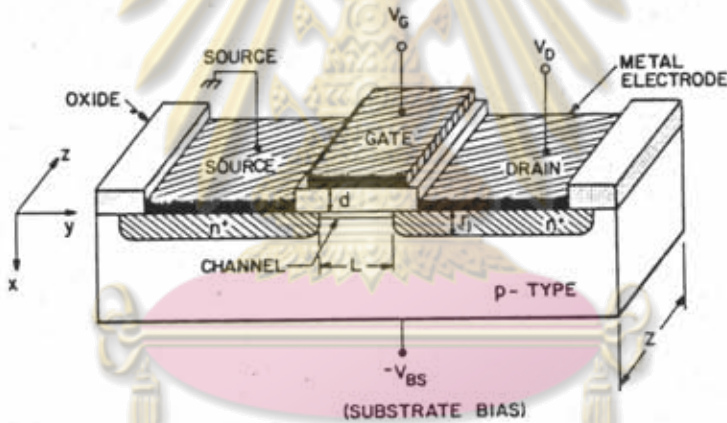




บทที่ 3

ทฤษฎีเกี่ยวกับทรานซิสเตอร์แบบมอส

ทรานซิสเตอร์แบบมอส (MOSFET) มีโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุฐานรอง (Substrate) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P มีเดรนและซอร์สเป็นชั้น  $n^+$  อยู่บนวัสดุฐานรองสำหรับสิ่งประดิษฐ์แบบ n-channel ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สำหรับสิ่งประดิษฐ์แบบ p-channel วัสดุฐานรองจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n เดรนและซอร์สเป็นชั้น  $p^+$  อยู่บนวัสดุฐานรอง เฟลตบนชั้นฉนวนเรียกว่าเกต (Gate) อาจจะทำด้วยโลหะหรือ Polysilicon ซึ่งถูกแพร่ซึมอย่างมาก (heavy dope)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอส

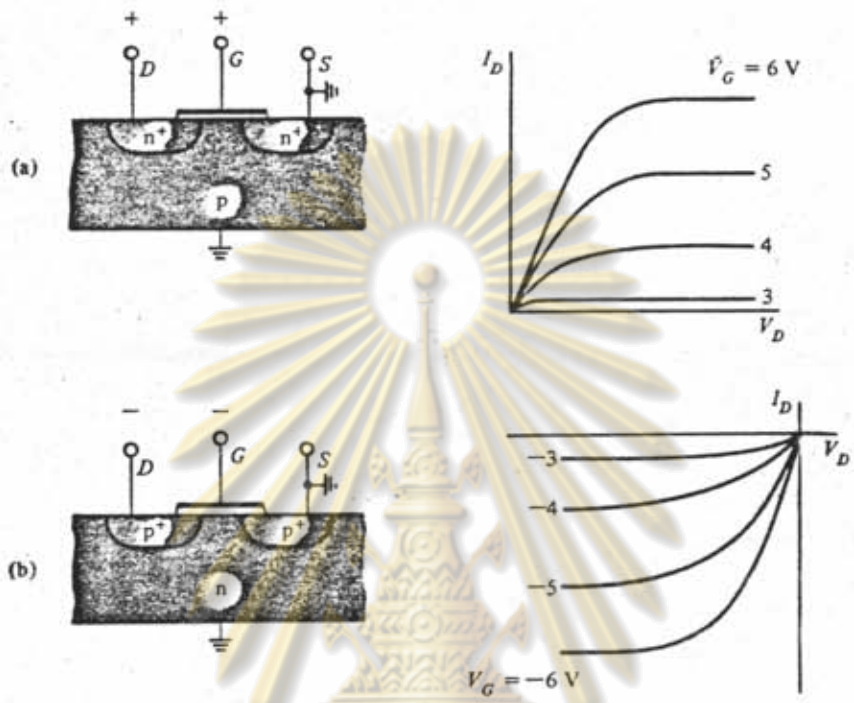
ขณะที่ไม่มีการป้อนแรงดันที่เกต (เทียบกับวัสดุฐานรอง) การเชื่อมต่อกันระหว่างเดรนและซอร์สจะเป็นลักษณะของหัวต่อ P-N หันหลังชนกัน กระแสที่ไหลระหว่างเดรนและซอร์สจะเป็นกระแสรั่วของหัวต่อ P-N เมื่อมีการป้อนแรงดันที่เกตด้วยแรงดันบวก (สำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด N) ที่มากพอจนทำให้เกิดชั้นอินเวอร์ชัน (Inversion Layer) ชั้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ เดรนและซอร์สจะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดย ช่องนำไฟฟ้า (channel) ของพาหะข้างน้อย (Minority Carrier) ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนสำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด N (NMOS) และเป็นโฮลสำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด P (PMOS) ดังนั้นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่าง

เดรนและซอร์สจะมีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านช่องนำไฟฟ้านี้ได้ ความนำไฟฟ้าของช่องนำไฟฟ้านี้จะถูกควบคุมด้วยการบ่อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเกต

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอส คือ ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage,  $V_T$ ) ซึ่งเป็นค่าแรงดันต่ำสุดเมื่อบ่อนให้กับเกตแล้วทำให้เกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้น ในทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$  แรงดันที่บ่อนให้กับเกต ต้องเป็นบวกมากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน เพื่อทำให้เกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้น สำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $p$  แรงดันที่บ่อนให้กับเกต ต้องเป็นลบมากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน เพื่อทำให้เกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้น

