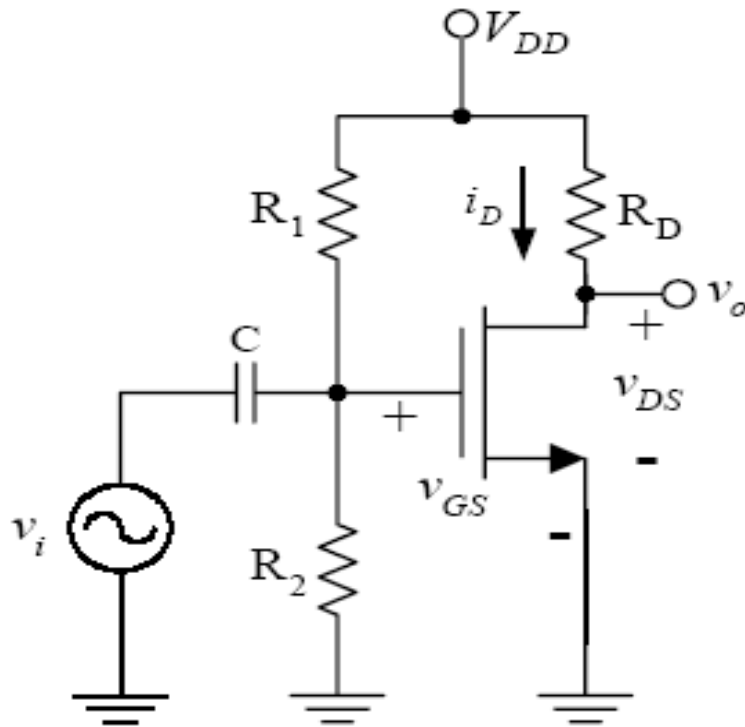
การเกิด Early Effect และ Early voltage ของ MOSFET

- สำหรับทรานซิสเตอร์ MOSFET ก็เช่นเดียวกัน มีการเกิด Early effect ที่ย่านอิมิตัวเช่นกัน ทำให้กระแสเดรน i_D มีค่าขึ้นอยู่กับแรงดัน v_{DS}

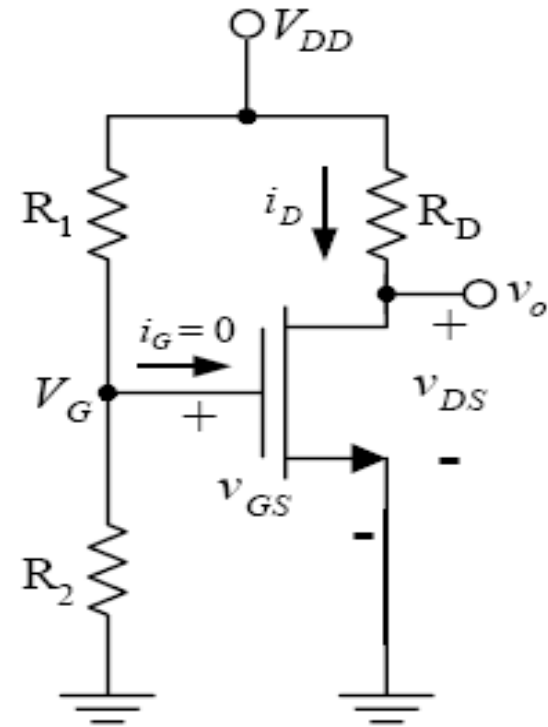



$$i_D = K_n [(v_{GS} - V_{TN})^2 (1 + \lambda v_{DS})]$$

วงจรไบอัสไฟตรงของ MOSFET (MOSFET DC Circuits)



(a) NMOS Common Source circuit



(b) Equivalent circuit

การวิเคราะห์วงจรไฟตรงของ MOSFET

- ในการวิเคราะห์วงจรไฟตรงของ MOSFET เนื่องจากที่ขั้ว gate ของ MOSFET ไม่ว่าจะเป็น NMOS หรือ PMOS จะมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขวางอยู่ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ไม่นำไฟฟ้า ดังนั้น กระแสที่ขั้วเกต

(i_G) ของ MOSFET จึงมีค่าน้อยมากจนประมาณให้เป็นศูนย์ได้ นั่นคือ

$$i_G = 0$$

สามารถใช้ได้ทั้ง enhancement mode และ depletion mode