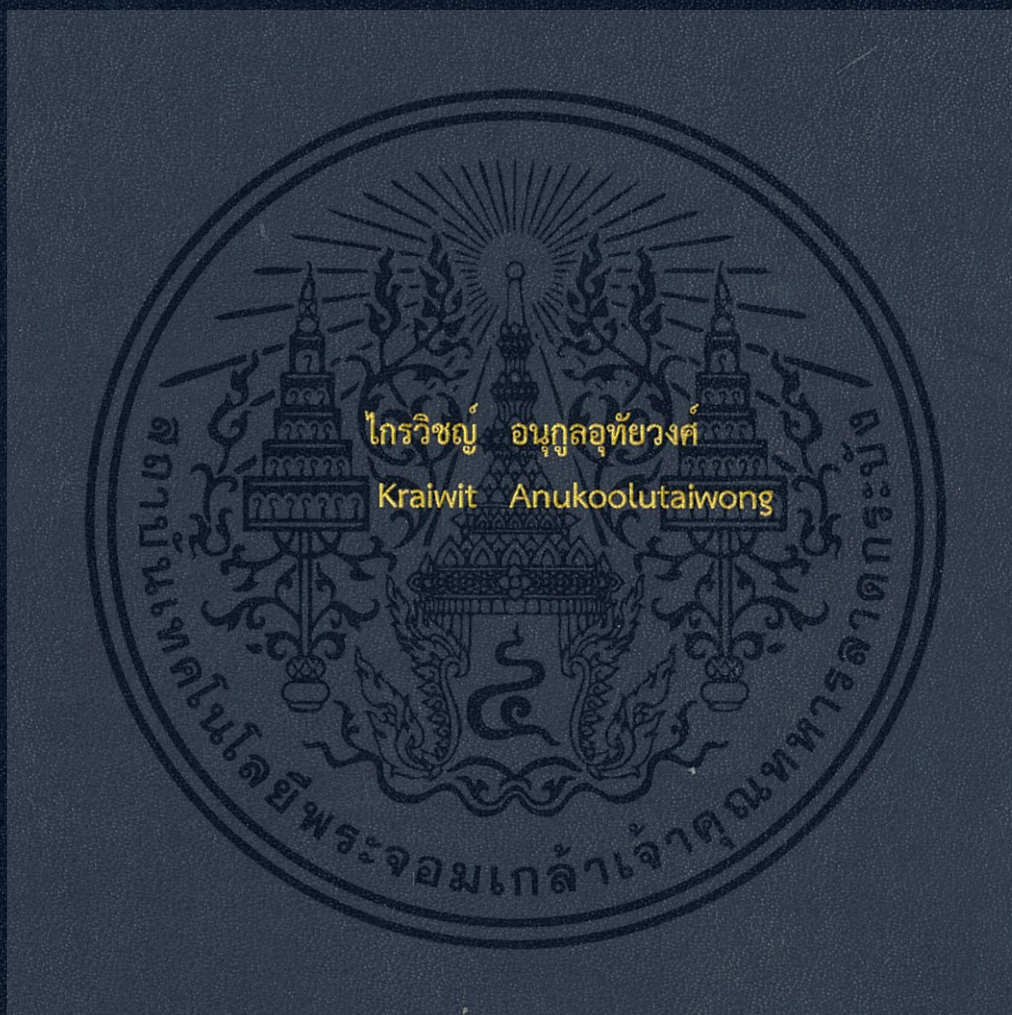


การจำลองแบบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าซับไมครอน-นาโนมอสเฟต  
THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SUBMICRON-  
NANOMETER MOSFET



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558

การจำลองแบบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าซับไมครอน-นาโนมอสเฟต  
THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SUBMICRON-  
NANOMETER MOSFET

โดย

ไกรวิชญ์ อนุกุลอุทัยวงศ์ รหัส 55010109



T143856

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **143856**  
วัน,เดือน,ปี **04 ต.ค. 2559**

b. 12810411  
f. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองแบบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าซับไมครอน-นาโนมอสเฟต  
THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SUBMICRON  
NANOMETER MOSFET

ผู้จัดทำ นายไกรวิชญ์ อนุกุลอุทัยวงศ์ รหัสประจำตัว 55010109

ปริญญานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(รศ.ดร.เต็มพงษ์ เท็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<b>Thesis Title</b>	The study of electrical characteristics of submicron-nanometer MOSFET
<b>Student</b>	Mr. Kraiwit Anukoolutaiwong Student ID. 55010109
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering
<b>Program</b>	Electronic Engineering
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul

### Abstract

This project studies about semiconductor technology, by studying semiconductor theory. This project studies the semiconductor devices (MOSFET) and semiconductor processing in every procedure. Moreover, this project has a simulation of MOSFET by using the simulation program, studied by changing MOSFET parameter to see the alteration of MOSFET characteristic.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับทำโครงการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้การสนับสนุนในด้านการศึกษามาโดยตลอด ไม่ว่าจะเป็นเรื่องคำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงเรื่องค่าใช้จ่ายในการเรียน

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆและพี่ๆทุกคนที่ให้คำแนะนำและคอยช่วยเหลือตลอดการทำโปรเจกต์ ทำให้ปริญาณีนพธนั้นเสร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.วีระ เพ็งจันทร์ ที่ให้ความรู้ในเรื่องโปรแกรมการจำลองอุปกรณ์และให้คำแนะนำต่างๆมากมาย ผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ไกรวิชญ์ อนุกุลอุทัยวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และกึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ii
กิตติกรรมประกาศ .....	iii
สารบัญ .....	iv
สารบัญรูป .....	ix
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ .....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น .....	2
2.1.1 ลักษณะภายนอก .....	2
2.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ .....	2
2.1.3 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ .....	3
2.2 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ .....	3
2.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้น .....	3
2.2.2 กระบวนการออกซิเดชัน .....	4
2.2.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี .....	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.4 กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน .....	8
2.2.5 กระบวนการฝังประจุไอออน .....	8
2.2.6 กระบวนการกัด .....	9
2.2.7 กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมี .....	10
2.2.8 กระบวนการทางโลหะ .....	11
2.2.9 กระบวนการเก็บบรรจุ .....	13
2.3 มอสเฟต .....	14
2.3.1 โครงสร้าง MOSFET .....	14
2.3.2 ประเภท MOSFET .....	15
2.3.3 สัญลักษณ์แทน MOSFET .....	16
2.3.4 การไบอัส .....	16
2.3.5 ประเภทของมอสทรานซิสเตอร์ .....	18
2.3.6 แรงดันขีดเริ่ม .....	18
2.3.7 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ .....	19
2.3.8 สมการกระแสของมอสทรานซิสเตอร์ .....	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	
3.1 โปรแกรม TCAD .....	21
3.1.1 GTS Framework .....	21
3.1.2 คุณสมบัติของโปรแกรม .....	21
3.1.3 โปรแกรมย่อย .....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม.....	23
3.2.1 The Tools Column .....	24
3.2.2 The Framework Hom.....	25

## บทที่ 4 ผลการทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นมอสด้วยแม่แบบ.....	26
4.1.1 วิธีการสร้างโปรเจคใหม่.....	26
4.1.2 วิธีการสร้างโครงสร้างใหม่.....	27
4.1.3 วิธีการสร้างอุปกรณ์ใหม่.....	27
4.1.4 การใช้อุปกรณ์แม่แบบ.....	28
4.1.5 วิธีการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของแม่แบบ.....	29
4.1.6 วิธีสร้างการจำลองผลอุปกรณ์ใหม่.....	30
4.1.7 การจำลองแบบอุปกรณ์.....	31
4.1.8 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	35
4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความยาวเกต.....	36
4.2.1 ความยาวเกต = 400 nm และความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm .....	37
4.2.2 ความยาวเกต = 200 nm และความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm .....	38
4.2.3 ความยาวเกต = 120 nm และความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm .....	39
4.2.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.3 ความสัมพันธ์ของความหนาเกตออกไซด์.....	41
4.3.1 ความหนาเกตออกไซด์ = 12 nm และ ความยาวเกต = 200 nm .....	41
4.3.2 ความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm และ ความยาวเกต = 200 nm .....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.3 ความหนาเกตออกไซด์ = 1 nm และ ความยาวเกต = 200 nm .....	43
4.3.4 สรุปลักษณะวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	44
4.4 ความสัมพันธ์ของขนาดความยาวของ MOSFET .....	45
4.4.1 Width = 1000 nm ความยาวเกต = 250 nm .....	45
4.4.2 Width = 800 nm ความยาวเกต = 250 nm .....	46
4.4.3 Width = 600 nm ความยาวเกต = 250 nm .....	47
4.4.4 Width = 400 nm ความยาวเกต = 250 nm .....	48
4.4.5 สรุปลักษณะวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	49
4.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้น P-Substrate .....	50
4.5.1 ความเข้มข้น $2 \times 10^{16}$ cc .....	50
4.5.2 ความเข้มข้น $2 \times 10^{17}$ cc .....	51
4.5.3 ความเข้มข้น $2 \times 10^{18}$ cc .....	52
4.5.4 สรุปลักษณะวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	53
4.6 Near Punch-through Effect .....	54
4.6.1 สรุปลักษณะวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	55
4.7 Snapback break-down Effect .....	56
4.7.1 กำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นแบบ “step” จาก 0.0v ถึง 40.0v .....	56
4.7.2 สรุปลักษณะวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	57
4.8 Substrate Bias Effect .....	58
4.8.1 สรุปลักษณะวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

### บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง.....66

5.2 ข้อเสนอแนะ .....66

เอกสารอ้างอิง .....67

### ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การคำนวณค่าแรงขีดเริ่ม.....68



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน.....	4
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิและความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์.....	5
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิและความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์.....	5
2.4 แผ่นเวเฟอร์ที่ถูกเคลือบด้วย Photoresist.....	6
2.5 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่าน Mask.....	7
2.6 การแพร่สารเจือด้วยความร้อน.....	8
2.7 การยิงไอออนของฟอสฟอรัสเข้าไปทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด N.....	9
2.8 การยิงไอออนของฟอสฟอรัสเข้าไปทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด P.....	9
2.9 การสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน.....	10
2.10 ส่วนของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่บนฐานรองซิลิคอนหลังกำจัดน้ำยาไวแสง.....	10
2.11 การสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมี.....	11
2.12 การสร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์ปกคลุมผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน.....	12
2.13 ช่องที่จะใช้สำหรับสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก.....	12
2.14 Metal Contact ต่อจากส่วนของ ซอร์ส เกต และเดรน.....	13
2.15 MOSFET.....	14
2.16 โครงสร้าง MOSFET.....	14
2.17 โคตรสร้างของ NMOS และ PMOS.....	15
2.18 สัญลักษณ์แทน MOSFET.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 ลักษณะการไปอัสมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น .....	17
2.20 ลักษณะการไปอัสมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี.....	17
2.21 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ประเภทต่างๆ .....	18
2.22 สถานะภาพต่างๆในโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆกัน .....	18
2.23 คุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์.....	19
2.24 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น .....	20
3.1 ส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม .....	23
4.1 ขั้นตอนการสร้าง New Project .....	26
4.2 ขั้นตอนการสร้าง New Structure .....	27
4.3 ขั้นตอนการสร้าง New Device.....	28
4.4 การเลือกใช้ Template.....	28
4.5 การสร้างอุปกรณ์จากแม่แบบ.....	29
4.6 การเปลี่ยนพารามิเตอร์จากแม่แบบ .....	30
4.7 การสร้าง New Device Simulation .....	30
4.8 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ gate .....	31
4.9 การคัดลอกการจำลองก่อนหน้า.....	32
4.10 การกำหนดค่าแรงดันเกต .....	33
4.11 การกำหนดค่าแรงดันเดรน .....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 การกำหนดคุณสมบัติในแกน X และแกน Y.....	34
4.13 การกำหนดค่าแรงดันที่เกตและเดรน.....	34
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต.....	35
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเกต.....	35
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน.....	36
4.17 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	37
4.18 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $L = 400 \text{ nm}$ และ $Tox = 5 \text{ nm}$ .....	37
4.19 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	38
4.20 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $L = 200 \text{ nm}$ และ $Tox = 5 \text{ nm}$ .....	38
4.21 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	39
4.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $L = 120 \text{ nm}$ และ $Tox = 5 \text{ nm}$ .....	39
4.23 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดความยาวเกตค่าต่างๆ.....	40
4.24 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	41
4.25 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $Tox = 12 \text{ nm}$ และ $L = 200 \text{ nm}$ .....	41
4.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	42
4.27 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $Tox = 5 \text{ nm}$ และ $L = 200 \text{ nm}$ .....	42
4.28 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	43
4.29 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $Tox = 1 \text{ nm}$ และ $L = 200 \text{ nm}$ .....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ความสัมพันธ์ของกระแสตรงเมื่อกำหนดความหนาของเกทออกไซด์ค่าต่างๆ .....	44
4.31 โครงสร้างอุปกรณ์.....	45
4.32 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อ Width = 1000 nm ความยาวเกท = 250 nm .....	45
4.33 โครงสร้างอุปกรณ์.....	46
4.34 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อ Width = 800 nm ความยาวเกท = 250 nm .....	46
4.35 โครงสร้างอุปกรณ์.....	47
4.36 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อ Width = 600 nm ความยาวเกท = 250 nm .....	47
4.37 โครงสร้างอุปกรณ์.....	48
4.38 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อ Width = 400 nm ความยาวเกท = 250 nm .....	48
4.39 ความสัมพันธ์ของกระแสตรงเมื่อกำหนดขนาดความยาวค่าต่างๆ.....	49
4.40 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ .....	50
4.41 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อความเข้มข้นมีค่า $2 \times 10^{16}$ cc.....	50
4.42 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ .....	51
4.43 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อความเข้มข้นมีค่า $2 \times 10^{17}$ cc.....	51
4.44 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ .....	52
4.45 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อความเข้มข้นมีค่า $2 \times 10^{18}$ cc.....	52
4.46 ความสัมพันธ์ของกระแสตรงเมื่อกำหนดความเข้มข้น P-Substrate ค่าต่างๆ.....	53
4.47 โครสร้างอุปกรณ์ความยาวเกท 50 nm .....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 การกำหนดค่าการไบอัส.....	54
4.49 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อปรับค่าความยาวเกตเป็น 50 nm.....	55
4.50 การกำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นแบบ “step” จาก 0.0v ถึง 40.0v และ step = 1v.....	56
4.51 ความสัมพันธ์กระแสแรงดัน.....	57
4.52 การกำหนดค่า Vg เป็นแบบ “step” จาก -2.0v ถึง 2.0v และให้ step = 0.2v, Vd = 2v ...	58
4.53 ค่าความสัมพันธ์ Id/Vg ใน TCAD .....	58
4.54 กราฟความสัมพันธ์ Id/Vg ใน Microsoft Excel.....	59
4.55 การกำหนดค่า Vg เป็นแบบ “step” จาก -2.0v ถึง 2.0v และให้ step = 0.05v, Vd = -1v	59
4.56 ค่าความสัมพันธ์ Id/Vg ใน TCAD.....	60
4.57 กราฟความสัมพันธ์ Id/Vg ใน Microsoft Excel.....	60
4.58 การกำหนดค่า Vg เป็นแบบ “step” จาก -2.0v ถึง 2.0v, Vd = -1v และ Vb = -1v.....	61
4.59 ค่าความสัมพันธ์ Id/Vg ใน TCAD .....	61
4.60 กราฟความสัมพันธ์ Id/Vg ใน Microsoft Excel.....	62
4.61 ค่าความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน.....	62
4.62 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน.....	63
4.63 ความสัมพันธ์ Root of Id(SAT)/Vgs เมื่อไบอัส Vsb = 0v.....	63
4.64 ความสัมพันธ์ Root of Id(SAT)/Vgs เมื่อไบอัส Vsb = 1v.....	64
4.65 ความสัมพันธ์ Root of Id(SAT)/Vgs เมื่อไบอัส Vsb = 2v.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.66 ความสัมพันธ์ Root of $I_d(SAT)/V_{gs}$ เมื่อไบอัส $V_{sb}$ ค่าต่างๆ.....	65
ก.1 การหาค่า Threshold Voltage โดยใช้ Microsoft Excel.....	68



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาอย่างเป็นอย่างมากและได้ถูกนำไปใช้ในโลกรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย จึงเป็นสิ่งที่น่าศึกษาและพัฒนาเพื่อให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

#### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายว่าต้องการศึกษาครั้งนี้คือเรียนรู้กระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำรวมถึงโครงสร้างและวิธีการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อนำพื้นฐานความรู้ไปพัฒนาต่อยอดในอนาคต

#### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ผู้เขียนคาดว่าจะได้รับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั้งหมด ทั้งในด้านโครงสร้างและวิธีการทำงานพื้นฐานต่างๆของอุปกรณ์

#### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เวลาในการวิจัยประมาณ 1 ภาคการศึกษา โดยการวิจัยจะทำโดยใช้โปรแกรมเพื่อจำลองการออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ รวมไปถึงการจำลองค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามต้องการเพื่อศึกษาการทำงานอย่างหลากหลาย

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในการศึกษาค้นคว้าและทดลองครั้งนี้ผู้เขียนคาดว่าจะได้รับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นอย่างมาก และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

สารกึ่งตัวนำ (อังกฤษ: semiconductor) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เป็นวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มักมีตัวประกอบของ germanium, selenium, silicon วัสดุเนื้อแข็งผลึกพวกหนึ่งที่มีสมบัติเป็นตัวนำ หรือสื่อไฟฟ้าก้ำกึ่งระหว่างโลหะกับอโลหะหรือฉนวน ความเป็นตัวนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสิ่งไม่บริสุทธิ์ที่มีเจือปนอยู่ในวัสดุพวกนี้ ซึ่งอาจเป็นธาตุหรือสารประกอบก็มี เช่น ธาตุเจอร์เมเนียม ซีลีคอน ซีลีเนียม และตะกั่วเทลลูไรด์ เป็นต้น วัสดุกึ่งตัวนำพวกนี้มีความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะตรงข้ามกับโลหะทั้งปวง

ที่อุณหภูมิ ศูนย์ เคลวิน วัสดุพวกนี้จะไม่ยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านเลย เพราะเนื้อวัสดุเป็นผลึกโควาเลนต์ ซึ่งอิเล็กตรอนทั้งหลายจะถูกตรึงอยู่ในพันธะโควาเลนต์หมด (พันธะที่หยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม) แต่ในอุณหภูมิธรรมดา อิเล็กตรอนบางส่วนมีพลังงาน เนื่องจากความร้อนมากพอที่จะหลุดไปจากพันธะ ทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเป็นสาเหตุให้สารกึ่งตัวนำ นำไฟฟ้าได้เมื่อมีมีสนามไฟฟ้ามาต่อเข้ากับสารนี้

#### 2.1.1 ลักษณะภายนอก

- มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม (จัตุรัส หรือ ผืนผ้าก็ได้)
- เป็นงานมีขา (Peripheral) หรือไม่มีก็ได้ งานไม่มีขา (Non-Lead) บางทีขาที่ว่าจะมีลักษณะกลม ๆ เรียกว่า บอล
- ตัวงานจะมีลักษณะสีดำ (หรือใส (Clear resin) โดยส่วนมากจะดำ) เนื่องจากใช้เรซินในการฉีดยึดขึ้นรูป ภายในจะมีวงจรต่าง ๆ ใช้สำหรับงานต่าง ๆ กันไป

#### 2.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเจือปนลงไปในสารกึ่งตัวนำแท้ เช่น

ซีลีคอน หรือเยอรมันเนียม เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (N-Type) และสารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-Type)

### 2.1.3 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำประเภท เอ็น (N-Type)

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของสารหนู ทำให้มีอิเล็กตรอนเกินขึ้นมา 1 ตัว เรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในก้อนผลึกนั้น จึงยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้เช่นเดียวกับตัวนำทั่วไป

สารกึ่งตัวนำประเภท พี (P-Type)

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของอะลูมิเนียม ทำให้เกิดที่ว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) ขึ้นในแขนร่วมของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนข้างโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในโฮลทำให้ดูคล้ายกับโฮลเคลื่อนที่ได้จึงทำให้กระแสไหลได้

## 2.2 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ

### 2.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้น (Wafer Preparation)

การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้นมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของวงจรรวมอย่างมาก การเลือกแผ่นฐานรองต้องพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆของแผ่นฐานรอง เช่น ความเข้มข้นฐานรอง ระบายผลึก ค่าพิทความต้านทานและอื่นๆ แผ่นฐานรองซิลิคอนที่นิยมใช้กันทั่วไปสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- ฐานรองชนิดเอ็น ระบาย (100) คือ แผ่นฐานรองซิลิคอนที่เกิดจากการเติมสารเจือของธาตุหมู่ 5 เช่น Arsenic หรือ Phosphorus
- ฐานรองชนิดพี ระบาย (100) คือ แผ่นฐานรองซิลิคอนที่เกิดจากการเติมสารเจือของธาตุหมู่ 3 เช่น Boron

ต้องมีการทำความสะอาดแผ่นฐานรองซิลิคอนก่อนการนำไปใช้เสมอ เพื่อล้างสิ่งเจือปนต่างๆ รวมถึงออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นบนผิวของแผ่นฐานรองออก เพื่อให้ผิวหน้าสะอาดและให้ได้อุปกรณ์ที่มี

ประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น

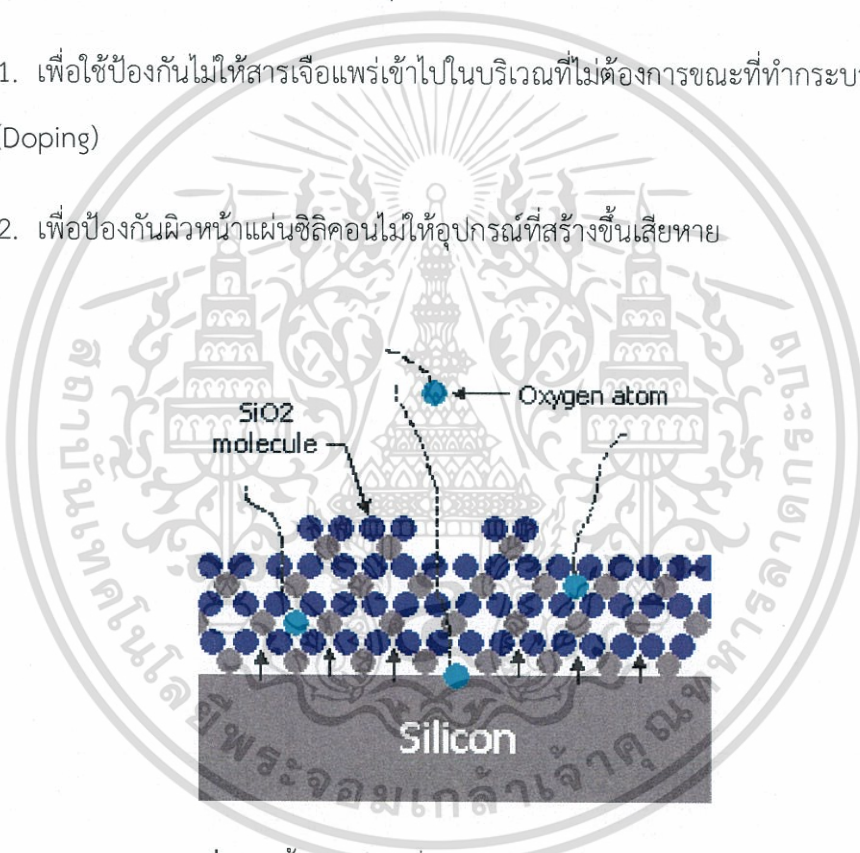
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

หลังจากการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่น โดยการนำแผ่นซิลิคอนใส่เข้าไปในท่อควอทซ์ (Quartz Tube) และใส่เข้าไปในเตาความร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 1000-1200 องศาเซลเซียส มีออกซิเจน และไอน้ำฉีดพ่นเข้าไปในเตา ซิลิคอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ปกคลุมผิวของแผ่นซิลิคอน ซึ่งซิลิคอนไดออกไซด์นี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใส

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) มีวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่าง คือ

1. เพื่อใช้ป้องกันไม่ให้อาร์เจนหรือแพร์เข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการขณะที่ทำกระบวนการเติมสารเจือ (Doping)
2. เพื่อป้องกันผิวหน้าแผ่นซิลิคอนไม่ให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเสียหาย



รูปที่ 2.1 ชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน

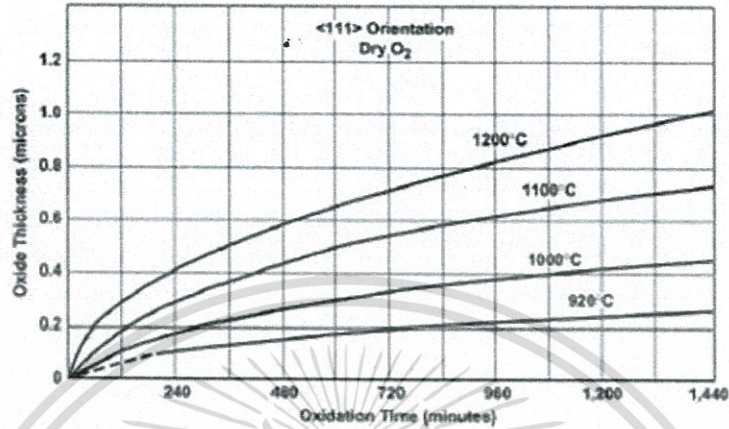
การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

