



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาและการถอดแบบจำลองทางไฟฟ้าของเอ็นมอสเฟต
0.5 ไมครอน

The development and electrical Extraction of 0.5 micron
NMOSFETs

นายรังสรรค์ เมืองเหลือ
นายอนุชา เรืองพานิช

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาและการถอดแบบจำลองทางไฟฟ้า ของเอ็นมอสเฟต 0.5 ไมครอน

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 480,000.- บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

หัวหน้าโครงการวิจัย นายรังสรรค์ เมืองเหลือ

ผู้ร่วมโครงการวิจัย นายอนุชา เรืองพานิช

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและการถอดแบบจำลองทางไฟฟ้า ของเอ็นมอสเฟต 0.5 ไมครอน เริ่มตั้งแต่ การจำลองกระบวนการสร้างเอ็นมอสโดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้า ขั้นตอนที่สอง นำผลจากการจำลองกระบวนการสร้างที่น่าสนใจมาเป็นเงื่อนไขที่ใช้สร้างลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอน หลังจากทำการสร้างเอ็นมอสเฟตตามเงื่อนไข แล้วทำการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า ในเงื่อนไขที่บ่อแยกชนิดที่ ค่าปริมาณโดส $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ค่าปริมาณโดสการยิงฝังประจุสำหรับการปรับแรงดันขีดเริ่ม $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และค่าปริมาณโดสการยิงฝังประจุสำหรับการป้องกันพันธ์ทรู $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ โดยเอ็นมอสเฟตมีค่าแรงดันขีดเริ่ม 0.693 V ที่ค่ากระแสเดรนย่านอิ่มตัว ($I_{D(sat)}$) 403 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ ที่ $V_{DS}=V_{GS}= 3.3 \text{ V}$ ขั้นตอนสุดท้าย การถอดแบบจำลองพารามิเตอร์ระดับ 3

คำสำคัญ : ซิลิคอน, มอสเฟต, โมเดล

Research Title : The development and electrical Extraction of 0.5 micron NMOSFETs

Researcher: Mr. Rangson Muanghlua

: Mr. Anucha Ruangphanit

Department: Electronics Engineering **Faculty:** Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This research presents a The development and electrical Extraction of 0.5 micron NMOSFETs. The first step is fabrication simulation process to study the electrical properties using Process simulation program, Sentaurus TCAD. The second step is to apply the interesting condition results from the fabrication simulation process for silicon substrate then proceed electrical properties testing of NMOSFET according to the design conditions including P-well dose concentration $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ threshold voltage adjustment dose concentration(VTA) $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ and anti-punch through dose concentration(ATP) $3.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. As the result, the threshold voltage 0.693 V. with saturated drain current($I_{D(sat)}$) $403 \mu\text{A}/\mu\text{m}$ at $V_{DS} = V_{GS} = 3.3 \text{ V}$. Finally, these conditions will be applied for extracting the parameter model, spice level 3

Keywords : Silicon, MOSFETS, Model

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็น การพัฒนาและการถอดแบบจำลองทางไฟฟ้า ของเอ็นมอสเฟต 0.5 ไมครอน (A118-0260-048) นี้ประสบความสำเร็จได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ จากบุคคลดังต่อไปนี้

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณณัฐพล สกุนา คุณนพพล พงษ์พันธุ์จันทรา และนักวิจัยศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ช่วยเหลือแนะนำเทคนิค เกี่ยวกับการวิจัย ตอบข้อซักถาม และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายรังสรรค์ เมืองเหลือ

นายอนุชา เรืองพานิช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย.....	3
1.5 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย.....	3
1.6 เนื้อหาของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 โครงสร้างมอส.....	5
2.2 ประเภทของมอสทรานซิสเตอร์.....	5
2.2.1 มอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เม้นท์.....	6
2.2.2 มอสเฟต แบบดีฟิสิชั่น.....	9
2.3 หลักการทำงาน และคุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน	12
2.3.1 ค่าแรงดันไบอัส $0 < V_{GS} < V_T$ และ $V_{DS} > 0$ ได้กระแส $I_D = 0$ A.....	13
2.3.2 ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} < V_{DS(sat)}$	16
2.3.3 ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(sat)}$	17
2.3.4 ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$	18
2.3.5 แรงดันพังทลาย.....	20
2.4 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสและแรงดันขณะที่แรงดันที่เกตคงที่.....	20
2.5 ค่าแรงดันชัตเริ่ม.....	21
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	25
3.1 การออกแบบเอ็นมอสเฟต.....	25
3.2 การจำลองกระบวนการสร้างเอ็นมอสเฟตด้วยโปรแกรม “Sentaurus TCAD”.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 การจำลองค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟท โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณโดส VTA และปริมาณโดส APT.....	26
3.2.2 การจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(VT)ของเอ็นมอสเฟท โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณโดส VTA และปริมาณโดสบ่อแยกแยกชนิดพี(P_well) APT.....	28
3.2.3 การจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T)ของเอ็นมอสเฟท โดยการปรับเปลี่ยนขนาดความยาวเกต(L_g).....	29
3.3 กระบวนการสร้างเอ็นมอสเฟท.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	40
4.1 การทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T).....	40
4.2 การวัดทดสอบคุณลักษณะความสัมพันธ์ทางไฟฟ้า.....	43
4.3 การหาแบบจำลองจอร์จพารามิเตอร์ของเอ็นมอสเฟท.....	44
4.3.1 วัสดุที่ใช้ทำเกต หรือ Type of Gate Material : TPG.....	44
4.3.2 ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟทขนาดใหญ่ในย่านเชิงเส้น(VTO) และปริมาณความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองซิลิคอน(NSUB).....	45
4.3.3 ความยาวของแซนแนลที่ลดลง (LD) และความกว้างของแซนแนลที่ลดลง(WD).....	48
4.3.4 การหาค่า UO, THETA, RD และ RS.....	50
4.3.5 ผลของการลดลงสภาพคล่องตัวของพาหะ หรือ Mobility Degradation.....	51
4.3.6 ความต้านทานของซอส(RS) และความต้านทานของเดรน (RD).....	53
4.3.7 ผลของความกว้างแซนแนลที่มีต่อ ค่าแรงดันขีดเริ่ม(Delta) และค่าประสิทธิจากผลของ DIBL (ETA).....	54
4.3.8 การหาค่า NFS ปริมาณความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของฐานรองซิลิคอน.....	57
4.3.9 การหาค่า VMAX.....	58
4.3.10 การหาค่า KAPPA.....	59
4.4 คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างผลจากการหาแบบจำลองพารามิเตอร์กับผลจากการวัดทดสอบ.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	68
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ลักษณะทางเรขาคณิตของเอ็นมอสเฟต..... 26
3.2	เงื่อนไขการกำหนดปริมาณโดสเพื่อศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม..... 27
3.3	เงื่อนไขการกำหนดปริมาณโดสเพื่อศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม..... 28
4.1	ค่าแรงดันขีดเริ่ม เอ็นมอสเฟสตัวในทุกแผ่นโดยใช้เงื่อนไขที่ $W/L = 20/20 \mu\text{m}$ 40
4.2	พารามิเตอร์แบบจำลองของเอ็นมอสเฟต..... 45
4.3	พารามิเตอร์ของเอ็นมอสเฟต ระดับ 3..... 61
5.1	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ..... 66
5.2	คุณลักษณะไฟฟ้าเอ็นมอสเฟต 0.5 ไมครอน..... 67
5.3	พารามิเตอร์ของเอ็นมอสเฟต ระดับ 3..... 67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างมอส(MOS)..... 5
2.2	แผนผังการจัดแบ่งประเภทของมอสเฟททรานซิสเตอร์..... 6
2.3	มอสเฟท แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดเอ็นแซนแนล..... 7
2.4	มอสเฟท แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดพีแซนแนล..... 9
2.5	มอสเฟท แบบดีฟลิชัน ชนิดเอ็นแซนแนล..... 10
2.6	มอสเฟท แบบดีฟลิชัน ชนิดพีแซนแนล..... 11
2.7	มอสเฟทชนิดเอ็นแซนแนล..... 12
2.8	มอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแซนแนล ที่ย่านการทำงาน $V_{GS} = V_{DS} = 0$ V..... 13
2.9	โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟท แบบเอ็นฮานซ์เมนต์..... 14
2.10	โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟท แบบเอ็นฮานซ์เมนต์..... 15
2.11	โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟท แบบเอ็นฮานซ์เมนต์..... 16
2.12	โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟท แบบเอ็นฮานซ์เมนต์..... 17
2.13	โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟท แบบเอ็นฮานซ์เมนต์..... 19
2.14	คุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสเดรน(I_D)และแรงดัน(V_{DS}) มอสเฟท ที่ให้แรงดันเดรน(V_{GS}) ที่มีค่าสูงจนเข้าสู่สภาวะการพังทลายที่ตรงบริเวณรอยต่อพีเอ็นของขั้วเดรนกับแผ่นฐานรอง..... 19
2.15	คุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสเดรน(I_D)และแรงดัน(V_{DS}) มอสเฟท ที่ให้แรงดันเดรน(V_{GS}) ที่มีค่าสูงจนเข้าสู่สภาวะการพังทลายที่ตรงบริเวณรอยต่อพีเอ็นของขั้วเดรนกับแผ่นฐานรอง..... 21
2.16	ภาคตัดขวางเอ็นมอสขณะได้รับการไบอัสแรงดันที่เกต(V_{GS})..... 22
3.1	ภาคตัดขวางโครงสร้างมอสเฟทในการจำลอง..... 25
3.2	การสร้างชั้นแยกชนิดพี(P_well)แผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี..... 27
3.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับที่ปริมาณโดสการยิงฝิงประจุ VTA ที่ปริมาณโดส Anti-punchthrough(ATP) ค่าต่างๆ..... 28
3.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันขีดเริ่มกับปริมาณโดสการยิงฝิงประจุ VTA ที่ปริมาณโดสบ่อพีค่าต่างๆ..... 29
3.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (VT) กับ ความยาวเกต (Lg) ที่ค่าปริมาณโดส ATP_Dose..... 30
3.6	กระบวนการสร้างซีมอสด้วยเทคโนโลยี 0.5 μm 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	วงจรรวบรวมค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH}) เอ็นมอสเฟท และกระแสเดรน(I_{DS}) 41
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับปริมาณโดสยึงฝังประจุ VTA ที่อัตราส่วนของ $W/L = 20/20 \mu\text{m}$ 41
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับความยาวเกต (L_{mark})..... 411
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับความกว้างของเกต (W_{mask})..... 43
4.5	วงจรวัดความสัมพันธ์เอ็นมอสเฟท แรงดันเดรน(V_{DS})กับ กระแสเดรน(I_{DS})..... 43
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเดรน (V_{DS}) ของเอ็นมอสเฟทที่ค่าแรงดันขั้วเกตค่าต่าง..... 44
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/20$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.00$ 47
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/20$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.80$ 47
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/20$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.81$ 48
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\beta$ กับ L_{mark} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความยาวของเกตเอ็นมอสเฟท ได้ $LD = 0.058 \mu\text{m}$ 49
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ W_{mark} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความกว้างของเกตเอ็นมอสเฟท ได้ $WD = 0.325 \mu\text{m}$ ต่อข้าง..... 50
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_D) ที่แรงดันเดรน(V_{DS}) คงที่ได้ค่าความชันของกราฟที่แรงดันเกตเปลี่ยนไป ที่เอ็นมอสเฟทขนาดใหญ่..... 52
4.13	กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{Slope_{max}}{Slope}$ กับแรงดันเกต(V_{GS})ของเอ็นมอสเฟทขนาดใหญ่ ($W/L=20/20$) ได้ค่าความชัน $THETA = 0.204 \text{ V}^{-1}$ 52
4.14	กราฟความสัมพันธ์ของ $THETA_m$ กับ β ของเอ็นมอสเฟทขนาดความยาวเกตค่าต่างๆ ซึ่งใช้หาค่า RD และ RS 53
4.15	กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{1}{W_{eff}}$ กับ V_T ของเอ็นมอสเฟทขนาดความกว้างเกตค่าต่างๆ ซึ่งใช้หาค่า $DELTA=1.57$ 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_D) ที่มีผล DIBL ที่เอ็นมอสเฟท ขนาด $W/L = 20/0.5$	56
4.17 ความสัมพันธ์ของแรงดันเดรน(V_{DS}) กับ $V_{T(c)}$ ที่เอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/0.5$	56
4.18 กราฟความสัมพันธ์ของ V_{GS} กับ $\log I_D $ ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/0.5$ ซึ่งหาค่า $S = 88 \text{ mV/dec}$	57
4.19 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{V_{DS}}{V_{eff}}$ กับ $\left(\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_v}\right)$ ของเอ็นมอสเฟทที่ขนาด $W/L = 20/0.5$ ซึ่ง หาค่า $V_{MAX} = 2.50 \times 10^5 \text{ cm/s}$	59
4.20 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{DS} - V_{DS(sat)}$ กับ L^2 ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/0.5$ ซึ่งหาค่า $KAPPA = 0.16 \text{ V}^{-1}$	60
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) อันเนื่องจาก การเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟท กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=20/20$	62
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) อันเนื่องจาก การเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟท กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=20/0.5$	63
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) อันเนื่องจาก การเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟท กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=1.5/20$	64
4.24 กราฟความสัมพันธ์การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันขั้วเดรน(V_{DS})กับค่ากระแสเดรน(I_D) ที่ แรงดันที่ขั้วเกต($V_{GS} = 0, 1.3, 2.3, 3.3 \text{ V}$) อันเนื่องจาก การเปรียบเทียบระหว่างการวัด ทดสอบเอ็นมอสเฟท กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=20/0.5$	65

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

χ	อิเล็คตรอนแอฟฟินิตี
β	พารามิเตอร์ของมอสเฟต
μ_n	สภาพคล่องของประจุพาหะประจุลบ
ϕ_F	ศักย์เฟอร์มิ
ϕ_M	ศักย์ไฟฟ้าของโลหะ
ϕ_S	ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ
ρ_{Nwell}	ความต้านทานแผ่นของชั้นแพร่อะตอมสารเจือ N-well
ρ_{n+}	ความต้านทานแผ่นของชั้นแพร่อะตอมสารเจือ n^+
ρ_{p+}	ความต้านทานแผ่นของชั้นแพร่อะตอมสารเจือ p^+
ρ_{Poly}	ความต้านทานแผ่นของชั้นฟิล์มโพลีซิลิคอน
ρ_{M1}	ความต้านทานแผ่นของชั้นฟิล์มโลหะ 1
ρ_{M2}	ความต้านทานแผ่นของชั้นฟิล์มโลหะ 2
ρ_{Nwell}	ความต้านทานแผ่นของชั้นแพร่อะตอมสารเจือ N-well
ρ_{n+}	ความต้านทานแผ่นของชั้นแพร่อะตอมสารเจือ n^+
μ_{cr}, UO	สภาพคล่องของพาหะในย่านเชิงเส้นที่มอสเฟตขนาดใหญ่
θ, ξ	ผลของการลดลงของสภาพคล่องของพาหะ THETA
$\delta, DELTA$	ผลความกว้างของช่องทางเดินกระแสที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม
$V_{sotb}, VMAX$	ความเร็วดริฟต์สูงสุดของพาหะ
$K, KAPPA$	ผลของช่องทางเดินกระแสสั้นที่มีผลต่อกระแสเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

มอสทรานซิสเตอร์ หรือ ภาษาอังกฤษ Metal Oxide Semiconductor Transistor หรือ ตัวย่อ MOS Transistor หรือ MOS เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทหนึ่ง ที่นิยมนำไปสร้างเป็นวงจรรวมขนาดใหญ่ เนื่องจากโครงสร้างไม่ซับซ้อน ตัวมอสทรานซิสเตอร์เองมีขนาดเล็กทำให้ความหนาแน่นจำนวนทรานซิสเตอร์สูง ง่ายต่อการพัฒนา ใช้กำลังงานน้อยกว่าทรานซิสเตอร์ชนิดอื่นๆ แต่ให้ประสิทธิภาพทำงานสูง

มอสทรานซิสเตอร์ (Metal Oxide Semiconductor Transistor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วย 3 ประเภทคือ โลหะตัวนำ(อลูมิเนียม, Al), ฉนวน(ซิลิคอนไดออกไซด์, SiO₂) และ สารกึ่งตัวนำ(ซิลิคอน ,Si)

หลักการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งที่ควบคุมการไหลของพาหะด้วยสนามไฟฟ้า

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งยิ่งใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ตลอดจนถึงข้อมูลและสารสนเทศ ซึ่งเป็นผลของการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม(ICs) ที่เรียกว่า “ชิป(chip)”

ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีวงจรรวมจึงเป็นหัวใจของการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยี โดยเริ่มจากจำนวนทรานซิสเตอร์ 2 ตัว จนถูกพัฒนาให้มีจำนวนหลายล้านตัว ดังนั้นประเทศไทยได้เริ่มสนใจศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานได้แก่ ไดโอด พินไดโอด ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ มอสทรานซิสเตอร์ และสามารถสร้างวงจรรวมพื้นฐานคือ อินเวอร์เตอร์ แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยีวงจรรวมขนาดใหญ่ต้องใช้งบประมาณมาก ต่อกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้จัดตั้งหน่วย ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่มีความเชี่ยวชาญด้านวงจรรวม ได้พัฒนามอสทรานซิสเตอร์ให้มีขนาดเทคโนโลยี 0.5 ไมครอนได้

จากเหตุผลที่ได้กล่าวข้างต้น ทำให้คณะผู้วิจัยสนใจที่จะทำ พัฒนาและถอดแบบจำลองทางไฟฟ้าของ เอ็นมอส 0.5 ไมครอน เพื่อให้นักศึกษาได้เรียนรู้พื้นฐานการออกแบบและกระบวนการสร้างวงจรรวมและเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมต้นน้ำในการออกแบบวงจรรวม(Integrated Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกนั้นแล้ว ยังเป็นการเพิ่มความรู้ความสามารถและประสบการณ์ทางด้านเทคโนโลยีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำระดับซัพไมครอนของบุคลากร เพื่อฝึกฝนทักษะการวิจัยและถ่ายทอดความรู้รวมทั้งเทคนิคต่างๆ ไปสู่บุคลากรรุ่นใหม่ให้มีความรู้ความเชี่ยวชาญในเรื่องที่เกี่ยวข้องในระดับสูงเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะเป็นกำลังสำคัญของการพัฒนาวงการวิทยาศาสตร์และวงการอุตสาหกรรมต้นน้ำของประเทศสืบต่อไป นำไปสู่การพัฒนาประเทศไทยที่ยั่งยืน

เริ่มจากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหรือไมโครชิปที่ถูกต้องจากผลทางไฟฟ้าจากการวัดจะนำมาคำนวณหาแบบจำลองพารามิเตอร์ตามลำดับขั้นการหาแบบจำลองที่กล่าวไว้ในขั้นตอนแผนงานงานวิจัยดังกล่าวจะสร้างนักวิจัยหรือผู้ที่สนใจเกิดความรู้และความเข้าใจพื้นฐาน ลดการนำเข้าของซอฟต์แวร์สร้างกระบวนการเรียนรู้ในการถอดแบบจำลองจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในการพัฒนาความพร้อมของบุคลากรในด้านดังกล่าวก่อนที่จะมีการลงทุนของภาคเอกชนในด้านดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ความมุ่งหมายในการศึกษาขั้นตอนกระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ที่ระดับเทคโนโลยีระดับ 0.5 ไมครอน

พัฒนาแบบจำลองพารามิเตอร์และการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของมอสเฟตเพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองจะทำให้เกิดความเข้าใจในการทำงานของอุปกรณ์และกระบวนการผลิตดังกล่าวมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ในเริ่มต้นนั้นได้ศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์โดยทำการศึกษาลงถึงขั้นตอนการสร้าง, วิธีการสร้าง, ทฤษฎีและหลักการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ เพื่อออกแบบเงื่อนไข, ออกแบบขั้นตอนวิธีการสร้าง แล้วนำเงื่อนไขที่ออกแบบไปจำลองผลเพื่อคาดเดาผลและนำผลที่ได้จากการจำลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ โดยได้ทำการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์และโครงสร้างทดสอบคุณสมบัติต่างๆขึ้นบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ จากนั้นนำมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และถอดแบบจำลองหาค่าพารามิเตอร์เพื่อเป็นค่าสำหรับนักออกแบบวงจรใช้ต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย

1. เป็นการเพิ่มเรียนรู้เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน
2. เป็นการส่งเสริมให้มีการพัฒนาอุปกรณ์ระดับที่น้อยกว่า 0.5 ไมครอน
3. เป็นการเพิ่มความรู้ด้านเทคโนโลยีที่พัฒนาประเทศ
4. เป็นพื้นฐานของการวิจัยด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ระดับที่น้อยกว่า 0.5 ไมครอน
5. เผยแพร่ผลงานในการวิจัยระดับประเทศและระดับนานาชาติ

1.5 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

1. ศึกษาและหาข้อมูลทั่วไปเกี่ยวมอสเฟตชนิดต่าง
 2. วัดและเก็บข้อมูล ของความสัมพันธ์ IV ของมอสเฟตขนาดใหญ่(Big MOS)ชนิดเอ็น
 3. วัดและเก็บข้อมูล ของความสัมพันธ์ IV ของมอสเฟตที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น(short MOS) ตามลำดับที่สถานะการทำงานเชิงเส้น
 4. วัดและเก็บข้อมูล ของความสัมพันธ์ IV ของมอสเฟตที่มีขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแสสั้น(Narrow MOS) ชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับที่สถานะการทำงานเชิงเส้น
 5. วัดและเก็บข้อมูล ของความสัมพันธ์ IV ของมอสเฟตที่มีโครงสร้างแบบความกว้างเท่ากับค่าคงที่แต่เปลี่ยนแปลงขนาดของความยาว
 6. วัดและเก็บข้อมูล ของความสัมพันธ์ IV ของมอสเฟตที่มีโครงสร้างแบบความยาวเท่ากับค่าคงที่แต่เปลี่ยนแปลงขนาดของความกว้าง
 7. วัดและเก็บข้อมูล ของความสัมพันธ์ IV ของมอสเฟตที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น(short MOS) ชนิดเอ็นที่สถานะการทำงานอิมิตัว
 8. ทำการเปรียบเทียบผลทางไฟฟ้าจากการจำลองการทำงานโดยอาศัยแบบจำลองพารามิเตอร์
 9. เสนอการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตบางกระบวนการที่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองพารามิเตอร์
 10. เขียนรายฉบับสมบูรณ์

สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 เนื้อหาของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งออกได้เป็น 5 บท ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในแต่ละบทดังนี้ คือ

บทที่ 1 จะเป็นการกล่าว ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย, วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย, ขอบเขตของโครงการวิจัย, ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย, เป็นแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย และสุดท้ายเนื้อหาของงานวิจัย

บทที่ 2 เกี่ยวกับทฤษฎีของมอสทรานซิสเตอร์ โครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์ และหลักการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์

บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการจำลองผลการสร้าง การออกแบบ การสร้าง ซีมอสทรานซิสเตอร์

บทที่ 4 กล่าวถึงการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ และการถอดแบบจำลองของมอสทรานซิสเตอร์

บทที่ 5 สรุปผล และ นำเสนอการทำวิจัยในระยะเวลาอันใกล้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

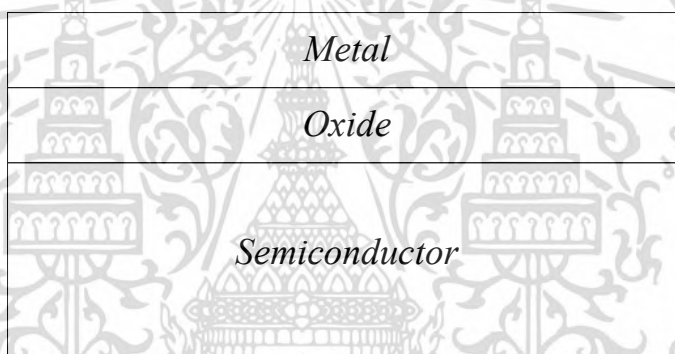
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 โครงสร้างมอส

มอสทรานซิสเตอร์ หรือ ภาษาอังกฤษ Metal Oxide Semiconductor Transistor ซึ่งใช้โครงสร้างของมอส Metal Oxide Semiconducture มี 3 ชั้น ประกอบด้วย คือ

1. ชั้นโลหะ เป็นชั้นตัวนำที่มีขนาดของความต้านทานต่ำ
2. ชั้นออกไซด์ เป็นชั้นฉนวนที่สมบูรณ์
3. ชั้นสารกึ่งตัวนำ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นสารเจือสม้าเสมอ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างมอส(MOS)

2.2 ประเภทของมอสเฟททรานซิสเตอร์

ประเภทของมอสเฟททรานซิสเตอร์อาจแบ่งได้ 2 ประเภท[1] โดยใช้หลัก คุณสมบัติทางไฟฟ้าและโหมดการทำงาน ตามรูปที่ 2.2 คือ

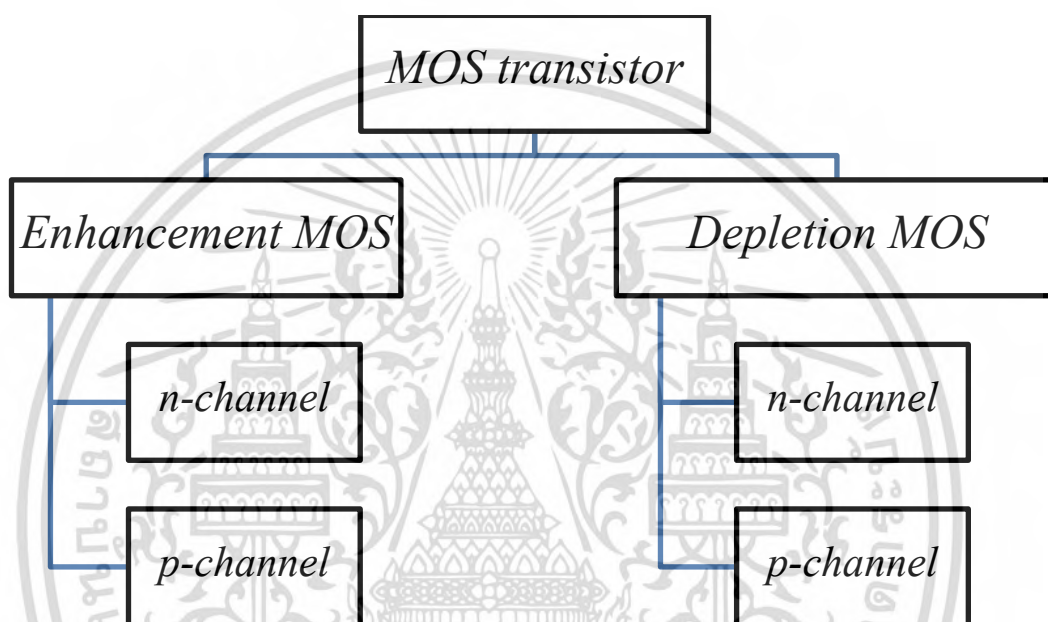
1. มอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์(enhancement mode MOS transistor) ที่แรงดันเกตเป็นศูนย์($V_{GS}=0$ V) จะไม่มีกระแสไหลจากขั้วซอสไปขั้วเดรนขณะที่ให้แรงดันเดรนซอส ($V_{DS} \neq 0$ V)
2. มอสทรานซิสเตอร์แบบดีพลีชัน(depletion mode MOS transistor) ที่แรงดันเกตเป็นศูนย์($V_{GS}=0$ V) จะมีกระแสไหลจากขั้วซอสไปขั้วเดรนขณะที่ให้แรงดันเดรนซอส ($V_{DS} \neq 0$ V) เพราะมีช่องเดินกระแสเชื่อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาจากช่องทางเดินกระแส(channel)และชนิดของพาหะที่ทำให้เกิดกระแสเดรนใน มอสทรานซิสเตอร์ แบ่งได้ 2 ประเภทคือ

1. เอ็นมอส(n-channel MOS, nMOS) กระแสเดรนเกิดจากอิเล็กตรอน
2. พีมอส(p-channel MOS, pMOS) กระแสเดรนเกิดจากโฮล

