



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาและการถอดแบบแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า
ของมอสเฟตขนาดซับไมครอน

The Development and the Parameter Extraction of
Submicron MOSFETs

นายรังสรรค์ เมืองเหลือ

นายอนุชา เรืองพานิช

นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาและการถอดแบบแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟตขนาดซัปไมครอน

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน งบประมาณ 2559

ประจำปีงบประมาณ..... 2559..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 430,000..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการวิจัย..... นายรังสรรค์ เมืองเหลือ.....

ผู้ร่วมโครงการวิจัย..... นายอนุชา เรืองพานิช.....

ผู้ร่วมโครงการวิจัย..... นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ.....

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและการถอดแบบแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟตขนาดซัปไมครอน โดยเริ่มจากจำลองกระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยการจำลองค่าความเข้มข้นสารเจือเพื่อปรับเปลี่ยนให้ค่าแรงขีดเริ่มให้มีค่าประมาณ ± 0.7 V และต่อมานำผลที่ได้จากการจำลองมาผ่านกระบวนการสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดพีแบบบ่อแยกคู่(twin well) ได้ค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ 0.77 V และ พีมอสทรานซิสเตอร์ -0.69 V และสุดท้ายเป็นการถอดแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้ค่าแรงดันขีดเริ่มของ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ 0.887 V และ พีมอสทรานซิสเตอร์ -0.79 V ตามลำดับ

คำสำคัญ : ซิลิคอน, มอสเฟต, โมเดล

Research Title : The Development and the Parameter Extraction of Submicron MOSFETs

Researcher: Mr. Rangson Muanghlua.....

: Mr. Anucha Ruangphanit.....

: Mr. Surasak Niemcharoen.....

Department:Electronics Engineering **Faculty:**Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This research describes the development and the parameter extraction of submicron MOSFETs. To study the effects of concentration on the threshold voltage of MOSFET in the range of ± 0.7 V, the TCAD process simulation and devices simulation was used firstly. The process simulation data is sent to process steps for fabrication. The threshold voltage is 0.77V and 0.69 V of NMOS and PMOS from CMOS process fabrication. Finally, the parameter extraction was used, the extracted threshold voltage is 0.887 V. and -0.79 V. respectively.

Keywords : Silicon, MOSFETS, Model

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็น การพัฒนาและการถอดแบบแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟตขนาดซัพไมครอน นี้ประสบความสำเร็จได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ จากบุคคลดังต่อไปนี้

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ นายนพพล พงษ์พันธุ์จันทรา และนักวิจัยศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ช่วยเหลือแนะนำเทคนิค เกี่ยวกับการวิจัย ตอบข้อซักถาม และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายรังสรรค์ เมืองเหลือ

นายอนุชา เรืองพานิช

นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
สัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย.....	4
1.6 เนื้อหาของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 วัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอน.....	5
2.2 โครงสร้างของมอส.....	8
2.3 มอสทรานซิสเตอร์.....	9
2.4 ทรานส์คอนดักแตนซ์.....	15
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	17
3.1 การออกแบบมอสทรานซิสเตอร์.....	17
3.2 กระบวนการสร้างซีมอสทรานซิสเตอร์.....	18
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	27
4.1 การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของซีมอสทรานซิสเตอร์.....	27
4.2 การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า ซีมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากกระบวนการสร้าง.....	31
4.3 แบบจำลองของพารามิเตอร์มอสทรานซิสเตอร์.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	62
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	63

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ขนาดความกว้างและยาว(W/L).....	17
4.1	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ บ่อแยกชนิด พี.....	27
4.2	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ บ่อแยกชนิด เอ็น.....	28
4.3	ปริมาณโดสยึงผึ้งประจุของสารเจือในบริเวณต่างๆ.....	29
4.4	คุณลักษณะไฟฟ้าเอ็นมอสทรานซิสเตอร์.....	37
4.5	คุณลักษณะไฟฟ้าพีมอสทรานซิสเตอร์.....	38
4.6	พารามิเตอร์ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ระดับ 3.....	58
5.1	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือที่จำลอง.....	59
5.2	คุณลักษณะไฟฟ้าเอ็นมอสทรานซิสเตอร์.....	59
5.3	คุณลักษณะไฟฟ้าพีมอสทรานซิสเตอร์.....	60
5.4	พารามิเตอร์ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ระดับ 3.....	60

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างอะตอมซิลิคอนประกอบด้วย นิวเคลียส และ อิเล็กตรอน.....	5
2.2	แบบจำลองพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนแบบโควาเลนซ์.....	6
2.3	แบบจำลองพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนที่มีการเพิ่มสารเจือในหมู่ V ของตารางธาตุ และจำนวนประจุพาหะ อิเล็กตรอน.....	7
2.4	แบบจำลองพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนที่มีการเพิ่มสารเจือในหมู่ III ของตารางธาตุ และจำนวนประจุพาหะ โฮล เพิ่มขึ้น.....	8
2.5	โครงสร้างของมอส ประกอบด้วย ชั้นโลหะตัวนำ ชั้นฉนวน และ ชั้นสารกึ่งตัวนำ.....	8
2.6	โครงสร้างของพีมอสทรานซิสเตอร์.....	9
2.7	โครงสร้างของพีมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ แบบเอ็นฮานซ์เมนต์.....	10
2.8	โครงสร้างของพีมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ แบบดีพลีชั่น.....	10
2.9	คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดัน V_{DS} กับ กระแสเดรน I_{DS} ที่แรงดันเกตคงที่ ที่ค่าต่าง ๆ ของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล.....	12
2.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(v_{GS}) กับ กระแสเดรน(i_{DS}) ที่สภาวะอิมิตัว ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม(v_{TH}).....	13
3.1	โครงสร้างลักษณะทางเรขาคณิตของมอสทรานซิสเตอร์.....	17
3.2	แผ่นฐานรองซิลิคอน สภาพความต้านทาน $5.0 \Omega\text{-cm}$	19
3.3	การสร้างบ่อแยก N-well และ P-well	19
3.4	การสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ LOCOS ทำให้พื้นที่ Active area ลดลง.....	20
3.5	การสร้างเกตด้วยฟิล์มโพลีซิลิคอน(polysilcon).....	20
3.6	ขั้นตอนการยิงฝังประจุ LDD.....	20
3.7	ขั้นตอนการสร้าง Sidewall Spacer.....	21
3.8	ขั้นตอนการยิงฝังประจุส่วนซอส/เดรน.....	21
3.9	ขั้นตอนการสร้างชั้นอินเตอร์เลเยอร์ไดอิเล็กตริก.....	21
3.10	การกัดช่องเชื่อมต่อ (Contact).....	22
3.11	การสร้างชั้นฟิล์มโลหะ 1(Metal_1).....	22
3.12	การกัดลวดลายชั้นฟิล์มโลหะ 1 (Metal_1).....	23
3.13	การสร้างชั้นฟิล์มอินเตอร์เมเดียไดอิเล็กตริก(Inter Media Dielectric).....	23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	การกัดช่องเพื่อเชื่อมต่อ Via..... 24
3.15	การสร้างชั้นโลหะ 2 (Meatl_2)..... 24
3.16	การกัดสวดลายชั้นฟิล์มโลหะ 2 (Metal_2)..... 25
3.17	การสร้างชั้นฟิล์ม Passivation และเปิด PAD..... 25
3.18	กระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยี CMOS 0.8 μm โดยใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี ระนาบ(100),,..... 26
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นสารเจือโดยการยิงฝั้งประจุไอออน(VTA) ที่ ช่องทางเดินกระแส กับ ค่าแรงดันขีดเริ่ม ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ที่ขนาดความยาวเกท 0.8 μm 28
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเจือโดยการยิงฝั้งประจุไอออน(VTA) ที่เซนแนล ทีมี ปริมาณสารเจือบ่อแยก ชนิด เอ็น ต่างๆ กับ ค่าแรงดันขีดเริ่ม ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ที ขนาดความยาวเกท 0.8 μm 29
4.3	กราฟจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเกต(V_{GS}) กับ I_{DS} และ g_m 30
4.4	กราฟจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเกต(V_{GS}) กับ I_{DS} และ g_m 31
4.5	วงจรวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH}) เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ในช่วง I_{DS} มีพฤติกรรมเป็น เชิงเส้น 32
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกท(μm) $W/L = 40/40$ 32
4.7	เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกท(μm) $W/L = 40/0.8$ 33
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกท(μm) $W/L = 0.8/40$ 33
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกท(μm) $W/L = 40/40$ 34
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกท(μm) $W/L = 40/0.8$ 34
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกท(μm) $W/L = 0.8/40$ 35
4.12	วงจรวัดความสัมพันธ์เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ แรงดัน V_{DS} กับ กระแส I_{DS} 35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	กราฟความสัมพันธ์ของ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ระหว่าง แรงดันเดรน (V_{DS})กับ กระแสเดรน (I_{DS}) 36
4.14	วงจรวัดความสัมพันธ์ พีมอสทรานซิสเตอร์ แรงดันเดรน (V_{DS})กับ กระแสเดรน (I_{DS})..... 36
4.15	ความสัมพันธ์ของ พีมอสทรานซิสเตอร์ ระหว่าง แรงดันเดรน (V_{DS})กับ กระแสเดรน (I_{DS})..... 37
4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.000$ 40
4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.702$ 40
4.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.739$ 41
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.000$ 41
4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.699$ 42
4.21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ V_T ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_S = 0.736$ 42
4.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\beta$ กับ L_{mark} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความยาวของเกตเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $LD = 0.105 \mu m$ 43
4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\beta$ กับ L_{mark} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความยาวของเกตพีมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $LD = 0.005 \mu m$ 43
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\beta$ กับ W_{mark} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความกว้างของเกตเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $WD = 0.205 \mu m$ 44
4.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\beta$ กับ W_{mark} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความกว้างของเกตเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $WD = 0.195 \mu m$ 44
4.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_D) ที่แรงดันเดรน(V_{DS})คงที่ ใช้หาค่าความชันของกราฟที่แรงดันเกตเปลี่ยนไป ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่..... 46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27	47
กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{Slope_{max}}{Slope}$ กับแรงดันเกต(V_{GS})ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ ใช้หาค่าความชัน $THETA = 0.046 V^{-1}$	
4.28	47
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_D) ที่แรงดันเดรน(V_{DS})คงที่ ใช้หาค่าความชันของกราฟที่แรงดันเกตเปลี่ยนไป ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่.....	
4.29	48
กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{Slope_{max}}{Slope}$ กับแรงดันเกต(V_{GS})ของพีมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ ใช้หาค่าความชัน $THETA = 0.116 V^{-1}$	
4.30	49
กราฟความสัมพันธ์ของ $THETA_m$ กับ β ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความยาวเกต เปลี่ยนไป ซึ่งใช้หาค่า RD และ RS	
4.31	49
กราฟความสัมพันธ์ของ β กับ $THETA_m$ ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความยาวเกต เปลี่ยนไป ซึ่งใช้หาค่า RD และ RS	
4.32	50
กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{1}{W_{eff}}$ กับ V_T ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความกว้างเกตเปลี่ยน ไป ซึ่งใช้หาค่า $DELTA=1.23$	
4.33	51
กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{1}{W_{eff}}$ กับ V_T ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความกว้างเกตเปลี่ยนไป ซึ่งใช้หาค่า $DELTA=0.621$	
4.34	52
กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_{GS}) ที่มีผล DIBL ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$	
4.35	52
ความสัมพันธ์ของแรงดันเดรน(V_{DS}) กับ $V_{T(c)}$ ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งได้ค่า $ETA = 0.0126$	
4.36	52
กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_{GS}) ที่มีผล DIBL ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$	
4.37	52
ความสัมพันธ์ของแรงดันเดรน(V_{DS}) กับ $V_{T(c)}$ ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งได้ค่า $ETA = 0.039$	
4.38	54
กราฟความสัมพันธ์ของ V_{GS} กับ $\log I_D $ ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $S = 90$ mV/dec	
4.39	54
กราฟความสัมพันธ์ของ V_{GS} กับ $\log I_D $ ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $S = 91.51$ mV/dec	
4.40	56
กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{V_{DS}}{V_{eff}}$ กับ $(\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_v})$ ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ที่ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $V_{MAX} = 1.28E7$ cm/s	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.41	กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{V_{DS}}{V_{eff}}$ กับ $(\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_v})$ ของพีมอสทรานซิสเตอร์ที่ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $V_{MAX} = 2.49E7$ cm/s	56
4.42	กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{DS} - V_{DS(sat)}$ กับ L'^2 ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $KAPPA = 0.16$ V ⁻¹	57
4.43	กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{DS} - V_{DS(sat)}$ กับ L'^2 ของพีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $KAPPA = 0.48$ V ⁻¹	58

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

χ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
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^+
$\mu_{\sigma} UO$	สภาพคล่องของพาหะในย่านเชิงเส้นที่มอสเฟตขนาดใหญ่
θ, ξ	ผลของการลดลงของสภาพคล่องของพาหะ THETA
$\delta, DELTA$	ผลความกว้างของแชนแนลที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม
$V_{sab} VMAX$	ความเร็วดริฟต์สูงสุดของพาหะ
$\kappa, KAPPA$	ผลของแชนแนลขนาดสั้นที่มีผลต่อกระแสเดรน

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) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยวัสดุ 3 ประเภทคือ โลหะตัวนำ(อลูมิเนียม, Al), ฉนวน(ซิลิคอนไดออกไซด์, SiO₂) และ สารกึ่งตัวนำ(ซิลิคอน ,Si)

หลักการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งที่ควบคุมการไหลของพาหะด้วยสนามไฟฟ้า

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันศักยภาพและมูลค่าเพิ่มของสินค้า ประเภทอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามามีบทบาทต่อการพัฒนาประเทศส่งผลรายได้มวลรวมของประเทศอย่างมาก ทางห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้มีการจัดตั้งหน่วยงานเพื่อเป็นต้นแบบนำร่องของการศึกษา ไมโครอิเล็กทรอนิกส์เต็มรูปแบบดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมบุคคลากรให้มีความรู้พื้นฐานอย่างเพียงพอเพื่อให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ จากอดีตถึงปัจจุบันการถอดแบบแบบจำลองพารามิเตอร์จำเป็นต้องมีการนำเข้าของซอฟต์แวร์ที่ใช้ถอดแบบจำลองอุปกรณ์สารกึ่งตัวซึ่งมีมูลค่าสูงมากและต้องมีการซื้อลิขสิทธิ์การใช้ตลอดของระยะเวลาการใช้ทำให้ผู้ใช้กลายเป็นผู้บริโภคไม่ก่อให้เกิดการวิจัยและพัฒนาที่ยั่งยืนที่เป็นของเราเองการถอดแบบและพัฒนาแบบจำลองพารามิเตอร์ของมอสเฟตขนาดซิปไมครอนจึงเป็นงานที่แก้ปัญหาดังกล่าวและเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืนทำให้บุคคลากรมีความรู้และความเข้าใจของเทคนิคการสร้างสารกึ่งตัวนำ การถอดแบบจำลองและการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่มีผลต่อแบบจำลองการวิจัยดังกล่าว

เริ่มจากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหรือไมโครชิปที่ถูกต้องจากผลทางไฟฟ้าจากการวัดจะนำมาคำนวณหาแบบจำลองพารามิเตอร์ตามลำดับขั้นตอนการหาแบบจำลองที่กล่าวไว้ในขั้นตอนแผนงานงานวิจัยดังกล่าวจะสร้างนักวิจัยหรือผู้ที่สนใจเกิดความรู้และความเข้าใจพื้นฐาน ลดการนำเข้าของซอฟต์แวร์สร้างกระบวนการเรียนรู้ในการถอดแบบจำลองจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในการพัฒนาความพร้อมของบุคลากรในด้านดังกล่าวก่อนที่จะมีการลงทุนของภาคเอกชนในด้านดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

พัฒนาแบบจำลองพารามิเตอร์และการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของมอสเฟตเพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองจะทำให้เกิดความเข้าใจในการทำงานของอุปกรณ์และกระบวนการผลิตดังกล่าวมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การพัฒนาการถอดแบบจำลองพารามิเตอร์ของมอสเฟต
2. การจำลองการทำงานด้วยแบบจำลองพารามิเตอร์ของมอสเฟต
พร้อมทั้งการปรุงแต่งแบบจำลองพารามิเตอร์
3. การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย

1. เพิ่มความรู้ความสามารถและประสบการณ์ทางด้านเทคโนโลยีอุปกรณ์ สารกึ่งตัวนำระดับซัพไมครอนของบุคลากร เพื่อฝึกฝนทักษะการวิจัยและถ่ายทอดความรู้รวมทั้งเทคนิคต่างๆ ไปสู่บุคลากรรุ่นใหม่ให้มีความรู้ความเชี่ยวชาญในเรื่องที่เกี่ยวข้องในระดับสูงเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะเป็นกำลังสำคัญของการพัฒนาวงการวิทยาศาสตร์และวงการอุตสาหกรรมต้นน้ำของประเทศสืบต่อไป นำไปสู่การพัฒนาประเทศไทยที่ยั่งยืน
2. เป็นการกระตุ้นให้มีการพัฒนาอุปกรณ์ระดับซัพไมครอน ขึ้นในประเทศ
3. เป็นพื้นฐานเทคโนโลยีที่พัฒนาประเทศ

4. เป็นพื้นฐานของการวิจัยด้านอุปกรณ์ระดับซิปไมครอน
5. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับประเทศและระดับนานาชาติ

1.5 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

1. วัดข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่าง IV ของมอสเฟตขนาดใหญ่(Big MOS)ชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับที่สถานะการทำงานเชิงเส้นที่มีการไบอัสฐานรองค่าต่างๆ
2. วัดข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่าง IV ของมอสเฟตที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น(short MOS) ชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับที่สถานะการทำงานเชิงเส้น
3. วัดข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่าง IV ของมอสเฟตที่มีขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแสสั้น(Narrow MOS) ชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับที่สถานะการทำงานเชิงเส้น
4. วัดข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่าง IV ของมอสเฟตที่มีโครงสร้างแบบ L-array (ความกว้างเท่ากับค่าคงที่แต่เปลี่ยนแปลงขนาดของความยาว) ชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับที่สถานะการทำงานเชิงเส้น
5. วัดข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่าง IV ของมอสเฟตที่มีโครงสร้างแบบ W-array (ความยาวเท่ากับค่าคงที่แต่เปลี่ยนแปลงขนาดของความกว้าง) ชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับที่สถานะการทำงานเชิงเส้น
6. วัดและเก็บข้อมูล ของความสัมพันธ์ระหว่าง IV ของมอสเฟตที่มีขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสสั้น(short MOS) ชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับที่สถานะการทำงานอิมตัว
7. ทำการเปรียบเทียบผลทางไฟฟ้าจากการจำลองการทำงานโดยอาศัยแบบจำลองพารามิเตอร์ในข้อที่ 6 กับผลทางไฟฟ้าจากการวัดพร้อมทั้งทำ curve fitting
8. เสนอการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตบางกระบวนการที่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองพารามิเตอร์
9. สรุปและเขียนประเมินผล เขียนรายฉบับสมบูรณ์

สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

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

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

ธาตุซิลิคอน(silicon, Si) สัญลักษณ์ Si เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่าง โลหะ และ ฉนวน มีเลขอะตอม 14 และวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ซึ่งจัดอยู่ในหมู่ที่ 4 เช่นเดียวกับ ธาตุคาร์บอน(carbon, C), เจอร์เมเนียม(germanium, Ge)

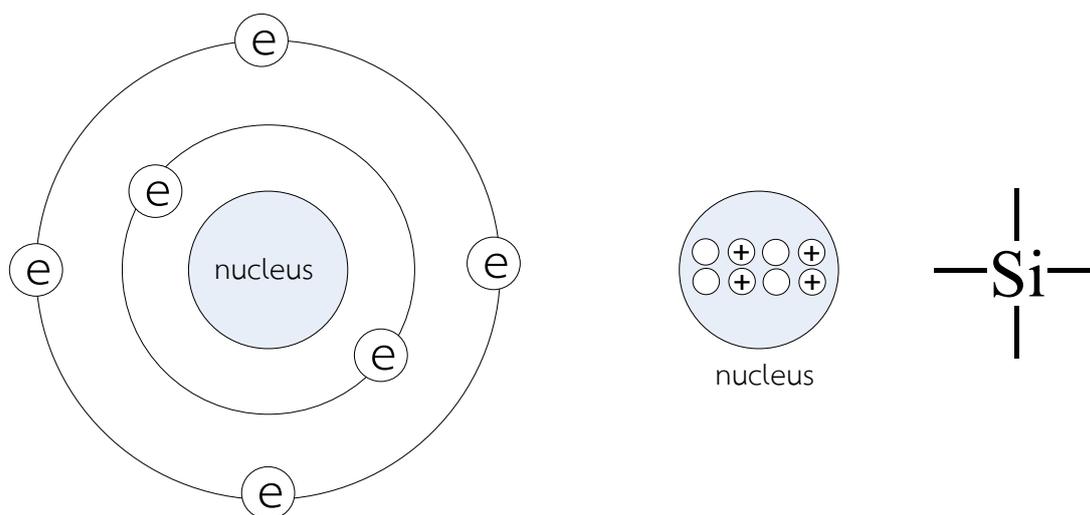
โครงสร้างอะตอมซิลิคอน

โครงสร้างของอะตอมประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

1. นิวเคลียส ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. โปรตรอน มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก มีจำนวน 14 ตัว
2. นิวตรอน ไม่มีประจุไฟฟ้า หรือ เป็นกลางทางไฟฟ้า มีจำนวน 14 ตัว

2. อิเล็กตรอน มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ มีจำนวน 14 ตัว



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมซิลิคอนประกอบด้วย นิวเคลียส และ อิเล็กตรอน

สารกึ่งตัวนำซิลิคอนแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

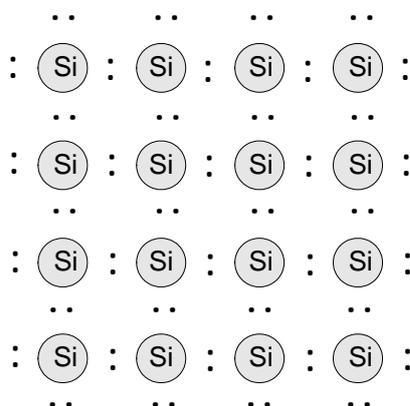
1. ซิลิคอนบริสุทธิ์
2. ซิลิคอนไม่บริสุทธิ์ หรือ ซิลิคอน ที่ถูกโด๊ปด้วยสารเจือ แบ่งได้ 2 ชนิด

ซิลิคอนชนิดเอ็น

ซิลิคอนชนิดพี

ซิลิคอนบริสุทธิ์ (intrinsic silicon)

ซิลิคอนบริสุทธิ์ เป็นซิลิคอนที่ไม่มีการเจือสารลงไป และมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานสูง มีประจุพาหะในการนำไฟฟ้า คือ อิเล็กตรอน(electron) มีประจุไฟฟ้าเป็นลบและ โฮล(hole) มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ซึ่งจำนวนประจุไฟฟ้า ลบ และ บวก เท่ากัน



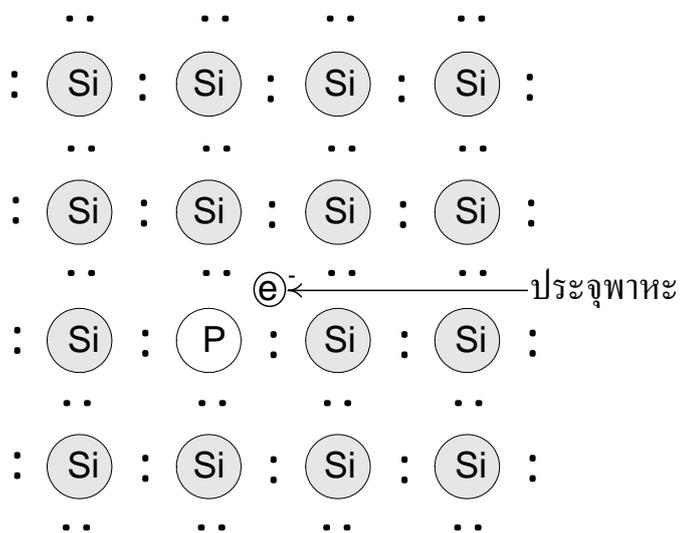
รูปที่ 2.2 แบบจำลองพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนแบบโควาเลนต์