### 1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของแก๊สออกซิเจนที่บริสุทธิ์กับอะตอมของซิลิคอนที่อุณหภูมิสูง ประมาณ  $1100^{\circ}\text{C}$  อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับอะตอมของออกซิเจนจนเกิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

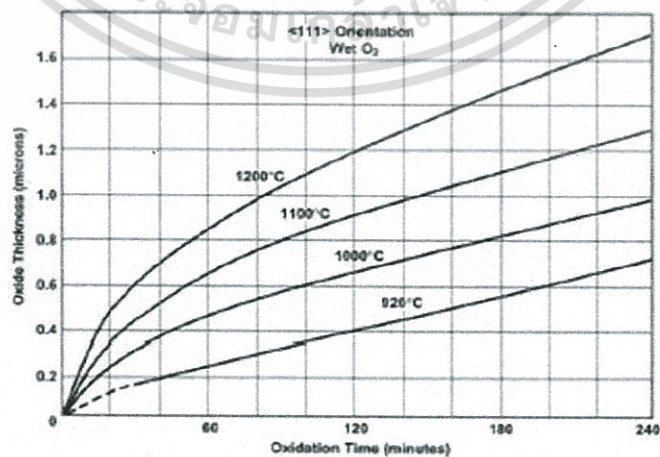
ซิลิกอนไดออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สำหรับความหนาของชั้น  $\text{SiO}_2$  นี้สามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิและความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

## 2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิกอนและอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำโดยการปล่อยแก๊สออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้วที่บรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90–95°C แก๊สออกซิเจนซึ่งอิ่มตัวและมีไอน้ำอยู่ด้วยจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ที่มีแผ่นเวเฟอร์วางอยู่ ทำให้อะตอมของออกซิเจนรวมตัวกับอะตอมของซิลิกอนจนเกิดเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ความหนาของชั้น  $\text{SiO}_2$  สามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิและความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

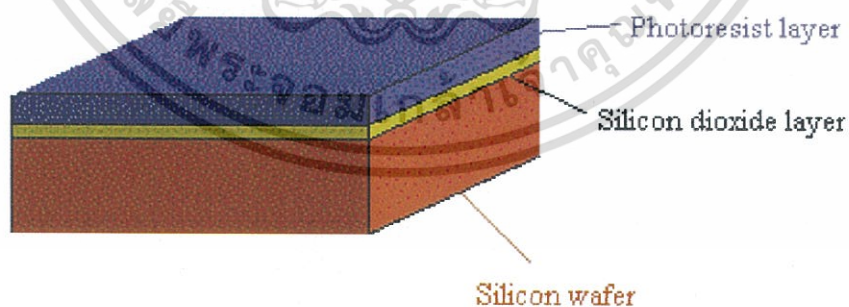
จากความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4 พบว่า ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบขึ้นเกิดเร็วกว่ากระบวนการที่ได้จากแบบแห้งถึง 4 เท่า แต่ซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างซิลิคอนไดออกไซด์สูงกว่าแบบขึ้น

### 2.2.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

หลังจากกระบวนการออกซิเดชันผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจะถูกเคลือบด้วยชั้นของ  $\text{SiO}_2$  ท้วแผ่นเพื่อป้องกันการแพร่ของสารเจือเข้าไปในเนื้อของแผ่นซิลิคอนในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆจึงจำเป็นต้องเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ออก เรียกว่า กระบวนการทางแสง (Photolithography) ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญมากในการทำจรรวมเพราะต้องใช้กระบวนการทางแสงเพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์หลายครั้ง

กระบวนการเริ่มต้นจากการเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist) ลงบนชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ทั่วทั้งแผ่นซิลิคอนด้วยเครื่องสปินเนอร์ (spinner) ซึ่งน้ำยาไวแสงที่ใช้มี 2 ชนิด คือ

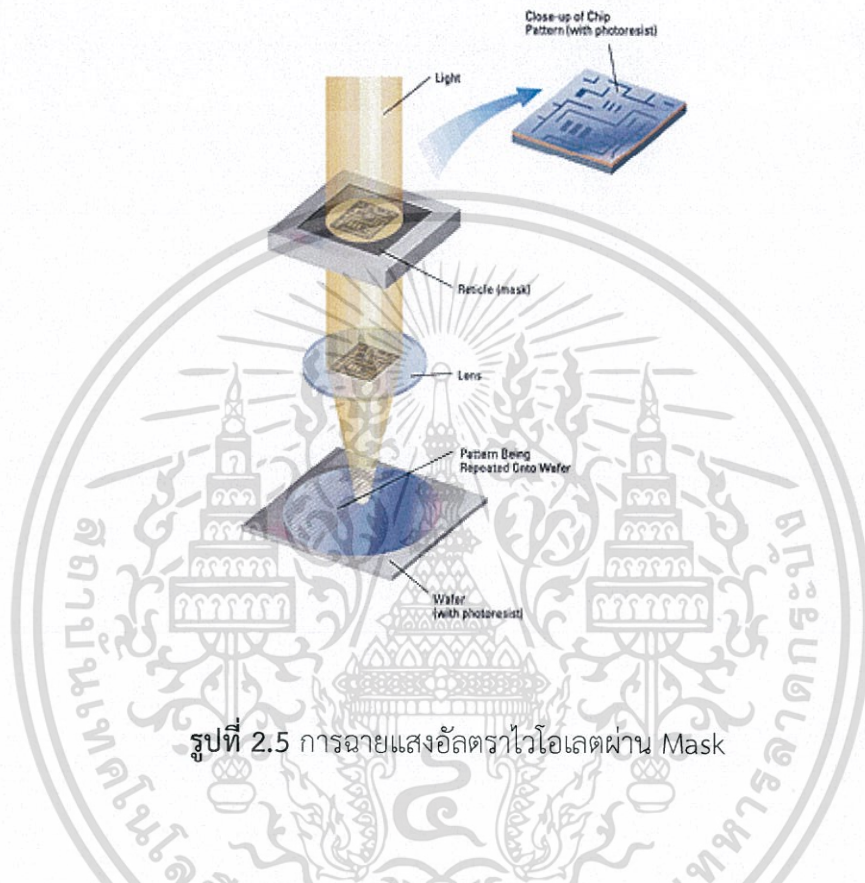
1. น้ำยาไวแสงเชิงลบ (negative photo resist) ได้แก่ DTFR way coat
2. น้ำยาไวแสงเชิงบวก ( positive photo resist) ได้แก่ AZ – 1350



รูปที่ 2.4 แผ่นเวเฟอร์ที่ถูกเคลือบด้วย Photoresist

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเคลือบเสร็จแล้วทำการอบฟิล์มครั้งแรก (prebake) เพื่อให้หน้าไวแสงยึดติดกับผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนไปทำการจัดวางมาส์กด้วยกระจกมาร์กตามลวดลายที่ออกแบบไว้ แล้วนำไปฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่องจัดวางมาส์ก (mask aligner) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2.5 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่าน Mask

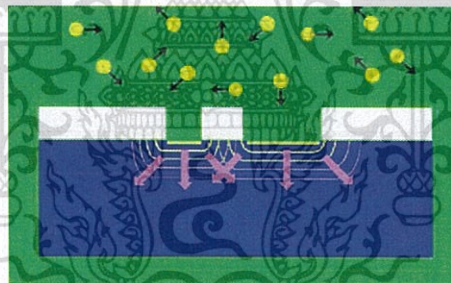
หลังจากฉายแสงแล้วทำการสร้างลวดลายฟิล์มด้วยน้ำยาสร้างลวดลายฟิล์ม (developer) แล้วทำการอบแห้งฟิล์มครั้งหลังอีกครั้ง (postbake) ทำการทางด้านหลังแผ่นและอบแห้งอีกครั้ง จากนั้นนำไปทำการกัด (etching) ซึ่งเป็นการลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ไม่มีฟิล์มคลุมอยู่โดยทำการกัดในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer) ที่มี  $\text{HF} : \text{NH}_4\text{F} = 1:6$  และมีอัตราการกัดประมาณ  $1,000 \text{ \AA} / \text{นาที่}$  จนกระทั่งชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ถูกกัดออกจนหมด และขั้นตอนสุดท้ายคือ การลอกฟิล์ม (photo resist & stripping) โดยน้ำยาไวแสงเชิงบวก สามารถลอกออกได้ง่ายในสารละลายออกแทนิกส์ เช่น อาซิโตน ส่วนน้ำยาไวแสงเชิงลบจะลอกออกได้ด้วยการต้มในกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งภายหลังจากการลอกฟิล์มต้องทำการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนอีกครั้งก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการอื่นๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 กระบวนการการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion Process)

กระบวนการการแพร่สารเจือเป็นการแพร่สารเจือลงบนแผ่นฐานรอง ด้วยวิธีการแพร่ด้วยอุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรอง และถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้นกลไกการแพร่ของสารเจือเป็น 2 แบบ คือ การเข้าไปแทนที่อะตอม และการเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม

ขั้นตอนการแพร่สารเจือ ทำโดยการกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งแหล่งสารเจือโบรอนใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และฟอสฟอรัสใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปยังบรรยากาศของสารเจือ อะตอมของสารเจือจะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นฐานรองและแพร่เข้าไปยังผลึกของฐานรอง ซึ่งสิ่งที่มีอิทธิพลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพร่ ได้แก่ ความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิ และระยะเวลาในการแพร่ โดยในกระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การแพร่สารเจือขั้นต้น (Pre-deposition) และการขับลึก (Drive-in)



รูปที่ 2.6 การแพร่สารเจือด้วยความร้อน

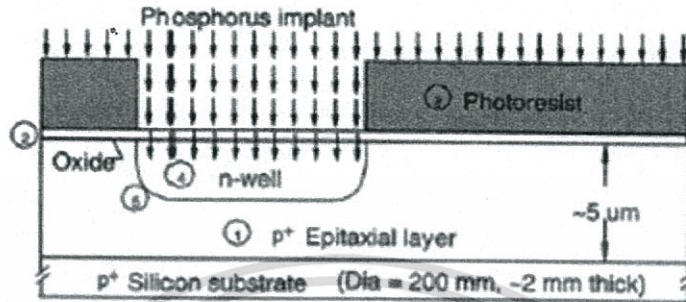
## 2.2.5 กระบวนการฝังประจุไอออน (Ion Implantation Process)

เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมวัสดุ โดยการเร่งประจุไอออนด้วยสนามไฟฟ้าและฝังเข้าไปยังเนื้อวัสดุที่ต้องการ กระบวนการนี้ถูกใช้เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางไฟฟ้า ฟิสิกส์ หรือเคมี กระบวนการฝังประจุไอออนนี้สามารถควบคุมให้มีความเที่ยงตรงได้ทั้งในการควบคุมความลึกของรอยต่อตลอดจนปริมาณอะตอมของสารเจือ

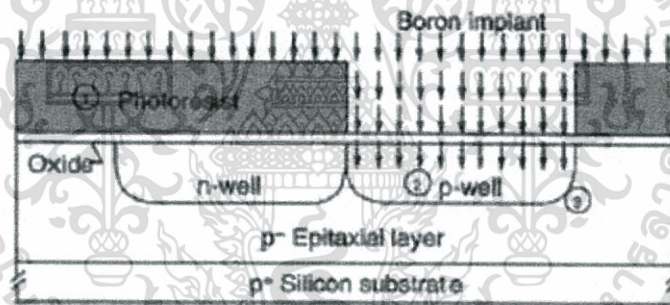
กระบวนการฝังประจุไอออนมีสารเจือที่นิยมใช้ ได้แก่ โบรอน ฟอสฟอรัส หรืออาร์เซนิก

อะตอมสารเจือจะสร้างประจุพาหะภายหลังการแอนนิล (annealing) โดยโฮลถูกสร้างจากสารเจือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดพีส่วนอิเล็กทรอนิกส์ถูกสร้างจากสารเจือชนิดเอ็น ซึ่งกระบวนการการยิงฟอสฟอรัสและโบรอนเข้าไปในเนื้อสารสามารถแสดงในรูปที่ 2.7 และ รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การยิงไอออนของฟอสฟอรัสเข้าไปทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด N



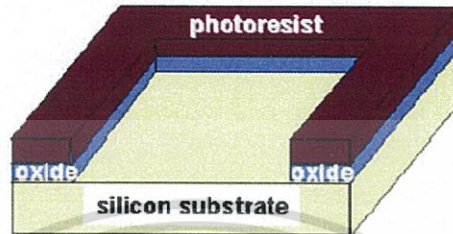
รูปที่ 2.8 การยิงไอออนของโบรอนเข้าไปทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด P

### 2.2.6 กระบวนการสกัด (Etching)

ภายหลังจากการสร้างลวดลายของน้ำยาไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเสร็จแล้วต้องผ่านกระบวนการสกัด (Etching) เพื่อทำการสกัดส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หรือชั้นซิลิคอนไนไตรด์ ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีน้ำยาไวแสงปกคลุมออก วิธีการสกัดที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ การใช้สารเคมี (Wet Etching) และการสกัดด้วยพลาสมา (Dry Etching) [3] ทั้งสองกรณีให้ผลลัพธ์คล้ายกันคือการสกัดจะ

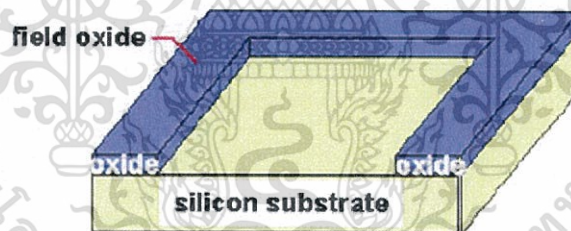
หยุดลงที่ของด้านล่างของชั้นฟิล์มที่ต้องการสกัดออก ขึ้นอยู่กับอัตราการสกัดและเวลา นิยมใช้การเอทช์แบบไอโซทรอปิกที่ส่วนใหญ่ใช้สำหรับกรเวตติ้งในเพอซิงกริดและในไมโครชิป แต่ในบางกรณีก็ใช้การเอทช์แบบแอนไอโซทรอปิกในการตัดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกัดแบบพลาสมาในการสกัดรูปทรงที่ละเอียด โดยทั่วไปใช้สารละลายของ HF-HNO<sub>3</sub> สำหรับการสกัดซิลิคอน, HF สำหรับสกัดซิลิคอนไดออกไซด์, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ร้อนสำหรับสกัดซิลิคอนไนไตรด์ และ H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> เย็นสำหรับสกัดโลหะอลูมิเนียม ส่วนกาซที่ใช้ในการทำพลาสมามักใช้ฟลูโอโรนหรือคลอรีน เช่น CF<sub>4</sub> โดยการสกัดซิลิคอนไดออกไซด์สามารถแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 การสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน

หลังจากสกัดส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกแล้วจะเข้าสู่กระบวนการสกัด (Etching) อีกครั้งเพื่อกำจัดชั้นของน้ำยาไวแสง (Photoresist) ออกไป เหลือส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ต้องการอยู่บนแผ่นฐานรองซิลิคอน ดังรูปที่ 2.10

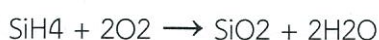


รูปที่ 2.10 ส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่อยู่บนแผ่นฐานรองซิลิคอนหลังจากกำจัดชั้นของน้ำยาไว

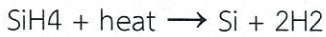
แสง

### 2.2.7 กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition-CVD)

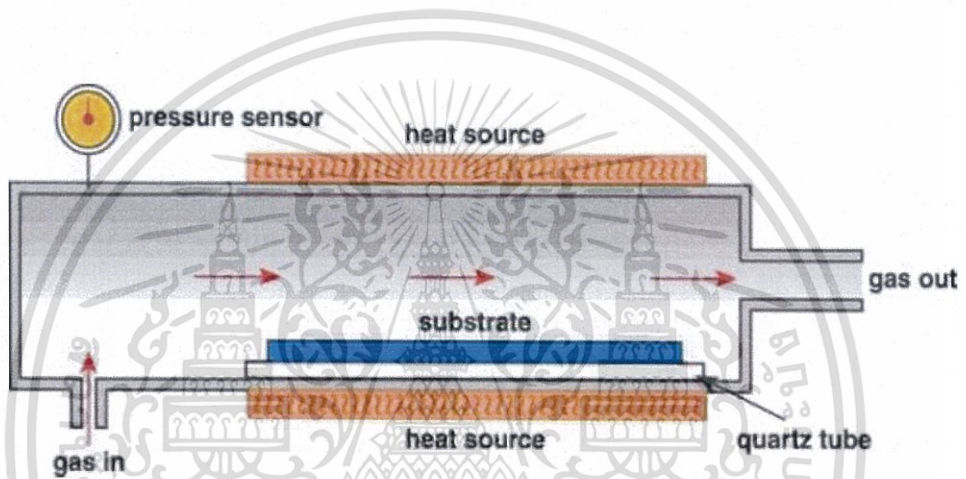
CVD ถูกใช้เพื่อสร้างชั้นฟิล์มของวัสดุบนแผ่นฐานรองซิลิคอน เช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ ซิลิคอนไนไตรด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป (Polycrystalline Silicon) กระบวนการทาง CVD ปกติกระทำที่อุณหภูมิช่วง 300- 900 °c และใช้ปฏิกิริยาเคมีดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การสร้างด้วยกระบวนการนี้จะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า และไม่เชื่อมติดแน่นกับแผ่นซิลิคอนเหมือน การสร้างด้วยกระบวนการความร้อน ดังนั้นจึงมักนำมาใช้ในกรณีที่ไม่สร้างจากความร้อนหรือใช้เป็น ฉนวนบนซิลิคอน สร้างด้วยการใช้พลังงานพลาสมาและปฏิกิริยาเคมีภายใต้อุณหภูมิต่ำเท่านั้น โดยเฉพาะการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิเพียง 300 °c เท่านั้น



รูปที่ 2.11 การสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมี

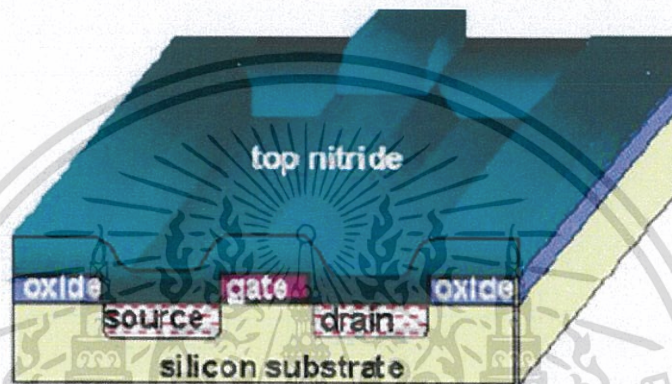
## 2.2.8 กระบวนการทางโลหะ (Metallization)

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์ด้วยกระบวนการต่างๆจนได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์จนครบ ขาดเพียงการเชื่อมต่ออุปกรณ์เหล่านั้นเข้าหากันซึ่งยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึง จำเป็นต้องผ่านกระบวนการเพื่อเชื่อมต่อชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์เข้าหากันให้เป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์ และพร้อมใช้งานทางไฟฟ้าได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยขั้นตอนการเชื่อมต่อชิ้นส่วนต่างๆด้วยโลหะนี้ เรียกว่า กระบวนการทางโลหะ (Metallization) สำหรับการเลือกใช้โลหะที่ใช้เคลือบแผ่นซิลิคอนเพื่อ เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกแถบความนำต่อเชื่อมภายในของวงจรรวม (Interconnector) ของวงจรรวม

ควรมีคุณสมบัติ เช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีความต้านทานต่ำ มีความจุไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

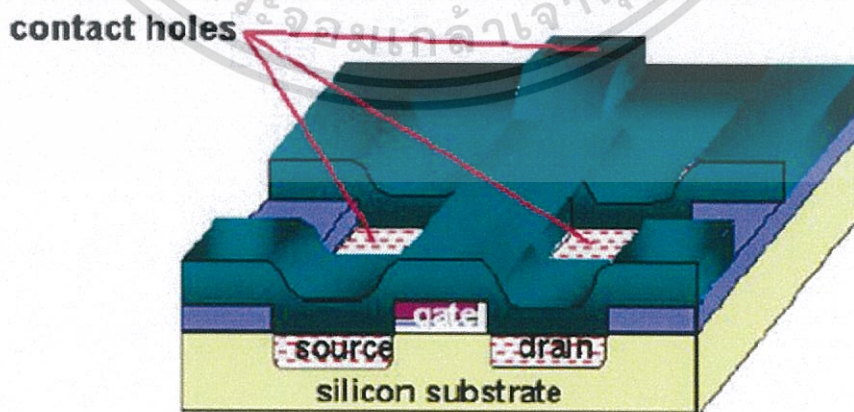
ผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำภายนอกได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) ทอง (Au) และเงิน (Ag) เป็นต้น

กระบวนการทางโลหะเริ่มต้นจากการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่มีความหนาปกคลุมผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง และรอยขีดข่วนที่อาจเกิดขึ้นกับชั้นของสารกึ่งตัวนำด้านล่าง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ปกคลุมผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน

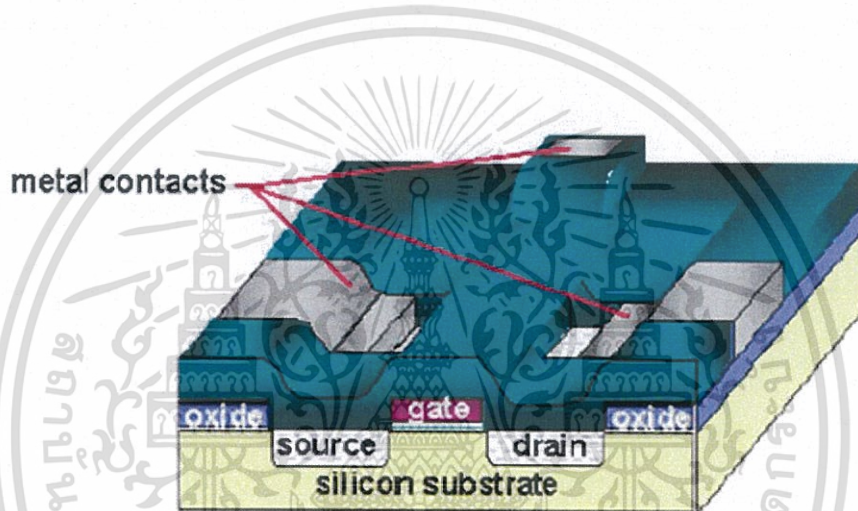
หลังจากนั้นจะเป็นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการสกัดเพื่อเปิดช่องสำหรับนำโลหะมาสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกต่อส่วนต่างๆของวงจบบนแผ่นซิลิคอน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ช่องที่จะใช้สำหรับสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกโดยใช้โลหะ เช่น อลูมิเนียมมาสร้างเป็นชั้นปกคลุมผิวหน้าของซิลิคอน กระบวนการทางโลหะมีหลายอย่างด้วยกัน เช่น การระเหยด้วยไส้ความร้อน (Filament Evaporation) การสปัตเตอริง (Sputtering) ภายหลังจากการเคลือบโลหะอลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอน และทำการโฟโตลิโธกราฟีแล้ว จะได้ลวดลายของวงจรรวมตามที่ออกแบบไว้ โดยอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำเชื่อมต่อ และก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มมิกขึ้น แต่รอยสัมผัสนี้อาจไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องทำการซินเตอริง (sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสเป็นโอห์มมิกที่สมบูรณ์และไม่เปลี่ยนแปลงต่อสภาพแวดล้อม



รูปที่ 2.14 Metal Contact ต่อจากส่วนของ ซอร์ส เกต และเดรน

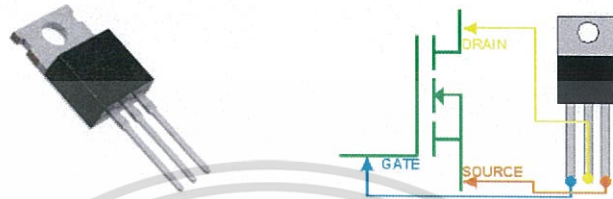
### 2.2.9 กระบวนการเก็บบรรจุ (Packaging)

การเก็บบรรจุเป็นกระบวนการป้องกันความเสียหายของชิ้นงาน อันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกหรือสารเคมีภายนอก และยังช่วยระบายความร้อนที่อาจเกิดขึ้นในขณะใช้งานได้ด้วย โดยการนำแผ่นซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการสร้างไปตัดเพื่อแยกตัววงจรรวมออกเป็นชิ้นเล็กๆที่เรียกว่า ไดซ์ (dice) หรือชิพ จากนั้นจึงนำเอาชิพไปติดตั้งบนฐานรองและเชื่อมต่อसानออกมาข้างของฐานรอง เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน จึงนำไปเก็บบรรจุและนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 มอสเฟต

มอสเฟต (อังกฤษ: metal-oxide-semiconductor field-effect transistor: MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ ที่ใช้อิทธิพลสนามไฟฟ้าในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ช่องทางไหลของโลหะในการทำส่วน GATE นิยมใช้ในวงจรดิจิทัล โดยนำไปสร้างลอจิกเกตต่างๆ เพราะมีขนาดเล็ก