สำหรับในที่นี้จะขอกล่าวเน้นไปที่ส่วนของ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์แบบเอ็นฮานซ์เมนต์เท่านั้น



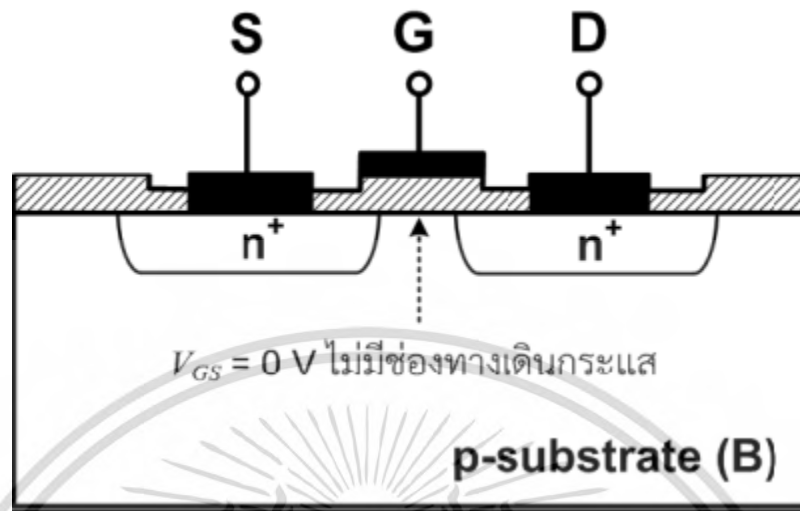
รูปที่ 2.2 แผนผังการจัดแบ่งประเภทของมอสเฟตทรานซิสเตอร์

2.2.1 มอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์

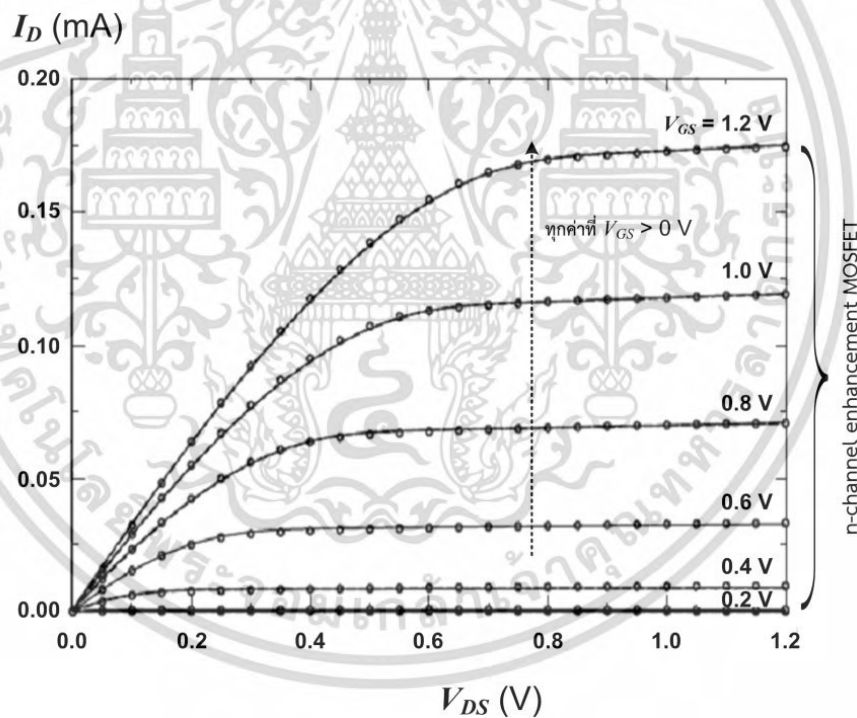
โครงสร้าง คุณสมบัติสมบัติของกระแสและแรงดันของมอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิด เอ็นแซนแนล[1] ดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างภาพตัดขวางจะประกอบด้วยส่วนของชั้นฐานรอง (Substrate, S หรือ Sub.) เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี(p-type) หรือ ชั้นฐานรองมักถูกเรียกว่า “บอดี (body: B)” ส่วนซอร์ส (Source, S) และส่วนเดรน (Drain, D) ที่สร้างขึ้นโดยการเติมอะตอม สารเจือ ชนิดเอ็น ที่มีความเข้มข้นสูง(n^+) เข้าไปในฐานรอง ชนิดพี ระยะห่างระหว่างส่วนซอร์สกับส่วน เดรน เรียกว่า “ความยาวของช่องทางเดินกระแส” หรือ channel length ส่วนเกตของ ทรานซิสเตอร์ เป็น โครงสร้างของมอส (MOS) ที่ถูกสร้างอยู่บนชั้นออกไซด์ และ อยู่ระหว่างส่วน ซอร์ส กับ ส่วนเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ขั้วไฟฟ้าของมอสเฟต มี 3 ขั้ว คือ ขั้วซอร์ส(S) ขั้วเดรน(D) และขั้วเกต(G) (ส่วนฐานรองโดยทั่วไปจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับส่วนซอร์ส) ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก)



(ก) โครงสร้าง เอ็นมอสเฟต



(ข) คุณลักษณะสมบัติของกระแส(I_D) และ แรงดัน(V_{GS})

รูปที่ 2.3 มอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดเอ็นแซนแนล

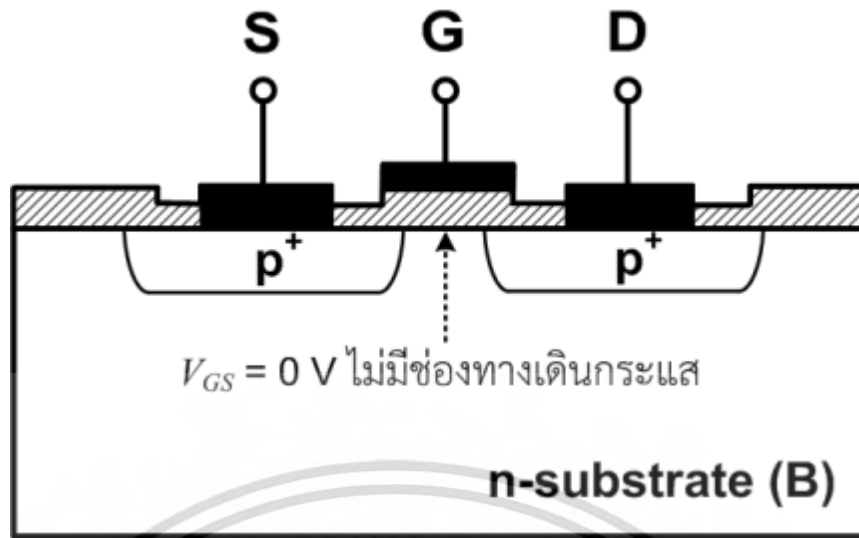
ที่แรงดันขั้วเกต $V_{GS} = 0 \text{ V}$ และให้แรงดันเดรน $V_{DS} > 0 \text{ V}$ จะได้ค่ากระแสเดรน $I_D = 0 \text{ A m}$ ทั้งนี้เพราะว่าไม่ช่องทางเดินกระแสเชื่อมระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอร์ส ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะปิด(OFF) แต่ขั้วเกตได้รับอัสแรงดัน $V_{GS} > 0 \text{ V}$ และมีค่ามากพอที่จะทำให้สนามไฟฟ้าที่ชั้นออกไซด์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางกระแสชนิดเอ็นเชื่อมระหว่างซอร์สกับเดรน หรือ $V_{GS} > V_T$ (V_T คือ ค่าแรงดันขีดเริ่ม) ซึ่งค่ากระแสเดรน(I_D) จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันในช่วงต้น และค่าแรงดันเดรนเพิ่มจนถึงค่าแรงดันเดรนอิ่มตัว (Saturation drain voltage, $V_{(DSsat)}$) หรือ ค่าแรงดันพินช์ออฟ(Pinch off voltage, P_V) ที่ $V_{DS} = V_{(DSsat)} = P_V$ ค่ากระแสเดรนจะเริ่มเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว และคงที่ ในขณะที่ยังให้ค่าแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าได้เพิ่มค่าแรงดันเกตให้ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะจะถูกเหนี่ยวนำให้ช่องทางเดินกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สภาพการนำไฟฟ้าของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้น และค่ากระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นจึงได้คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันเดรนกับกระแสเดรน ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดเอ็นแซนแนล ดังรูปที่ 2.3(ข) จากคุณลักษณะทางไฟฟ้า เช่นว่านี้ จึงเรียกว่า เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด(enhancement mode)

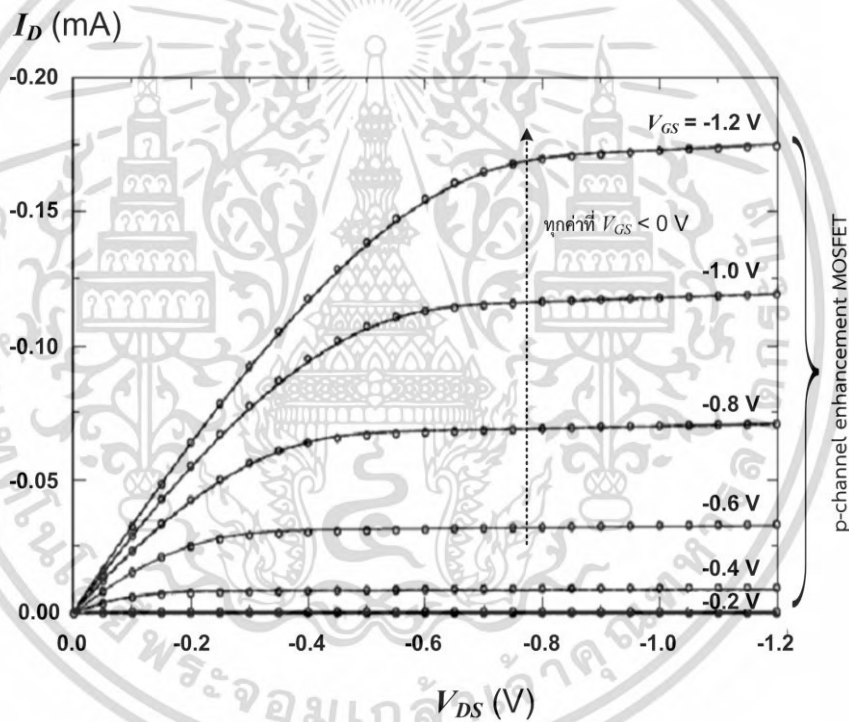
สำหรับกรณี มอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดพีแซนแนล ซึ่งมีโครงสร้าง คุณลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันของมอสเฟต ดังรูปที่ 2.4

ขั้วไฟฟ้าของมอสเฟต มี 3 ขั้ว คือ ขั้วซอร์ส(S) ขั้วเดรน(D) และขั้วเกต(G) (ส่วนฐานรองโดยทั่วไปจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับส่วนซอร์ส) ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก)

ที่แรงดันขั้วเกต $V_{GS} = 0\text{ V}$ และให้แรงดันเดรน $V_{DS} < 0\text{ V}$ จะได้ค่ากระแสเดรน $I_D = 0\text{ A}$ ทั้งนี้เพราะว่าไม่ช่องทางเดินกระแสเชื่อมระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอร์ส ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะปิด(OFF) แต่ขั้วเกตได้รับอัสแรงดัน $V_{GS} < 0\text{ V}$ และมีค่ามากพอที่จะทำให้สนามไฟฟ้าที่ชั้นออกไซด์เหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางกระแสชนิดพีเชื่อมระหว่างซอร์สกับเดรน หรือ $V_{GS} > V_T$ (V_T คือ ค่าแรงดันขีดเริ่ม) ซึ่งค่ากระแสเดรน(I_D) จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันในช่วงต้น และค่าแรงดันเดรนเพิ่มจนถึงค่าแรงดันเดรนอิ่มตัว (Saturation drain voltage, $V_{(DSsat)}$) หรือ ค่าแรงดันพินช์ออฟ(Pinch off voltage, P_V) ที่ $V_{DS} = V_{(DSsat)} = P_V$ ค่ากระแสเดรนจะเริ่มเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว และคงที่ ในขณะที่ยังให้ค่าแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าได้เพิ่มค่าแรงดันเกตให้ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะจะถูกเหนี่ยวนำให้ช่องทางเดินกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สภาพการนำไฟฟ้าของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้น และค่ากระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นจึงได้คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันเดรนกับกระแสเดรน ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดพีแซนแนล ดังรูปที่ 2.4(ข) จากคุณลักษณะทางไฟฟ้า เช่นว่านี้ จึงเรียกว่า เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด(enhancement mode)



(ก) โครงสร้าง พีมอสเฟต



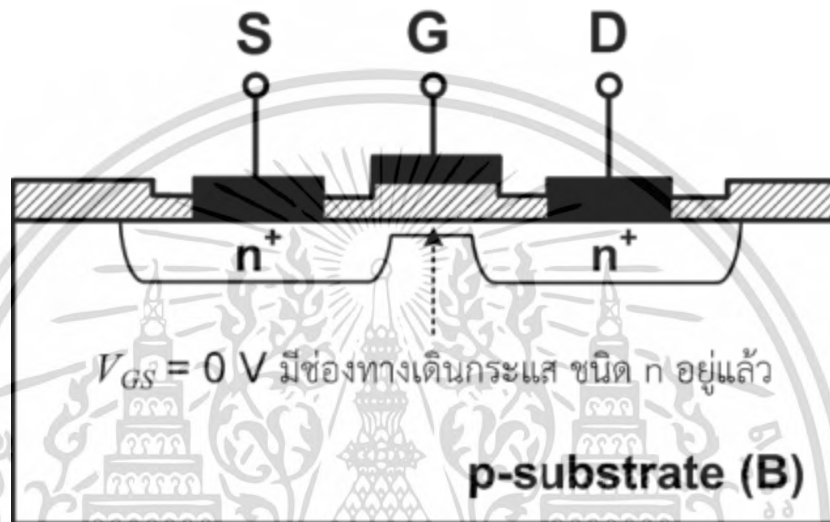
(ข) คุณลักษณะสมบัติของกระแส(I_D) และ แรงดัน(V_{GS})

รูปที่ 2.4 มอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดพีแชนแนล

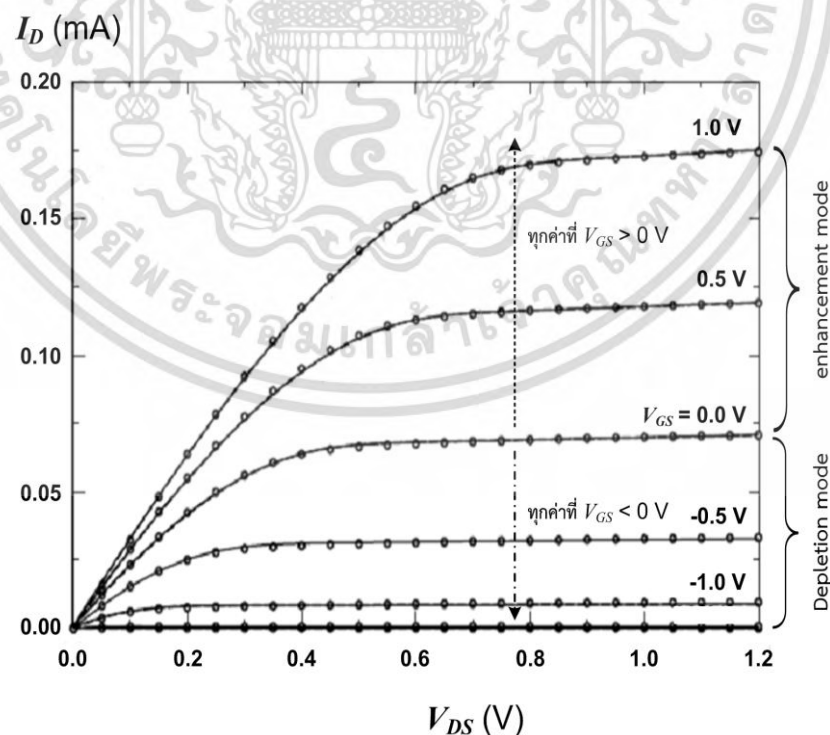
2.2.2 มอสเฟต แบบดีพลีชัน

โครงสร้าง คุณลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันของมอสเฟต แบบดีพลีชัน ชนิดเอ็นแชนแนล ดังรูปที่ 2.5 มีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับคล้ายกับมอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ เพราะว่ามีส่วนของช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นขึ้นมาเชื่อมระหว่างขั้วซอร์สกับขั้วเดรน เนื่องจากช่องทางเดินกระแสได้ถูกสร้างขึ้น โดยการแพร่อะตอมสารเจือ ชนิดเอ็น เข้าไปที่ผิวของฐานรอง ในกรณีนี้ให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเกต $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ดังนั้นทรานซิสเตอร์แบบนี้ จึงทำให้สามารถทำงาน และมีกระแสเดรน (I_D) ไหลได้ ถึงแม้ว่าแรงดันที่เกตเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ให้แรงดันเกตมีค่าเป็นลบ $V_{GS} < 0 \text{ V}$ อิเล็กตรอนตรงบริเวณช่องทางเดินกระแสจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ผลักให้ห่างออกไปจากผิวของซิลิคอน ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตรงบริเวณช่องทางเดินกระแสที่ผิวมีค่าลดลง ทำให้สภาพความนำไฟฟ้าของช่องทางเดินกระแสมีค่าลดลงอีกด้วย ทำให้ค่ากระแสเดรน (I_D) มีค่าลดลง ถ้าแรงดันที่ขั้วเกตมีค่าเป็นลบมากขึ้น ดังรูปที่ 2.4(ข)



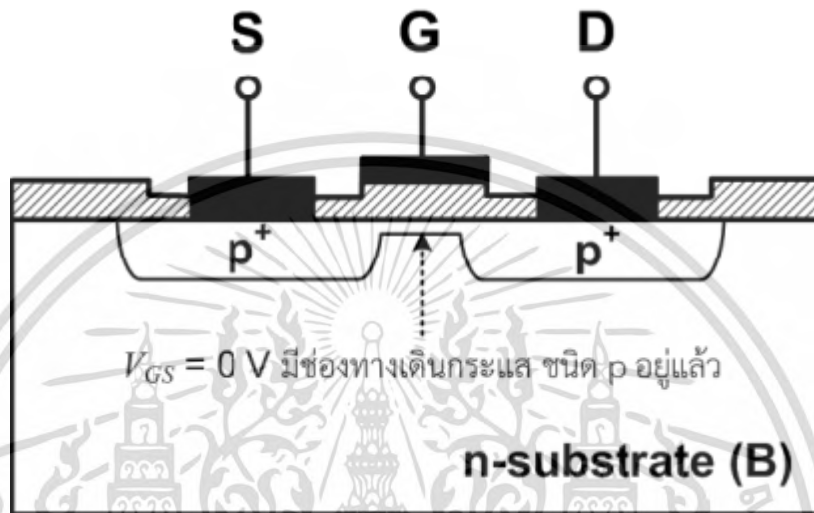
(ก) โครงสร้าง เอ็นมอสเฟต



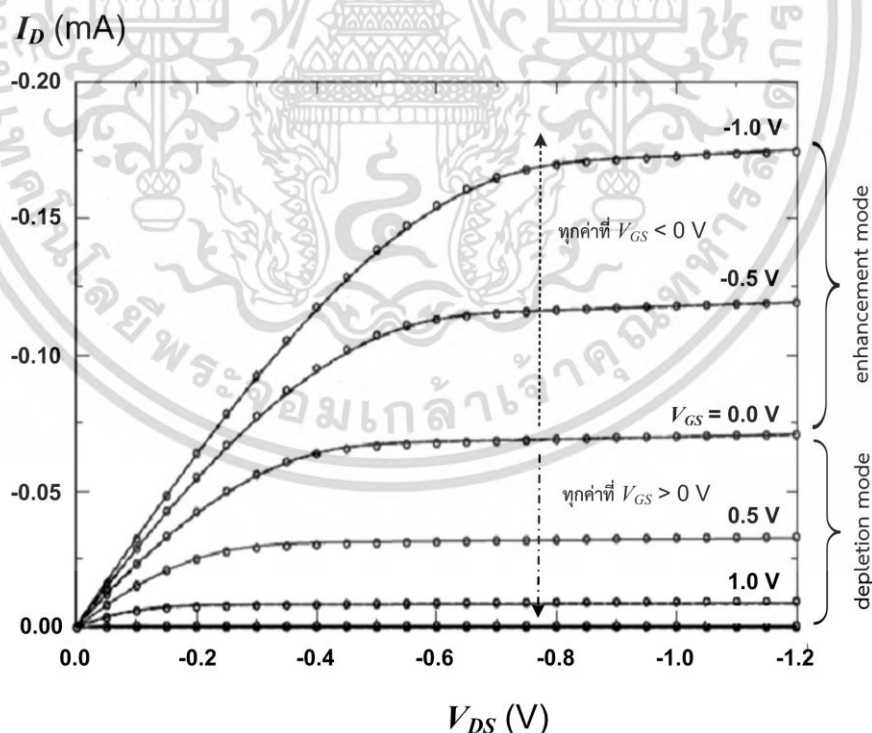
(ข) คุณลักษณะสมบัติของกระแส (I_D) และ แรงดัน (V_{GS})

รูปที่ 2.5 มอสเฟต แบบดีพลีชัน ชนิดเอ็นแชนแนล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ให้แรงดันที่ขั้วเกตเป็นบวก $V_{GS} > 0 \text{ V}$ ประจุพาหะที่ถูกเหนี่ยวนำมีความหนาแน่นมากขึ้น จะทำให้ค่ากระแสเดรน(I_D)เพิ่มขึ้นตามแรงดันเกตที่ขั้ว ลักษณะการทำงานเช่นนี้ เรียกว่า ดีพลีชันโหมด(depletion mode) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ขั้วเกตสามารถควบคุมให้กระแสเดรน(I_D)มีปริมาณที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นได้ สำหรับ มอสเฟต แบบดีพลีชัน ชนิดพีแชนแนล มีโครงสร้างและคุณลักษณะทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.5



(ก) โครงสร้าง พีมอสเฟต



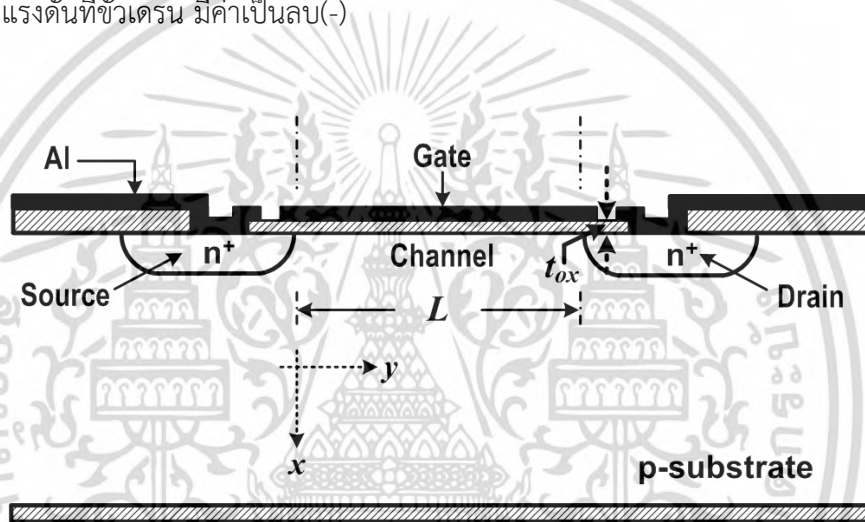
(ข) คุณลักษณะสมบัติของกระแส(I_D) และ แรงดัน(V_{GS})

รูปที่ 2.6 มอสเฟต แบบดีพลีชัน ชนิดพีแชนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการทำงาน และคุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน [27], [28]

การทำงานของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแซนแนล โดยการศึกษาจากแรงดันเกต (V_{GS}) [1] ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดช่องทางเดินกระแสและการเกิดเขตปลอดพาหะ ที่ผิวของซิลิคอนและความสัมพันธ์ของแรงดันเกต V_{GS} กับ แรงดันเดรน V_{DS} ที่ส่งผลต่อค่ากระแสเดรน (I_D) ดังรูปที่ 2.6 พิจารณาจากการให้แรงดันไบอัส แรงดันที่ขั้วเกต V_{GS} จะทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดประจุพาหะ (อิเล็กตรอน) ซึ่งเหมือนกับส่วนของซอร์สและเดรน ดังนั้นการให้แรงดันที่ขั้วเกต V_{GS} เพื่อจะควบคุมช่องทางเดินกระแสที่เชื่อมระหว่างซอร์สกับเดรน ส่วนขั้วเดรนได้รับแรงดันย้อนกลับ ดังนั้นเอ็นแซนแนล แรงดันที่ขั้วเกตและแรงดันที่ขั้วเดรน มีค่าเป็นบวก(+) ในส่วนของ พีแซนแนลแรงดันที่ขั้วเกตและแรงดันที่ขั้วเดรน มีค่าเป็นลบ(-)



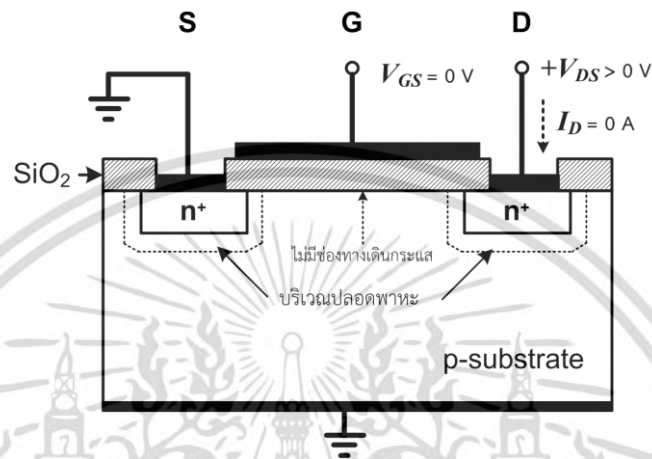
รูปที่ 2.7 มอสเฟตชนิดเอ็นแซนแนล

ที่ขั้วเกตไม่มีการไบอัส ($V_{GS} = 0$ V) ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าชั้นออกไซด์เป็นศูนย์ ส่งผลต่อบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง Si-SiO₂ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุพาหะ แต่พบบริเวณปลอดพาหะที่รอบๆรอยต่อพีเอ็น (pn junction) ที่ซอร์สกับฐานรอง และ ที่เดรนกับฐานรอง สุดท้ายเขตปลอดพาหะจากโครงสร้างระหว่างซอร์ส ฐานรอง เดรน ที่มีลักษณะเป็น n⁺-p⁺-n⁺ ดังรูปที่ 2.7(ก) ส่งผลให้ค่ากระแสเดรน (I_D) มีค่าน้อยมาก หรือ ไม่มีกระแสไหล ($I_D \cong 0$ A) ส่วนกราฟแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแรงดันและกระแส ดังรูปที่ 2.4(ข) มอสเฟตอยู่ในสถานะ คัดออฟ(cutoff) ซึ่งหมายถึงมอสเฟตไม่ทำงาน

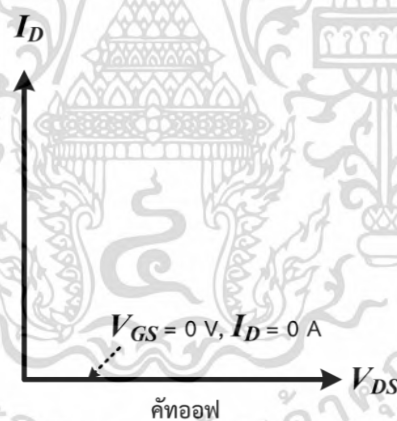
สำหรับกรณีที่แรงดันที่ขั้วเกต $V_{GS} > 0$ V และค่าแรงดันที่ขั้วเดรน (V_{DS}) มีการเปลี่ยนแปลง จะก่อให้เกิดการทำงานในย่านต่างๆ ซึ่งกำหนดค่าแรงดันที่ไบอัสเอ็นมอสเฟตเอ็นฮานซ์เมนต์ ชนิดเอ็นแซนแนล ดังนี้.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) ค่าแรงดันไบอัส $0 < V_{GS} < V_T$ และ $V_{DS} > 0$
- (2) ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ V_{DS} มีค่าต่ำ
- (3) ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} < V_{DS(sat)}$ (V_{DS} มีค่าสูง)
- (4) ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(sat)}$
- (5) ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$