ซิลิคอนไม่บริสุทธิ์(extrinsic silicon) หรือ ซิลิคอนที่ถูกเติมสารเจือ

ซิลิคอนที่ถูกเติมสารเจือจะทำให้สมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป คือ สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น เนื่องจากมีประจุพาหะเพิ่มขึ้น คือ อิเล็กตรอน และ โฮล

ซิลิคอนชนิดเอ็น(n-type silicon)

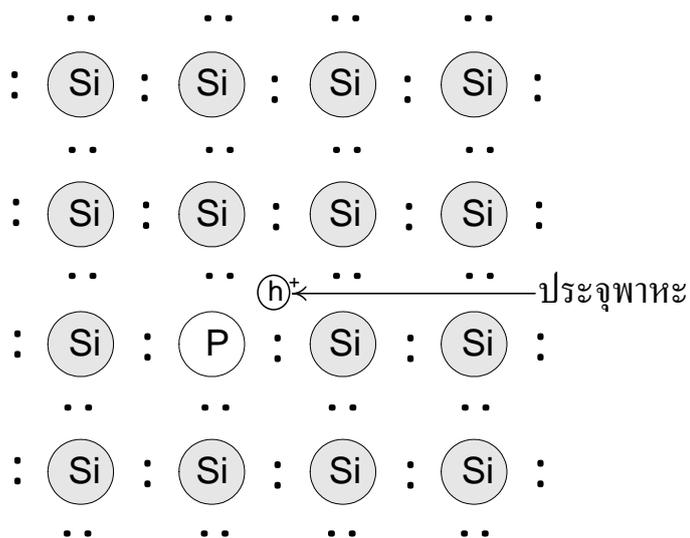
สารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่ถูกเจือด้วยธาตุในหมู่ V ตารางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส จะมีอิเล็กตรอนที่วงโคจรชั้นนอกสุดจำนวน 5 ตัว และ ทำให้มีอิเล็กตรอนเกินมา 1 ตัว กลายเป็น “อิเล็กตรอนอิสระ”



รูปที่ 2.3 แบบจำลองพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนที่มีการเพิ่มสารเจือในหมู่ V ของตารางธาตุ และจำนวนประจุพาหะ อิเล็กตรอน

ซิลิคอนชนิดพี(p-type silicon)

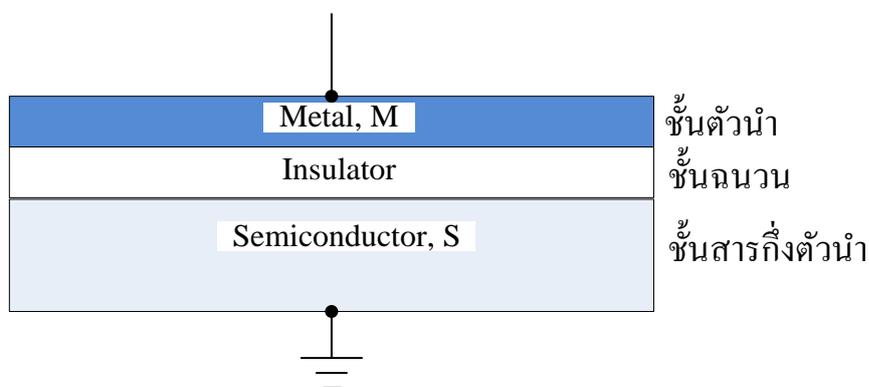
สารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่ถูกเจือด้วยธาตุในหมู่ III ตารางธาตุ เช่น โบรอน จะมีอิเล็กตรอนที่วงโคจรชั้นนอกสุดจำนวน 3 ตัว และ ทำให้เกิดโฮล 1 ตัว ส่งผลให้สารซิลิคอนชนิดพี มีจำนวนโฮลมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.4 แบบจำลองพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนที่มีการเพิ่มสารเจือในหมู่ III ของตารางธาตุ และจำนวนประจุพาหะ โฮล เพิ่มขึ้น

2.2 โครงสร้างของมอส[1]

คำว่า “มอส (Metal Oxide Semiconductor, MOS)” เป็นโครงสร้างวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิด คือ โลหะ ฉนวนออกไซด์ และ สารกึ่งตัวนำซิลิคอน ดังแสดงรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอส ประกอบด้วย ชั้นโลหะตัวนำ ชั้นฉนวน และ ชั้นสารกึ่งตัวนำ

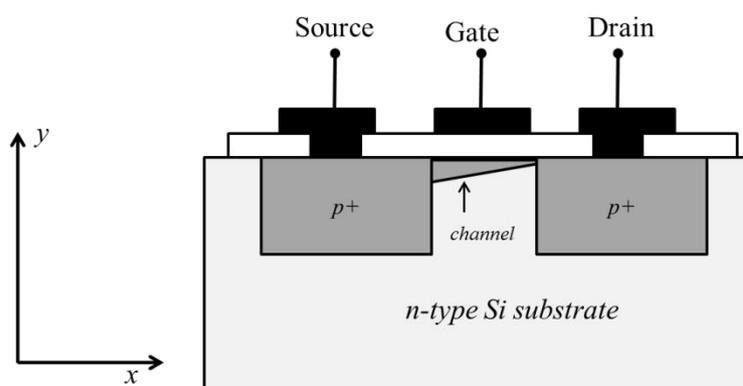
ชั้นตัวนำ เป็นชั้นฟิล์มบางโลหะที่อยู่ชั้นบนสุด เช่น ฟิล์มโลหะอลูมิเนียม(Al)

ชั้นฉนวนออกไซด์ เป็นชั้นฟิล์มบางฉนวนออกไซด์ อยู่ระหว่างชั้นตัวนำ กับ ชั้นสารกึ่งตัวนำ เช่น ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2)

ชั้นสารกึ่งตัวนำ เป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ อยู่ชั้นล่างสุด เช่น ซิลิคอน(Si)

2.3 มอสทรานซิสเตอร์ (MOS Transistor)[1]

มอสทรานซิสเตอร์ หรือ มอสเฟท(MOS Field Effect Transistor, MOS FET) ที่นำโครงสร้างของมอสมาดัดแปลงมาใช้เป็นส่วนของ “เกต” ที่ใช้สนามไฟฟ้าควบคุมและเหนี่ยวนำให้เกิด ช่องทางเดินกระแสระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอส ที่เรียกว่า “แชนแนล (channel)” หรือ ชั้นกลับ (inversion layer) การควบคุมความปริมาณของประจุพาหะที่ แชนแนล โดยการใช้แรงดันที่ขั้วเกต ซึ่งจะสามารถควบคุมค่ากระแสที่ไหลผ่านระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอส

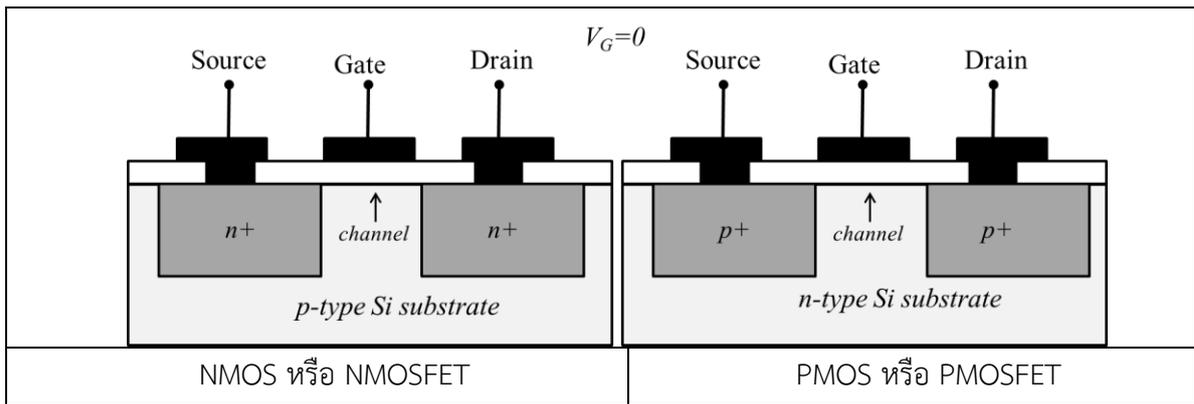


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของพีมอสทรานซิสเตอร์

2.3.1 ประเภทของมอสเฟท

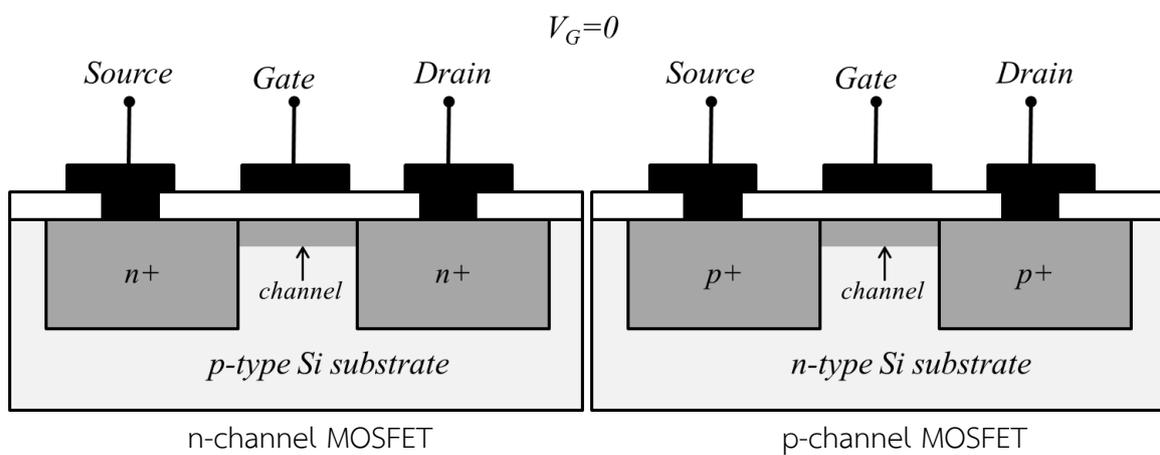
มอสเฟทแบ่งได้เป็น 2 ประเภท จากโหมดการทำงาน และ ลักษณะสมบัติ คือ

1. มอสเฟทประเภทเอ็นฮานซ์เมนต์(Enhancement MOSFET) เป็นมอสเฟทที่ไม่มีแชนแนล(channel) ที่แรงดันตกร่อมเกตเท่ากับศูนย์ ($V_G=0$ V) และไม่มีกระแสไหลจากขั้วเดรนไปซอส แต่ถ้ามีแรงตกร่อมเกตมากพอ สนามไฟฟ้าที่ขั้วเกตจะไปเหนี่ยวนำให้แชนแนลที่ผิวของซิลิคอนและเชื่อมต่อระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอส



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของฟิโอมสทรานซิสเตอร์ และ ฟิโอมสทรานซิสเตอร์ แบบเอ็นฮานซ์เมนต์

2. มอสเฟทประเภทดีพลีชัน(Depletion MOSFET) เป็น มอสเฟทที่แชนเนลเชื่อมระหว่างขั้วเดรนกับซอส โดยการแพร่สารเจือ(Diffused Channel MOSFET) ทำให้กระแสไหลได้ ที่แรงดันตกร่อมเกณฑ์เท่ากับศูนย์ ($V_G = 0$ V)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของฟิโอมสทรานซิสเตอร์ และ ฟิโอมสทรานซิสเตอร์ แบบดีพลีชัน

ชนิดของพาหะที่กระแสในมอสเฟทมี 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล จึงแบ่งมอสเฟทได้ 2 ชนิด คือ มอสเฟทชนิดเอ็นแชนเนล(*n-channel MOSFET*) หรือ เอ็นมอส(NMOS) และ มอสเฟทชนิดพีแชนเนล (*p-channel MOSFET*) หรือ เอ็นมอส(NMOS)

2.3.2 การทำงานและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของมอสเฟตชนิดเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์

ในการพิจารณาการทำงานของมอสเฟตโดยจะใช้แรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) ซึ่งจะมีผลต่อ การเกิดเขตปลอดพาหะ(depletion region) และการเกิดแขนแนลชนิดเอ็นใต้ผิวสัมผัสระหว่าง ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) กับ ซิลิคอน(Si) ผลของความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})กับ แรงดันเดรน (V_{DS})

การทำงานของมอสเฟตสามารถแบ่งได้ตามการให้แรงดันที่ขั้วเกตดังนี้

กรณีที่ 1 : $0 < V_{GS} < V_{TH}$ และ $V_{DS} > 0$ จะได้กระแสเดรน $I_{DS} = 0$

ให้ค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})ค่าหนึ่ง แต่ก่นน้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม(Threshold Voltage, V_{TH}) จะทำให้ไม่เกิดแขนแนลชนิดเอ็นใต้ผิวขั้วเกตที่จะเชื่อมระหว่างขั้วซอส(Source)กับเดรน(Drain) จะได้กระแสเดรน $I_{DS} = 0$ และมอสอยู่ในสภาวะ คัทออฟ(cut off)

กรณีที่ 2 : $V_{GS} > V_{TH}$ และ $V_{DS} > 0$ แต่มีค่าต่ำ และ จะได้กระแสเดรน I_{DS} ต่ำ

ให้ค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS})ค่าหนึ่ง แต่มากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม(Threshold Voltage, V_{TH}) จะทำให้เกิดแขนแนลชนิดเอ็น หรือ n-type inversion layer ใต้ผิวขั้วเกตที่จะเชื่อมระหว่างขั้วซอส(Source)กับเดรน(Drain) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นประจุบางๆ หรือ แผ่นหนา ขึ้นกับกับ ค่าแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) และให้ค่าแรงดันเดรน $V_{DS} > 0$ แต่มีค่าต่ำ จะได้กระแสไหล I_{DS} ต่ำ มีลักษณะเป็นเชิงเส้น(linear region) แสดงดังสมการ (2.1)

$$I_{DS} = \frac{V_{DS}}{R_{n_ch}} \quad (2.1)$$

R_{n_ch} เป็นค่าความต้านทานของแขนแนล (channel resistance)

กรณีที่ 3 : $V_{GS} > V_{TH}$ และ $V_{DS} = V_{DS(sat)}$

การเพิ่มค่าแรงดัน V_{DS} ในช่วงแรกเริ่มต้นค่ากระแส I_{DS} มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น แต่เมื่อเพิ่มค่าแรงดัน V_{DS} ค่ากระแส I_{DS} มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น จนถึงค่าแรงดันอิ่มตัว (Saturation Drain Voltage , $V_{DS(sat)}$) หรือ แรงดันพินช์ออฟ (Pinch Off Voltage , V_P) แสดงดังสมการ

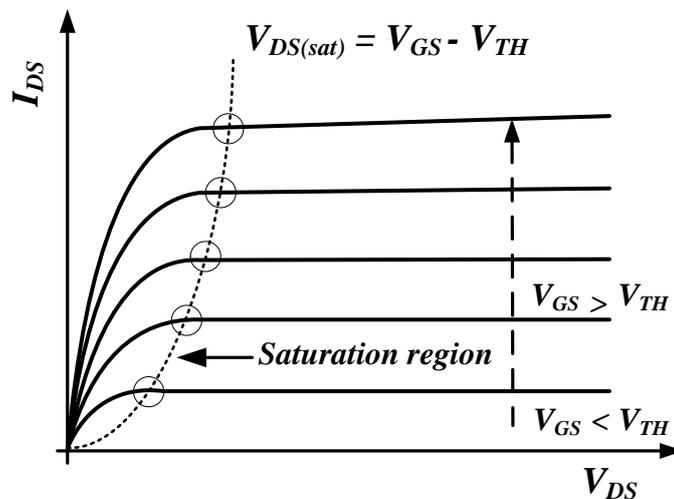
$$V_P = V_{DS(sat)} = (V_{GS} - V_{TH}) \quad (2.2)$$

ค่าแรงดันเดรนอิ่มตัว $V_{DS(sat)}$ นั้นจะแปรตามค่าแรงดันที่เกต V_{GS} ดังสมการที่ (2.2) ในส่วนของค่ากระแสเดรนอิ่มตัว ($I_{DS(sat)}$) นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม $V_{DS(sat)}$ แสดงดังสมการที่(2.3)

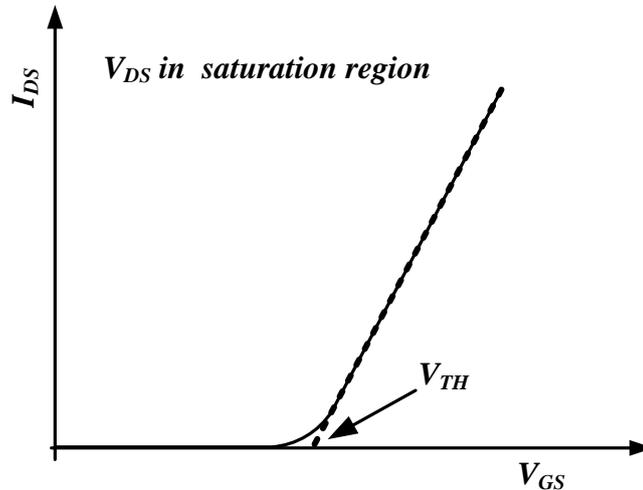
$$I_{DS(sat)} = \frac{V_{DS(sat)}}{R_{eff}(n_{ch})} = \frac{V_{GS} - V_{TH}}{R_{eff}(n_{ch})} \quad (2.3)$$

ดังนั้นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสเดรน I_{DS} และแรงดัน V_{DS} ของมอสเฟตชนิดเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เม้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.16

สำหรับรูปที่ 2.17 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของระหว่างแรงดันเกต กับ กระแสเดรน ($I_{DS}-V_{GS}$) ซึ่งสามารถใช้หาค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH})ได้



รูปที่ 2.9 คุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดัน V_{DS} กับ กระแสเดรน I_{DS} ที่แรงดันเกตคงที่ ที่ค่าต่างกันของมอสเฟตชนิดเอ็นแซนแนล



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_{DS}) ที่สภาวะอิ่มตัว ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH})

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเดรน V_{DS} กับ กระแสเดรน I_{DS} แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงไม่อิ่มตัว(Non-Saturation Region) และ ช่วงย่านอิ่มตัว (Saturation Region)

กรณีที่ ช่วงไม่อิ่มตัว(Non- Saturation Region) ซึ่งค่าแรงดัน $V_{DS} \leq V_{GS} - V_{TH}$ ค่ากระแสเดรน I_{DS} จะมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น ดังสมการ

$$I_{DS} = \beta[(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}] \quad (2.4)$$

ที่ค่า V_{DS} ต่ำมาก ($V_{DS}^2 \cong 0$) จะได้สมการใหม่ คือ

$$I_{DS} = \beta(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} \quad (2.5)$$

กรณีที่ ช่วงอิ่มตัว(Saturation Region) ซึ่งค่าแรงดัน $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ ค่ากระแสเดรน I_{DS} จะไม่มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น ดังสมการ

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (2.6)$$

ขณะที่ β เป็นพารามิเตอร์ของมอสเฟท

$$\beta = C_{OX}\mu_n \frac{W}{L} \quad (2.7)$$

เมื่อ μ_n เป็นค่าสภาพคล่องของประจุพาหะ,

C_{ox} เป็นค่าความจุทางไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่,

W เป็นความกว้างของเกต,

L เป็นความยาวของเกต,

ค่าแรงดันขีดเริ่ม หรือ Threshold voltage, V_{TH} เป็นค่าแรงดันที่ให้กับขั้วเกตน้อยที่สุด แล้วทำให้เกิดชั้นกลับ (Inversion layer) ที่อยู่ในสภาวะ สตรองอินเวอร์ชัน (Strong inversion layer) โดยที่แรงดันที่เกต จะทำให้ได้ตามสมการ(2.8)

$$\phi_S = 2\phi_F \quad (2.8)$$

ϕ_S = เป็นศักย์ที่ผิว (Surface energy)

ϕ_F = เป็นศักย์เฟอร์มิ (Fermi potential)

กลไกการเกิดเอ็นแชนแนลของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วเกต V_{GS} โดยมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นฉนวนไดอิเล็กตริก ที่แผ่นโลหะของขั้วเกตจะมีประจุบวกสะสมอยู่ และทำให้มีการดึงประจุลบ (อิเล็กตรอนในเนื้อซิลิคอนชนิดพี) แล้วผลักประจุบวก (โฮลในเนื้อซิลิคอนชนิดพี) ออกไป ซึ่งจะเกิดตรงบริเวณใต้ผิวของเกตซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) จะได้ชั้นแชนแนลชนิดเอ็นเป็นสะพานเชื่อมระหว่างซอส (Source) กับเดรน (Drain) นอกจากนั้นแล้วยังเกิดบริเวณปลอดพาหะ (W_D) ดังสมการ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_S \phi_S}{qN_A}} \quad (2.9)$$

ที่บริเวณปลอดพาหะใต้พื้นที่เกต ค่าประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$Q = qN_A W_D = \sqrt{2qN_A \epsilon_S \phi_S} \quad (2.10)$$

ที่ $\phi_S = 2\phi_F$ จะทำให้เกิดสภาวะ สตรองอินเวอร์ชัน

ขนาดของแชนแนล นั้นสามารถเพิ่มหรือลดได้ โดยการควบคุมค่าแรงดันที่ V_{GS} ที่ไม่มีการให้แรงดันที่ฐานรองซิลิคอน บริเวณปลอดพาหะมีประจุไฟฟ้า (Q_{dm}) หาได้ดังสมการ

$$Q_{dm} = \sqrt{2qN_A\epsilon_S(2\phi_F)} \quad (2.11)$$

และกรณีที่มีการให้แรงดันที่ฐานรอง V_{BS} สำหรับเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ที่ศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดสตรองอินเวอร์ชันจะได้ “ $(2\phi_F + V_{BS})$ ” มีผลให้ประจุไฟฟ้าที่สะสมที่บริเวณปลอดพาหะ (Q_d) ใหม่ คือ

$$Q_d = \sqrt{2qN_A\epsilon_S(2\phi_F + V_{BS})} \quad (2.12)$$

ดังนั้นจึงสามารถหาค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH})

$$\begin{aligned} V_{TH} &= \phi_{ms} + 2\phi_F + \frac{Q_{dm}}{C_{OX}} - \frac{Q_{ss}}{C_{OX}} \\ &= \phi_{ms} + 2\phi_F + \frac{Q_{dm}}{C_{OX}} - \frac{Q_{ss}}{C_{OX}} + \frac{Q_{dm} - Q_d}{C_{OX}} \\ &= V_{TO} + \gamma(\sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} V_{TO} &= \phi_{ms} + 2\phi_F + \frac{Q_{dm}}{C_{OX}} - \frac{Q_{ss}}{C_{OX}} \\ V_{TO} &= \phi_{ms} + 2\phi_F + \frac{Q_{dm}}{C_{OX}} - \frac{Q_{ss}}{C_{OX}} \\ \gamma &= \frac{1}{C_{OX}} \sqrt{2q\epsilon_S N_A} \\ \gamma &= \frac{1}{C_{OX}} \sqrt{2q\epsilon_S N_A} \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.4 ทรานส์คอนดักแตนซ์(Transconductance , g_m) หรือ ความนำถ่ายโอน

เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอสทรานซิสเตอร์ตัว ที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการทำงาน หาได้จากนิยามว่าเป็น “อัตราส่วนระหว่าง การเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรน(I_{DS})กับ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเกต(V_{GS})ในขณะที่แรงดันเดรนคงที่”

$$g_m \equiv \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}, \quad V_{DS} = \text{constant} \quad (2.15)$$

ค่าของความนำถ่ายโอนตาม สมการที่ 2.15 สามารถเทียบกับอัตราการขยายของมอสทรานซิสเตอร์ โดยพิจารณาจากแบบกฎกำลังสอง ในช่วงอิมิตัว และ เชิงเส้น แทนค่าตามสมการ (2.5) ในสมการ (2.15) จะได้ค่าความนำถ่ายโอนในช่วงเชิงเส้นเป็น

$$g_m(\text{linear}) = \beta V_{DS} = C_{OX}\mu_n \frac{W}{L} V_{DS} \quad (2.16)$$