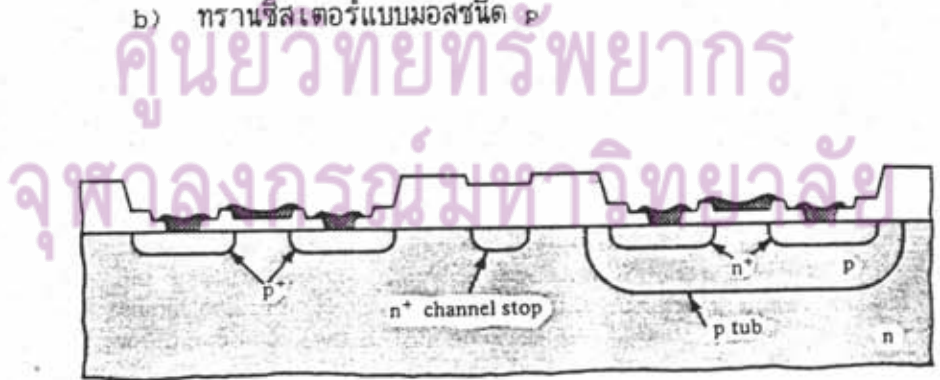
ทรานซิสเตอร์แบบมอส พิจารณาตามลักษณะโครงสร้างสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$  ( $n$ -channel MOSFET, NMOS) มีโครงสร้างประกอบด้วย วัสดุฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $p$  มีเดรนและซอร์สเป็นชั้น  $n^+$  ขณะที่เกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้น กระแสที่ไหลภายในช่องนำไฟฟ้าจะเป็นกระแสอิเล็กตรอน ลักษณะของ NMOS และลักษณะสมบัติขาออก (Output characteristics) แสดงดังในรูปที่ 3.2 (a)
2. ทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $p$  ( $p$ -channel MOSFET, PMOS) มีโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  มีเดรนและซอร์สเป็นชั้น  $p^+$  ขณะที่เกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้น กระแสที่ไหลภายในช่องนำไฟฟ้าจะเป็นกระแสโฮล ลักษณะของ PMOS และลักษณะสมบัติขาออก แสดงดังในรูปที่ 3.2 (b)
3. ทรานซิสเตอร์แบบมอสประกอบ (Complementary MOSFET, CMOS) เป็นสิ่งประดิษฐ์มอสที่รวมทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$  และ  $p$  อยู่บนวัสดุฐานรองเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 วัสดุฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  ทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$  จะอยู่ภายในชั้นของสารกึ่งตัวนำซึ่งถูกแพร์ซึมด้วยสารเจือปนชนิด  $p$  เรียกว่า  $p$ -tub การแพร์ซึมสารเจือปนในชั้น  $p$ -tub ต้องควบคุมความเข้มข้นของสารเจือปนอย่างมาก เพื่อให้ได้แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$  ตามต้องการ โดยทั่ว ๆ ไปชั้น  $p$ -tub จะถูกสร้างขึ้นโดย Ion Implantation ระหว่างสิ่งประดิษฐ์บางครั้งจะสร้างกำแพงกันช่องนำไฟฟ้า (Channel stops) เพื่อป้องกันการเกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้นระหว่างสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งจะเกิดการลัดวงจรระหว่างสิ่งประดิษฐ์ได้ กำแพงกันช่องนำไฟฟ้านี้จะเป็นชั้น  $n^+$  สำหรับวัสดุฐานรองชนิด  $n$  และเป็น  $p^+$  สำหรับวัสดุฐานรองชนิด  $p$



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอสและลักษณะสมบัติขาออกในการทำงานแบบเพิ่มพาดะ (Enhancement mode)

- a) ทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n
- b) ทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด p



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอสประกอบ

ทรานซิสเตอร์แบบมอสมีลักษณะการทำงาน 2 แบบคือ

1. แบบลดพาหะ (Depletion mode) เป็นการทำงานซึ่งทรานซิสเตอร์แบบมอสมีช่องนำไฟฟ้าอยู่แล้ว ขณะที่การไบอัสแรงดันให้กับเกตเป็นศูนย์ ดังนั้นการบ่อนแรงดันให้กับเกตจึงถูกใช้เพื่อกำจัดช่องนำไฟฟ้า สำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$  จะบ่อนแรงดันลบให้กับเกต สำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $p$  จะบ่อนแรงดันบวกให้กับเกตเพื่อกำจัดช่องนำไฟฟ้า

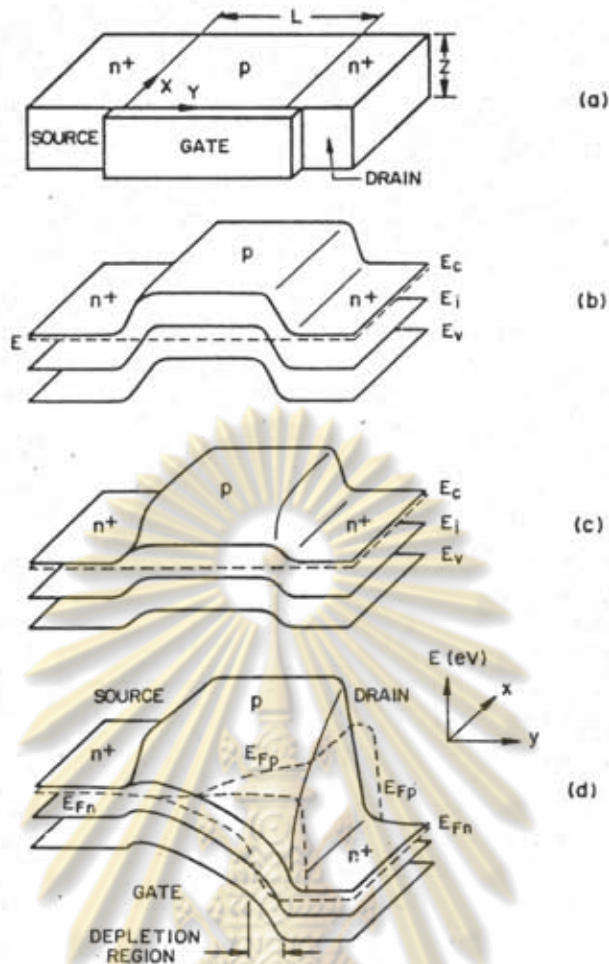
2. แบบเพิ่มพาหะ (Enhancement mode) เป็นการทำงานซึ่งทรานซิสเตอร์แบบมอสไม่มีช่องนำไฟฟ้าขณะที่การไบอัสให้กับเกตเป็นศูนย์ การบ่อนแรงดันให้กับเกตจึงถูกใช้เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้น สำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$  จะบ่อนแรงดันบวกให้กับเกต สำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $p$  จะบ่อนแรงดันลบให้กับเกตเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้น

### 3.1 สภาวะไม่สมดุลย์ของทรานซิสเตอร์แบบมอส

ทรานซิสเตอร์แบบมอสจะอยู่ในสภาวะไม่สมดุลย์เมื่อมีการบ่อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างเดรนและซอร์ส แรงดันไฟฟ้านี้จะทำให้  $Im_{ref}$ \* ของพาหะข้างน้อยต่ำกว่าระดับเฟอร์มิในสภาวะสมดุลย์แถบพลังงาน 3 มิติของทรานซิสเตอร์แบบมอสแสดงดังในรูปที่ 3.4 ขณะที่ไม่มีแรงดันไบอัสที่เกตแถบพลังงานจะมีลักษณะดังในรูปที่ 3.4 (b) เมื่อมีแรงดันบ่อนให้กับเกตจนเกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้นแถบพลังงานจะมีลักษณะดังในรูปที่ 3.4 (c) ซึ่งในทั้ง 2 กรณีนี้ทรานซิสเตอร์แบบมอสยังคงอยู่ในสภาวะสมดุลย์ เมื่อบ่อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างเดรนและซอร์สจะเกิดการแยกกระหว่าง  $Im_{ref}$  ของโฮล ( $E_{Fp}$ ) และของอิเล็กตรอน ( $E_{Fn}$ ) โดยที่  $Im_{ref}$  ของโฮลยังคงอยู่ในระดับเดียวกับระดับเฟอร์มิของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ส่วน  $Im_{ref}$  ของอิเล็กตรอนจะลดระดับลงเข้าหาผิวสัมผัสเดรน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (d)

การลดลงของ  $Im_{ref}$  ของอิเล็กตรอนนี้ทำให้การไบอัสเกตเพื่อทำให้เกิดชั้นอินเวอร์ชันขึ้นที่เดรน จะต้องใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้ามากกว่าในสภาวะสมดุลย์ รูปที่ 3.5 แสดงถึงการกระจายของประจุ และการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานของชั้น  $p$  บริเวณเดรนในสภาวะสมดุลย์และไม่สมดุลย์ของทรานซิสเตอร์แบบมอส ในสภาวะสมดุลย์ความกว้างของย่านปลอดพาหะจะมีค่ามากที่สุด