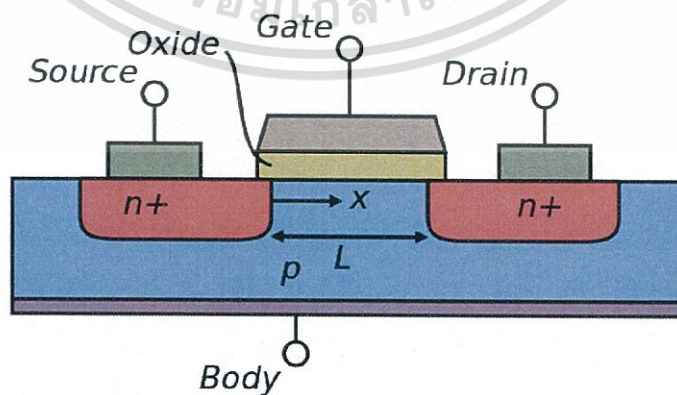


รูปที่ 2.15 MOSFET

### 2.3.1 โครงสร้างของ MOSFET

MOSFET ประกอบด้วยสามส่วน คือ

- GATE เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่น/สองแผ่นเพื่อ สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า
- SOURCE เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ
- DRAIN เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ



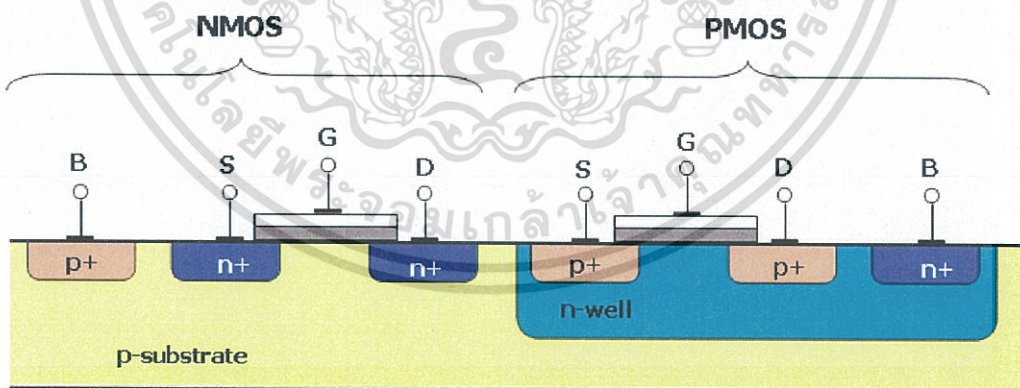
รูปที่ 2.16 โครงสร้าง MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ประเภทของ MOSFET

nMOS (negative MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท NPN เมื่อมีความต่างศักย์เป็นบวก (สนามไฟฟ้าแรง) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจาก source ไป drain ได้ เมื่อปล่อยความต่างศักย์สูง จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศลงอย่างแรง โอลใน p-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง (ตามรูปที่ประกอบข้างบน) ประกอบกับมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีอิเล็กตรอนอิสระมากจนเป็น n-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็น n-type เหมือนกับ drain และ source ได้โดยใช้อิเล็กตรอนอิสระเป็นพาหะ

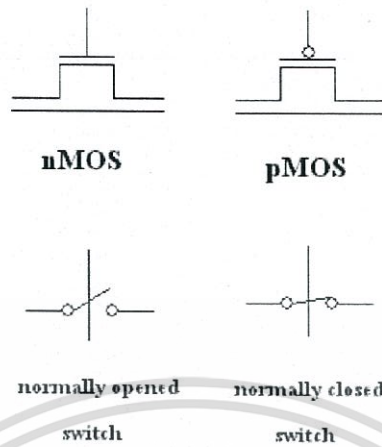
pMOS (positive MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท PNP เมื่อมีความต่างศักย์ต่ำหรือเป็นลบ (สนามไฟฟ้าอ่อน) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจาก source ไป drain ได้ จะทำงานกลับกับ nMOS โดยเมื่อปล่อยความต่างศักย์ต่ำ (โดยมากมักจะติดลบ) จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศขึ้นอย่างแรง อิเล็กตรอนอิสระใน n-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง ประกอบกับมีโฮลบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีโฮลมากจนเป็น p-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็น p-type เหมือนกับ drain และ source ได้โดยใช้โฮลเป็นพาหะ



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของ NMOS และ PMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 สัญลักษณ์แทน MOSFET



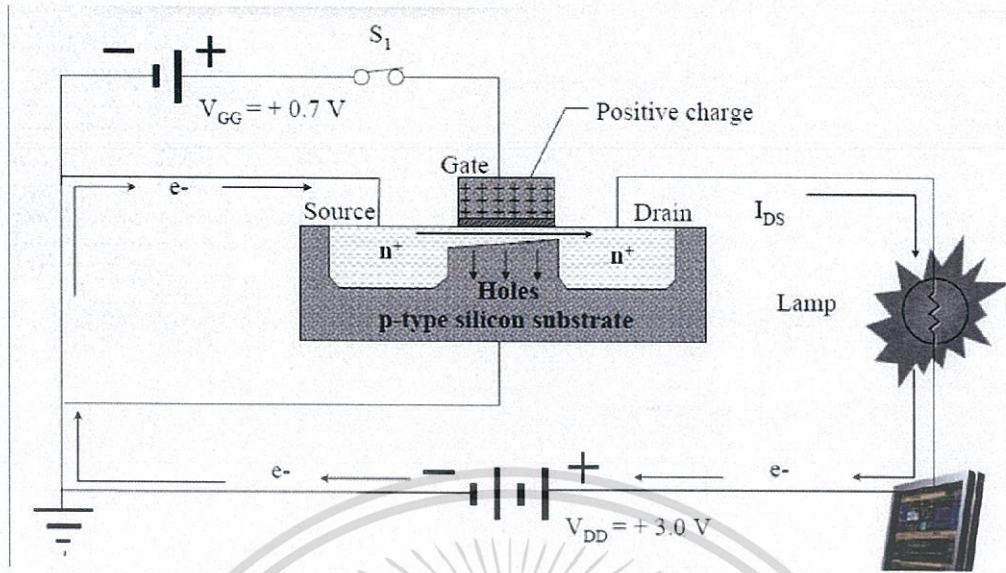
รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์แทน MOSFET

### 2.3.4 การไบอัส (Bias)

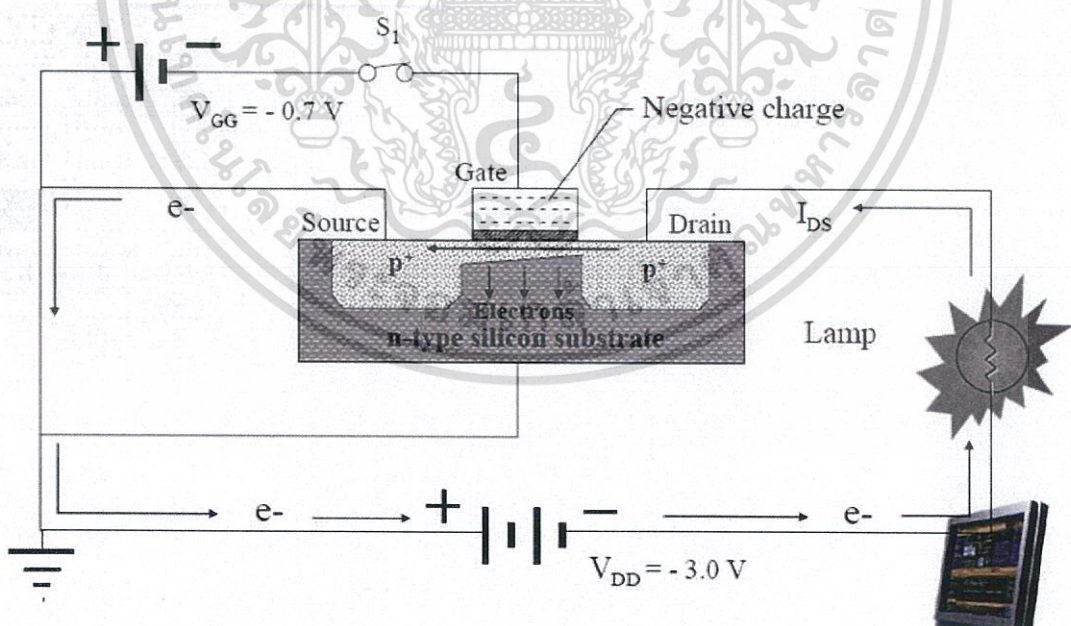
1. มอสมทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกต มีค่าน้อยจะส่งผลให้ขาเดรนและขาซอร์ส ไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตมีค่ามาก จะส่งผลให้ขาเดรนและขาซอร์ส มีกระแสไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.19

2. มอสมทรานซิสเตอร์ชนิดพี ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตมีค่ามาก จะส่งผลให้ขาเดรนและขาซอร์ส ไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตมีค่าน้อยจะส่งผลให้ขาเดรนและขาซอร์ส มีกระแสไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ลักษณะการไบอัสมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น

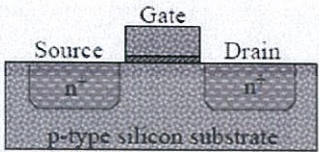
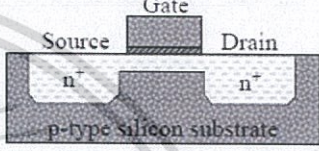
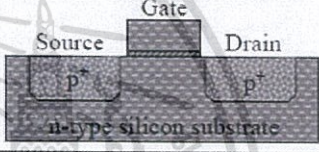
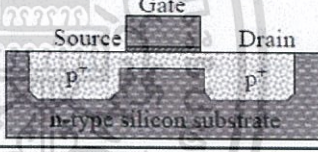


รูปที่ 2.20 ลักษณะการไบอัสมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

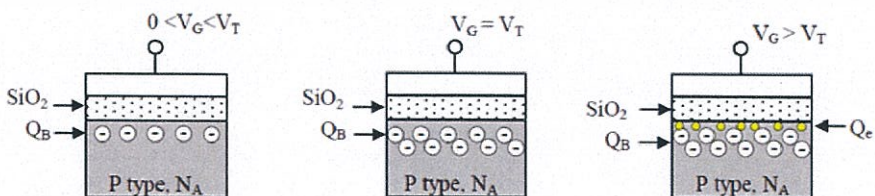
### 2.3.5 ประเภทของมอสทรานซิสเตอร์

มอสทรานซิสเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ดีพลีชัน (Depletion) และเอ็นฮานซ์เมนต์ (Enhancement) สามารถแสดงการทำงานของแต่ละประเภทได้ดังนี้

MOSFET Type	Mode	Standby Condition	$V_{CC}$ Switching Requirements	Physical Structure
nMOS	Enhancement	Off	+	
nMOS	Depletion	On	-	
pMOS	Enhancement	Off	-	
pMOS	Depletion	On	+	

รูปที่ 2.21 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ประเภทต่างๆ

### 2.3.6 แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{TH}$ )



รูปที่ 2.22 สถานะภาพต่างๆในโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

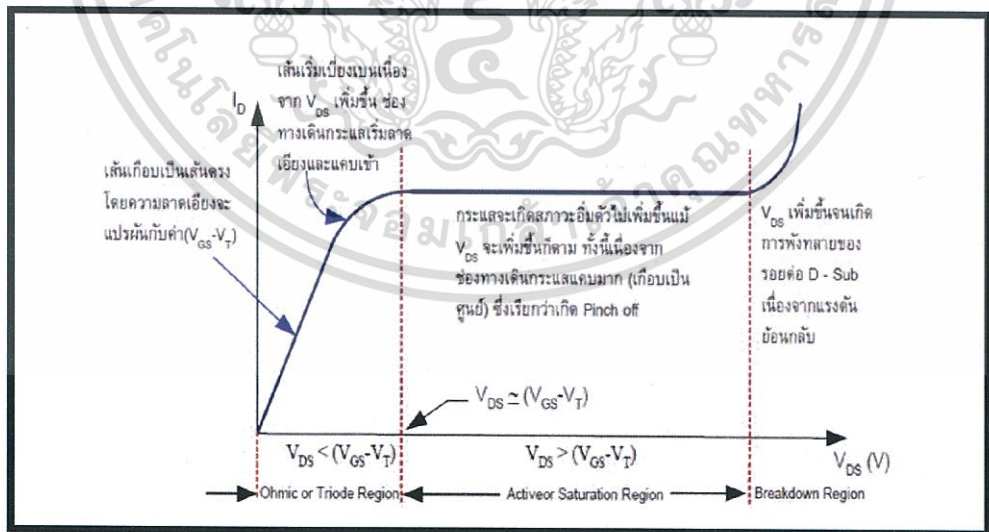
จากรูปที่ 2.22 หากแรงดันที่เกตมีค่าต่าง ๆ อิเล็กตรอนอิสระยังไม่สามารถที่จะทำให้ อะตอมสารเจืออ็อนไนซ์ได้หมด เมื่อแรงดันเกตสูงขึ้นถึงค่าเฉพาะค่าหนึ่งก็จะทำให้การอ็อนไนซ์ หมดพอดี และหากแรงดันเกตมากกว่าค่าเฉพาะนั้นก็จะมีอิเล็กตรอนอิสระเหลือ อิเล็กตรอนเหล่านี้ เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หากมีความต่างศักย์ระหว่างซอกกับเดรน พาหะนี้ก็จะเป็น กระแส และแรงดัน เกต ค่าเฉพาะนั้นก็เรียกว่า แรงดันขีดเริ่ม ; Threshold Voltage,  $V_{TH}$

### 2.3.7 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์

ลักษณะการทำงานของมอสเฟต (MOSFET) โดยสามารถที่แบ่งออกได้เป็น 3 สภาวะการทำงาน คือ

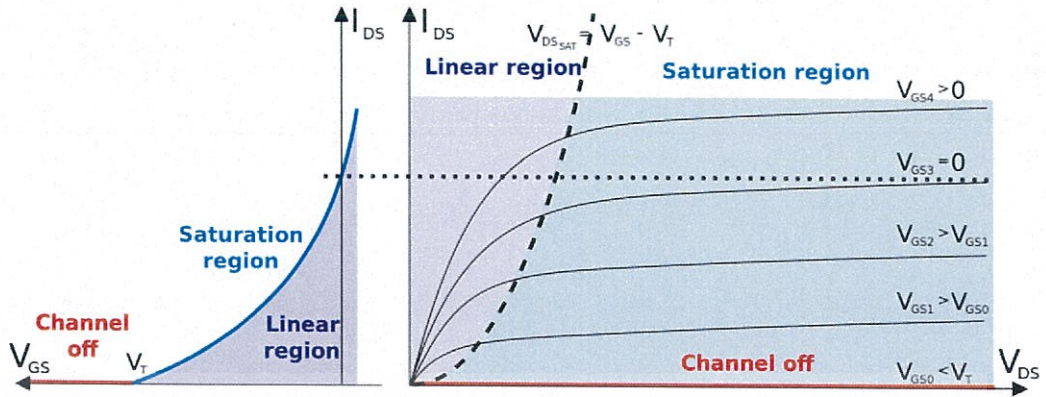
- 1) สภาวะการทำงานแบบคัตออฟ (Cut-off Mode)
- 2) สภาวะการทำงานแบบเชิงเส้น (Linear Mode)
- 3) สภาวะการทำงานแบบอิ่มตัว (Saturation Mode)

ซึ่งจากลักษณะการทำงานของอุปกรณ์มอสเฟต (MOSFET) ทั้ง 3 สภาวะการทำงานนั้น ดังแสดงใน รูปที่ 2.17



รูปที่ 2.23 คุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น

### 2.3.8 สมการกระแสของมอสทรานซิสเตอร์

สมการกระแส  $I_D$  ของมอสทรานซิสเตอร์ ในแต่ละช่วงการทำงานสรุปได้ดังนี้

Cut-off  $|V_{GS}| - |V_T| \leq 0, \quad I_D = 0$

Linear  $0 < |V_{DS}| < |V_{GS}| - |V_T|, \quad I_D = \beta \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$

Saturation  $0 < |V_{GS}| - |V_T| < |V_{DS}|, \quad I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2$

เมื่อ  $\beta = \mu C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) = KP \left( \frac{W}{L} \right)$

$\beta_n = \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) = KP \left( \frac{W}{L} \right)$  สำหรับมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น

$\beta_p = \mu_p C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) = KP \left( \frac{W}{L} \right)$  สำหรับมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 แนะนำโปรแกรม TCAD

##### 3.1.1 GTS Framework

GTS Framework เป็นโปรแกรมที่ครอบคลุมการทำงานสำหรับเทคโนโลยีโปรแกรมประยุกต์ CAD (TCAD) เช่น การจำลองอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ออกแบบโดยประกอบด้วยโปรแกรมย่อยต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน ปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน (workflow), สนับสนุนโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลให้สอดคล้องกัน ส่วนติดต่อผู้ใช้ (user interface) สำหรับเก็บเครื่องมือทั้งหมด [10]

GTS Framework ถูกพัฒนาและได้รับการดูแลรักษาโดย GTS ซึ่งเป็นบริษัทเอกชนในกรุงเวียนนาและร่วมมือกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเวียนนา (Vienna University of Technology) ประเทศออสเตรีย

##### 3.1.2 คุณสมบัติของโปรแกรม

- ง่ายต่อการใช้ โดยมีส่วนติดต่อผู้ใช้แบบกราฟิกที่สอดคล้องกันสำหรับเครื่องมือทั้งหมด
- มีการสนับสนุนแพลตฟอร์ม (platforms) ที่หลากหลาย
- มีการจัดโครงสร้าง แต่การจัดการไฟล์ตรงไปตรงมาสำหรับขั้นตอนการทำงานที่ง่ายขึ้น (โครงการ ; เครื่องมือ - โพลเดอร์ )
- มีการแสดงผลแบบ 1D/2D/3D
- มีการดำเนินการจำลองระยะไกล/เครือข่ายคอมพิวเตอร์
- มีการจัดเก็บข้อมูลโครงการระยะไกล/แบ่งปันข้อมูลในเวิร์กกรุ๊ป
- การพิมพ์ผลบนอินเทอร์เน็ต/ การชมเต็มรูปแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 โปรแกรมย่อย

ภายใน GTS Framework สามารถใช้โปรแกรมย่อยต่างๆได้ ขึ้นอยู่กับใบอนุญาตที่ได้รับ ซึ่งโปรแกรมย่อยที่ได้จาก GTS ที่สามารถใช้งานได้ในปัจจุบันมีดังนี้

#### 3.1.3.1 Structure

GTS Structure เป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่ายใช้สำหรับการกำหนดและแก้ไขโครงสร้างอุปกรณ์ มีการอำนวยความสะดวกสำหรับผู้ใช้งานด้วย art graphical และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้งาน

GTS Structure เป็นทางเลือกสำหรับการสร้างอุปกรณ์ทดสอบอย่างง่ายก่อนที่จะทำโครงสร้างจริงที่มีความซับซ้อน เป็นอุปกรณ์ที่สามารถออกแบบแก้ไขได้โดยใช้ตัวโปรแกรม 2D/3D CAD สามารถนำเข้าจากรูปแบบ TCAD อื่นๆ หรือสามารถสร้างขึ้นบนพื้นฐานของพารามิเตอร์แม่แบบซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง และเป็นส่วนพิเศษที่เพิ่มขึ้นเมื่อเร็วๆนี้ สำหรับรูปแบบรุ่นสามารถอ่านไฟล์ GDSII mask สำหรับผู้ใช้ การจำลองปริมาณ เป็นการจำลอง dopings หรือวัสดุ สามารถกำหนดและแก้ไขฟังก์ชันโดยการวิเคราะห์เครื่องมือใน CAD Editor, หรือยืนยันจากข้อมูลการวัด

นอกจากนี้ GTS Structure ยังใช้งานง่าย สอดคล้องสำหรับการสร้างโครงสร้างสุทธิที่ไม่มีโครงสร้างใน 2D และ 3D โดยมีคู่มือและระบบอัตโนมัติสำหรับเลือก refinement ต่างๆ

#### 3.1.3.2 minimos NT

ใช้ในวัตถุประสงค์เพื่อจำลองอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ทั้งแบบให้คงที่ (steady-state), ชั่วคราว (transient), การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของอุปกรณ์ในรูปแบบ 2 มิติและ 3 มิติ, อุปกรณ์ในโหมดผสม (mixed-mode) และการจำลองวงจร

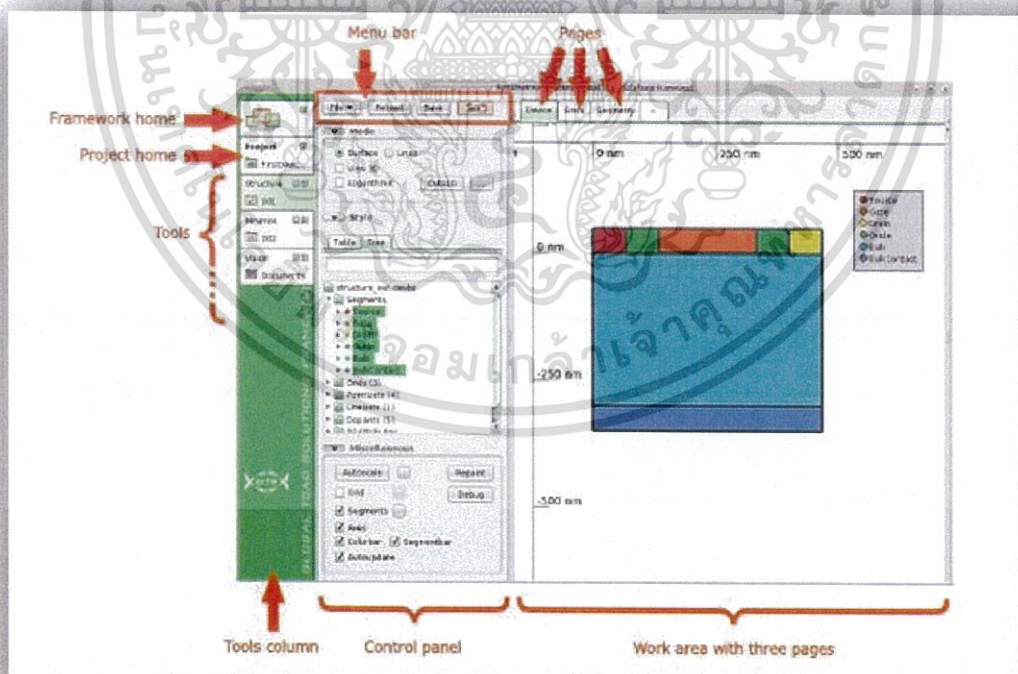
ครอบคลุมแบบจำลองทางกายภาพ ช่วยในการจำลองชนิดโครงสร้างของอุปกรณ์ขั้นสูง เช่น อุปกรณ์ CMOS อุปกรณ์ซิลิคอนบนฉนวน (SOI) และอุปกรณ์อื่น โครงสร้าง คำนึงถึงธรรมชาติของกับดักและสารเจือ minimos NT มีความน่าเชื่อถือและการเปลี่ยนแปลงการปรับแรงดันสูง เช่น เป็นอุปกรณ์ขนาดใหญ่และซิลิคอนระนาบบน finfets ฉนวนมีช่องความยาว 22nm หรือน้อยกว่า

### 3.1.3.3 Vision

GTS Vision เป็นเครื่องมือสำหรับการสร้างอุปกรณ์หลายมิติและพล็อตกราฟแบบลือก เครื่องมือนี้สามารถใช้สำหรับการแสดงผลและการดูผลการจำลองของอุปกรณ์ GTS Vision แสดงได้ในหลายวิธี ช่วยในการแสดงภาพโครงสร้างอุปกรณ์ 1D/2D/3D การแสดงภาพเรขาคณิตและ doping profile การจำลองข้อมูล เวกเตอร์ชนิดสเกล่าแสดงบนพื้นผิว SOI นอกจากนี้โมดูลการพล็อตเส้นโค้ง จะแสดงพื้นพารามตริกและปริมาณที่กำหนดโดยใช้ลักษณะเส้นสัญลักษณ์และสีต่างๆ

GTS Vision ช่วยให้การสร้างข้อมูลมีความชัดเจน โดยส่วนใหญ่ใช้งานง่ายช่วยให้วิศวกร ทำนายผลการทดลองได้อย่างรวดเร็วและสร้างชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพในเวลาเพียงไม่นาน

## 3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 The Tools Column

แถบเครื่องมือที่เป็นแนวตั้งแถบสีเขียว ที่ขอบซ้ายของหน้าต่างแสดงให้เห็นตัวแปรและจำนวนรายการในแถบอินเตอร์เฟซ เช่น

- ส่วนบนสุดของคอลัมน์เป็นจุดที่เริ่มต้นสำหรับการสร้างโปรเจกต์ซึ่งประกอบไปด้วยสาม pages labelled ซึ่งเป็นเครื่องมือ โครงสร้างและระบบ
- ถ้าเปิดโปรเจกต์และต้องการสร้าง Project Home ทำได้โดยเลือกส่วนที่สองถัดจาก Framework home
- นอกจากนี้ลงคอลัมน์เครื่องมือที่แสดงให้เห็นเครื่องมือทั้งหมดที่เปิดอยู่ในปัจจุบัน
  - GTS Structure ทำงานใน ToolFolder 001
  - GTS Minimos-NT ทำงานใน ToolFolder 002
  - GTS Vision ที่ทำงานในโหมดแบบสแตนด์อโลนในโพลีเตอร์เอกสาร

เครื่องมือที่ใช้งานในโหมดนี้จะแสดงแถบเครื่องมือและ ToolFolder ที่เกี่ยวข้อง ในขณะที่เครื่องมือที่อยู่ในสถานะ Stand-alone จะมีการแสดงไอคอนเป็นสีเทา

สีพื้นหลังสีเขียวแสดงให้เห็นว่าเป็นรายการที่ใช้งานในปัจจุบัน สามารถสลับการใช้งานระหว่างรายการได้โดยการใช้เมาส์เลื่อนขึ้นหรือลง เมื่อเครื่องมือ Bar ทำการโฟกัส (ถ้าไม่ได้กดปุ่ม Tab เพื่อย้ายโฟกัส)

รายการทั้งหมดในคอลัมน์เครื่องมือ จะมีปุ่มปิด การปิดเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง หรือการปิด Framework Home ออกจาก framework เมื่อใช้การปิดต้องมีการบันทึก files เพื่อที่จะเปิดเครื่องมือได้ในครั้งต่อไป

ปุ่มปิดเป็นทางลัดเพื่อปิดตัวเลือกในเมนู context menu ของแต่ละรายการ ที่สามารถเปิดโดยคลิกขวาที่ Tab นั้น ๆ การที่สามารถเข้าถึงเมนูได้โดยการเมนูกดแถบพื้นที่เมื่อได้ Tab ที่ต้องการโฟกัส (ใช้แป้น tab เพื่อย้ายโฟกัส) แต่ละรายการของเมนู มีตัวเลือกเพิ่มเติมจะแสดงโดย "... " ปุ่มซ้ายกับปุ่มปิด สามารถคลิกปุ่มนี้เพื่อเข้าถึงรายการเมนู โดยประกอบด้วยตัวเลือกเหล่านี้

- Explore คือ การเปิดตัว ToolFolder / การทำงานของเครื่องมือในเบราว์เซอร์ file ของระบบปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Close คือ การปิดเครื่องมือ (เหมือนปุ่มปิด)
- Delete คือ การปิดเครื่องมือและลบ ToolFolder (เพื่อป้องกันการลบโดยไม่ตั้งใจข้อมูลอื่นๆ ในโฟลเดอร์ ตัวเลือกนี้จะใช้ได้เฉพาะเครื่องมือที่ทำงานในโหมด Framework ที่จะสันนิษฐานว่าไฟล์ไม่อยู่ในโฟลเดอร์)

### 3.2.2 The Framework Home

เป็นกรอบรายการแรกบน Tools Column จะแสดงทุกครั้งเมื่อเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมซึ่งประกอบด้วยสามหน้าหลักๆ คือ Tools, Projects และ System

- หน้า Tools ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยต่างๆ เช่น minimos NT, Structure และ Vision ทำหน้าที่เป็นหน้าจอต้อนรับเมื่อเปิดโปรแกรม ประกอบด้วยคำอธิบายสั้นๆ ของโปรแกรมย่อยต่างๆ และเอกสารคู่มือที่สามารถดาวน์โหลดเพื่อประกอบการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมย่อยนั้นๆ
- หน้า Projects เป็นส่วนที่แสดงรายการของงานที่บันทึกไว้และเพื่อสร้างงานใหม่หรือเปิดไฟล์ที่บันทึกไว้ขึ้นมาสร้างต่อ
- หน้า System เป็นส่วนอธิบายถึง License สามารถแก้ไขหรือเพิ่ม License ได้ในกรณีที่ต้องการติดตั้งโปรแกรมครั้งแรก

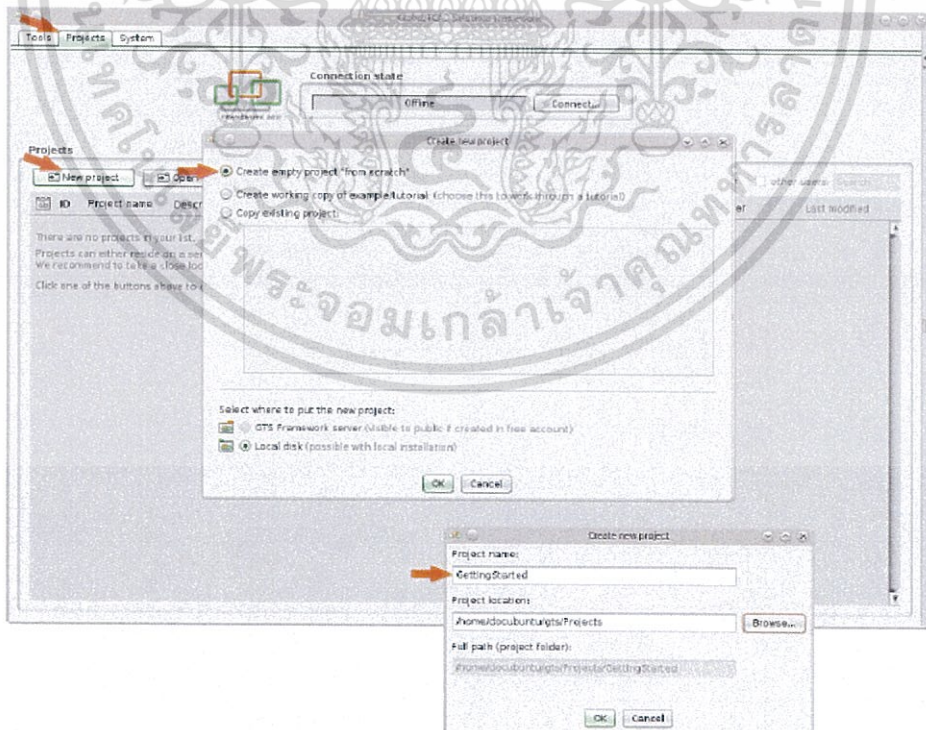
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นโดยใช้แม่แบบ (Template)

##### 4.1.1 วิธีการสร้างโปรเจคใหม่ (New Project)

- เปิดโปรแกรม GTS Framework
- คลิกแท็บที่ชื่อ Projects
- เลือก New project
- เลือก Create empty project "from scratch" เพื่อสร้างอุปกรณ์ขึ้นมาใหม่
- ตั้งชื่อ Projects ที่จะสร้าง
- คลิก OK

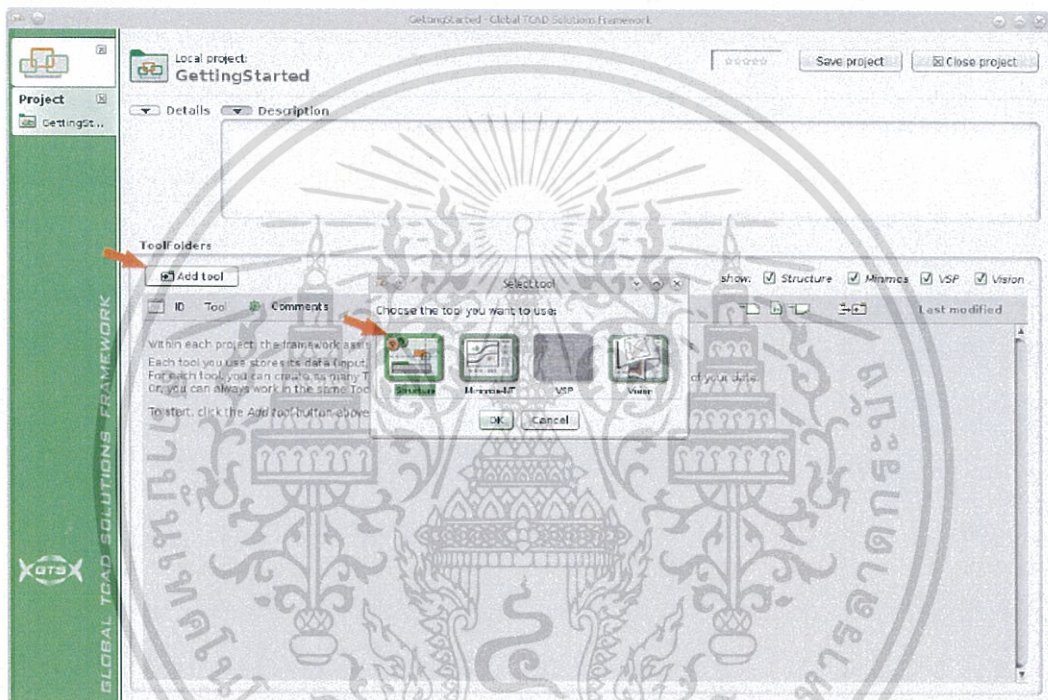


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการสร้าง New Project

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 วิธีการสร้างโครงสร้างใหม่ (New Structure)

- คลิกที่ “Add tool”
- เลือกที่โปรแกรมย่อย “Structure”
- คลิก OK



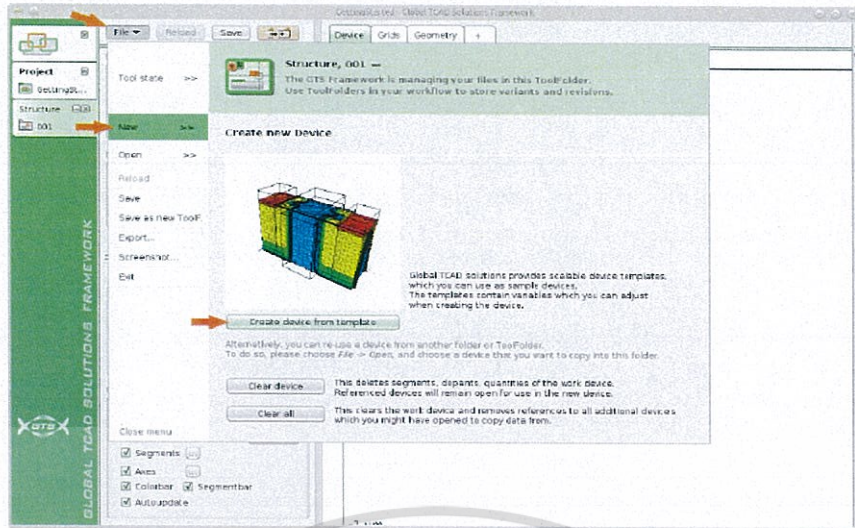
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการสร้าง New Structure

#### 4.1.3 วิธีการสร้างอุปกรณ์ใหม่ (New Device)

ในหน้าของโปรแกรมย่อย Structure เพื่อสร้างอุปกรณ์ขึ้นมาใหม่โดยใช้ Template จากโปรแกรม ให้เลือกตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- คลิกที่ “File” และ “New” ตามลำดับ
- เลือก “Create device from template” เพื่อไปสู่หน้าจอที่ปรากฏ Template แบบ

เอกสารที่เลือกได้ตามต้องการ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

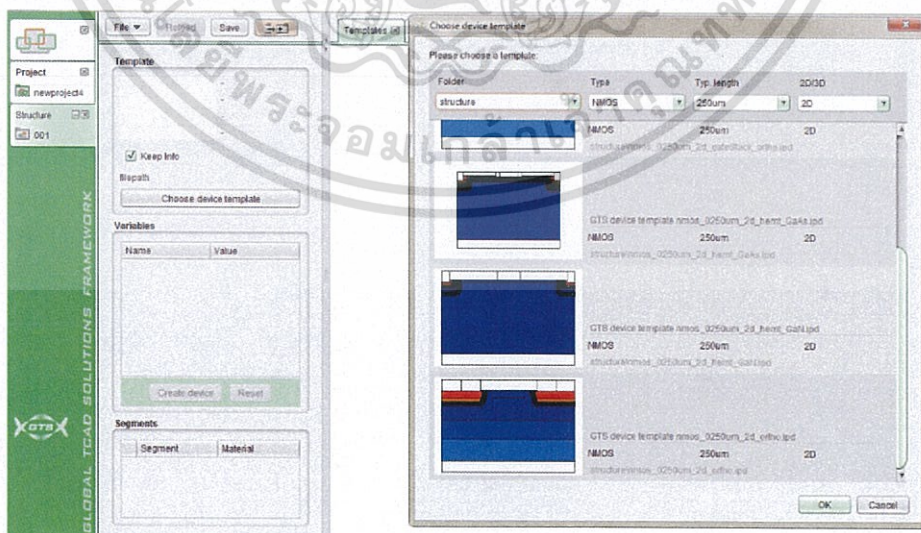


รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการสร้าง New Device

#### 4.1.4 การใช้อุปกรณ์แม่แบบ (Device Template)

หลังจากทำตามขั้นตอนที่ 4.1.3 แล้วจะปรากฏแท็บที่มีชื่อว่า Template ขึ้นมา ซึ่งประกอบด้วยแม่แบบที่มีรูปแบบต่างๆ สามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการ การเลือกใช้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

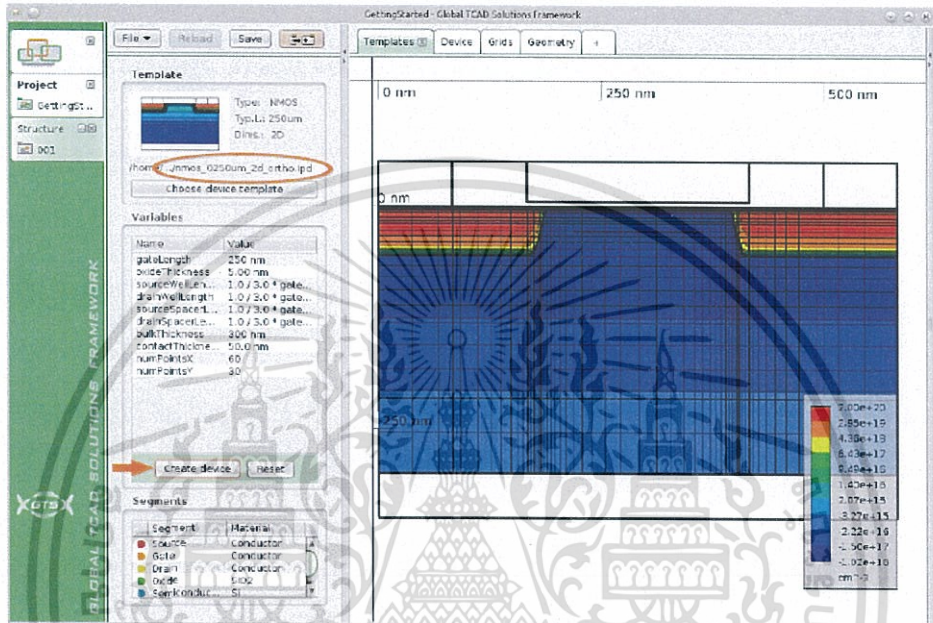
- คลิกเลือก Template ที่ต้องการซึ่งในการทดลองนี้ใช้ "nmos\_0250um\_2d\_ortho.ipd"



รูปที่ 4.4 การเลือกใช้ Template

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อเลือกแล้วให้คลิก OK
- เลือก “Create device” เพื่อสร้างอุปกรณ์จาก Template ที่เลือกซึ่งจะปรากฏหน้าจอตั้งรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การสร้างอุปกรณ์จากแม่แบบ

#### 4.1.5 วิธีการการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของแม่แบบ

พารามิเตอร์ต่างๆจะปรากฏในกรอบสี่เหลี่ยมด้านซ้ายมือที่มีชื่อว่า Variables ดังนี้

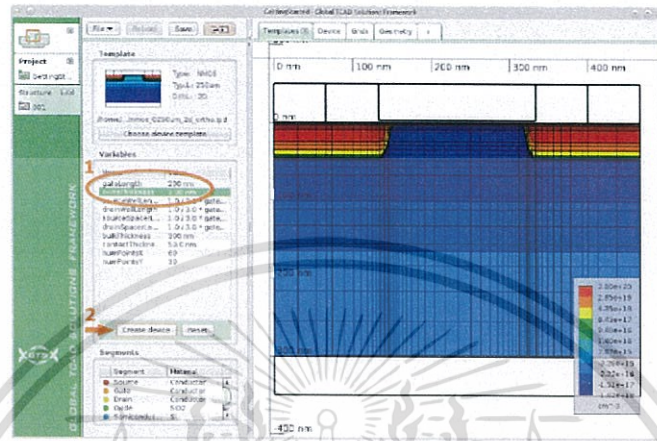
- |                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| - gateLength       | - numPointsX         |
| - numPointsY       | - contactThickness   |
| - oxideThickness   | - sourcespacerLength |
| - sourceWellLength | - Bulkthickness      |
| - drainWellLength  | - drainSpacerLength  |

สามารถเปลี่ยนค่าต่างๆได้โดยการคลิกที่ Value ของพารามิเตอร์นั้นๆ หลังจากเปลี่ยน

พารามิเตอร์เสร็จแล้ว เลือก “Create device” อีกครั้ง เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


## หมายเหตุ

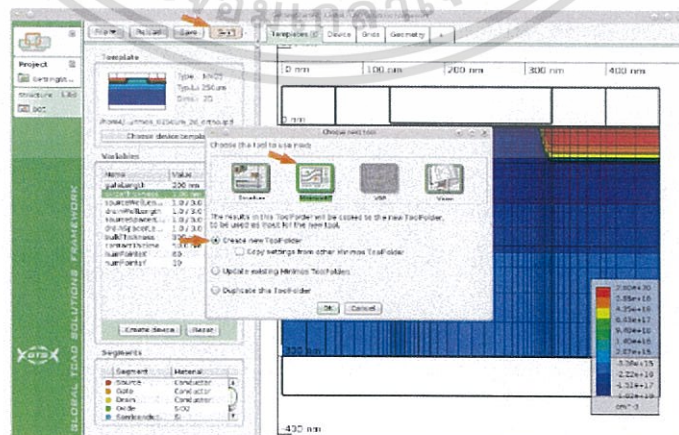
1. สามารถกดปุ่ม “Reset” เพื่อย้อนกลับไปที่พารามิเตอร์เริ่มต้นได้
2. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าแก้ไขพารามิเตอร์เสร็จแล้วด้วยการคลิกที่ช่องอื่น



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนพารามิเตอร์จากแม่แบบ

### 4.1.6 วิธีสร้างการจำลองผลของอุปกรณ์ใหม่ (New Device Simulation)

- คลิกที่ปุ่ม “Next tool” ที่แถบเครื่องมือด้านบน 
- เลือกโปรแกรมย่อยที่ชื่อ Minimos-NT
- เลือก “Create new ToolFolder” เพื่อสร้างการ Device Simulation ใหม่



รูปที่ 4.7 การสร้าง New Device Simulation

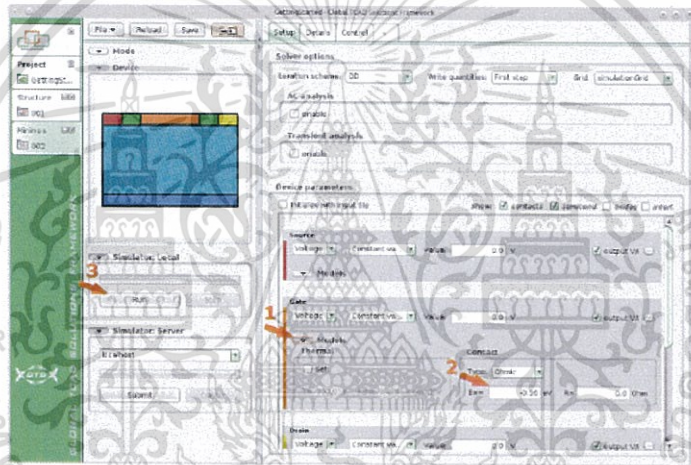
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.7 การจำลองแบบอุปกรณ์ (Device Simulation)

##### 4.1.7.1 Setup First Simulation

ในหน้าโปรแกรมย่อยของ Minimos-NT จะปรากฏหน้าต่างที่ชื่อ “setup” ขึ้น ให้เปิดไปที่ หน้าเพื่อตั้งค่าต่างๆดังนี้

1. คลิกที่ “Models” ในส่วนของการตั้งค่า gate เพื่อใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
2. ในพื้นฟังก์ชันชื่อ contact ตั้งค่า  $E_w = -0.56$  eV
3. กด “Run”



รูปที่ 4.8 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ gate

หมายเหตุ :

เมื่อกด “Run” อาจมีการถามเพื่อให้เลือกว่าจะบันทึกการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ หากต้องบันทึกให้กด “Yes” หลังจากนั้นจึงเริ่มการจำลองแบบ

##### 4.1.7.2 การวัดค่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรน

1. เปิดไปที่หน้า Setup
2. เลือกการจ่ายแรงดันที่เกตเป็นแบบ “step” จาก -2.0v ถึง 2.0v และ step = 0.2v
3. เลือกการจ่ายแรงดันที่เดรนเป็นแบบ “Constant value” กำหนดค่า 2.0v
4. กด Run ที่แถบเครื่องมือด้านซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.7.3 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น

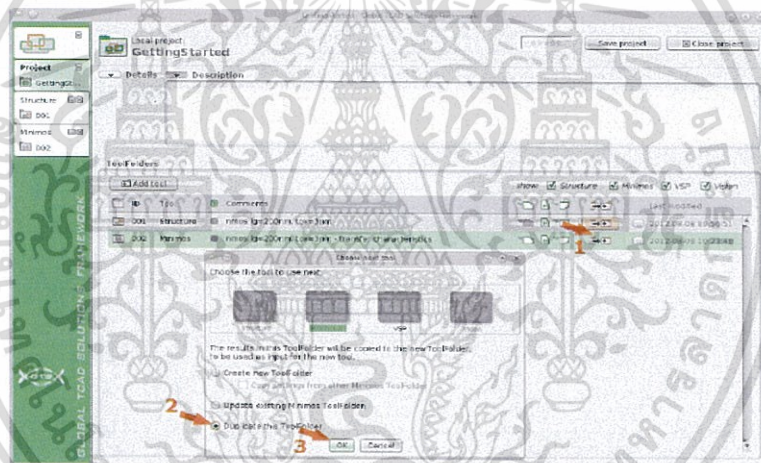
การเขียนกราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่เดรน มีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดไปที่หน้า “Project home” กดที่สัญลักษณ์ “Next tool” ของ Minimos-NT ToolFolder ก่อนหน้า

2. คลิกที่ “Duplicate this ToolFolder”

3. กด “OK” เพื่อยืนยัน

การกระทำข้างต้น เป็นการคัดลอกการจำลองก่อนหน้าให้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อทำการทดลองต่อไป

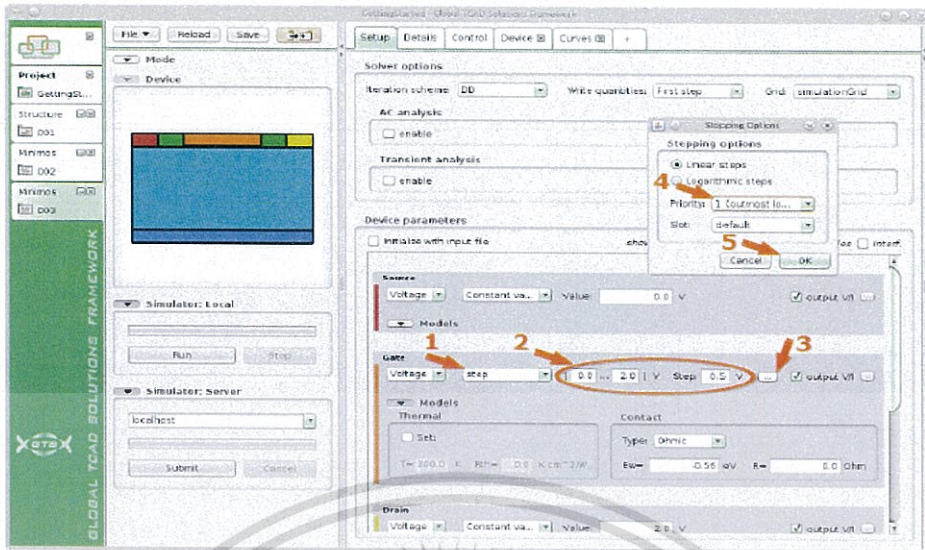


รูปที่ 4.9 การคัดลอกการจำลองก่อนหน้า

จากรูปที่ 4.9 เมื่อทำการคัดลอกการจำลองก่อนหน้าเสร็จแล้วให้ตั้งชื่อไฟล์ใหม่ก่อนการแก้ไขพารามิเตอร์เสมอเพื่อไม่ให้เกิดการสับสนชื่อไฟล์ หลังจากนั้นให้ไปที่หน้า Setup และกำหนดค่าต่างๆดังนี้

1. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าการจ่ายจ่ายแรงดันที่เกตเป็นแบบ “step” แล้ว
2. กำหนดค่าเป็น 0.0 V ถึง +2.0 V และให้ step = 0.5 V
3. คลิกที่เครื่องหมาย “...” เพื่อเปิดหน้าต่างเมนู “Stepping Options”
4. เลือกที่ priority เป็น 1

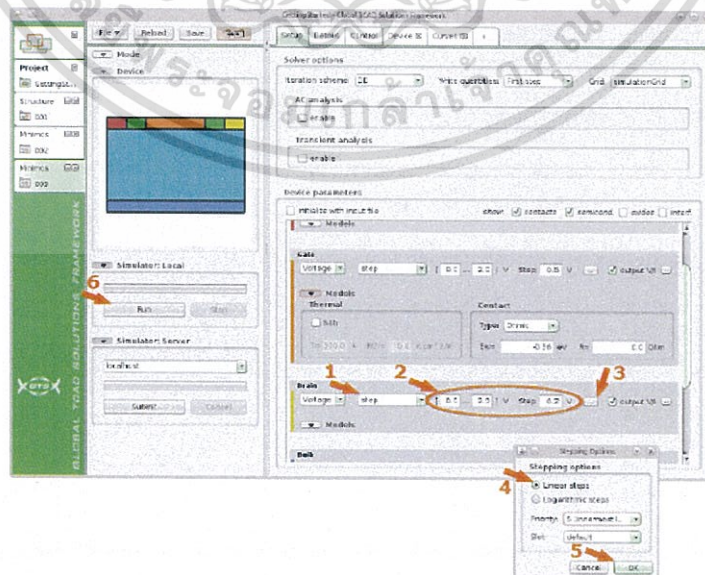
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การกำหนดค่าแรงดันเกต

ต่อไปจะเป็นการกำหนดค่าที่ขั้วเดรน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกการจ่ายแรงดันของเดรนเป็นแบบ “step”
2. กำหนดค่าเป็น 0.0 V ถึง +2:0 V และให้ step = 0.5 V และให้ step = 0.2 V
3. คลิกที่เครื่องหมาย “...” เพื่อเปิดหน้าต่างเมนู “Stepping Options”
4. เลือกที่ priority เป็น 5
5. กด Run

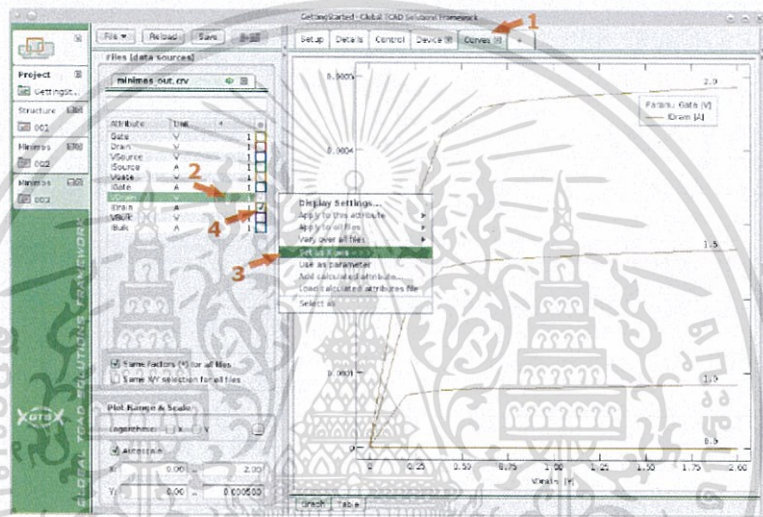


รูปที่ 4.11 การกำหนดค่าแรงดันเดรน

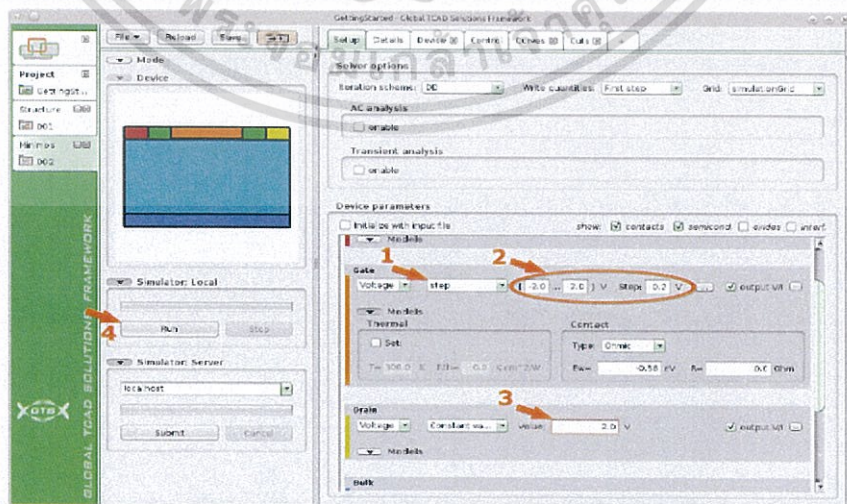
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง “Curves” ขึ้นที่แถบเครื่องมือด้านบน ให้ทำการกำหนดความสัมพันธ์ของปริมาณที่ต้องการพล็อตกราฟดังนี้

1. เปิดไปที่หน้า “Curves”
2. คลิกขวาที่ vDain
3. เลือก “Set as X axis” ในเมนูที่ปรากฏขึ้น
4. คลิกเลือก iDain ให้เป็นแกน Y



รูปที่ 4.12 การกำหนดคุณสมบัติในแกน X และแกน Y

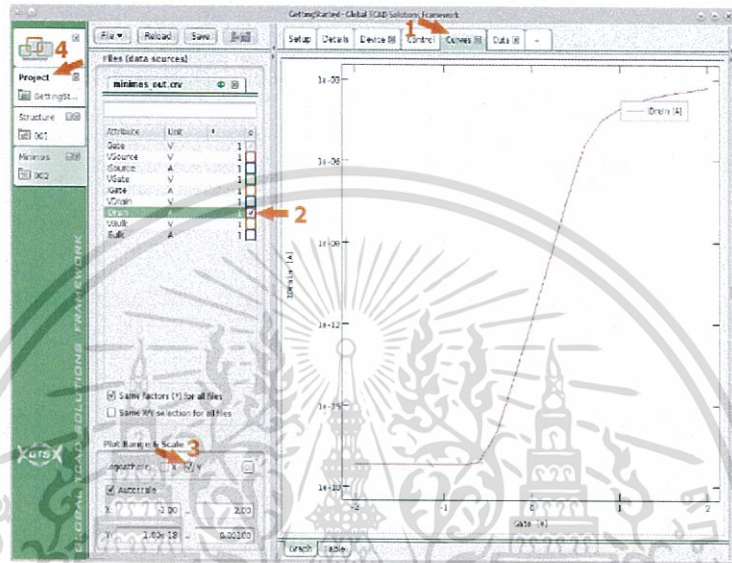


รูปที่ 4.13 การกำหนดค่าแรงดันที่เกตและเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจะปรากฏแถบเครื่องมือที่ชื่อ “Curves” ขึ้นมาให้ทำตามขั้นตอนดังนี้

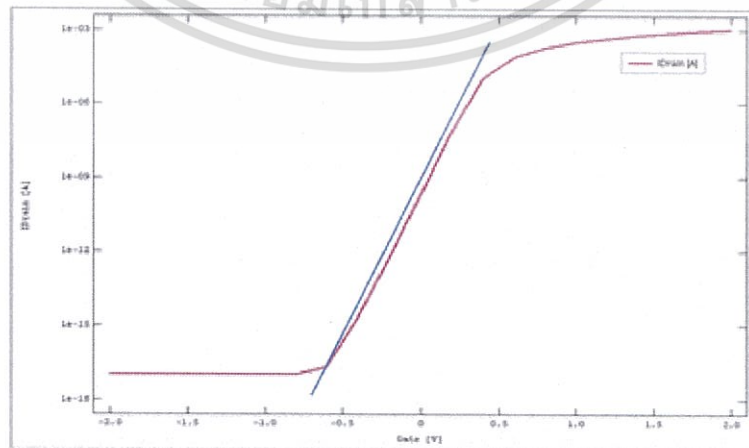
1. เปิดหน้า “Curves” ขึ้นมา
2. กดเครื่องหมาย  $\checkmark$  ที่ iDrain
3. เลือกเป็นสเกลแบบ logarithmic สำหรับแกน Y ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต

#### 4.1.8 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

##### 4.1.8.1 การวัดค่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรน

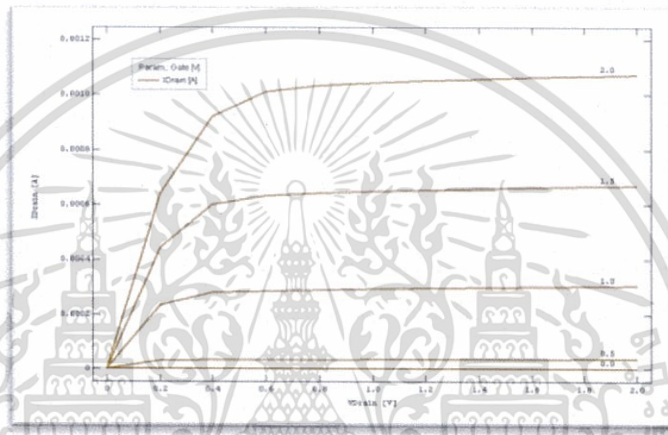


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเกต ซึ่งพบว่ากระแสไหลน้อยมากเมื่อให้แรงดันที่ขั้วเกตต่ำกว่า  $-0.5$  โวลต์ หลังจากนั้นกระแสจึงเริ่มไหลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในลักษณะเป็นเชิงเส้นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึง  $0.5$  โวลต์ และกระแสเริ่มไหลที่ค่าแรงดันเกตประมาณ  $2.0$  โวลต์ และแรงดันขีดเริ่มมีค่า  $-0.25$  โวลต์

#### 4.1.8.2 กราฟคุณลักษณะของ nMOS



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน

จากรูปที่ 4.23 คุณลักษณะของ nMOS โดยดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของขั้วเดรน เมื่อจ่ายแรงดันให้ขั้วเกตที่ค่าต่างๆ พบว่าเมื่อจ่ายแรงดันเกตเพิ่มขึ้นทำให้กระแสที่ขั้วเดรนเพิ่มขึ้น และที่แรงดันเกต  $2$  โวลต์ จะมีค่ากระแสเดรน  $1$  มิลลิแอมป์

## 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความยาวเกต (Gate Length, L)

การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

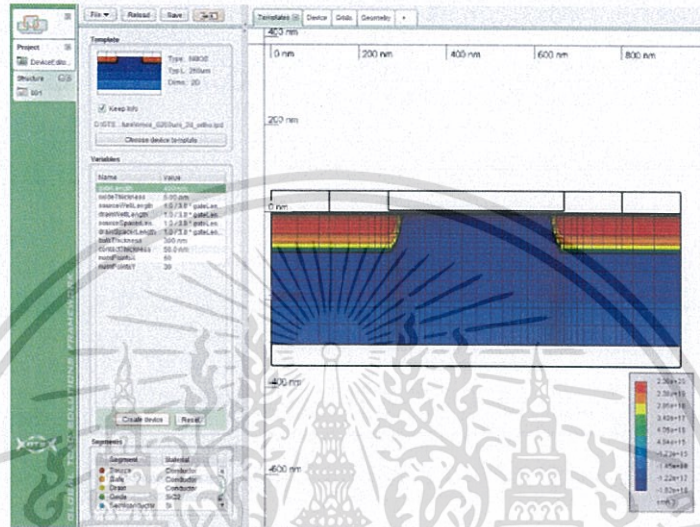
1. เปลี่ยนค่าความยาวเกต
2. กำหนดค่าความหนาออกไซด์เป็น  $5$  nm
3. วัดปริมาณกระแสที่ขั้วเดรน

- กำหนดแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ“step” จาก  $0.0\text{v}$  ถึง  $2.0\text{v}$  และให้  $\text{step} = 0.2\text{v}$

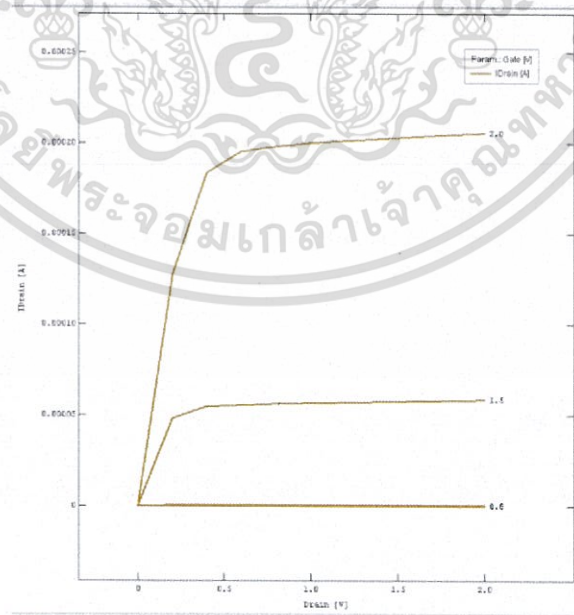
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับเพื่อการศึกษานานาชาติไปขอความเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนด priority ของเกตและเดรน เป็น 1 และ 5 ตามลำดับ
- เลือกแกน x เป็น vDrain และแกน y เป็น iDrain

#### 4.2.1 ความยาวเกต = 400 nm และ ความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm



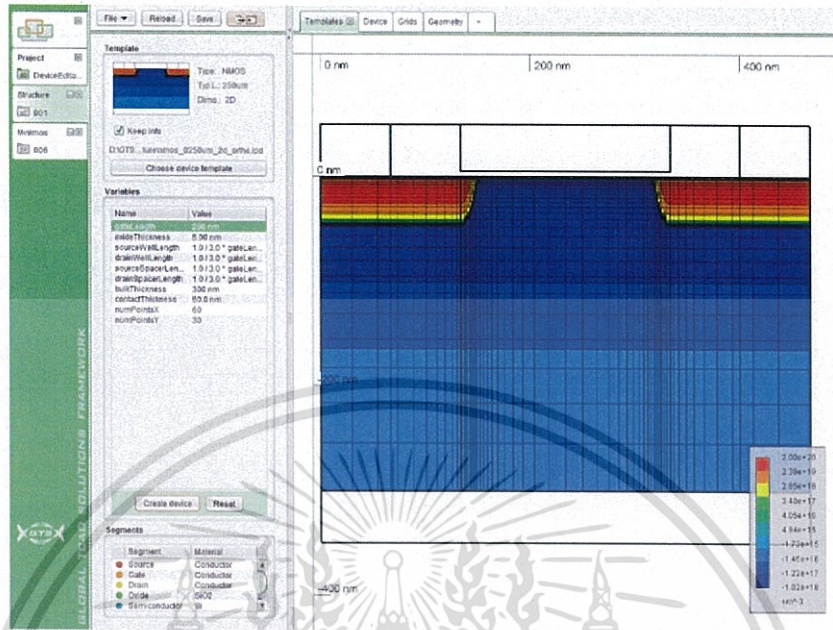
รูปที่ 4.17 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



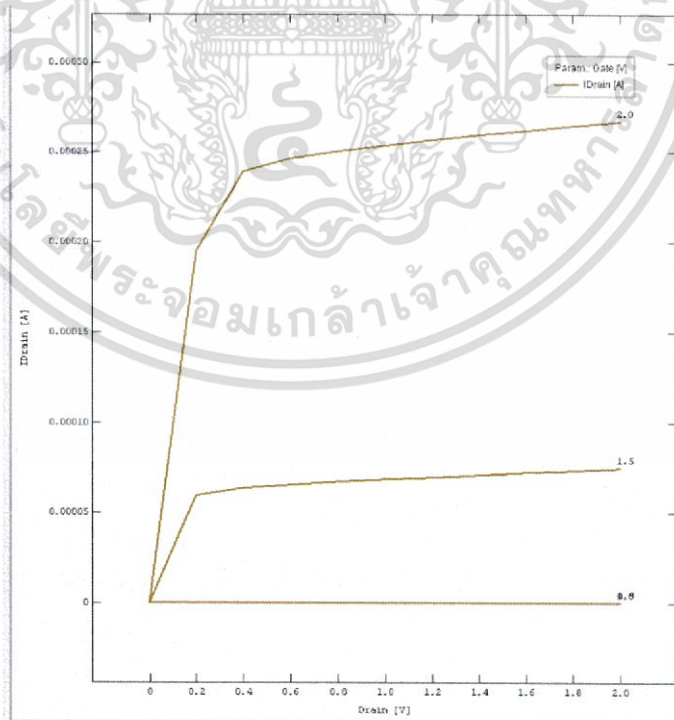
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $L = 400$  nm และ  $T_{ox} = 5$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ความยาวเกต = 200 nm และ ความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm



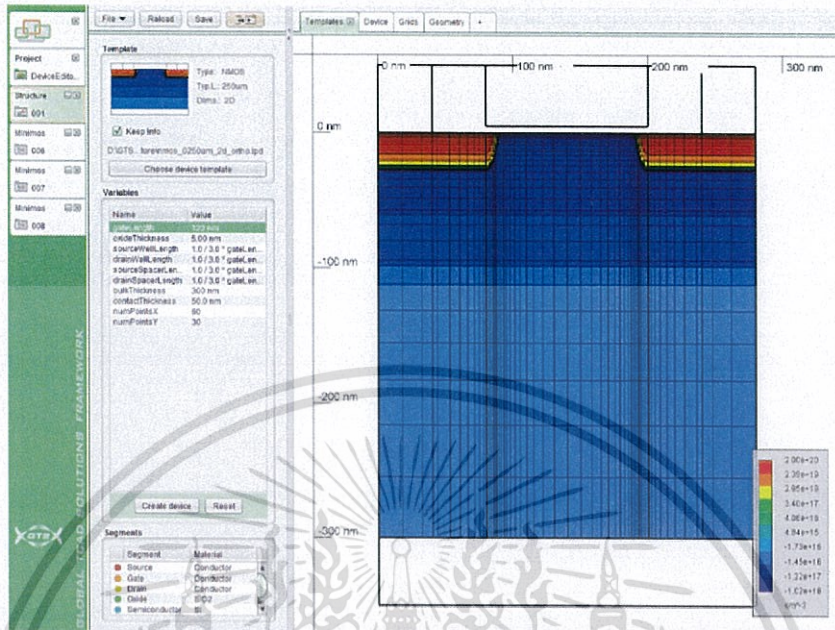
รูปที่ 4.19 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



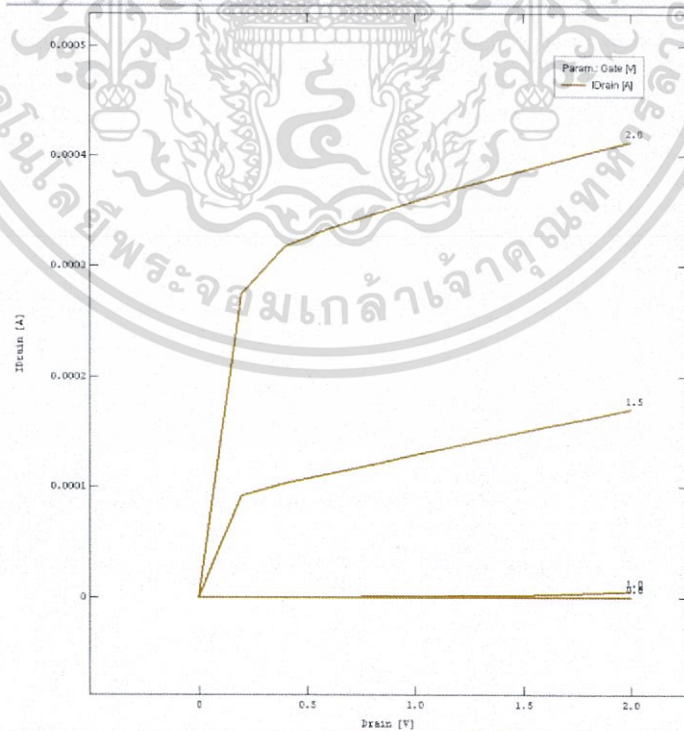
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $L = 200$  nm และ  $T_{ox} = 5$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ความยาวเกต = 120 nm และ ความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm



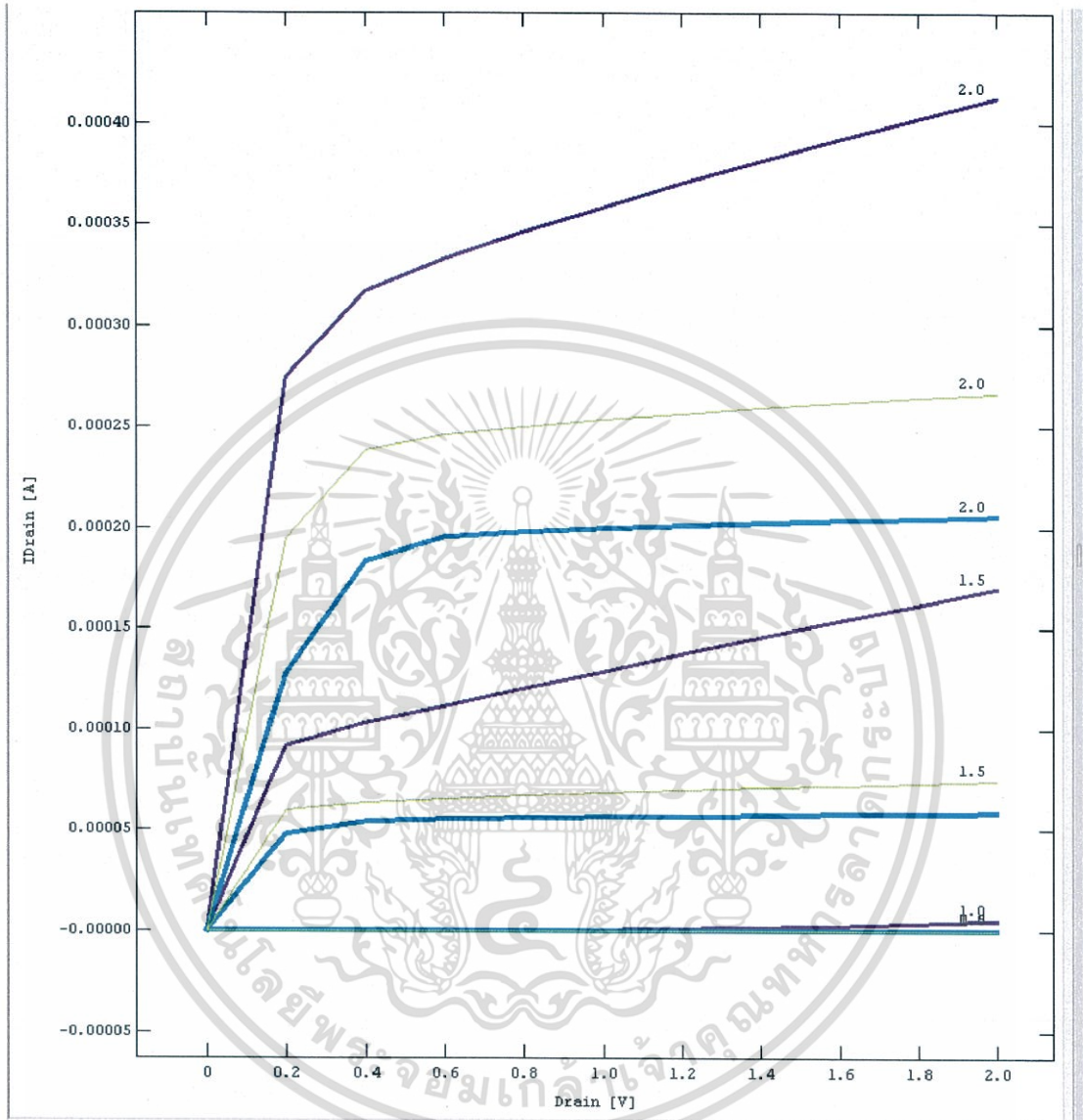
รูปที่ 4.21 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $L = 120$  nm และ  $T_{\text{ox}} = 5$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



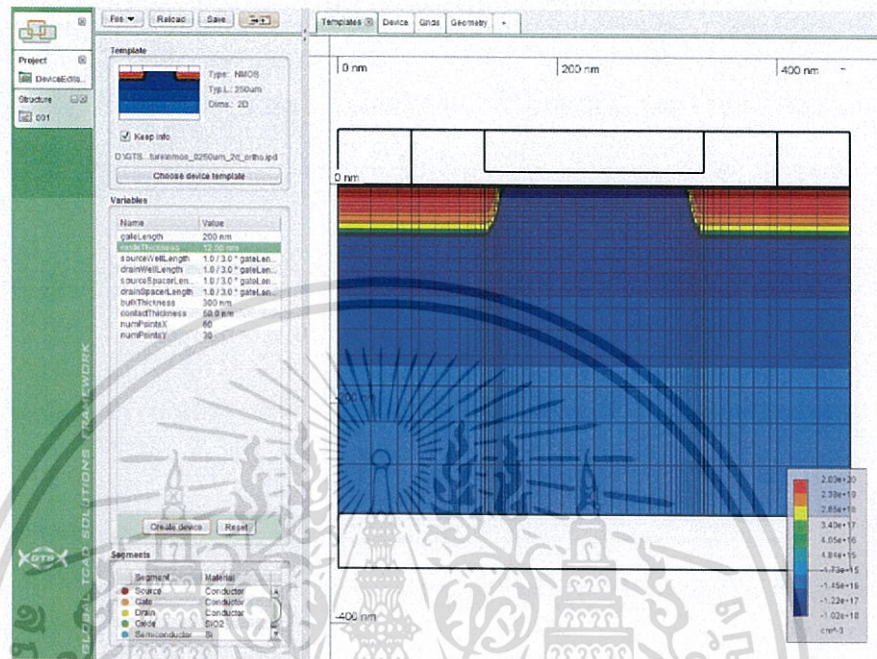
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดความยาวเกตค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.23 เป็นกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าความยาวของเกตเป็น 120 nm, 200 nm และ 400 nm และกำหนดความหนาเกตออกไซด์เป็น 5 nm พบว่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผกผันกับความยาวของเกต คือความยาวเกตมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง

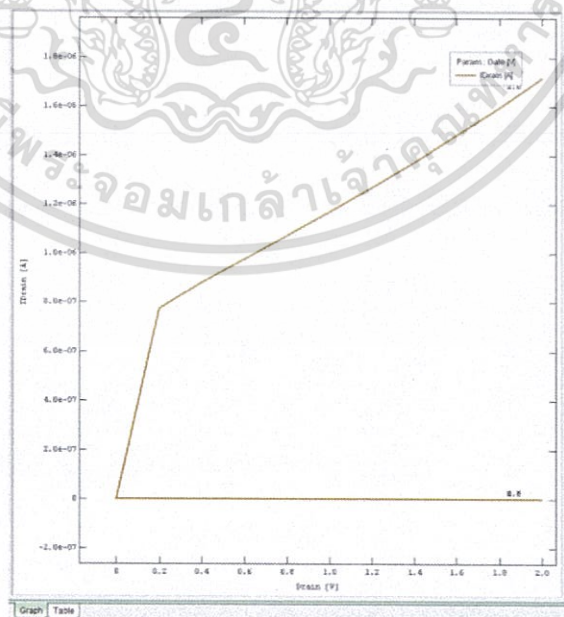
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ความสัมพันธ์ของความหนาเกตออกไซด์ (Oxide Thickness)

#### 4.3.1 ความหนาเกตออกไซด์ = 12 nm และ ความยาวเกต = 200 nm



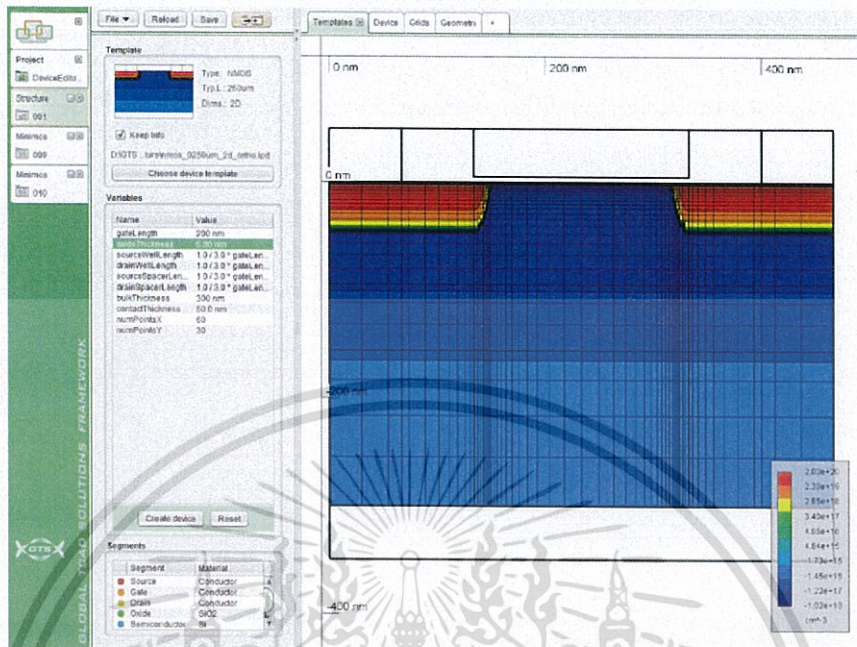
รูปที่ 4.24 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



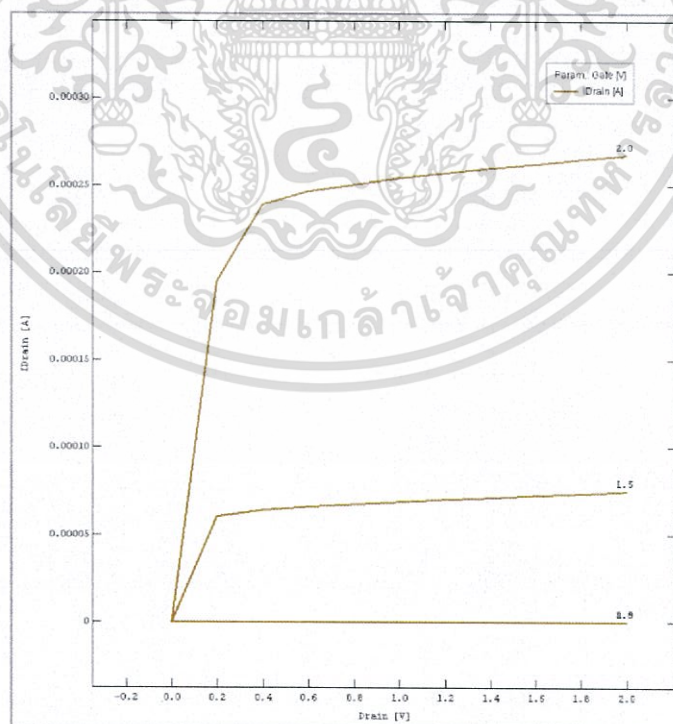
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $T_{ox} = 12$  nm และ  $L = 200$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm และ ความยาวเกต = 200 nm



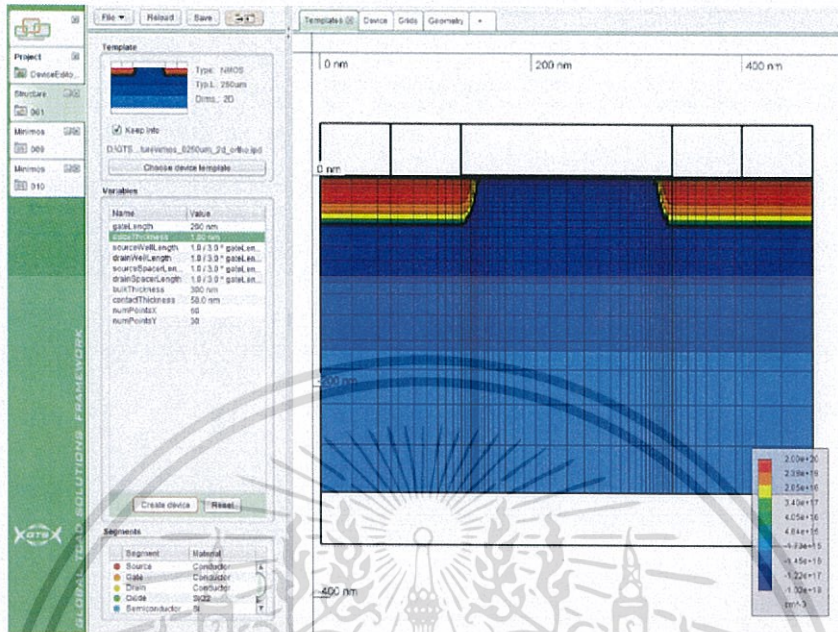
รูปที่ 4.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



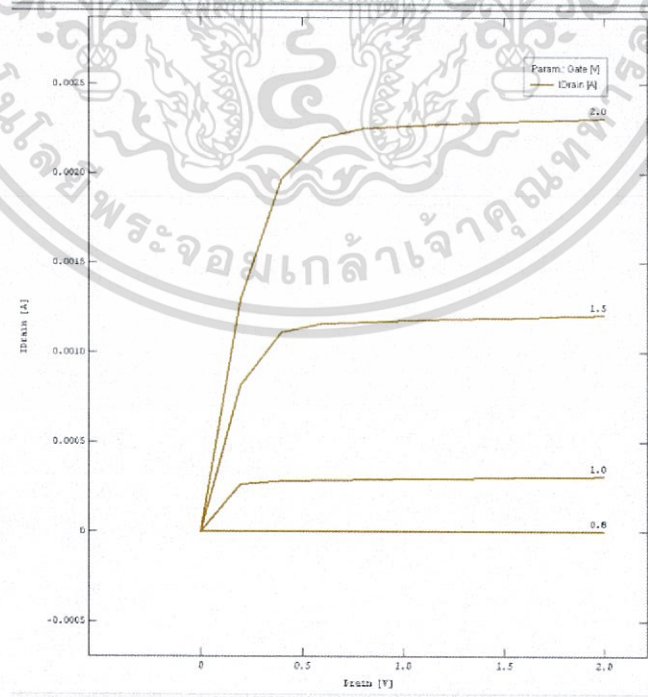
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $T_{ox} = 5$  nm และ  $L = 200$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ความหนาเกตออกไซด์ = 1 nm และ ความยาวเกต = 200 nm

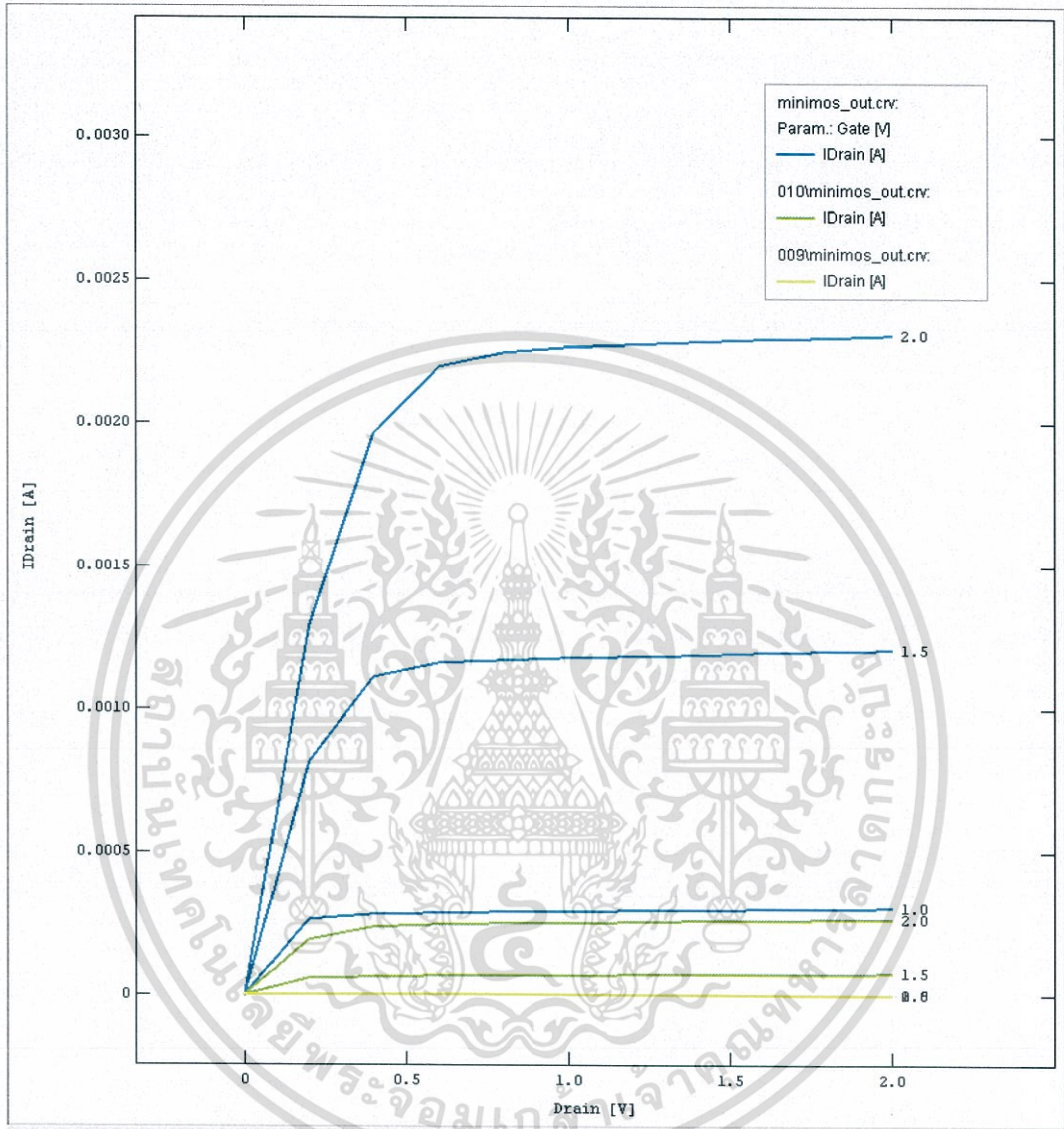


รูปที่ 4.28 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งงานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $T_{ox} = 1 \text{ nm}$  และ  $L = 200 \text{ nm}$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



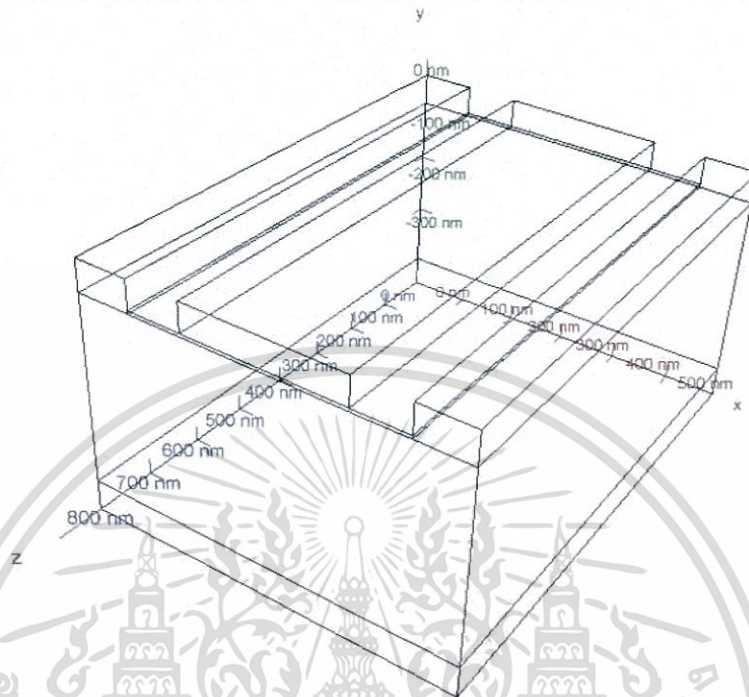
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดความหนาของเกตออกไซด์ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.30 เป็นกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าความหนาของเกตออกไซด์เป็น 1 nm, 5 nm และ 12 nm และกำหนดความยาวเกตเป็น 200 nm พบว่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผกผันกับความหนาของเกตออกไซด์ คือความหนาของเกตออกไซด์ มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง

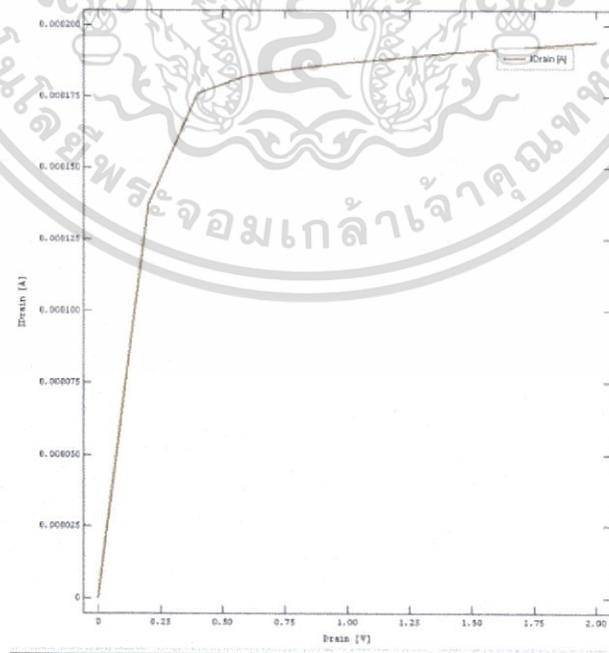
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 4.4.2 Width = 800 nm ความยาวเกท = 250 nm



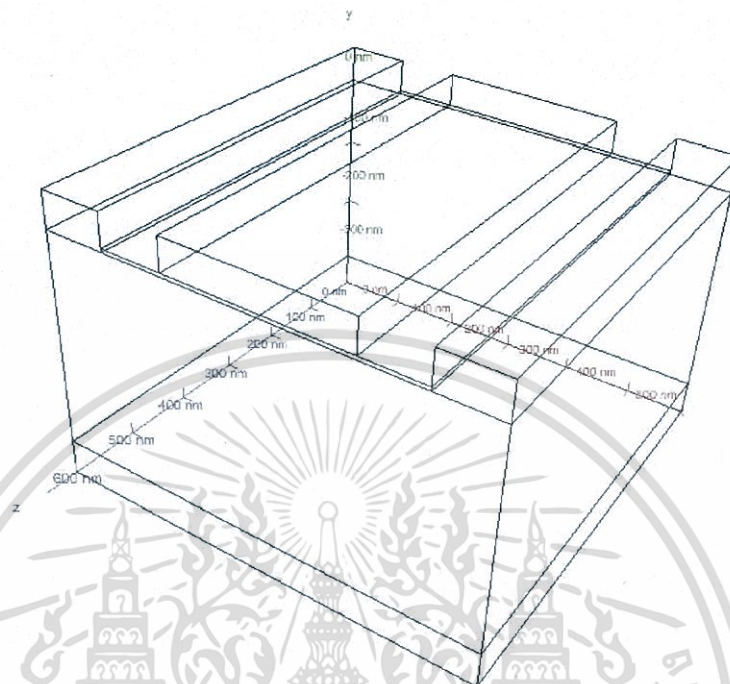
รูปที่ 4.33 โครงสร้างอุปกรณ์



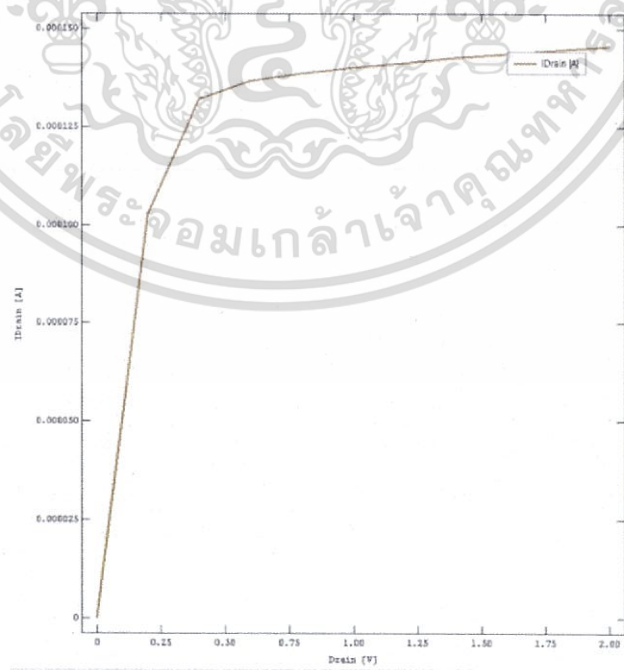
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อ Width = 800 nm ความยาวเกท = 250 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4.3 Width = 600 nm ความยาวเกท = 250 nm



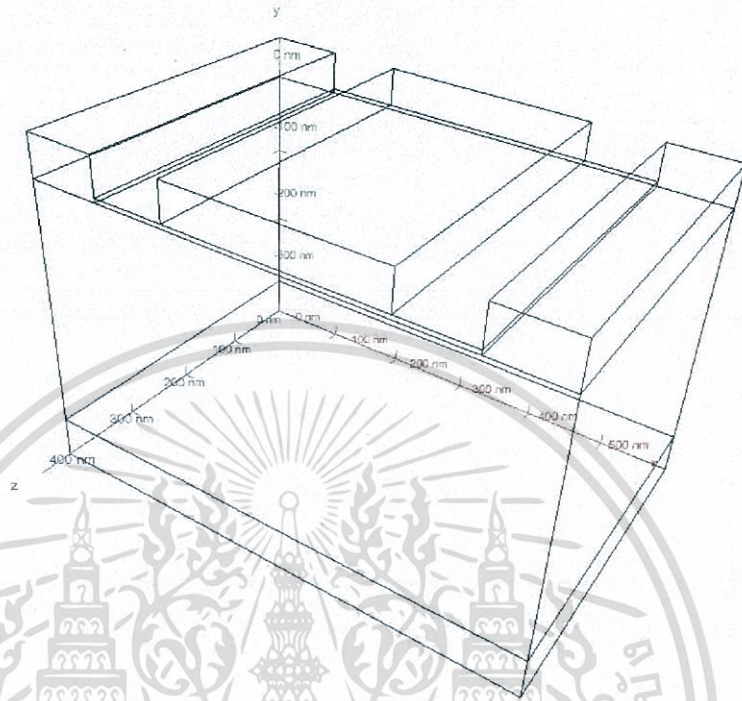
รูปที่ 4.35 โครงสร้างอุปกรณ์



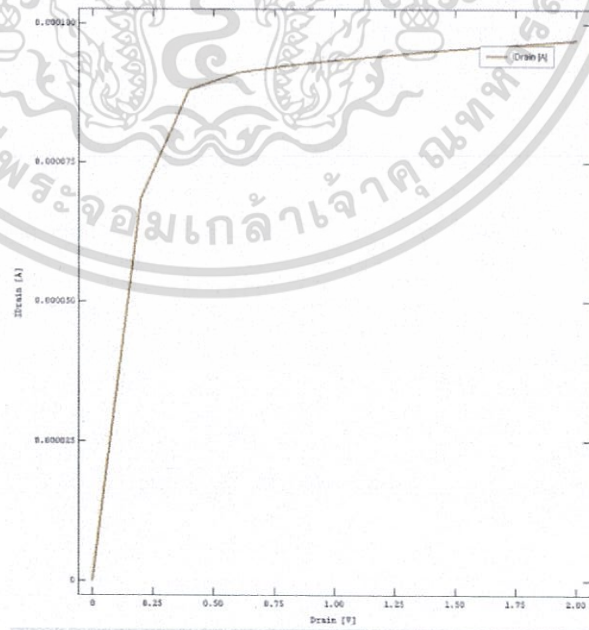
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อ Width = 600 nm ความยาวเกท = 250 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4.4 Width = 400 nm ความยาวเกท = 250 nm



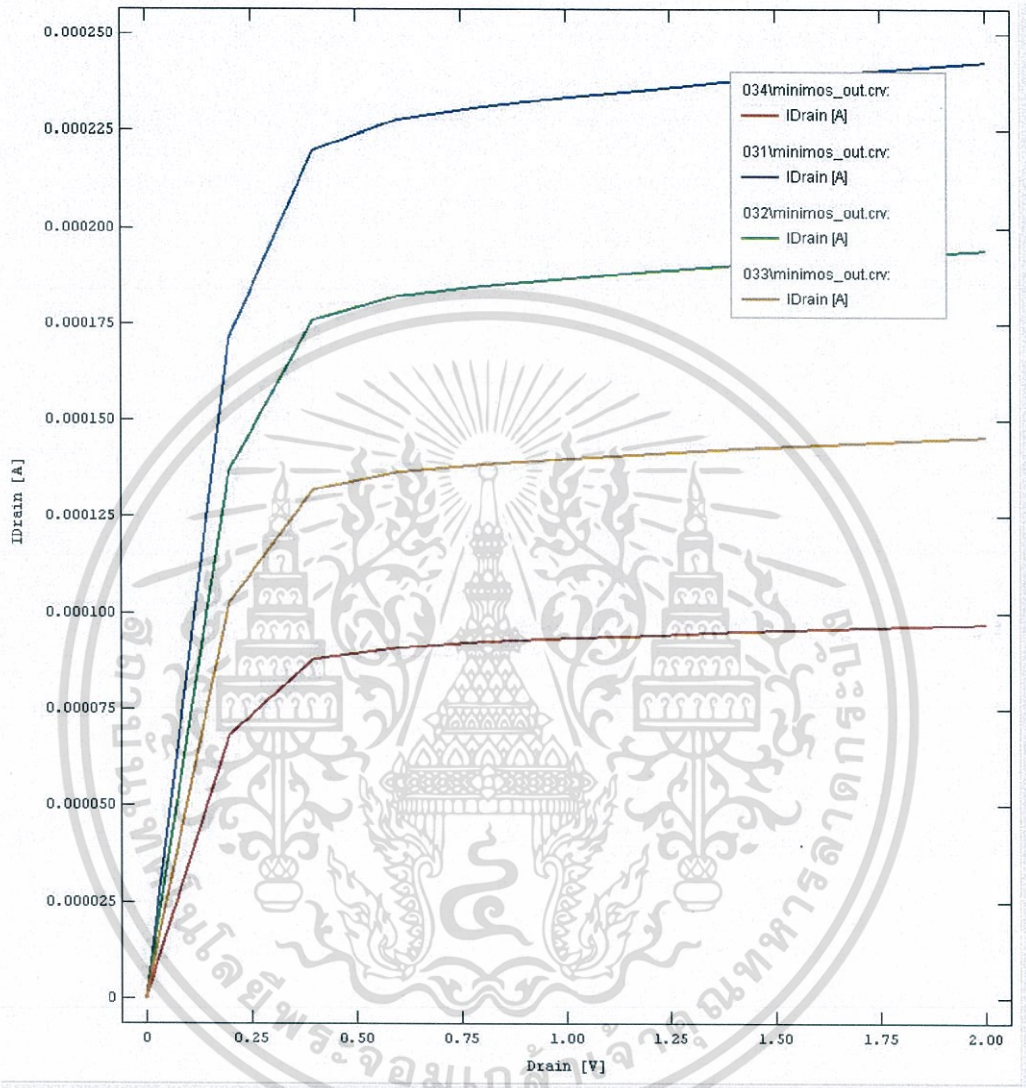
รูปที่ 4.37 โครงสร้างอุปกรณ์



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อ Width = 400 nm ความยาวเกท = 250 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดขนาดความยาวค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.39 เป็นกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าขนาดความยาวเป็น 1000 nm, 800 nm, 600 nm และ 400 nm และกำหนดความยาวเกตเป็น 250 nm พบว่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผันตรงกับขนาดความยาวของ MOSFET คือขนาดความยาวของ MOSFET มีค่า

ลดลงจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง

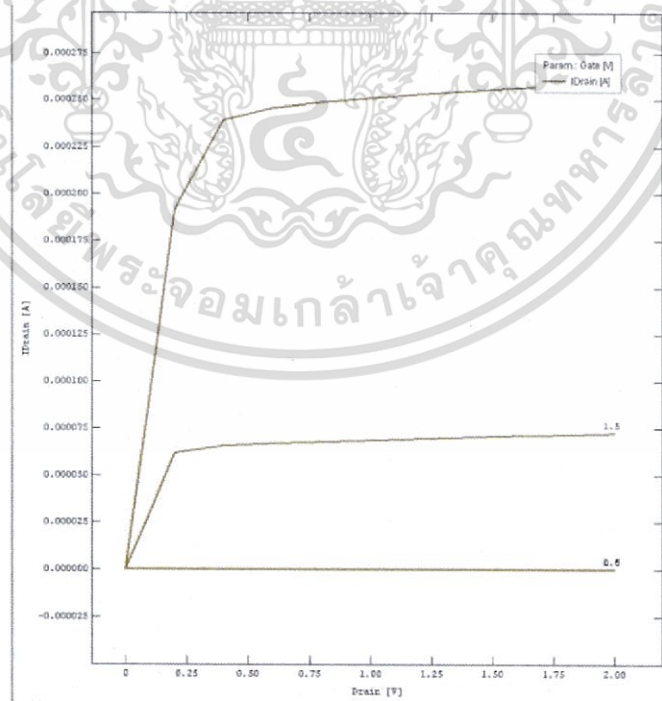
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้น P-Substrate

### 4.5.1 ความเข้มข้น $2 \times 10^{16}$ cc

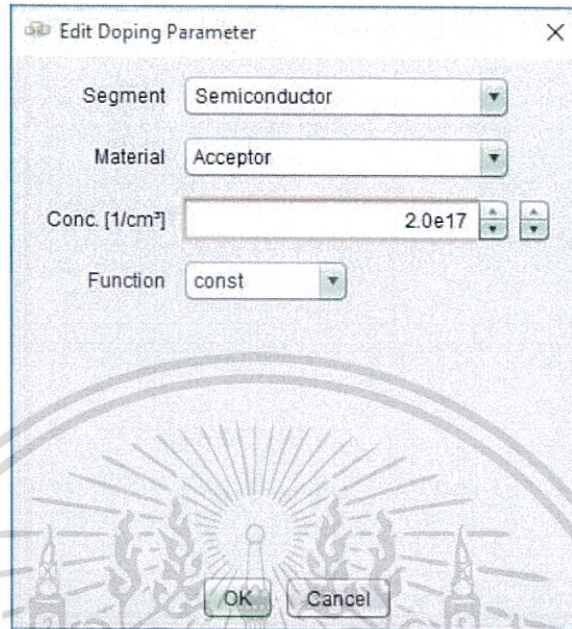


รูปที่ 4.40 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

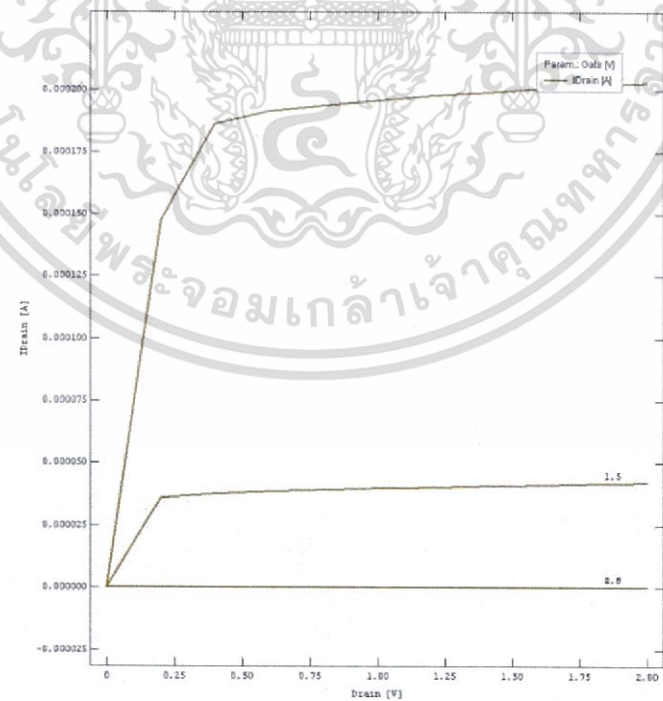


รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อความเข้มข้นมีค่า  $2 \times 10^{16}$  cc

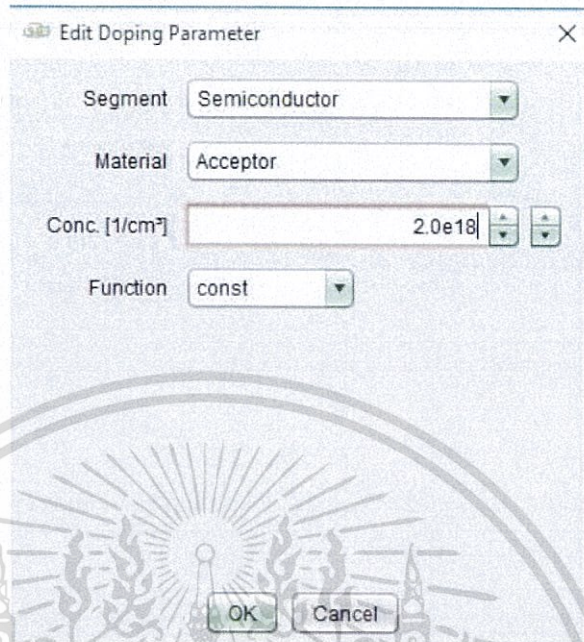
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ความเข้มข้น  $2 \times 10^{17} \text{ cc}$ 

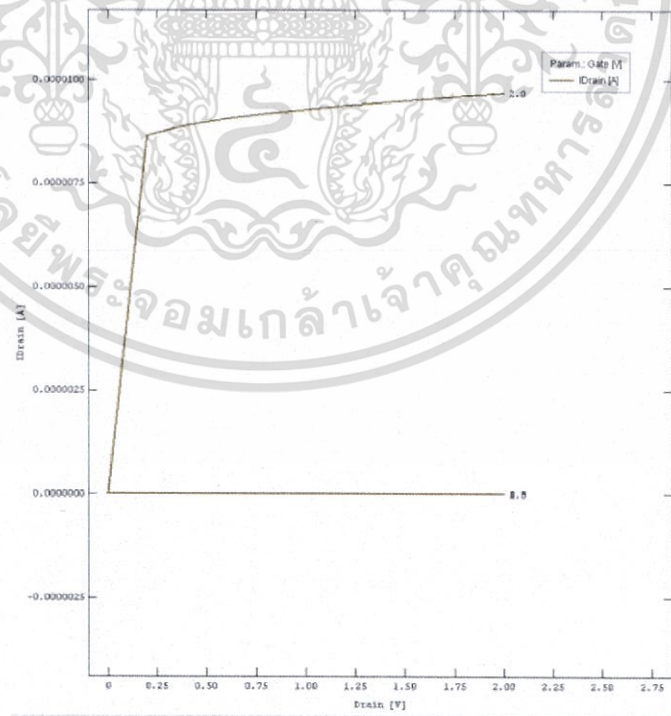
รูปที่ 4.42 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อความเข้มข้นมีค่า  $2 \times 10^{17} \text{ cc}$ 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

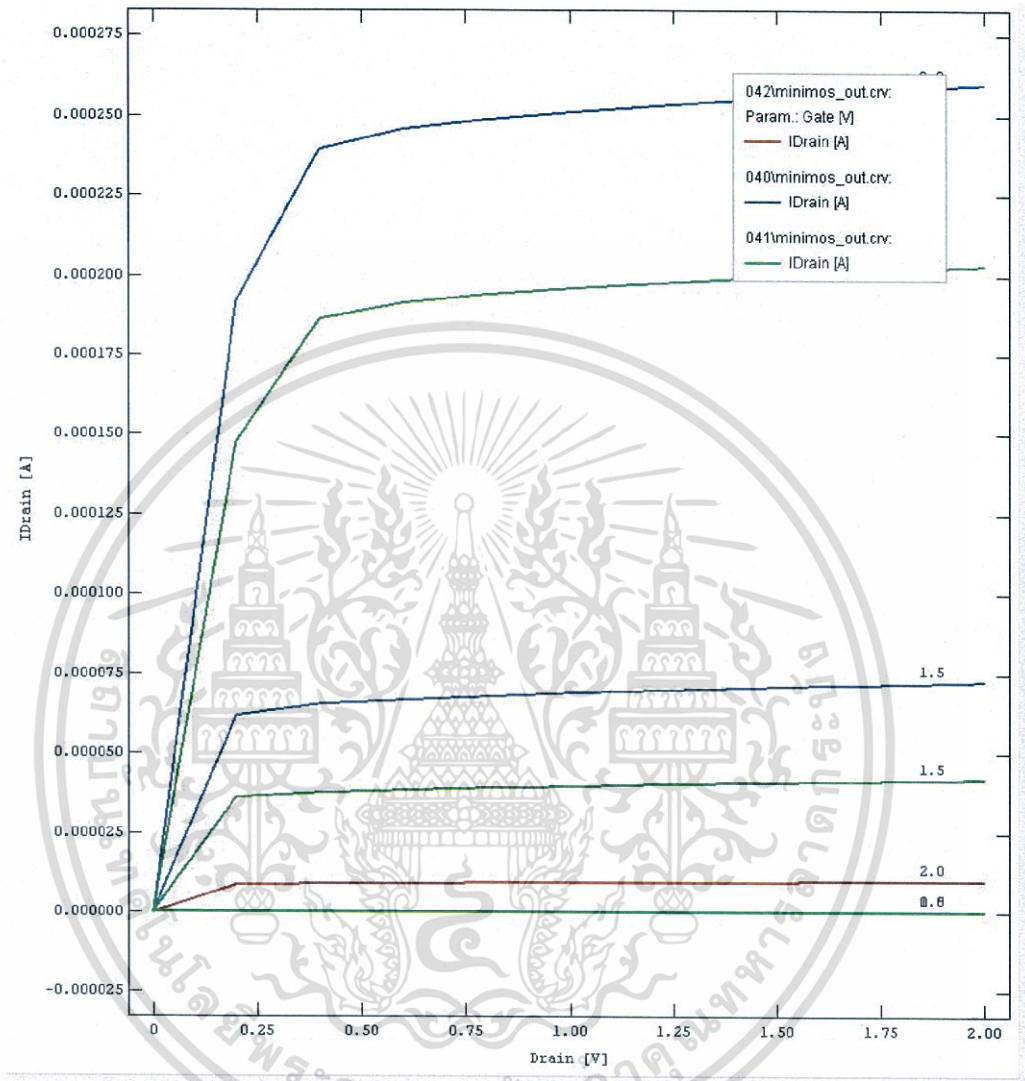
4.5.3 ความเข้มข้น  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 

รูปที่ 4.44 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อความเข้มข้นมีค่า  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



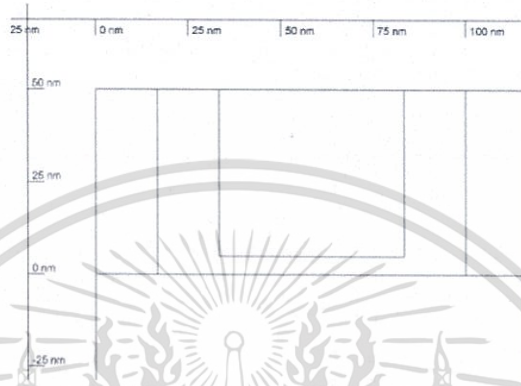
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดความเข้มข้น P-Substrate ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.46 เป็นกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มข้น P-Substrate เป็น  $2 \times 10^{16}$  cc,  $2 \times 10^{17}$  cc และ  $2 \times 10^{18}$  cc และกำหนดความยาวเกต เป็น 250 nm พบว่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผกผันกับความเข้มข้น P-Substrate คือ ความเข้มข้น P-Substrate มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.6 Near Punch-through Effect

การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

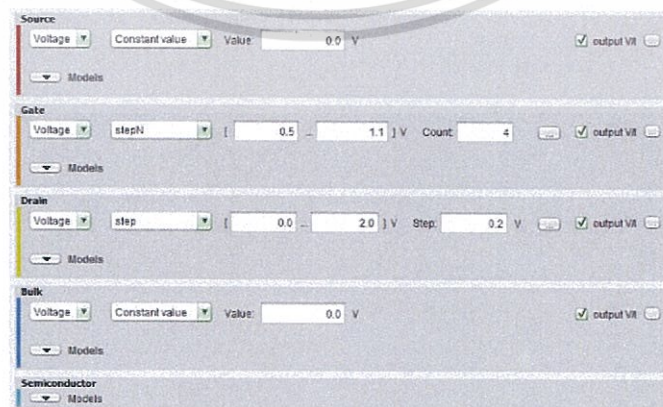
1. ปรับค่าความยาวเกตเป็น 50 nm



รูปที่ 4.47 โครงสร้างของอุปกรณ์ความยาวเกต 50 nm

2. วัดปริมาณกระแสที่ขั้วเดรน

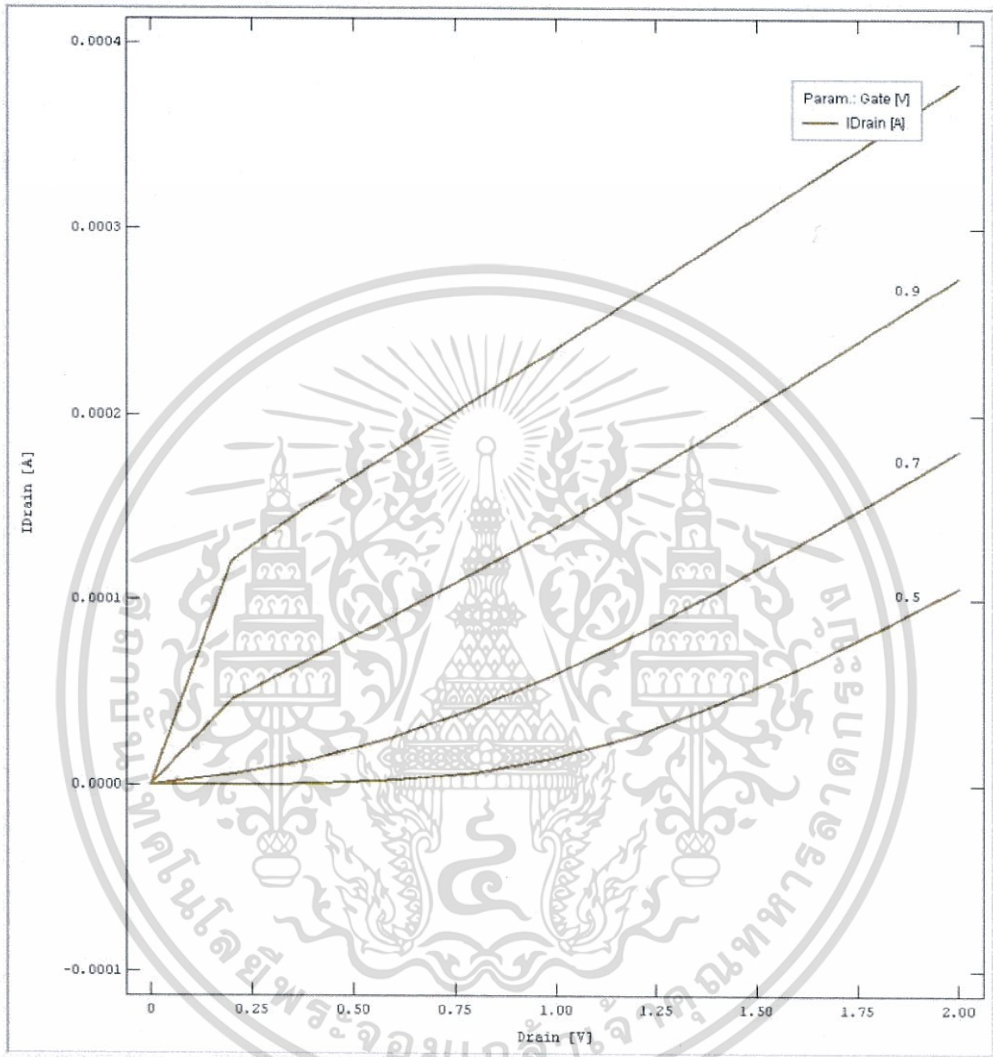
- กำหนดแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ“count” จาก 0.5v ถึง 1.1v และให้ count = 4
- กำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นแบบ“step” จาก 0.0v ถึง 2.0v และให้ step = 0.2v
- เลือกแกน x เป็น vDrain และแกน y เป็น iDrain



รูปที่ 4.48 การกำหนดค่าการไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อปรับค่าความยาวเกตเป็น 50 nm

จากรูปที่ 4.49 เป็นกราฟความสัมพันธ์กระแสแรงดันเมื่อปรับค่าความยาวเกตเป็น 50 nm แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการลดความยาวเกตลงมากๆ จนถึงจุดหนึ่ง จะเกิดปรากฏการณ์ Near Punch-Through Effect ส่งผลให้ MOSFET ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 Snapback break-down Effect

การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1. เปลี่ยนค่าความยาวเกตเป็น 300 nm

2. วัดปริมาณกระแสที่ขั้วเดรน

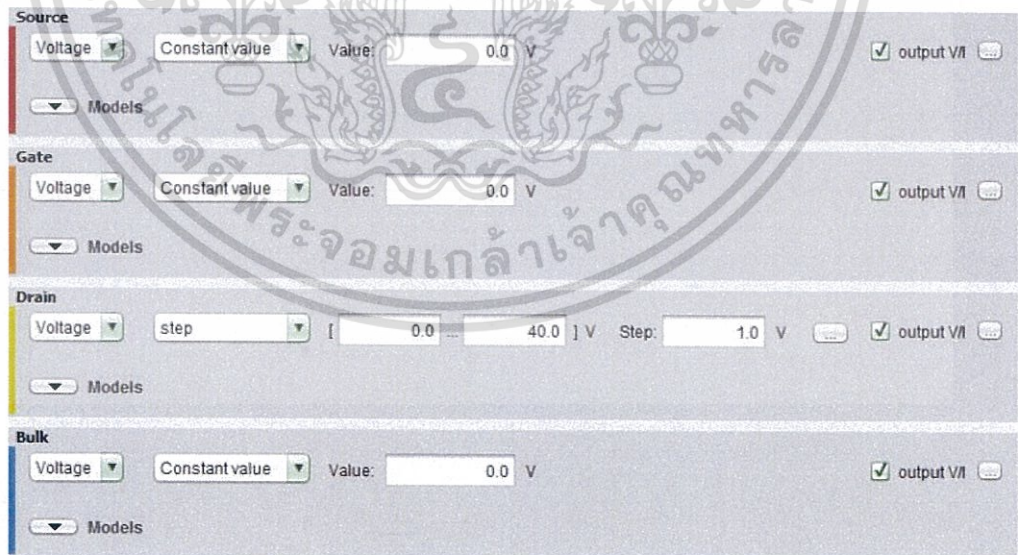
- กำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นแบบ“step” จาก 0.0v ถึง 40.0v และให้ step = 1v

- กำหนดค่าแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ“step” จาก 0.0v ถึง 70.0v และให้ step = 3v

- กำหนดค่าแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ“step” จาก 0.0v ถึง 100.0v และให้ step = 5v

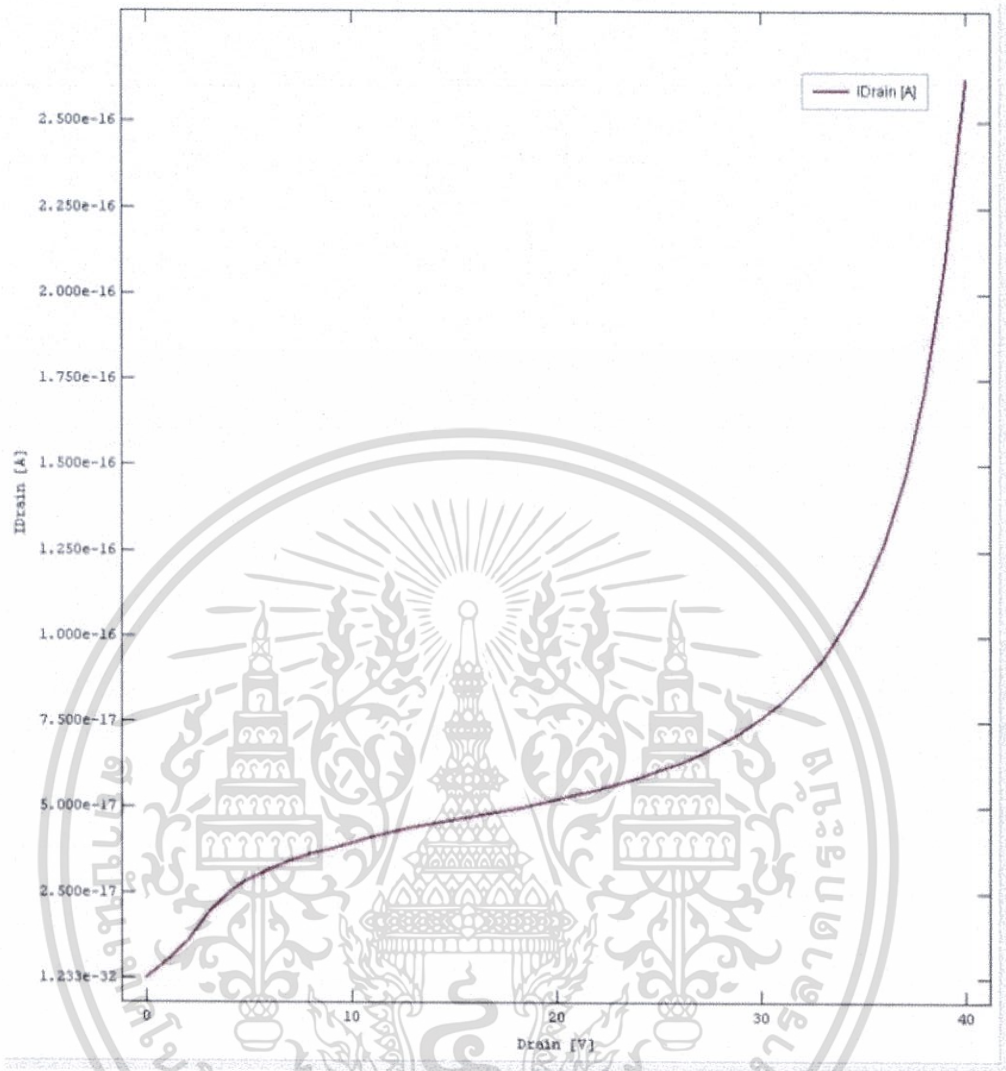
- เลือกแกน x เป็น vDrain และแกน y เป็น iDrain

### 4.7.1 กำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นแบบ“step” จาก 0.0v ถึง 40.0v



รูปที่ 4.50 การกำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นแบบ“step” จาก 0.0v ถึง 40.0v และให้ step = 1v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์กระแสแรงดัน

#### 4.7.2 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

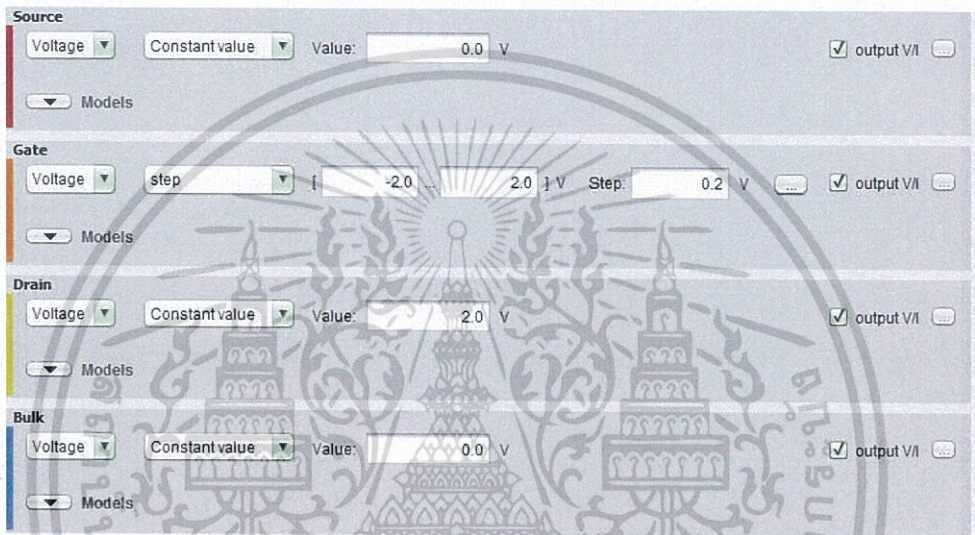
จากรูปที่ 4.56 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นค่า 40v แสดงให้เห็นถึงการนำกระแสของ MOSFET แม้ไม่ไบอัส  $V_g$  ปรากฏการณ์นี้เรียก Snapback break-down Effect ซึ่งมีสาเหตุมาจากการ break-down ของรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิด PN บริเวณเดรนเนื่องจากเกิด Reverse Bias ขึ้นในบริเวณนั้น โดยปรากฏการณ์นี้สามารถเกิดได้ใน bipolar transistor เช่นกัน เนื่องจากมีโครงสร้างรอยต่อสารกึ่งตัวนำเป็นลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.8 Substrate Bias Effects

การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างกราฟความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  ใน Microsoft Excel จากค่าความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  ใน TCAD โดยทำการไบอัสแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ“step” จาก -2.0v ถึง 2.0v และให้ step = 0.2v และ  $V_d = 2v$

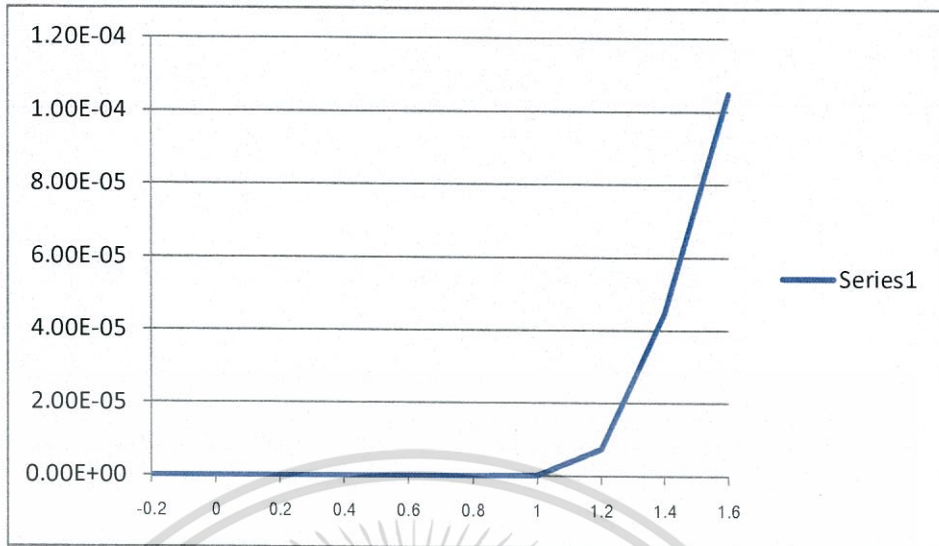


รูปที่ 4.52 การกำหนดค่า  $V_g$  เป็นแบบ“step” จาก -2.0v ถึง 2.0v และให้ step = 0.2v และ  $V_d = 2v$

Attribute	Unit	*	o		
Gate	V	1	<input checked="" type="checkbox"/>	-1.0	6.42331382E-18
VSource	V	1	<input type="checkbox"/>	-0.8	6.43200196E-18
ISource	A	1	<input type="checkbox"/>	-0.6	6.44330552E-18
VGate	V	1	<input type="checkbox"/>	-0.4	6.46354658E-18
IGate	A	1	<input type="checkbox"/>	-0.2	6.55093434E-18
VDrain	V	1	<input type="checkbox"/>	0.2	2.7755758E-16
IDrain	A	1	<input checked="" type="checkbox"/>	0.4	9.39162714E-18
VBulk	V	1	<input type="checkbox"/>	0.6	2.26240038E-16
IBulk	A	1	<input type="checkbox"/>	0.8	2.41186982E-14
				1.0	3.33604883E-12
				1.2	5.49217244E-10
				1.4	1.02492798E-7
				1.6	7.36593755E-6
				1.8	4.45259303E-5
				2.0	1.04820494E-4
					1.78145227E-4
					2.59560665E-4

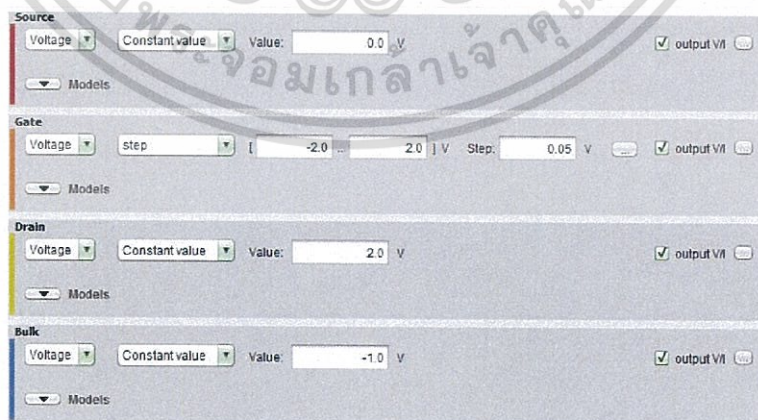
รูปที่ 4.53 ค่าความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  ใน TCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 กราฟความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  ใน Microsoft Excel

- หาค่า  $V_t$  จากกราฟความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  โดยใช้ Microsoft Excel ได้  $V_t = 1.16\text{v}$
  - ทำการไบอัสแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ "step" จาก  $-2.0\text{v}$  ถึง  $2.0\text{v}$  และให้  $\text{step} = 0.05\text{v}$  และ
- $V_d = 2\text{v}$  และทำการไบอัส  $V_b = -1\text{v}$



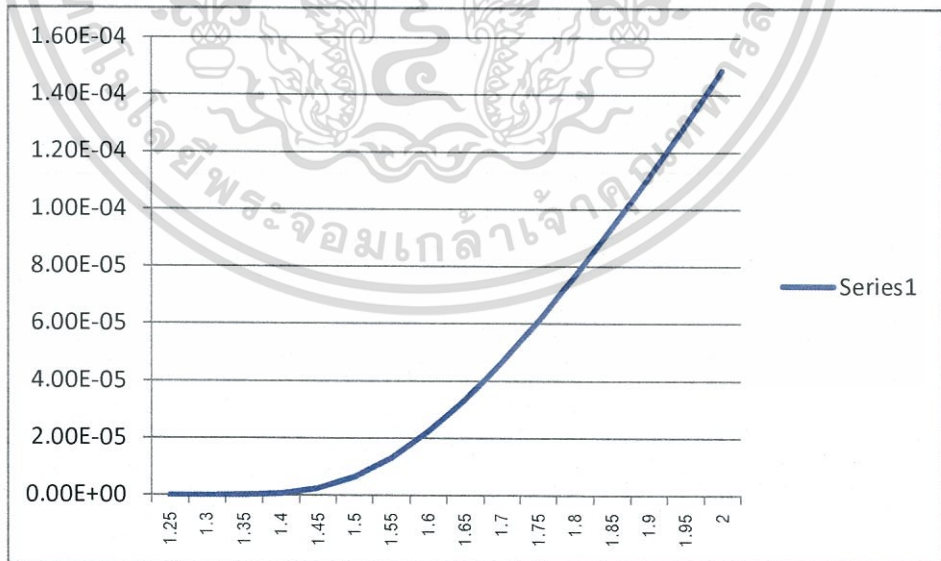
รูปที่ 4.55 การกำหนดค่า  $V_g$  เป็นแบบ "step" จาก  $-2.0\text{v}$  ถึง  $2.0\text{v}$  และให้  $\text{step} = 0.05\text{v}$  และ

$V_d = 2\text{v}$  และทำการไบอัส  $V_b = -1\text{v}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 ค่าความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  ใน TCAD



รูปที่ 4.57 กราฟความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  ใน Microsoft Excel

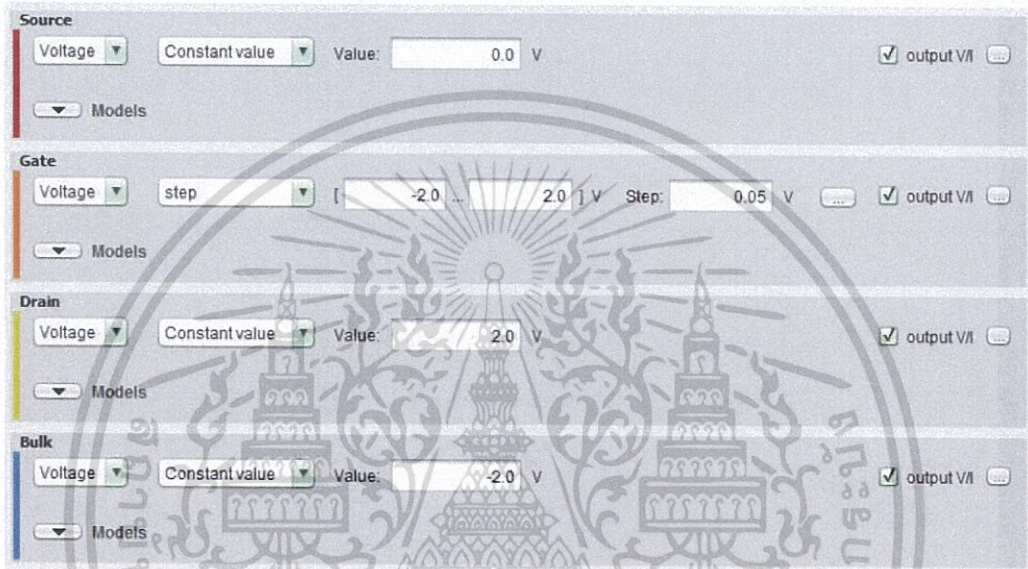
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หาค่า  $V_t$  จากกราฟความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  โดยใช้ Microsoft Excel ได้  $V_t = 1.48\text{v}$

5. ทำการไบอัสแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ“step” จาก  $-2.0\text{v}$  ถึง  $2.0\text{v}$  และให้  $\text{step} = 0.05\text{v}$

และ

$V_d = 2\text{v}$  และทำการไบอัส  $V_b = -2\text{v}$



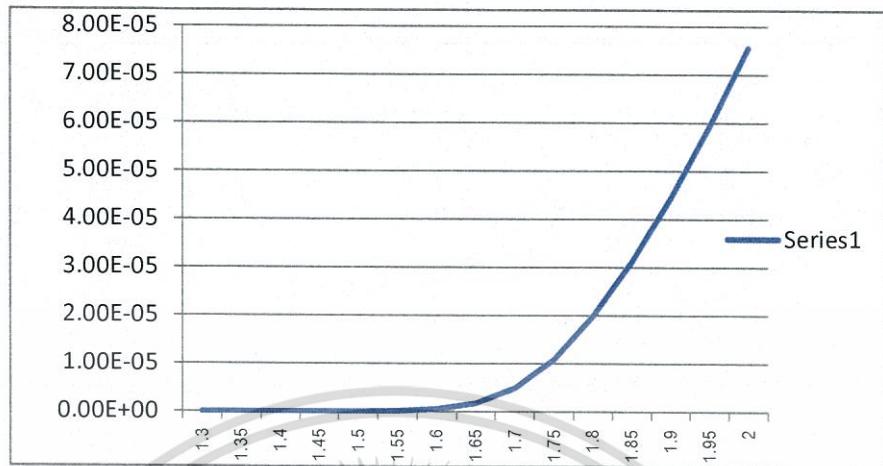
รูปที่ 4.58 การกำหนดค่า  $V_g$  เป็นแบบ“step” จาก  $-2.0\text{v}$  ถึง  $2.0\text{v}$  และให้  $\text{step} = 0.05\text{v}$  และ

$V_d = 2\text{v}$  และทำการไบอัส  $V_b = -1\text{v}$

1.3	4.42420361E-11
1.35	2.10945455E-10
1.4	1.00423402E-9
1.45	4.76302673E-9
1.5	2.23962371E-8
1.55	1.03017892E-7
1.6	4.46405531E-7
1.65	1.67368402E-6
1.7	4.9003956E-6
1.75	1.09652356E-5
1.8	1.9884243E-5
1.85	3.12368545E-5
1.9	4.45600416E-5
1.95	5.94739121E-5
2.0	7.56841971E-5

รูปที่ 4.59 ค่าความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  ใน TCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 กราฟความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  ใน Microsoft Excel

6. หาค่า  $V_t$  จากกราฟความสัมพันธ์  $I_d/V_g$  โดยใช้ Microsoft Excel ได้  $V_t = 1.67\text{v}$

7. วัดปริมาณกระแสที่ขั้วเดรน

- กำหนดแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ "step" จาก 0.0v ถึง 2.0v และให้ count = 5

- กำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นแบบ "step" จาก 0.0v ถึง 2.0v และให้ step =

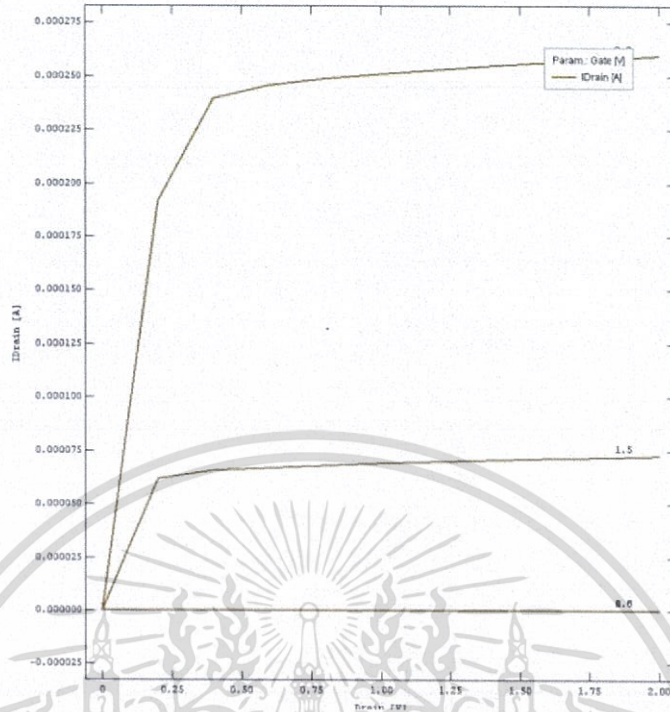
0.2v

- เลือกแกน x เป็น  $v_{\text{Drain}}$  และแกน y เป็น  $i_{\text{Drain}}$

VD	vg=0	vg=0.5	vg=1	vg=1.5	vg=2
0	-1.39E-31	-1.04E-23	3.90E-21	-1.44E-21	-5.61E-20
0.2	3.12E-18	2.28E-13	7.98E-08	6.19E-05	1.92E-04
0.4	3.38E-18	2.35E-13	8.31E-08	6.56E-05	2.39E-04
0.6	3.73E-18	2.41E-13	8.60E-08	6.69E-05	2.46E-04
0.8	4.07E-18	2.47E-13	8.87E-08	6.80E-05	2.49E-04
1	4.41E-18	2.52E-13	9.12E-08	6.89E-05	2.51E-04
1.2	4.92E-18	2.57E-13	9.36E-08	6.97E-05	2.53E-04
1.4	5.78E-18	2.62E-13	9.59E-08	7.05E-05	2.55E-04
1.6	6.76E-18	2.67E-13	9.81E-08	7.12E-05	2.57E-04
1.8	7.90E-18	2.72E-13	1.00E-07	7.19E-05	2.58E-04
2	9.39E-18	2.77E-13	1.02E-07	7.26E-05	2.60E-04

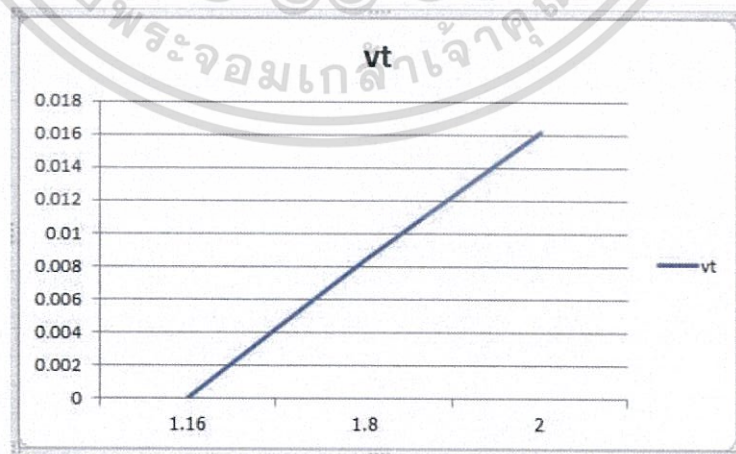
รูปที่ 4.61 ค่าความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



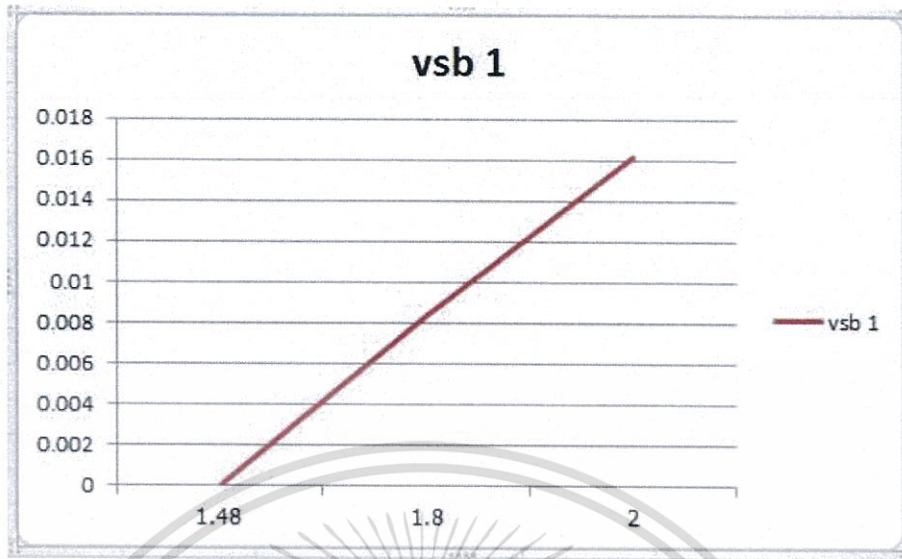
รูปที่ 4.62 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

8. หา Root of  $I_d(\text{SAT})$  2 ค่า ได้ 0.008367 และ 0.0161245 จากนั้น นำมาพลอตกราฟ ความสัมพันธ์  $\text{Root of } I_d(\text{SAT})/V_{gs}$

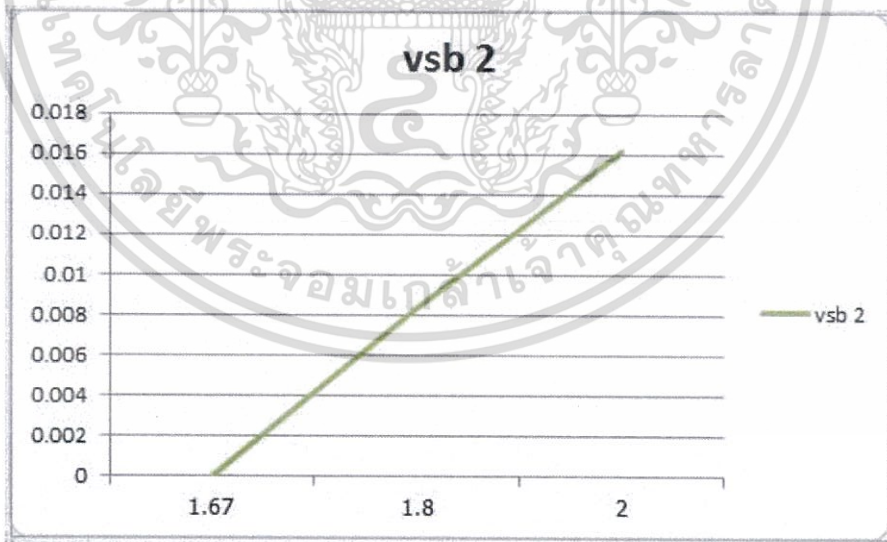


รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์  $\text{Root of } I_d(\text{SAT})/V_{gs}$  เมื่อไบอัส  $V_{sb} = 0v$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



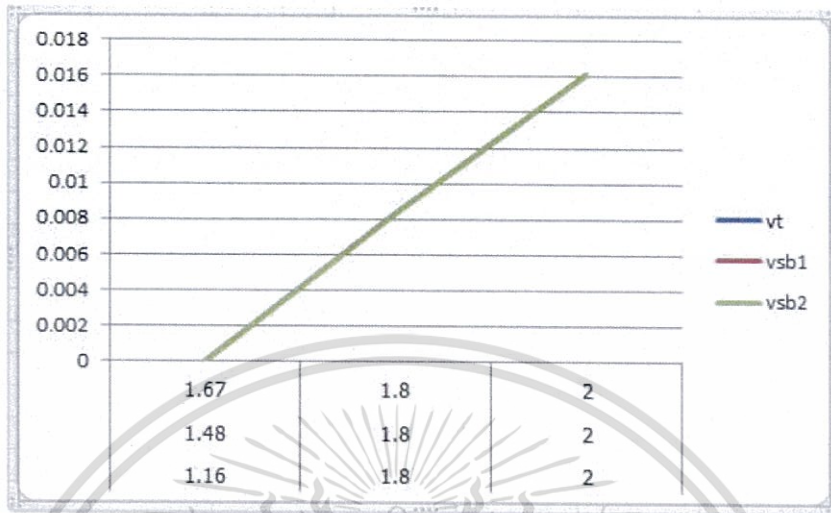
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ Root of  $I_d(SAT)/V_{gs}$  เมื่อไปอัส  $V_{sb} = 1v$



รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ Root of  $I_d(SAT)/V_{gs}$  เมื่อไปอัส  $V_{sb} = 2v$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ Root of  $I_d(SAT)/V_{gs}$  เมื่อไบอัส  $V_{sb}$  ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ Root of  $I_d(SAT)/V_{gs}$  เมื่อไบอัส  $V_{sb}$  ค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการไบอัส  $V_{sb}$  ทำให้ค่า  $V_t$  ของ MOSFET มีค่าเปลี่ยนไป โดยหากไม่ไบอัส  $V_{sb} = 0v$  MOSFET จะมี

$V_t = 1.16v$  หากไบอัส  $V_{sb} = 1v$  จะส่งผลให้  $V_t = 1.48v$  และหากไบอัส  $V_{sb} = 1v$  จะส่งผลให้  $V_t = 1.67v$  กล่าวคือ  $V_t$  แปรผันตรงกับ  $V_{sb}$  คือ  $V_{sb}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้  $V_t$  มีค่าเพิ่มขึ้น

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความยาวเกตโดยใช้โปรแกรม TCAD พบว่า กระแสที่ขั้วเดรนแปรผกผันกับความยาวของเกต คือความยาวเกตมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง เมื่อเปลี่ยนความหนาของเกตออกไซด์ พบว่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผกผันกับความหนาของเกตออกไซด์ คือความหนาของเกตออกไซด์ มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผันตรงกับขนาดความยาวของ MOSFET คือขนาดความยาวของ MOSFET มีค่าลดลงจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผกผันกับความเข้มข้น P-Substrate คือความเข้มข้น P-Substrate มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง และเมื่อทำการลดความยาวเกตลงมากๆ จนถึงจุดหนึ่ง จะเกิดปรากฏการณ์ Near Punch-Through Effect ส่งผลให้ MOSFET ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ

MOSFET สามารถนำไฟฟ้าได้ แม้ไม่ไบอัส  $V_g$  ปรากฏการณ์นี้เรียก Snapback break-down Effect ซึ่งมีสาเหตุมาจากการ break-down ของรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิด NPN โดยปรากฏการณ์นี้สามารถเกิดได้ใน bipolar transistor เช่นกัน เนื่องจากมีโครงสร้างรอยต่อสารกึ่งตัวนำเป็นลักษณะเดียวกัน และเมื่อทำการไบอัส  $V_{sb}$  ทำให้ค่า  $V_t$  ของ MOSFET มีค่าเปลี่ยนไป กล่าวคือ  $V_t$  แปรผันตรงกับ  $V_{sb}$  คือ  $V_{sb}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้  $V_t$  มีค่าเพิ่มขึ้น

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถประยุกต์ใช้โปรแกรม TCAD ในการออกแบบอุปกรณ์ได้อย่างกว้างขวาง
2. โปรแกรมสามารถใช้ในระบบออฟไลน์หรือออนไลน์ก็ได้ แต่ระบบออฟไลน์จะสามารถทำงานได้จำกัดกว่าออนไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Donald A. Neamen, Semiconductor physics and devices, ค้นเมื่อ 8 มีนาคม 2559
- [2] โยธิน วงประเสริฐ. กระบวนการผลิตวัสดุสารกึ่งตัวนำ. พิมพ์ครั้งที่1. คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552. ค้นเมื่อ 19 มีนาคม 2559
- [3] รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, เซมิคอนดักเตอร์ ดีไวซ์, 1st ed, ค้นเมื่อ 19 มีนาคม 2559 ISBN  
974-15-000-68, กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [4] Semiconductor Material Processing หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา  
อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] บริษัท GTS. การใช้งานโปรแกรม GTS Framework. จาก  
<http://www.globaltcad.com/en/home.html>

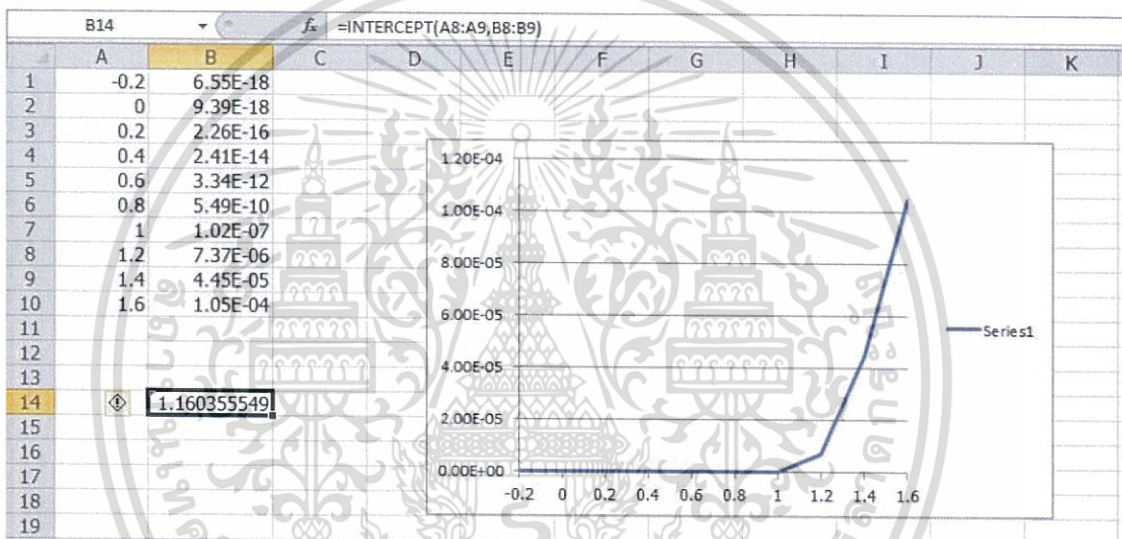
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### การคำนวณค่าแรงดันขีดเริ่ม

#### ก.1 หาค่า Threshold Voltage

หาค่า Threshold Voltage โดยใช้ Microsoft Excel จากกราฟ  $I_d/V_{gs}$  โดยใช้สูตร  
 $=\text{INTERCEPT}$  ในช่วงที่กราฟกำลังขึ้น



รูปที่ ก.1 การหาค่า Threshold Voltage โดยใช้ Microsoft Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้