ค่าความนำถ่ายโอนในช่วงเส้น ตามสมการ 2.16 พบว่า $g_m(\text{linear}) \propto V_{DS}$ ซึ่งจะไม่ขึ้นค่า V_{GS}

สำหรับมอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงอิมิตัว และค่ากระแสเดรนอิมิตัว($I_{DS(sat)}$) ลงในสมการ (2.15) จะได้ค่าความนำถ่ายโอนในช่วงอิมิตัว ดังสมการ (2.17)

$$g_m(\text{sat}) = \beta(V_{GS} - V_{TH}) = C_{OX}\mu_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) \quad (2.17)$$

ค่าความนำถ่ายโอนในช่วงอิมิตัวตามสมการที่ (2.17) พบว่า $g_m(\text{sat}) \propto V_{GS}$ ซึ่งจะไม่ขึ้นค่า V_{DS}

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

3.1 การออกแบบมอสทรานซิสเตอร์(MOS transistor)

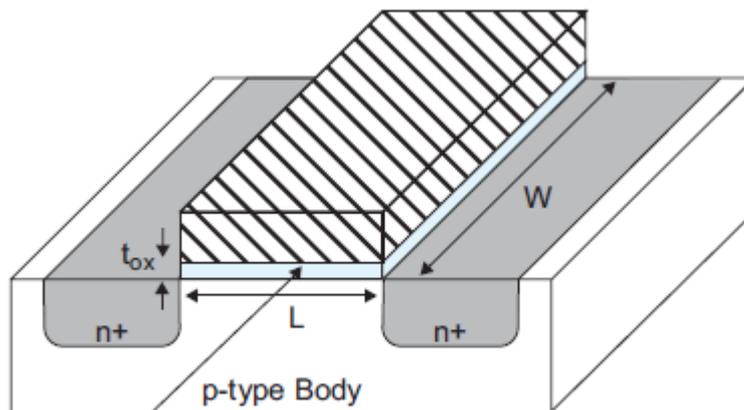
การออกแบบมอสทรานซิสเตอร์ จะทำตามกฎของการออกแบบ(Design rules)[2] ตามกระบวนการสร้างมอสเทคโนโลยี 0.8 μm โดยการออกแบบจะเน้นไปที่ลักษณะทางเรขาคณิต คือ ความกว้าง(W) กับ ความยาว(L) และตัวแปรอื่นๆลงบนกระจกมาส์กต้นแบบ นั้น จะต้องสัมพันธ์กับกระบวนการสร้าง และ คุณลักษณะทางไฟฟ้าด้วย

การกำหนดขนาดความกว้างและความยาว(W/L) เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้า ตามตารางที่

3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดความกว้างและความยาว(W/L)

W (μm)	L(μm)
40	40, 10, 3.0, 1.2 1.0, 0.8, 0.6
40, 10, 3.0, 1.2 1.0, 0.8, 0.6	40



รูปที่ 3.1 โครงสร้างลักษณะทางเรขาคณิตของมอสทรานซิสเตอร์[3]

ในการออกแบบต้องเป็นไปตาม กฎการออกแบบ ของมอสทรานซิสเตอร์เทคโนโลยี 0.8 μm โดยการออกแบบลงวาดลายลงบนกระจกต้นแบบ(Photomask) ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

1. ระยะห่างระหว่าง PAD กับ PAD, ขนาดความกว้างยาว PAD ต่ำสุด 90 μm
2. ระยะห่างระหว่าง โลหะ กับ โลหะ, ขนาดความกว้างยาว โลหะ ต่ำสุด 3 λ
3. พื้นที่ Active, ระยะโลหะที่เกย กับ ช่องรูเชื่อมต่อบนเกต ต่ำสุด 1 λ
5. ระยะเกต, พื้นที่ Active ที่เกย กับ ช่องรูเชื่อมต่อ ต่ำสุด 1.5 λ

6. พื้นที่ Active, ความกว้างบริเวณแพร่สารเจือต่ำสุด	3λ
7. . พื้นที่ Active กับ ระยะของบริเวณแพร่สารเจือที่เกยต่ำสุด	2λ
8. ระยะห่าง ช่องรูเชื่อมต่อกับเกต, ความกว้างช่องรูเชื่อมต่อต่ำสุด	2λ
9. ระยะห่าง ช่องรูเชื่อมต่อ กับ ช่องรูเชื่อมต่อ ต่ำที่สุด	2λ
10. ระยะของบริเวณแพร่สารเจือที่เกย กับ ช่องรูเชื่อมต่อ ต่ำสุด (1λ)	1λ
11. ขนาดความกว้างของเกตและระยะที่ เกต ขยายเกินเข้าไปพื้นที่ Active ต่ำสุด	2λ
12. ระยะห่างของ เกต กับ เกต ต่ำสุด	3λ
13. ระยะห่างของ เกต กับ พื้นที่ Active ต่ำสุด	1λ
14. ความกว้างของ Active, ระยะห่างของพื้นที่ Active กับ Active และระยะห่างของพื้นที่ Active ที่เป็นช่องรูเชื่อมต่อของ บ่อแยก(Well) กับขอบ บ่อแยก(Well) ต่ำสุด	3λ
15. ระยะห่างของพื้นที่ Active กับ ขอบบ่อแยก(Well) ต่ำสุด	6λ
16. ระยะห่างต่ำสุดของพื้นที่ Active ที่มีสารเจือต่างชนิดกัน	4λ
17. ความกว้าง บ่อแยก (Well) ต่ำสุด	12λ
18. ระยะห่าง ต่ำสุดของ บ่อแยก(Well) ที่มีศักย์ต่างกัน	18λ
19. ระยะห่างต่ำสุดของ บ่อแยก(Well) ที่มีศักย์เหมือนกัน	6λ

หมายเหตุ λ = 0.4 μm

3.2 กระบวนการสร้างซีมอสทรานซิสเตอร์(CMOS transistor)

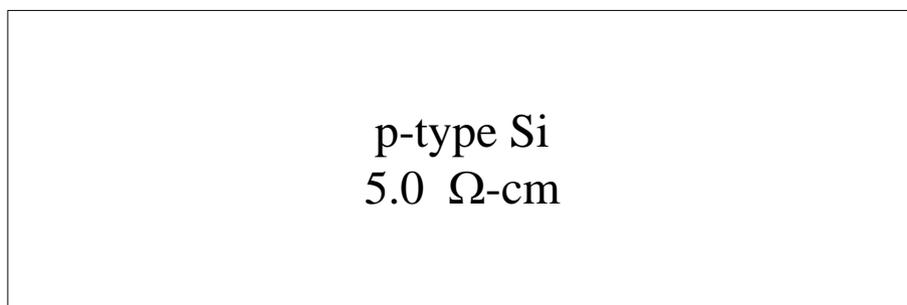
กระบวนการสร้างจะใช้เทคโนโลยีซีมอสทรานซิส 0.8 แบบบ่อแยกคู่(N-well และ P-well) โดยถูกสร้างที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี ระบาย(100) ที่สภาพความต้านทานประมาณ 5.0 Ω-cm. [4-5]

ลำดับแรกนำแผ่นซิลิคอนมาผ่านกระบวนการทำความสะอาด กระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี กระบวนการยิงฝังประจุไอออน เพื่อสร้างบ่อแยกคู่ บ่อแยกชนิดเอ็น(N-well) และ บ่อแยกชนิดพี(P-well) โดยบ่อแยกชนิดเอ็นจะยิงฝังประจุด้วยฟอสฟอรัส(Phosphorus) ที่ปริมาณความเข้มข้นสารเจือ $5.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และในส่วนบ่อแยกชนิดพีจะยิงฝังประจุด้วยโบรอน(Boron) ที่ปริมาณความเข้มข้นสารเจือ $9.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ต่อจากนั้นสร้างฟิล์ม โลคอส หรือ LOCOS(Local Oxidation on Silicon) ซึ่งเป็นส่วนแยกขาดของไฟฟ้า และผลของ LOCOS จะขยายเขตลูกไปยังส่วนพื้นที่ Active Area(พื้นที่สำหรับสร้าง มอสทรานซิสเตอร์) ถูกเรียกว่า “Bird’s Break” หรือ “จะงอยปากนก”แสดงดังรูปที่ 3.2 ถึง รูปที่ 3.4

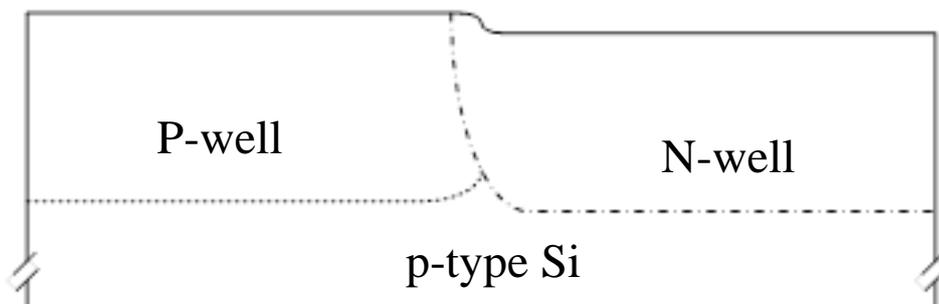
การสร้างมอสจะสร้างตรงบริเวณ Active area ของบ่อแยก(well) ใช้ความหนาของเกตออกไซด์ 15 nm และความหนาของฟิล์มโพลีซิลิคอน 350 nm ต่อจากนั้นจึงฝังประจุเพื่อปรับเปลี่ยนค่าแรงดันขีดเริ่มทั้ง เอ็นมอส และ พีมอส มีค่าใกล้เคียงกัน ± 0.7 V โดยที่ เอ็นมอส ฝังประจุด้วย ฟอสฟอรัส ส่วน พีมอส ฝังประจุด้วย โบรอน

ก่อนที่จะสร้างส่วนของ ซอส(Source, S) และ เดรน(Drain, D) จะสร้าง LDD(lightly doped drain) โดยการฝังประจุที่ระดับพลังงานต่ำ ส่วนของ NMOS จะฝังด้วย ฟอสฟอรัส และ PMOS จะฝังด้วย B_2F หลังจากทำการสร้างขั้วเกต และ LDD เรียบร้อยแล้ว จะสร้างส่วนของ ซอส และ เดรน ในส่วนของ NMOS จะฝังประจุด้วย As และ พีมอส จะใช้ B_2F นำไปแอนนัลที่ 900 °C 40 นาที หลังจากนั้นสร้าง ชั้นฟิล์มออกไซด์ 650 nm ดังรูปที่ 3.5 ถึง 3.9

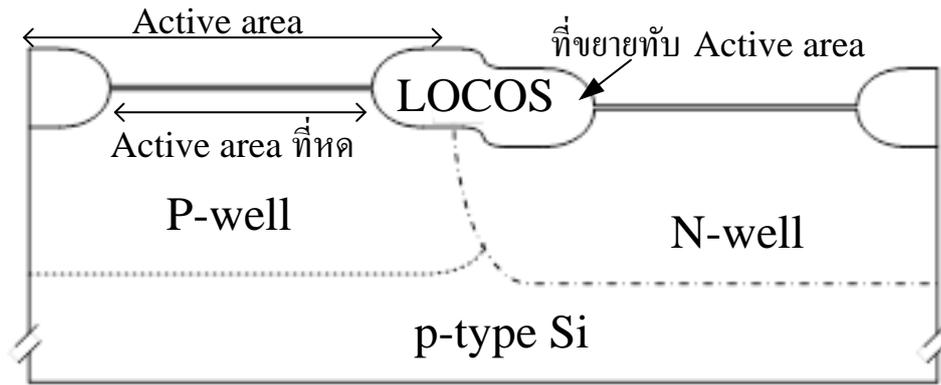
สำหรับการต่อเชื่อมโลหะกับขั้ว เกต เดรน และ ซอส ด้วยการกัดช่องที่ฟิล์มออกไซด์ แล้วเคลือบด้วยฟิล์ม Ti/TiN และตามด้วยโลหะชั้นแรก Al/TiN และ ฟิล์มออกไซด์อีกครั้งหนึ่ง แล้วกัดช่องเพื่อสร้างโลหะชั้นที่ 2 และเคลือบด้วย TiN ดังรูปที่ 3.10 ถึง 3.18



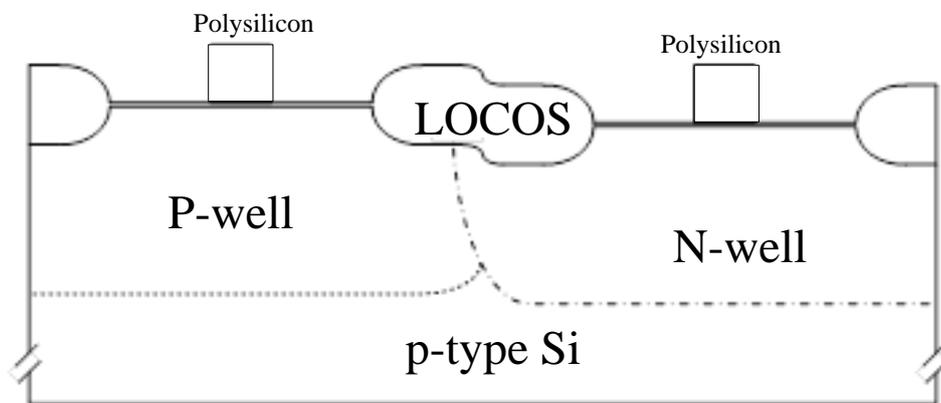
รูปที่ 3.2 แผ่นฐานรองซิลิคอน สภาพความต้านทาน 5.0 Ω-cm



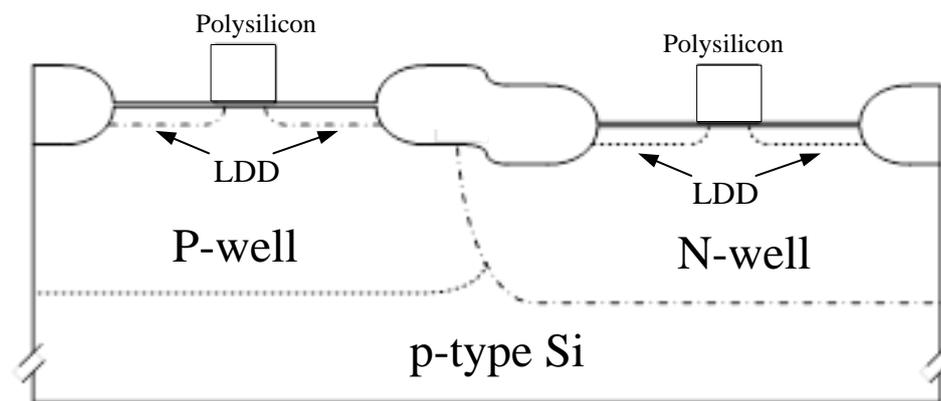
รูปที่ 3.3 การสร้างบ่อแยก N-well และ P-well



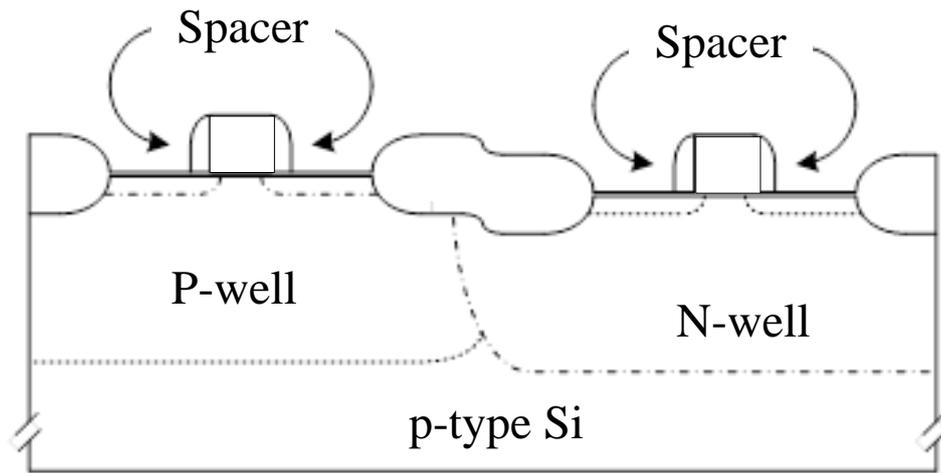
รูปที่ 3.4 การสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ LOCOS ทำให้พื้นที่ Active area ลดลง



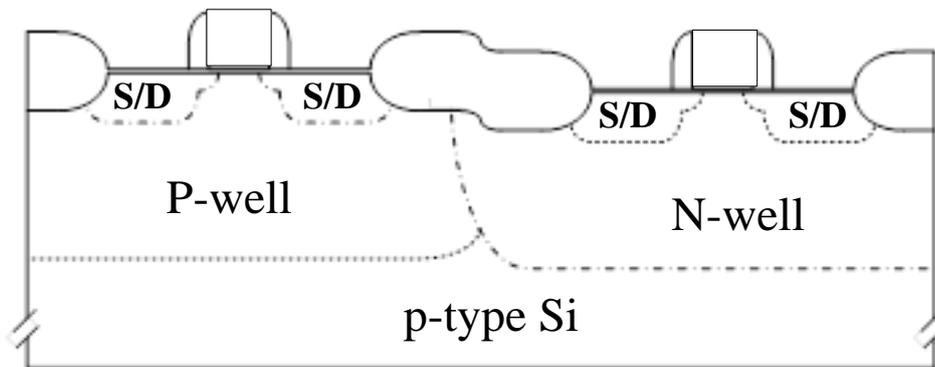
รูปที่ 3.5 การสร้างเกตด้วยฟิล์มโพลีซิลิคอน(polysilicon)



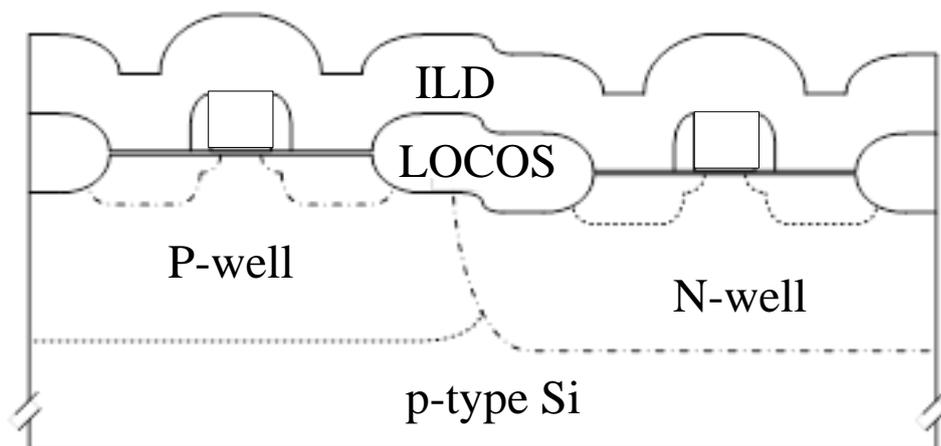
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการยิงฝังประจุ LDD



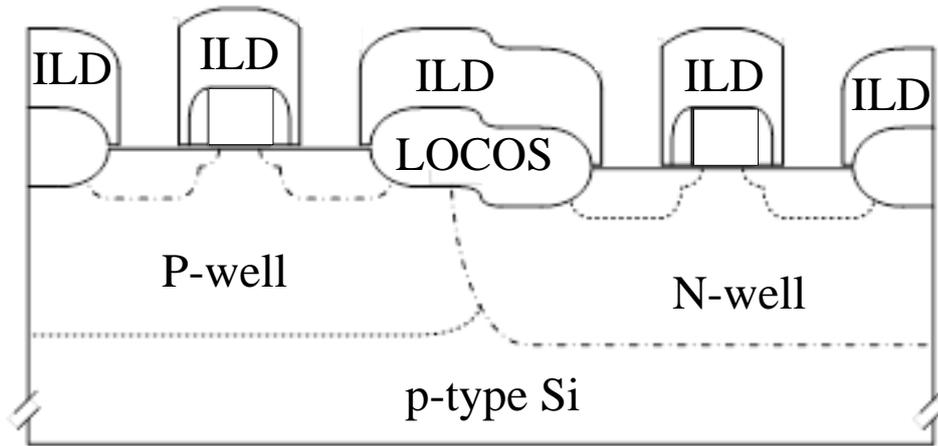
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการสร้าง Sidewall Spacer



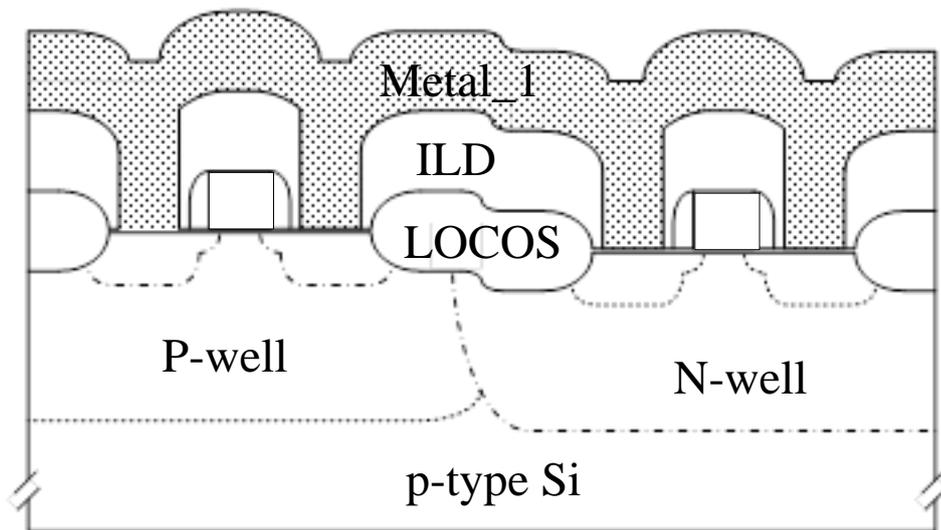
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการยิงฝังประจุส่วนซอส(Source, S)/เดรน(Drain, D)



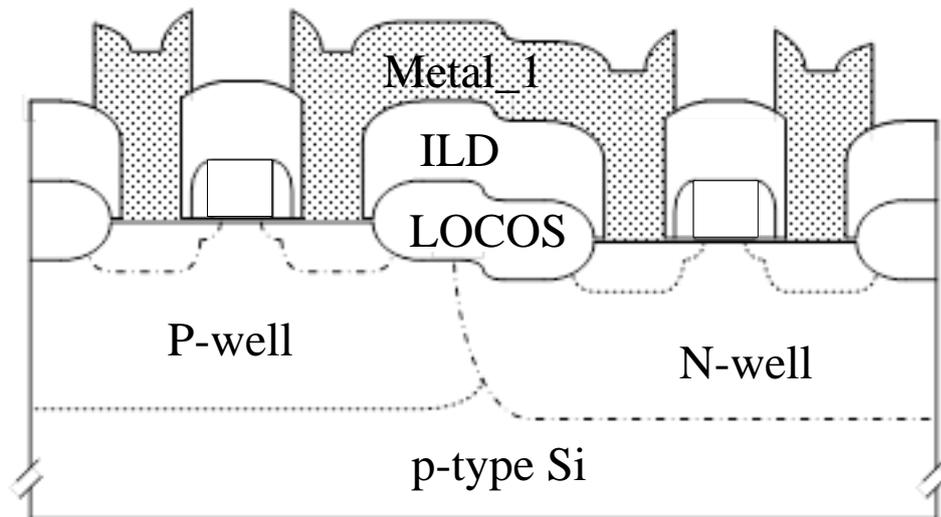
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการสร้างชั้นอินเตอร์เลเยอร์ไดอิเล็กทริก(ILD)



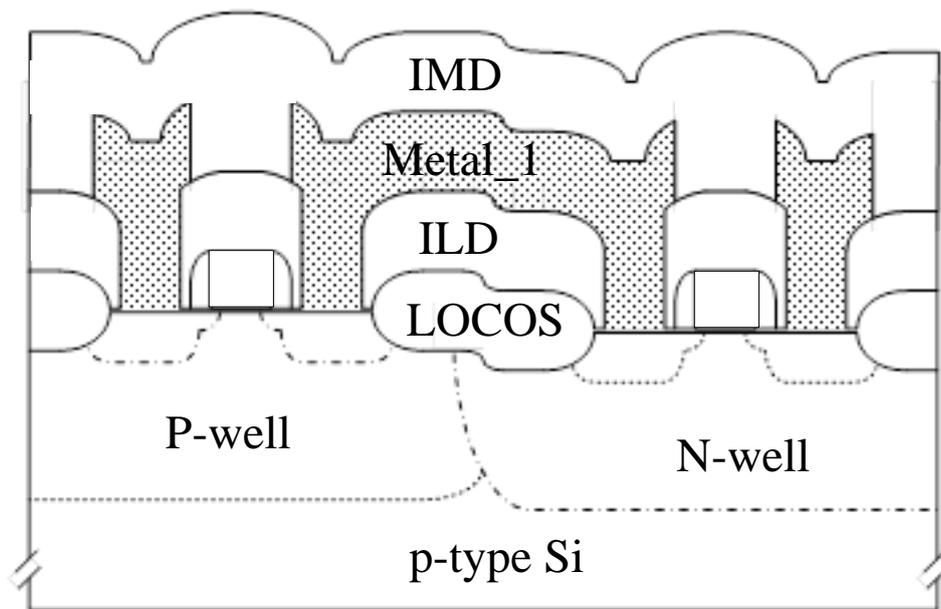
รูปที่ 3.10 การกัดช่องเชื่อมต่อ (Contact)



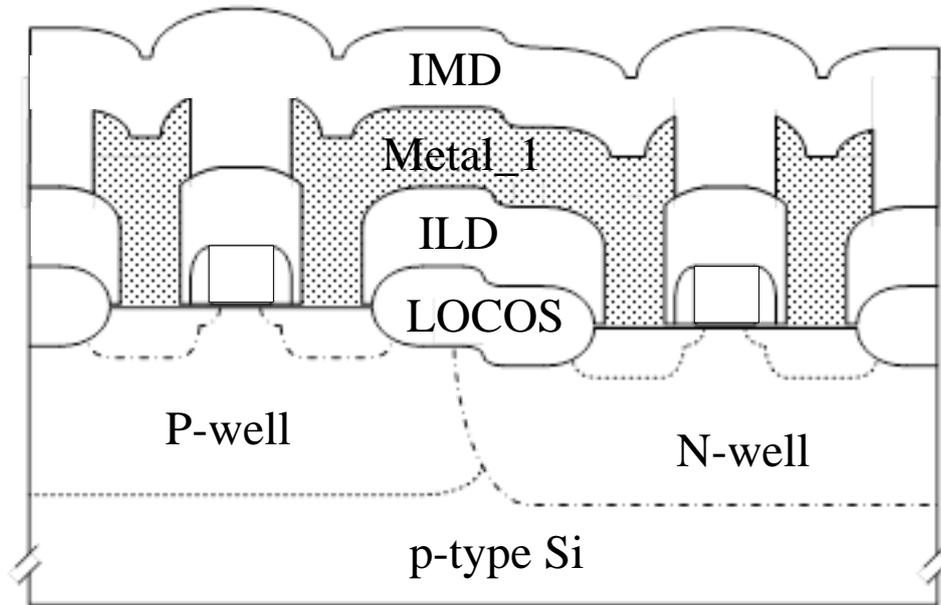
รูปที่ 3.11 การสร้างชั้นฟิล์มโลหะ 1(Metal_1)



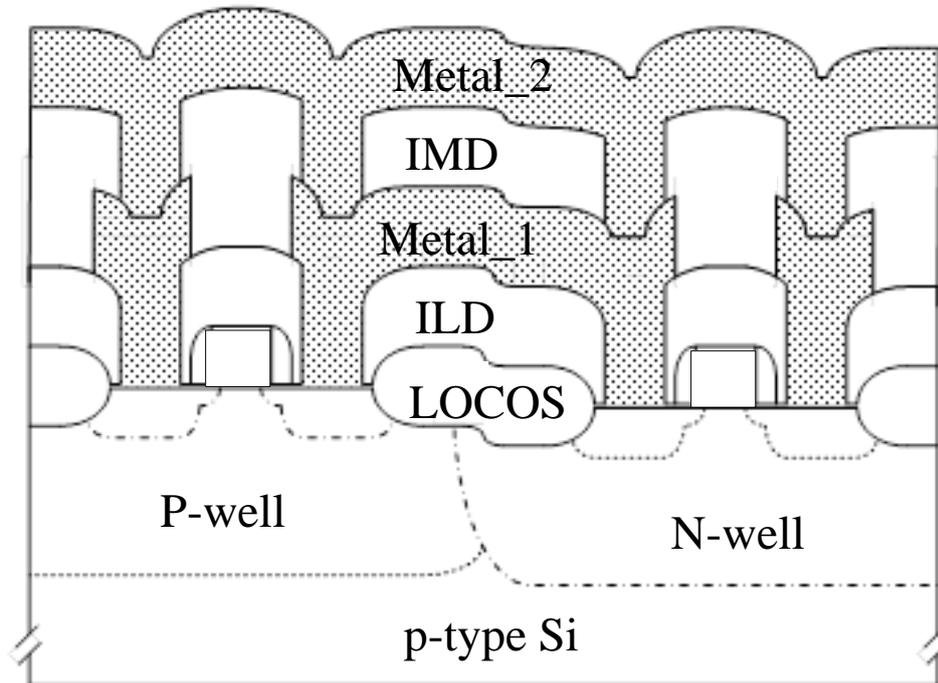
รูปที่ 3.12 การกัดละลายชั้นฟิล์มโลหะ 1 (Metal_1)



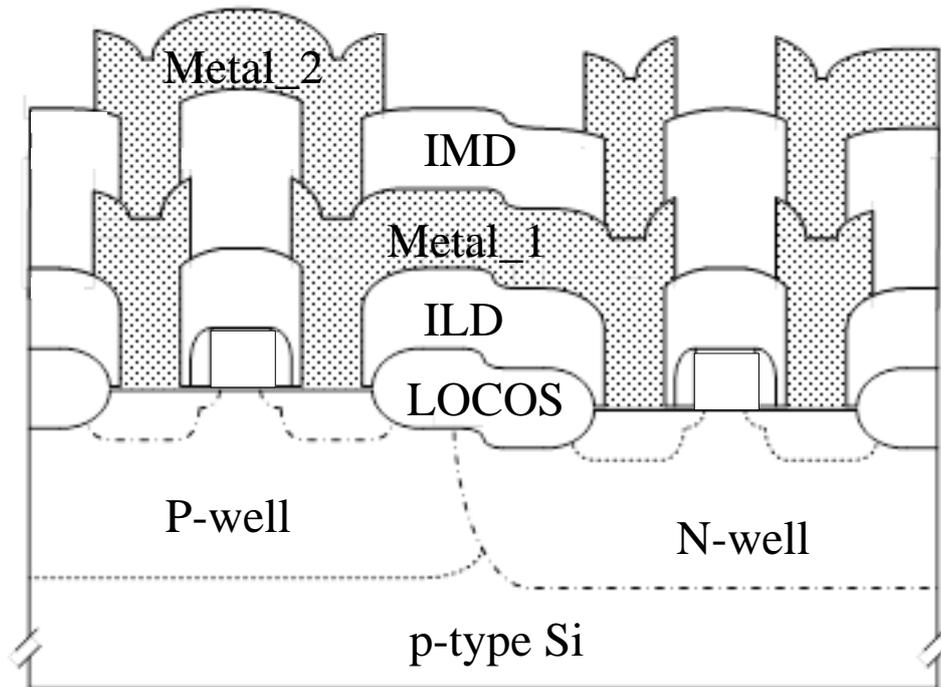
รูปที่ 3.13 การสร้างชั้นฟิล์มอินเทอร์เมเทิลไดอิเล็กตริก (Inter Media Dielectric)



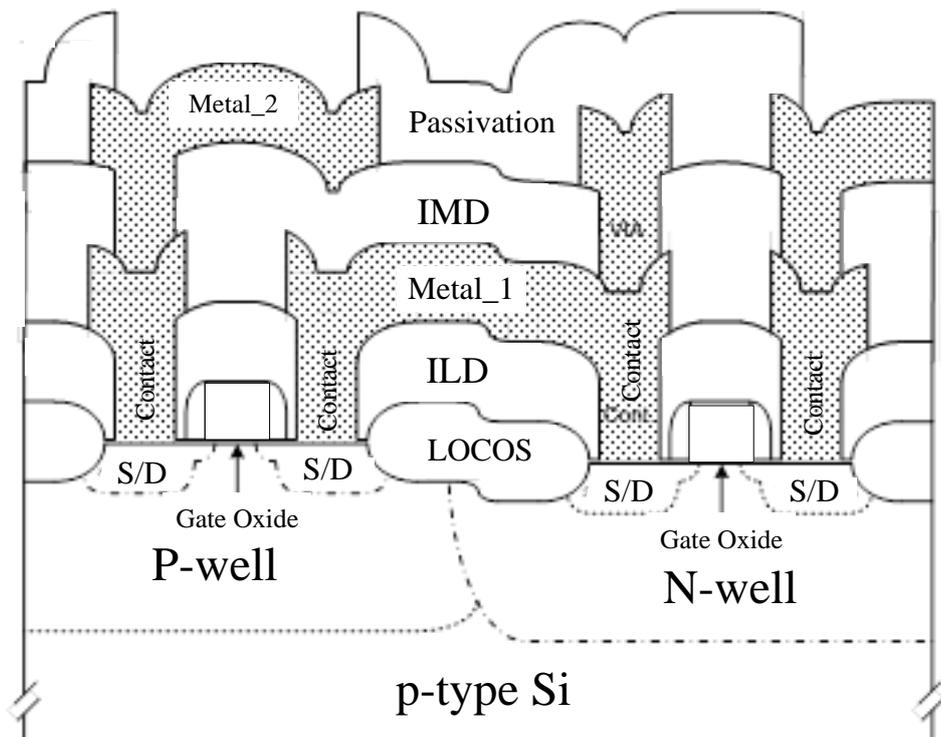
รูปที่ 3.14 การกัดช่องเพื่อเชื่อมต่อ Via



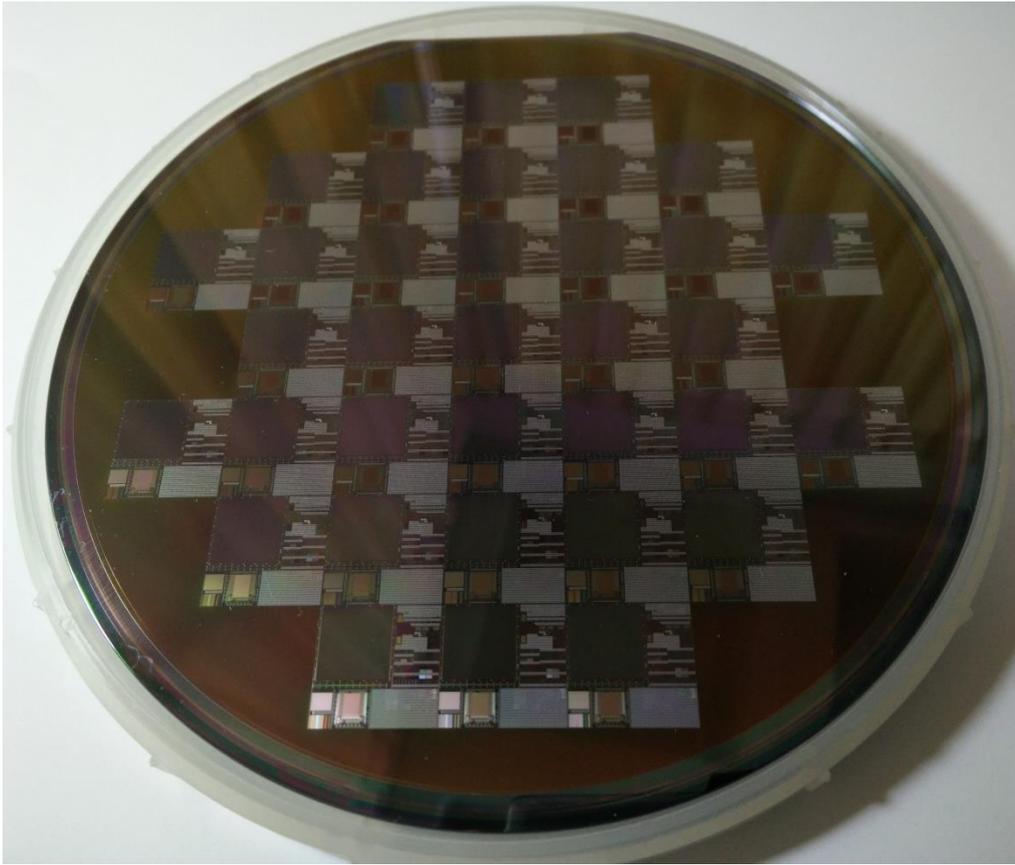
รูปที่ 3.15 การสร้างชั้นโลหะ 2 (Meatl_2)



รูปที่ 3.16 การกัดลวดลายชั้นฟิล์มโลหะ 2 (Metal_2)



รูปที่ 3.17 การสร้างชั้นฟิล์ม Passivation และเปิด PAD



รูปที่ 3.18 กระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยี CMOS $0.8\ \mu\text{m}$ โดยใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี ระนาบ (100)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการพัฒนาและการถอดแบบแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟทรระดับซัพไมครอน นั้นจะเริ่มจาก การจำลองกระบวนการสร้างและการจำลองผลทางไฟฟ้า ทั้งเอ็นมอสทรานซิสเตอร์และพีมอสทรานซิสเตอร์ โดยการใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD แล้วนำผลที่ได้จากจำลองกระบวนการสร้างไปทำการสร้างด้วยเทคโนโลยีระดับซัพไมครอน ต่อจากนั้นทำการวัดทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้า และสุดท้ายเป็นการหาแบบจำลองทางไฟฟ้าของทั้งเอ็นมอสทรานซิสเตอร์และพีมอสทรานซิสเตอร์

4.1 การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของซีมอสทรานซิสเตอร์

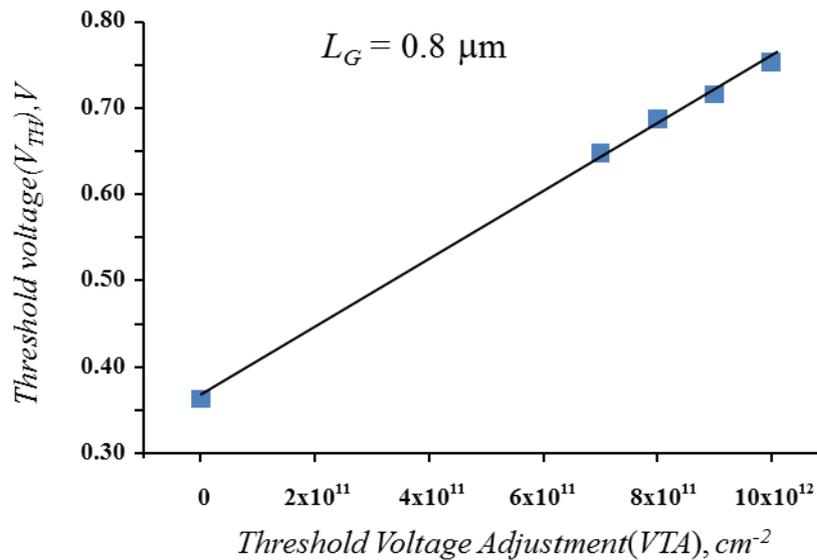
การจำลองผลทางไฟฟ้าของซีมอสทรานซิสเตอร์ โดยจะใช้โปรแกรม “Sentaurus TCAD”[36] โดยจะเน้นศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าทั้งเอ็นมอสทรานซิสเตอร์และพีมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งได้กำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มประมาณ ± 0.7 V จะควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสารที่แกนแนล หรือความเข้มข้น ช่องทางเดินของกระแส โดยการยิงฝังไอออนเพื่อปรับเปลี่ยนค่าแรงดันขีดเริ่ม(Threshold Voltage Adjustment, *VTA*)

เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ จะใช้แผ่นฐานรองซิลิคอน ชนิดพี ที่สภาพความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ บ่อแยก ชนิดพี(P-well) มีปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่ยิงฝังประจุสารเจือปริมาณ $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ โดยมีค่าความหนาเกตออกไซด์ (T_{ox}) 15 nm

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ บ่อแยกชนิด พี

ชนิดของตัวแปร	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ
บ่อแยกชนิด พี (P-well)	$6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
<i>VTA</i>	$0, 7 \times 10^{11}, 8 \times 10^{11}, \underline{9 \times 10^{11}}, 1 \times 10^{12}, \text{ cm}^{-2}$

การปรับเปลี่ยนค่า *VTA* ที่เหมาะสมบริเวณช่องทางเดินกระแส เพื่อปรับเปลี่ยนค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) ให้ได้ ~ 0.7 V แสดงดังรูปที่ 4.1 จากความสัมพันธ์ของกราฟพบว่า ค่า *VTA* ที่มีปริมาณสารเจือ $9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ มีค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH}) ~ 0.7 V



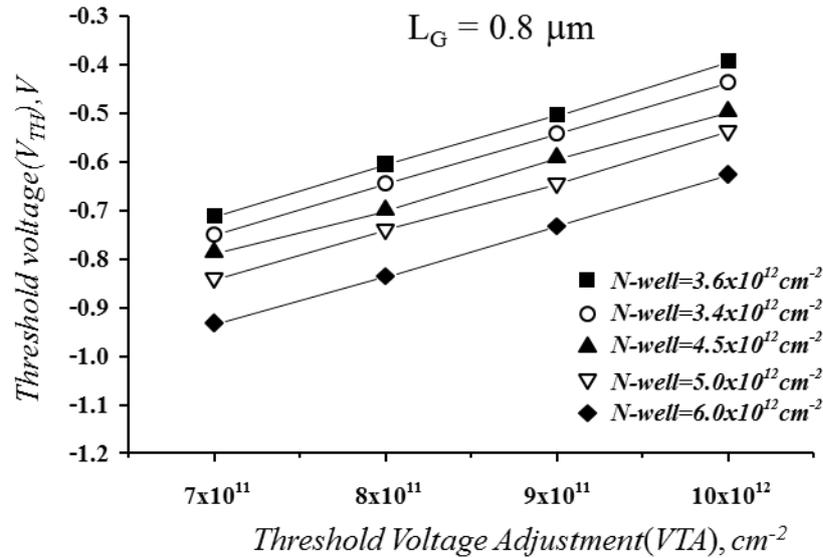
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นสารเจือโดยการยิงฝังประจุไอออน(VTA) ที่ช่องทางเดินกระแส กับ ค่าแรงดันขีดเริ่ม ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ที่ขนาดความยาวเกต(L) $0.8 \mu m$

พืมอสทรานซิสเตอร์ ใช้แผ่นฐานรองซิลิคอน ชนิดพี ที่สภาพความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ ระบาย (100)บ่อแยก ชนิดเอ็น(N-well) มีการเปลี่ยนแปลงสารเจือที่ปริมาณต่างๆ กำหนดค่าคงที่ปริมาณสารเจือโดยการยิงฝังประจุไอออน(VTA) และ กำหนดค่าความหนาเกตออกไซด์ (T_{ox}) 15 nm

ตารางที่ 4.2 ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ บ่อแยกชนิด เอ็น

ชนิดของตัวแปร	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ
บ่อแยกชนิด เอ็น(N-well)	$3.6 \times 10^{12}, 4 \times 10^{12}, 4.5 \times 10^{12}, \underline{5 \times 10^{12}}, 6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
VTA	$7 \times 10^{11}, 8 \times 10^{11}, \underline{9 \times 10^{11}}, 1 \times 10^{12}, \text{ cm}^{-2}$

การปรับเปลี่ยนค่า VTA ที่เหมาะสมบริเวณเซนแนล เพื่อปรับเปลี่ยนค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH}) ให้ได้ $\sim -0.7 \text{ V}$ แสดงดังรูปที่ 4.2 จากความสัมพันธ์ของกราฟพบว่า ค่า VTA ที่มีปริมาณสารเจือ $9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ และที่บ่อแยกชนิด เอ็น(N-well) มีปริมาณสารเจือ $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH}) $\sim -0.7 \text{ V}$



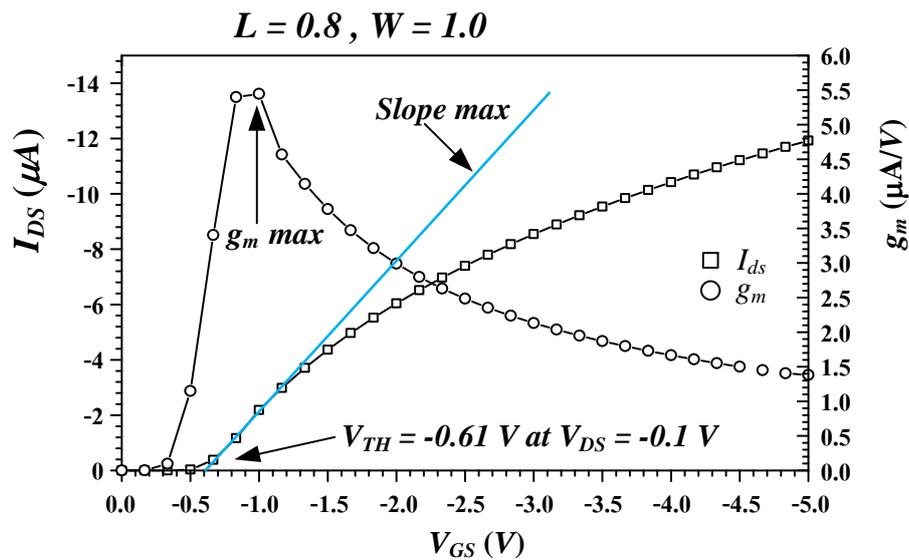
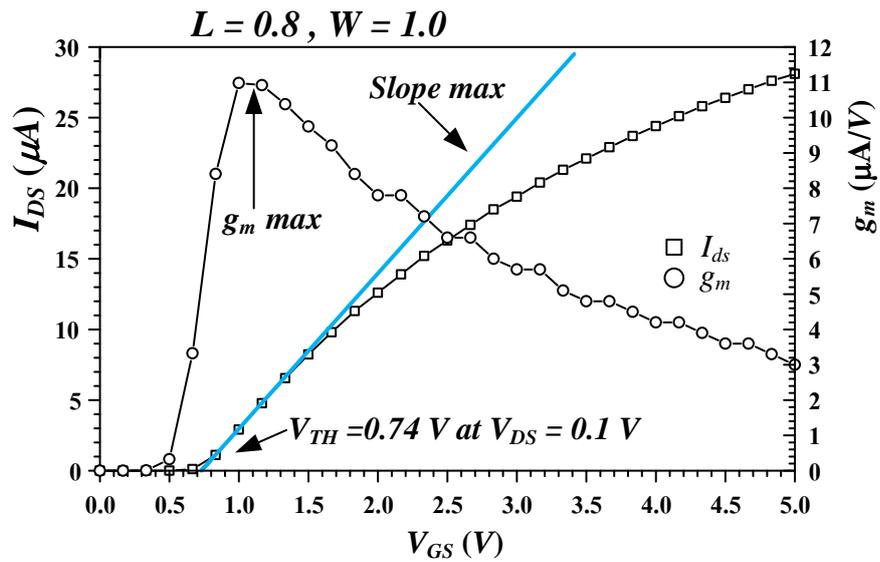
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเจือโดยการยิงฝังประจุไอออน(VTA) ที่แขนแนล ที่มีปริมาณสารเจือบ่อแยก ชนิด เอ็น ต่างๆ กับ ค่าแรงดันขีดเริ่ม ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ที่ขนาดความยาวเกต(L) $0.8 \mu\text{m}$

ในการออกแบบได้กำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH})ของซีมอสทรานซิสเตอร์ประมาณ $\pm 0.7 \text{ V}$ นั้นสามารถหาจากความสัมพันธ์ของกราฟ รูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 เพื่อกำหนดปริมาณสารเจือที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างจริง แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโดสยิงฝังประจุของสารเจือในบริเวณต่างๆ