\*  $Im_{ref}$  หมายถึง Fermi level ในสภาวะไม่สมดุล



รูปที่ 3.4 แถบพลังงาน 3 มิติของทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n

- a) ลักษณะของทรานซิสเตอร์แบบมอส
- b) สภาวะสมดุลย์ขณะ ไม่มีการ ไบอัสเกต
- c) สภาวะสมดุลย์ขณะมีการ ไบอัสเกต
- d) สภาวะ ไม่สมดุลย์ขณะมีการ ไบอัสเกตและเดรน

สัด ( $\psi_m$ ) เมื่อเกิดชั้นอินเวอร์ชัน และ

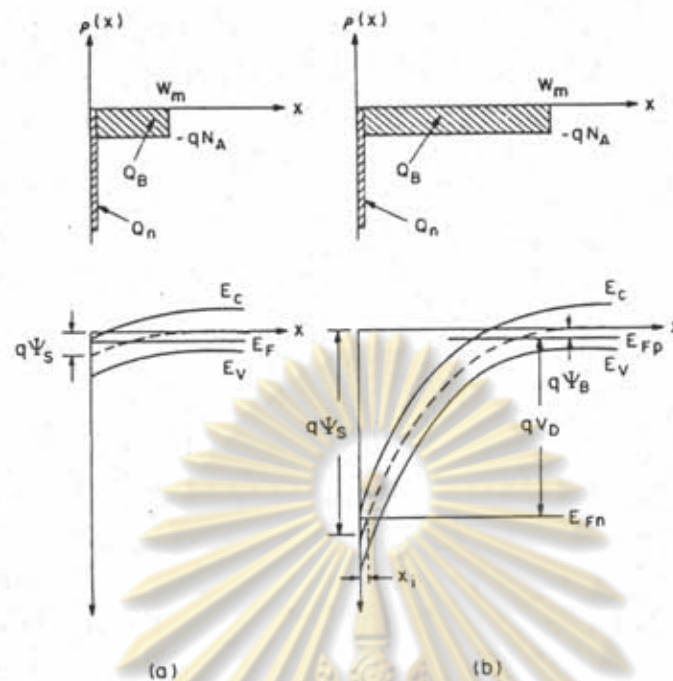
$$\psi_s(inv) \approx 2\psi_B$$

(3.1)

ในสภาวะไม่สมดุลย์ ความกว้างของย่านปลอดพาหะขณะที่เริ่มเกิดชั้นอินเวอร์ชันขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสเดรน ( $V_D$ ) และ

$$\psi_s(inv) = V_D + 2\psi_B$$

(3.2)

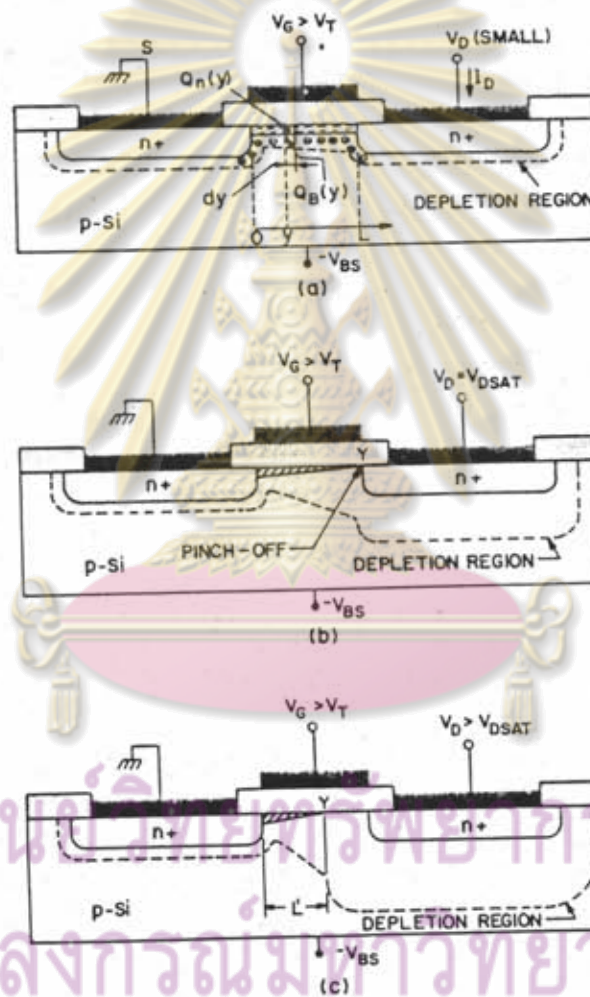


รูปที่ 3.5 การกระจายของประจุและการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานของชั้น  $p$  ในทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$   
 a) สภาวะสมดุลย์  
 b) สภาวะไม่สมดุลย์ที่เดรน

### 3.2 ลักษณะการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบมอสในย่านเชิงเส้น (Linear) และย่านอิ่มตัว (Saturation)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเกตของทรานซิสเตอร์แบบมอส (ในที่นี้ขอยกตัวอย่างทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด  $n$ ) จะทำให้เกิดช่องนำไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (b) ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้านาต่ำให้กับเดรน โดยมีขั้วต่อลงกราวด์ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านช่องนำไฟฟ้า โดยที่ช่องนำไฟฟ้านี้จะประพฤติตัวเหมือนความต้านทานตัวหนึ่ง กระแสเดรน ( $I_D$ ) ซึ่งไหลในช่องนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับแรงดันเดรน ( $V_D$ ) แบบเชิงเส้น เรียกการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบมอสในช่วงนี้ว่า ย่านเชิงเส้น (Linear region) เมื่อเพิ่มแรงดันเดรนมากขึ้นทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลย์มากขึ้นในขณะที่แรงดันเกตเท่าเดิม ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นช่องนำไฟฟ้าหรือชั้นนำเวอร์ชันจะลดขนาดของความลึกลงบริเวณเดรน เมื่อเพิ่มแรงดันเดรนจนถึงค่า  $V$  หนึ่ง ซึ่งทำให้ความลึกของช่องนำไฟฟ้าลดลงจนเป็นศูนย์ที่บริเวณเดรน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (b) จุดที่

ความลึกของช่องนำไฟฟ้าลดเป็นศูนย์บริเวณเดรนนี้เรียกว่า จุด Pinch-off เรียกแรงดันเดรน ณ จุด Pinch off นี้ว่า แรงดันเดรนอิ่มตัว ( $V_{D, sat}$ ) เมื่อเพิ่มแรงดันเดรนให้สูงกว่าค่า  $V_{D, sat}$  กระแสเดรนจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงมีค่าเท่ากับกระแสเดรนที่จุด Pinch-off และตำแหน่งที่ช่องนำไฟฟ้ามีความลึกเป็นศูนย์ จะเลื่อนเข้าหาซอร์สเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (c) การทำงานของทรานซิสเตอร์แบบมอสที่มีการไบอัสเดรนเกินจุด Pinch-off แล้วนี้ เรียกว่า ทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation region)



