

บทที่ 2

เทคโนโลยีของซีมอสและทฤษฎีของมอสเฟต

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยในส่วนและเทคโนโลยีของซีมอสและทฤษฎีของมอสเฟต ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง บทนำ เทคโนโลยีของมอส โครงสร้างของมอสเฟต สัญลักษณ์ของมอสเฟต หลักการพื้นฐานของมอสเฟต ชนิดของมอสเฟต แบบจำลองของมอสเฟต และบทสรุป

2.1 บทนำ

วงจรรวม (Integrated Circuit) ซึ่งเรียกย่อ ๆ ว่า IC ที่จะกล่าวถึงในที่นี้จะอยู่ในลักษณะที่เป็นโมโนลิธิค (Monolithic) กล่าวคือ วงจรทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย ส่วนประกอบ (Component) ต่าง ๆ ทั้งแบบแอคทีฟและแพสซีฟ อยู่บนสารกึ่งตัวนำเดียวกัน วงจรรวมนี้โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ พวกลิเนียร์และดิจิทัล ซึ่งในหัวข้อการวิจัยนี้จะเน้นไปในการออกแบบวงจรลิเนียร์ โดยเป็นการวิจัยและพัฒนาการออกแบบวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน อาศัยหลักการทำงานของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนซ์เมนต์ (Enhancement) ที่มีการทำงานอยู่ในย่านไม่อิ่มตัว (Non-Saturation Region หรือ Ohmic Region) เป็นหลักการออกแบบวงจร และได้จำลองการเลียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ คือ โปรแกรม PSpice ซึ่งจะใช้เป็นข้อแสดงถึงสมรรถนะของวงจรที่เกิดขึ้นว่ามีคุณสมบัติเป็นไปตามหลักการที่ออกแบบไว้หรือไม่

2.1.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างวงจรรวมกับวงจรดีสครีท

ในปัจจุบันการลงทุนเกี่ยวกับทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ มักจะเน้นหนักไปในการผลิต IC มากกว่าการผลิตส่วนประกอบแบบดีสครีท ทั้งนี้เพราะ IC มีข้อดีมากกว่าวงจรดีสครีท กล่าวคือ

- 1) ทางด้าน IC นั้นสามารถผลิตวงจรต่าง ๆ ได้ที่ละหลาย ๆ วงจรต่อการผลิต 1 ครั้ง ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนในการผลิต IC มีราคาถูก
- 2) เนื่องจากส่วนประกอบภายใน IC เช่น ทรานซิสเตอร์ซึ่งถูกผลิตขึ้นมาพร้อม ๆ กัน ในกระบวนการผลิต ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของส่วนประกอบต่าง ๆ นั้นมีค่าเท่ากันและคุณสมบัติ (Characteristics) ของส่วนประกอบเหล่านั้นจะมีความสมมาตรกัน (Match) และนอกจากนั้นส่วน

ประกอบเหล่านี้ยังมีคุณสมบัติต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่นการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิเหมือนกันด้วย (Thermal Tracking) ซึ่งข้อดีดังกล่าวจึงทำให้ IC มีขีดความสามารถและความเชื่อมั่นในการใช้งานสูง (High Performance and High Reliability) โดยที่ผู้สร้างอาจจะสร้างวงจรที่มีความยุ่งยากและสลับซับซ้อนมาก ๆ ขึ้นมาได้โดยที่อาจจะเป็นไปได้เลยสำหรับวงจรดิจิตอล

3) เนื่องจาก IC จะไม่มีรอยต่อบัดกรี จึงสามารถลดผลต่าง ๆ อันเกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งที่แอบแฝงอยู่ในรอยบัดกรีนั้นลงไปโดยสิ้นเชิง ทำให้วงจรใน IC ทำงานดีกว่าวงจรดิจิตอลทั่วไป

4) IC แต่ละตัวอาจทำงานได้เท่า ๆ กับบล็อกแต่ละบล็อกของระบบ (System) ทั่ว ๆ ไปในการศึกษาหรือการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน จึงเน้นหนักไปในทางด้านบล็อกไดอะแกรมเสียเป็นส่วนใหญ่ จึงจะช่วยให้เกิดความสะดวกขึ้นอีกมาก เพราะสามารถใช้ IC แทนลงในบล็อกไดอะแกรมนั้นได้เลย โดยที่ผู้สร้างไม่จำเป็นต้องไปสร้างวงจรในแต่ละบล็อกนั้นอีก จึงทำให้ลดความยุ่งยากของวงจรทั้งหมดลงไปได้

5) IC มีขนาดเล็กและเบา

อย่างไรก็ตามเมื่อ IC มีข้อดี ก็ย่อมจะมีข้อเสียคู่กันไปเป็นของธรรมดา ซึ่งข้อเสียข้อหนึ่งของ IC ก็คือ ไม่สามารถปรับแต่งค่าต่าง ๆ เช่น ค่าความต้านทานใน IC ได้โดยง่าย เหมือนกับในวงจรดิจิตอล แต่ถ้าจำเป็นจริง ๆ ก็จะสามารถปรับแต่งได้โดยใช้แสงเลเซอร์ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นมาก ส่วนข้อเสียอีกหนึ่งข้อของ IC ก็คือ การออกแบบวงจรจะยุ่งยากสลับซับซ้อนและใช้เวลามากกว่าการออกแบบวงจรดิจิตอลที่ทำงานอย่างเดียวกันแต่ข้อเสียดังกล่าวก็จะมีผลมากเท่าไรเมื่อผลิต IC เหล่านั้นในจำนวนมาก

2.1.2 ข้อเปรียบเทียบระหว่างทรานซิสเตอร์แบบเฟทกับแบบไบโพลาร์

โดยทั่วไปทรานซิสเตอร์แบบเฟทถูกพิจารณาว่ามีคุณสมบัติที่ดีและมีประโยชน์เหนือกว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ซึ่งอาจสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1) ทรานซิสเตอร์แบบเฟทจะมีค่าความต้านทานอินพุตสูงมาก (High Input Impedance) อยู่ในช่วงประมาณ $10^{10} - 10^{15} \Omega$ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของเฟท ซึ่งแตกต่างจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ที่มีค่าความต้านทานอินพุตต่ำ จึงทำให้เฟทถูกนำไปใช้งานได้อย่างสะดวก กว้างขวาง ไม่มีปัญหายุ่งยากในการใช้งานและไม่เป็นภาระในการต่อร่วมกับอุปกรณ์หรือวงจรอื่น ๆ

2) ทรานซิสเตอร์แบบเฟท เป็นอุปกรณ์ที่มีเสถียรภาพการทำงานที่ดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ คือ มีค่าความไวต่ออุณหภูมิหรือรังสี โดยเฉพาะรังสีคอสมิก (Cosmic Ray) น้อยกว่าทำให้เฟทถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุปกรณ์การสื่อสารระบบดาวเทียม ซึ่งทำงานในอวกาศ

3) ทรานซิสเตอร์แบบเฟต จะมีสัญญาณรบกวน (Noise) ต่ำกว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ การทำงานของเฟตจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่า

4) ทรานซิสเตอร์แบบเฟต เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างง่าย ๆ ไม่สลับซับซ้อนโดยเฉพาะมอสเฟต ทำให้สร้างได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก จึงทำให้เฟต มีราคาถูกกว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

5) ทรานซิสเตอร์แบบเฟต มีโครงสร้างที่เป็นแบบสมมาตรสองข้าง (Bisymmetrical Structure) คือ ในส่วนของซอสและเดรน จะมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการสามารถสลับหน้าที่กันได้ทำให้ง่ายต่อการออกแบบวงจร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบเฟตในรูปของวงจรรวม (Integrated Circuit) ต่างจากกรณีของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ เช่น ในส่วนของอิมิตเตอร์ (Emitter) และคอลเลกเตอร์ (Collector) มีคุณสมบัติแตกต่างกันไม่สามารถสลับหน้าที่กันได้

6) การทำงานของทรานซิสเตอร์แบบเฟต มีการสูญเสียกำลังงานน้อยมาก เนื่องจากค่าความต้านทานอินพุตมีค่าสูง ทำให้มีกระแสไหลได้น้อยมากหรือไม่มีกระแสไหล เช่น ในกรณีของมอสเฟต ดังนั้นจึงทำให้ไม่มีการใช้กำลังงาน ซึ่งแตกต่างจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ จะมีค่าความต้านทานอินพุตต่ำ ทำให้มีกระแสไหลในด้านอินพุต จึงมีการสูญเสียกำลังงานสูง ดังนั้นเฟตจึงเป็นอุปกรณ์ที่ประหยัดกำลังงานที่ดี คุณสมบัติข้อนี้ทำให้เฟต โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอสเฟต (MOSFET) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างยิ่งมีบทบาทมากที่สุดและถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งกล่าวได้ว่ามอสเฟต เป็นสิ่งประดิษฐ์จากฝีมือของมนุษย์ที่มีจำนวนมากที่สุดบนโลก

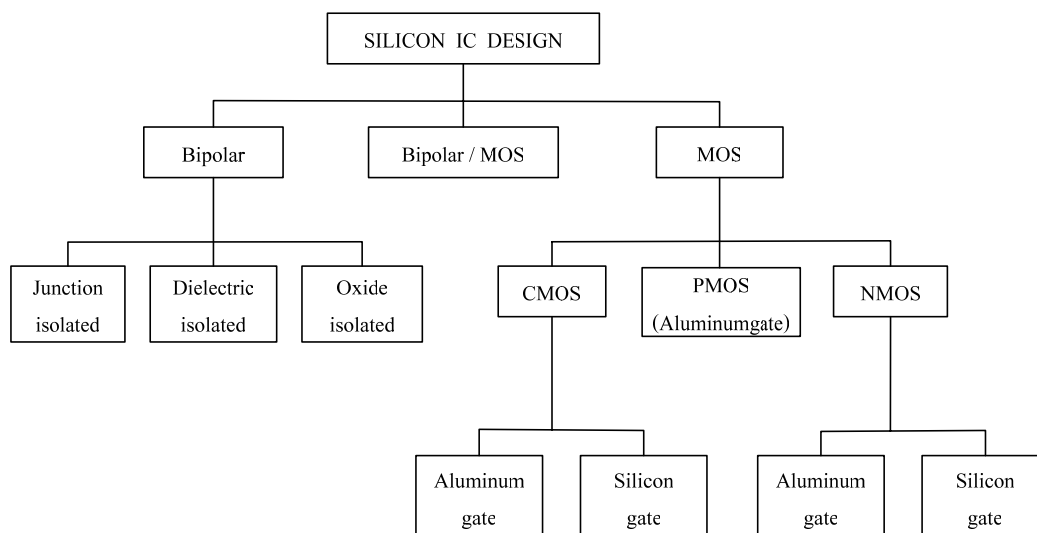
7) ทรานซิสเตอร์แบบเฟต เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แรงดันในการควบคุมการทำงาน (Voltage Control) ต่างจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ที่ควบคุมการทำงานด้วยกระแส (Current Control) ทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดยสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด และในขณะทำงานจะเกิดความร้อนน้อยกว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

8) กรณีของทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะนำไปสร้างในรูปของวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) เพราะมีโครงสร้างที่ง่ายกว่า ทั้งยังสามารถสร้างให้มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ในระดับไมโครเมตร (μm) ซึ่งในเทคโนโลยีของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ยังไม่สามารถทำได้ ทำให้วงจรรวมชนิดมอสเฟต (MOS IC) เป็นวงจรรวมที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น วงจรหน่วยความจำ (Memory ICs) ซึ่งในแต่ละชิ้นของวงจรรวมที่มีขนาดพื้นที่ประมาณหนึ่งตารางเซนติเมตรจะมีมอสเฟตบรรจุอยู่หลายล้านตัว

สำหรับข้อจำกัดหรือข้อด้อยของทรานซิสเตอร์แบบเฟตที่สำคัญ ได้แก่ การที่เฟตมีค่าความนำถ่ายโอนหรือทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance: g_m) ที่มีค่าต่ำ จึงทำให้เฟตมีอัตราขยายที่ต่ำกว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

2.2 เทคโนโลยีของมอส

การพัฒนาการของเทคโนโลยี (VLSI: Very Large Scale Integration) เป็นการผลิตวงจรรวมที่เป็นเทคโนโลยีที่นิยมกันมาก เพราะมีข้อดีกว่าเทคโนโลยีแบบอื่น ๆ หลายประการ เช่น การสูญเสียของพลังงานต่ำกว่า มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก การออกแบบง่าย ฯลฯ ซึ่งมีความต้องการมากในงานด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) แบบเป็นวงจรรวมอยู่บนชิพเดียว (Single Chip) การทำงานจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งในวงจรรอนาลอก (Analog) ซึ่งเป็นบทบาทสำคัญของการผลิตไอซีโดยออกแบบเป็น VLSI ในการออกแบบ VLSI ในระบบวงจรรอนาลอก (Analog Circuit) ส่วนใหญ่ที่รู้จักก็คือ วงจรกรองสัญญาณ วงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิทัล และวงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาลอก วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) วงจรควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (Automatic Gain Control) ภาพที่ 2.1 พัฒนาการของแผนผังเทคโนโลยีวงจรรวม



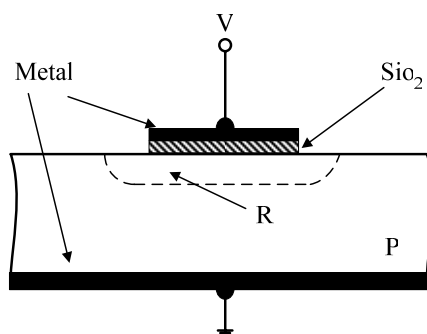
ภาพที่ 2.1 แผนผังของเทคโนโลยีวงจรรวม

วิธีการออกแบบ IC นิยมใช้เทคโนโลยีอยู่ 2 แบบคือ แบบไบโพลาร์ (BJT) และแบบมอส (MOS) โดยจะแบ่งเป็นส่วนย่อย ๆ ดังภาพที่ 2.1 ทั้งหมดจะอยู่บนรากฐานของเทคโนโลยีวงจรรวมซิลิกอน (Silicon Integrate – Circuit Technology) โดยเมื่อก่อนการออกแบบวงจรรวมนั้นจะใช้เทคโนโลยีของไบโพลาร์ แต่ในยุคปัจจุบันเทคโนโลยีของมอสได้เจริญเติบโตขึ้นอย่างมากซึ่งในส่วนเทคโนโลยีของมอส ทำให้สามารถบรรจุวงจรที่ถูกออกแบบไว้มีความหนาแน่นมากขึ้น เช่น หน่วยความจำ (Memory) หน่วยประมวลผล (Microprocessor) และจากภาพที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า

ในเทคโนโลยีวงจรรวมมีอุปกรณ์หลายชนิดงานวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์มอสเฟตชนิดเอ็นแชนซ์เมนต์ในการออกแบบ ดังนั้นในบทนี้จะขออธิบายถึงการทำงานของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนซ์เมนต์ต่อไป

2.3 โครงสร้างของมอสเฟต

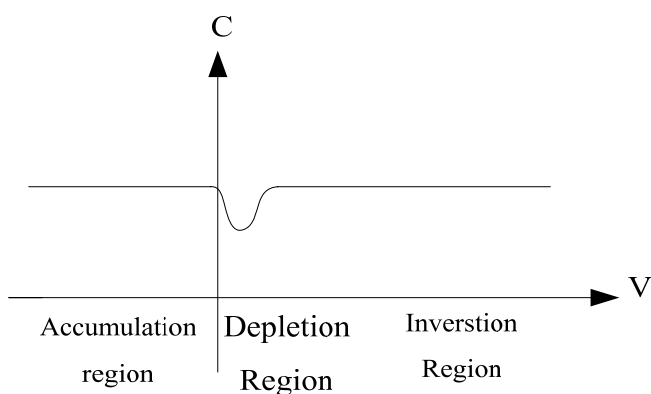
จากภาพ 2.2 เป็นการประกอบของชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้างแบบมอสประกอบด้วยโลหะชั้นบนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งเป็นฉนวนที่สมบูรณ์ ซิลิกอนชนิดพี และโลหะชั้นล่างที่ซึ่งต่อกับกราวด์ (Ground)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของมอส (MOS: Metal-Oxide Semiconductor)

สมมติให้ V เป็นลบมีสนามไฟฟ้าคร่อมชั้นของซิลิกอน (โวล) ไปที่บริเวณ R ได้โลหะชั้นล่างประจุลบจะรวมตัวอยู่แผ่นโลหะ (Electrode) ด้านบน และประจุบวกจะรวมตัวอยู่ที่บริเวณ R ซึ่งในกรณีนี้ อุปกรณ์นี้จะแสดงตัวเป็นตัวเก็บประจุมีค่าของขนาดความจุไฟฟ้าเป็น

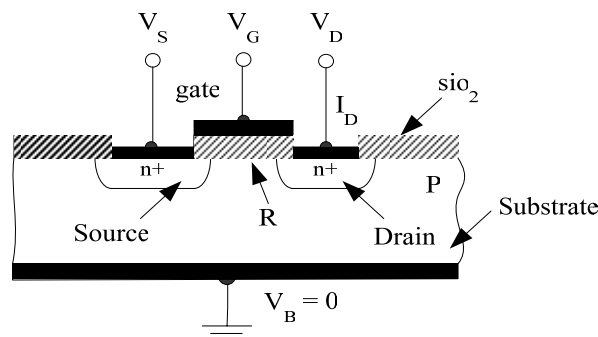
$$C \approx \epsilon_{ox} \frac{A}{l} \quad (2.1)$$



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ (C) กับแรงดัน (V)

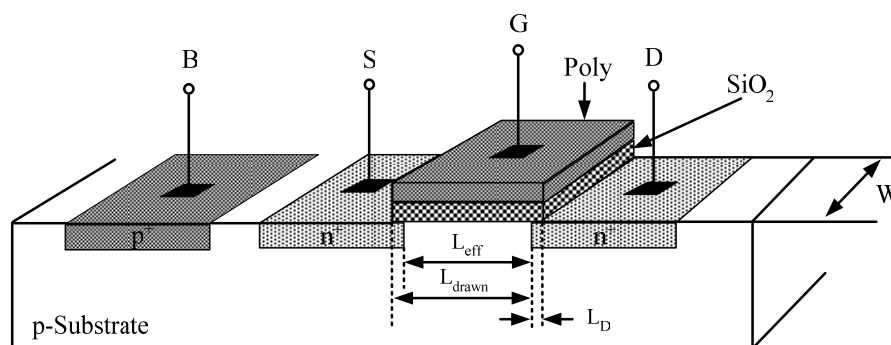
จากสมการที่ (2.1) ค่าของ ε_{OX} เป็นค่าการยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านของ (SiO_2) โดยมีค่าของ $\varepsilon_{OX} = \varepsilon_O k_{OX} \cong 0.35 \text{ pF/cm}$ โดยที่ k_{OX} คือค่าความเป็นฉนวนของ (SiO_2) ($k_{OX} = 3.9$), ε_O คือ ค่าการยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านของบรรยากาศ ($\varepsilon_O \cong 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$) สำหรับ A คือพื้นที่หน้าตัดของขั้วโลหะด้านบน และ l เป็นความหนาของชั้นออกไซด์ซิลิกอนชนิดพีที่อยู่ระหว่าง R และโลหะชั้นล่างแสดงตัวเป็นความต้านทาน หรือค่าตัวเก็บประจุสัญญาณนั่นเอง

ขั้นต่อไปสมมติให้ V มีแรงดันเป็นค่าบวกน้อย ๆ จะเกิดสนามไฟฟ้าซึ่งผลักดัน(โฮล) ผลที่ได้คือ ประจุลบแยกออกจากกัน โดย (โฮล) ที่เคลื่อนที่จะเป็นผลให้ไม่มีประจุอยู่ที่บริเวณ R ซึ่งเรียกว่า (Depletion Layer) และประจุบวกก็จะรวมกันอยู่ที่ (Electrode) ด้านบนและจะเป็นเหมือนตัวเก็บประจุเมื่อ V เพิ่มขึ้นทำให้ประจุใน R จะมากขึ้นและทำให้ (Depletion Layer) กว้างขึ้นตาม ถ้า V เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะมีปรากฏการณ์ใหม่เกิดขึ้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจาก (โฮล) และอิเล็กตรอนเกิดขึ้นเรื่อย ๆ ในสารกึ่งตัวนำถ้าสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างจาก V ที่เป็นบวกอย่างเพียงพอจะสามารถดูดความร้อนจากอิเล็กตรอนทั้งหมดไปที่ R และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปที่ผิวหน้า ซึ่งประจุบวกจะรวมตัวอยู่ที่ (Electrode) ด้านบน ขณะเดียวกันประจุลบ หรืออิเล็กตรอน จะอยู่ที่ชั้นของผิวหน้า จากสมการที่ (2.1) ค่าของ l ซึ่งเป็นความหนาของ (SiO_2) และค่าของ C จะมีค่าเท่ากับกรณีที่ V ที่เป็นบวกกับในกรณีที่ค่า V ที่เป็นลบ แต่ในกรณีที่ V เป็นบวกน้อย ๆ จะอยู่ในย่าน Depletion Region ซึ่งค่าของ C ในเทอมของ V จะแสดงไว้ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งมีชื่อเรียกอยู่ 3 Regions คือ (Accumulation Region, Depletion Region, Inversion Region) โดยพิจารณาจากภาพที่ 2.4 แสดงถึงรายละเอียดของมอสเฟต ซึ่งจะเห็น n^+ (การโดปสารชนิด n) Region อยู่ 2 ตัวในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในด้านซ้ายจะเรียกว่าซอส (Source) ซึ่งแรงดันที่ต่ออยู่จะเรียกว่า V_S ในด้านขวาจะเรียกว่า เทรน (Drain) ซึ่งแรงดันที่ต่ออยู่จะเรียกว่า V_D โลหะที่ทำ Electrode จะเรียกว่าเกต ซึ่งแรงดันที่ต่ออยู่จะเรียกว่า V_G และตัวถังของอุปกรณ์ตัวนี้จะเรียกว่า ซับสเตรท (Substrate) หรือ บัค (Bulk) ซึ่งแรงดันที่ต่ออยู่จะเรียกว่า V_B