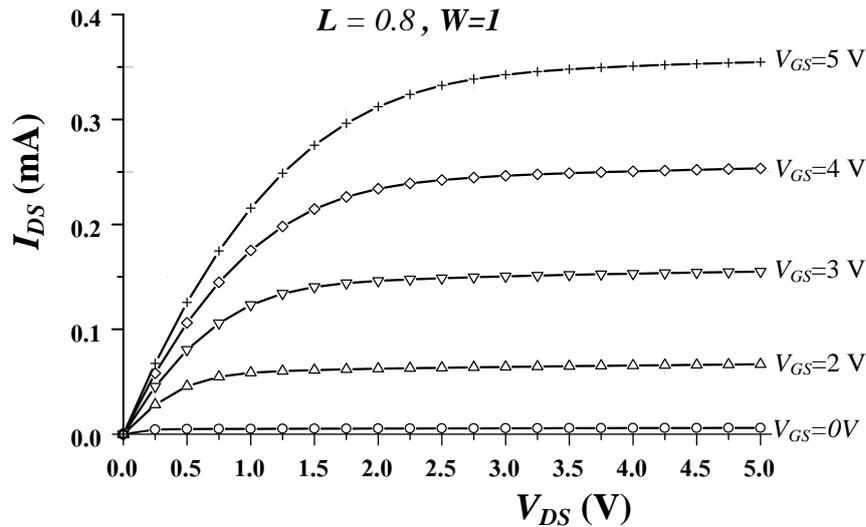
ชนิดของตัวแปร	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ
บ่อแยกชนิด พี(P-well)	$6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
บ่อแยกชนิด เอ็น(N-well)	$5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
VTA	$9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

จากการจำลองหาปริมาณสารเจือที่เหมาะสมได้ และ กระบวนการสร้างที่สมบูรณ์ ต่อจากนั้นจะดำเนินการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4

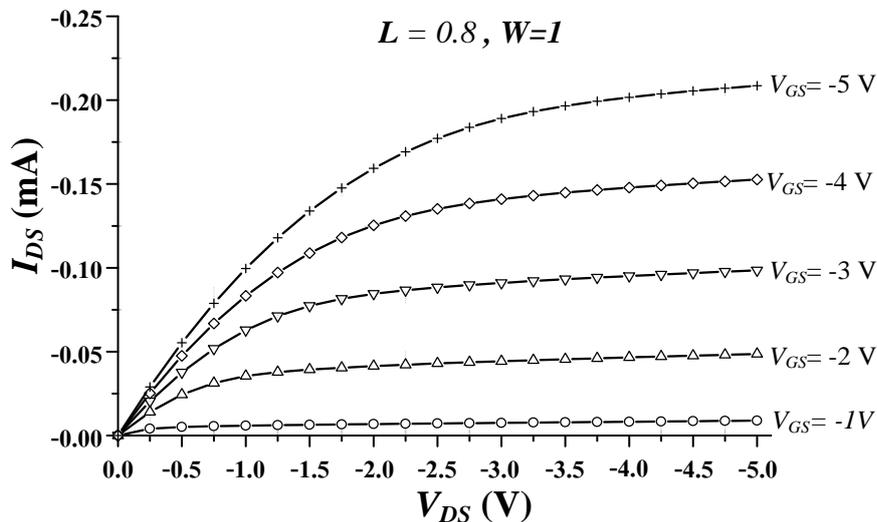


รูปที่ 4.3 กราฟจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเกต (V_{GS}) กับกระแสเดรน (I_{DS}) และ g_m

จากกราฟความสัมพันธ์ รูปที่ 4.3 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ 0.74 V และ ค่ากระแสเดรน (I_{DS}) ย่านอิ่มตัว 0.36 mA/ μm ที่ $V_{DS} = V_{GS} = 5$ V ในส่วนของกราฟความสัมพันธ์ รูปที่ 4.4 เป็นของพีมอสทรานซิสเตอร์ ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) -0.61 V และ ค่ากระแสเดรน (I_{DS}) ย่านอิ่มตัว -0.21 mA/ μm ที่ $V_{DS} = V_{GS} = 5$ V จากการจำลองกระบวนการสร้างซีมอสทรานซิสเตอร์เป็น ข้อมูลที่น่าสนใจที่จะใช้เป็นแนวคิดสำหรับกระบวนการสร้างในทางปฏิบัติการต่อไป



(ก) เอ็นมอสทรานซิสเตอร์



ข. พีมอสทรานซิสเตอร์

รูปที่ 4.4 กราฟจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน (I_{DS}) และ g_m

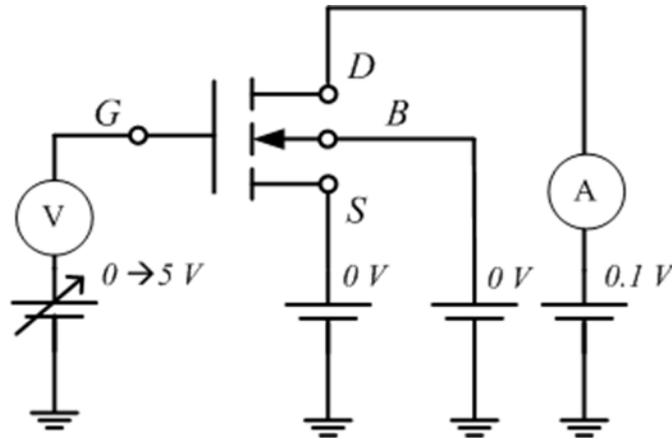
4.2 การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า ซีมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากกระบวนการสร้าง

การหาค่าแรงดันขีดเริ่ม(Threshold Voltage, V_{TH}) [7-8]

สำหรับการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ นั้น จะทำการวัดทดสอบ ได้แก่ การวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_{TH}) ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ตามลำดับ ต่อจากนั้น ทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน(I_{DS}) กับแรงดันเดรน(V_{DS})

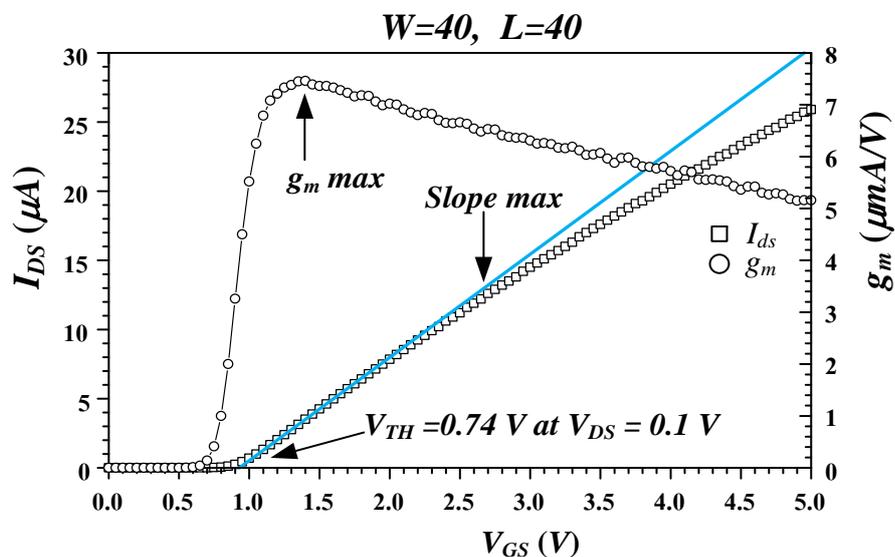
เอ็นมอสทรานซิสเตอร์

การวัดค่าแรงดันขีดเริ่มได้ดังวงจร รูปที่ 4.5 โดยการให้แรงดันคงที่มีค่าต่างๆ ที่ขั้วเดรน (V_{DS}) 0.1 V และให้แรงดันที่ขั้วเกท (V_{GS}) ตั้งแต่ 0 ถึง 5 V และวัดค่ากระแสเดรน (I_{DS}) ที่ไหลจากขั้วซอส ไป ขั้วเดรน



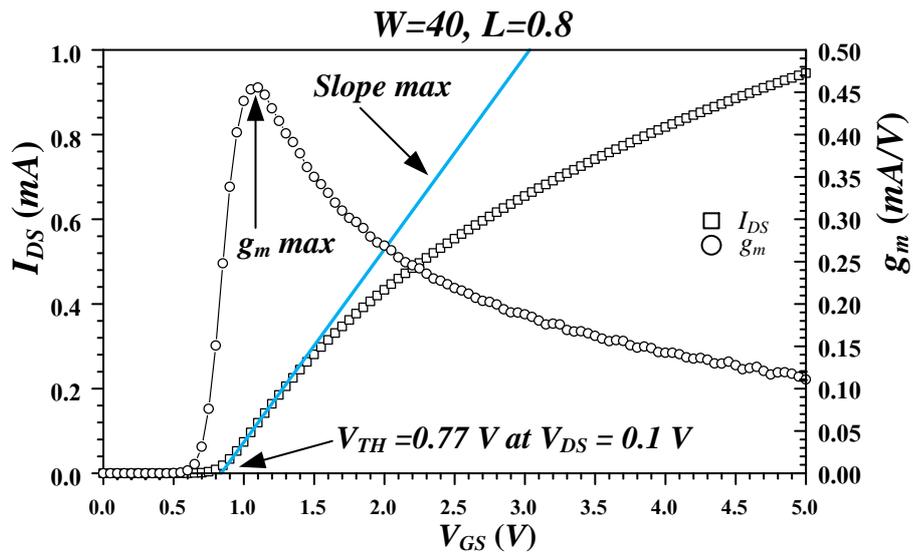
รูปที่ 4.5 วงจรการวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ในช่วง I_{DS} มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น

การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด W 40 μm และ L 40 μm ($W/L=40/40$) แสดงผลดังรูปที่ 4.6 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ~ 0.74 V



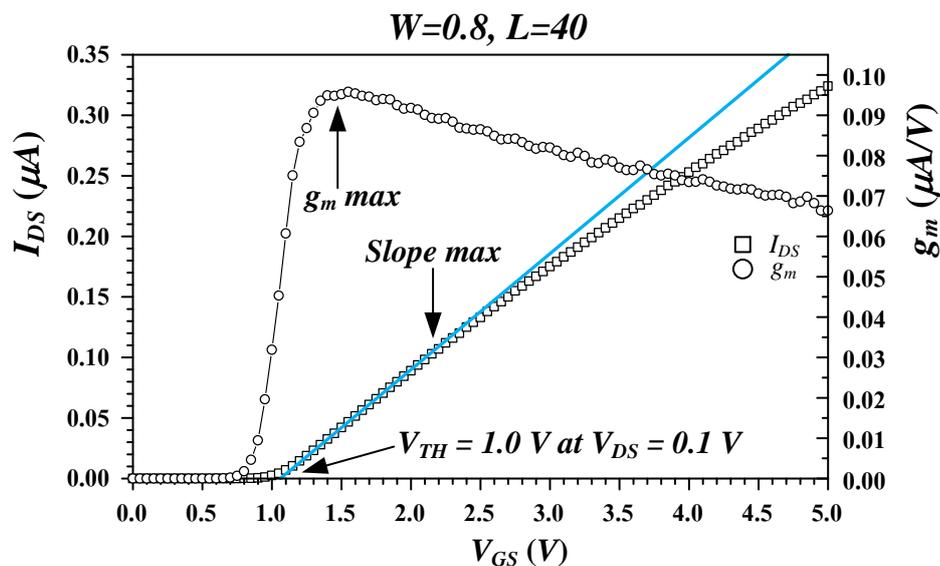
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกท (V_{GS}) กับกระแสเดรน (I_{DS}) ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความกว้างและยาวของเกท (μm) $W/L = 40/40$

การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W = 40$ μm และ $L = 0.8$ μm ($W/L=40/0.8$) แสดงผลดังรูปที่ 4.6 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ~ 0.77 V



รูปที่ 4.7 เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกต(μm) $W/L = 40/0.8$

การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W = 0.8$ μm และ $L = 40$ μm ($W/L=40/0.8$) แสดงผลดังรูปที่ 4.6 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ~ 1.0 V

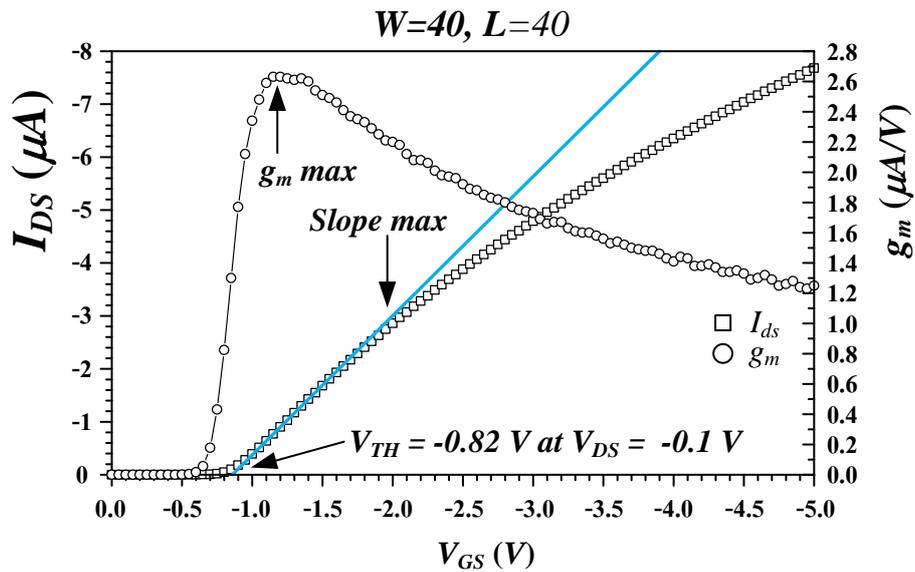


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกต(μm) $W/L = 0.8/40$

พีมอสทรานซิสเตอร์

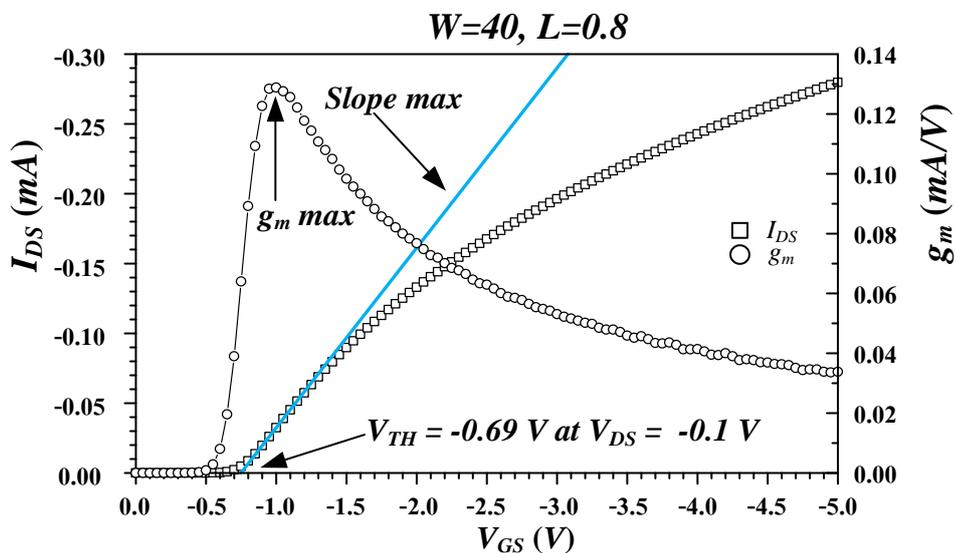
การวัดหาค่าแรงดันขีดเริ่มได้ดังวงจร รูปที่ 4.9 โดยการให้แรงดันคงที่มีค่าต่ำๆ ที่ขั้วเดรน(V_{DS}) - 0.1 V และให้แรงดันที่ขั้วเกต (V_{GS}) ตั้งแต่ 0 ถึง -5 V และวัดค่ากระแสเดรน I_{DS} ที่ไหลจากขั้วซอส ไป ขั้วเดรน

การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด W 40 μm และ L 40 μm ($W/L=40/40$) แสดงผลดังรูปที่ 4.9 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ~ -0.82 V



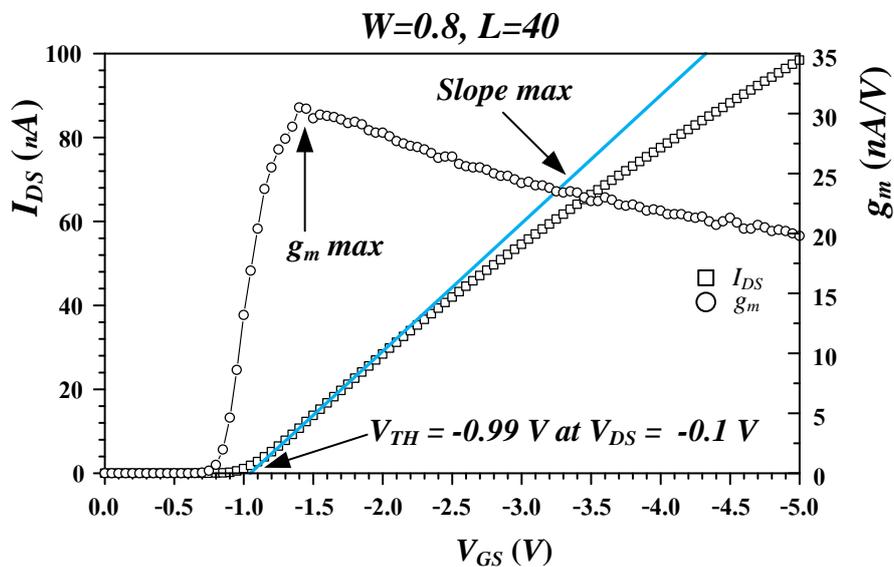
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกต(μm) $W/L = 40/40$

การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W = 40$ μm และ $L = 0.8$ μm ($W/L=40/0.8$) แสดงผลดังรูปที่ 4.10 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ~ -0.69 V



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกต(μm) $W/L = 40/0.8$

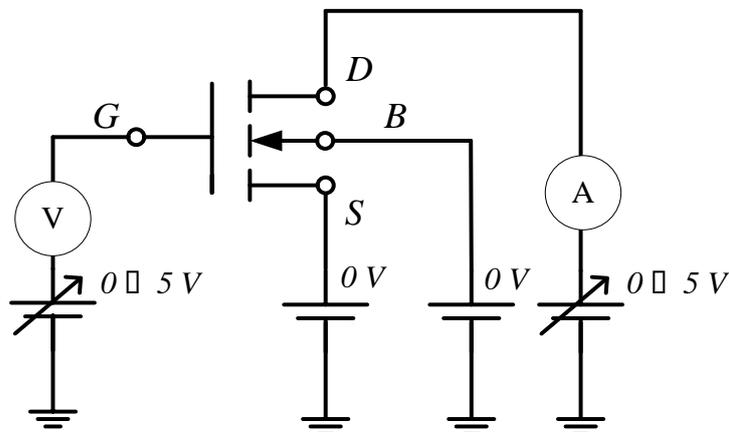
การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ของพีมอสทรานซิสเตอร์ที่มีขนาด $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 0.8 \mu\text{m}$ ($W/L=40/0.8$) แสดงผลดังรูปที่ 4.11 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม $\sim -0.99 \text{ V}$



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต(V_{GS})กับกระแสเดรน(I_{DS}) ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ขนาดความกว้างและยาวของเกต(μm) $W/L = 0.8/40$

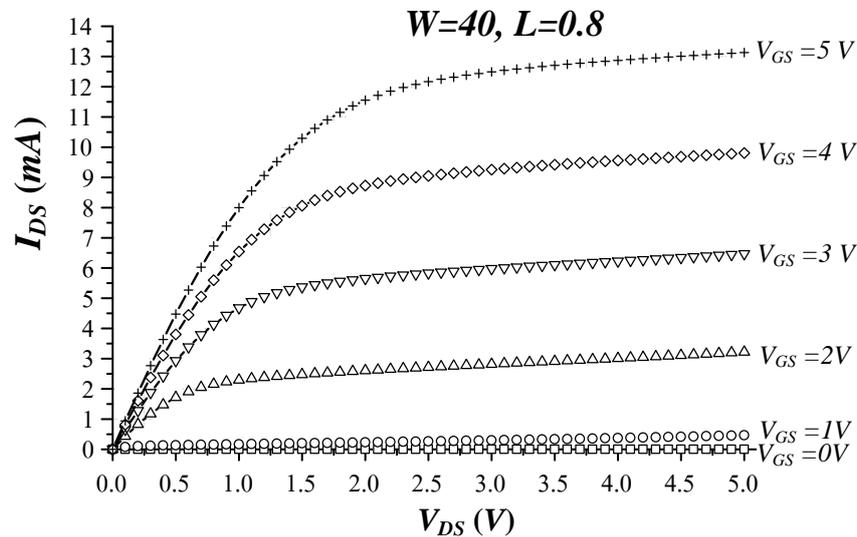
การวัดความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเดรน (V_{DS}) กับ กระแสเดรน (I_{DS}) ของมอสทรานซิสเตอร์

สำหรับการวัดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเดรน (V_{DS}) กับ กระแสเดรน (I_{DS}) ของ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ โดยการให้แรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) จาก 0 ถึง 5 V และให้แรงดันแรงดันที่ขั้วเกต(V_{DS}) จาก 0 ถึง 5 V แสดงดัง รูปที่ 4.12



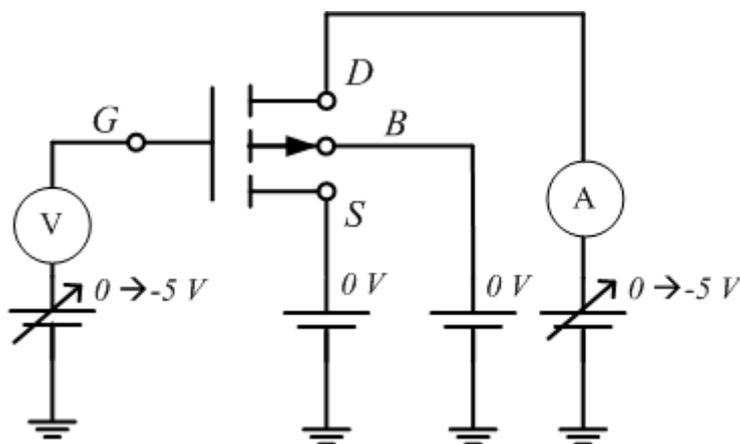
รูปที่ 4.12 วงจรวัดความสัมพันธ์เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ แรงดัน V_{DS} กับ กระแส I_{DS}

จากการทดสอบลักษณะทางไฟฟ้าของ แรงดันเดรน (V_{DS}) กับ กระแสเดรน (I_{DS}) พบว่าที่ค่าแรงดันที่ขั้วเกต เท่ากับ 0 V ($V_{GS} = 0$ V) ค่ากระแสเดรน (I_{DS}) ไม่มี ($I_{DS} = 0$ A) เพราะว่าแรงที่เกตน้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} < V_{TH}$) แต่ในกรณีที่ แรงที่เกตมากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} \geq V_{TH}$) จะทำให้กระแสของอิเล็กตรอนไหลเคลื่อนที่จากขั้วซอส(S)ไปขั้วเดรน(D) แสดงดังรูปที่ 4.13



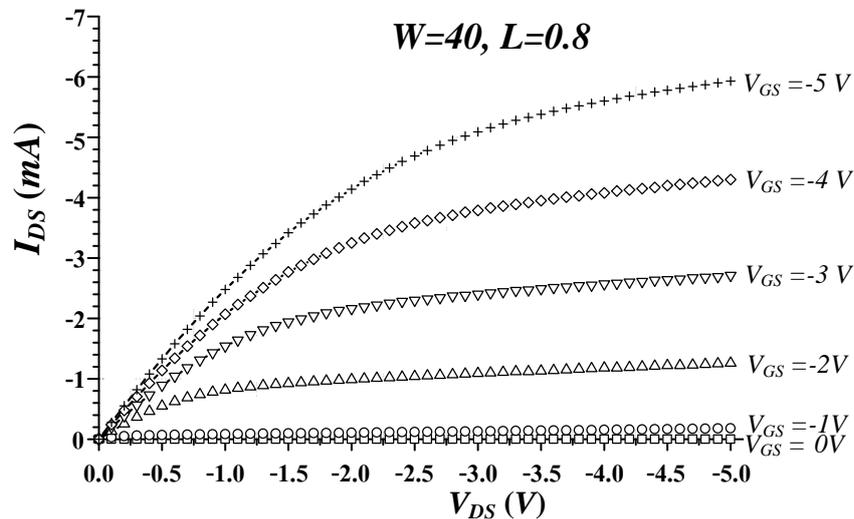
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ระหว่าง แรงดันเดรน (V_{DS})กับ กระแสเดรน (I_{DS})

สำหรับการวัดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสเดรน (I_{DS}) กับ แรงดันเดรน (V_{DS}) ของพีมอสทรานซิสเตอร์ โดยการให้แรงดันที่ขั้วเกต (V_{GS}) จาก 0 ถึง -5 V และให้แรงดันแรงดันที่ขั้วเกต (V_{DS}) จาก 0 ถึง -5 V แสดงดัง รูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 วงจรวัดความสัมพันธ์ พีมอสทรานซิสเตอร์ แรงดันเดรน (V_{DS})กับ กระแสเดรน (I_{DS})

จากการทดสอบลักษณะทางไฟฟ้าของ แรงดันเดรน (V_{DS}) กับ กระแสเดรน (I_{DS}) พบว่าที่ค่าแรงดันที่ขั้วเกต เท่ากับ 0 V ($V_{GS} = 0$ V) ค่ากระแสเดรน (I_{DS}) ไม่มี ($I_{DS} = 0$ A) เพราะว่าแรงที่เกตน้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} < V_{TH}$) แต่ในกรณีที่ แรงที่เกตมากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} \geq V_{TH}$) จะทำให้กระแสไหล แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของ พิวมอสทรานซิสเตอร์ ระหว่าง แรงดันเดรน (V_{DS})กับ กระแสเดรน (I_{DS}) สรุปลักษณะไฟฟ้า

การวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าทั้งเอ็นมอสทรานซิสเตอร์และพิวมอสทรานซิสเตอร์ สรุปลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญได้ ดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะไฟฟ้าเอ็นมอสทรานซิสเตอร์

พารามิเตอร์เอ็นมอสทรานซิสเตอร์	W/L	คุณลักษณะไฟฟ้า
1. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ $V_{TH(\text{big MOS})}$	40/40	0.87 V
2. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดสั้น $V_{TH(\text{short MOS})}$	40/0.8	0.77 V
3. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดแคบ $V_{TH(\text{narrow MOS})}$	0.8/40	1.02 V
4. กระแสเดรน ($I_{DS(\text{sat})}$) ในย่านอิ่มตัว ที่ $V_{DS} = V_{GS} = 5$ V	40/0.8	13.13 mA

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของไฟฟ้าพิมอสทรานซิสเตอร์

พารามิเตอร์พิมอสทรานซิสเตอร์	W/L	คุณสมบัติของไฟฟ้า
1. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ $V_{TH}(big\ MOS)$	40/40	-0.82 V
2. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก $V_{TH}(short\ MOS)$	40/0.8	-0.69 V
3. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดแคบ $V_{TH}(narrow\ MOS)$	0.8/40	-0.99 V
4. กระแสเดรน ($I_{DS(sat)}$) ในย่านอิ่มตัว ที่ $V_{DS} = V_{GS} = 5\ V$	40/0.8	-5.93 mA

4.3 แบบจำลองของพารามิเตอร์มอสทรานซิสเตอร์

การหาแบบจำลองของพารามิเตอร์มอสทรานซิสเตอร์ ระดับ 3 หรือ The Level 3 MOSFET Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี มาผสมผสานกัน ที่เรียกว่า “การทดลองกึ่งทฤษฎี หรือ Semi-Empirical” โดยมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ดังต่อไปนี้ คือ แรงดันขีดเริ่ม, ขนาดความกว้างและความยาว(W/L)ของแชนแนล, ผลของกระแสเนื่องจากความเร็วอิ่มตัวของประจุพาหะในแชนแนล หรือช่องทางเดินกระแส ที่ขนาดความยาวน้อยกว่า $1\ \mu\text{m}$ ในที่นี่จะใช้พารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์จำนวน 15 ตัว[9] คือ *DELTA, ETA, KAPPA, LD, NFS, NSUB, RD, RS, THETA, TOX, TPG, UO, VMAX, VTO, WD* และ *XJ*

4.3.1 วัสดุที่ใช้ทำเกต หรือ Type of Gate Material : TPG

จะใช้โพลีซิลิคอนเป็นขั้วเกต(*Gate*) [10]ทั้ง เอ็นมอส และ พิมอส กรณีที่เกตใช้วัสดุโพลีซิลิคอนเป็นชนิดเดียวกันกับชนิดของ ซอส(Source)และเดรน(Drain) จะกำหนดให้ $TPG = 1$ ถ้าเปลี่ยนเป็นพิมอสทรานซิสเตอร์ ขั้วเกตเป็นชนิดโพลีซิลิคอนชนิดเอ็นและขั้วซอสและเดรน กำหนดให้ $TPG = -1$ ส่วนกรณีขั้วเกตเป็นโลหะอลูมิเนียมจะกำหนดให้ $TPG = 0$

4.3.2 ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟทขนาดใหญ่ในย่านเชิงเส้น(*VTO*) และปริมาณความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองซิลิคอน(*NSUB*)

ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน(I_{DS})และแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) ในกรณีที่พิมอสทรานซิสเตอร์มีขนาดใหญ่ คือ $W/L = 40/40\ \mu\text{m}/\mu\text{m}$ จะใช้หาค่า ค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟทขนาดใหญ่(*VTO*) และปริมาณความหนาแน่นอะตอมสารเจือ(*NSUB*) ที่มีผลของแรงดันไบอัสฐานรอง(V_{BS})ในย่านเชิงเส้น(linear line) โดยใช้ความสัมพันธ์ของ $\sqrt{\phi_S - V_{BS}} - \sqrt{\phi_S}$ กับ ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) [9-11] ที่ค่าแรงดันไบอัสฐานรอง (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)

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

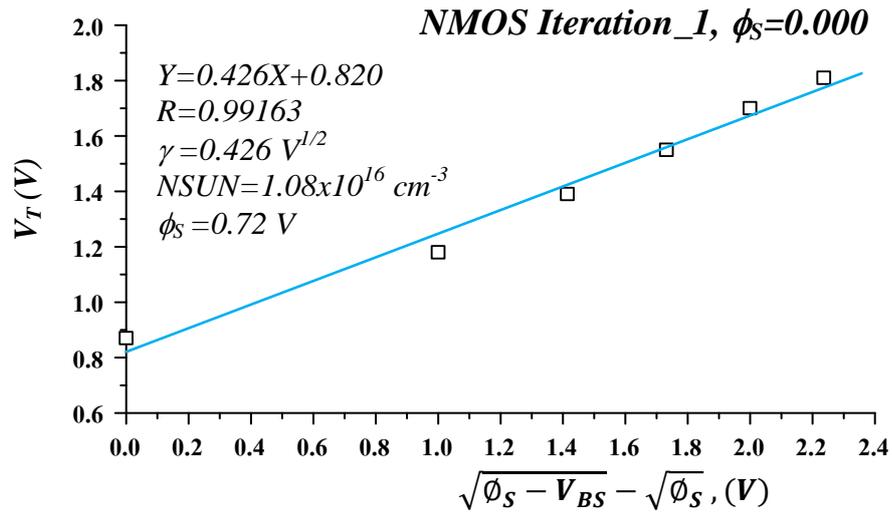
โดยที่ γ

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

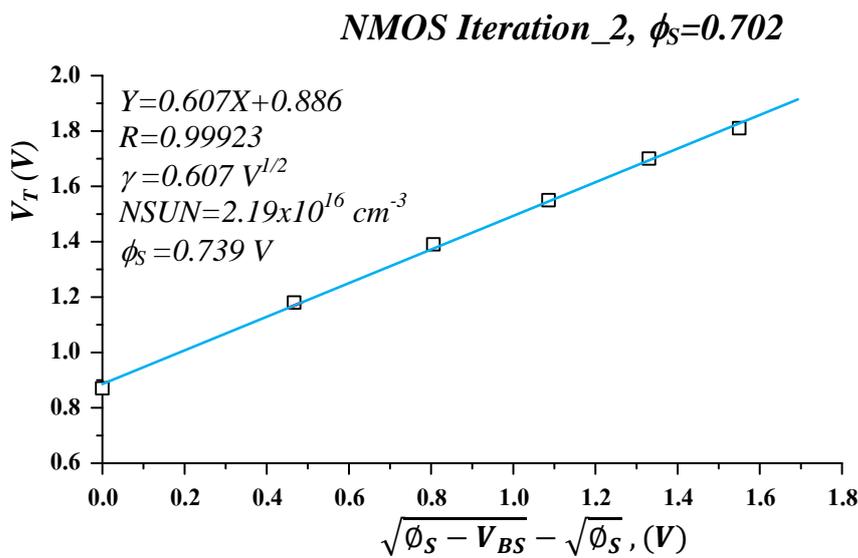
จะได้ค่า $NSUB$

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

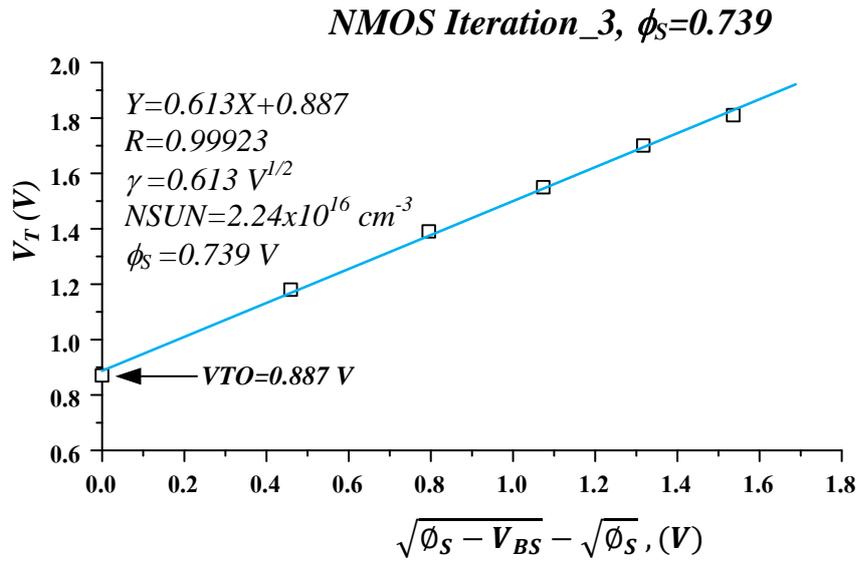
ในการหาค่า $NSUB$ โดยสมการที่ (4.4) ได้ความชัน γ ดังสมการที่ (4.5) [43] และ ณ จุดตัดแกน $Y = V_{TO}$ โดยกำหนดให้ $\phi_S = 0$ ในตอนเริ่มต้น และต่อมาได้ค่า ϕ_S ใหม่จาก รูปที่ 4.16 แล้วแทนค่า ϕ_S เพื่อให้ค่า ϕ_S มีค่าแตกต่างกันน้อยที่สุด ต่อจากนั้นนำ ϕ_S ไปคำนวณหา $NSUB$ และ V_{TO} เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ตามขั้นตอนดังรูปที่ 4.16 ถึง 4.18 และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ตามขั้นตอนดังรูปที่ 4.19 ถึง 4.21



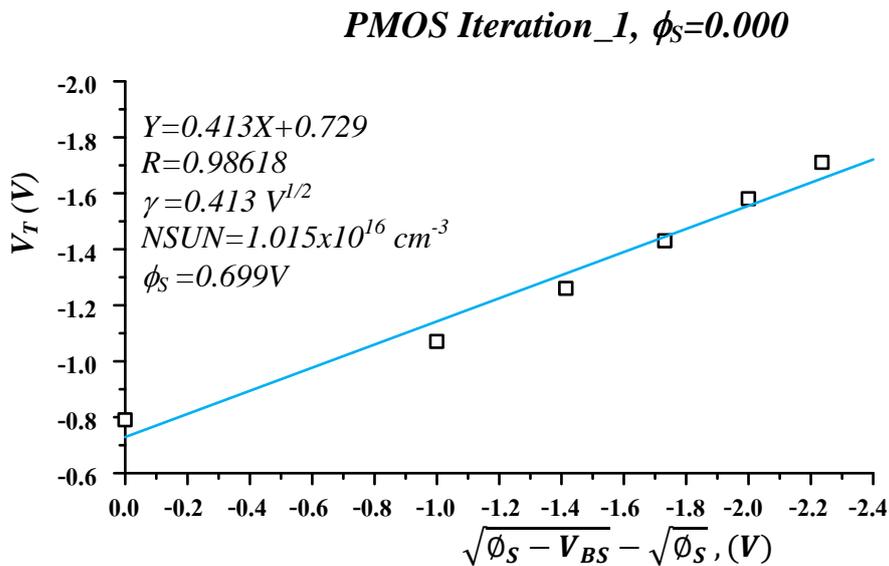
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s - V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.000$



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s - V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.702$

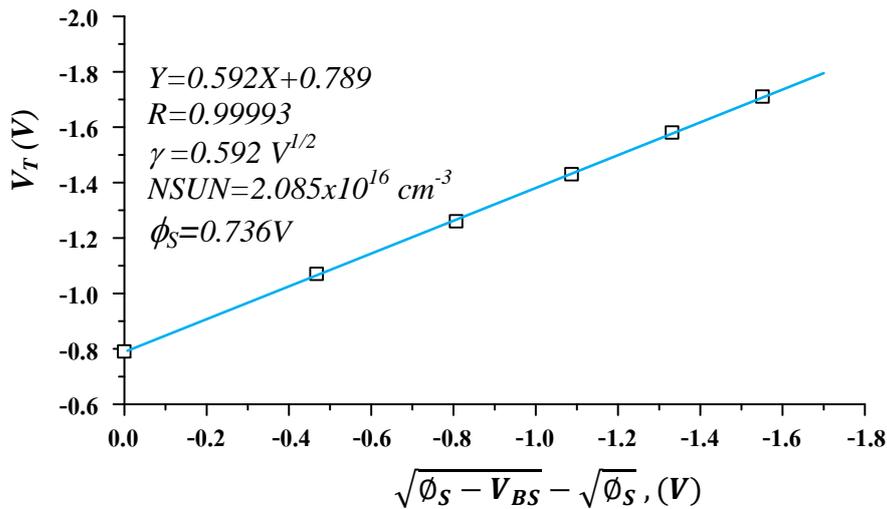


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s - V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.739$



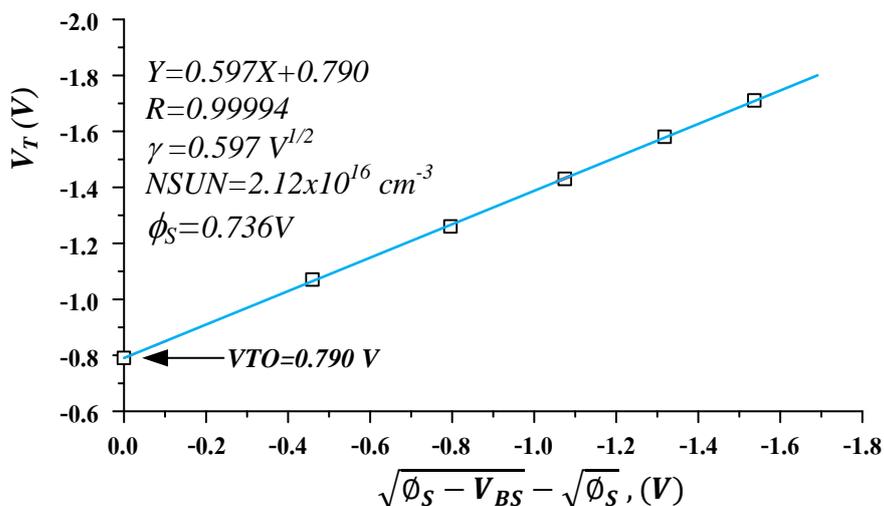
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s - V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของพีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.000$

PMOS Iteration_2, $\phi_s=0.699$



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s - V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของพีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.699$

PMOS Iteration_3, $\phi_s=0.736$

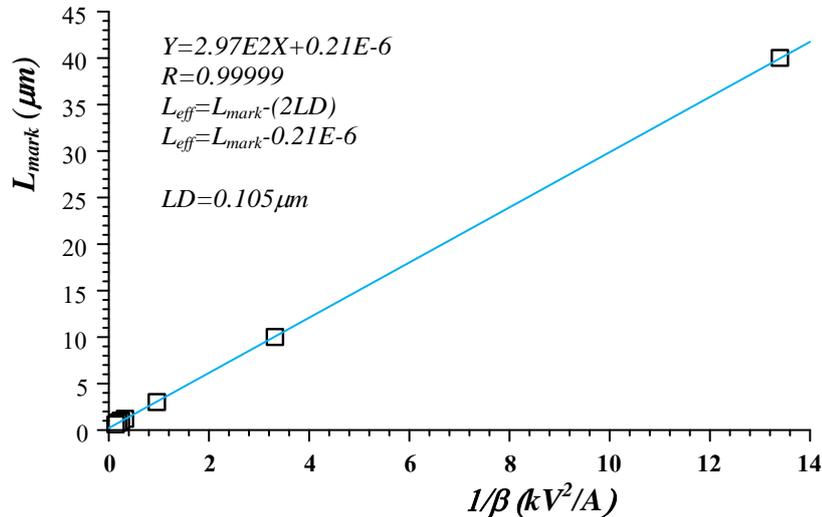


รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{\phi_s - V_{BS}} - \sqrt{\phi_s}$ กับ V_T ของพีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/40$ ที่ค่า V_{BS} เปลี่ยนไป โดยที่กำหนด $\phi_s = 0.736$

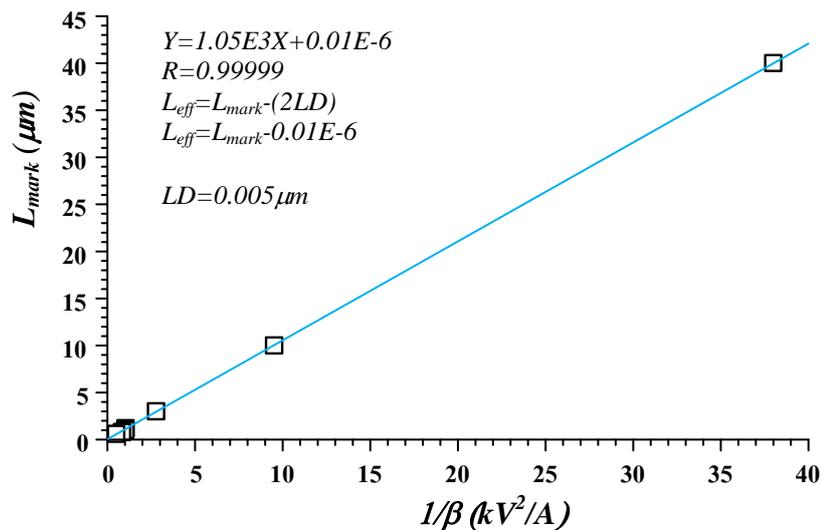
การแทนค่า ϕ_s เป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ จะได้ค่าของพารามิเตอร์ก่อน และ หลังมีค่าต่างกันน้อยมาก จึงหยุดการแทนค่า ตามรูปที่ 4.18 และ 4.21 ได้ค่า γ จากความชัน และ ค่าที่จุดตัดแกน Y สำหรับเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ได้ $NSUB = 2.24 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และ $VTO = 0.89 \text{ V}$ ส่วนพีมอสทรานซิสเตอร์ได้ $NSUB = 2.12 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และ $VTO = -0.79 \text{ V}$

4.3.3 ความยาวของแขนแนลที่ลดลง (LD) และ ความกว้างของแขนแนลที่ลดลง(WD) [11]

ความยาวของแขนแนลที่ลดลง (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 ตามรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23

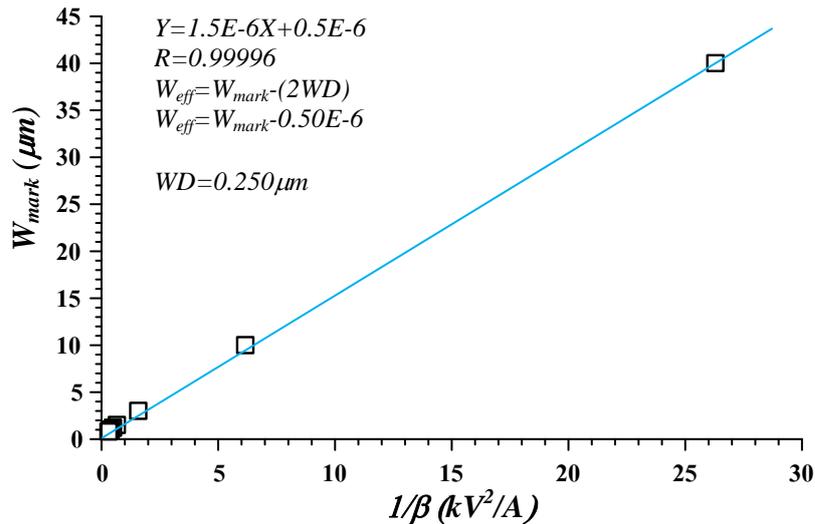


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\beta$ กับ L_{mark} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความยาวของเกตเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $LD = 0.105 \mu m$

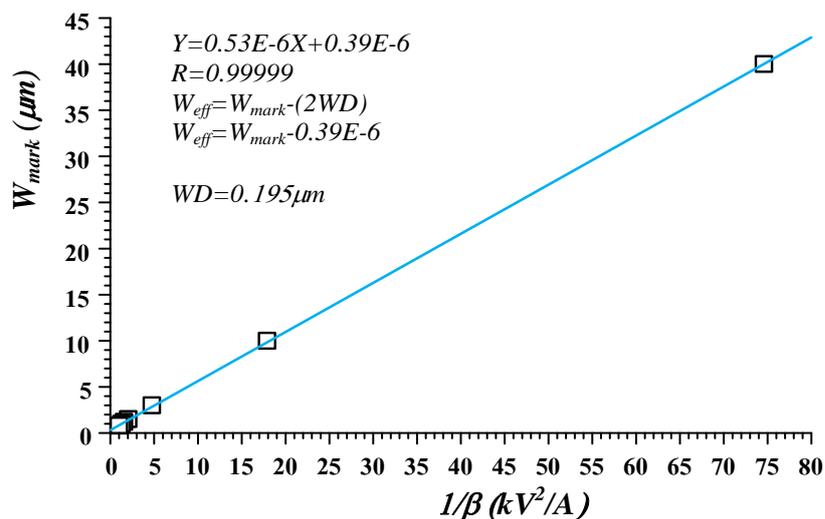


รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\beta$ กับ L_{mark} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความยาวของเกตพีมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $LD = 0.005 \mu m$

ความกว้างของแซนแนลที่ลดลง(Lateral Diffusion Width, WD) อันเนื่องมาจากผลของ LOCOS และ การแพร่ของสารเจือ มีผลให้ความกว้างเกตลดลง ซึ่งเรียกว่า ความกว้างเกตที่ปรากฏ หรือ Effective Width, W_{eff} โดยหาได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง ความยาวของเกตที่ออกแบบ(W_{mask}) กับ β ที่ขนาดความกว้างเกตที่เปลี่ยนแปลง ณ ที่จุดตัดของแกน Y นั้น จะได้ค่า WD ตามรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ W_{mask} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความกว้างของเกตเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $WD = 0.205 \mu m$ ต่อข้าง



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ W_{mask} ใช้หาระยะแพร่ด้านข้างที่ล้ำเข้ามาด้านความกว้างของเกตเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $WD = 0.195 \mu m$ ต่อข้าง

4.3.4 การหาค่า UO , $THETA$, RD และ RS

สภาพคล่องตัวของพาหะ(UO) หรือ โมบิลิตี้ ของพาหะ หาจากมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ ใน ย่านเชิงเส้น ที่ขนาดความกว้างและยาวของเกต($W/L = 40/40$) นั้นหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสเดรน(I_{DS}) และแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) ที่ย่านเชิงเส้น โดยใช้สมการที่ (4.6)

$$\begin{aligned} Slope &= \beta V_{DS} = \beta_0 \frac{W}{L} V_{DS} = \mu_0 C_{OX} \frac{W}{L} V_{DS} \\ Slope &= \beta V_{DS} = UO C_{OX} \frac{W}{L} V_{DS} \\ UO &= \frac{Slope \cdot L}{C_{OX} V_{DS} W} \end{aligned} \quad (4.6)$$

ดังนั้นสภาพคล่องตัวของพาหะ(UO)ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์จะได้

$$UO = \frac{7.46 \times 10^{-6}}{1.41 \times 10^{-7} \times 0.1} \times \frac{40}{40} = 529.08 \text{ cm}^2 / VS \quad (4.7)$$

ดังนั้นสภาพคล่องตัวของพาหะ(UO)ของพีมอสทรานซิสเตอร์จะได้

$$UO = \frac{2.06 \times 10^{-6}}{1.41 \times 10^{-7} \times 0.1} \times \frac{40}{40} = 184.4 \text{ cm}^2 / VS \quad (4.8)$$

ผลของการลดลงสภาพคล่องตัวของพาหะ หรือ Mobility Degradation, $THETA$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน(I_{DS})กับแรงดันที่ขั้วเกต(V_{GS}) พบว่ากระแสเดรน(I_{DS}) มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่แรงดันขั้วเกตเพิ่มขึ้น อันเป็นผลเนื่องจากการลดประสิทธิภาพของสภาพคล่องตัว (Mobility Degradation, $THETA$) ดังสมการที่ (4.9) [9] ที่ได้รับผลของสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง (Vertical Field Mobility, μ_v)

$$\mu_v = \frac{\mu_0}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} \quad (4.9)$$

เขียนใหม่ได้

$$\mu_v = \frac{UO}{1 + THETA(V_{GS} - V_T)} \quad (4.10)$$

จากสมการ (4.6) เขียนสมการ (4.10) ใหม่เป็น

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

คูณ V_{DS} ทั้งด้านซ้ายและขวาของสมการ (4.11)

$$\frac{\beta}{C_{OX}} \frac{W_{eff}}{L_{eff}} V_{DS} = \frac{V_{DS} \beta_{Slope,max} W_{eff} / C_{OX} W_{eff}}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} \quad (4.12)$$

โดยค่า $Slope = \beta V_{DS}$ จะได้

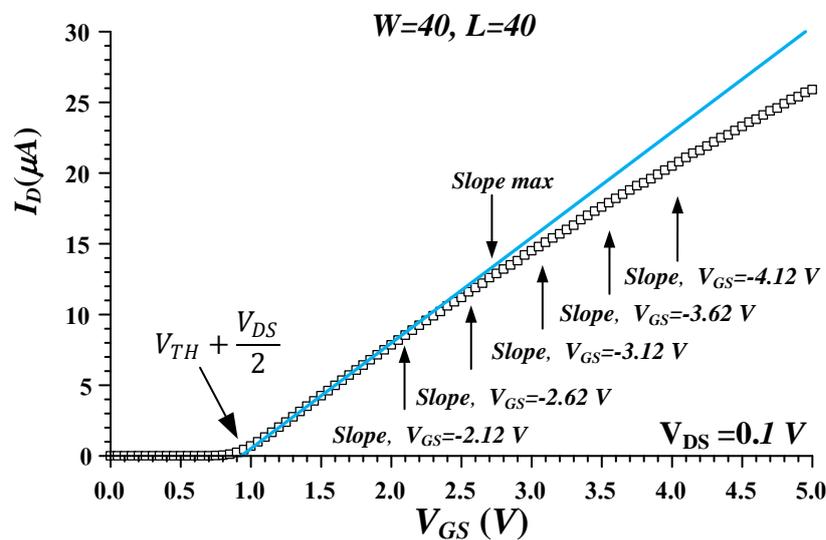
$$Slope = \frac{Slope_{max}}{1 + \theta(V_{GS} - V_T)} \quad (4.13)$$

เขียนใหม่ได้

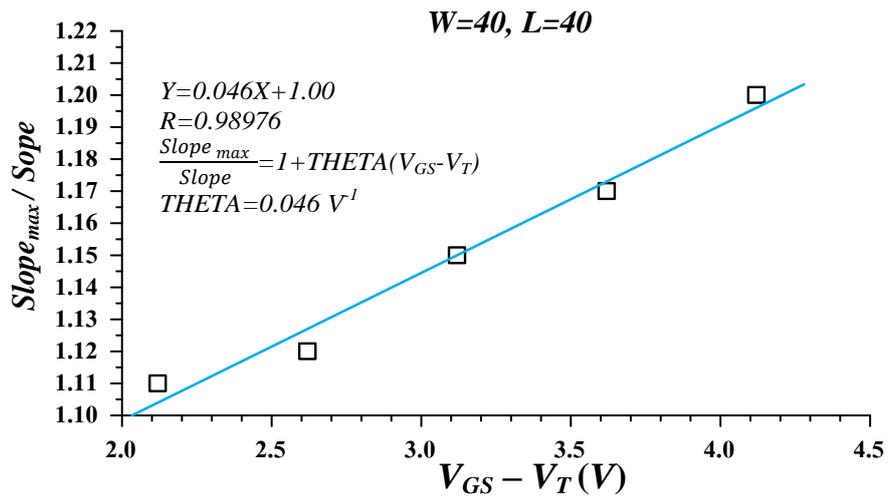
$$\frac{Slope_{max}}{Slope} = 1 + \theta(V_{GS} - V_T) \quad (4.14)$$

ค่า $Slope$ เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง กับ แรงดันที่ขั้วเกต (V_{GS}) กับ กระแสเดรน (I_{DS}) ในย่านที่เป็นเชิงเส้น ที่แรงดันที่ขั้วเกต (V_{GS}) มีค่าสูง ตามรูปที่ 4.26 เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ รูปที่ 4.28 พีมอสทรานซิสเตอร์ ตามลำดับ

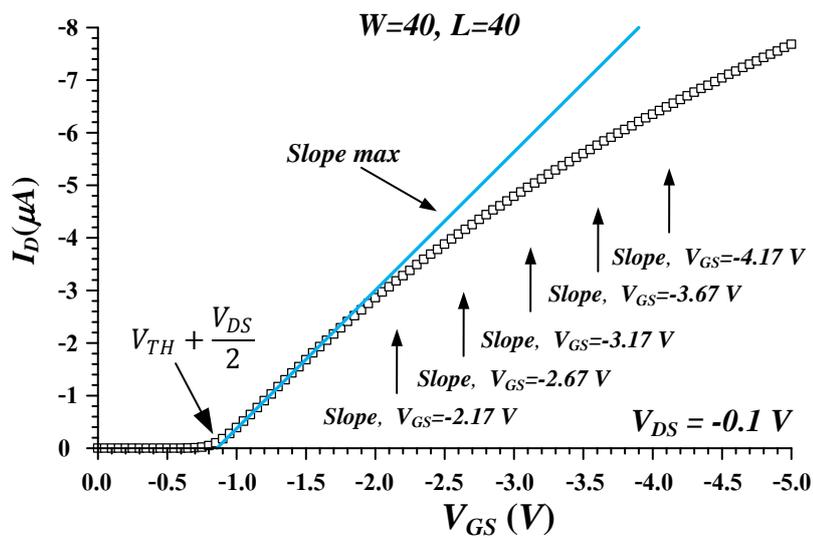
หาค่า THETA หรือ ความชัน จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{Slope_{max}}{Slope}$ กับ V_{GS} ตามรูปที่ 4.27 เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ รูปที่ 4.29 พีมอสทรานซิสเตอร์



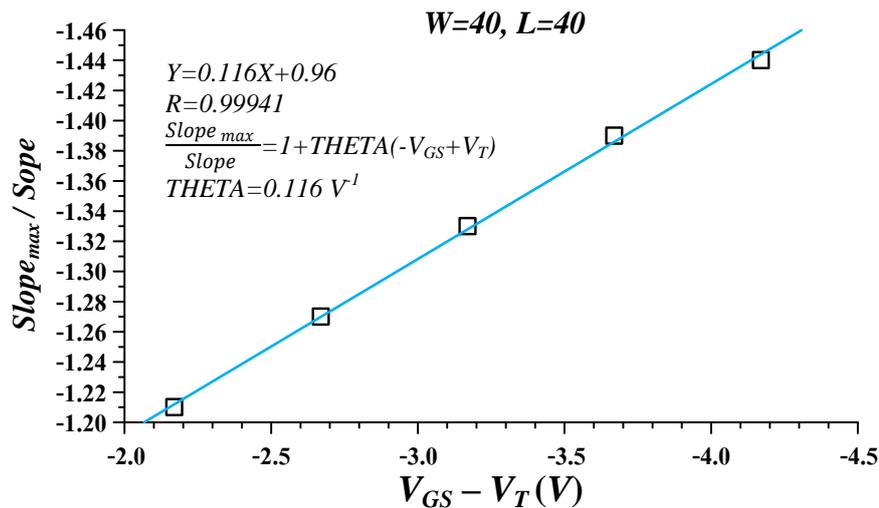
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเกต (V_{GS}) กับ กระแสเดรน (I_D) ที่แรงดันเดรน (V_{DS}) คงที่ ได้ค่าความชันของกราฟที่แรงดันเกตเปลี่ยนไป ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{Slope_{max}}{Slope}$ กับแรงดันเกต (V_{GS}) ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ ได้ค่าความชัน $THETA = 0.046 \text{ V}^{-1}$



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเกต (V_{GS}) กับ กระแสเดรน (I_D) ที่แรงดันเดรน (V_{DS}) คงที่ ใช้หาค่าความชันของกราฟที่แรงดันเกตเปลี่ยนไป ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{Slope_{max}}{Slope}$ กับแรงดันเกต (V_{GS}) ของฟิสิกส์ทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ ได้หาค่าความชัน $THETA = 0.116 V^{-1}$

4.3.5 ความต้านทานของซอส(RS) และความต้านทานของเดรน (RD)

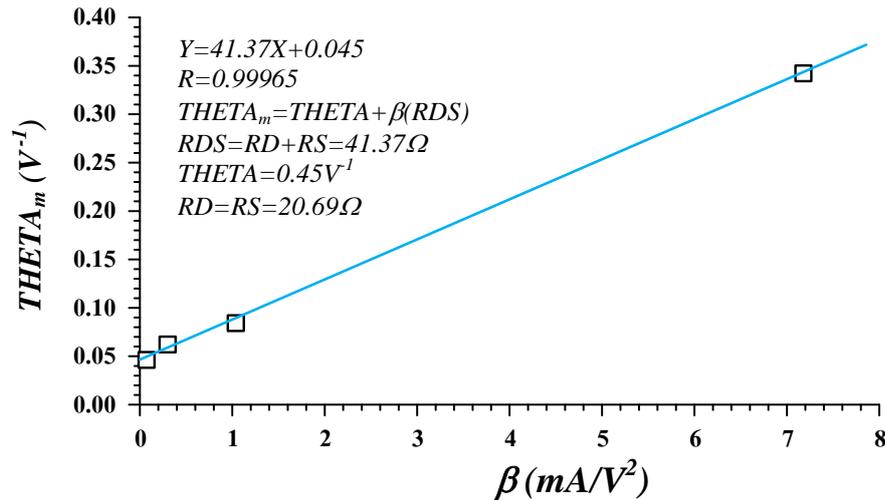
ตามปกติแล้ว ค่าความต้านทานของซอส(RS) และความต้านทานของเดรน (RD) ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นสารเจือในด้านซอส(S) และ ด้านเดรน (D)

การหาค่า ค่าความต้านทานของซอส(RS) และความต้านทานของเดรน (RD) ได้จากสมการที่ (4.15) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ $THETA_m$ ที่มีขนาดความยาวของแขนแนลค่าต่างๆ กับ ค่า β ตามรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31 ค่าความชันคือ ค่าความต้านทานของซอส (RS) และความต้านทานของเดรน (RD) ณ จุดตัดแกน Y จะได้ค่า $THETA$ เฉลี่ยของมอสทรานซิสเตอร์ที่แขนแนลกระแสต่างๆ

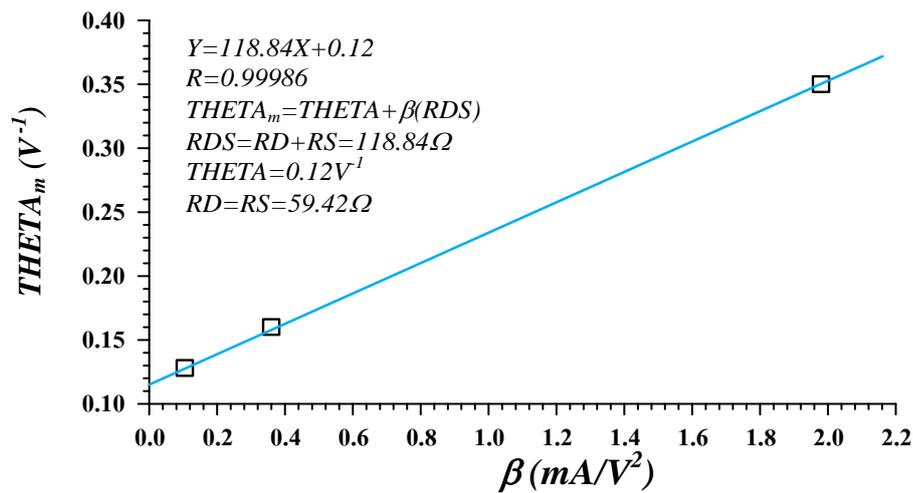
$$THETA_m = THETA + \beta R_{DS} \quad (4.15)$$

โดยที่

$$R_{DS} = RD + RS \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ของ $THETA_m$ กับ β ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความยาวเกตค่าต่างๆ ซึ่งใช้หาค่า RD และ RS



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ของ β กับ $THETA_m$ ของพีมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความยาวเกตค่าต่างๆ ซึ่งใช้หาค่า RD และ RS

3.4.5 ผลของความกว้างแซนแนลที่มีต่อ ค่าแรงดันขีดเริ่ม(Delta) และ ค่าสัมประสิทธิ์จากผลของ DIBL (ETA)

สำหรับกรณีที่ มอสทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดใหญ่($W/L=40/40$) จะไม่มีผลของความกว้างและความยาวของแซนแนลกระแสที่ลดลง และยังรวมถึงผลของ Drain-Induced Barrier Lowering หรือ DIBL เมื่อขนาดของมอสทรานซิสเตอร์มีขนาดลดลง ซึ่งหมายความว่าความยาวของแซนแนลมีขนาดสั้น(F_5) ผลของ

ความกว้างแขนแนลที่แคบลง(F_N) และสุดท้ายเป็นผลของ DIBL(F_D) จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ (4.17)[9]

$$V_T = V_{FB} + \phi_S + F_S \gamma \sqrt{\phi_S - V_{BS}} + F_N (\phi_S - V_{BS}) + F_D F_{DS} \quad (4.17)$$

$$F_S = 1 - \frac{1}{L_{eff}} \left[(W_C + LD) \left[1 - \left(\frac{W_P}{XJ + W_P} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - LD \right] \quad (4.18)$$

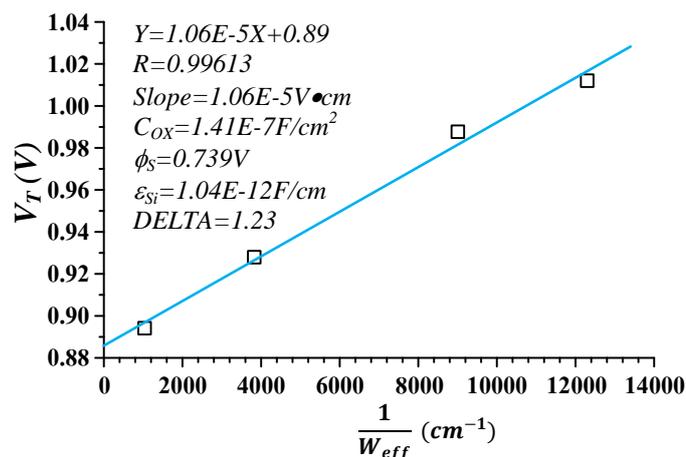
โดยที่

$$F_N = \delta \frac{\pi \epsilon_{Si}}{2C_{OX}W_{eff}} = DELTA \frac{\pi \epsilon_{Si}}{2C_{OX}W_{eff}} \quad (4.19)$$

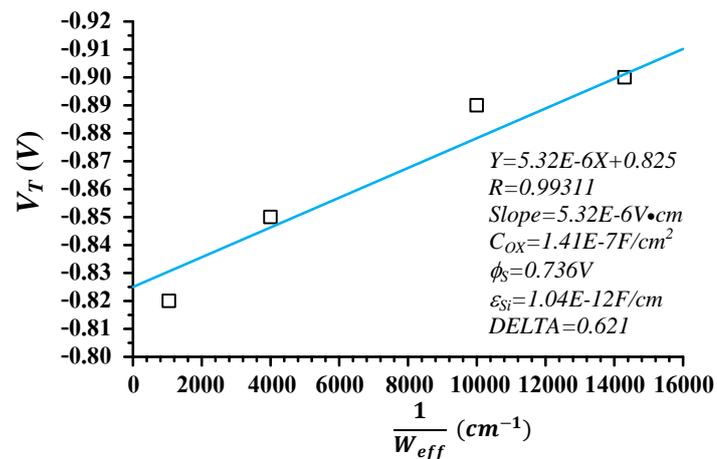
$$F_D = \eta \frac{8.15 \times 10^{-22}}{C_{OX}W_{eff}} = ETA \frac{8.15 \times 10^{-22}}{C_{OX}W_{eff}} \quad (4.20)$$

ผลของความกว้างแขนแนลที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม หรือ DELTA

การหาค่า *DELTA* จากสมการที่ (4.17) และสมการที่ (4.19) โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_T กับ $\frac{1}{W_{eff}}$ ได้ *DELTA* คือค่าความชันคูณด้วย $2C_{OX}/\pi\epsilon_{Si}(\phi_S - V_{BS})$ หรือ *Slope* $\frac{2C_{OX}}{\pi\epsilon_{Si}(\phi_S - V_{BS})}$ [9] ของมอสทรานซิสเตอร์ที่มีค่าความกว้างแขนแนลแคบ สำหรับเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ *DELTA*=1.23 ตามรูปที่ 4.32 และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ได้ *DELTA*=0.621 ตามรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{1}{W_{eff}}$ กับ V_T ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความกว้างเกตค่าต่างๆ ซึ่งใช้หาค่า *DELTA*=1.23

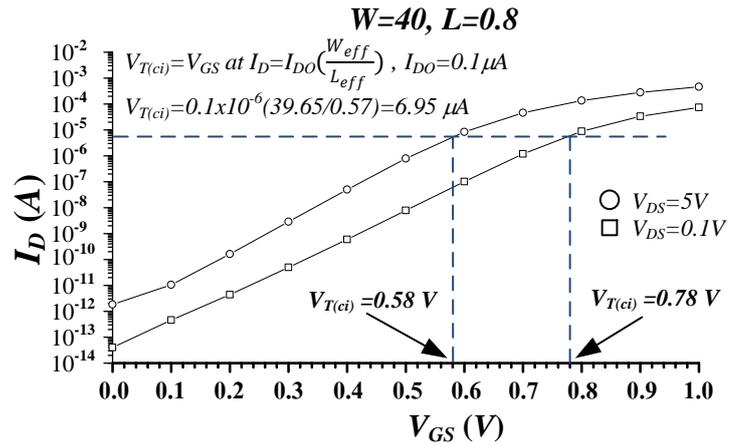


รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{1}{W_{eff}}$ กับ V_T ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความกว้างเกตค่าต่างๆซึ่งใช้หาค่า $DELTA=0.621$

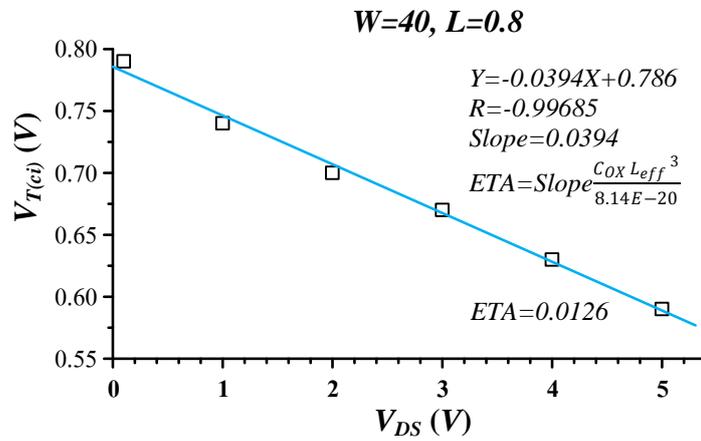
ค่าสัมประสิทธิ์จากผลของ DIBL หรือ ETA

การหาค่า ETA จากสมการที่ (4.17) และสมการที่ (4.20) 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 4.34 และ รูปที่ 4.35 การหาค่า $V_{T(c)}$ ที่ V_{DS} ต่างๆ ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ตามลำดับ จะได้ค่า ETA คือ ค่าความชันคูณด้วย $(C_{OX} L_{eff}^3)/8.15 \times 10^{-20}$ หรือ

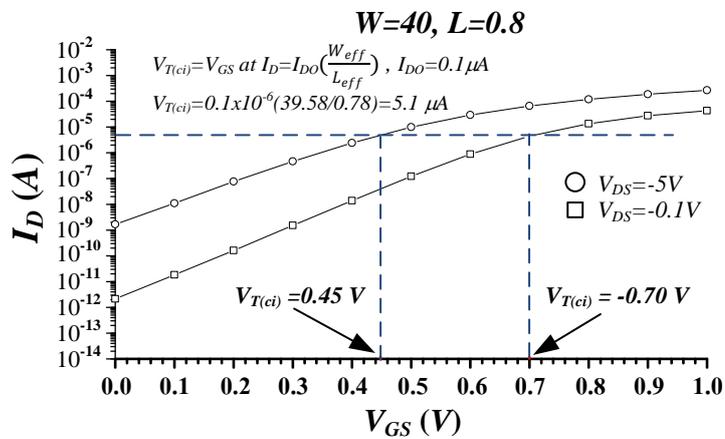
$Slope \frac{C_{OX} L_{eff}^3}{8.15 \times 10^{-20}}$ [9] ของมอสทรานซิสเตอร์ที่มีค่าความยาวแขนแนลสั้น สำหรับเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $ETA=1.23$ ตามรูปที่ 4.32 และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $DELTA=0.621$ ตามรูปที่ 4.33 คือค่าความชันคูณด้วย $2C_{OX}/\pi\epsilon_{Si}(\phi_s - V_{BS})$ หรือ $Slope \frac{2C_{OX}}{\pi\epsilon_{Si}(\phi_s - V_{BS})}$ [41] ของมอสทรานซิสเตอร์ที่มีค่าความกว้างแขนแนลกระแสแคบ สำหรับเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $DELTA=0.0126$ ตามรูปที่ 4.35 และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ได้ $ETA=0.039$ ตามรูปที่ 4.37



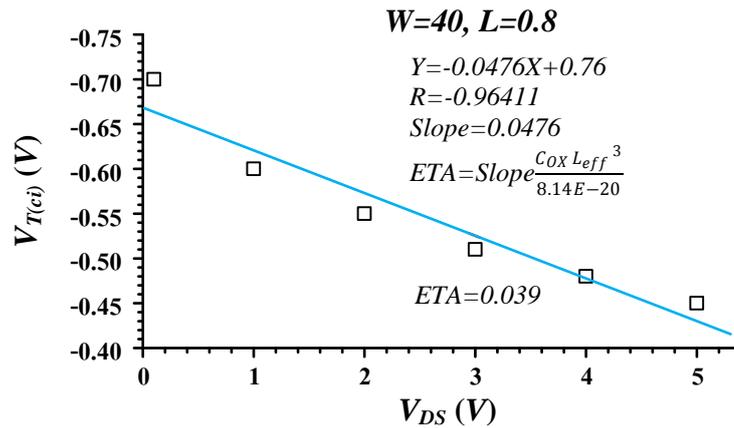
รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_{GS}) ที่มีผล DIBL ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ของแรงดันเดรน(V_{DS}) กับ V_{TCI} ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งได้ค่า $ETA = 0.0126$



รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเกต(V_{GS}) กับ กระแสเดรน(I_{GS}) ที่มีผล DIBL ที่พีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของแรงดันเดรน(V_{DS}) กับ $V_{T(ci)}$ ที่เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งได้ค่า $ETA = 0.039$