รูปที่ 3.6 ลักษณะการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบมอส

- ย่านเชิงเส้น (แรงดันเดรนต่ำ ๆ)
- การเกิด Pinch-off
- ย่านอิ่มตัว

### 3.3 ลักษณะสมบัติขาออก (Output characteristics) ของทรานซิสเตอร์แบบมอส

พิจารณาทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n บนเงื่อนไขอุดมคติ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในช่องนำไฟฟ้าเป็นกระแสที่เกิดเนื่องจากสนามไฟฟ้าเท่านั้น ความคล่องตัวของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้ามักค่าคงที่ ความเข้มข้นของสารเจือปนในช่องนำไฟฟ้าสม่ำเสมอ กระแสรั่วของหัวต่อน้อยมาก และสนามไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับผิวของสารกึ่งตัวนำมีขนาดใหญ่กว่าสนามไฟฟ้าในแนวขนานกับผิวของสารกึ่งตัวนำมาก เมื่อป้อนแรงดันบวกให้กับเกตจนกระทั่งย่านปลอดพาหะในสารกึ่งตัวนำขยายตัวจนถึงความกว้างสูงสุด ( $W_m$ ) แล้ว แต่ยังไม่เกิดขึ้นอินเวอร์ชันขึ้นที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ ( $\psi_s = 2\psi_s$ ) ความสัมพันธ์ของประจุต่าง ๆ ภายใต้ออกเกตเป็นดังนี้

$$Q'_G - Q'_{ss} = Q'_B \quad (3.3)$$

$$Q'_G - Q'_{ss} = (V_{GB} - V_{FB} - \psi_s) C'_{ox} \quad (3.4)$$

$$Q'_B = \frac{N_A q W_m}{A} = \sqrt{2\epsilon_s q \psi_s N_A} \quad (3.5)$$

- โดยที่
- $Q'_G$  คือ ความหนาแน่นของประจุภายในเกต
  - $Q'_{ss}$  คือ ความหนาแน่นของ Interface state
  - $Q'_B$  คือ ความหนาแน่นของประจุในย่านปลอดพาหะ
  - $V_{GB}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเกตเมื่อเทียบกับวัสดุฐานรอง
  - $V_{FB}$  คือ แรงดันแถบราบ
  - $\psi_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าพื้นผิวของซิลิกอนซึ่งตกคร่อมย่านปลอดพาหะ
  - $C'_{ox}$  คือ ความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่

การไบอัสเกตเพื่อให้เกิดขึ้นอินเวอร์ชันที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ แรงดันไบอัสเกตต้องมากกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) ดังกล่าวแล้วข้างต้น ขณะที่เกิดขึ้นอินเวอร์ชันขึ้น แรงดันไฟฟ้าพื้นผิวของซิลิกอนและความกว้างของย่านปลอดพาหะจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าภายในชั้นอินเวอร์ชัน



ขณะที่เพิ่มแรงดันไบอัสเกตขึ้น ดังนั้น

$$Q'_I = (V_{GB} - V_{TH}) C'_{ox} \quad (3.6)$$

โดยที่  $Q'_I$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในชั้นอินเวอร์ชันหรือช่องนำไฟฟ้า  
 $V_{TH}$  คือ แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน

และ

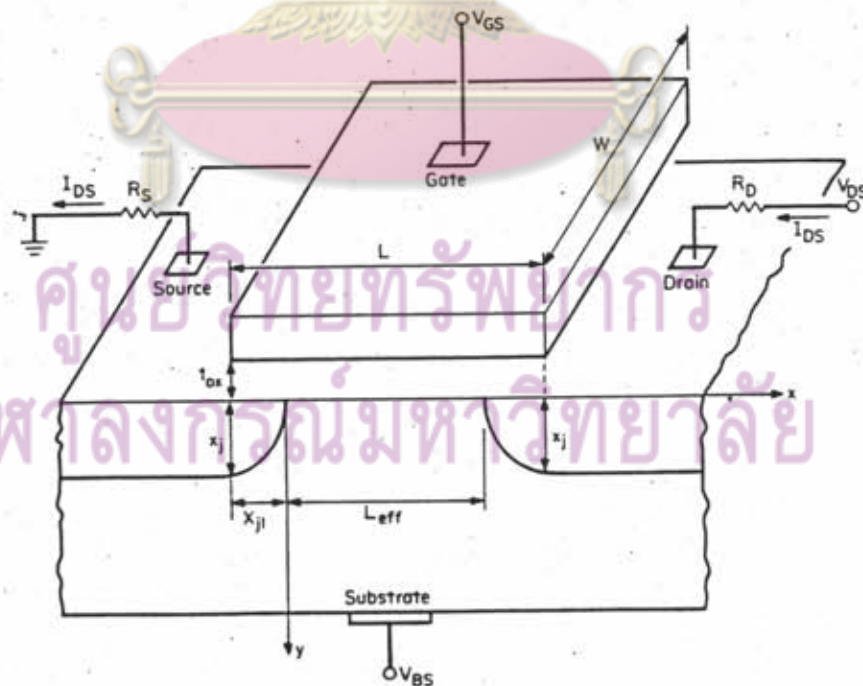
$$Q'_I = Q'_G - Q'_{ss} - Q'_B \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.4), (3.5), (3.6) และ (3.7) จะหาค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน  
 ขณะเริ่มเกิดชั้นอินเวอร์ชันได้ คือ

$$V_{TH} = V_{FB} + 2\phi_B + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\phi_B)}}{C'_{ox}} \quad (3.8)$$

โดยที่

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอส (33)

เมื่อไบอัสเกตจนทำให้เกิดขึ้นอินเวอร์ชันแล้ว บัณฑิตแรงดันไบอัสให้กับเดรนขนาดต่ำ ๆ โดยที่ซอร์สและวัสดุฐานรองลัดวงจรร่วมกันลงกราวด์ ( $V_{BS} = 0$ ) จะทำให้เกิดกระแสเล็กน้อย ไนลอนภายในช่องนำไฟฟ้าหรือขึ้นอินเวอร์ชันจากซอร์สถึงเดรน พิจารณารูปที่ 3.7 ประกอบ กระแสเล็กน้อย  $I_x$  ซึ่งไหลผ่านระยะทาง  $dx$  ในช่องนำไฟฟ้า จะมีค่า

$$I_x = \frac{dQ_I}{dt} \tag{3.10}$$

โดยที่  $x$  คือ ระยะทางที่วัดจากซอร์สถึงเดรน  
 $dQ$  คือ ปริมาณประจุซึ่งปรากฏอยู่ในระยะทาง  $dx$   
 $dt$  คือ เวลาที่ประจุต้องใช้ในการเคลื่อนที่ระยะทาง  $dx$

จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$dQ_I = dQ_G - dQ_{ss} - dQ_B \tag{3.11}$$

จากสมการที่ (3.4) เมื่อคำนึงถึงผลของการไบอัสเดรนแล้วจะได้

$$dQ_G - dQ_{ss} = C'_{ox} W dx [V_{GB} - V_{FB} - 2\phi_B - V_c(x)] \tag{3.12}$$

โดยที่  $\phi_s(inv) \approx 2\phi_B + V_c(x)$  (3.13)