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของมอสเฟต (MOSFET: Metal-Oxide Semiconductor FET)

NMOS ประกอบด้วย ส่วนซับสเตรท (Substrate) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P – Type) ซึ่งมีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น 2 ชุค ถูกแพร่ลงบนฐานรอง สารกึ่งตัวนำนี้เรียกว่า ซอส (Source) และเดรน (Drain) บนผิวหน้าระหว่างซอสกับเดรนจะมีแผ่นฟิล์มบางของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ส่วนบนของซิลิกอนไดออกไซด์ จะมีโพลีซิลิกอนซึ่งทำหน้าที่เรียกว่า เกท (Gate) ถ้าส่วนของฐานรองทำด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพีถูกแพร่ลงบนฐานรอง โครงสร้างชนิดนี้เรียกว่า PMOS ระยะห่างระหว่างสารกึ่งตัวนำที่เป็น ซอสและเดรน เรียกว่าความยาวแชนแนล (Channel Length : L) และความกว้างของช่องระหว่าง ซอสและเดรน เรียกว่า ความกว้างแชนแนล (Channel width : W)



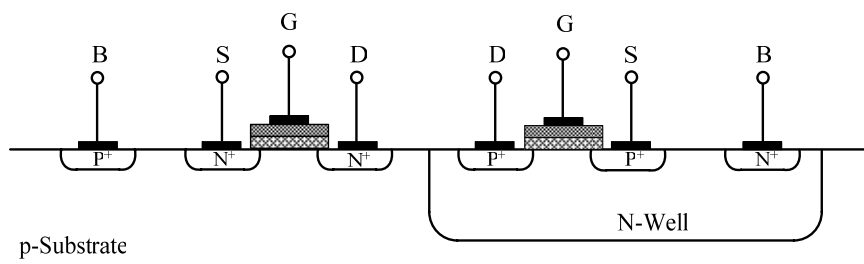
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็น

จากภาพที่ 2.5 โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็น (NMOS) ขั้วซอส (Source) และขั้วเดรน (Drain) ถูกสร้างขึ้นโดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นมาก (Heavily Doped N-Type Region) เข้าไปในฐานรอง (Bulk Region or Substrate) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยว (Single Crystal) ที่มีความหนาแน่นน้อย (Lightly Doped P-Type Substrate) ขั้วเกทจะเป็นส่วนของโลหะ (Metal) หรือชั้นของโพลีซิลิกอน (Poly Silicon) ซ้อนอยู่บนชั้นของออกไซด์ระหว่างขั้วเดรนและซอส ซึ่งวิธีการในการสร้างชั้นโพลีซิลิกอนสร้างด้วยเทคนิค (CVD: Chemical Vapor Deposition) จากก๊าซสารประกอบของซิลิกอน เช่น ก๊าซไฮโดรเจน (Silane) ชั้นของซิลิกอนที่สร้างจะถูกเติมด้วยอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้นเพื่อให้มีความนำไฟฟ้าสูง นำไฟฟ้าได้ดีเหมือนตัวนำ ลดค่าแรงดันขีดเริ่ม ทำงานได้ดีที่ความถี่สูง และมีคุณสมบัติเป็นผลึกรูปหรือโพลีซิลิกอน (Poly Silicon) นอกจากนี้แล้ว เกทที่ทำจากซิลิกอนมีความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิเย็บ ทำให้ไม่มีปัญหาในการสร้างที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง

ระยะห่างระหว่างขั้วซอสและขั้วเดรน เป็นความยาวของมอสทรานซิสเตอร์ (L : Channel Length) และมีระยะทางด้านข้าง (Side Wall) เป็นความกว้างของมอสทรานซิสเตอร์ (W : Channel

Width) จากภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าในเทอมของ L ประกอบด้วย L_{eff} คือ ความยาวจริง (Effective Length), L_{drawn} คือ ค่าความยาวที่เลย์เอาท์ (Layout) เพื่อวาดทรานซิสเตอร์ และ L_D คือ ความยาวที่เกิดจากการแพร่สารที่เจอแล้วกินความยาวเข้าไป (Diffusion Length) โครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดพี (PMOS) ลักษณะคล้ายคลึงกับมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็น (NMOS) แต่จะสลับกัน คือ มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีจะประกอบ ด้วย ผลึกฐานรองชนิดเอ็น (N-Type Substrate) ที่มีความหนาแน่นน้อย และมีการแพร่อะตอมสารเจือชนิดพีที่มีความหนาแน่นมากเข้าไปในฐานรองเพื่อเป็นขั้วซอสและเดรน

เทคโนโลยีซีมอส (CMOS: Complementary MOS) เป็นการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (NMOS) และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี (PMOS) บนผลึกแผ่นสารตัวนำเดียวกันมอสทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งจะถูกสร้างอยู่ในบ่อฐานรอง (Well) โดยทั่วไปแล้วจะนิยมสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี ในบ่อฐานรองชนิดเอ็น (N-Well) ดังภาพที่ 2.6



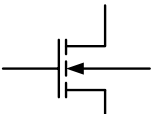
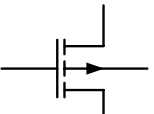
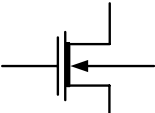
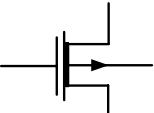
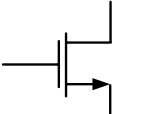
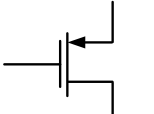
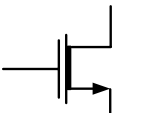
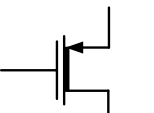
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของเทคโนโลยีซีมอส

2.4 สัญลักษณ์ของมอสเฟต

สัญลักษณ์ของมอสเฟตสามารถบอกได้ว่าเป็น มอสเฟตชนิด N หรือ P โดยดูที่หัวของลูกศรที่ขาซอส แต่ถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาเกตแสดงว่าเป็น PMOS แต่ถ้าหัวลูกศรหันออกจากเกตแสดงว่าเป็น NMOS หรือดูที่ทิศทางของหัวลูกศรที่ขาบอดี้ (Body) หรือฐานรอง (Substrate) หรือบางที่อาจเรียกว่า Bulk โดยถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาเกตแสดงว่าเป็น NMOS แต่ถ้าหัวลูกศรหันออกจากเกตแสดงว่าเป็น PMOS และสัญลักษณ์ยังสามารถบอกได้อีกว่ามอสเฟตเป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ หรือ ดิฟฟิชั่นอีกด้วย แสดงได้ตามตารางที่ 2.1

มอสเฟตแบ่งตามชนิดการทำงานได้ 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์มอส (Enhancement MOSFET) และชนิดดิฟฟิชั่นมอส (Depletion MOSFET) ซึ่งแต่ละชนิดจะแบ่งออกได้อีกเป็น (N-Channel) หรือ NMOS และ (P-Channel) หรือ PMOS ซึ่งโครงสร้างของ NMOS และ PMOS จะมีโครงสร้างตรงข้ามกัน เมื่อโครงสร้างของ PMOS และ NMOS แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิด (Enhancement) และมอสเฟตชนิด (Depletion)

NMOS	PMOS	MODE
 (ก)	 (ข)	Enhancement
 (ค)	 (ง)	Depletion
 (จ)	 (ฉ)	Enhancement
 (ช)	 (ซ)	Depletion

จากตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่าง ๆ ทั้ง 2 ชนิด แสดงสัญลักษณ์ในภาพ (ก) คือ (Enhancement NMOS) เมื่อโวลต์เดจระหว่างบอดีและซอส $V_{BS} \neq 0$ ในภาพ (ข) คือ (Enhancement PMOS) เมื่อ $V_{BS} \neq 0$ ในภาพ (ค) และ (ง) คือ (Depletion PMOS) เมื่อ $V_{BS} \neq 0$ สัญลักษณ์ในภาพ (ก) และ (ข) กับภาพ (จ) และ (ฉ) แตกต่างกันที่ $V_{BS} \neq 0$ และ $V_{BS} = 0$ ตามลำดับ

2.5 หลักการพื้นฐานของมอสเฟต

2.5.1 การทำงานของมอสเฟต

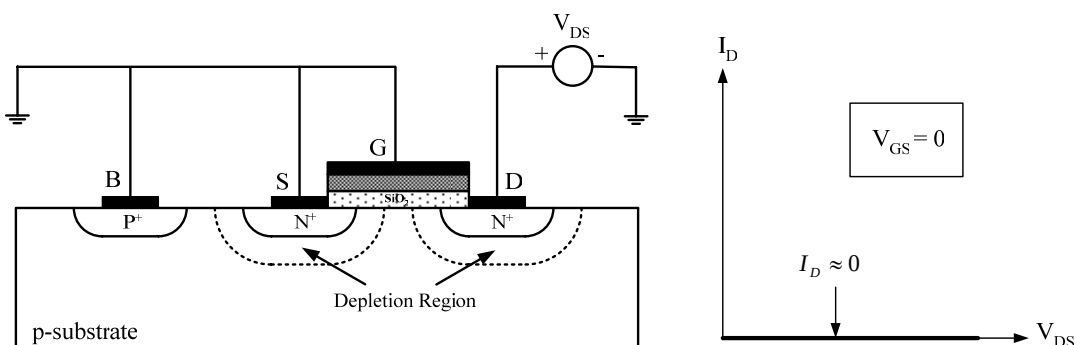
การให้แรงดันไบอัสแก่มอสเฟต ทำได้โดยแรงดันที่เกต V_G จะถูกไบอัสเพื่อควบคุมให้มีการเหนี่ยวนำประจุพาหะชนิดเดียวกับส่วนซอสและเดรน นั่นคือการควบคุมให้เกิดแขนแนลระหว่างซอสและเดรน ขั้วของซอสและฐานรองจะถูกต่อลงกราวด์ และส่วนเดรนได้รับศักดาซึ่งทำให้รอยต่อพี-เอ็น ที่ส่วนเดรนเป็นไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) ดังนั้น ในกรณีของเอ็น แขนแนลศักดาที่เกตและเดรนจึงมีค่าเป็นบวก ในทำนองเดียวกันกรณีของพีแขนแนล ศักดาที่เกตและเดรนจึงมีค่าเป็นลบ

ในกรณีที่ไม่มีแรงดันไบอัสที่เกต-ซอส หรือแรงดันที่เกต-ซอสเป็นศูนย์ ทำให้ไม่มีการสนามไฟฟ้าในชั้นของออกไซด์ ดังนั้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ ในสารกึ่งตัวนำจะไม่มีการ

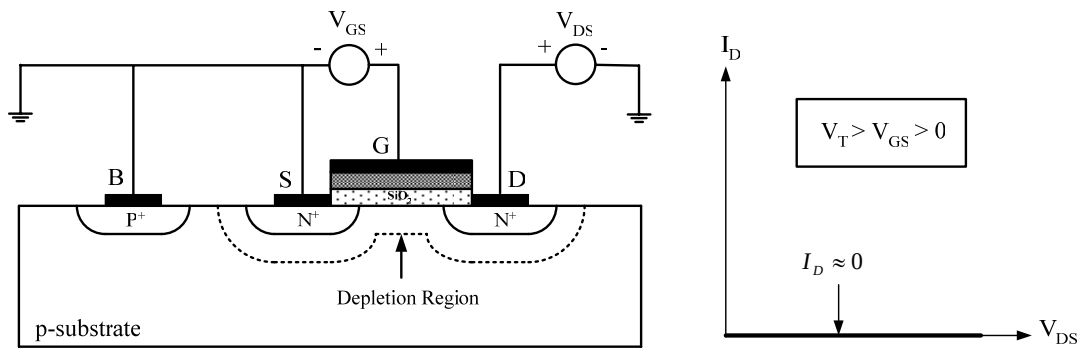
เปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้น ทำให้ไม่มีบริเวณปลอดพาหะและแซนแนลในย่านนี้ คงมีแต่บริเวณปลอดพาหะที่อยู่รอบ ๆ รอยต่อพี-เอ็นของส่วนซอสกับฐานรอง และส่วนเดรนกับฐานรอง นอกจากนี้โครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างซอสและเดรนมีลักษณะเป็น $n^+ - p - n^+$ ดังภาพที่ 2.7 ก) ทั้งยังได้รับไบอัสแบบย้อนกลับ (Reverse Bias) จึงทำให้มีกระแสเดรนมีค่าน้อยมาก และอาจจะประมาณค่าได้เป็นศูนย์หรือ $I_D \approx 0$ แม้ว่าแรงดันเดรน-ซอสจะเพิ่มขึ้นก็ตาม กราฟของ $I_D - V_{DS}$ จึงแสดงได้ดังภาพที่ 2.7 ก) ในขณะนี้มอสเฟตจะอยู่ในสภาวะคัทออฟ หรือเป็นสถานะ OFF ของมอสเฟต แต่ถ้าชั้นฐานรองถูกต่อเข้ากับซอส และแรงดันเดรนมีค่าเป็นลบ จะทำให้รอยต่อพี-เอ็นระหว่างเดรนกับฐานรองได้รับการไบอัสตรง (Forward Bias) และมีกระแสเดรนได้ อย่างไรก็ตามในสภาพปกติที่ใช้งานมอสเฟต จะไม่ให้แรงดันเดรนมีค่าเป็นลบ ดังนั้นกระแสเดรนจึงไม่สามารถไหลได้ สำหรับคุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต ในขณะที่มีการให้แรงดันไบอัสที่เกท-ซอสค่าคงที่ต่าง ๆ โดย $V_{GS} > 0$ และแรงดันเดรน-ซอส มีค่าเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้มอสเฟตทำงานในย่านต่าง ๆ ซึ่งอาจจะพิจารณาแบ่งออกเป็นย่านต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.5.1.1 กรณีที่ $V_T > V_{GS} > 0$ และ $V_{DS} > 0$; (Cutoff: ย่านไม่นำกระแส)

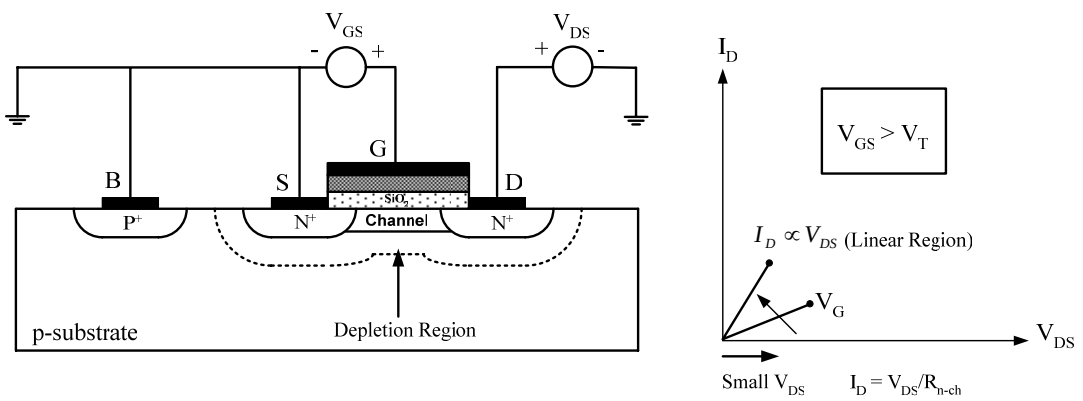
เมื่อป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขั้วเกทเทียบกับขั้วซอส V_{GS} ที่มีค่าบวกค่าหนึ่ง แต่น้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T : Threshold Voltage) หรือ $V_T > V_{GS} > 0$ สนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ที่เกิดจากแรงดันเกทซอส จะผลักให้โฮลในสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัส $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ เคลื่อนที่ห่างออกไป ความหนาแน่นของโฮลในบริเวณดังกล่าวจึงมีค่าลดลงจากเดิม ผลดังกล่าวทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใต้ส่วนเกท ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ข) ดังนั้นในกรณีนี้ ซอสและเดรนยังคงถูกแยกจากกันด้วยชั้นของบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นใต้ส่วนเกทและเป็นชั้นที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรนซอสมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสเดรนก็จะมีการไหลแต่มีค่าน้อยมากประมาณว่าเป็นศูนย์ $I_D \approx 0$ ในสภาวะนี้มอสเฟตยังคงอยู่ในสภาวะคัทออฟ หรือสถานะ off เช่นเดิม



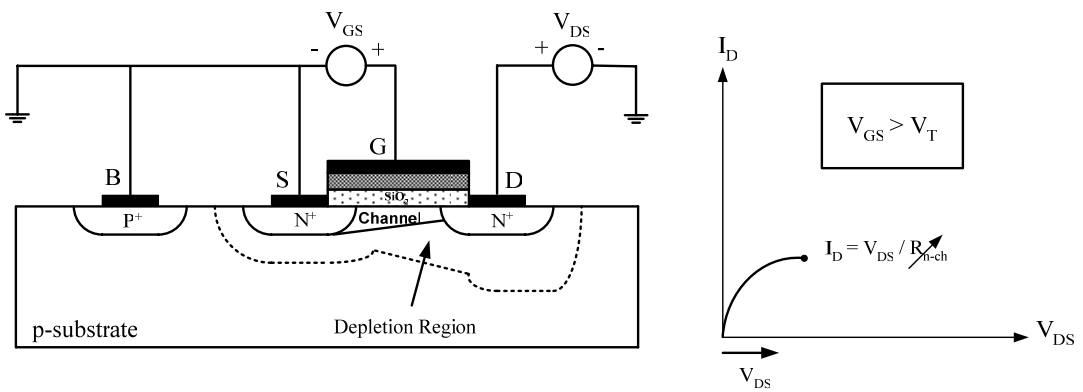
ก) กรณี $V_{GS} = 0$ และ $V_{DS} > 0$



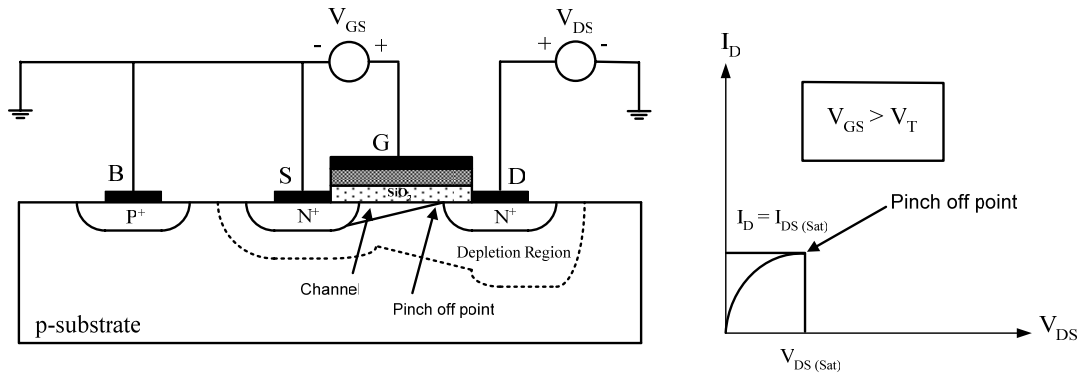
ข) กรณี $V_T > V_{GS} > 0$ และ $V_{DS} > 0$



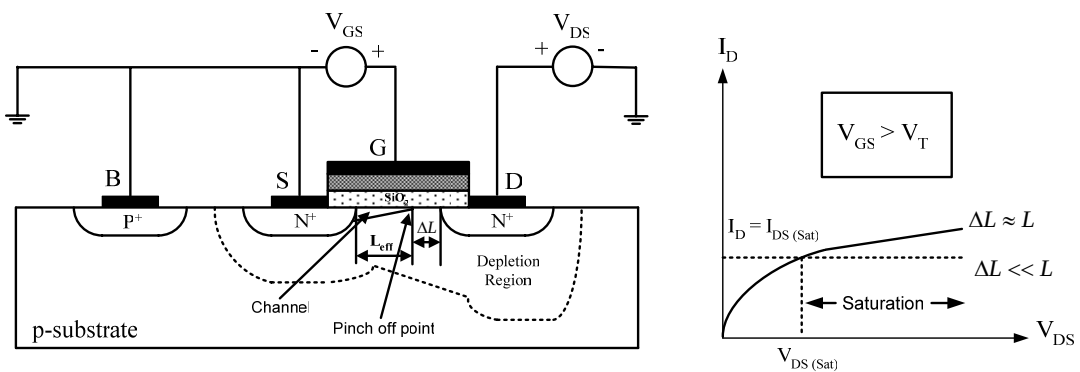
ค) กรณี $V_{GS} > V_T$ และ V_{DS} มีค่าน้อยมาก



ง) กรณี $V_{GS} > V_T$ และ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(Sat)}$



จ) กรณี $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(Sat)}$ หรือ $(V_{GS} - V_{DS}) = V_T$



ฉ) กรณี $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(Sat)}$

ภาพที่ 2.7 การทำงานและคุณสมบัติ $I_D - V_{DS}$ ของมอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดเอ็น แชนแนลขณะที่ V_{GS} มีค่าคงที่ และ V_{DS} มีค่าอยู่ในย่านต่าง ๆ

2.5.1.2 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ V_{DS} มีค่าน้อย ; (Ohmic Region: ย่านไม่อิ่มตัว)

เมื่อแรงดันเกตขอส V_{GS} มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น ในที่สุดแรงดันเกตขอสจะเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม V_T หรือมีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{GS} > V_T$ ในขณะนี้สนามไฟฟ้าในชั้นจนวนออกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันเกตขอส จะมีค่ามากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับชนิดเอ็น (N-Inversion Layer) หรือแชนแนลชนิดเอ็นในสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO₂ - Si บริเวณใต้ส่วนเกต ดังภาพที่ 2.7 ค) แชนแนลนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นประจุบาง ๆ (Sheet of Charge) ภายในแชนแนลนี้จะมีอิเล็กตรอนซึ่งถูกเหนี่ยวนำอยู่ในแชนแนลและจะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ หรือแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ เมื่อแรงดันเกตขอสคงที่ และแรงดันเดรนเป็นศูนย์มีค่าเท่ากับแรงดันที่ขอส แรงดันที่ตกคร่อมของออกไซด์จะมีค่าเท่า ๆ กันทุกจุดในแชนแนล

แต่เมื่อแรงดันเดรนซอส V_{DS} มีค่าเป็นบวก สนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ที่จุดต่าง ๆ ที่ห่างออกมาจากด้านซอสจะมีค่าลดลง เพราะแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่จุดใกล้ด้านเดรนจะมีค่าลดลง ผลดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแชนแนลที่เข้าใกล้มาทางด้านเดรน มีค่าลดลงด้วย และจะมีค่าน้อยที่สุดที่ปลายด้านเดรน

อย่างไรก็ดี กรณีที่แรงดันเดรนซอสมีค่าในช่วงต่ำ ๆ อาจประมาณได้ว่าสนามไฟฟ้าทุกจุดมีค่าเท่ากัน ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแชนแนล ประมาณได้ว่ามีค่ายาวเท่ากันตลอดจากปลายซอสถึงปลายเดรน ถัดจากแชนแนลออกไปจะเป็นบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งแรงดัน $+V_D$ จะทำให้รอยต่อพี-เอ็นที่อยู่รอบ ๆ ส่วนเดรนได้รับไบอัสย้อนกลับ ทำให้บริเวณปลอดพาหะทางด้านเดรนขยายกว้างมากกว่าทางด้านซอสเล็กน้อย แชนแนลชนิดเอ็นที่เกิดขึ้นนี้เสมือนกับเป็นแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีความยาวเท่ากับ L โดยมีขั้วปลายทั้งสองด้าน คือ ส่วนซอสและส่วนเดรน (n^+) เมื่อแรงดันเดรนเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สนามไฟฟ้าในแชนแนลจะทำให้อิเล็กตรอนในแชนแนลเกิดการครีพ (Drift) หรือเคลื่อนที่ในทิศทางจากด้านซอสไปยังด้านเดรน ดังนั้นทำให้มีกระแส I_D เกิดขึ้น โดยมีทิศทางพุ่งเข้าที่ขั้วเดรน ขนาดของกระแสเดรนในขณะนี้ จะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานของแชนแนล หรือก็คือ $I_D \propto \frac{1}{R_{n-ch}}$ และเป็นไปตามกฎของโอห์มคือ

$$I_D = \frac{V_D}{R_{n-ch}} \quad (2.2)$$

โดยที่ R_{n-ch} คือ ความต้านทานของแชนแนล (Channel Resistance) และเท่ากับ $\frac{1}{G_{n-ch}}$
 G_{n-ch} คือ ความนำไฟฟ้าของแชนแนล (Channel Conductance)

ดังนั้นขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นในช่วงต่ำ กระแสเดรนที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันเดรน ซึ่งเกือบจะเป็นเชิงเส้น ดังภาพที่ 2.7 ค) เรียกการทำงานในย่านนี้ว่า “ย่านเชิงเส้น” (Ohmic Region หรือ Linear Region หรือ Triode Region) ในช่วงนี้มอสเฟตจะมีสภาพไม่อิ่มตัว หรือ (Non-Saturation) กล่าวคือ กระแสเดรนจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่เดรน และความชันของกราฟ $I_D - V_D$ จะเพิ่มขึ้นกับแรงดันเกต เนื่องจากแรงดันเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้ความนำของแชนแนลเพิ่มขึ้นด้วย

2.5.1.3 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(Sat)}$

เมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงขึ้นต่อไป ค่าความต่างศักย์ระหว่างซอสและเดรน จะทำให้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแชนแนลมีศักย์ไม่เท่ากันอย่างเห็นได้ชัด ศักย์ไฟฟ้าที่ปลายซอสยังคงเป็นศูนย์

โวลต์ แต่เมื่อตำแหน่งนั้นอยู่ห่างออกมาจากทางด้านซอส หรือเมื่อเข้าไปใกล้ทางด้านเดรน ศักย์คาไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่ปลายด้านเดรน คือ V_D ดังนั้นแรงดันระหว่างขั้วเกตและแซนแนล(แรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์)ที่ตำแหน่ง X ต่าง ๆ ตลอดความยาวของแซนแนลจะมีค่าไม่เท่ากัน ที่ปลายด้านซอสแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ V_C โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันเดรน แต่ที่ตำแหน่ง X ที่ห่างจากซอสหรือใกล้เข้ามาทางด้านเดรน แรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์จะมีค่าลดลง และที่ปลายด้านเดรนแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์นี้จะมีค่าต่ำสุดและมีค่าเท่ากับ $V_{GS} - V_{DS}$ กรณีที่แรงดันเดรนมีค่าไม่สูงมากและทำให้ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ แสดงว่าในช่วงนี้ยังมีแซนแนลเกิดขึ้นได้โดยตลอดตั้งแต่ซอสจนถึงเดรน และแรงดันเกตคงที่ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ในแซนแนลที่ปลายด้านซอสจะมีค่าคงที่ แม้แรงดันเดรนจะเพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแซนแนลจะลดลงกับระยะทางที่ห่างออกไปจากด้านซอส และยังมีค่าลดลงเมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.7 ง) ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเมื่อใกล้เข้าไปทางด้านเดรน หนาของแซนแนลจะมีค่าลดลง ดังนั้นความต้านทานของแซนแนล R_{n-ch} จะมีค่าเพิ่มขึ้นกับแรงดันเดรน โดยเมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสจะลดตัวลงดังสังเกตได้จากกราฟ $I_D - V_D$ ซึ่งความชันของกราฟจะมีค่าลดลง (โค้งมากขึ้น) เมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น แต่ยังคงอยู่ในเงื่อนไข $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(Sat)}$ โดยที่ $V_{DS(Sat)}$ หมายถึง แรงดันเดรนซอสที่อิ่มตัว

2.5.1.4 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(Sat)}$; (Pinch off Point: จุดพินช้อฟ)

เมื่อแรงดัน V_D ยังคงเพิ่มขึ้นกระทั่งมีค่ามาก จนทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่ตำแหน่งปลายด้านเดรนมีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มพอดี หรือ $(V_{GS} - V_{DS}) = V_T$ แซนแนลที่ปลายด้านเดรนจะมีขนาดลดลงเป็นศูนย์หรือก็คือ แซนแนลขาดออกพอดีที่เดรน ดังภาพที่ 2.7 จ) ซึ่งเรียกสภาวะนี้ว่า “สภาวะพินช้อฟ” (Pinch off) และจุดที่แซนแนลขาดออกพอดีนี้เรียกว่า “จุดพินช้อฟ” (Pinch off Point) บริเวณตลอดพาหะตรงส่วนเดรนจะมีขนาดกว้างมากกว่าด้านซอสอย่างเห็นได้ชัด ค่าของแรงดันเดรนซอสที่พอดีที่ทำให้เริ่มเกิดสภาวะพินช้อฟ ถูกเรียกว่า “แรงดันเดรนซอสอิ่มตัว” (Saturation Drain Source Voltage: $V_{DS(Sat)}$) หรือบางกรณีเรียกว่า “แรงดันพินช้อฟ” (Pinch off Voltage: V_P)

ในขณะนี้พิจารณาได้ว่า แซนแนลที่ขาดออกพอดีที่ตำแหน่งปลายด้านเดรน การทำงานของมอสเฟตในสภาวะนี้จึงคล้ายกับสภาวะพินช้อฟของ (N-Channel JFET) กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนในแซนแนลถูกครีฟท์ (Drift) โดยสนามไฟฟ้าจากด้านซอสมาทางด้านเดรน และเมื่อมาถึงปลายแซนแนลที่จุดพินช้อฟ สนามไฟฟ้าค่าสูงสุดที่ตกคร่อมในช่วงแคบ ๆ ของบริเวณตลอดพาหะระหว่างปลายของแซนแนล และส่วนเดรน จะดึงให้อิเล็กตรอนที่ส่วนปลายแซนแนล

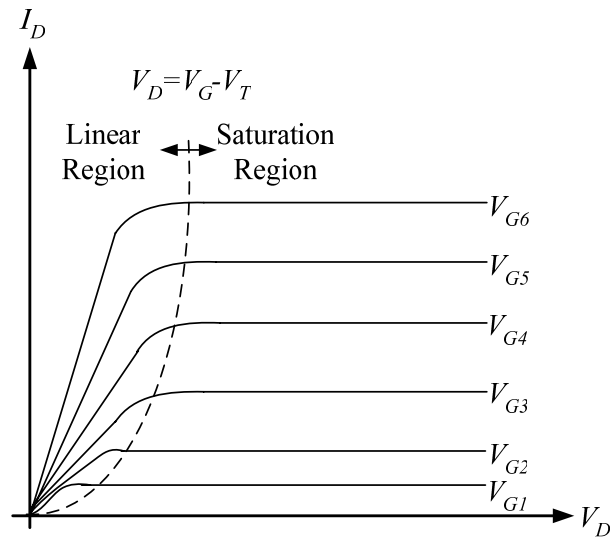
ข้ามบริเวณปลอดพาหะเข้าไปยังส่วนเดรน ดังนั้นกระแสเดรนยังคงไหลได้แต่ขนาดของกระแสจะถูกจำกัดด้วยปริมาณของอิเล็กตรอน ที่ถูกดึงหรือฉีดข้ามบริเวณปลอดพาหะดังกล่าวและอาจจะพิจารณาได้ว่ากระแสเดรนถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานประสิทธิผล (Effective Resistance) ของแซนแนล ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรน-ซอสเพิ่มขึ้น กระแส I_D จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (อย่างชะลอตัว) กระทั่งเมื่อถึงค่า $V_{DS(Sat)}$ กระแสเดรนจะมีค่าสูงสุดเรียกว่า “กระแสเดรนอิ่มตัว” (Saturation Drain Current) และเขียนแทนด้วย $I_{D(Sat)}$ ดังภาพที่ 2.7 จ)

2.5.1.5 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(Sat)}$; (Saturation Region: ย่านนำกระแสอิ่มตัว)

เมื่อแรงดันที่เดรนซอสมีค่ามากกว่าแรงดันอิ่มตัวหรือ $V_{DS} > V_{DS(Sat)}$ ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่บริเวณใกล้ปลายด้านเดรน มีค่าน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม $(V_{GS} - V_{DS}) < V_T$ ดังนั้นในบริเวณดังกล่าวจะไม่มีแซนแนลเกิดขึ้น จึงคล้ายกับว่าจุดพินชออฟเกิดขึ้น เลื่อนไปจากจุดเดรนเข้าไปทางด้านจุดซอส และที่ตำแหน่ง X ใด ๆ ที่เป็นจุดพินชออฟ ตามเงื่อนไขของสมการ $(V_{GS} - V_{DS}(X)) = V_T$ ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงกว่า $V_{DS(Sat)}$ จุดพินชออฟจะเลื่อนเข้าไปใกล้ด้านซอส ดังภาพที่ 2.7 ฉ) ทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะระหว่างจุดพินชออฟกับส่วนเดรน ซึ่งมีระยะกว้างเท่ากับ ΔL หากพิจารณาว่า โมสเฟตนี้เป็นชนิด Long Channel และ $\Delta L \ll L$ ดังนั้นความยาวของแซนแนลจึงมีขนาดสั้นลงจากเดิมน้อยมาก กระทั่งประมาณว่ามีขนาดความยาวเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นความต้านทานของแซนแนล R_{n-ch} จะมีค่าประมาณเท่าเดิม แม้ว่าแรงดันที่เดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม และแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างซอสถึงจุดพินชออฟจะมีค่าคงที่เสมอ โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันเดรนซอส และเมื่อแรงดันที่เดรนซอสเพิ่มขึ้นสูงกว่า $V_{DS(Sat)}$ กระแสเดรนจะประมาณได้ว่ามีค่าคงที่ และเท่ากับค่าของ $I_{D(Sat)}$ ซึ่งเป็นกระแสเดรนอิ่มตัว หาได้จากสมการ

$$I_D \approx I_{D(Sat)} = \frac{V_{D(Sat)}}{R_{eff(n-ch)}} \quad ; \quad V_{DS} > V_{DS(Sat)} \quad (2.3)$$

ซึ่งโมสเฟตถูกพิจารณาว่าทำงานในย่านอิ่มตัวหรือ (Saturation Region) กล่าวคือ กระแสเดรนจะมีค่าคงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันที่เดรน



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน และแรงดันที่ขาเดรนกับซอส

ความสัมพันธ์ของแรงดัน V_G กับกระแส I_D ในขณะที่แรงดันที่ขาเกตคงที่และมอสเฟตทำงานในย่านอิ่มตัวสามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสเดรนและแรงดันที่เดรนกับซอส โดยเปลี่ยนค่า V_G โดยที่ $V_{G1} < V_{G2} < V_{G3} < V_{G4} \dots$

การทำงานของมอสเฟตจะเป็นลักษณะของการใช้แรงดันไฟฟ้า ควบคุมปริมาณการไหลของกระแส สมการกระแสเดรนของมอสเฟตถูกคิดขึ้นโดย Sah , H. Shichman และ D. Hodges [14],[15] ดังสมการที่ (2.4) แสดงคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต

$$I_D = K' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} ; V_{GS} > V_T \quad (2.4)$$

โดยที่ K' = ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (Transconductance) มีค่าเท่ากับ $\mu_0 C_{OX}$

μ_o = ค่าความคล่องโวล หรืออิเล็กตรอน (Surface Mobility of Carrier)

C_{OX} = ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์ (Capacitance Per Unit Area of The Gate Oxide)

W = ความกว้างของแชนแนล (Channel width)

L = ความยาวของแชนแนล (Channel Length)

V_{GS} = แรงดันระหว่างขาเกต กับ ซอส

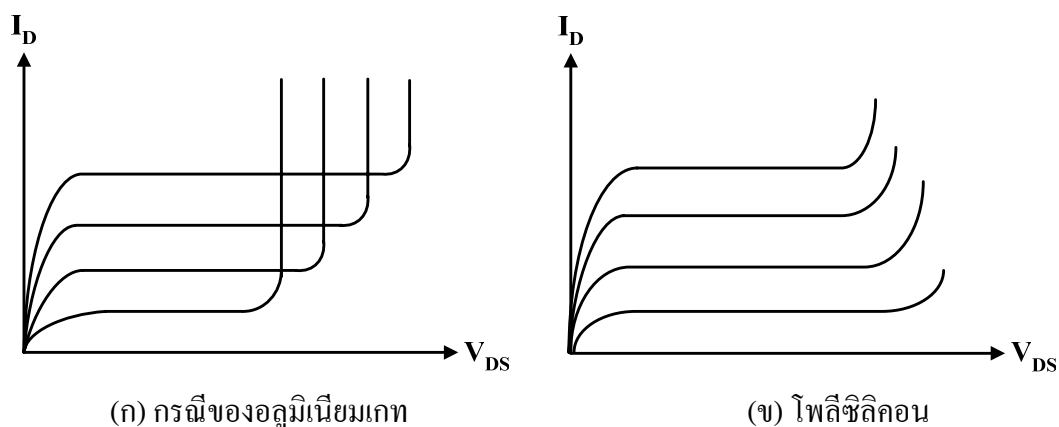
V_T = แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage)

V_{DS} = แรงดันระหว่างขาเดรน กับ ซอส

I_D = กระแสเดรน

2.5.1.6 กรณีย่านพังทลาย (Breakdown Region)

เนื่องจากแรงดันไบอัสที่ให้แก่วัสดุพี-เอ็นระหว่างเดรน-ซอร์สจะเป็นการไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นเมื่อแรงดันที่เดรนมีค่ามากขึ้นและสูงขึ้นถึงค่า ๆ หนึ่งที่เรียกว่า “แรงดันพังทลาย” (Breakdown Voltage: V_B) ทำให้รอยต่อเกิดการพังทลายแบบอวาลันซ์ (Avalanche Breakdown) กระแสเดรนที่อยู่ในย่านอิมิตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้มอสเฟตเข้าสู่สภาวะการพังทลาย ดังภาพที่ 2.9 ก) และ ข) ซึ่งเป็นกรณีของมอสเฟตที่มีเกทเป็นโลหะและโพลีซิลิคอนตามลำดับ



ภาพที่ 2.9 ย่านพังทลาย กระแสเดรนของมอสเฟตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ $V_D \geq V_B$

2.5.2 สมการกระแสในย่านต่าง ๆ ของมอสเฟต

จากการทำงานของมอสเฟต ดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่กล่าวมานั้น สามารถแบ่งย่านของการนำกระแสของมอสเฟตได้ 3 ย่าน คือ ย่านไม่นำกระแส (Cut-off Region) ย่านไม่อิมิตัว (Triode Region) และย่านอิมิตัว (Saturation Region) โดยแต่ละช่วงการทำงานจะขึ้นอยู่กับค่า $V_{GS} - V_T$ และค่าของ V_{DS}

2.5.2.1 ย่านไม่นำกระแส (Cut-off Region)

ถ้าค่า $V_{GS} - V_T$ เป็นศูนย์หรือเป็นค่าลบ เป็นช่วงที่มอสเฟตไม่ทำงานไม่มีช่องทางเดินของกระแสจะทำตัวเหมือนวงจรเปิด จึงทำให้มอสเฟตไม่สามารถนำกระแสเดรน (I_D) ได้ มอสเฟตจะอยู่ในช่วงไม่นำกระแส (Cut-off Region) ตามสมการ

$$I_D = 0 \quad ; \quad |V_{GS}| - |V_T| < 0 \quad (2.5)$$

2.5.2.2 ย่านไม่อิ่มตัว (Triode Region หรือ Ohmic Region)

ถ้าค่า $|V_{GS}| - |V_T| > 0$ และ $0 < |V_{DS}| < |V_{GS}| - |V_T|$ แล้ว เป็นย่านที่แรงดันไบอัสที่ขาเกตและขาซอสมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{GS} > V_T$ และแรงดันระหว่างขาเดรนกับขาซอส V_{DS} มีค่าน้อยกว่า $V_{GS} - V_T$ แล้วมอสเฟตจะอยู่ในย่านไม่อิ่มตัว (Triode Region หรือ Ohmic Region) สามารถหากระแสเดรน (I_D) ได้ตามสมการ

$$I_D = K' \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (2.6)$$

สำหรับในกรณีที่แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส V_{DS} มีค่าน้อยมาก เทอมของ $V_{DS}^2/2$ ในสมการที่ (2.6) สามารถตัดทิ้งได้ กระแสเดรน I_D จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยขึ้นอยู่กับแรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส V_{DS} กรณีนี้ มอสเฟตจะประพฤติตัวเสมือนตัวต้านทาน โดยมีค่าความต้านทาน R_{eq} ได้ตามสมการ

$$R_{eq} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{1}{K' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)} \quad (2.7)$$

2.5.2.3 ย่านอิ่มตัว (Saturation Region)

ถ้าค่า $|V_{GS}| - |V_T| > 0$ และ $|V_{DS}| > |V_{GS}| - |V_T|$ แล้ว เป็นย่านที่แรงดันที่ขาเกตและขาซอสมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{GS} > V_T$ และแรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส V_{DS} มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $V_{GS} - V_T$ แล้ว มอสเฟตจะทำงานอยู่ในย่านอิ่มตัว (Saturation Region) สามารถหาค่ากระแสเดรน (I_D) ได้ตามสมการ

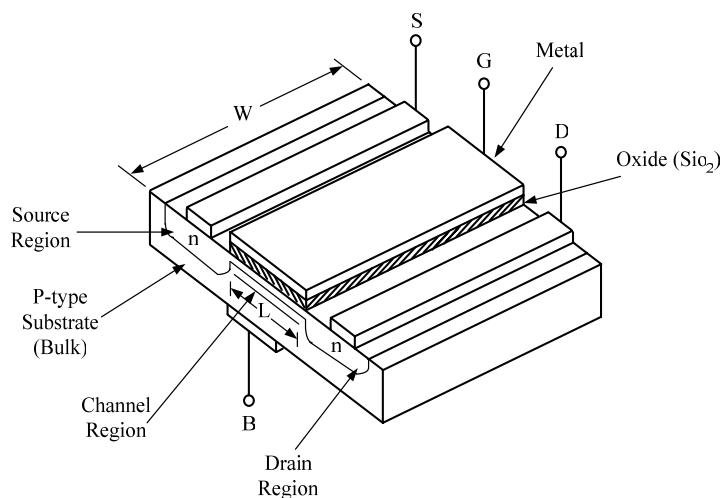
$$I_D = \frac{K'}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2.8)$$

โดยที่ λ = แชนแนล เลนจ์ มอดูเลชัน (Channel Length Modulation); (V^{-1})

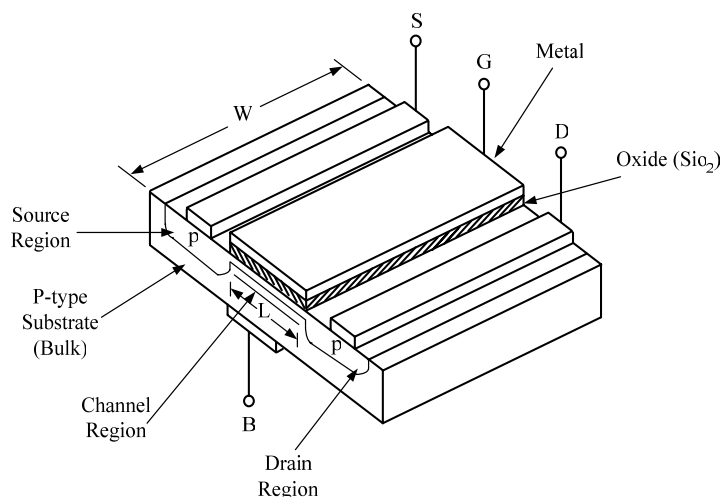
2.6 ชนิดของมอสเฟต

มอสเฟตแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็นฮานสมันท์มอสเฟต หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า (E-MOSFET) และชนิดดีฟิชั่นมอสเฟต หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า (D - MOSFET) ดังภาพที่ 2.10 และภาพที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของมอสเฟตชนิดเอ็นและพี ทั้ง 2 แบบตามลำดับ

จากภาพที่ 2.10 จะเห็นว่าโครงสร้าง (D-MOSFET) จะคล้ายกับ (E-MOSFET) แต่จะแตกต่างกันตรงที่ช่องระหว่างซอสกับเดรนของ (D-MOSFET) จะมีการแพร่สารเอ็นอยู่ ดังนั้นจึงมีกระแสไหลระหว่างเดรนกับซอส เมื่อแรงดันที่เดรนเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอส และที่แรงดันระหว่างเกตกับซอสเป็นศูนย์ $V_{GS} = 0$ เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นลบกระแสเดรนจะลดลงถ้า V_{GS} มีค่าเป็นบวกกระแสเดรนจะเพิ่มขึ้น ส่วนการทำงานของ (E-MOSFET) จะไม่มีกระแสไหลระหว่างเดรนกับซอส เมื่อแรงดันที่เดรนเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอส และแรงดันที่เกตกับซอสเป็นศูนย์เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นบวกจะทำให้กระแสเดรนไหล และเมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นบวกมากขึ้นจะทำให้กระแสเดรนไหลเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.12 แสดงกราฟคุณสมบัติของ (E-MOSFET) และ (D-MOSFET)

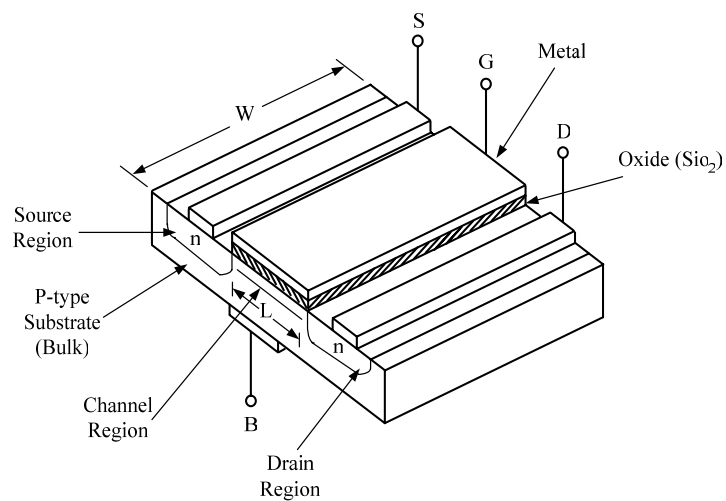


(ก) ชนิด N-Channel

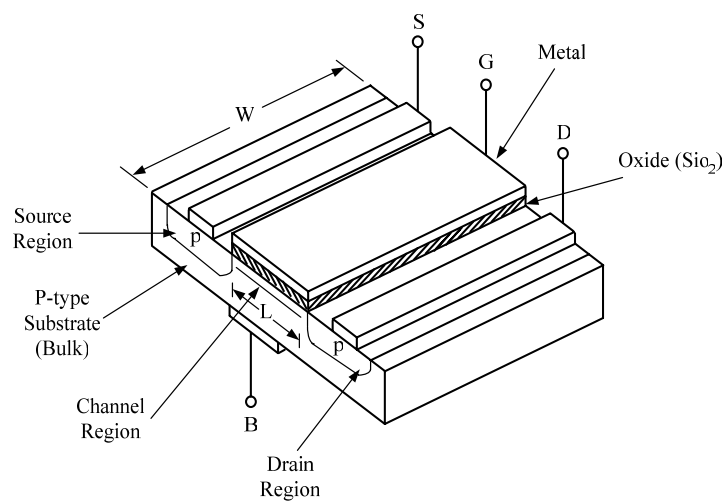


(ข) ชนิด P-Channel

ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ D-MOSFET

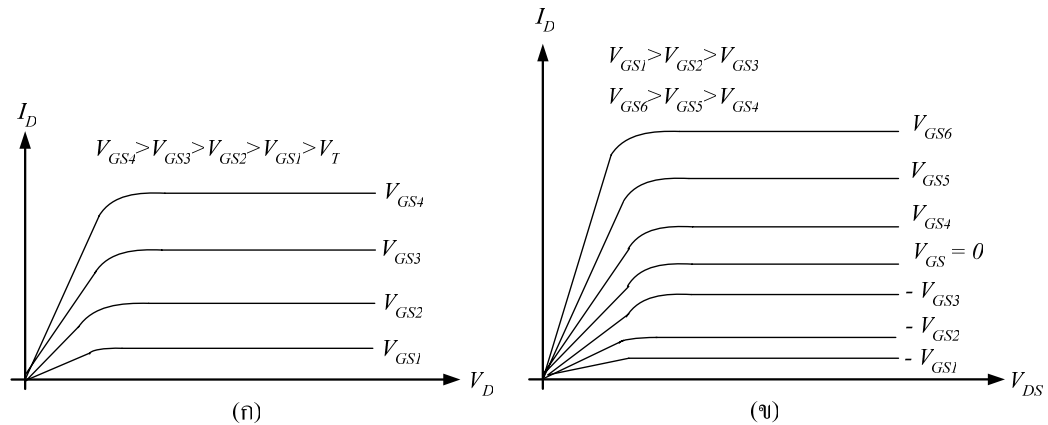


(ก) ชนิด N-Channel



(ข) ชนิด P-Channel

ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ E-MOSFET

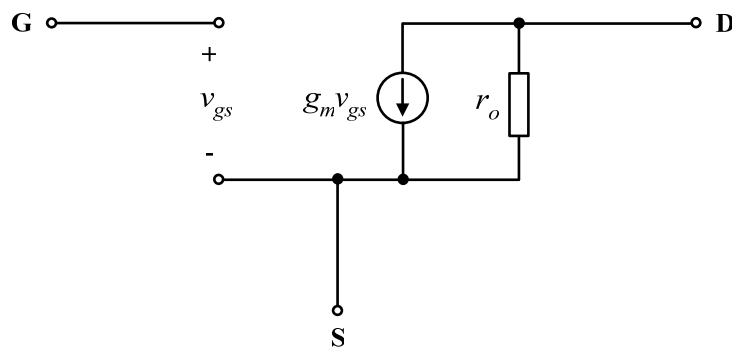


ภาพที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{DS} (ก) E-MOSFET (ข) D-MOSFET

2.7 แบบจำลองของมอสเฟต

2.7.1 แบบจำลองของมอสเฟตสำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่มีความถี่ต่ำ

จากภาพที่ 2.13 แสดงแบบจำลองของมอสเฟตสำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่มีความถี่ต่ำ (Low Frequency Small Signal Equivalent Circuit Models) จากภาพเป็นการแทนมอสเฟตด้วยวงจรไฟฟ้า เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลของการตอบสนองต่อสัญญาณที่มีขนาดเล็ก (Small Signal Analysis)



ภาพที่ 2.13 แบบจำลองของมอสเฟตสำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่มีความถี่ต่ำ

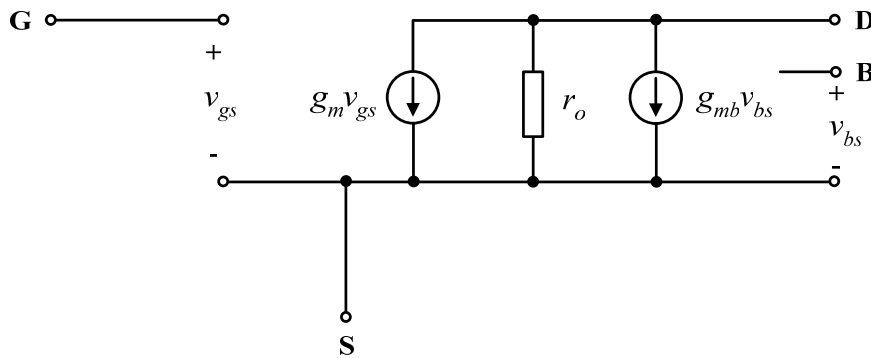
มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแรงดันที่เกต-ซอส (v_{gs}) ให้เป็นกระแสที่เดรน-ซอส ($g_m v_{gs}$) ความต้านทานที่ขาเกตมีค่าสูงมาก ซึ่งในทางอุดมคติ (Ideal) ถือว่ามีค่าเป็นอนันต์ (∞) ความต้านทานที่ขาเดรน (r_o) มีค่าค่อนข้างสูง พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก คือ ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m) สามารถหาได้ตามสมการ

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = k' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2.9)$$

กรณีที่มอสเฟตทำงานในย่านอิ่มตัว ค่าของทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m) จะมีค่าเท่ากับ

$$g_m = k' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = \sqrt{2k' \frac{W}{L} I_D} \quad (2.10)$$

แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น เป็นแบบจำลองที่ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงผลของฐานรอง (Body Effect) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อฐานรองนั้นไม่ได้ต่ออยู่กับขาซอสเมื่อรวมผลของฐานรองทำให้ได้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แบบจำลองมอสเฟตสำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่ฐานรองไม่ได้ต่ออยู่กับขาซอส

จากภาพที่ 2.14 สัญญาณขนาดเล็กที่เกิดขึ้นระหว่างฐานรองกับขาซอส (v_{bs}) จะทำให้เกิดค่าของกระแสเดรนมีค่าเท่ากับ ($g_{mb} v_{bs}$) โดยที่ค่าของ (g_{mb}) ก็คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ที่ฐานรอง (Body Transconductance) ของมอสเฟต สามารถหาได้ตามสมการ

$$g_{mb} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{BS}} = -k' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) (1 + \lambda V_{DS}) \frac{\partial V_t}{\partial V_{BS}} \quad (2.11)$$

สำหรับกรณีของมอสเฟตที่ทำงานในย่านอิ่มตัว สามารถหาได้ตามสมการ

$$g_{mb} = \eta g_m \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$\eta = \frac{\gamma}{2\sqrt{2|\phi_F| + V_{SB}}}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_{Si}N_{sub}}}{C_{OX}}$$

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{sub}}{n_i}\right)$$

2.7.2 แบบจำลองของมอสเฟตสำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่มีความถี่สูง

จากภาพที่ 2.15 แสดงแบบจำลองของมอสเฟตสำหรับสัญญาณขนาดเล็กที่มีความถี่สูง ซึ่งรวมผลของตัวเก็บประจุแผ่น ได้แก่ C_{gs} , C_{gd} , C_{gb} , C_{sb} และ C_{db} ตัวเก็บประจุ C_{sb} และ C_{db} เป็นค่าตัวเก็บประจุแผ่นบริเวณรอยต่อ (Junction Capacitance) ระหว่างฐานรอกกับซอสและฐานรอกกับเดรนตามลำดับ สามารถหาได้ตามสมการ

$$C_{sb} = \frac{A_s C_{sbo}}{\sqrt[n]{1 + \frac{V_{sb}}{\psi_o}}} \quad (2.13)$$

และ

$$C_{db} = \frac{A_d C_{dbo}}{\sqrt[n]{1 + \frac{V_{db}}{\psi_o}}} \quad (2.14)$$

โดยที่

$n = 2$	กรณีรอยต่อพี-เอ็น เป็นแบบขั้นบันได (Step Junction)
$n = 3$	กรณีรอยต่อพี-เอ็น เป็นแบบลาด (Graded Junction)
C_{sb} และ C_{db}	เป็นค่าความจุไฟฟ้ากรณี (v_{bs}) และ (v_{bd}) มีค่าเป็นศูนย์ ตามลำดับ
ψ_o	เป็นแรงดันที่รอยต่อพี-เอ็น ขณะที่แรงดันภายนอกเป็นศูนย์ (Built-in Potential)
A_s และ A_d	เป็นพื้นที่ของซอสและเดรน รวมถึงพื้นที่ด้านข้าง (Side-Wall)
V_{sb} และ V_{db}	เป็นแรงดันระหว่างขาซอสกับฐานรอกและขาเดรนกับฐานรอก

ค่าของตัวเก็บประจุระหว่างขาเกตและขาซอส (C_{gs}) ในย่านอิมิตัว สามารถหาได้ตามสมการ

$$C_{gs} = \frac{\partial Q_T}{\partial V_{gs}} = \frac{2}{3} C_{ox} WL \quad (2.17)$$

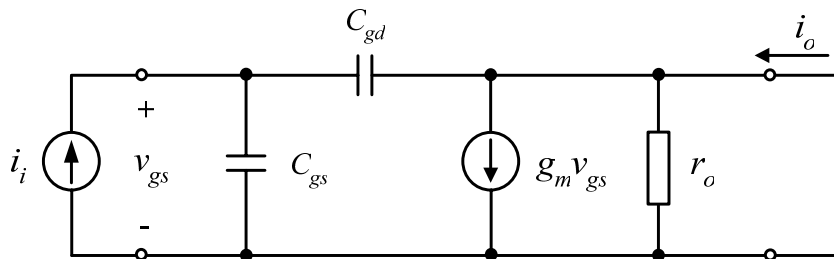
ในทางปฏิบัติค่าตัวเก็บประจุ (C_{gs}) ยังต้องรวมถึงผลของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ที่เกิดจากค่าตัวเก็บประจุออกไซด์แฝง เนื่องจากพื้นที่ของส่วนเกตที่ซ้อนทับกันกับส่วนของเดรนเช่นเดียวกับ (C_{gd}) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่ง สำหรับในการทำงานที่ย่านความถี่สูงของมอสเฟตที่ทำงานเป็นวงจรขยาย คือ ความถี่ที่มีอัตราขยายเป็นหนึ่ง (Unity Gain Frequency: f_T) โดยนิยามว่าเป็นความถี่ที่อัตราขยายของมอสเฟตที่ต่ออยู่ในรูปแบบของวงจรคอมมอนซอส (Common Source Configuration) ขณะปัดวงจร (Short Circuit) มีค่าเป็นหนึ่งดังภาพที่ 2.16 แสดงแบบจำลองไฮบริด-ไพล์ (Hybrid- π) ของมอสเฟตในลักษณะวงจรคอมมอนซอส พร้อมทั้งกระแสอินพุต (i_i) และกระแสเอาต์พุต (i_o) ในการหาอัตราขยายกระแสขณะปัดวงจรอยู่ จะต้องมีการป้อนแหล่งกำเนิดกระแสอินพุต (i_i) ที่ขาเข้า ซึ่งจะได้กระแสที่ขาออก (i_o) สามารถหาได้ตามสมการ

$$i_o = g_m v_{gs} - sC_{gd} v_{gs} \quad (2.18)$$

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น (C_{gd}) มีค่าน้อยมาก ทำให้พจน์สุดท้ายในสมการที่ (2.18) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะได้สมการของกระแสที่ขาออกใหม่ มีค่าเท่ากับ

$$i_o \cong g_m v_{gs} \quad (2.19)$$



ภาพที่ 2.16 การหาอัตราขยายกระแสขณะปัดวงจร

จากภาพที่ 2.16 แสดง (v_{gs}) ในพจน์ของกระแสขาเข้า (i_i) สามารถหาได้ตามสมการ

$$v_{gs} = \frac{i_i}{s(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) สามารถหาอัตราขยายกระแสขณะปิดวงจร ได้เป็น

$$\frac{i_o}{i_i} = \frac{g_m}{s(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21) สามารถหาความถี่ที่ทำให้อัตราขยายกระแสมีค่าเป็นหนึ่ง ได้เป็น

$$\omega_T = \frac{g_m}{(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) สามารถหาค่าความถี่ f_T ได้เป็น

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \omega_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2.23)$$

เมื่อ $f_T = \omega_T / 2\pi$

นอกจากนี้ยังได้มีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทำการวิเคราะห์ และเลียนแบบการทำงานของวงจรต่าง ๆ กันอย่างกว้างขวางโปรแกรม Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) เป็นโปรแกรมหนึ่งซึ่งถูกใช้มากและเป็นที่ยอมรับ ถูกคิดค้นพัฒนาจากมหาวิทยาลัย Berkley แห่งรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ในโปรแกรม Spice ได้แบ่งรูปแบบจำลอง (Mode) การทำงานของมอสเฟตออกเป็น 3 รูปแบบ คือ แบบจำลองระดับหนึ่ง (Level 1 Model) แบบจำลองระดับสอง (Level 2 Model) และแบบจำลองระดับสาม (Level 3 Model)

2.7.3 แบบจำลองระดับหนึ่ง (Level 1 Model)

เป็นแบบจำลองแบบพื้นฐาน ที่ใช้อ้างอิงเป็นสมการต่าง ๆ แบบพื้นฐาน เหมาะสำหรับการคำนวณพื้นฐานทั่วไปที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (Error) ต่าง ๆ ซึ่งถ้าต้องการการคำนวณวงจรแบบง่าย ๆ หรือแบบไม่ต้องพิจารณาความผิดพลาดแบบจำลองนี้ก็เพียงพอที่จะใช้งานได้ ซึ่งสามารถใช้สำหรับการทำงานของมอสเฟตแบบพื้นฐาน ที่มีความยาวของแชนแนลมากกว่า 10 ไมครอน โดยใช้โมเดลของ H. Shichman and D. Hodges ซึ่งครอบคลุมการทำงานไปถึงโมเดลของ C.T. Sah ด้วย

2.7.4 แบบจำลองระดับสอง (Level 2 Model)

เป็นแบบจำลองที่ต่างจาก (Level 1) อยู่ 2 ส่วน คือ วิธีการคำนวณค่าผลกระทบทางความยาวแชนแนล (Effective Channel Length: λ) และในส่วนของการเปลี่ยนแปลง (Transition) ย่านการทำงานระหว่างช่วงอิ่มตัวและช่วงไม่อิ่มตัว ใช้เวลาการคำนวณการเปลี่ยนแปลง (Transition) การทำงานช่วงอิ่มตัวและช่วงไม่อิ่มตัวมาก หมายถึง วิธีคำนวณการเปลี่ยนแปลงระหว่างรอยต่อของช่วงการนำกระแสอิ่มตัว (Saturation Region) และช่วงการนำกระแสไม่อิ่มตัว (Non-Saturation Region) ในแบบจำลองระดับสองนี้ยังให้ประโยชน์ทางด้านประสิทธิภาพที่ดีกว่าและสนับสนุนการใช้อุปกรณ์ที่มีแชนแนลแคบ (Short Channel) ได้ซึ่งสามารถใช้สำหรับการทำงานของมอสเฟตที่มีความยาวของแชนแนลน้อยกว่า 10 ไมครอนซึ่งเรียกว่า (Short Channel effect)

2.7.5 แบบจำลองระดับสาม (Level 3 Model)

เป็นแบบจำลองที่ผสมผสานตัวแปรจากการสังเกตเข้าไปด้วย (Semi-Empirical Model) โดยตัวแปรต่าง ๆ ที่เพิ่มเข้ามา (จะมีความสัมพันธ์ไม่ชัดเจนว่าส่งผลมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของมอสทรานซิสเตอร์) ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น ในแบบจำลองระดับสามนี้ยังสามารถลดเวลาในการคำนวณการเปลี่ยนแปลง (Transition) ย่านการทำงานระหว่างช่วงการนำกระแสอิ่มตัวและช่วงการนำกระแสไม่อิ่มตัวอีกด้วย

การเลือกชนิดของแบบจำลองสำหรับใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรมานั้นโดยทั่วไปจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่น แบบจำลองในระดับหนึ่ง เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์พื้นฐานโดยผู้ออกแบบ ให้ผลได้ไม่ถูกต้องนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับมอสเฟตที่มีขนาดเล็กเพราะโมเดลระดับนี้ ไม่รวมผลของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับมอสเฟตขนาดเล็ก และผลของการนำกระแสในย่านที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม

2.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง กระบวนการประดิษฐ์อย่างพอสังเขป และการทำงานในย่านต่าง ๆ ทำให้ทราบได้ว่าการทำงานย่านต่าง ๆ เกิดขึ้นได้อย่างไรและมีสมการที่เกี่ยวข้อง เพื่อช่วยการคำนวณวงจรต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นจากมอสเฟต ซึ่งมอสเฟตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง สามารถควบคุมปริมาณของกระแสตรงได้ด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงดันที่ขาคาท สามารถแบ่งตามชนิดของมอสเฟตได้เป็น 2 ชนิด คือ เอ็นฮานสม์มอสเฟต และดีพลีชันมอสเฟต โดยแต่ละชนิดแบ่งออกเป็น PMOS, NMOS ซึ่งการไบอัสจะมีลักษณะตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาสมการกระแสตรงของมอสเฟตแบ่งเป็น 3 ย่านการทำงานขึ้นอยู่กับค่าของ $V_{GS} - V_T$ ที่ป้อนเป็นอินพุตให้กับมอสเฟตโดยจะต้องมีค่ามากกว่าแรงดันเทรชโฮลด์ (V_T) จึงจะสามารถควบคุมกระแสเอาต์พุตได้ แรงดันเทรชโฮลด์ (V_T) นั้น สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยแรงดันระหว่างขาซอสกับฐานรอง (Substrate) และในส่วนสุดท้ายของบทนี้ได้กล่าวถึงรูปแบบจำลอง (Model) ของการใช้โปรแกรมเลียนแบบการทำงาน PSpice ใน Model ต่าง ๆ ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพื่อการวิเคราะห์วงจรตามที่ออกแบบมานั้นว่ามีการทำงานเป็นอย่างไรและมีประสิทธิภาพมากเท่าไร