(ก) ภาพตัดขวางแสดงเขตปลอดพาหะตรงบริเวณรอยต่อพีเอ็น



(ข) คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันเดรนกับกระแสเดรน

รูปที่ 2.8 มอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแชนแนล ที่ย่านการทำงาน $V_{GS} = V_{DS} = 0$ V

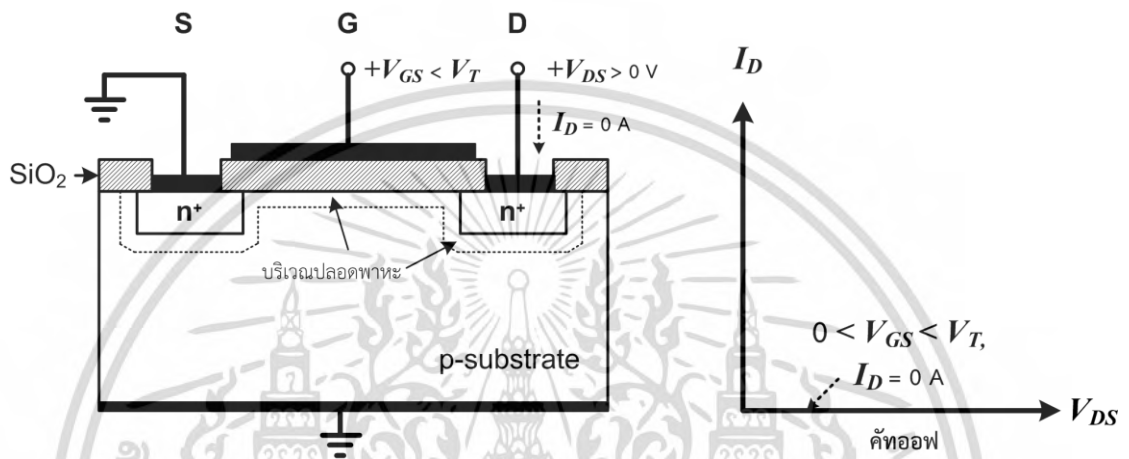
2.3.1 ค่าแรงดันไบอัส $0 < V_{GS} < V_T$ และ $V_{DS} > 0$ ได้กระแส $I_D = 0$ A

ค่าแรงดันที่ให้แก่วัสดุเป็นค่าบวก(+) แต่น้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม(Threshold Voltage, V_T) หรือ $0 < V_{GS} < V_T$ ค่าแรงดันที่ต่ำกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ขึ้นของออกไซด์และเกิดการผลักประจุพาหะโฮลในวัสดุสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณผิวสัมผัสรอยต่อระหว่าง Si-SiO₂ เคลื่อนที่เข้าไปใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อซิลิคอน ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะโฮสมีค่าลดลงจากเดิม จากผลการเคลื่อนที่ของประจุพาหะทำให้เกิดบริเวณปลอดประจุพาหะขึ้นที่อยู่ใต้ส่วนของพื้นที่เกต ดังรูปที่ 2.8(ก)

ในส่วนขั้วซอร์ส(S)และเดรน(D) ยังไม่เชื่อมต่อกันโดยบริเวณปลอดพาหะแทรกอยู่ตรงกลางตรงพื้นที่ใต้ขั้วเกต(G) และชั้นของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าสภาพความนำไฟฟ้าต่ำ ถ้าให้แรงดันเดรน(V_{DS}) สูงขึ้น ค่ากระแสเดรน(I_D) มีค่าต่ำมากๆ หรือเป็น 0 A และในสถานะเช่นว่านี้ อยู่สถานะคัตออฟ(cutoff) ดังรูปที่ 2.8(ข)



(ก) ภาพตัดขวางบริเวณปลอดพาหะ (ข) คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันกับกระแส รูปที่ 2.9 โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟต แบบเอ็นแชนแนล

(2) ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ V_{DS} มีค่าต่ำ ได้กระแส $I_D > 0$ A (เชิงเส้น)

ให้ค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) มากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) หรือ $V_{GS} > V_T$ จะทำให้ค่าสนามไฟฟ้าในชั้นของออกไซด์มีค่ามากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดแขนแนลชนิดเอ็น(n channel) หรือ ชั้นกลับชนิดเอ็น(n-inversion layer) หรือ ช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น ที่ผิวสัมผัสรอยต่อระหว่าง Si-SiO₂ ตรงพื้นที่ใต้ขั้วเกต(G) ดังรูปที่ 2.9(ก) เป็นลักษณะของช่องทางเดินกระแสเป็นแผ่นประจุชั้นบางๆ(sheet of charge) ที่เป็นประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากเหนี่ยวนำขึ้นมาเป็นประจุพาหะที่นำแสดงอย่างเดียวกับอิเล็กตรอนในวัสดุสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น(n-type) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำที่ช่องทางกระแสจะขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ ที่แรงดันขั้วเกต(V_{GS}) และแรงดันเดรน $V_{GS} = 0$ V ค่าแรงดันตรงพื้นที่ขั้วเกตตกรวมชั้นออกไซด์จะมีค่าเท่ากันทุกจุด รวมทั้งชั้นของช่องทางเดินกระแสด้วย ต่อมาเมื่อให้แรงดันที่ขั้วเดรน $V_{DS} > 0$ V จะมีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ที่ต่างๆ ที่อยู่ห่างจากขั้วซอร์สจะมีค่าลดลงตามระยะห่าง ส่งผลให้ค่าความ

หนาแน่นของอิเล็กตรอนในช่องทางเดินกระแสมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้ขั้วเดรน และมีค่าน้อยสุดที่ปลายช่องทางเดินกระแสต่อกับขั้วเดรน

การพิจารณาเงื่อนไข แรงดันที่ขั้วเดรน V_{DS} มีค่าต่ำๆ และให้ถือว่าค่าสนามไฟฟ้าของชั้นออกไซด์เท่ากันทุกจุด ดังนั้นช่องทางเดินกระแสมีพื้นที่เป็นสี่เหลี่ยม ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคงที่ที่ช่องทางเดินกระแสตลอดความยาว L และชั้นของเขตปลอดพาหะจะอยู่ด้านล่างของชั้นช่องทางเดินกระแส

ให้แรงดันที่ขั้วเดรน $+V_{DS}$ ต่ำๆ ซึ่งเป็นไปอัสแรงดันย้อนกลับ ที่รอยต่อ pn ที่บริเวณรอบๆ ส่วนของขั้วเดรนเขตปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้นมากส่วนของขั้วซอร์ส ช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น (n channel) มีค่าความยาว L ขณะที่ให้แรงดันที่ขั้วเดรน V_{DS} เพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าที่ช่องทางเดินกระแสจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการดริฟท์(drift) เคลื่อนที่จากขั้วซอร์ส(S)ไปยังขั้วเดรน(D) ค่ากระแสเดรน(I_D) จะแปรผกผันกับค่าความต้านทานของช่องทางเดินกระแส ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม ดังสมการที่ (2.1)

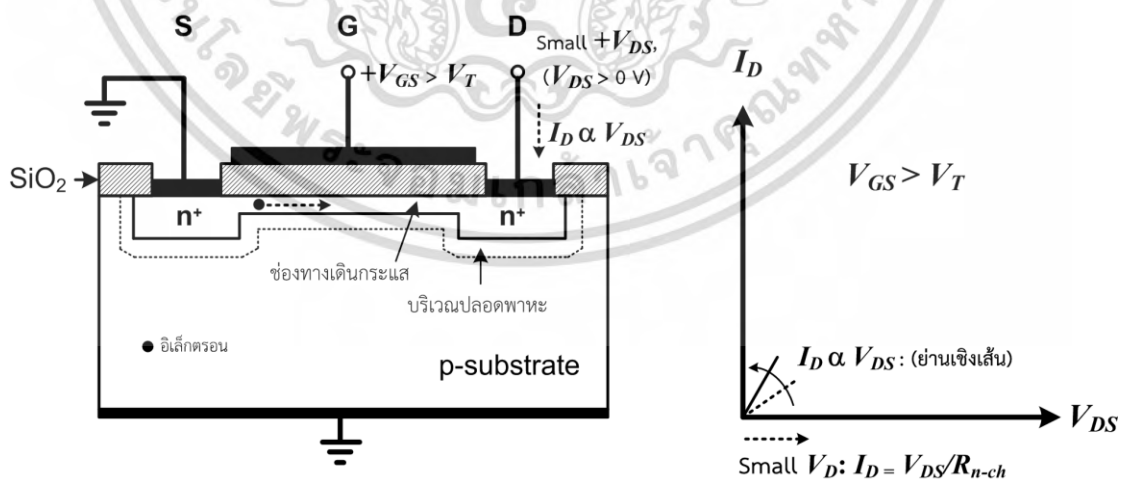
$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{n-ch}} \tag{2.1}$$

$$R_{n-ch} = \frac{1}{G_{n-ch}} \tag{2.2}$$

โดยที่

R_{n-ch} คือ ค่าความต้านทานของช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น

G_{n-ch} คือ ค่าความนำไฟฟ้าของช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น



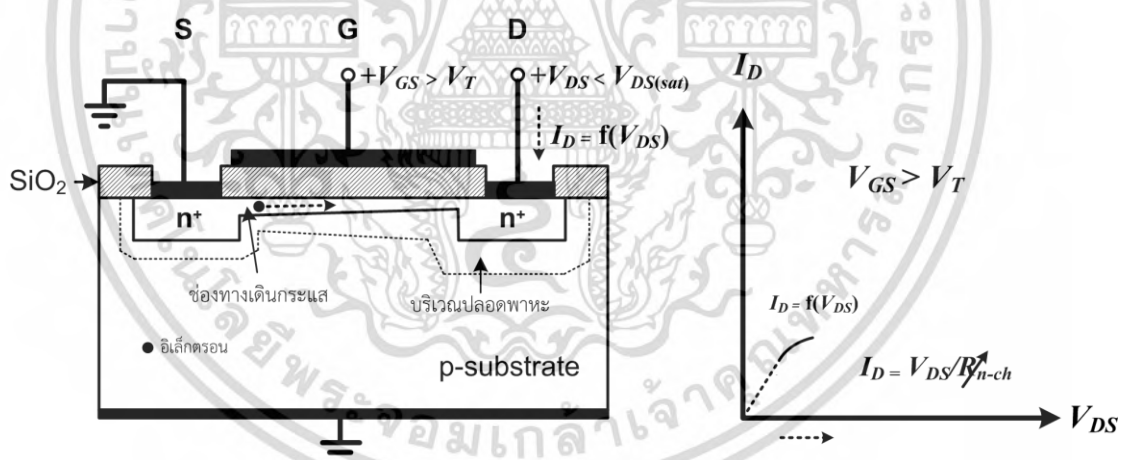
(ก) ภาพตัดขวางช่องทางเดินกระแส (ข) คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันกับกระแส รูปที่ 2.10 โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสเดรน I_D จะแปรผันตรงกับค่าแรงดันที่ขั้วเดรน V_{DS} ที่ค่าต่ำๆ โดยที่กระแสเดรน I_D มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.9(ข) คุณลักษณะทางไฟฟ้าเช่นว่านี้ เรียกว่า ย่านเชิงเส้น(linear region)

2.3.2 ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} < V_{DS(sat)}$ (V_{DS} มีค่าสูงแต่น้อยกว่า $V_{DS(sat)}$)

จากข้อ 2.3.2 ได้ให้ค่าแรงที่ขั้วเดรน V_{DS} มีค่าต่ำๆ แต่เมื่อเพิ่มแรงดันที่ขั้วเดรน V_{DS} มากขึ้นแต่น้อยกว่าค่าแรงดันที่เดรนอิ่มตัว $V_{DS(sat)}$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(sat)}$ ซึ่งการเพิ่มค่าแรงดันที่ขั้วเดรน V_{DS} จะมีอิทธิพลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของช่องทางเดินกระแสระหว่างขั้วซอร์ส(S)กับขั้วเดรน(D) ที่ปลายช่องทางเดินกระแสติดด้านขั้วซอร์ส(S) มีศักย์ไฟฟ้า 0 V แต่เมื่อตำแหน่งเลื่อนออกไปห่างขั้วซอร์สจะมีศักย์ไฟฟ้าบวกเพิ่มขึ้นตามระยะห่าง และมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ปลายด้านขั้วเดรน(D) $+V_{DS}$ ดังรูปที่ 2.6 ค่าแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ ที่ตำแหน่งตามแกน y ที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งตลอดแนวความยาวช่องทางเดินกระแสจะมีค่าแตกต่างกัน ที่ปลายด้านซอร์ส(S)มีค่าสูงสุด $V_{GS} - 0$ V หรือ V_{GS} และ ที่ปลายด้านเดรน(D)มีค่าสูงสุด $V_{GS} - V_{DS}$ ดังนั้นที่ค่าแรงดันเดรน(V_{DS}) มีค่าน้อยกว่า $V_{DS(sat)}$ จะทำให้ค่า $V_{GS} > V_T$ ยังคงมีช่องทางเดินกระแสเชื่อมระหว่างขั้วซอร์ส(S)ไปยังขั้วเดรน(D) และแรงดันที่ตกคร่อมชั้นเกต(G)ยังคงที่



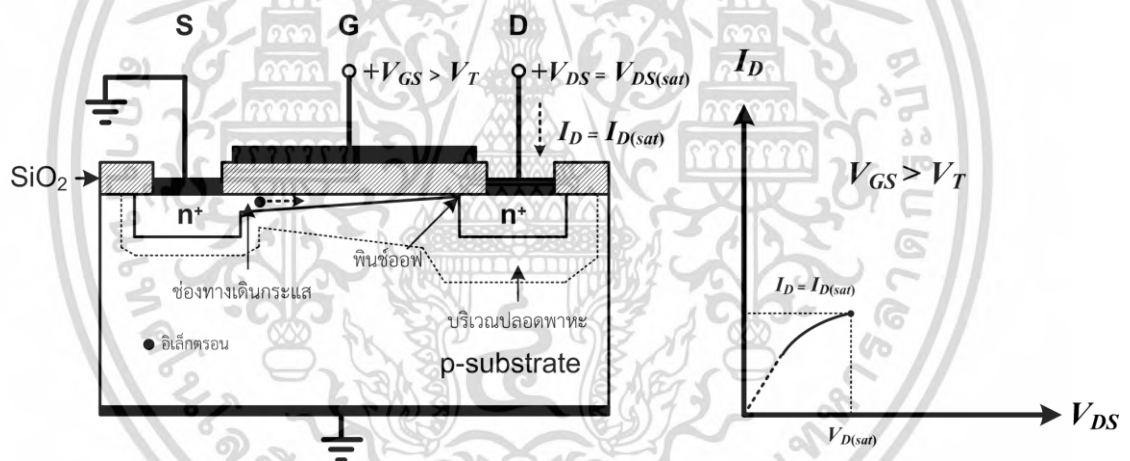
(ก) ภาพตัดขวางช่องทางเดินกระแส (ข) คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันกับกระแส
รูปที่ 2.11 โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟต แบบเอ็นชานซ์เมนต์

ส่วนค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ช่องทางเดินกระแสที่ปลายด้านขั้วซอร์ส(S) มีค่าคงที่ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ช่องทางเดินกระแสจะมีค่าลดลงตามระยะที่ห่างจากขั้วซอร์ส และมีค่าต่ำสุดที่ปลายด้านติดกับขั้วเดรน(D) ดังรูปที่ 2.10(ก) โดยพิจารณาจากช่องทางเดินกระแสเมื่อเข้าใกล้ทางด้านขั้วเดรน(D) พบว่าขนาดของช่องทางเดินกระแสมีค่าลดลง มีผลให้ค่าความ

ต้านทานของช่องทางเดินกระแส(Rn-ch) มีค่าเพิ่มตามกับค่าแรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS}) ขณะที่ค่าแรงดันที่ขั้วเดรน V_{DS} สูงขึ้น การเพิ่มขึ้นค่ากระแสเดรน(I_D)จะเพิ่มขึ้นแบบชะลอตัว จากการสังเกตพบว่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 2.10(ข) ค่าความชันของเส้นกราฟมีแนวโน้มลดลง(เส้นโค้ง) ในขณะที่ค่าแรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS})เพิ่มขึ้น ที่เงื่อนไข ($V_{GS} > V_T$) และ ($V_{DS} < V_{DS(sat)}$) (V_{DS} มีค่าสูงแต่น้อยกว่า $V_{DS(sat)}$) ที่ $V_{DS} = V_{DS(sat)}$ และได้ $V_{GS} - V_{DS(sat)} = V_T$ ซึ่งเป็นสภาวะพินช์ออฟ (pinch off)

2.3.3 ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(sat)}$

ขณะที่ยังคงเพิ่มค่าแรงดันที่ขั้วเดรน V_{DS} จนกระทั่งมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่ปลายตำแหน่งของด้านขั้วเดรน(D) มีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม หรือ $(V_{GS} - V_{DS}) = V_T$ ทำให้ช่องทางเดินกระแสด้านปลายที่ติดกับชั้นเดรน(D) มีขนาดเล็กจนกลายเป็นศูนย์ หรือ ช่องทางเดินกระแสขาดออกพอดีจากขั้วเดรน(D) ดังรูปที่ 2.11(ก) ในสภาวะเช่นว่านี้เรียกว่า พินช์ออฟ(pinch off) และจุดที่ขาดจากกันเรียกว่า จุดพินช์ออฟ(pinch off point)



(ก) ภาพตัดขวางช่องทางเดินกระแส (ข) คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันกับกระแส
รูปที่ 2.12 โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟต แบบเอ็นฮานซ์เมนต์

ที่รอยพีเอ็น(pn-junction) ด้านชั้นเดรน(D) พบว่าพื้นที่บริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดการขยายตัวเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบด้านของขั้วซอร์สอย่างชัดเจน

ค่าของแรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS}) ที่ส่งผลให้เกิดสภาวะ พินช์ออฟ ถูกเรียกว่า แรงดันเดรนอิ่มตัว $V_{DS(sat)}$ ในบางครั้งก็เรียกว่า แรงดันพินช์ออฟ (pinch off voltage, V_P) ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.4)

$$V_P = V_{DS(sat)} = (V_{GS} - V_T) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากช่องทางเดินกระแสที่ขาดพอดีที่ตำแหน่งปลายด้านขั้วเดรน คุณสมบัติการทำงานของมอสเฟตเช่นนี้จะคล้ายกับสภาวะ พินช์ออฟ(pinch off) ของเอ็นแชนแนลเจเฟต(n-channel JFET) โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในช่องทางเดินกระแสจะถูกดริฟท์(drift) ด้วยสนามไฟฟ้าจากขั้วซอร์ส(S)มีทิศทางมาทางขั้วเดรนและพอมารั้งปลายของช่องทางเดินกระแสที่ จุดพินช์ออฟ จะมีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงตกคร่อมช่วงแคบๆ ตรงบริเวณหลอดพาหะที่อยู่ระหว่างปลายของช่องทางเดินกระแสกับขั้วเดรน(D) จะถูกฉีดเอาอิเล็กตรอนที่อยู่ส่วนปลายของช่องทางเดินกระแสข้ามบริเวณหลอดพาหะเข้าไปยังส่วนเดรน(D) จึงทำให้กระแสเดรน(I_D) ที่ยังคงไหลได้ แต่ค่ากระแสเดรน(I_D)จะถูกจำกัดด้วยปริมาณของอิเล็กตรอนที่ฉีดข้ามบริเวณหลอดพาหะ และพิจารณาว่ากระแสเดรน(I_D)จะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานประสิทธิผล(effective resistance) ของช่องทางเดินกระแส ขณะที่ให้ค่าแรงดันที่ขั้วเดรน V_{DS} เพิ่มขึ้น ค่ากระแสเดรน(I_D) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชะลอตัว จนกระทั่งถึงค่า $V_{DS(sat)}$ จะได้ค่ากระแสเดรน(I_D) มีค่าสูงสุด เรียกว่า กระแสเดรนอิ่มตัว(saturation drain current, $I_{D(sat)}$) ดังรูปที่ 2.11(ข) ซึ่งเป็นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสและแรงดัน

2.3.4 ค่าแรงดันไบอัส $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$

ในกรณีที่ค่าแรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS}) ที่มากกว่า แรงดันอิ่มตัว หรือ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ จะส่งผลให้ค่าแรงดันที่คร่อมชั้นของออกไซด์ที่บริเวณใกล้ๆปลายขั้วเดรน(D) จะมีค่าน้อยค่าแรงดันขีดเริ่ม หรือ $V_{GS} - V_{DS} < V_T$ ที่บริเวณดังกล่าวจะไม่มีช่องทางเดินกระแสเกิดขึ้น มีลักษณะคล้ายกับจุดพินช์ออฟ(pinch off) โดยเริ่มเกิดที่จุดเดรน(D)และเลื่อนไปในทิศทางขั้วซอร์ส(S)และที่ตำแหน่งแนวแกน y ที่เป็นจุดพินช์ออฟ(pinch off) ที่เงื่อนไข $V_{GS} - V_{DS}(y) = V_T$ ที่ไม่เปลี่ยนแปลง ขณะที่แรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS}) สูงกว่า $V_{DS(sat)}$ การเคลื่อนที่ของจุดพินช์ออฟจะเลื่อนเข้าไปใกล้ขั้วซอร์ส(S) ดังรูปที่ 2.12(ก) ก่อให้เกิดบริเวณหลอดพาหะระหว่างจุดพินช์ออฟกับขั้วเดรน(D) มีระยะห่าง ΔL ที่ขนาดความยาวช่องทางเดินกระแสสมอสเฟต(long channel MOSFET) และ $\Delta L \ll L$ มีผลให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสนั้นสั้นลงน้อยมาก หรือ $L - \Delta L \approx L$ มีผลให้ความต้านทานของช่องทางเดินกระแส R_{n-ch} จะมีค่าประมาณเท่าเดิม ในขณะที่แรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS})เพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าแรงที่ตกคร่อมช่องทางเดินกระแสจากซอร์ส(S) ถึง จุดพินช์ออฟ(pinch off) มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS}) ดังสมการที่ (2.3)

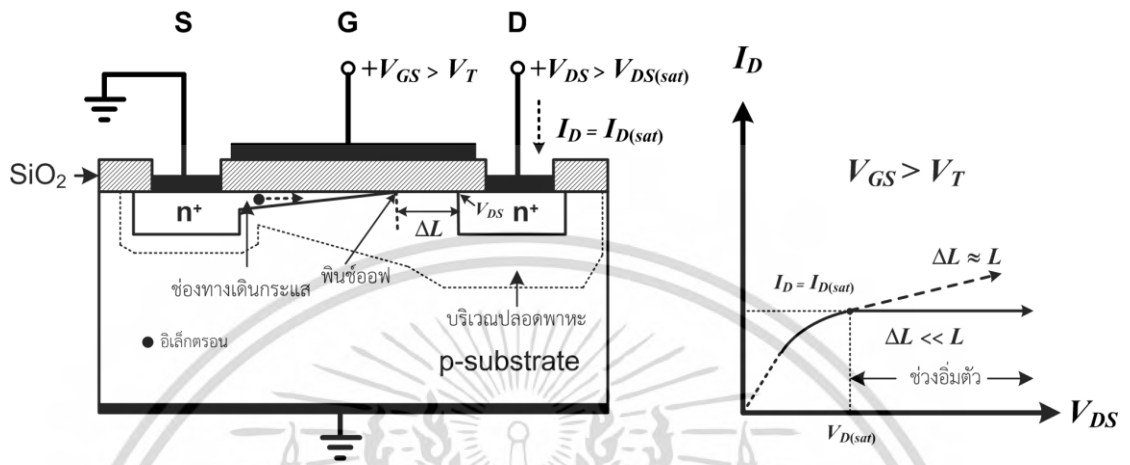
ที่ค่าแรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS}) มีค่าสูงกว่า $V_{DS(sat)}$ หรือ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ ค่ากระแสเดรน(I_D) อาจประได้ว่ามีค่าคงที่เท่ากับกระแสเดรนอิ่มตัว($I_{D(sat)}$) ดังสมการที่ (2.4)

$$I_{DS} \approx I_{DS(sat)} = \frac{V_{DS(sat)}}{R_{n-ch}} \quad (2.4)$$

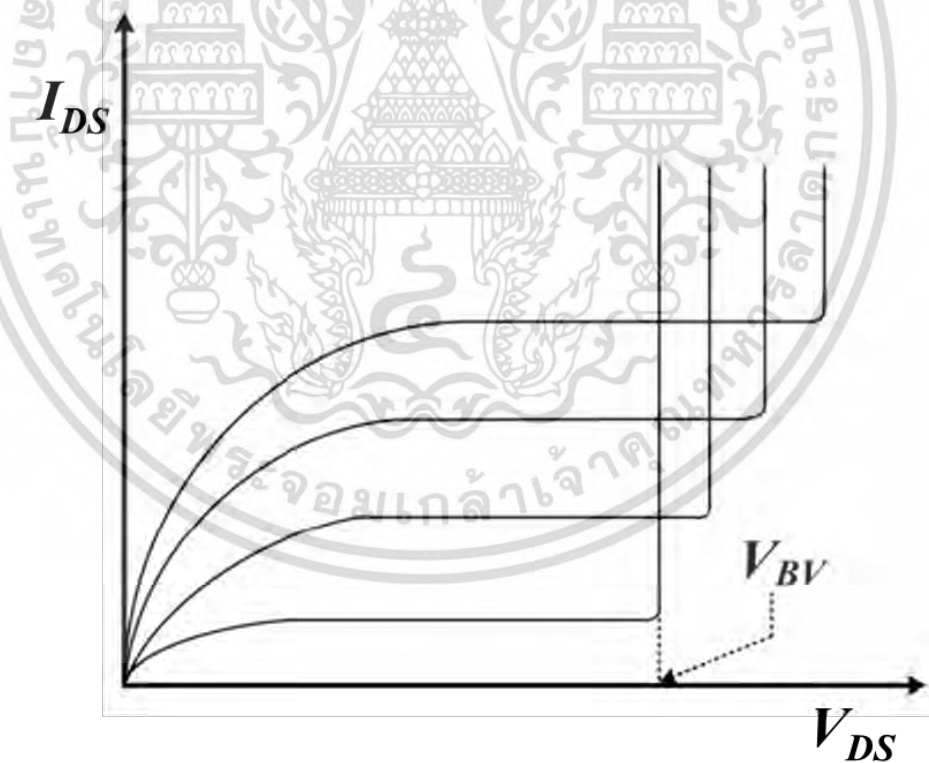
การทำงานของมอสเฟตในย่านอิ่มตัว(saturation region) มีค่ากระแสเดรน(I_D) คงที่ ไม่ขึ้นกับค่าแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 2.12(ข) เส้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟทที่มีขนาดความยาวช่องทางเดินกระแส L สั้นๆ หรือ short channel MOSFET จะได้ $\Delta L \approx L$ ขณะที่ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ จะทำให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสลดลงความต้านทานประสิทธิผลของช่องทางเดินกระแสจึงลดลง ค่ากระแสเดรน (I_D) ก็เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.12(ข) เส้นประ



(ก) ภาพตัดขวางช่องทางเดินกระแส (ข) คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันกับกระแส รูปที่ 2.13 โครงสร้าง และคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของมอสเฟท แบบเอ็นฮานซ์เมนต์



รูปที่ 2.14 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสเดรน (I_D) และแรงดัน (V_{DS}) มอสเฟท ที่ให้แรงดันเดรน (V_{GS}) ที่มีสค่าสูงจนเข้าสู่สภาวะการพังทลายที่ตรงบริเวณรอยต่อพีเอ็นของขั้วเดรนกับแผ่นสุารอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 แรงดันพังทลาย

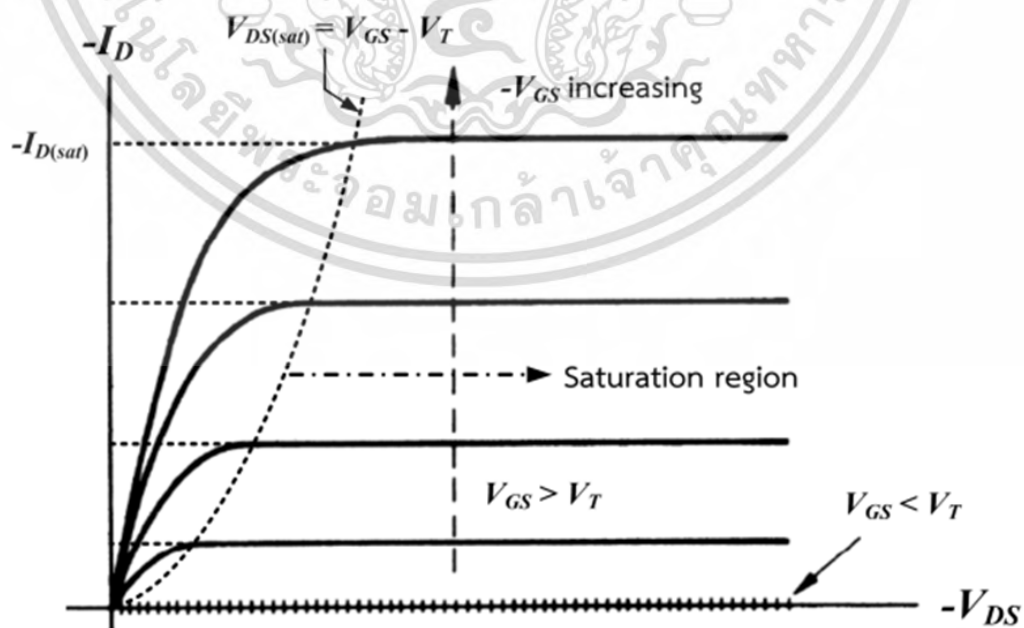
การให้แรงดันไบอัสตรงบริเวณรอยต่อพีเอ็น (pn junction) ระหว่างขั้วเดรนกับแผ่นฐานรอง ด้วยการให้แรงดันเดรน (V_{DS}) สูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ที่เรียกว่า แรงดันพังทลาย (breakdown voltage, V_{BV}) โดยลักษณะการพังทลายจะเป็นแบบอะวาลันซ์ (avalanche breakdown) จะส่งผลให้ค่ากระแสเดรน (I_{DS}) ซึ่งอยู่ในย่านอิมิตัว จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และควบคุมไม่ได้ สุดท้ายจึงเข้าสู่ภาวะ การพังทลาย ดังรูปที่ 3.13

2.4 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสและแรงดันขณะที่แรงดันที่เกตคงที่

ค่ากระแสเดรนอิมิตัว ($I_{DS(sat)}$) จะแปรผันตามค่าแรงเดรนอิมิตัว ($V_{DS(sat)}$) ตามสมการ (4.4) และแรงดันอิมิตัว $V_{DS(sat)}$ หรือ V_P จะแปรผันตามแรงดันเกต (V_{GS}) [1] ตามสมการ (4.3) และจะได้ค่ากระแสเดรนอิมิตัว ($I_{DS(sat)}$) จะแปรตามแรงดันเกต (V_{GS}) และการให้ค่าแรงดันเกต (V_{GS}) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากระแสเดรนอิมิตัว ($I_{DS(sat)}$) เพิ่มขึ้นตามสมการที่ (4.5)

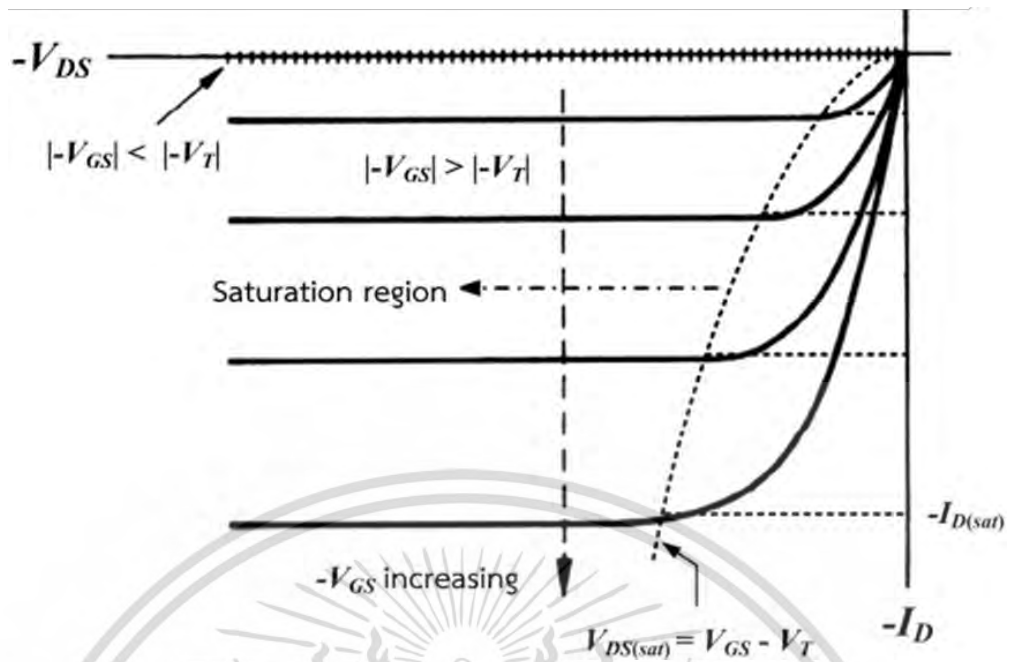
$$I_{DS(sat)} = \frac{V_{DS(sat)}}{R_{eff(n-ch)}} = \frac{V_{GS} - V_T}{R_{eff(n-ch)}} \quad (2.5)$$

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสเดรน (I_D) และแรงดัน (V_{DS}) มอสเฟตมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์แบบเอ็นแซนแนล โดยโครงสร้างที่มีช่องทางเดินกระแสแบบยาว ที่ค่าแรงดันเกต (V_{GS}) ที่ค่าแรงดันเกตที่ค่าต่างๆ ดังรูปที่ 2.14(ก) ส่วนมอสเฟตมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์แบบพีแซนแนล ได้ผลดังรูปที่ 2.14(ข)



(ก) มอสเฟตเอ็นแซนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) มอสเฟตพีแชนแนล

รูปที่ 2.15 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสเดรน(I_D)และแรงดัน(V_{DS}) ที่ค่าแรงดันเกต(V_{GS}) ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์

2.5 ค่าแรงดันขีดเริ่ม

ค่าแรงดันขีดเริ่ม หรือ threshold voltage, V_T หมายถึงค่าแรงดันที่ไบอัสให้กับขั้วเกต(V_{GS}) ที่ต่ำที่สุดหรือ ที่น้อยที่สุด[1] ที่ทำให้เกิดสถานะ สตรองอินเวอร์ชัน(strong inversion) ดังสมการที่ (2.6)

$$\phi_S = 2\phi_F \quad (2.6)$$

โดยที่

$$\phi_S = \text{ศักย์ที่ผิว(surface potential)}$$

$$\phi_F = \text{ศักย์เฟอร์มี(fermi potential)}$$

จากรูปที่ 4.15 เป็นให้แรงดันไบอัสบวกที่ขั้วเกต(V_{GS}) และสังเกตว่าส่วนขั้วเกต(G)กับแผ่นฐานรอมมีลักษณะคล้ายกับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ที่มีชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2) เป็นไดอิเล็กทริก(dielectric) ซึ่งประจุบวกจะอยู่ที่แผ่นโลหะของขั้วเกต(G) และจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุลบ(electron) ขึ้นที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนใต้ชั้น SiO_2 ได้เป็นช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และชั้นปลอดพาหะขึ้นมา ในส่วนของโฮล(hole) จะถูกผลักให้เข้าไปอยู่ลึกในเนื้อซิลิคอน ความกว้างตรงบริเวณเขตปลอดพาหะ(W_D) ที่อยู่ใต้ชั้น SiO_2 หาได้ดังสมการ (2.6)

$$W_D = \frac{\sqrt{2\varepsilon_S\phi_S}}{qN_A} \quad (2.7)$$

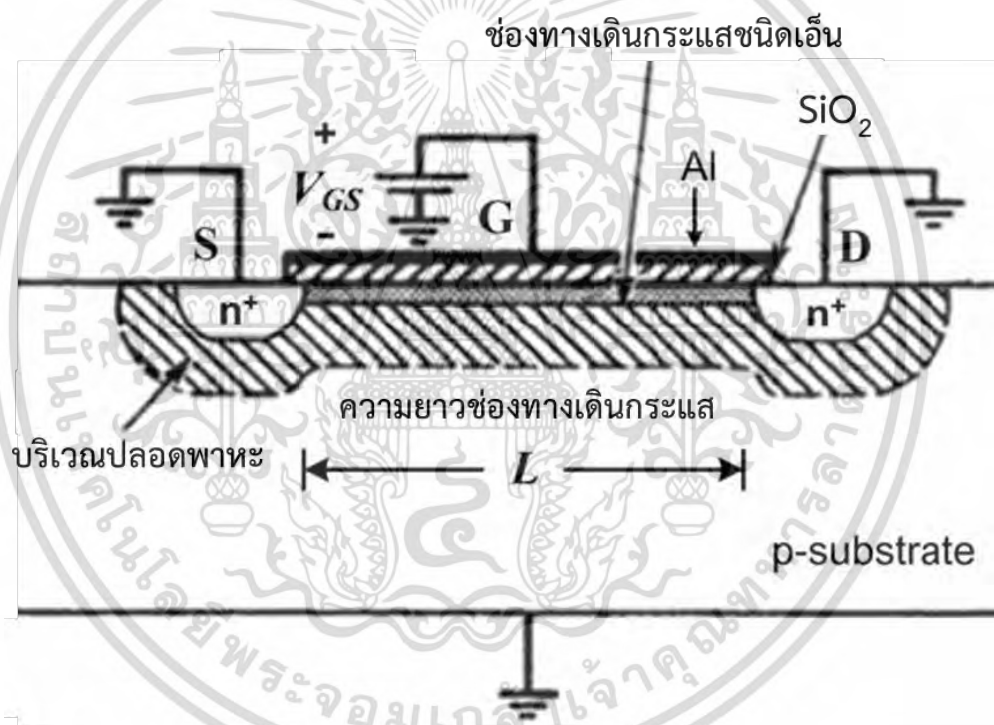
โดยที่

คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ชั้นปลอดพาหะระหว่างผิวของซิลิคอนไดออกไซด์และเนื้อซิลิคอน

คือ เฟอร์มิตติวิตีของซิลิคอน

คือ ประจุอิเล็กตรอน

คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือฐานรองชนิดพี



รูปที่ 2.16 ภาคตัดขวางเอ็นมอสขณะได้รับการไบอัสแรงดันที่เกต(V_{GS})

จะได้ประจุต่อพื้นที่ ที่บริเวณปลอดพาหะ ดังสมการ (2.8)

$$Q = qN_AW_D = \sqrt{2qN_A\varepsilon_S\phi_S} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่ศักย์ไฟฟ้าที่ผิว ϕ_s ของซิลิคอนที่คาร์บอนที่มีค่าเท่ากับสองเท่าของศักย์เฟอร์มิ ดังสมการที่ (2.6) จะเกิดปรากฏการณ์สตรองอินเวอร์ชันและชั้นปลอดพาหะขึ้นตรงใต้ขั้วเกต(G) การเพิ่มค่าแรงดันที่เกต(V_{GS}) จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของชั้นเขตปลอดพาหะ แต่จะเกิดชั้นบางๆของอิเล็กตรอน ที่เหนี่ยวนำขึ้นในชั้นปลอดพาหะใต้ชั้น SiO_2 เรียกว่า ช่องทางเดินกระแส เป็นชั้นกลับชนิดเอ็นที่เชื่อมต่อระหว่างขั้ว(S)และเดรน(D) โดยขนาดของช่องทางเดินกระแสอาจลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามการไบอัสแรงเกต(V_{GS}) ค่าประจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะ(Q_{dm}) หาได้ดังสมการ

$$Q_{dm} = \sqrt{2qN_A\epsilon_S\phi_S(2\phi_F)} \quad (2.9)$$

แต่กรณีที่เราได้รับแรงดันไบอัส V_{SB} ได้ค่าประจุไฟฟ้าที่สะสมบริเวณปลอดพาหะ(Q_d) ดังสมการ

$$Q_{dm} = \sqrt{2qN_A\epsilon_S\phi_S(2\phi_F + V_{SB})} \quad (2.10)$$

ที่เงื่อนไขของสตรองอินเวอร์ชัน จะประกอบด้วยหลายส่วน คือ

- (1) ค่าแรงดันตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ $[(2\phi_F + Q_d/C_{ox})]$ ซึ่ง C_{ox} คือ ความจุไฟฟ้าของออกไซด์ที่ส่วนของเกต(G)ต่อหน่วยพื้นที่
- (2) ความแตกต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะส่วนเกต(G) กับ ฐานรองซิลิคอน(ϕ_{ms})
- (3) ความหนาแน่นประจุในชั้นออกไซด์และที่ผิวสัมผัสกับซิลิคอน(บวก) ซึ่งจะถูกลดเซชด้วยแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) $-Q_{ss}/C_{ox}$

จะได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T)

$$V_T = \phi_{ms} + 2\phi_F + \frac{Q_d}{C_{ox}} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2.10)$$

$$V_T = \phi_{ms} + 2\phi_F + \frac{Q_{dm}}{C_{ox}} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} + \frac{Q_d - Q_{dm}}{C_{ox}}$$

$$V_T = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \quad (2.11)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{TO} = \phi_{ms} + 2\phi_F + \frac{Q_d}{C_{ox}} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}}$$

$$\gamma = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2qN_A \epsilon_S}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

ϵ_{ox} คือ เปรอริมิตติวิตีของออกไซด์

t_{ox} คือ ความหนาออกไซด์ที่เกต(G)



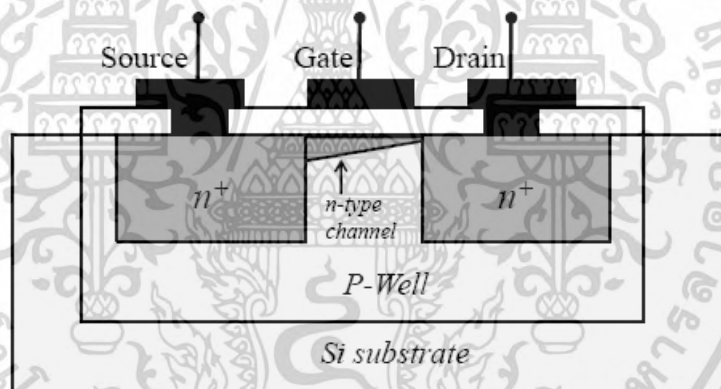
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

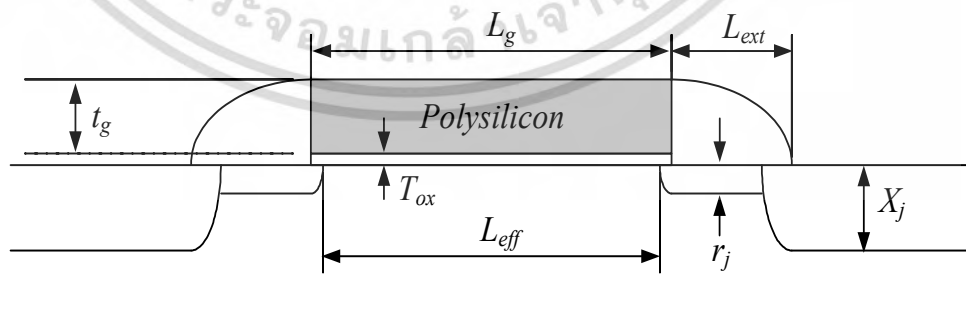
กระบวนการสร้าง

3.1 การออกแบบเอ็นมอสเฟต

ในการออกแบบเอ็นมอสเฟต จำต้องเป็นไปตามกฎการออกแบบ หรือ Design rules[2] ที่ใช้กระบวนการสร้างซีมอสเฟตด้วยเทคโนโลยี $0.5\ \mu\text{m}$ ซึ่งการออกแบบทางลักษณะทางเรขาคณิต คือ ความยาวเกต (Gate Length, L_g) ความหนาชั้นออกไซด์ (Gate oxide thickness, T_{ox}), ความลึกซอสและเดรน (S/D junction depth, X_j) สำหรับการออกแบบเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางกายภาพจะมีความสัมพันธ์แปรตามความยาวเกตของกฎการออกแบบมอสเฟต เช่น ความหนาออกไซด์ ($T_{ox}=0.018L_g$), ความลึกของ LDD extension ($r_j=0.3L_g$), ความลึกซอส(S)และเดรน(D) ($X_j=0.6L_g$), Spacer width ($L_{ext}=0.3L_g$) และความยาวสุทธิของเกต effect gate ($L_{eff}=0.6L_g$) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางกายภาพของเอ็นมอสเฟตที่ขนาดความยาวเกต $0.5\ \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 3.1



(ก) ภาคตัดขวางโครงสร้างเอ็นมอสเฟต



(ข) ภาคตัดขวางโครงสร้างเอ็นมอสเฟตแสดงขอบเขตทางกายภาพ

รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางโครงสร้างมอสเฟตในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ลักษณะทางเรขาคณิตของเอ็นมอสเฟท

พารามิเตอร์เอ็นมอสเฟท	ขนาด
Gate Length, L_g	0.5 μm
Gate oxide thickness, T_{ox}	100 nm
LDD junction depth, r_j	180 nm
N+ Poly silicon thickness,	300 nm
S/D junction depth, X_j	360 nm
Spacer width	160 nm
well junction depth	2.0 μm

ในตารางที่ 3.1 การจำลองกระบวนการสร้างได้กำหนดขนาดความยาวเกต(L_g)มีค่าที่ 0.3, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 3.0 และ 20 μm จะต้องคำนึงถึงสัมพันธ์กับกระบวนการสร้างเอ็นมอสเฟท และ คุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกด้วย

3.2 การจำลองกระบวนการสร้างเอ็นมอสเฟทด้วยโปรแกรม “Sentaurus TCAD”

การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเอ็นมอสเฟท โดยจะใช้โปรแกรม “Sentaurus TCAD” [3] โดยจะเน้นศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้า ซึ่งได้กำหนดค่าแรงดันขั้วเริ่มต้นประมาณ 0.6-0.7 V จะควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสารที่ช่องทางเดินของกระแส แชนแนล หรือความเข้มข้น แชนแนลของกระแส โดยวิธีการยิงฝังไอออนเพื่อปรับเปลี่ยนค่าแรงดันขั้วเริ่มต้น(Threshold Voltage Adjustment, VTA)

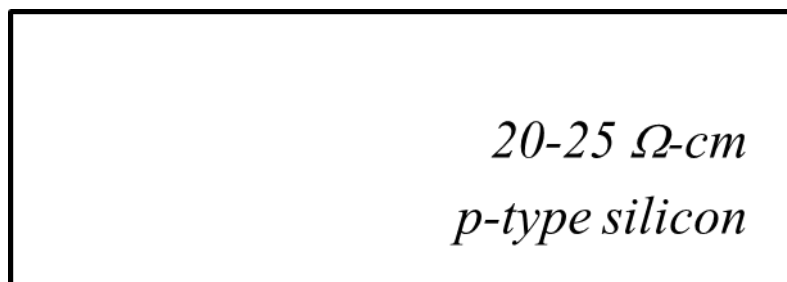
3.2.1 การจำลองค่าแรงดันขั้วเริ่มต้นของเอ็นมอสเฟท โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณโดส VTA และปริมาณโดส APT

การหาค่าแรงดันขั้วเริ่มต้น(V_T) นั้นจะขึ้นกับค่าความเข้มข้นของแผ่นฐานรองซิลิคอนที่ใช้และอาจเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันขั้วเริ่มต้น(V_T) ได้ด้วยการควบคุมความเข้มข้นของแผ่นฐานรองซิลิคอน หรือการควบคุมปริมาณโดสจากการยิงฝังประจุเพื่อปรับค่าแรงดันขั้วเริ่มต้น(VTA)และปริมาณโดสจากการยิงฝังประจุจากกระบวนการป้องกันพันธ์ทรู(APT) ตามเงื่อนไขการจำลองปริมาณโดส ดังตารางที่ 3.2

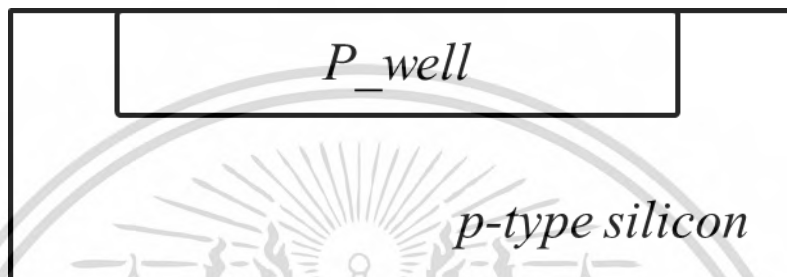
เริ่มจากการเลือกแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี(p-type silicon) มีค่าความต้านในช่วง 20-25 ohm-cm ดังรูปที่ 3.1 ต่อจากนั้นทำการสร้างบ่อแยกชนิดพี(P-well) ดังรูปที่ 3.2 ด้วยการยิงฝังประจุธาตุโบรอนใช้พลังงาน 140 keV ส่วนการยิงฝังประจุจากกระบวนการป้องกันพันธ์ทรู(APT) จะใช้พลังงาน 90 keV และสุดท้ายเป็นการยิงฝังประจุเพื่อปรับค่าแรงดันขั้วเริ่มต้น(VTA) โดยใช้ BF_2 ที่

พลังงาน 70 keV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี



(ข) บ่อแยกชนิดพี(P_well)

รูปที่ 3.2 การสร้างชั้นแยกชนิดพี(P_well)แผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี

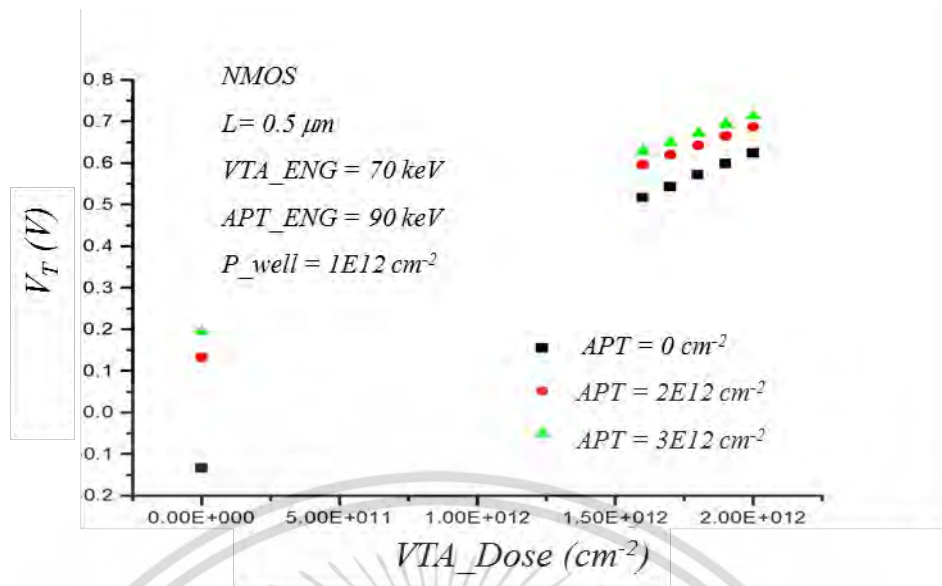
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการกำหนดปริมาณโดสเพื่อศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม

แผ่นที่ใช้ทดสอบ	P-WELL IMPLANT DOSE ที่ใช้พลังงานคงที่ 140 keV(cm ⁻²)	VTA IMPLANT DOSE ที่ใช้พลังงานคงที่ 70 keV (cm ⁻²)	APT IMPLANT DOSE ที่ใช้พลังงานคงที่ 90 keV(cm ⁻²)
A01	1.0×10^{12}	0, 1.6×10^{12} , 1.7×10^{12} ,	0
A02		1.8×10^{12} , 1.9×10^{12}	2.0×10^{12}
A03		2.0×10^{12}	3.0×10^{12}

สำหรับการศึกษาการจำลองกระบวนการสร้างเอ็นมอสเฟทจะเน้นไปที่เทคโนโลยีที่มีความยาวเกต 0.5 μm และบ่อแยกชนิดพี(P_well) ที่มีปริมาณโดส 1×10^{12} cm⁻² จากเงื่อนไขที่ได้กำหนดตามตารางที่ 3.2 นำพารามิเตอร์มาใส่ในแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD (ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก TMEC) ได้ผลตาม รูปที่ 3.3 สำหรับการปรับเปลี่ยนปริมาณโดส VTA ที่มีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) เพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้เพราะว่ามีปริมาณของโฮลเพิ่มขึ้นที่ผิวของบ่อแยกชนิดพี(P_well) และที่ปริมาณโดส VTA แต่ได้ปรับเปลี่ยนปริมาณโดสสำหรับการป้องกันพันธ์ทรู(ATP) พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) เพิ่มขึ้นตามปริมาณโดสของ ATP เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณโดสของ ATP

3.0×10^{12} cm⁻² และได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) ในช่วง 0.6-0.7 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับที่ปริมาณโดสการยิงฝังประจุ VTA ที่ปริมาณโดส Anti-punchthrough(ATP) ค่าต่างๆ

3.2.2 การจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T)ของเอ็นมอสเฟท โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณโดส VTA และปริมาณโดสบ่อแยกแยกชนิดพี(P_well) APT

การจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) โดยกำหนดความยาว L 0.5 μm ปริมาณโดส APT_Dose $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ จากเงื่อนไขที่ได้กำหนดตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการกำหนดปริมาณโดสเพื่อศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม

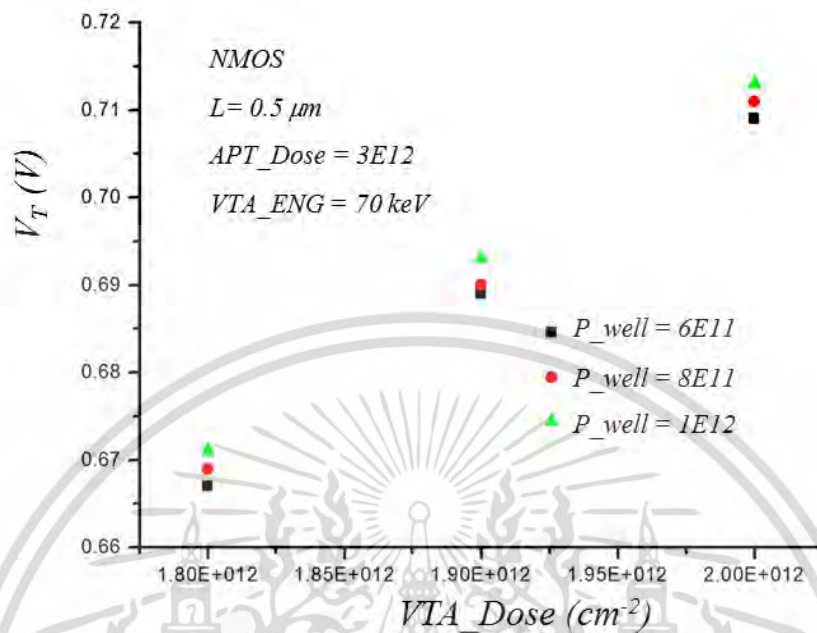
แผ่นที่ใช้ทดสอบ	APT IMPLANT DOSE ที่ใช้พลังงานคงที่ 90 $\text{keV}(\text{cm}^{-2})$	VTA IMPLANT DOSE ที่ใช้พลังงานคงที่ 70 $\text{keV}(\text{cm}^{-2})$	P-WELL IMPLANT DOSE ที่ใช้พลังงานคงที่ $140 \text{ keV}(\text{cm}^{-2})$
A04	3.0×10^{12}	$1.8 \times 10^{12}, 1.9 \times 10^{12}$ 2.0×10^{12}	6.0×10^{11}
A05			8.0×10^{11}
A06			1.0×10^{12}

จากผลการจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) จากรูปที่ 3.3 สามารถกำหนดค่า APT_Dose $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และได้ผลการจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) ดังรูปที่ 3.4 พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) จะแปรตามปริมาณโดส VTA_Dose มีลักษณะเป็นเชิงเส้น เพราะว่าปริมาณของโฮลเพิ่มขึ้น และกำหนดปริมาณ

โดส VTA_Dose คงที่ ขณะเดียวกันได้ปรับปริมาณโดสบ่อแยกชนิดพี(P_well) เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันขีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่ม(V_T) จะเพิ่มขึ้น จากผลการจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) โดยต้องการค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) ในช่วง 0.6-0.7 V จะได้ค่าปริมาณโดสของบ่อแยกชนิดพี(P_well) $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$



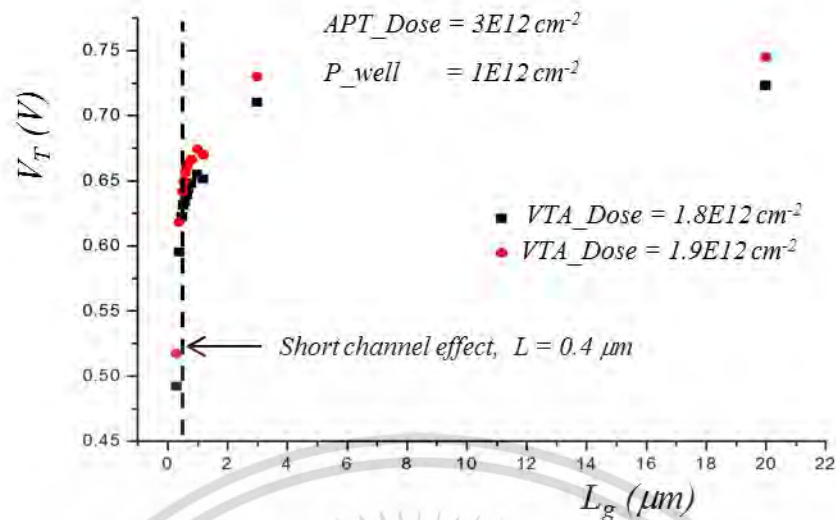
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันขีดเริ่มกับปริมาณโดสการยิงฝั่งประจุ VTA ที่ปริมาณโดส บ่อพีค่าต่างๆ

3.2.3 การจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T)ของเอ็นมอสเฟท โดยการปรับเปลี่ยนขนาดความยาวเกต(L_g)

จากผลจำลองค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) โดยกำหนดความยาวเกต(L_g) $0.5 \mu\text{m}$ ซึ่งได้ผลตามรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ได้พารามิเตอร์ 2 ตัวคือค่าปริมาณโดส APT_Dose $3.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และค่าปริมาณ โดสบ่อแยกชนิดพี(P_well) $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ในหัวข้อนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของเกต(L_g) 0.3, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.8, 1.2 3.0 และ $20 \mu\text{m}$ ตามลำดับ และได้ปรับเปลี่ยน ปริมาณโดสการยิงฝั่งประจุเพื่อปรับเปลี่ยนค่าแรงดันขีดเริ่ม VTA_Dose 1.8×10^{12} และ $1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ตามลำดับ

นำตัวแปรที่กำหนดไว้แล้วมาผ่านโปรแกรม เพื่อจำลองหาค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) โดยการ เปลี่ยนแปลงความยาวเกต(L_g) ได้ผลการจำลองตาม รูปที่ 3.5 พบว่าที่ค่าความยาวเกต(L_g) ที่ต่ำกว่า $0.4 \mu\text{m}$ จะเกิดปรากฏการณ์ช่องทางเดินกระแสสั้น (Short channel Effect) จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) ลดลงอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับ ความยาวเกต (L_g) ที่ค่าปริมาณโดส ATP_Dose

3.3 กระบวนการสร้างเอ็นมอสเฟท

กระบวนการสร้างจะเน้นที่เอ็นมอสเฟทนี้ จะดำเนินการที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) โดยการสร้างเอ็นมอสเฟทลงบนฐานรองเริ่มต้นผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดพี ระบาย (100) สภาพความต้านทาน 20-35 $\Omega\text{-cm}$ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเวเฟอร์ขนาด 6 นิ้ว เริ่มแรกจากการสร้างบ่อแยกชนิดพี (P-Well) ด้วยการยิงฝังประจุโบรอน ที่พลังงาน 140 keV ซึ่งในการจำลองได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณโดสที่ สำหรับการยิงฝังประจุสำหรับการศึกษาการป้องกัน พันซ์ทรู (APT) จะใช้โบรอนปริมาณโดสที่ ด้วยพลังงาน 90 keV และการยิงฝังประจุสำหรับการปรับ แรงดันขีดเริ่ม (VTA) จะใช้โบรอน ซึ่งในการจำลองได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ ด้วยพลังงาน คงที่ 70 keV มีลำดับการสร้างซีมอสเทคโนโลยี 0.5 μm โดยจะเน้นไปที่ nMOS 0.5 μm และการจำลอง กระบวนการสร้าง[4] ตามรูปที่ 3.6

nMOS0.5 μm Process name

1 Starting Wafer P type 20-30 $\Omega\text{-cm}$

2 Cleaning

P-Tub formation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3	Init oxide 25 nm	900 C 90 min dryo2
4	Implantation	Boron, 140 keV , 7 Boron, 90 keV ,7
5	Cleaning	
6	Drive in	1050 C 30 min N2
7	Etch all oxide	
8	Inspection(No oxide on Wafer)	
9	Cleaning	
	Active formation	
10	Pad oxide/Poly	900 C 40 min dryo2/50
11	Nitride dep	150 nm
12	Photostep Active	
13	Resist coating	
14	Exposure	
15	Develop	
16	Inspection	
17	Nitride etch/Poly etch	
18	Cleaning	
19	Resist strip	
20	Inspection	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21	Cleaning		
	Field isolation		
22	Implantation	Boron	30 keV
23	Inspection		
24	Cleaning		
	LOCOS		
25	Field oxide	600 nm	1000 C 120 min Weto2
26	Oxide on Nitride/Nitride etch/Poly etch		
27	Pad oxide etch		
28	Inspection		
29	Cleaning		
	Sac oxide		
30	Scarificial oxide	50 nm	1000 C 30 min O2 P=2atm
31	Etch Scarificial oxide		
32	Cleaning		
	Gate oxide		
33	Gatel oxide	10 nm	900C 25 min Dryo2
34	NMOS_VTA implant	Bf2, 70Kev	
		Bf2, 70KeV	
		Bf2	70KeV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Poly Gate

35	Poly dep	350 nm
36	Oxide dep	20 nm
37	Implantation	Phos 40KeV 7
38	Poly anneal	850 C 30 min N2
39	Etch Oxide	20 nm
40	Photostep POLY	
41	Resist coating	
42	Exposure	
43	Develop	
44	Inspection	
45	Poly etch	
46	Inspection	
47	Resist strip	
48	Inspection	
49	Cleaning	

LDD

50	LDD I/I oxide	850 C 30 min O2
51	Implantation	Phos 30 KeV 0
52	Cleaning	

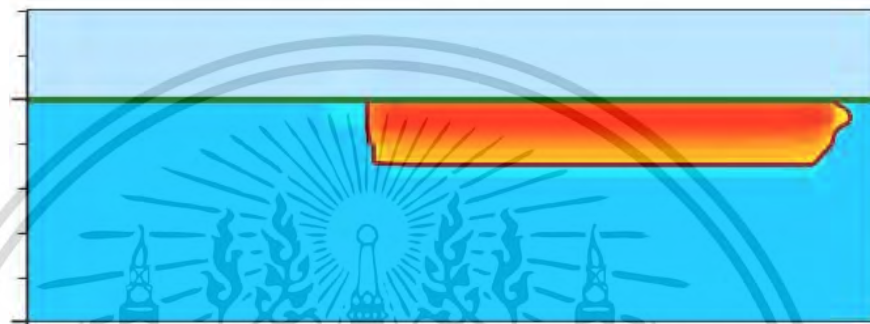
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

53	Implantation	Bf2 70 KeV, 0
54	Cleaning	
	Spacer	
55	Oxide dep	200 nm
56	Oxide densification	850 C 30 min N2
57	Spacer etch	
58	Inspection	
59	Cleaning	
	S/D formation	
60	I/I oxide on S/D	900 C 30 min Dryo2
61	Implantation	AS. 100KeV 7
62	Cleaning	
63	Coat front	
64	Backside etch	
65	Resist strip at front	
66	Cleaning	
67	Anneal	1100 C 10 sec N2

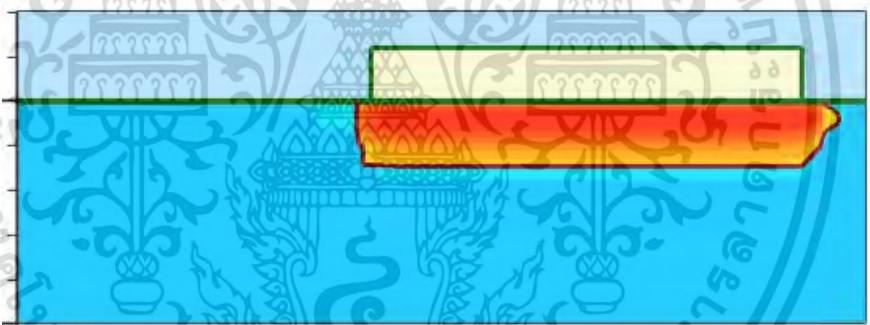
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



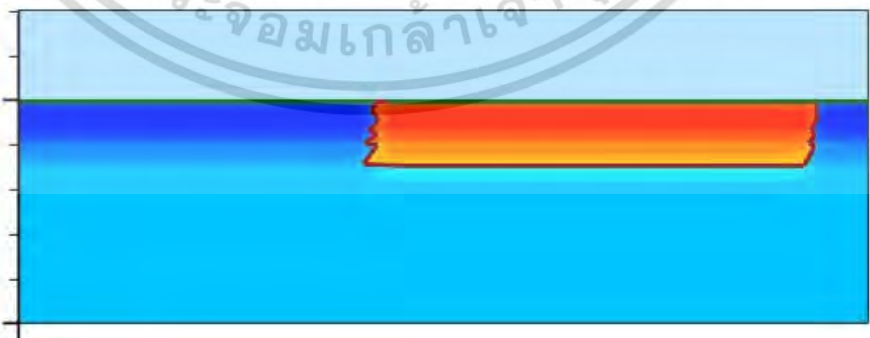
(ก) แผ่นฐานรองซีลคอนกรีตความต้านทาน 20-35 โห้ม-ซม. หนา 100



(ข) สร้างบ่อแยกชนิดเอ็น(N_well) พร้อมขัปลีก

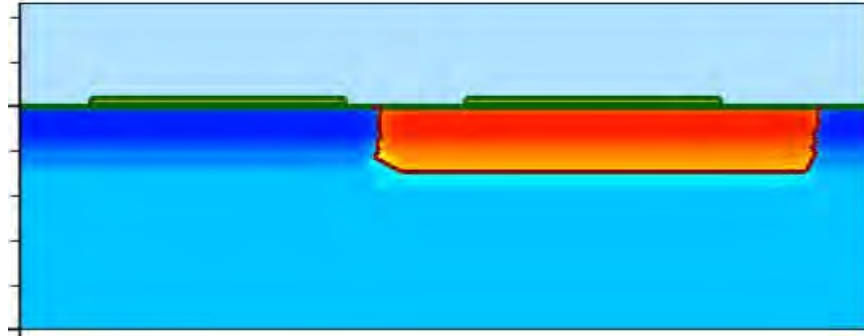


(ค) เปิดหน้ากากเพื่อสร้างบ่อแยกชนิดพี

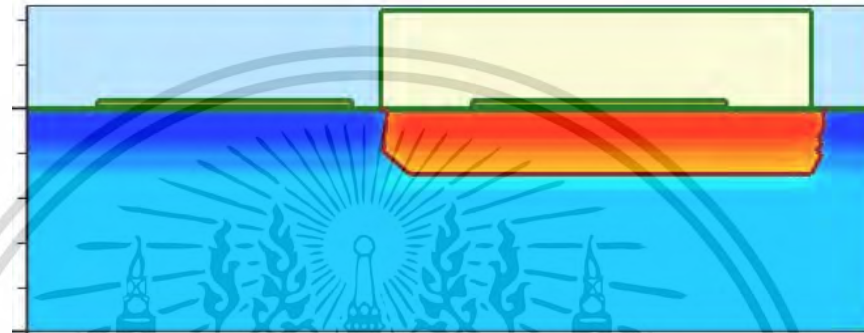


(ง) ยิงฝังประจุโบรอนสร้างบ่อแยกชนิดพี พร้อมขัปลีก

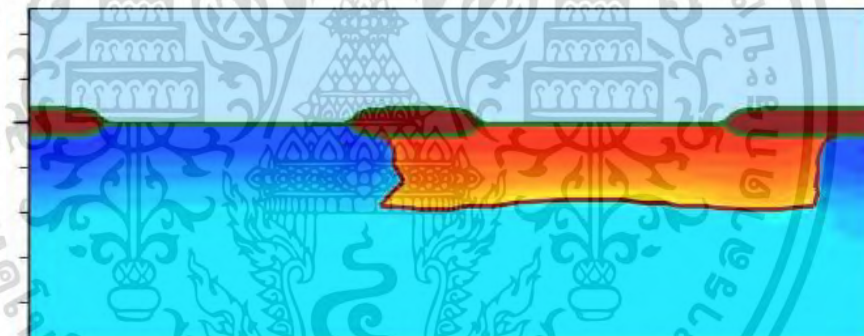
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



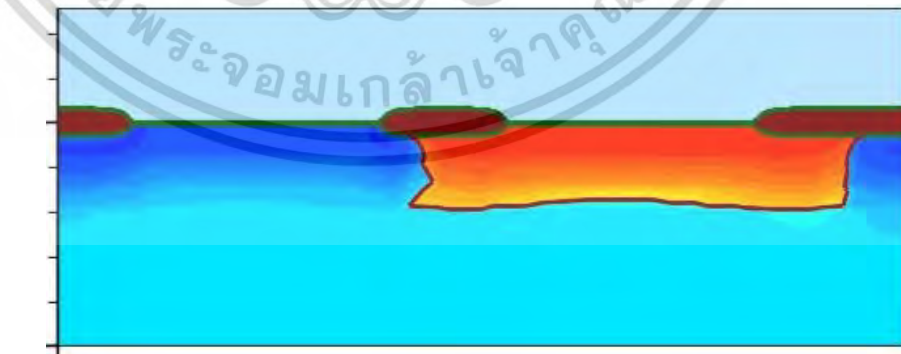
(จ) สร้างชั้นไนโตรด และออกไซด์ เปิดหน้ากาก แอคทีฟ กัดชั้นไนโตรด ลอกน้ำยาไวแสงออก



(ฉ) เปิดหน้ากาก NFIMP ยิงฝั้งประจุโบรอน

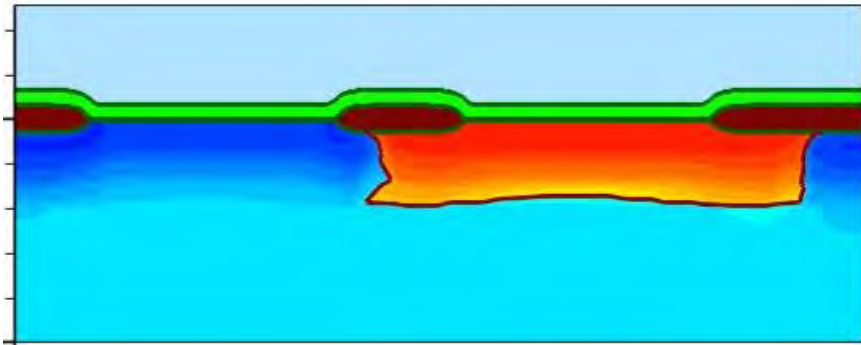


(ช) สร้างชั้นออกไซด์หนา 600 นาเมตร เป็นส่วนแยกทางไฟฟ้าแบบ LOCOS

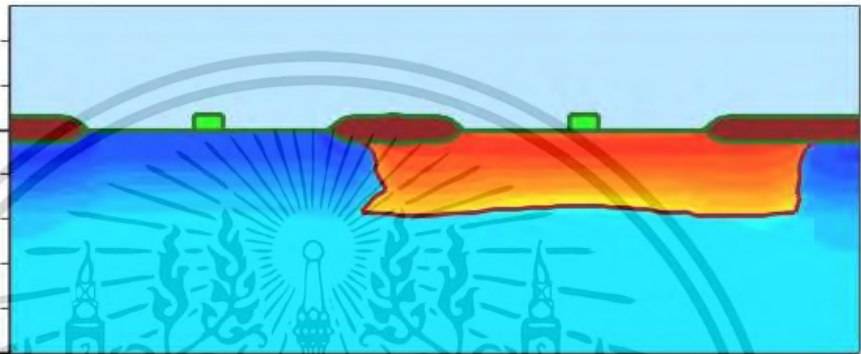


(ซ) สร้าง เกทออกไซด์ พร้อมทั้งยิงฝั้งประจุเพื่อปรับค่าแรงดันขีดเริ่มทั้งเอ็นมอสและพีมอส

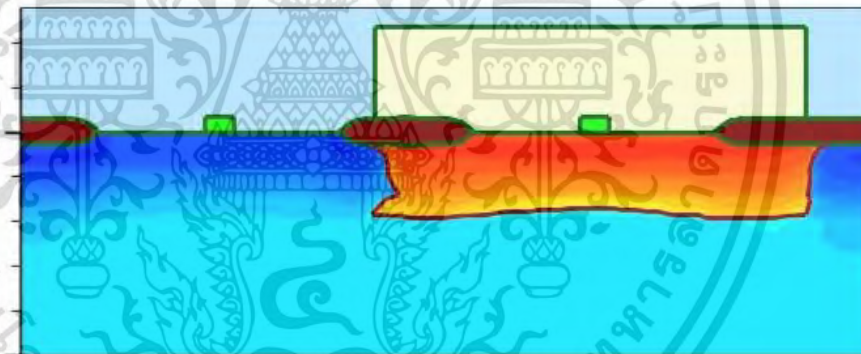
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



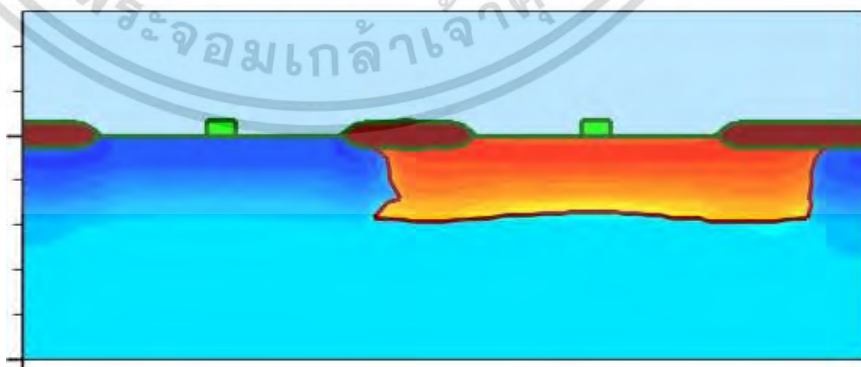
(ฉ) สร้างชั้นโพลีซัลคอน และยิงฝังประจุกด้วยสารเจืออย่างเข้มข้นในชั้นโพลีซัลคอน



(ญ) เปิด หน้ากากชั้นโพลีซัลคอน กัดชั้นโพลีซัลคอนให้เหลือเฉพาะพื้นที่ส่วนเกท

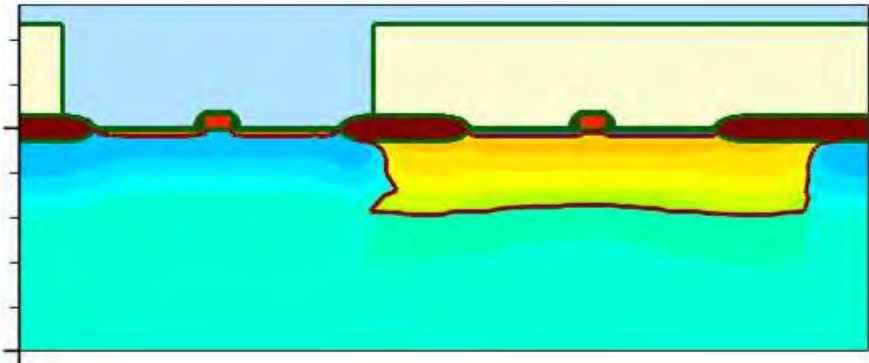


(ฎ) เปิดหน้ากาก NFIMP ยิงฝังประจุกในส่วน LDD ของเอ็นมอส

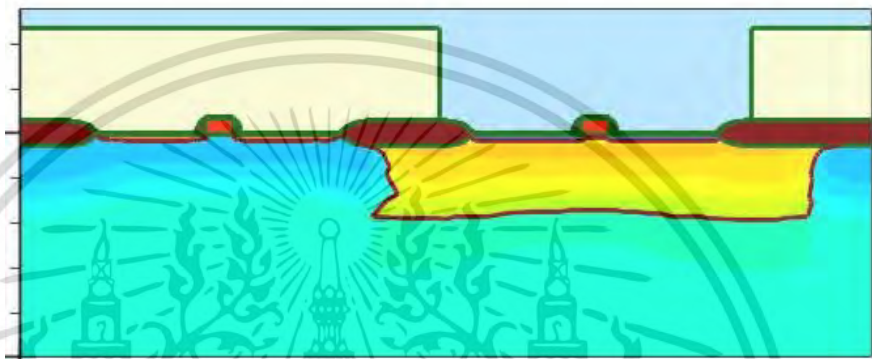


(ฏ) ยิงฝังประจุกในส่วน LDD ของพีมอส

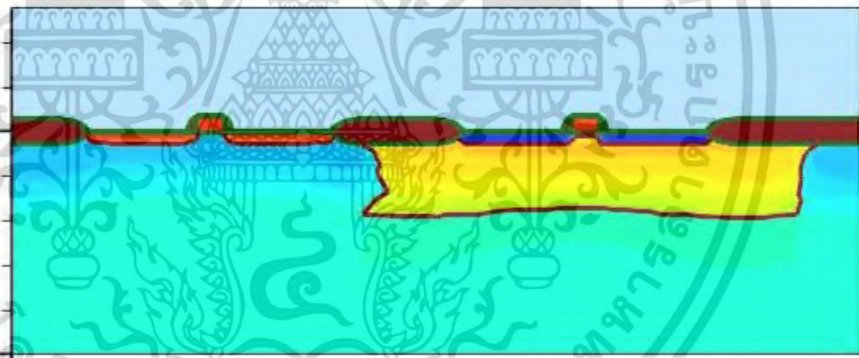
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



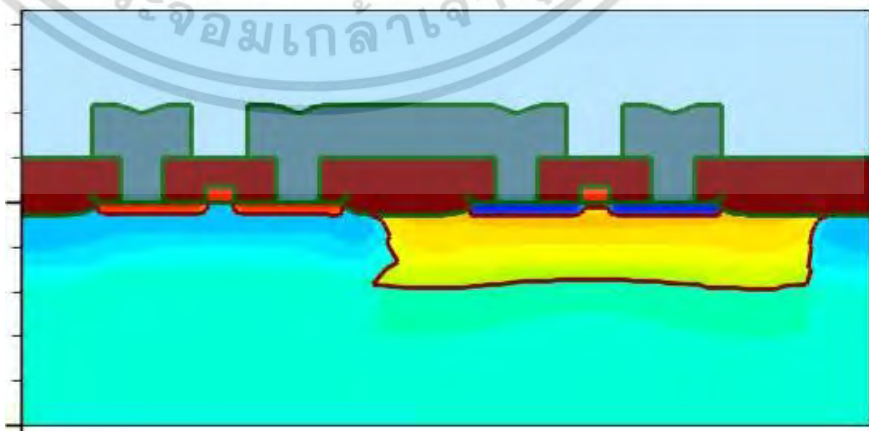
(จ) เปิดหน้ากาก NSD ยิงฝังประจุในส่วนซอร์ส(Source) และ เดรน(Drain)ของเอ็นมอส



(ฉ) เปิดหน้ากาก PSD ยิงฝังประจุในส่วนซอร์ส(Source) และ เดรน(Drain)ของพีมอส

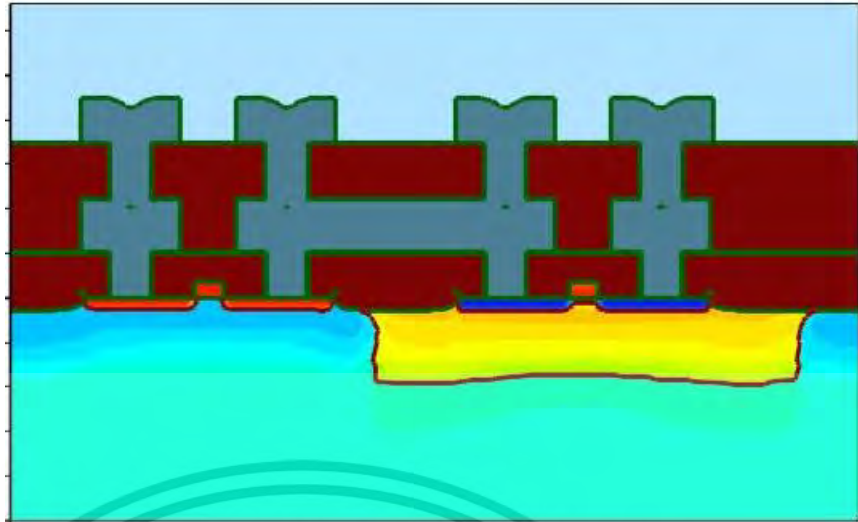


(ณ) Annealing ขั้วซอร์ส(Source) และ ขั้วเดรน(Drain)

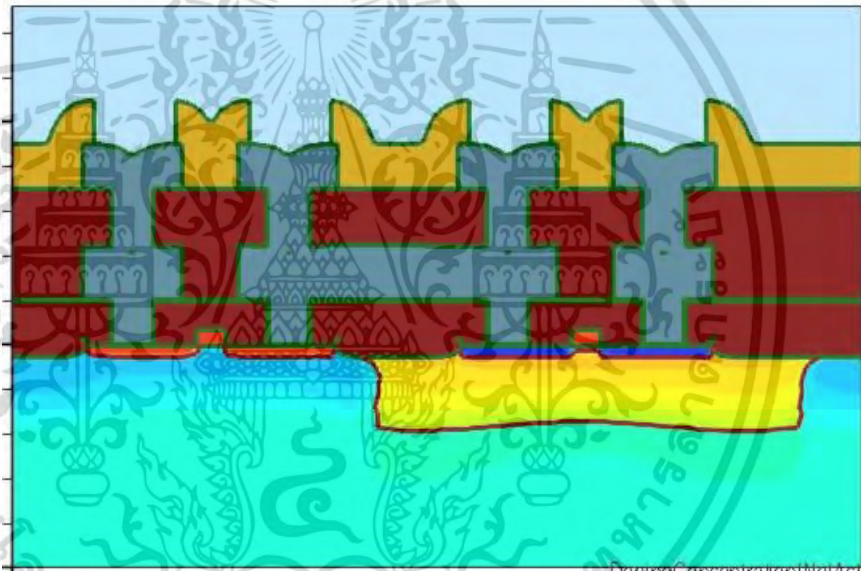


(ด) สร้างออกไซด์ ILD ป้องกันไม่ให้สวดลายโลหะลัดวงจรกับส่วนโพลีซิลิคอน และเปิดช่องสัมผัสและ

เปิดหน้ากาก กัดลวดลาย โลหะชั้นที่1 (Metal1) สุดท้ายลอกน้ำยาไวแสงออก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ณ) สร้างออกไซด์ IMD ป้องกันไม่ให้ลวดลายโลหะชั้นที่1กับส่วนลวดลาย โลหะชั้นที่2 และเปิดช่องสัมผัสและเปิดหน้ากาก กัดลวดลาย โลหะชั้นที่2 (Metal2) สูดท้ายลอกน้ำยาไวแสงออก



(ด) สร้างชั้นไนไตรด์ เปิดหน้ากาก PAD กัดลวดลาย PAD เพื่อเป็นส่วนเชื่อมต่อภายในส่วนซอร์ส (S) ส่วนเดรน(D) เกทโพลีซิลิคอน(G) และ ในส่วนของซับสเตทท์

รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างชิปด้วยเทคโนโลยี 0.5 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T)

การทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) ที่เอ็นมอสเฟทขนาดใหญ่เนื่องจากต้องการตัดหรือลดผลของการปรากฏการณ์ช่องทางเดินกระแสสั้น (Short Channal Effect) ใช้ความยาว L 20 μm และช่องทางเดินกระแสแคบ (Narrow Channal Effect) ใช้ความกว้าง W 20 μm ได้ผลดังตารางที่ 4.1 พบว่า

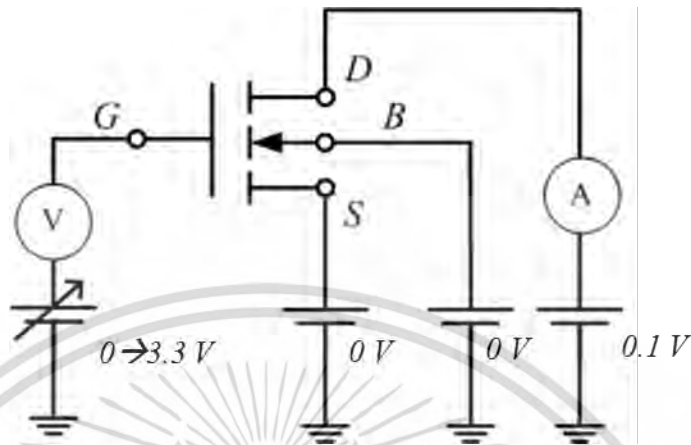
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันขีดเริ่ม เอ็นมอสเฟสตัวในทุกแผ่นโดยใช้เงื่อนไขที่ $W/L = 20/20 \mu\text{m}$

แผ่นทดสอบ	P-WELL IMPLANT ที่พลังงานคงที่ 140 keV	VTA IMPLANT ที่พลังงานคงที่ 70 keV	ค่าแรงดัน ขีดเริ่ม
D01		No implant	0.266
D02	$6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	$1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.729
D03		$1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.75
D04		$2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.753
D05		No implant	0.31
D06	$8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	$1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.731
D07		$1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.753
D08		$2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.761
D09		No implant	0.322
D10	$1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.735
D11		$1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.758
D12		$2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	0.776

สำหรับการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเอ็นมอสเฟท ใช้ชุดเครื่องมือวัดที่ประกอบด้วยเครื่อง Probe Station Cascade M 150, HP B1500A Precision Semiconductor Parameter Analyzer เป็นชุดเครื่องมือวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมอสเฟท โดยการควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์

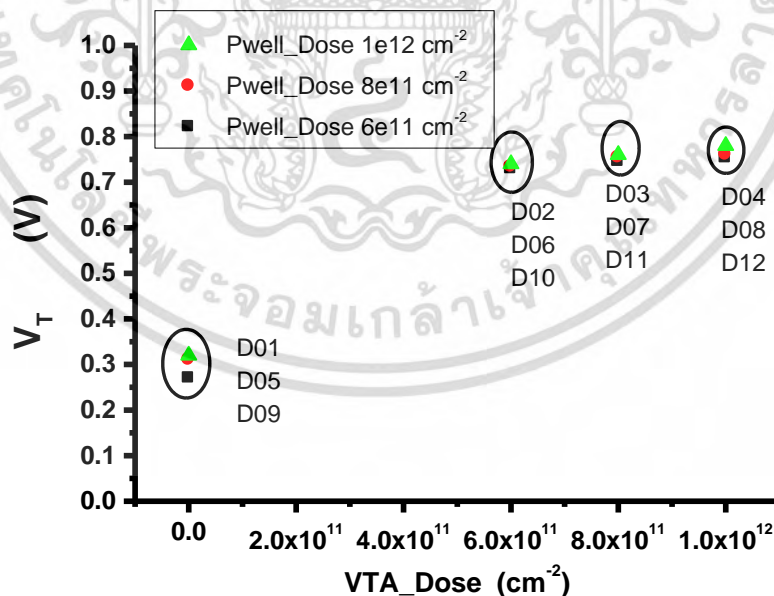
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟท ในย่านทำงานเชิงเส้น (Linear Region) ให้แรงดันคงที่ ที่ขั้วเดรน (V_{DS}) 0.1 V ให้แรงดันขั้วเกตโดยการปรับเปลี่ยนค่าตั้งแต่ 0 ถึง 3.3 V ($V_{GS} = 0 \rightarrow 3.3$ V, 1 V/Step) และขั้วซอสและฐานรองต่อกับกราวด์



รูปที่ 4.1 วงจรการวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) เอ็นมอสเฟท และกระแสเดรน (I_{DS})

ในการวัดหาค่าแรงดันขีดเริ่มที่ปริมาณโดสต่างๆ (P-Well และ VTA) ที่เอ็นมอสขนาดความกว้างยาวเกต $W/L = 20/20$ μm แสดงดัง รูปที่ 4.2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับปริมาณโดสยึงฝังประจุสำหรับปรับแรงดันขีดเริ่ม (VTA) และปริมาณโดสการยึงฝังประจุบ่อแยกชนิดพี (P-Well) ที่ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับปริมาณโดสยึงฝังประจุ VTA ที่อัตราส่วนของ $W/L = 20/20$ μm

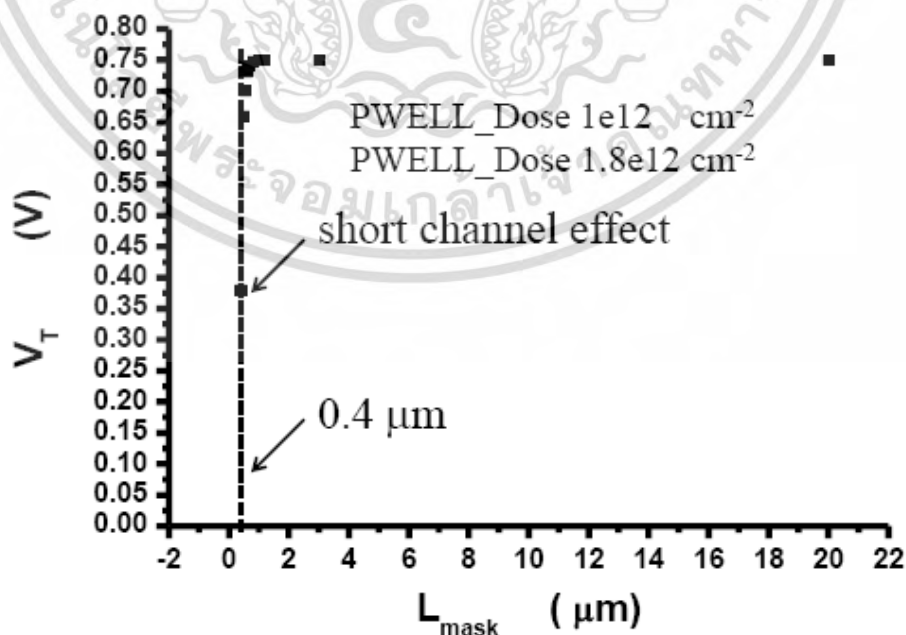
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 แบ่งออกได้ 2 กรณี ในกรณีแรก ไม่มีการยิงฝังประจุสำหรับการปรับค่าแรงดันขีดเริ่ม (VTA) เป็นการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มกับการปรับเปลี่ยนปริมาณโดสของบ่อแยกชนิดพี (P-Well) ที่แผ่น D01, D05, D09 พบว่าการเพิ่มปริมาณโดสของบ่อแยกชนิดพี (P-Well) ทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องมาจากมีความหนาแน่นของพาหะโฮล (hole) เพิ่มขึ้น

ในกรณีที่สอง มีการยิงฝังประจุเพื่อปรับค่าแรงดันขีดเริ่ม (VTA) การวัดค่าของแรงดันขีดเริ่มที่มีการปรับเปลี่ยนค่าปริมาณโดส VTA แผ่นที่ D02, D06, D10, D03, D07, D11, D04, D08 และ D12 มีค่าปริมาณโดส VTA มากขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าของ VTA ทำให้ความหนาแน่นของพาหะโฮล (hole) ในช่องทางเดินมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตเพิ่มขึ้นในการทำให้เกิดเป็นชั้นกลับ (inversion layer)

จากทั้ง 2 กรณี ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณโดสของ P-Well และ ปริมาณโดสของ VTA พบว่าปริมาณโดสของการยิงฝังประจุมีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณโดส P-Well มีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับปริมาณโดสของ VTA

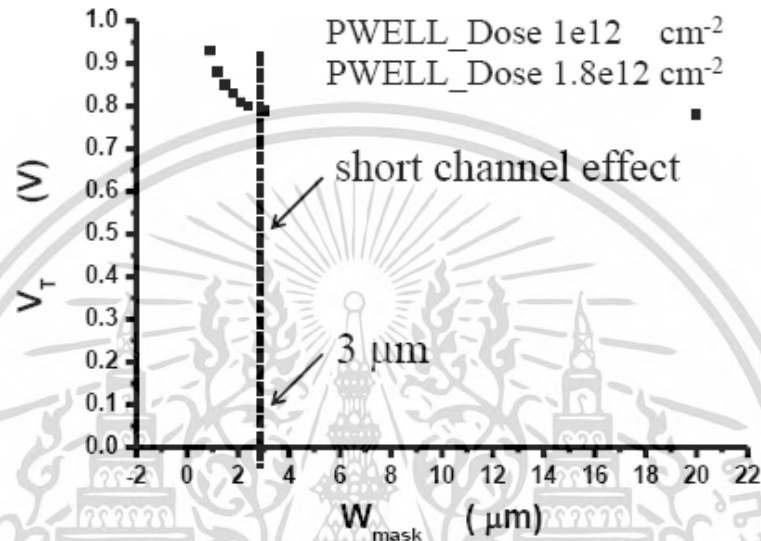
จากการศึกษาผลการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มกับปริมาณโดส ได้เลือกแผ่น D10 ที่ปริมาณโดส P-Well $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และ ปริมาณโดส VTA $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ มาเป็นกรณีศึกษาหาค่าของแบบจำลองพารามิเตอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความยาวเกต (L_{mark}) ดังรูปที่ 4.3 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่มประมาณ 0.75 V ที่อัตราส่วนของ $W/L = 20/20$ และที่ขนาดความยาวเกตน้อยกว่าหรือเท่า $0.4 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นค่าความยาววิกฤตที่ทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลกรากเกิดปรากฏการณ์แชนแนลสั้น (short channel effect)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับความยาวเกต (L_{mark})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

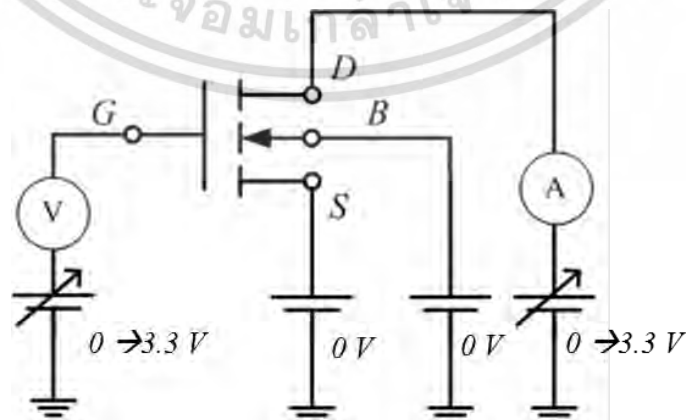
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความกว้างช่องทางเดินกระแสของแผ่นที่ทำการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความกว้าง (W_{mask}) ของช่องทางเดินกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $3 \mu\text{m}$ กล่าวได้ว่าในกระบวนการสร้างของเอ็นมอสเฟท $0.5 \mu\text{m}$ เกิดปรากฏการณ์ของแชนแนลแคบ (narrow channel) ที่ความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีน้อยกว่าหรือเท่ากับ $3 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับความกว้างของเกต (W_{mask})

4.2 การวัดทดสอบคุณลักษณะความสัมพันธ์ทางไฟฟ้า

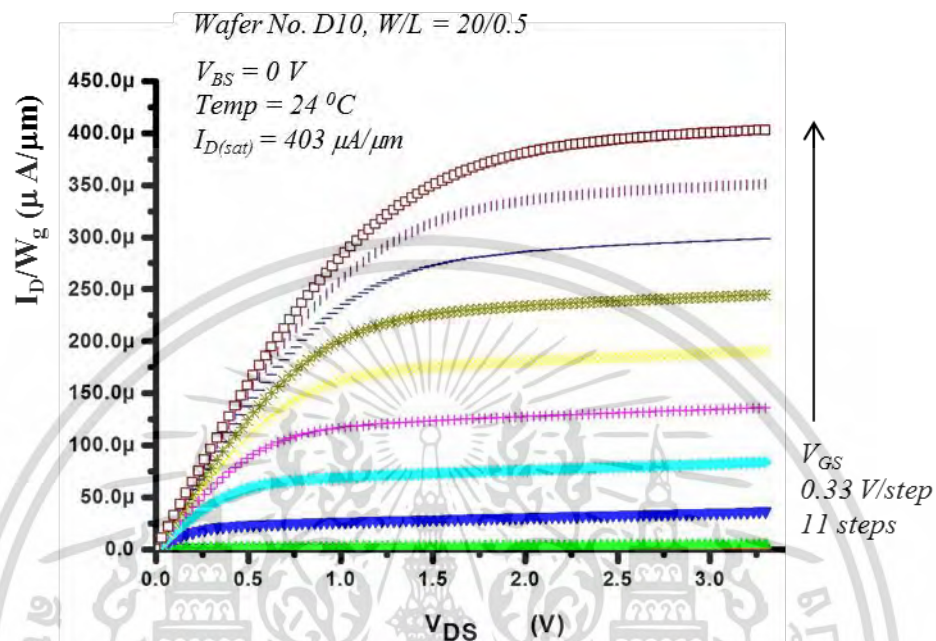
ในส่วนของการวัดทดสอบคุณลักษณะความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าของเอ็นมอสเฟท ระหว่างกระแสเดรน (I_D) กับแรงดันเดรน (V_{DS}) โดยการให้แรงดันที่ขั้วเดรนตั้งแต่ 0 ถึง 3.3 V, ($V_{DS} = 0 \rightarrow 3.3 \text{ V}$, 0.33 V/step) และให้แรงดันที่ขั้วเกตตั้งแต่ 0 ถึง 3.3 V ($V_{GS} = 0 \rightarrow 3.3 \text{ V}$, 0.33 V/step) และขั้วซอสและฐานรองต่อกับกราวด์ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรวัดความสัมพันธ์เอ็นมอสเฟท แรงดันเดรน (V_{DS}) กับ กระแสเดรน (I_{DS})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสกับแรงดัน ดังรูปที่ 4.6 พบว่าได้ ค่าอัตราส่วนของ กระแสเดรนต่อความยาวเกต อิมิต์สูงสุด ที่ $V_{GS} = V_{DS} = 3.3$ V ประมาณ $403 \mu A/\mu m$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเดรน (V_{DS}) ของเอ็นมอสเฟตที่ค่าแรงดันที่ขั้วเกตค่าต่าง

4.3 การหาแบบจำลองจอร์จพารามิเตอร์ของเอ็นมอสเฟต

สำหรับขั้นตอนการหาแบบจำลองพารามิเตอร์ของเอ็นมอสเฟต(nMOS) ระดับ 3 ด้วยคำนวณจากผลการทดลองจากหัวข้อได้ผ่านมาได้กำหนดพารามิเตอร์จำนวน 15 ตัวคือ DELTA, ETA, KAPPA, LD, NFS, NSUB, RD, RS, THETA, TOX, TPG, UO, VMAX, VTO, WD และ XJ[5] ดังตารางที่ 4.2 โดยพารามิเตอร์มอสเฟต ระดับ 3 หรือ The Level 3 MOSFET Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี นำมาผสมผสานกัน ที่เรียกว่า “การทดลองกึ่งทฤษฎี หรือ Semi-Empirical” โดยมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ดังต่อไปนี้ คือ แรงดันขีดเริ่ม, ขนาดความกว้างและความยาว(W/L)ของแชนแนล, ผลของกระแสเนื่องจากความเร็วอิมิต์ของประจุพาหะในแชนแนล หรือ ช่องทางเดินกระแส ที่ขนาดความยาวน้อยกว่า $1 \mu m$

4.3.1 วัสดุที่ใช้ทำเกต หรือ Type of Gate Material : TPG

จะใช้โพลีซิลิคอนเป็นขั้วเกต(Gate) [6]ทั้ง เอ็นมอส และ พีมอส กรณีที่เกตใช้วัสดุโพลี

ซิลิคอนเป็นชนิดเดียวกันกับชนิดของ ซอส(Source)และเดรน(Drain) จะกำหนดให้ $TPG = 1$ ถ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนเป็นพินอสเฟท ขั้วเกตเป็นชนิดโพลีซิลิคอนชนิดเอ็นและขั้วซอสและเดรน กำหนดให้ $TPG = -1$ ส่วนกรณีขั้วเกตเป็นโลหะอลูมิเนียมจะกำหนดให้ $TPG = 0$

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์แบบจำลองของเอ็นมอสเฟท

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย	ความหมาย
TPG	-	-	ชนิดวัสดุของเกต
TOX	t_{GOX}	m	ความหนาเกตออกไซด์
LD	-	m	ความยาวของช่องทางเดินกระแสที่ลดลงจากค่าที่ออกแบบ
WD	-	m	ความกว้างของช่องทางเดินกระแสที่ลดลงจากค่าที่ออกแบบ
UO	μ_0	$cm^2/V \cdot s$	สภาพคล่องของพาหะในย่านเชิงเส้นที่มอสเฟทขนาดใหญ่
VTO	$V_{T(Big\ MOS)}$	V	แรงดันขีดเริ่มในย่านเชิงเส้นที่มอสเฟทขนาดใหญ่
THETA	θ, ξ	V^{-1}	ผลของการลดลงของสภาพคล่องของพาหะ
RS	R_S	Ohm (Ω)	ความต้านทานของซอส
RD	R_D	Ohm (Ω)	ความต้านทานของเดรน
DELTA	δ	-	ผลความกว้างของแชนแนลที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม
NSUB	N_{sub}	cm^{-3}	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของฐานรอง
XJ	X_j	m	ความลึกรอยต่อของซอส/เดรน
NFS	-	cm^2	ปริมาณสารเจือที่ผิวของฐานรอง
VMAX	v_{sat}	m/s	ความเร็วดริฟท์สูงสุดของพาหะ
KAPPA	κ	V^{-1}	ผลของแชนแนลขนาดสั้นที่มีผลต่อกระแสเดรน
ETA	η	-	ค่าสัมประสิทธิ์จากผลของDIBL
KAPPA	κ	V^{-1}	ผลของแชนแนลขนาดสั้นที่มีผลต่อกระแสเดรน
ETA	η	-	ค่าสัมประสิทธิ์จากผลของDIBL

4.3.2 ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟทขนาดใหญ่ในย่านเชิงเส้น(VTO) และปริมาณความหนาแน่น

อะตอมสารเจือของฐานรองซิลิคอน(NSUB)

ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน(I_{DS})และแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) ในกรณีที่มอสเฟทมีขนาดใหญ่

คือ $W/L = 20/20 \mu m/\mu m$ จะใช้หาค่า ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟทขนาดใหญ่(VTO) และ

ปริมาณความหนาแน่นอะตอมสารเจือ(NSUB) ที่มีผลของแรงดันไบอัสฐานรอง(V_{BS})ในย่านเชิงเส้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(linear line) โดยใช้ความสัมพันธ์ของ $\sqrt{\phi_s - V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) [5-7] ที่ ค่าแรงดันไบอัสฐานรอง (V_{BS}) ที่เปลี่ยนไปตามสมการ (4.1)

$$V_T = V_{FB} + \phi_s + \gamma\sqrt{\phi_s - V_{BS}} \quad (4.1)$$

ในขณะที่ ในย่านเชิงเส้น ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟทขนาดใหญ่ V_{TO}

$$V_{TO} = V_{T(Big\ MOS)} = V_{FB} + \phi_s + \gamma\sqrt{\phi_s} \quad (4.2)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการ (4.1) และ(4.2)

$$V_T = V_{TO} + \gamma(\sqrt{\phi_s - V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}) \quad (4.3)$$

โดยที่ γ

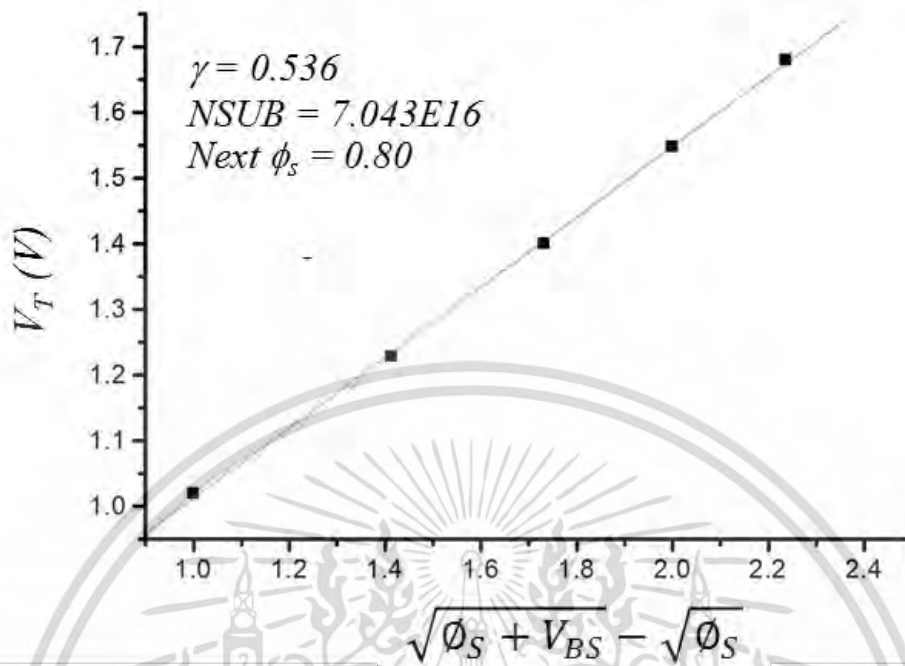
$$\gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_{si}qNSUB}}{C_{ox}} \quad (4.4)$$

จะได้ค่า $NSUB$

$$NSUB = \frac{(\gamma C_{ox})^2}{2\varepsilon_{si}q} \quad (4.5)$$

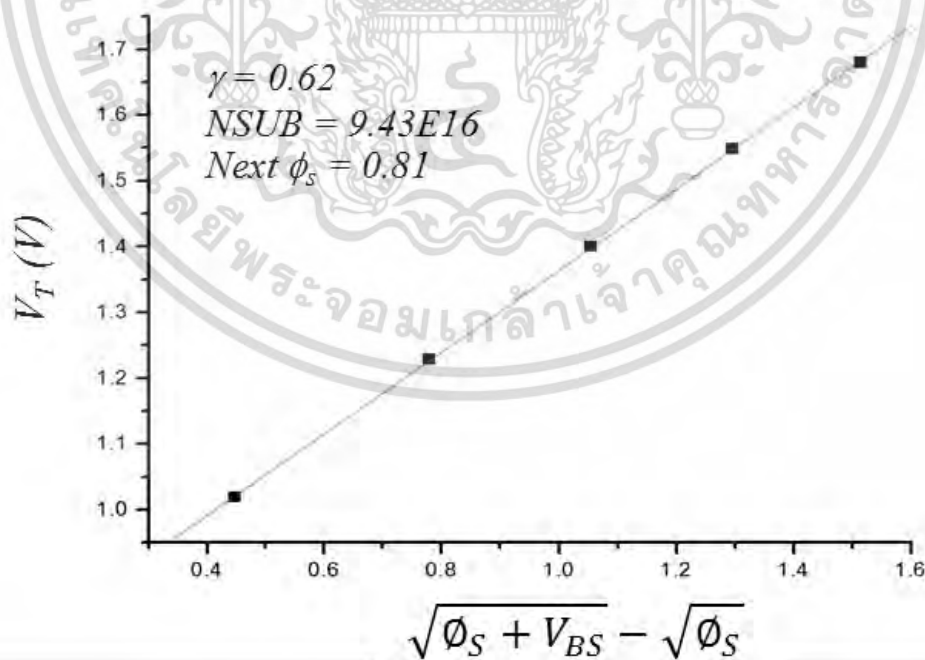
ในการหาค่า $NSUB$ โดยสมการที่ (4.4) ได้ความชัน γ ดังสมการที่ (4.5) [43][8] และ ณ จุดตัดแกน $Y = V_{TO}$ โดยกำหนดให้ $\phi_s = 0.00$ ในตอนเริ่มต้น และต่อมาได้ค่า ϕ_s ใหม่จาก รูปที่ 4.6 แล้วแทนค่า ϕ_s เพื่อให้ค่า ϕ_s มีค่าแตกต่างกันน้อยที่สุด ต่อจากนั้นนำ ϕ_s ไปคำนวณหา $NSUB$ และ V_{TO} เอ็นมอสเฟท ตามขั้นตอนดังรูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.9

nMOS Iteration # 1 , $\phi_s = 0.00$



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s + V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/20$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.00$

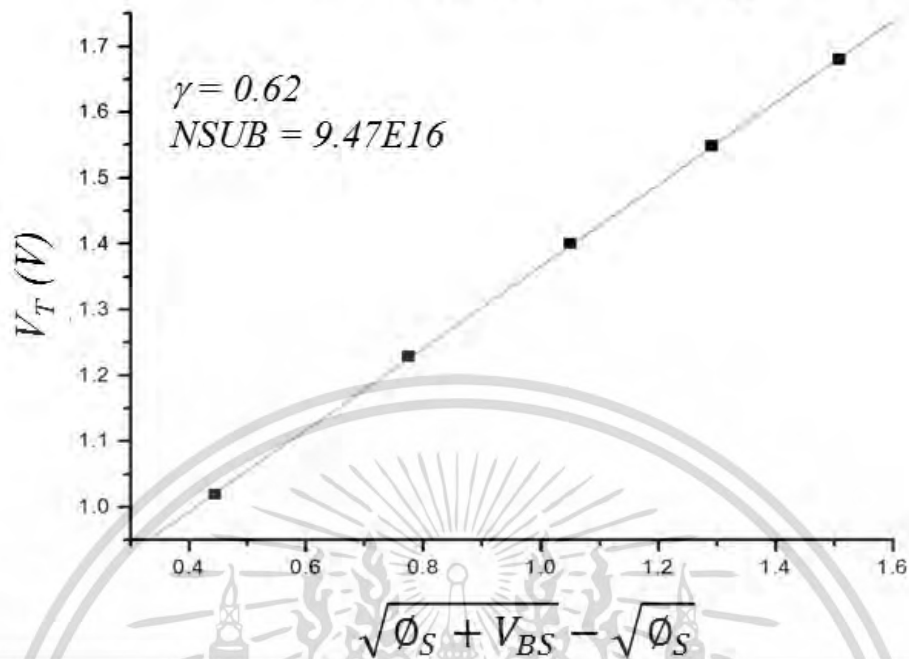
nMOS Iteration # 2 , $\phi_s = 0.80$



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s + V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/20$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.80$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nMOS Iteration # 3 , $\phi_s = 0.81$

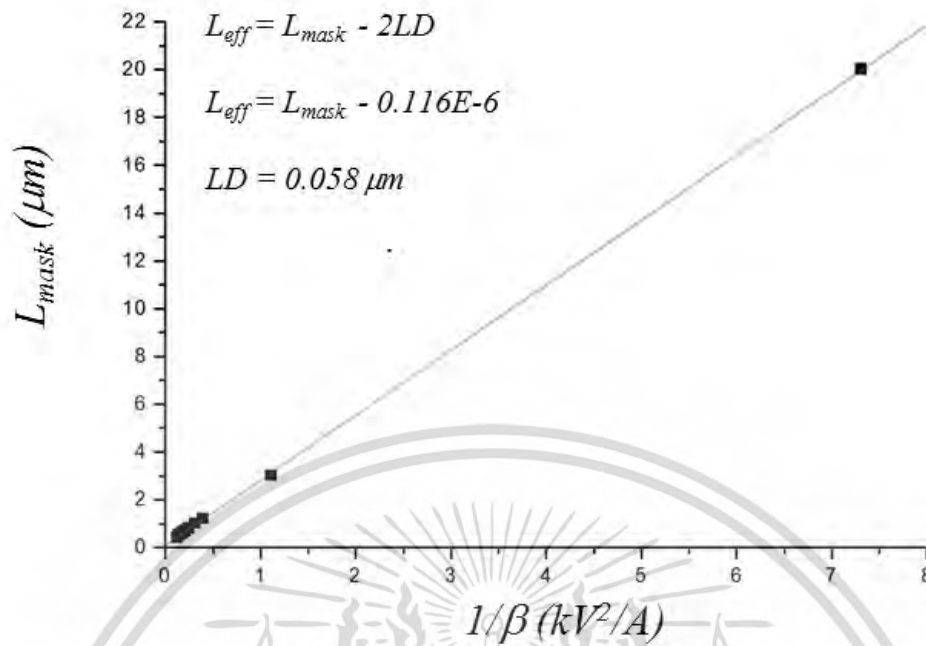


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s + V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/20$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.81$

การแทนค่า ϕ_s เป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยที่เอ็นมอสเฟท จะได้ค่าของพารามิเตอร์ก่อน และหลังมีค่าต่างกันน้อยมาก จึงหยุดการแทนค่า ตามรูปที่ 4.7 และ 4.9 ได้ค่า γ จากความชัน และค่าที่จุดตัดแกน Y สำหรับเอ็นมอสเฟทได้ $NSUB = 9.47 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และ $V_{TO} = 0.72 \text{ V}$

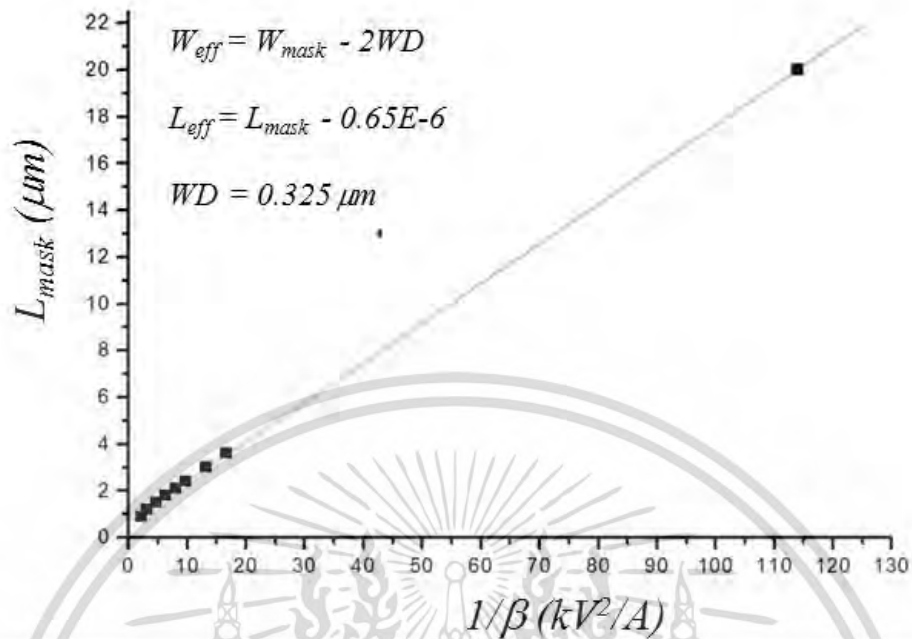
4.3.3 ความยาวของแซนแนลที่ลดลง (LD) และ ความกว้างของแซนแนลที่ลดลง(WD)[7]

ความยาวของแซนแนลที่ลดลง (Lateral Diffusion Length : LD) อันเนื่องมาจากการแพร่ของสารเจือ มีผลให้ความยาวเกตลดลง ซึ่งเรียกว่า ความยาวเกตที่ปรากฏ หรือ Effective Length : L_{eff} โดยหาได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง ความยาวของเกตที่ออกแบบ (L_{mask}) กับ $\frac{1}{\beta}$ ที่ขนาดความยาวเกตค่าต่างๆ ที่จุดตัดของแกน Y นั้น จะได้ค่า $LD = 0.058 \mu\text{m}$ ตามรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\beta$ กับ L_{mask} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความยาวของเกตเอ็นมอสเฟต ได้ $LD = 0.058 \mu m$

ความกว้างของแซนแนลที่ลดลง(Lateral Diffusion Width, WD) อันเนื่องมาจากผลของ LOCOS และการแพร่ของสารเจือ มีผลให้ความกว้างเกตลดลง ซึ่งเรียกว่า ความกว้างเกตที่ปรากฏ หรือ Effective Width, W_{eff} โดยหาได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง ความยาวของเกตที่ออกแบบ (W_{mask}) กับ β ที่ขนาดความกว้างเกตที่เปลี่ยนแปลง ณ ที่จุดตัดของแกน Y นั้น จะได้ค่า $WD = 0.325 \mu m$ ตามรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ W_{mask} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความกว้างของเกตเอ็นมอสเฟต ได้ $WD = 0.325 \mu m$ ต่อข้าง

4.3.4 การหาค่า UO , $THETA$, RD และ RS

สภาพคล่องตัวของพาหะ(UO) หรือ โมบิลิตี้ ของพาหะ หากจากมอสเฟตขนาดใหญ่ ในย่านเชิงเส้น ที่ขนาดความกว้างและยาวของเกต($W/L = 20/20$) นั้นหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน(I_D) และแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) ที่ย่านเชิงเส้น โดยใช้สมการที่ (4.6)

$$Slope = \beta V_{DS} = \beta_0 \frac{W}{L} V_{DS} = \mu_0 C_{OX} \frac{W}{L} V_{DS}$$

$$Slope = \beta V_{DS} = UO C_{OX} \frac{W}{L} V_{DS} \quad (4.6)$$

$$UO = \frac{Slope L}{C_{OX} V_{DS} W}$$

ดังนั้นสภาพคล่องตัวของพาหะ(UO)ของเอ็นมอสเฟตจะได้

$$UO = \frac{1.38 \times 10^{-5}}{2.87 \times 10^{-7} \times 0.1} \times \frac{20}{20} = 480.83 \text{ cm}^2/Vs \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 ผลของการลดลงสภาพคล่องตัวของพาหะ หรือ Mobility Degradation, THETA

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน(I_D)กับแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) พบว่ากระแสเดรน(I_D) มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่แรงดันขั้วเกตเพิ่มขึ้น อันเป็นผลเนื่องจากการลดประสิทธิภาพของสภาพคล่องตัว (Mobility Degradation, *THETA*) ดังสมการที่ (4.8) [5] ที่ได้รับผลของสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง (Vertical Field Mobility, μ_v)

$$\mu_v = \frac{\mu_0}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} \quad (4.8)$$

เขียนใหม่ได้

$$\mu_v = \frac{UO}{1 + THETA(V_{GS} - V_T)} \quad (4.9)$$

จากสมการ (4.6) เขียนสมการ (4.9) ใหม่เป็น

$$\frac{\beta}{C_{OX}} \frac{W_{eff}}{L_{eff}} = \frac{\beta_{Slope,max} W_{eff} / C_{OX} W_{eff}}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} \quad (4.10)$$

คูณ V_{DS} ทั้งด้านซ้ายและขวาของสมการ (4.10)

$$\frac{\beta}{C_{OX}} \frac{W_{eff}}{L_{eff}} V_{DS} = \frac{V_{DS} \beta_{Slope,max} W_{eff} / C_{OX} W_{eff}}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} \quad (4.11)$$

โดยค่า Slope = βV_{DS} จะได้

$$Slope = \frac{Slope_{max}}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} \quad (4.12)$$

เขียนใหม่ได้

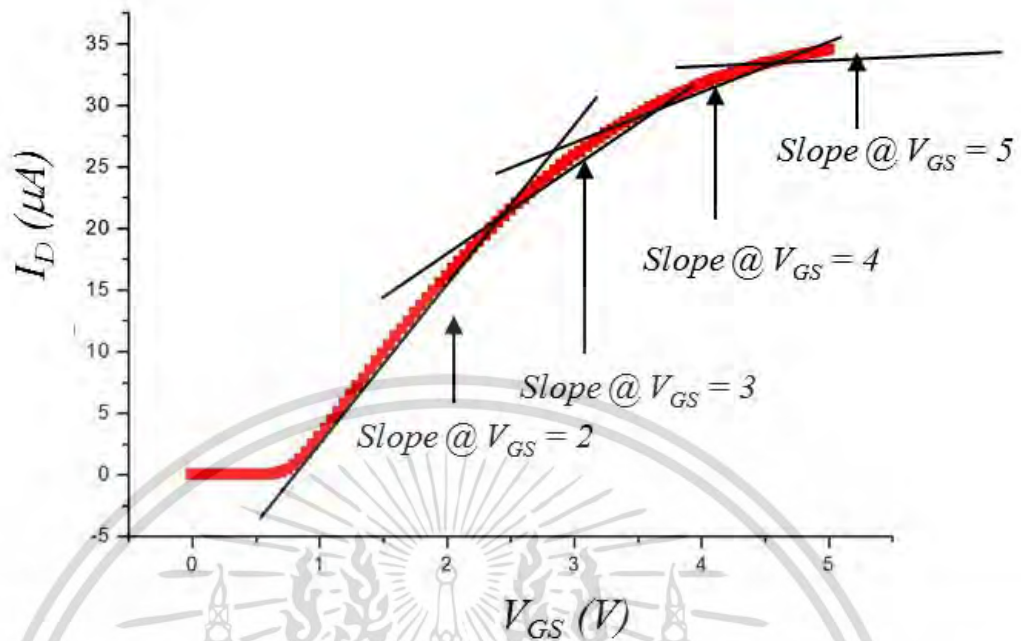
$$\frac{Slope_{max}}{Slope} = 1 + \theta(V_{GS} - V_T) \quad (4.13)$$

ค่า Slope เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง กับ แรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_{DS}) ในย่านที่เป็นเชิงเส้น ที่แรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) มีค่าสูง ตามรูปที่ 4.12 เอ็นมอสเฟท

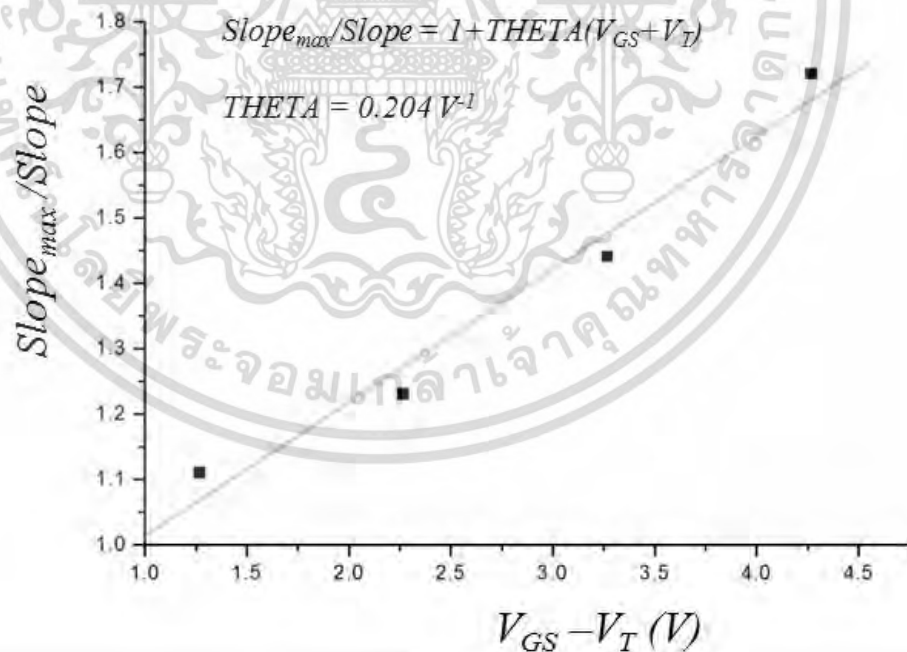
หาค่า THETA หรือ ความชัน จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{Slope_{max}}{Slope}$ กับ V_{GS} ตามรูปที่ 4.13

เอ็นมอสเฟท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_D) ที่แรงดันเดรน(V_{DS})คงที่ ได้ค่าความชันของกราฟที่แรงดันเกตเปลี่ยนไป ที่เอ็นมอสเฟตขนาดใหญ่



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{Slope_{max}}{Slope}$ กับแรงดันเกต(V_{GS})ของเอ็นมอสเฟตขนาดใหญ่ ($W/L=20/20$) ได้ค่าความชัน $THETA = 0.204 V^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 ความต้านทานของซอส(RS) และความต้านทานของเดรน (RD)

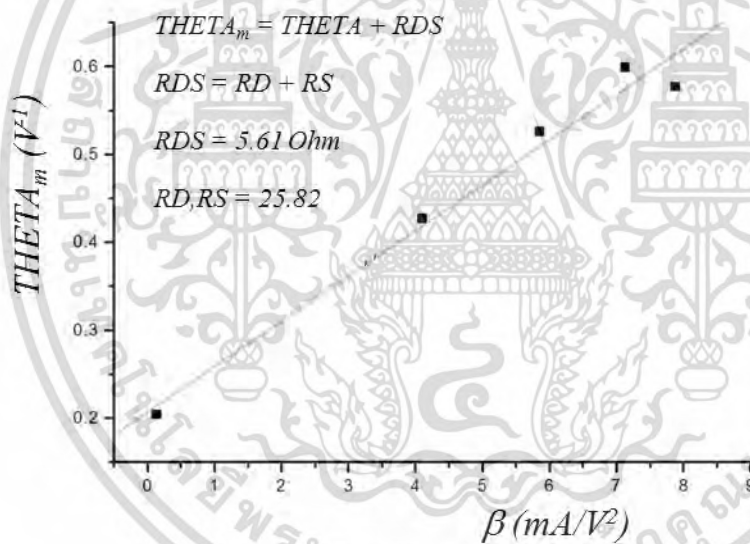
ตามปกติแล้ว ค่าความต้านทานของซอส(RS) และความต้านทานของเดรน (RD) ขึ้นกับ ปริมาณความเข้มข้นสารเจือในด้านซอส(S) และ ด้านเดรน (D)

การหาค่า ค่าความต้านทานของซอส(RS) และความต้านทานของเดรน (RD) ได้จากสมการที่ (4.14) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ $THETA_m$ ที่มีขนาดความยาวของแกนแนลค่าต่างๆ กับ ค่า β ตามรูปที่ 4.14 ค่าความชันคือ ค่าความต้านทานของซอส (RS) และความต้านทานของเดรน (RD) ณ จุดตัดแกน Y จะได้ค่า $THETA$ เฉลี่ยของมอสเฟตที่แกนแนลกระแสต่างๆ

$$THETA_m = THETA + \beta R_{DS} \quad (4.14)$$

โดยที่

$$R_{DS} = RD + RS \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ของ $THETA_m$ กับ β ของเอ็นมอสเฟตขนาดความยาวเกตค่าต่างๆ ซึ่งใช้หาค่า RD และ RS

3.4.7 ผลของความกว้างแชนแนลที่มีต่อ ค่าแรงดันขีดเริ่ม(*DELTA*) และ ค่าสัมประสิทธิ์จากผลของ DIBL (*ETA*)

สำหรับกรณีที่ มอสเฟทที่มีขนาดใหญ่($W/L=20/20$) จะไม่มีผลของความกว้างและความยาวของแชนแนลกระแสที่ลดลง และยังรวมถึงผลของ Drain-Induced Barrier Lowering หรือ DIBL เมื่อขนาดของมอสเฟทมีขนาดลดลง ซึ่งหมายความว่าความยาวของแชนแนลมีขนาดสั้น(F_S) ผลของความกว้างแชนแนลที่แคบลง(F_N) และสุดท้ายเป็นผลของ DIBL(F_D) จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ(4.16)[5]

$$V_T = V_{FB} + \phi_S + F_S \gamma \sqrt{\phi_S - V_{BS}} + F_N (\phi_S - V_{BS}) + F_D F_{DS} \quad (4.16)$$

$$F_S = 1 - \frac{1}{L_{eff}} \left[(W_C + LD) \left[1 - \left(\frac{W_P}{XJ + W_P} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - LD \right] \quad (4.17)$$

โดยที่

$$F_N = \delta \frac{\pi \epsilon_{Si}}{2C_{ox} W_{eff}} = DELTA \frac{\pi \epsilon_{Si}}{2C_{ox} W_{eff}} \quad (4.18)$$

$$F_D = \eta \frac{8.15 \times 10^{-22}}{C_{ox} W_{eff}} = ETA \frac{8.15 \times 10^{-22}}{C_{ox} W_{eff}} \quad (4.19)$$

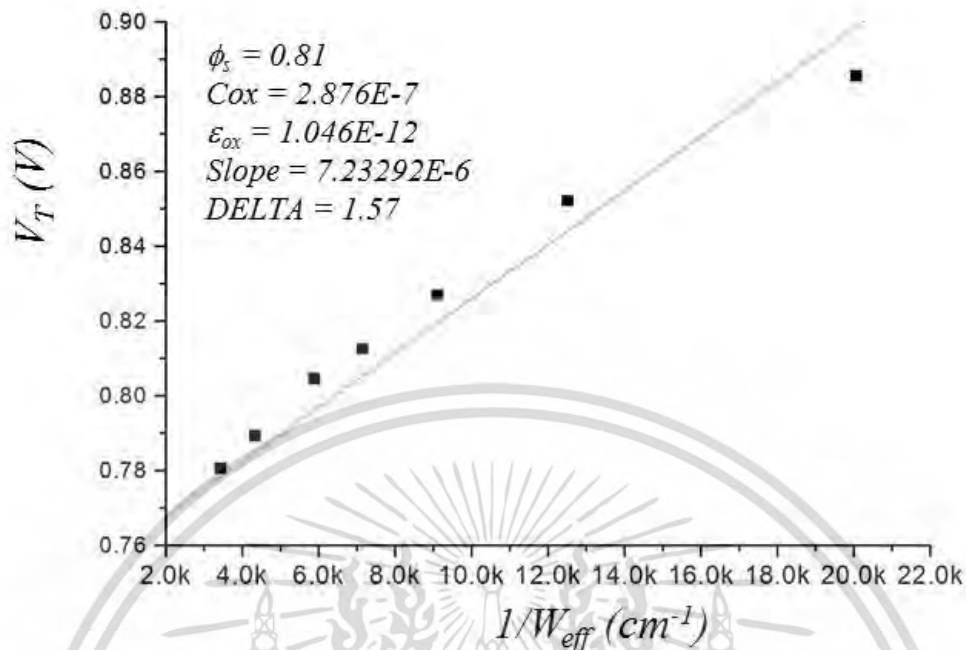
ผลของความกว้างแชนแนลที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม หรือ DELTA

การหาค่า *DELTA* จากสมการที่ (4.16) และสมการที่ (4.18) โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

V_T กับ $\frac{1}{W_{eff}}$ ได้ *DELTA* คือค่าความชันคูณด้วย $2C_{ox}/\pi\epsilon_{Si}(\phi_S - V_{BS})$ หรือ *Slope* $\frac{2C_{ox}}{\pi\epsilon_{Si}(\phi_S - V_{BS})}$

ของมอสเฟทที่มีค่าความกว้างแชนแนลแคบ[5] สำหรับเอ็นมอสเฟท ได้ *DELTA*=1.57 ตามรูปที่

4.15



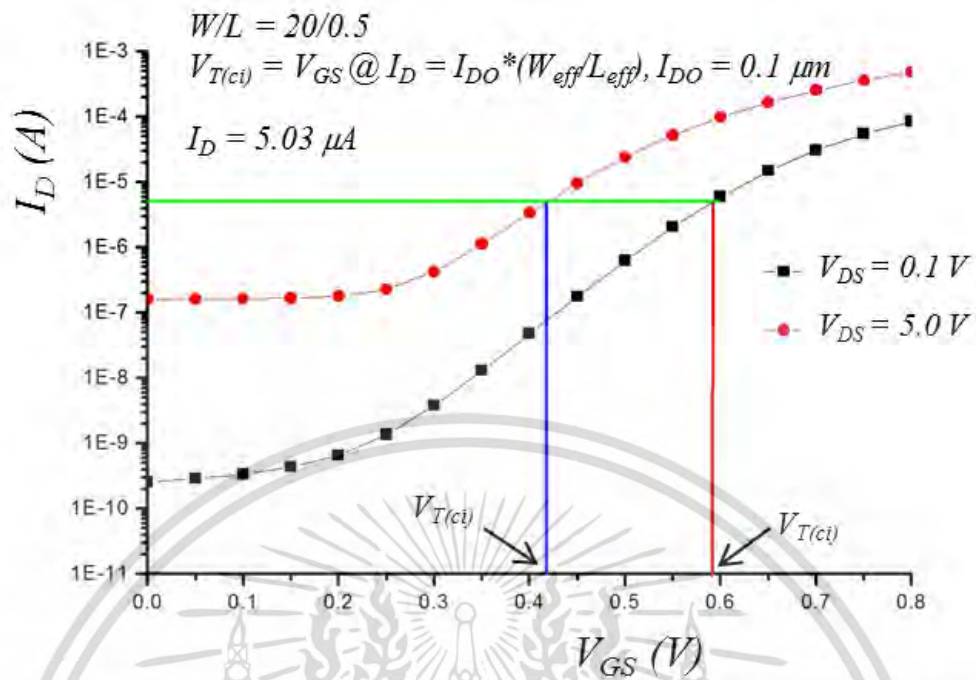
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{1}{W_{eff}}$ กับ V_T ของเอ็นมอสเฟตขนาดความกว้างเกตค่าต่างๆ ซึ่งใช้หาค่า $DELTA=1.57$

ค่าสัมประสิทธิ์จากผลของ DIBL หรือ ETA

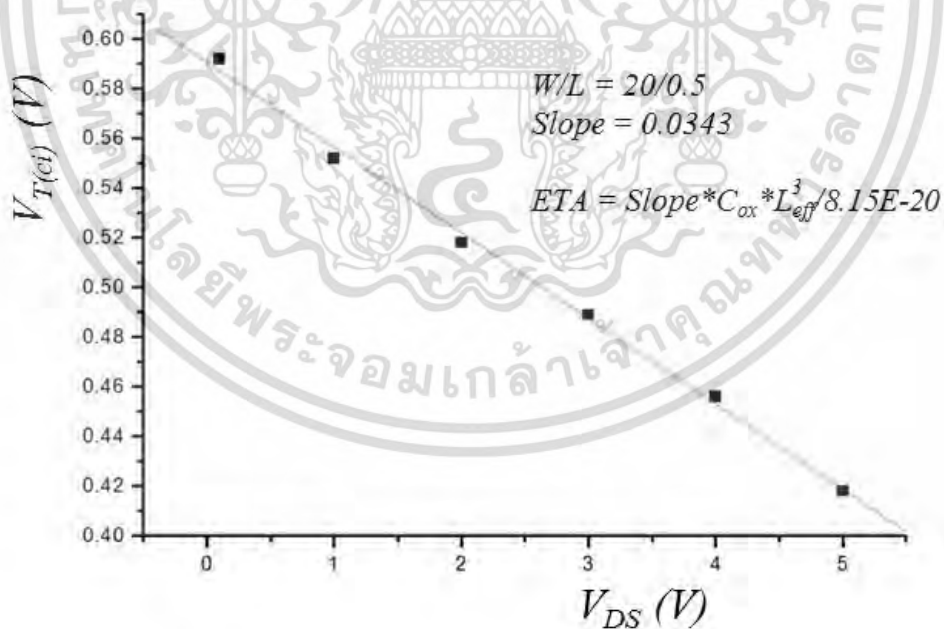
การหาค่า ETA จากสมการที่ (4.16) และสมการที่ (4.19) โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_T กับ V_{DS} ซึ่งกำหนดให้ V_T ที่ค่า V_{GS} ที่ $I_{DO} \frac{W_{eff}}{L_{eff}}$ โดยค่า V_T กำหนดค่ากระแสเดรน (I_{DS}) แทนด้วย $V_{T(c)}$ ตามรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 การหาค่า $V_{T(c)}$ ที่ V_{DS} ต่างๆ ของเอ็นมอสเฟต จะได้ค่า ETA คือ ค่าความชันคูณด้วย $(C_{OX} L_{eff}^3)/8.15 \times 10^{-20}$ หรือ $Slope \frac{C_{OX} L_{eff}^3}{8.15 \times 10^{-20}}$ ของมอสเฟตที่มีค่าความยาวแกนแนลสั้น[5] สำหรับเอ็นมอสเฟต ได้ $ETA=6.84 \times 10^{-9}$ ตามรูปที่ 4.16 คือค่าความชันคูณด้วย

$$2C_{OX}/\pi\epsilon_{Si}(\phi_s - V_{BS}) \text{ หรือ } Slope \frac{2C_{OX}}{\pi\epsilon_{Si}(\phi_s - V_{BS})} [7]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเกต (V_{GS}) กับ กระแสเดรน (I_D) ที่มีผล DIBL ที่เอ็นมอสเฟท ขนาด $W/L = 20/0.5$



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของแรงดันเดรน (V_{DS}) กับ $V_{T(ci)}$ ที่เอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

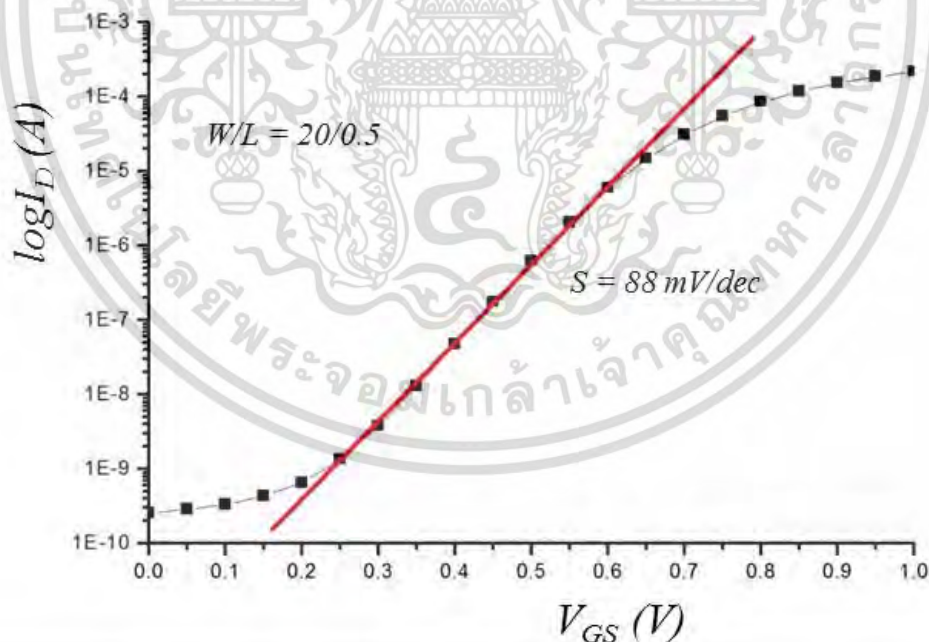
4.3.8 การหาค่า NFS ปริมาณความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของฐานรองซิลิคอน

การหาปริมาณความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของฐานรองซิลิคอน หรือ NFS ใช้ ค่าซับเทรตโวลต์สวิง (Subthreshold Swing, S) จากการวัดค่ากระแสเดรน (I_{DS}) ในช่วงที่เริ่มจะเกิดชั้นกลับ (Weak Inversion layer) ของแชนแนลกระแสเดรนระหว่างช่วงแถบเรียบจนกระทั่งค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ขณะที่มอสเฟตมีแชนแนลสั้น จะได้ความสัมพันธ์ของซับเทรตโวลต์สวิง (S) ดังสมการที่ (4.20) [5]

$$S = \frac{\partial V_{GS}}{\partial \log |I_{DS}|} = \frac{KT}{q} \ln 10 \left(1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_{OX}} \right)$$

$$S = \frac{KT}{q} \ln 10 \left(1 + \frac{1}{C_{OX}} \sqrt{\frac{q \epsilon_{Si} N_{ch}}{\phi_s}} \right) \quad (4.20)$$

สมการที่ (4.21) จะใช้หา ค่าซับเทรตโวลต์สวิง (S) ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log |I_D|$ กับ V_{GS} โดยที่ค่าความชันของความสัมพันธ์ นั้นคือค่าซับเทรตโวลต์สวิง (S) เป็นวิธี การหา ค่าซับเทรตโวลต์สวิง (S) เอ็นมอสเฟต ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ของ V_{GS} กับ $\log |I_D|$ ของเอ็นมอสเฟตขนาด $W/L = 20/0.5$ ซึ่งหาค่า $S = 88 \text{ mV/dec}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ ค่าชั้บเทรตโวลต์สวิง(S) แล้วนำไปคำนวณเพื่อหาค่า NFS โดยใช้สมการ (4.21)

$$NFS = \frac{C_{ox}}{q} \left(\ln \frac{S}{\frac{kT}{q}} - \frac{\gamma}{2\sqrt{\phi_s}} - 1 \right) \quad (4.21)$$

กรณีเอ็นมอสเฟท

$$NFS = \frac{1.41 \times 10^{-7}}{1.602 \times 10^{-19}} \left(\ln \frac{0.9}{2.59 \times 10^{-2}} - \frac{0.631}{2\sqrt{0.739}} - 1 \right)$$

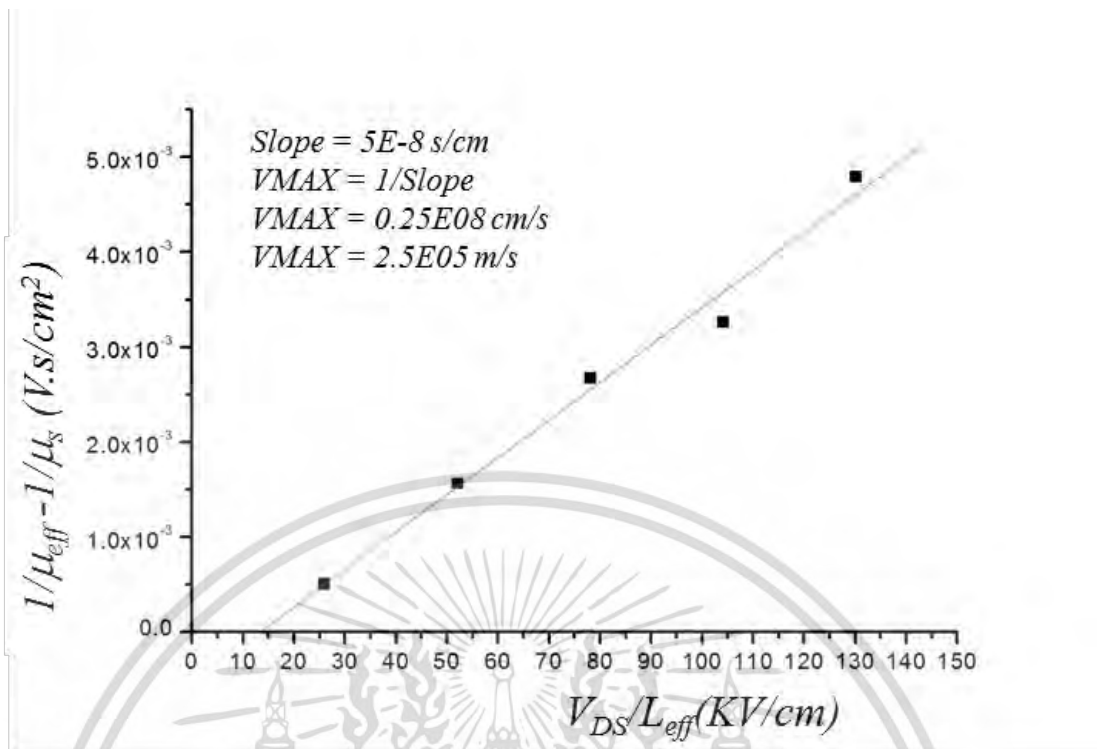
$$NFS = 1.25 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$$

4.3.9 การหาค่า VMAX

VMAX หรือ ความเร็วดริฟต์สูงสุดของพาหะ ซึ่งค่าสภาพคล่องของพาหะ จะมีผลของสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง (Vertical Field Mobility, μ_v) และ ค่าสภาพคล่องของพาหะประสิทธิผล (Effective Mobility : μ_{eff}) โดยที่ค่าความคล่องตัวที่แรงดันเดรน (V_{DS}) ต่ำ และ สูง ตามลำดับ ที่มอสเฟทที่มีแกนแลกระแสสั้น ในส่วนของค่าสภาพคล่องของพาหะประสิทธิผล ซึ่งจะรวมผลของสนามไฟฟ้าในแนวแกนนอนและแนวตั้ง นั้นหาจากได้ สมการ (4.22) [5-8] ซึ่ง μ_v เป็น ค่าสภาพคล่องของพาหะเนื่องจากมีผลของสนามไฟฟ้าตามแนวตั้ง ดังสมการ (4.9)

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_v}{1 + \frac{\mu_v V_{DS}}{V_{MAX} L_{eff}}} \quad (4.22)$$

สำหรับค่า VMAX หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_v} \right)$ กับ $\frac{V_{DS}}{V_{eff}}$ จะได้ค่า $V_{MAX} = \frac{1}{Slope}$ ของเอ็นมอสเฟท ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{V_{DS}}{V_{eff}}$ กับ $(\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_v})$ ของเอ็นมอสเฟตที่ขนาด $W/L = 20/0.5$ ซึ่งหาค่า $V_{MAX} = 2.50 \times 10^5$ cm/s

4.3.10 การหาค่า KAPPA

KAPPA หรือ ผลของแขนแนลขนาดสั้นที่มีผลต่อกระแสเดรน (I_D) จะปรากฏขึ้นในย่านการอิ่มตัว เป็นผลมาจากความยาวแขนแนลประสิทธิผล หรือความยาวแขนแนลจริง (Effective Channel Length : L') [7] ของมอสเฟตที่มีช่องทางเดินกระแสสั้นเนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์ดัง สมการ (4.23)

$$L' = \left[\left(\frac{V_{DS(sat)}}{2aL_{eff}} \right)^2 + k \left(\frac{V_{DS} - V_{DS(sat)}}{a} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{V_{DS(sat)}}{2aL_{eff}} \quad (4.23)$$

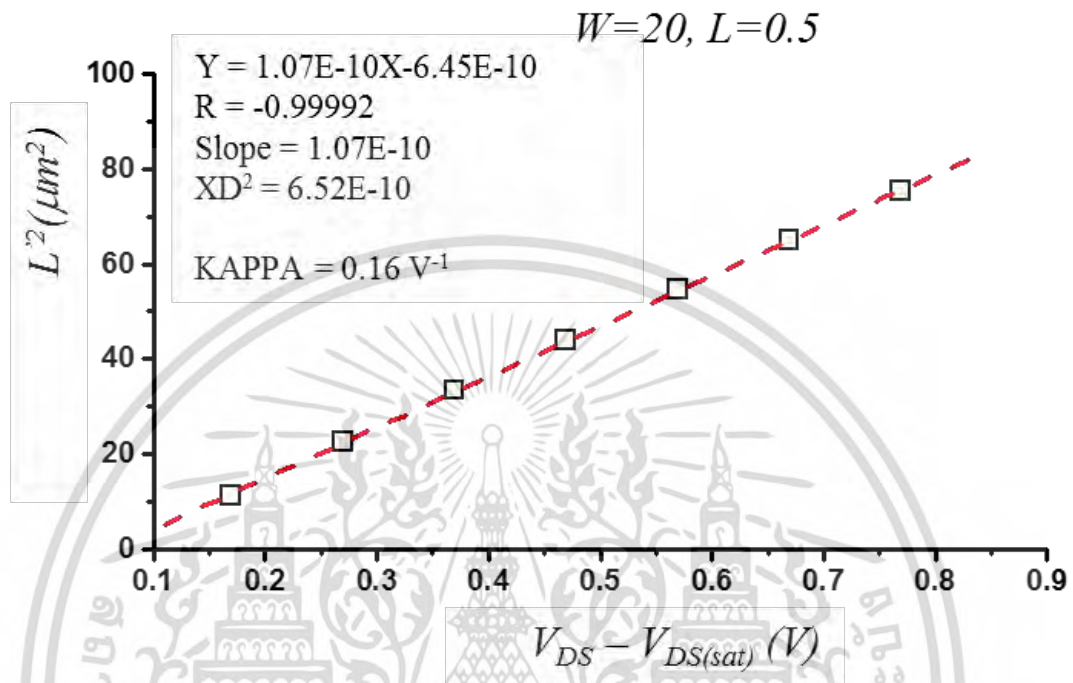
$$L' = \left[\left(\frac{V_{DS(sat)}}{2aL_{eff}} \right)^2 + KAPPA \left(\frac{V_{DS} - V_{DS(sat)}}{a} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{V_{DS(sat)}}{2aL_{eff}} \quad (4.24)$$

โดยที่ a

$$a = \frac{qN_{sub}}{2\epsilon_{Si}} = \frac{qNSUB}{2\epsilon_{Si}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่าง L'^2 กับ $V_{DS}-V_{DS(sat)}$ จากสมการ (4.24) จะได้ $Slope=KAPPA \times a$ และค่า $L' = L_{eff} \left(1 - \frac{I_{D(sat)}}{I_D}\right)$ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเดรน (V_{DS}) กับค่ากระแสเดรน (I_D) เอ็นมอสเฟทที่มีเซนแนลกระแสสั้น ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{DS}-V_{DS(sat)}$ กับ L'^2 ของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L = 20/0.5$ ซึ่งหาค่า $KAPPA = 0.16 \text{ V}^{-1}$

สรุปได้ผลการแบบจำลองพารามิเตอร์เอ็นมอสเฟทตาม ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของเอ็นมอสเฟท ระดับ 3

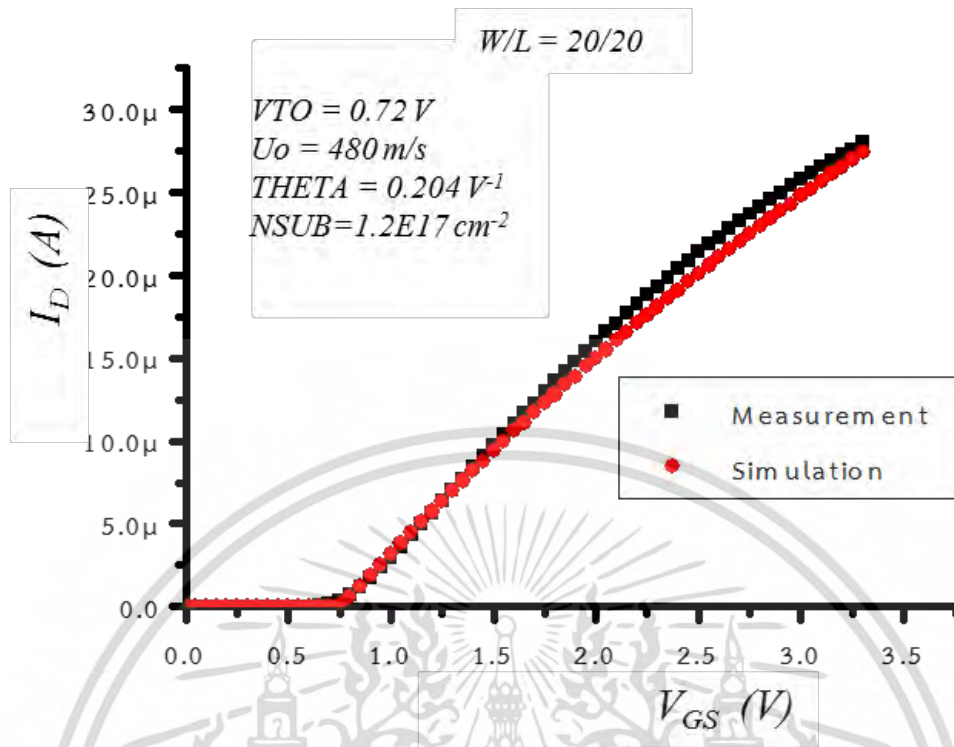
ลำดับ	พารามิเตอร์	เอ็นมอสเฟท
1	TPG	1
2	$TOX(t_{GOX})$	11.8 nm
3	LD	0.058 μm
4	WD	0.325 μm
5	$UO(\mu_o)$	480.08 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
6	$VTO(V_{T(\text{Big MOS})})$	0.720 V
7	$THETA(\theta, \xi)$	0.204 V^{-1}
8	$RS(R_S)$	25.82 Ω
9	$RD(R_D)$	25.82 Ω
10	$DELTA(\delta)$	1.23
11	$NSUB(N_{sub})$	$9.47 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
12	$XJ(X_j)$	0.35 μm
13	NFS	$2.37 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
14	$VMAX(V_{sat})$	$2.5 \times 10^5 \text{ m/s}$
15	$KAPPA(\kappa)$	0.16 V^{-1}
16	$ETA(\eta)$	6.84×10^{-9}

4.4 คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างผลจากการหาแบบจำลองพารามิเตอร์กับผลจากการวัดทดสอบ

สุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างผลจากการหาแบบจำลองพารามิเตอร์กับผลจากการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟท เพื่อศึกษาถึงความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพารามิเตอร์ SPICE ระดับ 3 ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งการหาแบบจำลองพารามิเตอร์ทำได้โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ใส่ในโปรแกรม T-SPICE โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้า จะทำการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

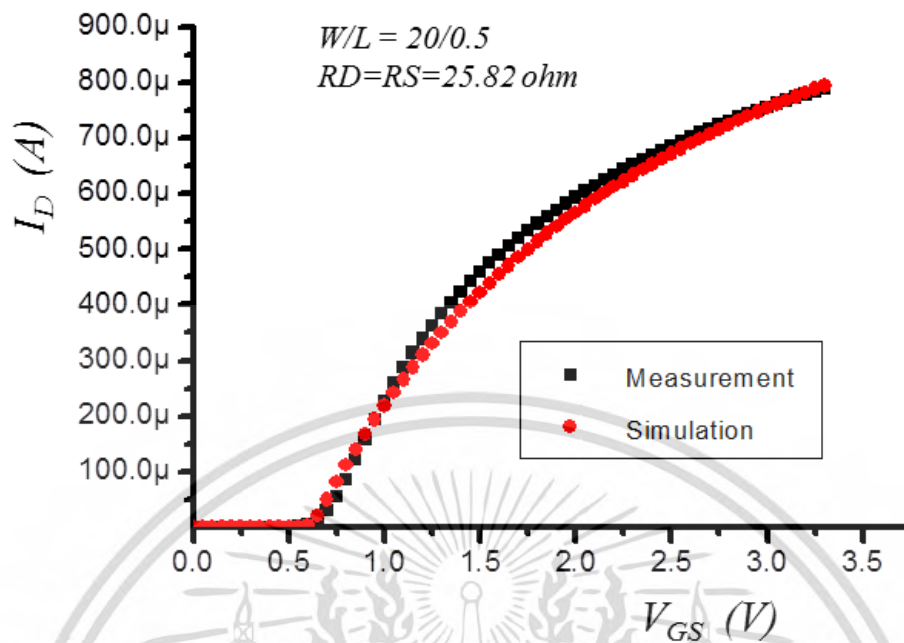
1. ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) เอ็นมอสเฟทขนาด $W = 20 \mu\text{m}$, $L = 20 \mu\text{m}$ เพื่อดูผลของพารามิเตอร์ NSUB THETA VTO และ UO ที่มีต่อเอ็นมอสเฟทขนาดใหญ่ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน (I_D) อันเนื่องมาจากการเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟท กับ ผลการจำลอง

พารามิเตอร์ $W/L=20/20$ ได้ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 5% ซึ่งเป็นค่าสูงสุด ได้ผลดังรูปที่ 4.21 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) อันเนื่องจากการเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟต กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=20/20$

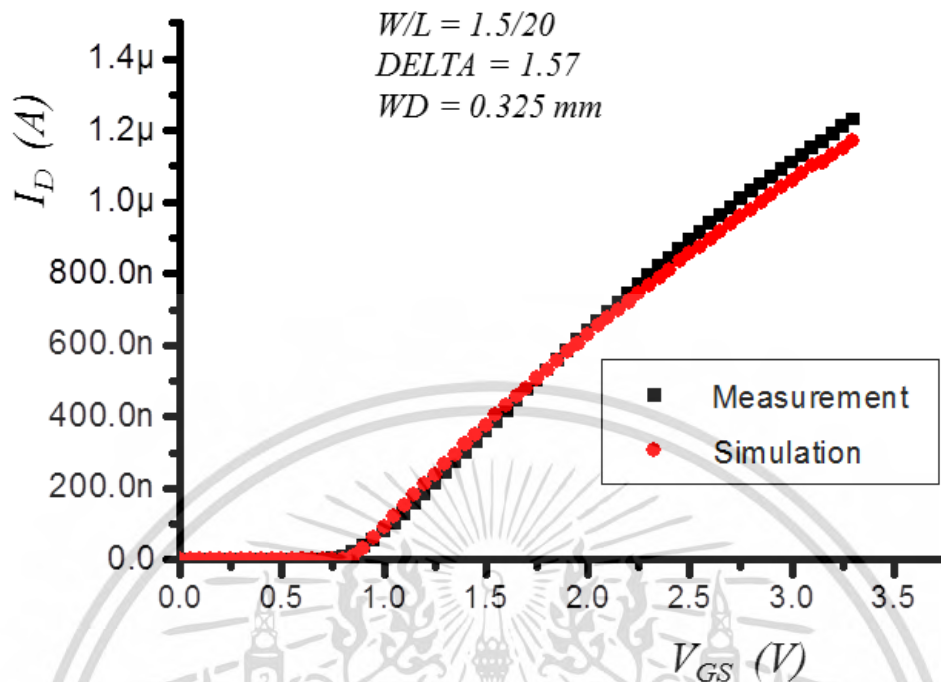
2. ผลของพารามิเตอร์ R_D และ R_S เอ็นมอสเฟตขนาด $W = 20 \mu m$ $L = 0.5 \mu m$ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) อันเนื่องจากการเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟต กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ ($W/L = 20/0.5$) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 4.7% ซึ่งเป็นค่าสูงสุด ได้ผล ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) อันเนื่องจากการเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟต กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=20/0.5$

จากผลในรูปที่ 4.23 เป็นกราฟความสัมพันธ์การเปรียบเทียบระหว่างค่ากระแสเดรน(I_D)กับค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) ที่ได้จากการจำลองพารามิเตอร์และผลจากการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟต (W/L = 1.5/20) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 3% ซึ่งเป็นค่าสูงสุด

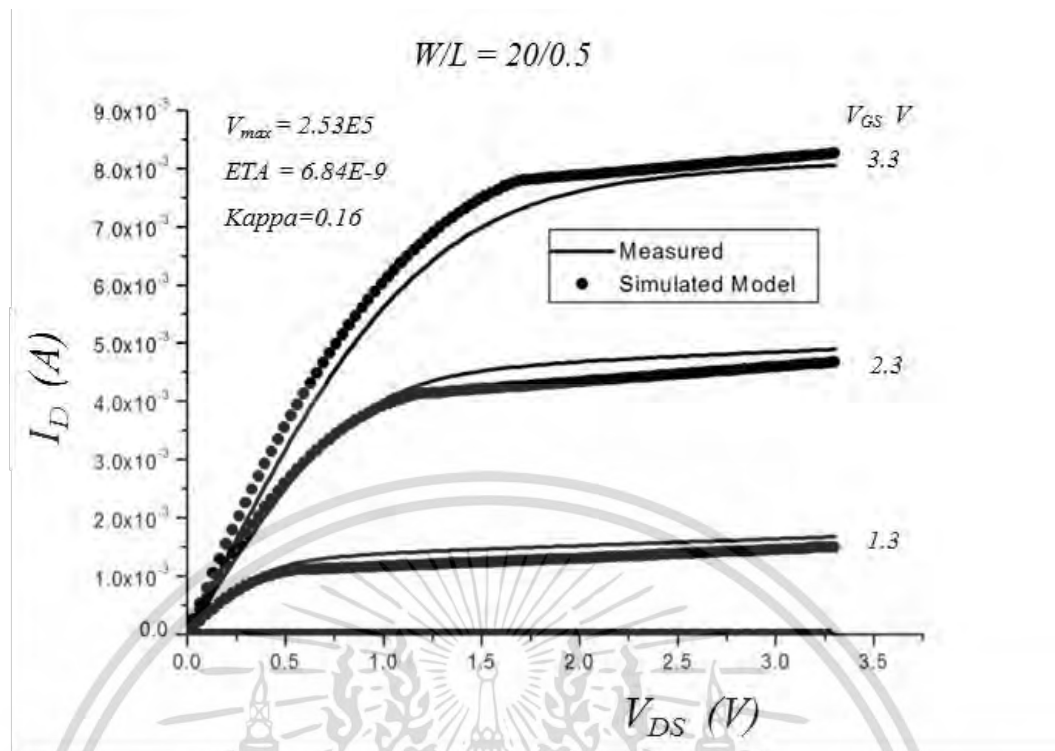
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) อันเนื่องจากการเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟต กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=1.5/20$

4. การวัดทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเดรน(I_D)กับค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})ที่ฐานรองโดยการให้แรงดันที่ฐานรอง(V_{BS})ที่เอ็นมอสเฟตขนาด $W = 20 \mu\text{m}$, $L = 0.5 \mu\text{m}$ โดยให้ $V_{DS} = 0 \rightarrow 3.3 \text{ V}$ ที่แรงดันที่ขั้วเกต V_{GS} ค่าต่างๆ ซึ่งได้ผล ดังรูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเดรน(V_{DS})กับ ค่ากระแสเดรน(I_D) ที่ใช้ค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})ค่าต่างๆ ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบเอ็นมอสเฟต กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=1.5/20$ ได้ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 5% ซึ่งเป็นค่าสูงสุด ทั้งนี้เนื่องมาจาก ตัวแบบจำลองของ SPICE ระดับ 3 เองที่ยังไม่ให้ความเที่ยงตรงในช่วงเชิงเส้น และ อิมิตัว เท่าที่ควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันขั้วเดรน(V_{DS})กับค่ากระแสเดรน(I_D) ที่แรงดันที่ขั้วเกต($V_{GS} = 0, 1.3, 2.3, 3.3 \text{ V}$) อันเนื่องจากการเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบ เอ็นมอสเฟต กับ ผลการจำลองพารามิเตอร์ $W/L=20/0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การพัฒนาและการถอดแบบจำลองทางไฟฟ้า ของเอ็นมอสเฟต 0.5 ไมครอน เริ่มจาก การออกแบบ การจำลองกระบวนการสร้าง กระบวนการสร้างเอ็นมอสเฟต การวัดทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้า และสุดท้ายเป็นการถอดแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ซึ่งสรุปรายละเอียดได้ต่อไปนี้

1. การจำลองกระบวนการสร้างเอ็นมอสเฟตแบบบ่อแยกชนิดพี(P-well) เพื่อกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T)ของเอ็นมอสเฟต ≈ 0.7 V ($V_T \approx 0.7$ V) เริ่มจากการเลือกแผ่นนฐานรองซิลิคอนชนิดพี(p-type silicon) มีค่าความต้านในช่วง 20-25 ohm-cm ต่อจากนั้นทำการสร้างบ่อแยกชนิดพี(P-well) ด้วยการยิงฝังประจุธาตุโบรอนใช้พลังงาน 140 keV ส่วนการยิงฝังประจุจากกระบวนการป้องกันพันธ์ทรู(APT_Dose) จะใช้พลังงาน 90 keV และสุดท้ายเป็นการยิงฝังประจุเพื่อปรับค่าแรงดันขีดเริ่ม(VTA_Dose) โดยใช้ BF_2 ที่พลังงาน 70 keV และกำหนดความหนาชั้นเกตออกไซด์ 10 นาโนเมตร ได้เงื่อนไข ตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ

ชนิดของตัวแปร	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ
บ่อแยกชนิด พี (P-well)	$1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
VTA_Dose	$1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
APT_Dose	$3.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

ผลจากการจำลองหาค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟต(V_T) 0.693 V และได้ค่ากระแส

อิ่มตัว($I_{D(sat)}$) 403 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ ที่ $V_{DS} = V_{GS} = 3.3$ V

2. การวัดทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของมอสเฟต 0.5 ไมครอน สรุปผลได้ดังตารางที่

5.2

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของไฟฟ้าเอ็นมอสเฟท 0.5 ไมครอน

พารามิเตอร์เอ็นมอสทรานซิสเตอร์	W/L	คุณสมบัติของไฟฟ้า
1. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ $V_{TH}(\text{big MOS})$	20/20	0.75 V
2. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก $V_{TH}(\text{short MOS})$	20/0.5	0.62 V
3. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดแคบ $V_{TH}(\text{narrow MOS})$	0.9/40	0.928 V
4. กระแสเดรน ($I_{D(\text{sat})}$) ในย่านอิ่มตัว ที่ $V_{DS} = V_{GS} = 3.3$ V	20/0.5	403 mA

3. แบบจำลองพารามิเตอร์ที่ได้นำเสนอ สรุปได้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของเอ็นมอสเฟท ระดับ 3

ลำดับ	พารามิเตอร์	เอ็นมอสเฟท
1	TPG	1
2	$TOX(t_{GOX})$	11.8 nm
3	LD	0.058 μm
4	WD	0.325 μm
5	$UO(\mu_o)$	480.08 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
6	$VTO(V_{T(\text{Big MOS})})$	0.720 V
7	$THETA(\theta, \xi)$	0.204 V^{-1}
8	$RS(R_s)$	25.82 Ω
9	$RD(R_D)$	25.82 Ω
10	$DELTA(\delta)$	1.23
11	$NSUB(N_{sub})$	$9.47 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
12	$XJ(X_j)$	0.35 μm
13	NFS	$2.37 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
14	$VMAX(v_{sat})$	$2.5 \times 10^5 \text{ m/s}$
15	$KAPPA(\kappa)$	0.16 V^{-1}
16	$ETA(\eta)$	6.84×10^{-9}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สมเกียรติ ศุภเดช., **เทคโนโลยีวงจรรวม**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, พ.ศ. 2559. บทที่ 4. หน้า 138-182.
- [2] Neil H.E. Weste and David Harris., **CMOS VLSI Design ; A Circuits and Systems Perspective**, 3rd ED. Boston : Pearson Education, Inc. 2005 pp. 28-32.
- [3] Synopsys Inc. “Sentaurus TCAD User Manual, version Z-2007.” [Compact Disc]. USA : Synopsys Inc. 2007
- [4] S. Wolf., **Silicon Processing for the VLSI Era Volume 2 ; Process Integration**, California : Lattice Press. 1990. pp. 355-361.
- [5] อนุชา เรืองพานิช, รัชสรศักดิ์ เมืองเหลือ, นพพล พงษ์พันธุ์จันทร์, ภาวดี มีสรพรพงศ์ และ อัมพร โพธิ์ไย., “แบบจำลองพารามิเตอร์และการหาค่า ของมอสเฟตระดับ 3” **มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 2**, กันยายน พ.ศ. 2549. หน้า 42.
- [6] Daniel P. Foty., **MOSFET Modeling with SPICE Principles and Practice**, New Jersey : Prentice Hall, Inc., 1997. pp. 154-211.
- [7] อนุชา เรืองพานิช และสรายุทธ วิศวแสงสุข., “วิธีการหาแบบจำลองพารามิเตอร์ของ มอสทรานซิสเตอร์” **สารเนคเทค**, ปีที่ 10, ฉบับที่ 53. กรกฎาคม พ.ศ. 2546. หน้า 31-35.
- [8] G. Baum and H. Beneking. “Drift Velocity Saturation in MOS Transistors” **IEEE Trans. Elec. Dev.**, vol. ED-17, Jun. 1970. pp. 481-482.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติคณะผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ
(ภาษาอังกฤษ) Dr. RANGSON MUANGHLUA
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3-6601-00854-71-0
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520
โทร. 02-329-8344 โทรสาร 02-329-8346
E-mail : rangson.mu@kmitl.ac.th

2. ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.อนุชา เรืองพานิช
(ภาษาอังกฤษ) Dr. Anucha Ruangphanit
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3-5001-00413-24-2
3. ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

ศูนย์วิจัยและพัฒนาไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

โทรศัพท์ : 0 3885 7100-9 ต่อ 513 โทรสาร :-

E-mail Address : anucha.ruangphanit@nectec.or.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้