และจากสมการ (3.5) จะได้

$$dQ_B = C'_{ox} W \gamma dx \sqrt{2\phi_B} \tag{3.14}$$

โดยที่  $\gamma = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A}}{C'_{ox}}$  (3.15)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่า  $dQ_{\text{I}}$  ในสมการที่ (3.14) ไม่ได้คำนึงถึงผลของสถานะไม่สมดุลย์ของทรานซิสเตอร์แบบมอส เนื่องจากการไบอัสเดรน ( $v_c(x)$ ) เพราะแรงดันไบอัสเดรนมีค่าต่ำ ทำให้ผลของ  $v_c(x)$  ที่มีต่อปริมาณประจุ  $Q_{\text{I}}$  มีค่าน้อยจึงสามารถตัดทิ้งได้

แทนค่าสมการที่ (3.12) และ (3.14) ในสมการที่ (3.11) จะได้

$$dQ_{\text{I}} = C'_{\text{ox}} W dx [V_{\text{GB}} - V_c(x) - V_{\text{TH}}] \quad (3.16)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของพาหะในแกน  $x$  ( $v(x)$ ) ภายในช่องนำไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับผิวสารกึ่งตัวนำ ภายในช่องนำไฟฟ้า ( $E_x(x)$ ) เป็น

$$v(x) = \frac{dx}{dt} = -\mu E_x(x) = \mu \frac{dv_c(x)}{dx} \quad (3.17)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ความคล่องตัวของพาหะข้างน้อยภายในช่องนำไฟฟ้า

จากสมการที่ (3.17) จะได้

$$\frac{1}{dt} = \mu \frac{dv_c(x)}{dx^2} \quad (3.18)$$

แทนค่าสมการที่ (3.16) และ (3.18) ในสมการที่ (3.10) จะได้

$$I_x = \mu C'_{\text{ox}} W [V_{\text{GB}} - V_{\text{TH}} - V_c(x)] \frac{dv_c(x)}{dx} \quad (3.19)$$

อินทิเกรตสมการที่ (3.19) จาก  $x = 0$ ,  $V_c(x) = 0$  ถึง  $x = L_{\text{eff}}$ ,  $V_c(x) = V_{\text{DS}}$  จะได้

$$\int_0^{L_{\text{eff}}} I_x dx = \mu C'_{\text{ox}} W \int_0^{V_{\text{DS}}} [V_{\text{GB}} - V_{\text{TH}} - V_c(x)] dV_c(x) \quad (3.20)$$

เนื่องจากกระแส  $I_{DS}$  มีค่าคงที่ตลอดช่องนำไฟฟ้า ดังนั้นจะได้

$$I_{DS} = \mu C'_{ox} \left( \frac{W}{L_{eff}} \right) \left[ (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (3.21)$$

โดยที่  $L_{eff}$  คือ ความยาวประสิทธิผลของช่องนำไฟฟ้า  
 $W$  คือ ความกว้างของช่องนำไฟฟ้า  
 $V_{GS} = V_{GS}$  เนื่องจากวัสดุฐานรองและซอร์สลิวดวงจรเข้าด้วยกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) แรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) และแรงดันเดรน ( $V_{DS}$ ) ดังสมการที่ (3.21) นี้ใช้ได้เมื่อช่องนำไฟฟ้าระหว่างซอร์สและเดรนมีความต่อเนื่องตลอด หรือ อีกนัยหนึ่ง เป็นความสัมพันธ์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์แบบมอสทำงานในย่านเชิงเส้น (Linear region)

ณ จุด Pinch-off ช่องนำไฟฟ้าหรือชั้นอินเวอว์ชันที่เดรนจะมีความลึกเป็นศูนย์ ดังกล่าวแล้วในหัวข้อที่แล้ว แรงดันไบอัสเดรนจะมีค่าเท่ากับแรงดันเดรนอิ่มตัว ( $V_{D,sat}$ ) ซึ่งมีค่าเป็น

$$V_{D,sat} = V_c(L') = V_{GS} - V_{TH} \quad (3.22)$$

( $L'$  นิยามไว้ในรูปที่ 3.6 (c))

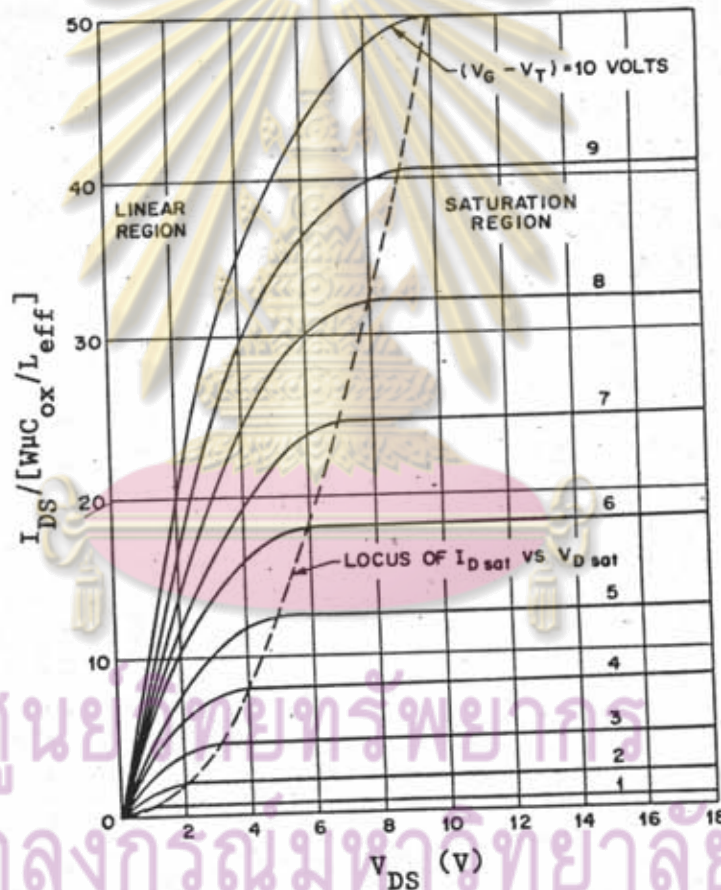
ดังนั้นเมื่อ  $V_{DS} > V_{D,sat}$  กระแสเดรนจะไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันเดรนอีกต่อไป เพราะเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ปลายของช่องนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $V_{D,sat}$  เสมอ ดังนั้นแทนสมการ (3.22) ในสมการที่ (3.21) จะได้

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (3.23)$$

โดยที่  $\beta = \mu C'_{ox} \left( \frac{W}{L_{eff}} \right)$  (3.24)

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกตในสมการที่ (3.23) จะใช้กับทรานซิสเตอร์แบบมอสขณะทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation region)

จากสมการที่ (3.21) และ (3.23) จะใช้ในการคำนวณหาลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอสได้ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน โดยมีแรงดันเกตเป็นพารามิเตอร์



รูปที่ 3.8 ลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n

ในการทำงานย่านเชิงเส้น จากสมการที่ (3.21) จะหาค่าความนำไฟฟ้าของช่องนำไฟฟ้าและค่า Transconductance ของทรานซิสเตอร์แบบมอสได้จาก

$$\varepsilon_D = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS} = \text{constant}} = \beta (V_{GS} - V_{TH} - V_{DS}) \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_m = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{constant}} = \beta V_{DS} \quad (3.26)$$