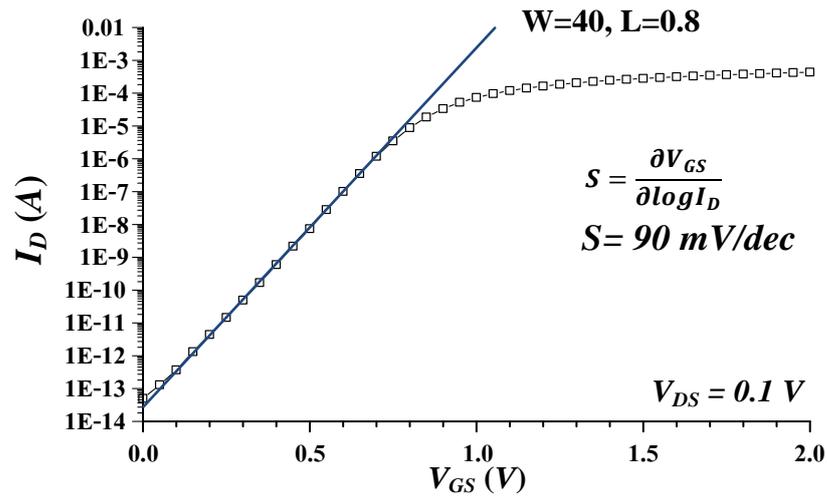
3.4.6 การหาค่า NFS ปริมาณความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของฐานรองซิลิคอน

การหาปริมาณความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของฐานรองซิลิคอน หรือ NFS ใช้ ค่าซับเทรตโวลต์สวิง (Subthreshold Swing, S) จากการวัดค่ากระแสเดรน(I_{DS}) ในช่วงที่เริ่มจะเกิดขึ้นกลับ(Weak Inversion layer) ของแชนแนลกระแสเดรนระหว่างช่วงแถบเรียบจนกระทั่งค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T) ขณะที่มอสทรานซิสเตอร์มีแชนแนลสั้น จะได้ความสัมพันธ์ของซับเทรตโวลต์สวิง(S) ดังสมการที่ (4.21) [9]

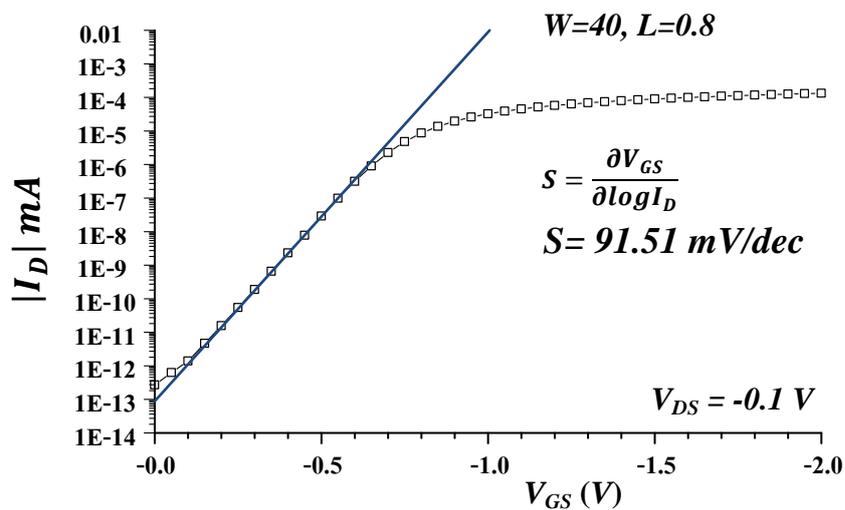
$$S = \frac{\partial V_{GS}}{\partial \log |I_{DS}|} = \frac{KT}{q} \ln 10 \left(1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_{OX}} \right)$$

$$S = \frac{KT}{q} \ln 10 \left(1 + \frac{1}{C_{OX}} \sqrt{\frac{q \epsilon_{Si} N_{ch}}{\phi_s}} \right) \quad (4.21)$$

สมการที่ (4.21) จะใช้หา ค่าซับเทรตโวลต์สวิง(S) ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log |I_D|$ กับ V_{GS} โดยที่ค่าความชันของความสัมพันธ์ นั้นคือค่าซับเทรตโวลต์สวิง(S) เป็นวิธี การหา ค่าซับเทรตโวลต์สวิง(S) เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 4.38 และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ของ V_{GS} กับ $\log |I_D|$ ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $S = 90 \text{ mV/dec}$



รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ของ V_{GS} กับ $\log |I_D|$ ของพีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $S = 91.51 \text{ mV/dec}$

เมื่อได้ ค่าชั้บเทรตโซลด์สวิง(S) แล้วนำไปคำนวณเพื่อหาค่า NFS โดยใช้สมการ (4.22)

$$NFS = \frac{C_{OX}}{q} \left(\ln \frac{S}{\frac{kT}{q}} - \frac{\gamma}{2\sqrt{\phi_s}} - 1 \right) \quad (4.22)$$

กรณีเอ็นมอสทรานซิสเตอร์

$$NFS = \frac{1.41 \times 10^{-7}}{1.602 \times 10^{-19}} \left(\ln \frac{0.9}{2.59 \times 10^{-2}} - \frac{0.631}{2\sqrt{0.739}} - 1 \right) \quad (4.22)$$

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

กรณีพีมอสทรานซิสเตอร์

$$NFS = \frac{1.41 \times 10^{-7}}{1.602 \times 10^{-19}} \left(\ln \frac{0.9}{2.59 \times 10^{-2}} - \frac{0.579}{2\sqrt{0.736}} - 1 \right) \quad (4.23)$$

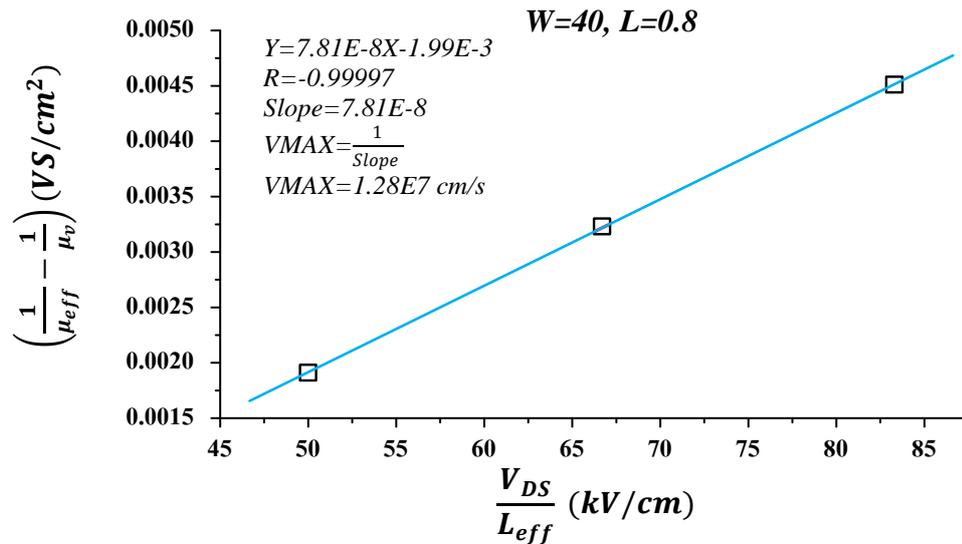
$$NFS = 1.73 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$$

3.4.7 การหาค่า VMAX

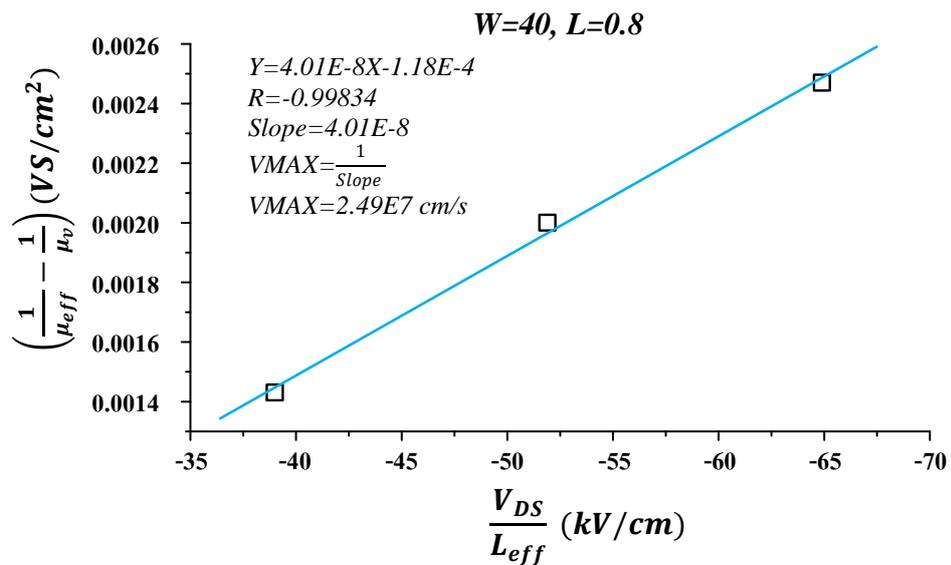
VMAX หรือ ความเร็วครีฟท์สูงสุดของพาหะ ซึ่งค่าสภาพคล่องของพาหะ จะมีผลของสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง (Vertical Field Mobility, μ_v) และ ค่าสภาพคล่องของพาหะประสิทธิผล (Effective Mobility : μ_{eff}) โดยที่ค่าความคล่องตัวที่แรงดันเดรน (V_{DS}) ต่ำ และ สูง ตามลำดับ ที่มอสทรานซิสเตอร์ที่มีแกนแนลกระแสรัน ในส่วนของค่าสภาพคล่องของพาหะประสิทธิผล ซึ่งจะรวมผลของสนามไฟฟ้าในแนวแกนนอนและแนวตั้ง นั้นหาจากได้ สมการ (4.24) [9-10,12] ซึ่ง μ_v เป็น ค่าสภาพคล่องของพาหะ เนื่องจากมีผลของสนามไฟฟ้าตามแนวตั้ง ดังสมการ (4.9)

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_v}{1 + \frac{\mu_v V_{DS}}{VMAX L_{eff}}} \quad (4.24)$$

สำหรับค่า VMAX หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_v} \right)$ กับ $\frac{V_{DS}}{V_{eff}}$ จะได้ค่า $VMAX = \frac{1}{\text{slope}}$ ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 4.40 และพีมอสทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{V_{DS}}{V_{eff}}$ กับ $\left(\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_v}\right)$ ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ที่ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $VMAX = 1.28E7 \text{ cm/s}$



รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{V_{DS}}{V_{eff}}$ กับ $\left(\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_v}\right)$ ของพีมอสทรานซิสเตอร์ที่ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $VMAX = 2.49E7 \text{ cm/s}$

3.4.8 การหาค่า KAPPA

KAPPA หรือ ผลของแชนแนลขนาดสั้นที่มีผลต่อกระแสเดรน(I_D) จะปรากฏขึ้นในย่านการอิ่มตัว เป็นผลมาจากความยาวแชนแนลประสิทธิผล หรือความยาวแชนแนลจริง(Effective Channel Length :

L') [41] ของมอสทรานซิสเตอร์ที่มีช่องทางเดินกระแสสั้นเนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมี ความสัมพันธ์ ดัง สมการ (4.25)

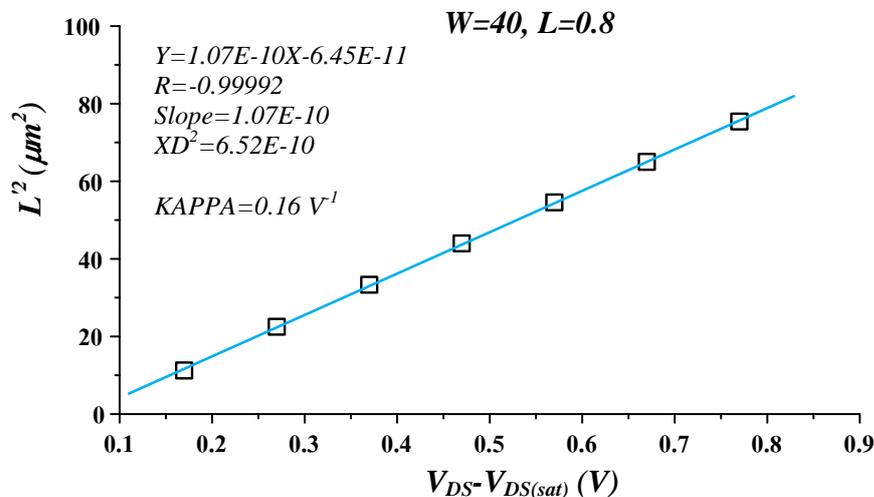
$$L' = \left[\left(\frac{V_{DS(sat)}}{2aL_{eff}} \right)^2 + k \left(\frac{V_{DS} - V_{DS(sat)}}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{V_{DS(sat)}}{2aL_{eff}} \quad (4.25)$$

$$L' = \left[\left(\frac{V_{DS(sat)}}{2aL_{eff}} \right)^2 + KAPPA \left(\frac{V_{DS} - V_{DS(sat)}}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{V_{DS(sat)}}{2aL_{eff}} \quad (4.26)$$

โดยที่ a

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

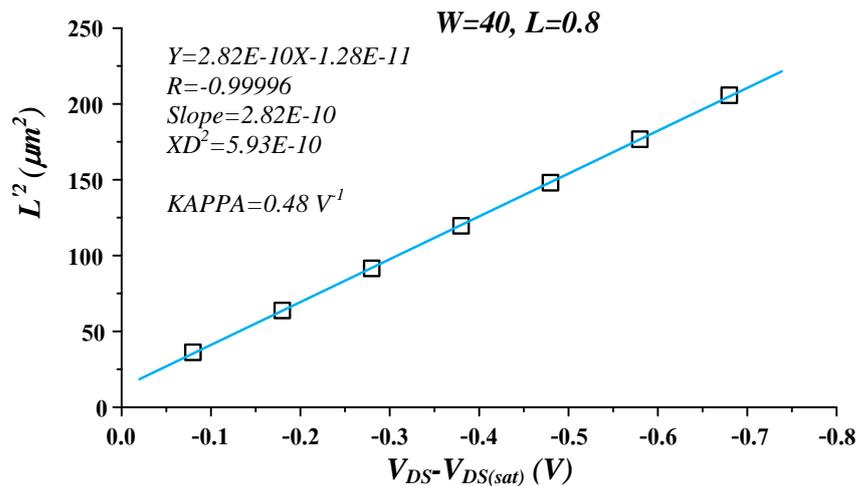
จากความสัมพันธ์ระหว่าง L'^2 กับ $V_{DS} - V_{DS(sat)}$ จากสมการ (4.26) จะได้ $Slope = KAPPA \times a$ และค่า $L' = L_{eff} \left(1 - \frac{I_{D(sat)}}{I_D} \right)$ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนของ มอสทรานซิสเตอร์ที่มีแขนแนลกระแสสั้น ดังรูปที่ 4.42 และ รูปที่ 4.43 ในการหาค่า $KAPPA$ โดยการใช้ ความสัมพันธ์ดังกล่าว



รูปที่ 4.42 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{DS} - V_{DS(sat)}$ กับ L'^2 ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $KAPPA = 0.16 \text{ V}^{-1}$

สรุปแบบจำลองพารามิเตอร์ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์และพีมอสทรานซิสเตอร์

จากการหาแบบจำลองพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้นำเสนอ สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดได้ดัง ตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{DS}-V_{DS(sat)}$ กับ L'^2 ของพีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด $W/L = 40/0.8$ ซึ่งหาค่า $KAPPA = 0.48 V^{-1}$

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พีมอสทรานซิสเตอร์ ระดับ 3

พารามิเตอร์	เอ็นมอสทรานซิสเตอร์	พีมอสทรานซิสเตอร์
TPG	1	-1
TOX(t_{GOX})	15 nm	15 nm
LD	0.105 μm	0.005 μm
WD	0.195 μm	0.25 μm
UO(μ_o)	529.08 $cm^2/V \cdot s$	184.4 $cm^2/V \cdot s$
VTO($V_{T(Big MOS)}$)	0.887 V	-0.79 V
THETA(θ, ξ)	0.046 V^{-1}	0.116 V^{-1}
RS(R_S)	20.69 Ω	59.42 Ω
RD(R_D)	20.69 Ω	59.42 Ω
DELTA(δ)	1.23	0.621
NSUB(N_{sub})	$2.24 \times 10^{16} cm^{-3}$	$2.12 \times 10^{16} cm^{-3}$
XJ(X_j)	0.2 μm	0.2 μm
NFS	$1.25 \times 10^{11} cm^{-2}$	$1.73 \times 10^{11} cm^{-2}$
VMAX(V_{sat})	$1.28 \times 10^5 m/s$	$2.49 \times 10^5 m/s$
KAPPA(κ)	0.16 V^{-1}	0.48 V^{-1}
ETA(η)	0.0126	0.039

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและการถอดแบบแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟทขนาดซับไมครอน เกี่ยวกับ การออกแบบ การจำลองกระบวนการสร้าง กระบวนการสร้างจริง การวัดทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้า และสุดท้ายเป็นการถอดแบบจำลองพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ซึ่งสรุปรายละเอียดได้ต่อไปนี้

1. การจำลองกระบวนการสร้างซีมอสทรานซิสเตอร์แบบบ่อแยกคู่(P-well และ N-well) เพื่อกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มของซีมอสทรานซิสเตอร์ ± 0.7 โวลต์ ($V_{TH} \approx \pm 0.7$ V) โดยการจำลองนี้จะใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD โดยใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี ระบาย(100) ที่สภาพด้านทานของฐานรองที่ $25 \Omega\text{-cm}$. โดยการจำลองปริมาณความเข้มข้นของสารเจือที่จำลองตรงบริเวณบ่อแยกคู่ตามตารางที่ 5.1 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ≈ 0.74 V. กระแสเดรนย่านอิมิตัวที่ $V_{DS} = V_{GS} = 5$ V เท่ากับ $0.36 \text{ mA}/\mu\text{m}$ และ ค่าแรงดันขีดเริ่มของพีมอสทรานซิสเตอร์ ≈ -0.61 V. กระแสเดรนย่านอิมิตัวที่ $V_{DS} = V_{GS} = -5$ V เท่ากับ $-0.21 \text{ mA}/\mu\text{m}$ ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือที่จำลอง

ชนิดของตัวแปร	ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ
บ่อแยกชนิด พี (P-well)	$6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
บ่อแยกชนิด เอ็น(N-well)	$5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
VTA	$9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

2. การวัดทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์ สรุปผลได้ดังตารางที่ 5.2 ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และตารางที่ 5.3 ของพีมอสทรานซิสเตอร์ ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 คุณลักษณะไฟฟ้าเอ็นมอสทรานซิสเตอร์

พารามิเตอร์เอ็นมอสทรานซิสเตอร์	W/L	คุณลักษณะไฟฟ้า
1. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ $V_{TH}(\text{big MOS})$	40/40	0.87 V
2. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก $V_{TH}(\text{short MOS})$	40/0.8	0.77 V
3. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดแคบ $V_{TH}(\text{narrow MOS})$	0.8/40	1.02 V
4. กระแสเดรน($I_{DS(\text{sat})}$)ในย่านอิมิตัว ที่ $V_{DS} = V_{GS} = 5$ V	40/0.8	13.13 mA

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติไฟฟ้าพินมอสทรานซิสเตอร์

พารามิเตอร์พินมอสทรานซิสเตอร์	W/L	คุณสมบัติไฟฟ้า
1. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ $V_{TH}(big\ MOS)$	40/40	-0.82 V
2. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก $V_{TH}(short\ MOS)$	40/0.8	-0.69 V
3. แรงดันขีดเริ่มมอสทรานซิสเตอร์ขนาดแคบ $V_{TH}(narrow\ MOS)$	0.8/40	-0.99 V
4. กระแสเดรน ($I_{DS(sat)}$) ในย่านอิ่มตัว ที่ $V_{DS} = V_{GS} = 5\ V$	40/0.8	-5.93 mA

3. แบบจำลองพารามิเตอร์ที่ได้นำเสนอ สรุปได้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงตามตารางที่ 5.4 ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และ พินมอสทรานซิสเตอร์ ระดับ 3

พารามิเตอร์	เอ็นมอสทรานซิสเตอร์	พินมอสทรานซิสเตอร์
TPG	1	-1
TOX(t_{GOX})	15 nm	15 nm
LD	0.105 μm	0.005 μm
WD	0.195 μm	0.25 μm
UO(μ_c)	529.08 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$	184.4 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
VTO($V_{T(Big\ MOS)}$)	0.887 V	0.79 V
THETA(θ, ξ)	0.046 V^{-1}	0.116 V^{-1}
RS(R_S)	20.69 Ω	59.42 Ω
RD(R_D)	20.69 Ω	59.42 Ω
DELTA(δ)	1.23	0.621
NSUB(N_{sub})	$2.24 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$2.12 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
XJ(X_j)	0.2 μm	0.2 μm
NFS	$1.25 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	$1.73 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
VMAX(v_{sat})	$1.28 \times 10^5 \text{ m/s}$	$2.49 \times 10^5 \text{ m/s}$
KAPPA(κ)	0.16 V^{-1}	0.48 V^{-1}
ETA(η)	0.0126	0.039

4. การหาแบบจำลองของพารามิเตอร์มอสทรานซิสเตอร์ ระดับ 3 หรือ The Level 3 MOSFET Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี มาผสมผสานกัน ที่เรียกว่า “การทดลองกึ่งทฤษฎี” หรือ Semi-Empirical ในที่นี้จะใช้พารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์ จำนวน 15 ตัว คือ

DELTA, ETA, KAPPA, LD, NFS, NSUB, RD, RS, THETA, TOX, TPG, UO, VMAX, VTO, WD
และ *XJ*

ในกรณีที่ต้องการถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นอาจต้องใช้แบบจำลองของ BSIM (Berkeley Short-channel IGFET Mode) จะต้องใช้พารามิเตอร์ถึง 60 ตัว

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ศุภเดช., **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, พ.ศ. 2544. บทที่ 6-7. หน้า 291-390.
- [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] [Online]. ; <https://i.stack.imgur.com/sRPCB.png>
- [4] S. Ogura, P. J. Tsang, W. W. Walker, D. L. Critchlow, and J. F. Shepard. “Design and Characteristics of the Lightly Doped Drain-Source (LDD) Insulated Gate Field Effect Transistor” **IEEE Trans. Elec. Dev.**, vol. ED-27, Aug. 1980. pp. 1359-1367.
- [5] S. Wolf., **Silicon Processing for the VLSI Era Volume 2 ; Process Integration**, California : Lattice Press. 1990. pp. 355-361.
- [6] Synopsys Inc. “Sentaurus TCAD User Manual, version Z-2007.” [Compact Disc]. USA : Synopsys Inc. 2007
- [7] Dieter K. Schroder., **Semiconductor Material and Device Characterization**, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1990. pp. 183-186.
- [8] ASTM International. 1988 “ASTM F617, Standard Method for Measuring MOSFET Linear Threshold Voltage.” **Annual Book of ASTM Standrads**. Am. Soc. Test. Mat.
- [9] อนุชา เรืองพานิช, รังสรรค์ เมืองเหลือ, นพพล พงษ์พันธุ์จันทร์, ภาวดี มีสรพรพงศ์ และ อัมพร โพธิ์ไย., “แบบจำลองพารามิเตอร์และการหาค่า ของมอสเฟตระดับ 3” **มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 2**, กันยายน พ.ศ. 2549. หน้า 42.
- [10] Daniel P. Foty., **MOSFET Modeling with SPICE Principles and Practice**, New Jersey : Prentice Hall, Inc., 1997. pp. 154-211.
- [11] อนุชา เรืองพานิช และสรายุทธ วิศวแสวงสุข., “วิธีการหาแบบจำลองพารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์” **สารเนคเทค**, ปีที่ 10, ฉบับที่ 53. กรกฎาคม พ.ศ. 2546. หน้า 31-35.
- [12] G. Baum and H. Beneking. “Drift Velocity Saturation in MOS Transistors” **IEEE Trans. Elec. Dev.**, vol. ED-17, Jun. 1970. pp. 481-482.

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

3. ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3-1101-01199-84-1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
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 : surasak.ni@kmitl.ac.th