โดยที่  $\varepsilon_D$  คือ ค่าความนำไฟฟ้าของช่องนำไฟฟ้า

$\varepsilon_m$  คือ ค่า Transconductance

ในการทำงานย่านเอ็มตัว จากสมการที่ (3.23) ค่า Transconductance ของทรานซิสเตอร์แบบมอสจะ เป็น

$$\varepsilon_m = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{constant}} = \beta (V_{GS} - V_{TH}) \quad (3.27)$$

### 3.4 ความไม่คงที่ของความคล่องตัวของพาหะ

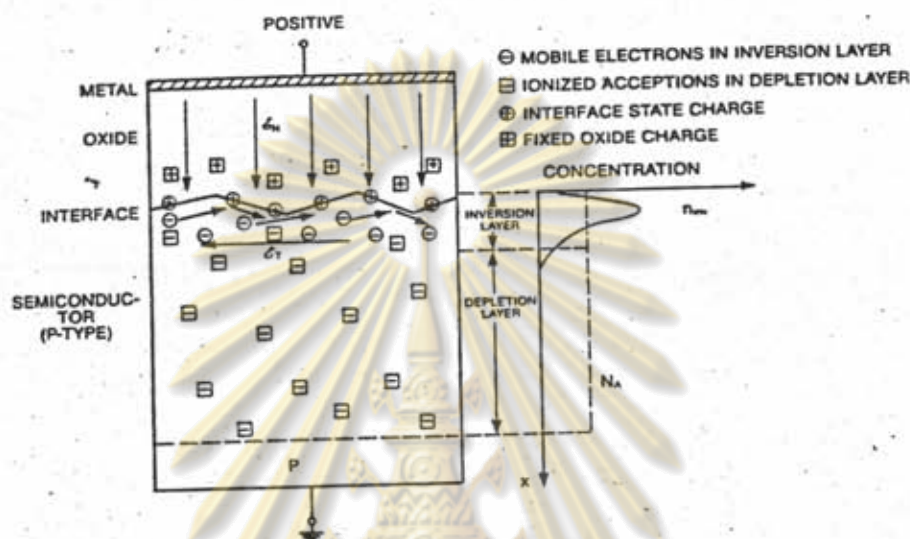
ลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอสในหัวข้อที่แล้ว เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขทางอุดมคติ ในทางปฏิบัติแล้วความคล่องตัว (mobility) ของพาหะในช่องนำไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบมอสจะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะมีผลต่อค่า Transconductance ของทรานซิสเตอร์แบบมอส พิจารณาทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n เมื่อป้อนแรงดันบวกให้กับเกตจนเกิดขึ้นอินเวอร์ชัน อิเล็กตรอนภายในชั้นอินเวอร์ชันจะมีการกระจายตัวแบบ Gaussian ดังแสดงในรูปที่ 3.9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในช่องนำไฟฟ้าจะถูกรบกวนจากสาเหตุ

1. เกิด Coulombic scattering เนื่องจากไอออนผู้รับ (Ionized acceptor) ซึ่งอยู่ในย่านปลอดพาหะ

2. เกิด Surface phonon scattering เนื่องจากการสั่นของโครงร่างผลึก ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

3. เกิด Coulombic scattering เนื่องจากประจุไฟฟ้าภายใน Interface state ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญเมื่อความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในชั้นอินเวอร์ชันไม่มากนัก (ในย่านการไบอัสแบบ weak inversion) และเมื่อความหนาแน่นของ Interface state สูง

4. เกิด Surface roughness scatterings ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญเมื่อทรานซิสเตอร์แบบมอสถูกไบอัสเกิดในย่าน Strong inversion

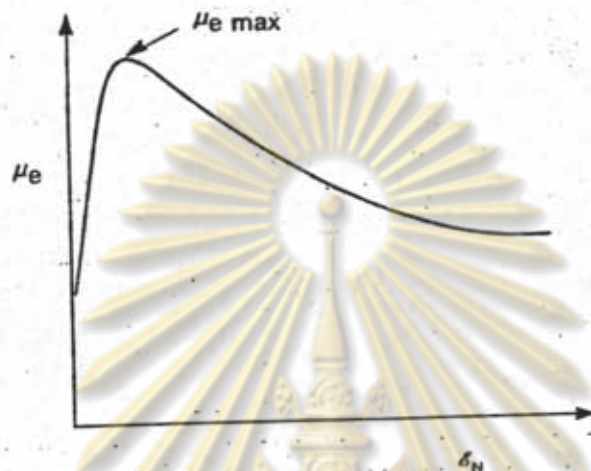


รูปที่ 3.9 ชั้นอินเวอร์ชันในทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n เมื่อป้อนแรงดันบวกให้กับเกต (34)

สาเหตุดังกล่าวข้างต้นนี้จะทำให้ความคล่องตัวของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้าเปลี่ยนไป เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าในทิศทางขนานกับผิวของสารกึ่งตัวนำ ( $E$ ) ขนาดต่ำ ๆ drift velocity ของพาหะจะขึ้นอยู่กับ  $E$  แบบเชิงเส้น โดยที่ความชันของเส้นตรงจะเป็นความคล่องตัวของพาหะ ( $v = \mu_n E$ ) ความคล่องตัวของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวของสารกึ่งตัวนำ ( $E_N$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวสารกึ่งตัวนำ แสดงดังในรูปที่ 3.10

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเพิ่มของความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะเมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวสารกึ่งตัวนำ มีค่าต่ำ ๆ (ย่าน Weak Inversion) เกี่ยวข้องอยู่กับ Coulombic Scattering เนื่องจากประจุไฟฟ้าภายใน Interface state (36) เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวสารกึ่งตัวนำมีค่ามากกว่า  $10^4$  v/cm ความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะจะลดลง (ย่าน Strong inversion) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Surface roughness scatterings ขึ้น



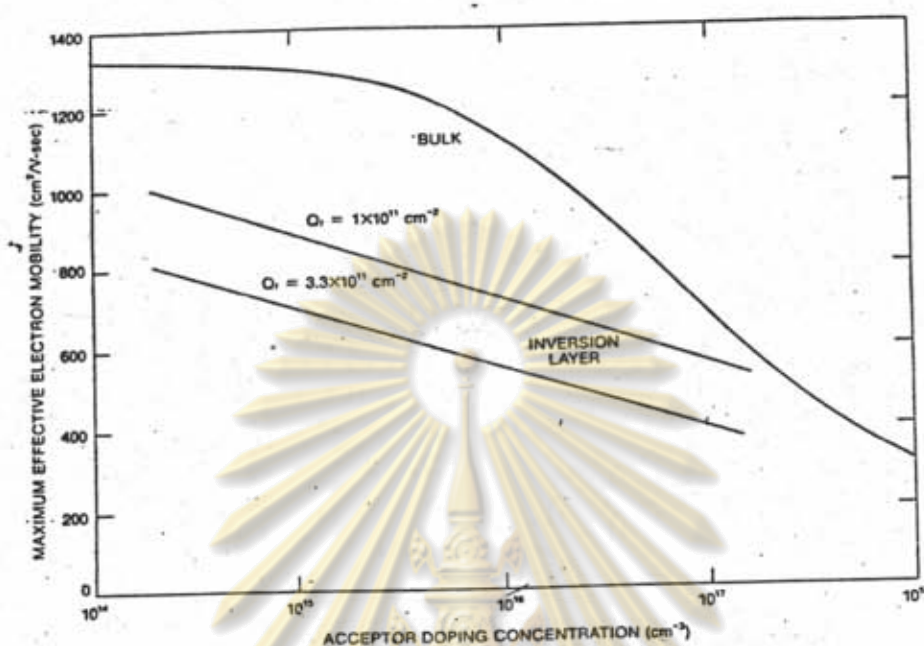
รูปที่ 3.10 ผลของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวสารกึ่งตัวนำต่อความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้า (35)

องค์ประกอบที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้ามืดดังต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของสารเจือปนภายในวัสดุฐานรอง (Substrate doping concentration) ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวประสิทธิผลสูงสุดของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้า ( $\mu_{e,max}$ ) กับความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรอง (37) แสดงดังในรูปที่ 3.11 การลดลงของความคล่องตัวประสิทธิผลสูงสุดของพาหะ เมื่อความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้เกิดชั้นอินเวอร์ชันขึ้นได้ มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรองสูงขึ้น

2. ประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์ (Oxide charge) ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนภายในช่องนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์อย่างมาก (37) ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวประสิทธิผลสูงสุดของพาหะกับ Oxide fixed charge ( $Q_f$ ) แบบไฮเปอร์โบลิก (38) แสดงดังสมการที่ (3.28)





รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงของความคล่องตัวสูงสุดของพาหะในช่องนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารเจือปนภายในวัสดุฐานรอง เปรียบเทียบกับความคล่องตัวของพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ (37)

$$\mu_{e,max} = \frac{\mu_o}{1 + \alpha Qf} \quad (3.28)$$

$$\mu_o = 3490 - 164 \log(N_A) \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \quad (3.29)$$

$$\alpha = -0.104 + 0.0193 \log(N_A) \quad (3.30)$$

สมการที่ (3.28), (3.29) และ (3.30) ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวสูงสุดของพาหะกับความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรองในหัวขั้วที่แล้วด้วย สำหรับกรณีที่ความหนาแน่นของ Interface trap มีค่าสูงจะรวมผลของ Interface trap เข้ากับ  $Qf$  ด้วย

3. สนามไฟฟ้า (Electric field) เมื่อเกิดขึ้นอินเวอร์ชันขึ้นเรียบร้อยแล้ว (ย่าน Strong inversion) ความคล่องตัวของพาหะในชั้นอินเวอร์ชันจะลดลงเมื่อสนามไฟฟ้าประสิทธิผล ตั้งฉากกับผิวสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับที่ปรากฏในรูปที่ 3.10 ค่าสนามไฟฟ้าประสิทธิผลคือ ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงการกระจายของพาหะภายในชั้นอินเวอร์ชัน

$$(E_n)_{\text{eff}} = \frac{1}{\epsilon_s} \left( \frac{1}{2} Q_{\text{inv}} + Q_B \right) \quad (3.31)$$

โดยที่  $Q_{\text{inv}}$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในชั้นอินเวอร์ชัน  
 $Q_B$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในย่านปลอดพาหะ  
 $\epsilon_s$  คือ Dielectric constant

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวของพาหะและสนามไฟฟ้าประสิทธิผลมีดังนี้

$$\mu_e = \mu_{e,\text{max}} \left( \frac{E_c}{(E_n)_{\text{eff}}} \right)^\beta \quad (3.32)$$

ค่า  $\mu_{e,\text{max}}$  หาได้จากสมการที่ (3.28) ค่า  $\beta$  และ  $E_c$  จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของ Interface state และความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรอง ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ได้ถูกวัดในระหว่างการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบเปียกและแบบแห้ง (37) มีค่าดังต่อไปนี้

$$\beta_{\text{wet } O_2} = 0.341 - (5.44 \times 10^{-3}) \log(N_A) \quad (3.33)$$

$$\beta_{\text{dry } O_2} = 0.313 - (6.05 \times 10^{-3}) \log(N_A) \quad (3.34)$$

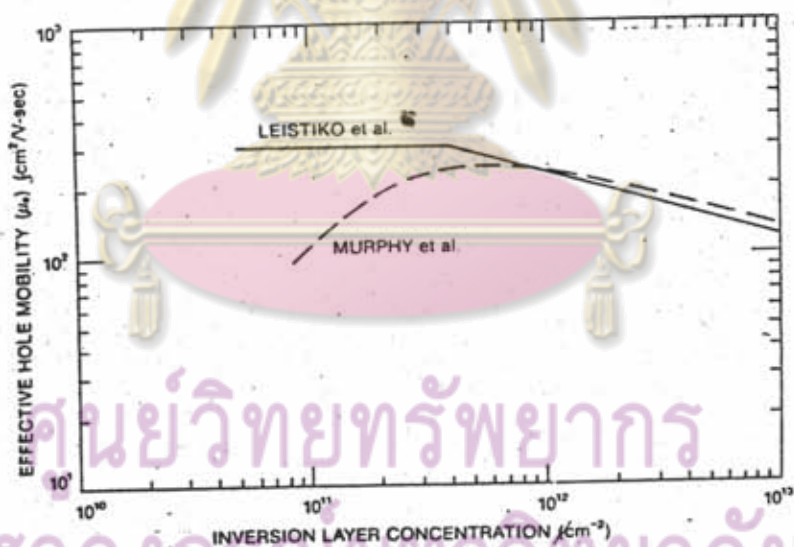
ค่าความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะในช่องนำไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบมอสซึ่งผลิตด้วยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบแห้งจะมีค่าสูงกว่าของทรานซิสเตอร์แบบมอส ซึ่งผลิตด้วยการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบเปียกเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูง เพราะเนื่องจากผิว Interface ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อนแบบแห้งจะเรียกว่า

$$E_c = (2 \times 10^{-4}) N_A^{(0.25)} (BQ_f)^{Ae} \quad (3.35)$$

ใน Wet oxide  $A = 2.79 \times 10^4$  V/cm  $B = 8.96 \times 10^{-2}$   
 ใน dry oxide  $A = 2.61 \times 10^4$  V/cm  $B = 0.13$

จากสมการที่ 3.35 เนื่องจากค่า  $Q_f$  อยู่ในช่วงของ  $10^{11}/\text{cm}^2$  ดังนั้นประจุไฟฟ้าใน Interface state จึงมีอิทธิพลมากกว่าความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรองต่อความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวประสิทธิผลของโฮลภายในช่องนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าภายในช่องนำไฟฟ้า (35, 39) แสดงดังในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงของความคล่องตัวของโฮลในชั้นอินเวอร์ชันกับประจุไฟฟ้าภายในชั้นอินเวอร์ชัน

4. ทิศทางของผลึก (Orientation) ความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะภายในชั้นอินเวอร์ชันจะขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึกที่บริเวณผิวของวัสดุฐานรอง ซึ่งเกิดขึ้นอินเวอร์ชันชั้น (40,41) พบว่าสำหรับอิลเล็คตรอนในชั้นอินเวอร์ชัน

$$\mu_e(100) > \mu_e(111) > \mu_e(110)$$

และสำหรับโฮลในชั้นอินเวอร์ชัน

$$\mu_p(110) > \mu_p(111) > \mu_p(100)$$

นอกจากความคล่องตัวของพาหะภายในชั้นอินเวอร์ชันจะเปลี่ยนแปลง เนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ ดังได้กล่าวมาแล้ว ถ้าสนามไฟฟ้าขนานกับผิวของสารกึ่งตัวนำ ( $E_x$ ) มีค่าสูงจนทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง drift velocity ของพาหะกับสนามไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว ความเร็วของพาหะอิสระในช่องนำไฟฟ้าจะเกิดการอิ่มตัวขึ้น และเรียกความเร็วนี้ว่า Saturated drift velocity ซึ่ง Saturated drift velocity ของพาหะจะขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก อุณหภูมิและสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวสารกึ่งตัวนำ ( $E_n$ ) (42) drift velocity ของพาหะในช่องนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

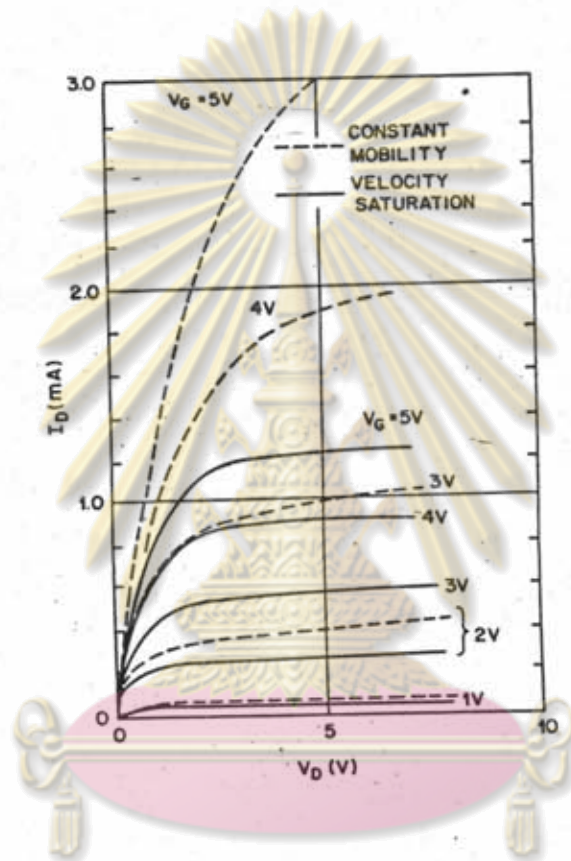
$$v_d = v_o \left[ 1 + \left( \frac{v_o}{v_c} \right)^2 \left( \frac{v_o}{v_s} + G \right)^{-1} + \left( \frac{v_o}{v_s} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (3.36)$$

$$v_o \equiv \mu_n(E_n) \cdot E_x \quad (3.37)$$

โดยที่  $v_c$ ,  $v_s$  และ  $G$  เป็นพารามิเตอร์

เมื่อ  $E_x$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แล้ว  $v_d = v_o = \mu_n(E_n)E_x$  และเมื่อ  $\mu_n E_x$  มีค่าสูงกว่าค่า  $v_c$  และ  $v_s$  มาก  $v_d$  จะมีค่าประมาณ  $v_s$  (Saturated drift velocity) ซึ่งขึ้นอยู่กับ  $E_n$

การอิ่มตัวของความเร็วของพาหะจะมีผลต่อทรานซิสเตอร์แบบมอส 2 ประการคือ ทำให้กระแสเดรนอิ่มตัวลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแรงดันเกตมีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และกระแสเดรนอิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับแรงดันเกตแบบเชิงเส้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใกล้ ๆ กับแรงดันเดรนอิ่มตัว

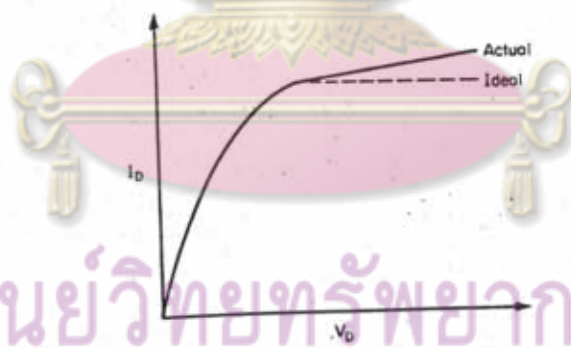


รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอส เมื่อความคล่องตัวของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้าคงที่ และเมื่อเกิดการอิ่มตัวของความเร็วของพาหะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5 ผลของการสั้นลงของช่องนำไฟฟ้า

การทำงานของทรานซิสเตอร์แบบมอสตังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อการไบอัสแรงดันให้เดรนเกินค่าแรงดันเดรนอิ่มตัว ( $V_{D,sat}$ ) แล้ว ไม่ได้คำนึงถึงการเคลื่อนตัวของจุด Pinch-off เข้าหาซอร์ส จึงทำให้กระแสเดรนในย่านอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์แบบมอสมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันเดรน ดังแสดงในสมการที่ (3.23) การเคลื่อนตัวของจุด Pinch-off เข้าหาซอร์สจะทำให้ช่องนำไฟฟ้าสั้นลง โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่จุด Pinch-off (ตำแหน่ง Y ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (c)) จะมีค่าเท่ากับแรงดันเดรนอิ่มตัว แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเดรนส่วนเกินจะตกคร่อมย่านปลอดพาหะจากจุด Y ถึงเดรน เมื่อช่องนำไฟฟ้าสั้นลงเมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น ขณะที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมช่องนำไฟฟ้ายังคงเท่ากับแรงดันเดรนอิ่มตัว จึงทำให้กระแสเดรนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของแรงดันเดรน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ปรากฏการณ์เช่นนี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์แบบมอสมีค่าอิมพีแดนซ์ขาออกเมื่อถูกนำไปใช้ในวงจรรอนาล็อก และทรานซิสเตอร์แบบมอสจะมีกระแสเดรนมากเกินไปเมื่อใช้ในวงจรถิฉิตอล



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ 3.14 ผลของการสั้นลงของช่องนำไฟฟ้า

กระแสเดรนเมื่อเกิดการสั้นลงของช่องนำไฟฟ้าชั้น สามารถหาได้จาก

$$I_D = \frac{I_{D,sat}}{(L'/L)} \quad (3.38)$$

โดยที่

$$L-L' = \left[ \frac{2\epsilon_s \epsilon_{ox} (V_D - V_{D,sat})}{qN_A} \right]^{1/2} \quad (3.39)$$

เมื่อสมมติว่าแรงดันเดรนส่วนเกิน  $(V_D - V_{D,sat})$  ตกคร่อมหัวต่อ pn



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย