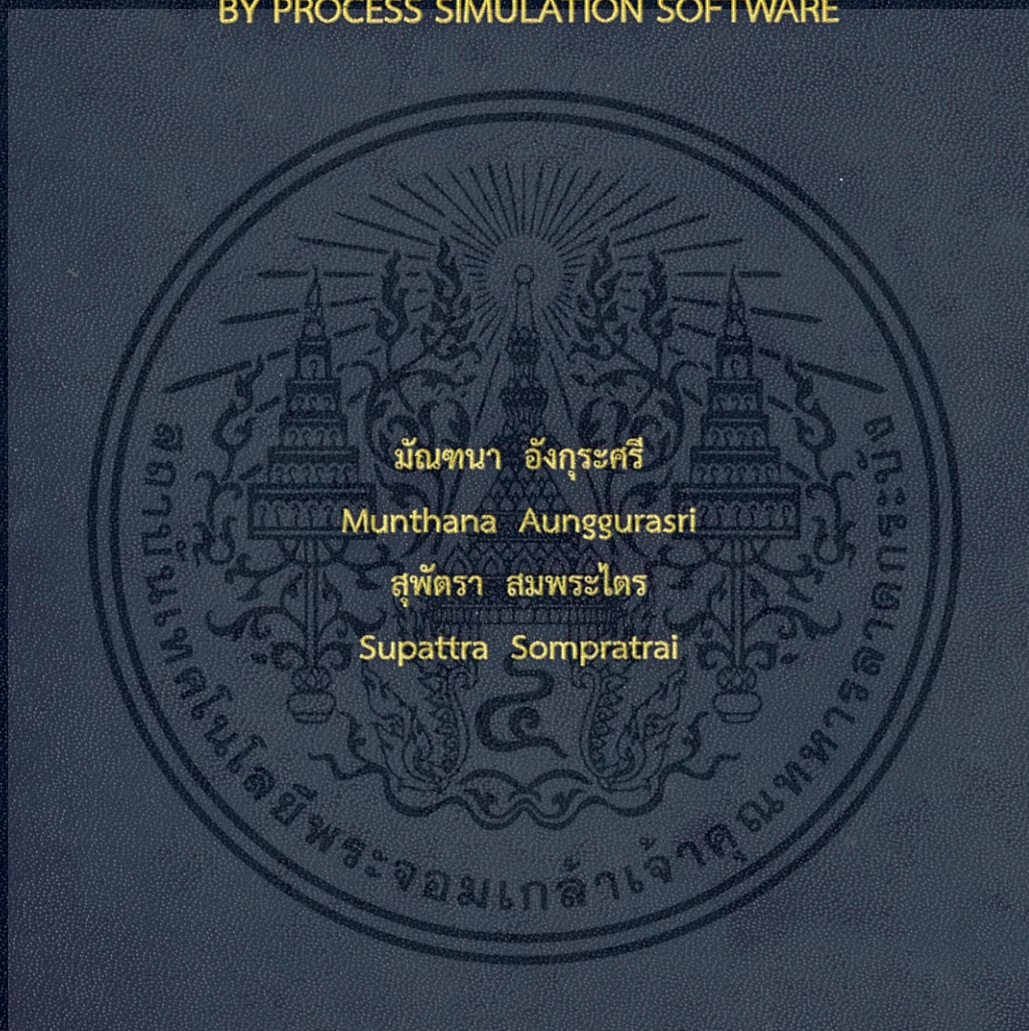


การศึกษาและสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมจำลองแบบ  
กระบวนการสร้าง

STUDY OF SEMICONDUCTOR ELECTRONIC DEVICES FABRICATION  
BY PROCESS SIMULATION SOFTWARE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2557

การศึกษาและสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมจำลองแบบ  
กระบวนการสร้าง

STUDY OF SEMICONDUCTOR ELECTRONIC DEVICES FABRICATION  
BY PROCESS SIMULATION SOFTWARE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมจำลองแบบ  
กระบวนการสร้าง

STUDY OF SEMICONDUCTOR ELECTRONIC DEVICES FABRICATION BY  
PROCESS SIMULATION SOFTWARE

ผู้จัดทำ นางสาวมันทนา อังกระศรี รหัสประจำตัว 54011024

นางสาวสุพัตรา สมพระไตร รหัสประจำตัว 54011409

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(ดร. วีระ เห่งจันทร์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาและสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมจำลองแบบกระบวนการสร้าง
นักศึกษา	นางสาวมณฑนา อังกระศรี รหัสประจำตัว 54011024 นางสาวสุพัตรา สมพระไตร รหัสประจำตัว 54011409
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ดร.วีระ เฟ็งจันทร์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมจำลองแบบกระบวนการสร้าง เพื่อศึกษาถึงการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้ได้โครงสร้างและคุณสมบัติตามที่ต้องการโดยใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เริ่มต้นจากการศึกษาขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการศึกษาการใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เพื่อการออกแบบและจำลองการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นทำการสร้างมอสทรานซิสเตอร์และฟินเฟตโดยใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ทำการจำลองแบบกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติกระแสและแรงดัน ความเข้มข้นพาหะ ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า คุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเกต แรงดันขีดเริ่ม ค่า subthreshold swing (ss) และอื่นๆ ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากการจำลองแบบที่ได้มีโครงสร้างเหมือนการสร้างจริงในโรงงานอุตสาหกรรม และพบว่าในการใช้โปรแกรมจำลองแบบนี้ทำให้สามารถทดลองเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ต้องการ ผลการจำลองแบบที่ได้สามารถแสดงด้วยภาพแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ตลอดจนแสดงคุณสมบัติของความสัมพันธ์เป็นเส้นกราฟ จากการทดลองสร้างมอสทรานซิสเตอร์ พบว่าความหนาของเกตออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง และพบว่าความยาวของเกตมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง จากการทดลองสร้างฟินเฟต พบว่าเมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น แต่กระแสเดรนและค่า subthreshold swing (ss) มีค่าลดลง และพบว่าเมื่อความกว้างของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น

<b>Thesis Title</b>	Study of Semiconductor Electronic Devices Fabrication by Process Simulation Software
<b>Student</b>	Miss. Munthana Aungurasri Student ID. 54011024 Miss. Supattra Sompratrai Student ID. 54011409
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering
<b>Program</b>	Electronic Engineering
<b>Year</b>	2557
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Weera Pengchan

## Abstract

This research studied the creation of the semiconductor electronic devices by process simulation software. Studied the design of the electronic structure and properties as required by using TCAD. Started from the educational process to create electronic devices. The program includes the study of TCAD. Design and create of the simulation electronic devices. Then create MOSFET and finFET by TCAD. The replication process of creating electronic devices and electrical and physical properties involved such as current and voltage characteristic, net concentration, current drain and voltage drain, threshold voltage, subthreshold swing (ss) etc. The structure of simulation of electronic devices as real in the industry and found that can to change parameters of desired simulation. The results show that display 2D and 3D images and shows a graph of the relationship. The experiment created MOSFET. Found that the thickness of gate oxide has increased to make the current drain has decreased. The experiment created fin. The created finFET. Found that the channel length has increased to make the threshold voltage has increased. However, the drain current and the subthreshold swing (ss) has decreased. Found that the channel width has increased to make the current drain has increased.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจในการศึกษาเล่าเรียนรวมถึงค่าใช้จ่ายต่างๆในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณศศิธร ศรีศิริโรจน์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและแนะนำวิธีการจัดทำเล่มปริญญานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ดร. วีระ เพ็งจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้



มณฑนา อังกระศรี

สุพัตรา สมพระไตร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป.....	vii
สารบัญตาราง.....	xii
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	4
2.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้น.....	4
2.1.2 กระบวนการออกซีเดชัน.....	5
2.1.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี.....	7
2.1.4 กระบวนการการแพร่สารเจือด้วยความร้อน.....	8
2.1.5 กระบวนการฝังประจุไอออน.....	12
2.1.6 กระบวนการสกัด.....	12
2.1.7 กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมี.....	13
2.1.8 กระบวนการทางโลหะ.....	14
2.1.9 กระบวนการเก็บบรรจุ.....	15

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2 มอสมิทธานซิสเตอร์.....	15
2.2.1 การไปอัส.....	16
2.2.2 ประเภทของมอสมิทธานซิสเตอร์.....	18
2.2.3 แร่งตันซิดเรีม.....	18
2.2.4 กราฟคุณลักษณะของมอสมิทธานซิสเตอร์.....	19
2.2.5 สมการกระแสมอสมิทธานซิสเตอร์.....	20
2.3 ฟินเฟต.....	20
2.3.1 ที่มาของฟินเฟต.....	20
2.3.2 ประโยชน์และกานำไปใช้งาน.....	21
2.3.3 โครงสร้างของฟินเฟต.....	21
2.3.4 กราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟินเฟต.....	22
2.3.5 สมการกระแส.....	23
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	
3.1 โปรแกรม TCAD.....	24
3.1.1 GTS Framework.....	24
3.1.2 คุณสมบัติของโปรแกรม.....	24
3.1.3 โปรแกรมย่อย.....	24
3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม.....	26
3.2.1 The Tools Column.....	26
3.2.2 The Framework Hom.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การทดลองสร้างมอสมิทธานซิสเตอร์ชนิดเอ็นมอสด้วยแม่แบบ.....	28
4.1.1 วิธีการสร้างโปรเจคใหม่.....	28
4.1.2 วิธีการสร้างโครงสร้างใหม่.....	29

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.3 วิธีการสร้างอุปกรณ์ใหม่ .....	29
4.1.4 การใช้อุปกรณ์แม่แบบ .....	30
4.1.5 วิธีการการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของแม่แบบ .....	31
4.1.6 วิธีสร้างการจำลองผลอุปกรณ์ใหม่ .....	32
4.1.7 การจำลองแบบอุปกรณ์ .....	33
4.1.8 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	41
4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความยาวเกท .....	43
4.3 ความสัมพันธ์ของความหนาเกทออกไซด์ .....	47
4.4 การทดลองสร้างมอสทรานซิสเตอร์โดยไม่ใช้แม่แบบ .....	51
4.5 การทดลองสร้างฟินเฟต .....	54
4.5.1 การศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับความยาวของช่องทางเดินกระแส .....	54
4.5.2 การศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับความกว้างของช่องทางเดินกระแส .....	66
4.5.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	77
เอกสารอ้างอิง .....	78
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	80
ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าแรงขีดเริ่มและค่า Subthreshold swing (ss) .....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลงหรืออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	4
2.2 ชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนรูปที่.....	5
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิและความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์.....	6
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิและความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์.....	6
2.5 การฉายแสงอินตราไวโอเล็ตด้วยเครื่องจัดวางมาสก์.....	7
2.6 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านมาสก์.....	8
2.7 ค่า solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน.....	9
2.8 ค่าความหนาน้อยที่สุดของออกไซด์สำหรับการแพร่โบรอน.....	10
2.9 ค่าความหนาน้อยที่สุดของออกไซด์สำหรับการแพร่ฟอสฟอรัส.....	10
2.10 การยิงไอออนของฟอสฟอรัสเข้าไปทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด N.....	12
2.11 การยิงไอออนของโบรอนเข้าไปทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด P.....	12
2.12 การสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน.....	13
2.13 ส่วนของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่บนแผ่นฐานรองซิลิคอน.....	13
2.14 การสร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์ปกคลุมผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน.....	14
2.15 ช่องที่จะใช้สำหรับสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก.....	14
2.16 Metal Contact ต่อจากส่วนของ ซอร์ส เกต และเดรน.....	15
2.17 โครงสร้างพื้นฐานและสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดเอ็นและชนิดพี.....	16
2.18 (ก) ลักษณะการไบอัสอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น (ข) ลักษณะการไบอัสอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี.....	17
2.19 การทำงานของมอสเฟตประเภทต่างๆ.....	18
2.20 สถานะภาพต่างๆในโครงสร้างมอสเมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆกัน.....	18
2.21 สรุปคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์.....	19
2.22 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น.....	19
2.23 ส่วน Cross ของ DGFET ในระนาบทั่วไป.....	21

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 โครงสร้าง FinFET.....	21
2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	22
2.26 การหากระแสเดรน.....	22
3.1 ส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม.....	26
4.1 ขั้นตอนการสร้าง New Project.....	28
4.2 ขั้นตอนการสร้าง New Structure .....	29
4.3 ขั้นตอนการสร้าง New Device.....	30
4.4 การเลือกใช้ Template.....	30
4.5 การสร้างอุปกรณ์จากแม่แบบ .....	31
4.6 การเปลี่ยนพารามิเตอร์จากแม่แบบ.....	32
4.7 การสร้าง New Device Simulation.....	32
4.8 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ gate.....	33
4.9 หน้าจอแสดงพื้นที่ใช้งานของแท็บ “Device”.....	34
4.10 การเลือกตัวแปรที่ต้องการวัดค่า.....	34
4.11 การกำหนดค่าแรงดันเกต .....	35
4.12 การกำหนดพื้นที่ที่ต้องการวัดค่าอุปกรณ์.....	36
4.13 การเลือกปริมาณสำหรับแกน X .....	36
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ElectronConcentration กับความลึก .....	37
4.15 การกำหนดค่าการจ่ายแรงดันที่เกตและเดรน.....	37
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต .....	38
4.17 การคัดลอกการจำลองก่อนหน้า .....	39
4.18 การกำหนดค่าแรงดันเกต .....	39
4.19 การกำหนดค่าแรงดันเดรน .....	40
4.20 การกำหนดคุณสมบัติในแกน X และแกน Y .....	41

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอน.....	41
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเกต.....	42
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน.....	42
4.24 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	43
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อ $L = 500 \text{ nm}$ และ $t_{ox} = 5 \text{ nm}$ .....	44
4.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	44
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อ $L = 250 \text{ nm}$ และ $t_{ox} = 5 \text{ nm}$ .....	45
4.28 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	45
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อ $L = 125 \text{ nm}$ และ $t_{ox} = 5 \text{ nm}$ .....	46
4.30 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดความยาวเกตค่าต่างๆ.....	46
4.31 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	47
4.32 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $T_{ox} = 10 \text{ nm}$ และ $L = 250 \text{ nm}$ .....	48
4.33 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	48
4.34 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $T_{ox} = 5 \text{ nm}$ และ $L = 250 \text{ nm}$ .....	49
4.35 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์.....	49
4.36 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ $T_{ox} = 2 \text{ nm}$ และ $L = 250 \text{ nm}$ .....	50
4.37 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดความหนาของเกตออกไซด์ค่าต่างๆ.....	50
4.38 การ Add Segment.....	51
4.39 การ Dopants.....	51
4.40 การ Add Grids.....	52
4.41 ลักษณะความเข้มข้นสารเจือและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น.....	52
4.42 กราฟ Threshold Voltage.....	53
4.43 กราฟ I-V Characteristics.....	53
4.44 การสร้างฟินเฟตที่มี $L=20 \text{ nm}$ , $W= 10 \text{ nm}$ .....	54

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี $L = 20 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	54
4.46 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $L = 20 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	55
4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	56
4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน .....	56
4.49 การสร้างฟินเฟตที่มี $L = 22 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	57
4.50 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี $L = 22 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	57
4.51 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $L = 22 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	58
4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	58
4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน .....	59
4.54 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $L = 32 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	59
4.55 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี $L = 32 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	60
4.56 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $L = 32 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	60
4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	61
4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน .....	61
4.59 การสร้างฟินเฟตที่มี $L = 40 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	62
4.60 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี $L = 40 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	62
4.61 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $L = 40 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	63
4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	63
4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน .....	64
4.64 การสร้างฟินเฟตที่มี $L = 80 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	64
4.65 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี $L = 80 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	65
4.66 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $L = 80 \text{ nm}$ , $W = 10 \text{ nm}$ .....	65
4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	66
4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน .....	66

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.69 การสร้างฟินเฟตที่มี $W= 10 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	67
4.70 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี $W= 10 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	67
4.71 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $W= 10 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	68
4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	69
4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน .....	69
4.74 การสร้างฟินเฟตที่มี $W= 15 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	70
4.75 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี $W= 15 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	70
4.76 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $W= 15 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	71
4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	71
4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน .....	72
4.79 การสร้างฟินเฟตที่มี $W= 20 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	72
4.80 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี $W= 20 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	73
4.81 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี $W= 20 \text{ nm}$ , $L=32\text{nm}$ .....	73
4.82 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต .....	74
4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน .....	74
4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ $L$ ค่าต่างๆ.....	75
4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ $L$ ค่าต่างๆ.....	75
4.86 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเดรนที่ $L$ ค่าต่างๆ.....	76
4.87 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเดรนที่ $W$ ค่าต่างๆ.....	77
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต	
เมื่อ $V_{ds}=0.05\text{V}$ ของ $L=20\text{nm}$ .....	82
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน(scale log)กับแรงดันเกต	
เมื่อ $V_{ds}=0.05\text{V}$ ของ $L=20\text{nm}$ .....	83

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ค่า Subthreshold Swing ที่ความยาวของช่องทางเดินกระแสค่าต่างๆ .....	75
ก ข้อมูล Current Drain.....	80
ข ผลการคำนวณ ss .....	84



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เมื่อกล่าวถึงอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์นั้นมียุ่อยู่มากมายหลายประเภทและสามารถนำมาใช้งานได้อย่างสะดวก แต่เมื่อนึกถึงโครงสร้างหรือกระบวนการผลิตแล้วเราจะพบว่ามีความยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ซึ่งในอดีตการพัฒนาอุปกรณ์ใหม่ๆขึ้นมาในการออกแบบและสร้างต้องใช้เวลาในการออกแบบและทดลองเป็นเวลาที่ยาวนานทำให้ต้องใช้ต้นทุนจำนวนมากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ได้ก็ไม่สูง แต่ในปัจจุบันการพัฒนาของความรู้เทคโนโลยีได้มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมากซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบต่างๆมากมายมีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆมาใช้ในการทำงาน มีการพัฒนาสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในรูปของวงจรรวมขนาดเล็ก และสร้างโปรแกรมต่างๆขึ้นมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อช่วยในการออกแบบ ให้สะดวกรวดเร็ว และได้ผลผลิตที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น โดยในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างประเทศได้มีการนำเทคโนโลยีมาพัฒนาและสร้างโปรแกรมในการออกแบบและจำลองกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยในการจำลองการสร้าง การทำงาน และการวัดประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ก่อนการนำไปผลิตจริงเพื่อช่วยในการลดต้นทุนและเวลาในการผลิต

การใช้โปรแกรมในการออกแบบและจำลองกระบวนการสร้างก่อนการนำไปผลิตจริงจึงถือว่ามีความสำคัญมากเพราะเราสามารถทราบถึงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์และยังช่วยให้เกิดความผิดพลาดน้อยลงรวมถึงประหยัดค่าใช้จ่ายในการออกแบบและทดลอง แต่เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาใหม่จากต่างประเทศจึงทำให้โรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในประเทศไทยยังขาดแคลนผู้ที่มีความรู้ความสามารถในการใช้โปรแกรมนี้เป็นจำนวนมาก ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้เราได้ตระหนักถึงความสำคัญนี้ จึงได้ทำการศึกษาการใช้โปรแกรมจำลองแบบ TCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และนำความรู้ในการใช้โปรแกรม TCAD มาทดลองสร้างมอสทรานซิสเตอร์และฟินเฟต ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก เพื่อช่วยในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าและศึกษาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ และเพื่อนำความรู้ในการใช้โปรแกรมนี้ไปพัฒนาสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำใหม่ๆขึ้นมาใช้งานในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการทำงาน คุณสมบัติและโครงสร้างของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์และฟินเฟต
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์
3. เพื่อศึกษาการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรมจำลองแบบ TCAD

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาถึงการทำงาน คุณสมบัติและโครงสร้างของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์และฟินเฟต
2. ศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์และฟินเฟต
3. ศึกษาการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรมจำลองแบบTCAD

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงาน คุณสมบัติและโครงสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ อิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์และฟินเฟต
2. ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับขั้นตอนและกระบวนการสร้างของอุปกรณ์แบบสารกึ่ง ตัวนำอิเล็กทรอนิกส์
3. ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับขั้นตอนและวิธีการใช้โปรแกรมจำลองแบบ TCAD อย่าง ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำความรู้ที่ได้ไปสร้างอุปกรณ์แบบสารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบด้วย มอสทรานซิสเตอร์และฟิเนลต์ได้

5. นำความรู้และประสบการณ์ที่ได้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆและนำไปใช้ในการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมได้



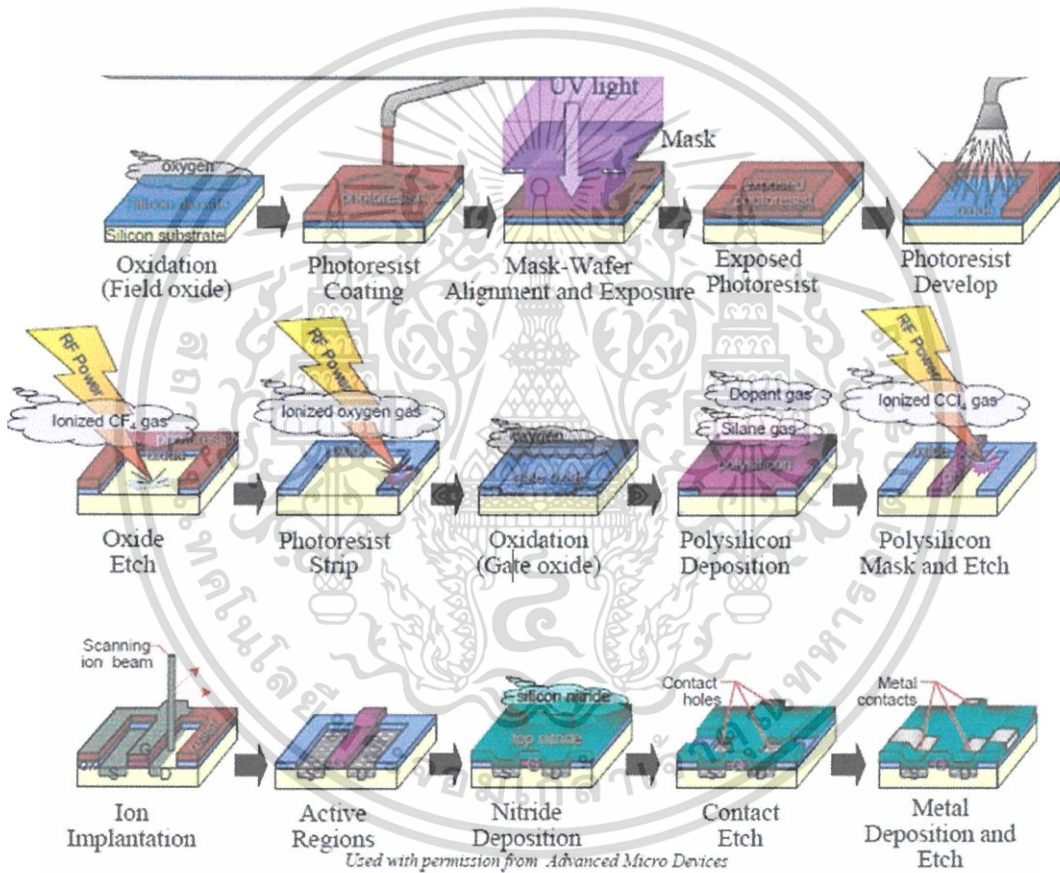
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

กระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [1] มีขั้นตอนต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

#### 2.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้น (Wafer Preparation)

การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้นมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของวงจรรวมอย่างมาก การเลือกแผ่นฐานรองต้องพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆของแผ่นฐานรอง เช่น ความเข้มข้นฐานรอง หนาบผลึก ค่าพิกัดความต้านทานและอื่นๆ แผ่นฐานรองซิลิคอนที่นิยมใช้กันทั่วไปสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฐานรองชนิดเอ็น ระบาย (100) คือ แผ่นฐานรองซิลิคอนที่เกิดจากการเติมสารเจือของธาตุ หมู่ 5 เช่น Arsenic หรือ Phosphorus

- ฐานรองชนิดพี ระบาย (100) คือ แผ่นฐานรองซิลิคอนที่เกิดจากการเติมสารเจือของธาตุ หมู่ 3 เช่น Boron

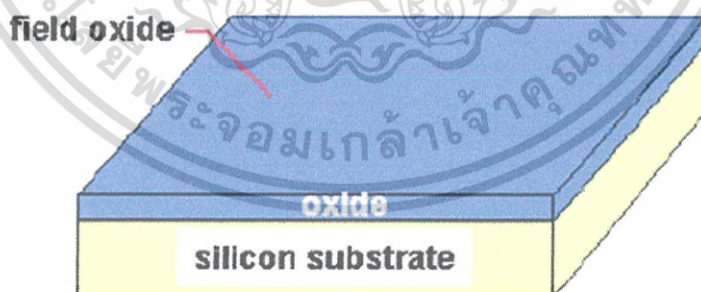
ต้องมีการทำความสะอาดแผ่นฐานรองซิลิคอนก่อนการนำไปใช้เสมอ เพื่อล้างสิ่งเจือปนต่างๆ รวมถึงออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นบนผิวของแผ่นฐานรองออก เพื่อให้ผิวหน้าสะอาดและให้ได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น

### 2.1.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) [2]

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. เพื่อใช้ป้องกันไม่ให้สารเจือแพร่เข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการขณะที่ทำกระบวนการเติมสารเจือ (Doping)
2. เพื่อป้องกันผิวหน้าแผ่นซิลิคอนไม่ให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเสียหาย



รูปที่ 2.2 ชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน

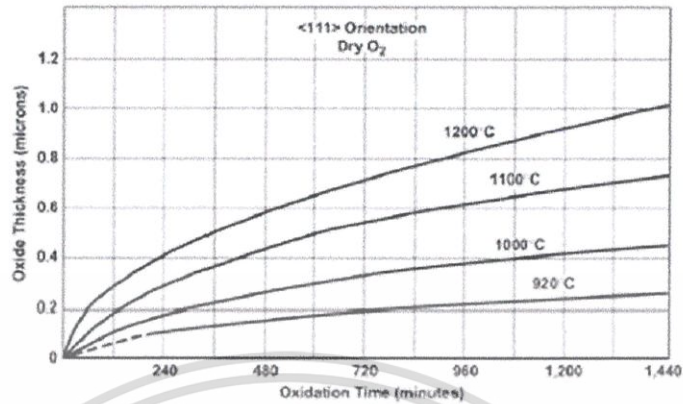
การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของแก๊สออกซิเจนที่บริสุทธิ์กับอะตอมของซิลิคอนที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $1100^\circ\text{C}$  อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับอะตอมของออกซิเจนจนเกิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

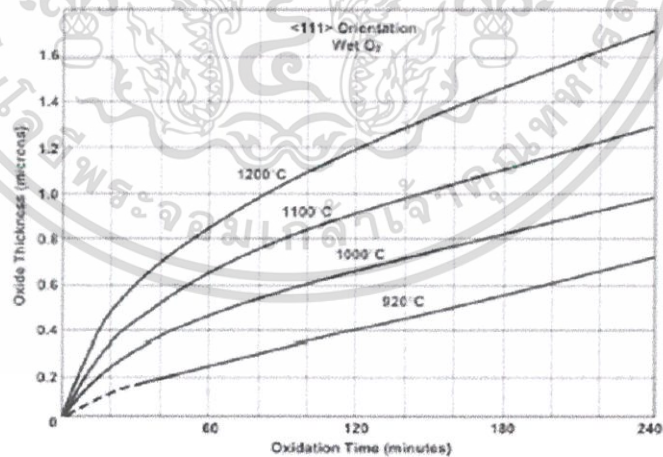
ซิลิกอนไดออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สำหรับความหนาของชั้น  $\text{SiO}_2$  นี้สามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิและความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

## 2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิกอนและอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำโดยการปล่อยแก๊สออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้วที่บรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิประมาณ  $90 - 95^\circ \text{C}$  แก๊สออกซิเจนซึ่งอิ่มตัวและมีไอน้ำอยู่ด้วยจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ที่มีแผ่นเวเฟอร์วางอยู่ ทำให้อะตอมของออกซิเจนรวมตัวกับอะตอมของซิลิกอนจนเกิดเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ความหนาของชั้น  $\text{SiO}_2$  สามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิและความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

จากความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดซิลิกอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4 พบว่าซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบชื้นเกิดเร็วกว่ากระบวนการที่ได้จากแบบแห้งถึง 4 เท่า แต่ซิลิกอนไดออกไซด์แบบแห้งจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างซิลิกอนไดออกไซด์สูงกว่าแบบชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

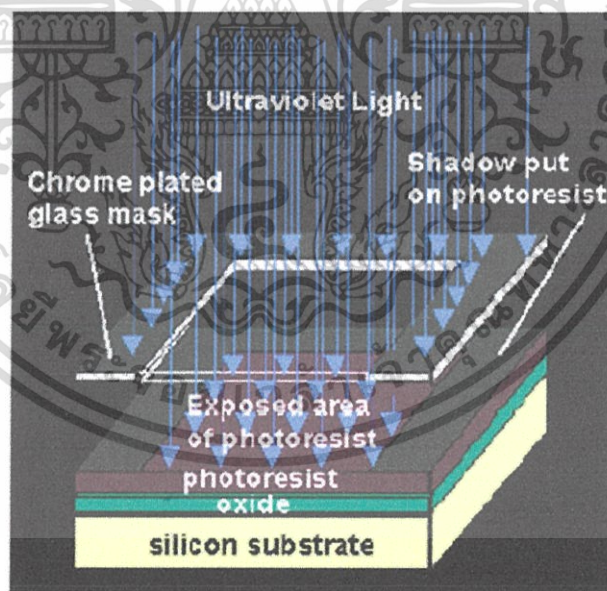
### 2.1.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

หลังจากกระบวนการออกซิเดชันผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจะถูกเคลือบด้วยชั้นของ  $\text{SiO}_2$  ทั้งหมดเพื่อป้องกันการแพร่ของสารเจือเข้าไปในเนื้อของแผ่นซิลิคอนในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆจึงจำเป็นต้องเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ออก เรียกว่า กระบวนการทางแสง (Photolithography) ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญมากในการทำวงจรรวมเพราะต้องใช้กระบวนการทางแสงเพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์หลายครั้ง

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

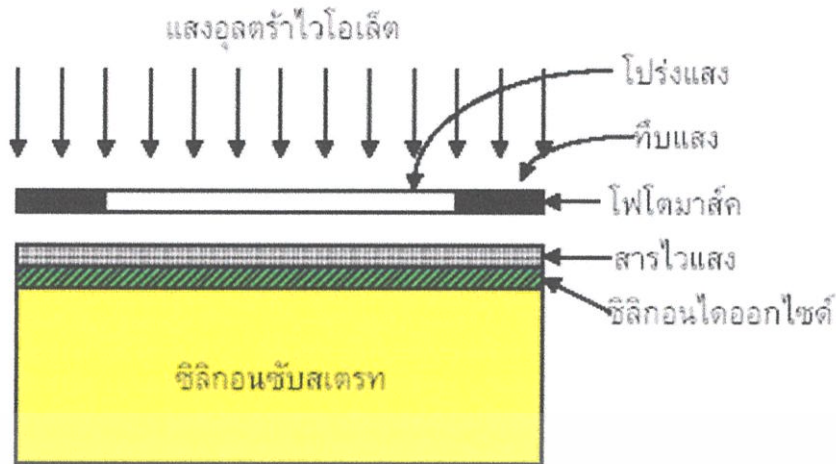
1. น้ำยาไวแสงเชิงลบ (negative photo resist) ได้แก่ DFR way coat
2. น้ำยาไวแสงเชิงบวก (positive photo resist) ได้แก่ AZ – 1350

เมื่อเคลือบเสร็จแล้วทำการอบฟิล์มครั้งแรก (prebake) เพื่อให้ทำให้น้ำยาไวแสงยึดติดกับผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนไปทำการจัดวางมาสก์ด้วยกระจกมาสก์ตามลวดลายที่ออกแบบไว้ แล้วนำไปฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่องจัดวางมาสก์ (mask aligner) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.5 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่องจัดวางมาสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านมาสก์

หลังจากฉายแสงแล้วทำการสร้างลวดลายฟิล์มด้วยน้ำยาสร้างลวดลายฟิล์ม (developer) แล้วทำการอบแห้งฟิล์มครั้งหลังอีกครั้ง (postbake) ทำการทาด้านหลังแผ่นและอบแห้งอีกครั้ง จากนั้นนำไปทำการกัด (etching) ซึ่งเป็นการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ไม่มีฟิล์มคลุมอยู่ โดยทำการกัดในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer) ที่มี  $\text{HF} : \text{NH}_4\text{F} = 1:6$  และมีอัตราการกัดประมาณ  $1,000 \text{ \AA} / \text{นาที่}$  จนกระทั่งชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ถูกกัดออกจนหมด และขั้นตอนสุดท้ายคือ การลอกฟิล์ม (photo resist & stripping) โดยน้ำยาไวแสงเชิงลบจะลอกออกได้ง่ายในสารละลายออกแกนิกส์ เช่น อาซิโตน ส่วนน้ำยาไวแสงเชิงลบจะลอกออกได้ด้วยการต้มในกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งภายหลังจากการลอกฟิล์มต้องทำการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนอีกครั้งก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการอื่นๆต่อไป

#### 2.1.4 กระบวนการการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion Process)

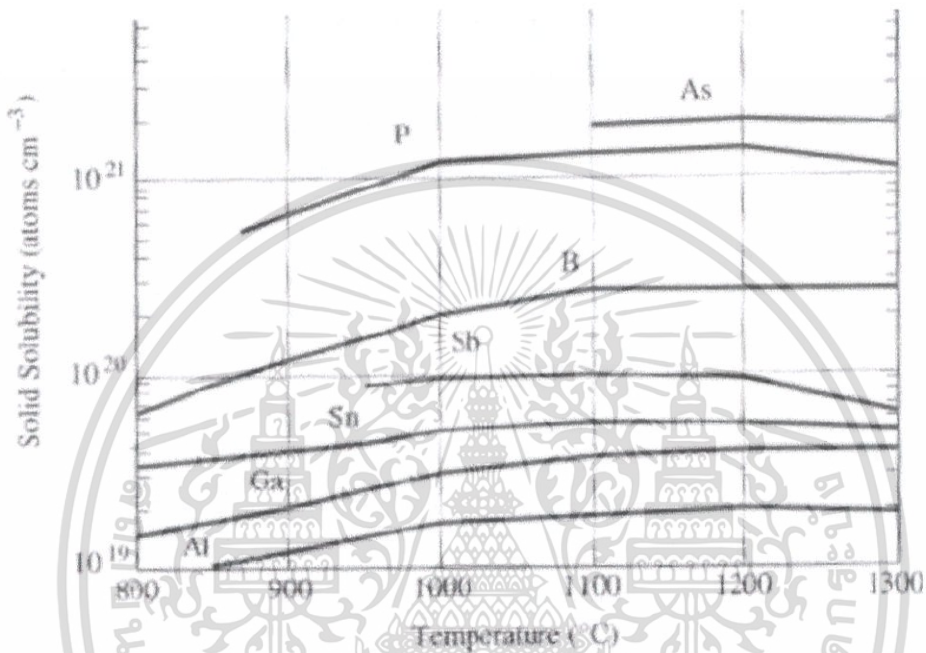
กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการแพร่สารเจือลงบนแผ่นฐานรอง ด้วยวิธีการแพร่ด้วยอุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรอง และถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้นกลไกการแพร่ของสารเจือเป็น 2 แบบ คือ การเข้าไปแทนที่อะตอม และการเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4.1 การแพร่สารเจือชั้นต้น (Pre-deposition)

เป็นการแพร่ชั้นต้น เพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือ (Q) ที่จะเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ ขั้นตอนนี้กระทำโดยการแพร่สารเจือในเงื่อนไขของ Complementary Error Function Distribution (unlimited source) การแพร่ชั้นนี้จะทำในช่วงเวลาสั้น ๆ

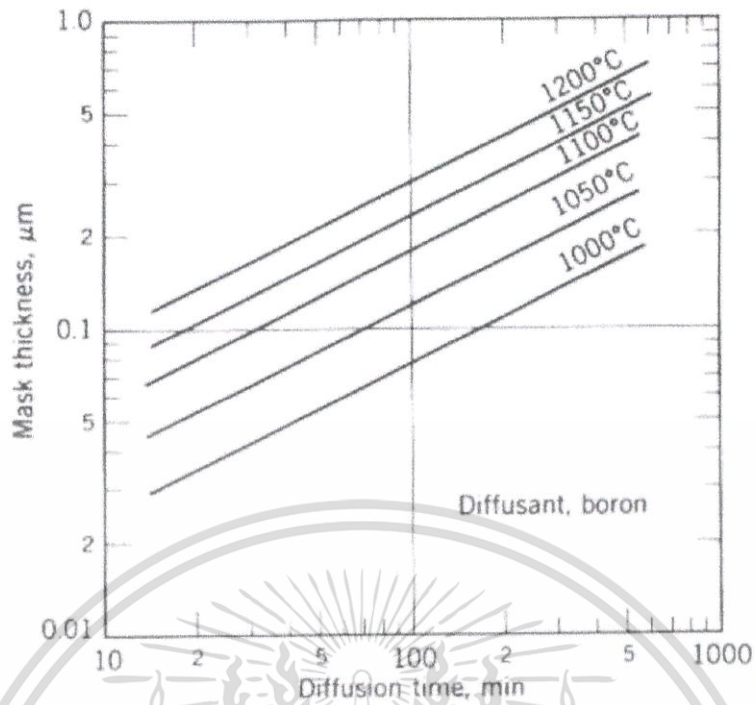


รูปที่ 2.7 ค่า solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน

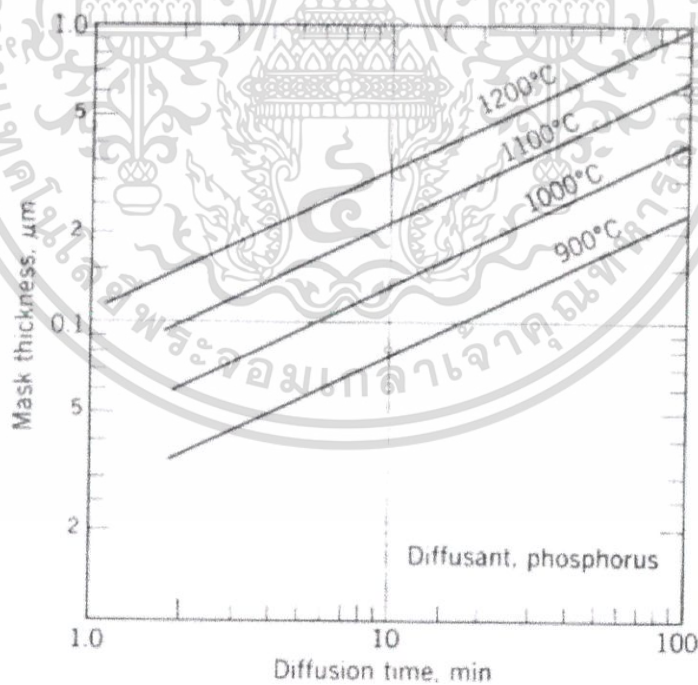
ค่าของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในอากาศ (หรือที่ผิวของซิลิคอน) จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ และอุณหภูมิ ค่านี้ถูกกำหนดได้ด้วยความหนาแน่นสูงสุดของสารเจือชนิดใดๆที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ซึ่งเรียกค่านี้ว่า Solid Solubility และหาได้จากกราฟรูปที่ 2.4 ดังนั้นที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ๆ “solid solubility” ของสารเจือจะบ่งบอกถึงปริมาณของสารเจือที่มากที่สุดที่จะแพร่เข้าไปอยู่ในผลึก Si ที่อุณหภูมินั้น ๆ ได้

ในขบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ บริเวณใดของแผ่นผลึก Si ที่ไม่ต้องการให้อะตอมสารเจือแพร่เข้าไปก็จะถูกชั้นของออกไซด์ ซึ่งมีความหนาแน่นพอเหมาะปิดอยู่ เพื่อทำหน้าที่เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของสารเจือไม่ให้เข้าถึงผลึก Si ได้ ค่าความหนาแน่นของ SiO<sub>2</sub> ที่น้อยที่สุดที่จะสามารถป้องกันการแพร่ผ่านของอะตอมสารเจือมิให้เข้าไปถึงผลึก Si แสดงได้ในกราฟรูปที่ 2.5 ในกรณีการแพร่โบรอนเข้าไปในซิลิคอน และรูปกราฟที่ 2.9 ในกรณีการแพร่ฟอสฟอรัสเข้าไปในซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ค่าความหนาแน่นที่สุดของออกไซด์สำหรับการแพร่โบรอน



รูปที่ 2.9 ค่าความหนาแน่นที่สุดของออกไซด์สำหรับการแพร่ฟอสฟอรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายอะตอมสารเจือในผลึกฐานรองซิลิคอน แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc}(x/\sqrt{4D_p t_p}) \quad (\text{ions/cm}^3) \quad (2.1)$$

ซึ่ง  $N_s$  = ความเข้มข้นที่ผิว ( $\text{cm}^{-3}$ )

$x$  = ระยะลึกของการแพร่สารเจือจากผิว (cm)

$D_p$  = ความสามารถในการแพร่ที่อุณหภูมิการแพร่เริ่มต้น ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

$t_p$  = เวลาที่ใช้ในการแพร่เริ่มต้น

การหาค่าความเข้มข้น  $N(x, t)$  ที่ความลึก  $x$  ภายหลังจากการแพร่เริ่มต้นเป็นเวลา  $t_p$  ต้องแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการที่ 2.1 สิ่งที่สำคัญ 2 ประการในการแพร่ คือ ความลึกรอยต่อพี-เอ็น ( $X_j$ ) ที่ได้จากการแพร่เริ่มต้น และจำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด ( $Q$ ) ภายหลังจากการแพร่ ซึ่งมีค่าดังสมการที่ 2.2

$$Q = N_s \sqrt{4D_p t_p} / \pi \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (2.2)$$

#### 2.1.4.2 การขับเคลื่อน (Drive-in)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารเจือบริเวณผิวที่ได้จากขั้นตอนการแพร่เริ่มต้น แพร่ลงไปในเนื้อสารลึกมากขึ้น ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นซิลิคอน แสดงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$N(x, t) = (Q/\sqrt{\pi D_d t_d}) \exp(-x^2/4D_d t_d) \quad (\text{ions/cm}^3) \quad (2.3)$$

ซึ่ง  $Q$  = จำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด ( $\text{cm}^{-2}$ )

$D_d$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ในการขับเคลื่อน

$t_d$  = เวลาที่ใช้ในการขับเคลื่อน

ความลึกรอยต่อ ภายหลังจากทำการขับเคลื่อน โดยให้  $N(x, t) = N_B$  จะได้

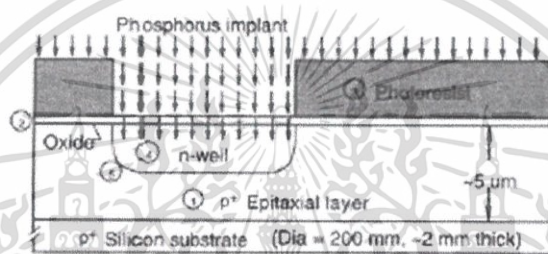
$$X_j = \sqrt{D_d t_d \ln[Q/(N_B \sqrt{\pi D_d t_d})]} \quad (\text{cm}) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

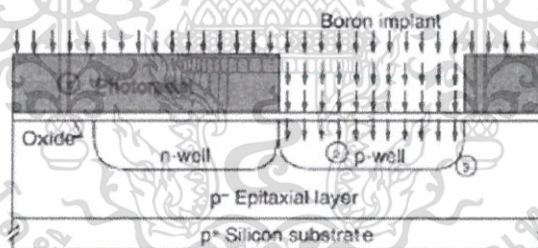
### 2.1.5 กระบวนการฝังประจุไอออน (Ion Implantation Process)

เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมวัสดุ โดยการเร่งประจุไอออนด้วยสนามไฟฟ้าและฝังเข้าไปยังเนื้อวัสดุที่ต้องการ กระบวนการนี้ถูกใช้เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางไฟฟ้า ฟิสิกส์ หรือเคมี กระบวนการฝังประจุไอออนนี้สามารถควบคุมให้มีความเที่ยงตรงได้ทั้งในการควบคุมความลึกของรอยต่อตลอดจนปริมาณอะตอมของสารเจือ

กระบวนการฝังประจุไอออนมีสารเจือที่นิยมใช้ ได้แก่ โบรอน ฟอสฟอรัส หรืออาร์เซนิก อะตอมสารเจือจะสร้างประจุพาหะภายหลังการแอนนัล (annealing) โดยโฮลถูกสร้างจากสารเจือชนิดพีส่วนอิเล็กทรอนิกส์สร้างจากสารเจือชนิดเอ็น ซึ่งกระบวนการการยิงฟอสฟอรัสและโบรอนเข้าไปในเนื้อสารสามารถแสดงในรูปที่ 2.7 และ รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.10 การยิงไอออนของฟอสฟอรัสเข้าไปทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด N



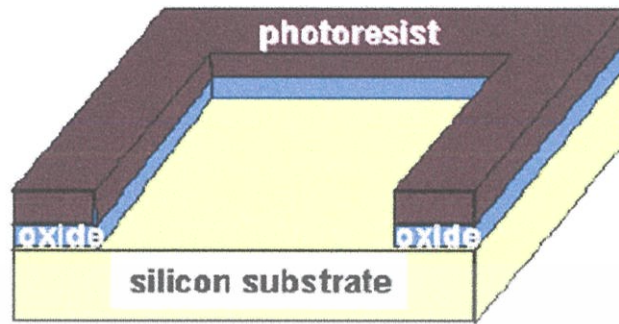
รูปที่ 2.11 การยิงไอออนของโบรอนเข้าไปทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด P

### 2.1.6 กระบวนการสกัด (Etching)

หลังจากการสร้างลวดลายของน้ำยาไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเสร็จแล้วต้องผ่านกระบวนการสกัด (Etching) เพื่อทำการสกัดส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หรือชั้นซิลิคอนไนไตรด์ ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีน้ำยาไวแสงปกคลุมออก วิธีการสกัดที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ การใช้สารเคมี (Wet Etching) และการสกัดด้วยพลาสมา (Dry Etching) [3] ทั้งสองกรณีให้ผลลัพธ์คล้ายกันคือการสกัดจะหยุดลงที่ของดักกลางของชั้นฟิล์มที่ต้องการสกัดออก ขึ้นอยู่กับอัตราการสกัดและเวลา นิยมใช้การสกัดแบบพลาสมาในการสกัดรูปทรงที่ละเอียด โดยทั่วไปใช้สารละลายของ HF-HNO<sub>3</sub> สำหรับการสกัดซิลิคอน, HF สำหรับการสกัดซิลิคอนไดออกไซด์, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ร้อนสำหรับการสกัดซิลิคอนไนไตรด์ และ

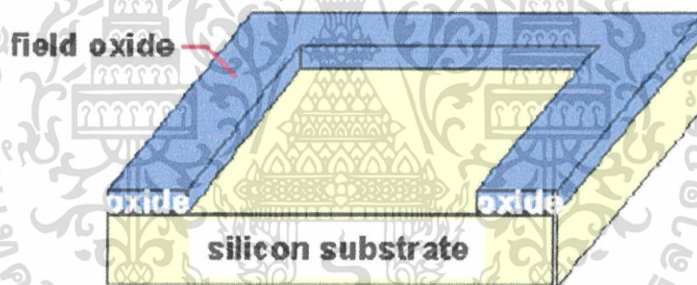
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$H_3PO_4$  เย็นสำหรับสกัดโลหะอลูมิเนียม ส่วนกาซที่ใช้ในการทำพลาสมามักใช้ฟลูโอโรโรนหรือคลอโรน เช่น  $CF_4$  โดยการสกัดซิลิคอนไดออกไซด์สามารถแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.12 การสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน

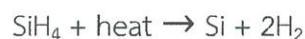
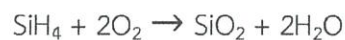
หลังจากสกัดส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกแล้วจะเข้าสู่กระบวนการสกัด (Etching) อีกครั้งเพื่อกำจัดชั้นของน้ำยาไวแสง (Photoresist) ออกไป เหลือส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ต้องการอยู่บนแผ่นฐานรองซิลิคอน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.13 ส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่อยู่บนแผ่นฐานรองซิลิคอน

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

CVD ถูกใช้เพื่อสร้างชั้นฟิล์มของวัสดุบนแผ่นฐานรองซิลิคอน เช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ ซิลิคอนไนไตรด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป (Polycrystalline Silicon) กระบวนการทาง CVD ปกติกระทำที่อุณหภูมิช่วง  $300-900^{\circ}C$  และใช้ปฏิกิริยาเคมีดังนี้



การสร้างด้วยกระบวนการนี้จะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า และไม่เชื่อมติดแน่นกับแผ่นซิลิคอน เหมือนการสร้างด้วยกระบวนการความร้อน ดังนั้นจึงมักนำมาใช้ในกรณีที่ไม่สร้างจากความร้อนหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เป็นฉนวนบนซิลิคอน สร้างด้วยการใช้พลังงานพลาสมาและปฏิกิริยาเคมีภายใต้อุณหภูมิต่ำเท่านั้น โดยเฉพาะการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ที่ใช้อุณหภูมิเพียง  $300^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น

### 2.1.8 กระบวนการทางโลหะ (Metallization)

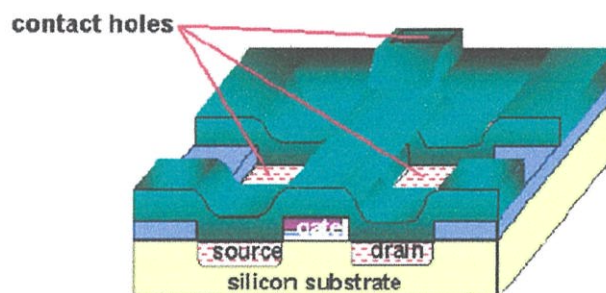
ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์ด้วยกระบวนการต่างๆจนได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์จนครบขาดเพียงการเชื่อมต่ออุปกรณ์เหล่านั้นเข้าหากันซึ่งยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการเพื่อเชื่อมต่อชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์เข้าหากันให้เป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์และพร้อมใช้งานทางไฟฟ้าได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยขั้นตอนการเชื่อมต่อชิ้นส่วนต่างๆด้วยโลหะนี้เรียกว่า กระบวนการทางโลหะ (Metallization) สำหรับการเลือกใช้โลหะที่ใช้เคลือบแผ่นซิลิคอนเพื่อเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกแถบความนำต่อเชื่อมภายในของวงจรรวม (Interconnector) ของวงจรรวมควรมีคุณสมบัติ เช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีค่าความต้านทานต่ำ มีความจุไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนได้ออกไซด์ และสามารถต่อเข้ากับสวิตความนำภายนอกได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) ทอง (Au) และเงิน (Ag) เป็นต้น

กระบวนการทางโลหะเริ่มต้นจากการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่มีความหนาปกคลุมผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง และรอยขีดข่วนที่อาจเกิดขึ้นกับชั้นของสารกึ่งตัวนำด้านล่าง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ปกคลุมผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน

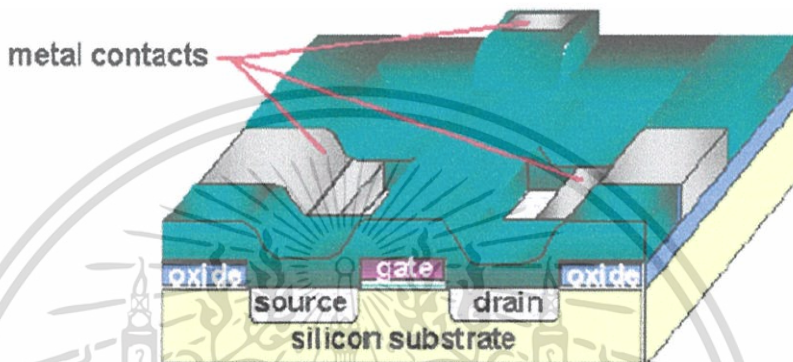
หลังจากนั้นจะเป็นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการกัดเพื่อเปิดช่องสำหรับนำโลหะมาสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกต่อส่วนต่างๆของวงจรรวมแผ่นซิลิคอน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ช่องที่จะใช้สำหรับสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิคโดยใช้โลหะ เช่น อลูมิเนียมมาสร้างเป็นชั้นปกคลุมผิวหน้าของซิลิคอน กระบวนการทางโลหะมีหลายอย่างด้วยกัน เช่น การระเหยด้วยไส้ความร้อน (Filament Evaporation) การสปัตเตอริง (Sputtering) ภายหลังจากการเคลือบโลหะอลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอน และทำการโฟโตลิโธกราฟีแล้ว จะได้ลวดลายของวงจรรวมที่ออกแบบไว้ โดยอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำเชื่อมต่อ และก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มมิคขึ้น แต่รอยสัมผัสนี้อาจไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องทำการซินเตอร์ริง (sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสเป็นโอห์มมิคที่สมบูรณ์และไม่เปลี่ยนแปลงต่อสภาพแวดล้อม



รูปที่ 2.16 Metal Contact ต่อจากส่วนของ ซอร์ส เกต และเดรน

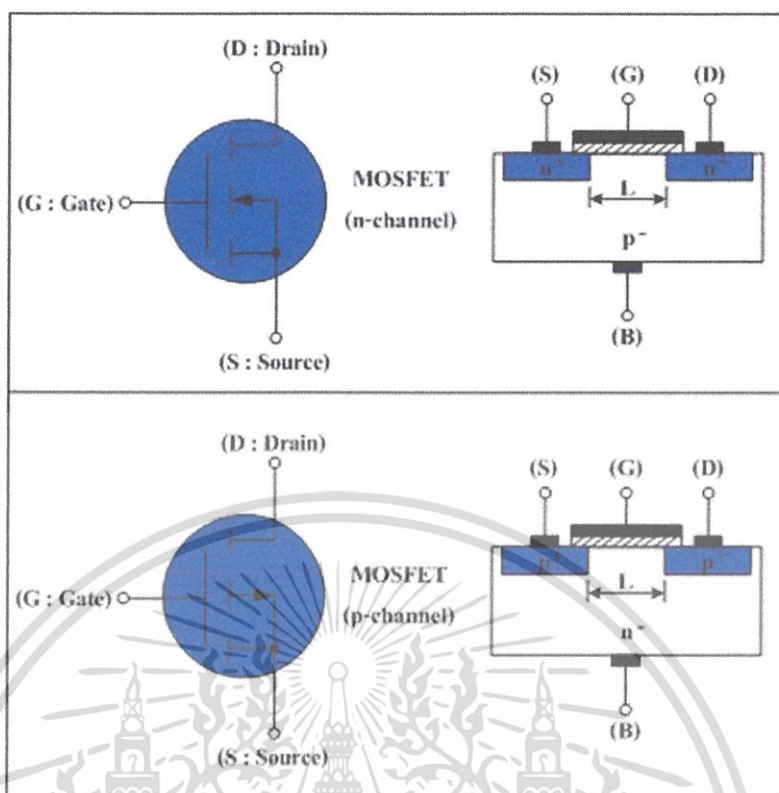
### 2.1.9 กระบวนการเก็บบรรจุ (Packaging)

การเก็บบรรจุเป็นกระบวนการป้องกันความเสียหายของชิ้นงาน อันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกหรือสารเคมีภายนอก และยังช่วยระบายความร้อนที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานได้ด้วย โดยการนำแผ่นซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการสร้างไปตัดเพื่อแยกตัววงจรรวมออกเป็นชิ้นเล็กๆที่เรียกว่า ไดซ์ (dice) หรือชิพ จากนั้นจึงนำเอาชิพไปติดตั้งบนฐานรองและเชื่อมต่อสายออกมายังขาของฐานรอง เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน จึงนำไปเก็บบรรจุและนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

## 2.2 มอสทรานซิสเตอร์ (MOSFET)

มอสทรานซิสเตอร์ (MOSFET : Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภทหนึ่ง และเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน ในการนำไปใช้ในการออกแบบเป็นวงจรรวม ซึ่งอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์นั้นจะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็น (n-channel) และชนิดพี (p-channel) โดยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์นี้สร้างขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำซึ่งจะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพีโดยมอสทรานซิสเตอร์นั้นแบ่งตามโครงสร้างได้ดังแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 โครงสร้างพื้นฐานและสัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นและชนิดพี

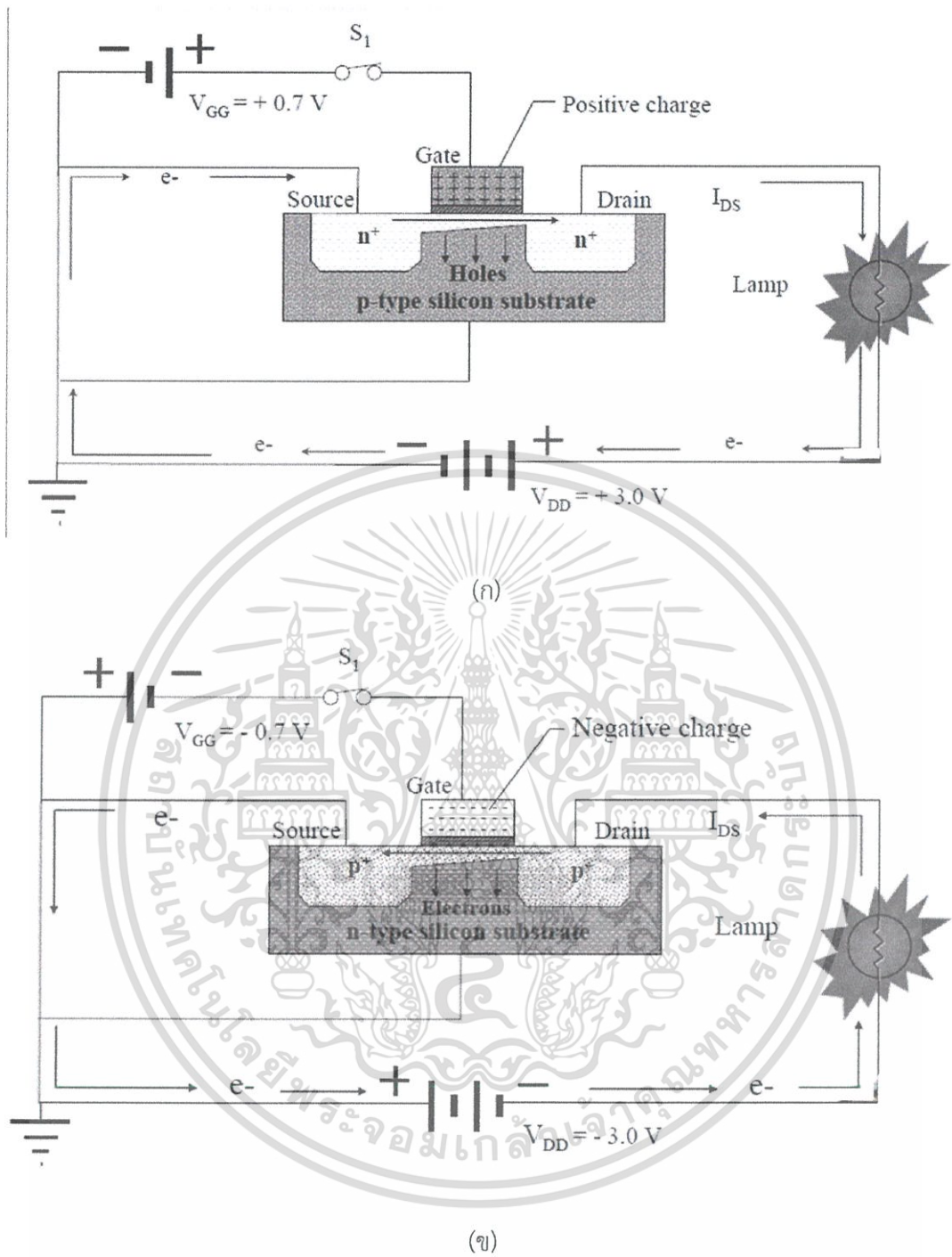
จากรูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์ โดยทั้งสองชนิดนั้นมีขาที่เชื่อมต่อออกมาเพื่อใช้งานหลักอยู่ทั้งหมด 3 ขา ด้วยกัน ประกอบด้วย ขาเกต (G : Gate), ขาเดรน (D : Drain) และขาซอร์ส (S : Source) ส่วนขาที่เห็นในโครงสร้างนั้นคือ ขาฐานรอง (B : Bulk) โดยถูกต่อเข้ากับขาซอร์ส (S : Source) ดังนั้นในการนำมาใช้งานเราจะเห็นขาของอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์เพียง 3 ขาเท่านั้น [4]

### 2.2.1 การไบอัส (Bias)

1. มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกต มีค่าน้อยจะส่งผลให้ขาเดรนและขาซอร์ส ไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตมีค่ามาก จะส่งผลให้ขาเดรนและขาซอร์ส มีกระแสไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก)

2. มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตมีค่ามาก จะส่งผลให้ขาเดรนและขาซอร์ส ไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตมีค่าน้อยจะส่งผลให้ขาเดรนและขาซอร์ส มีกระแสไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



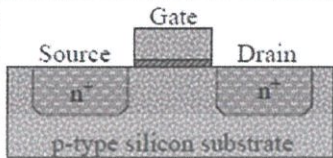
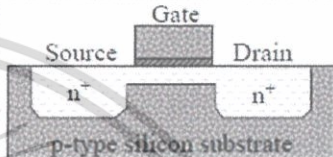
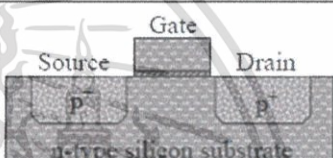
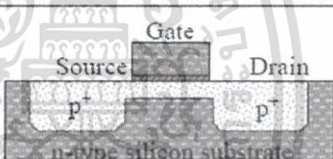
รูปที่ 2.18 (ก) ลักษณะการไบอัสมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น

(ข) ลักษณะการไบอัสมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

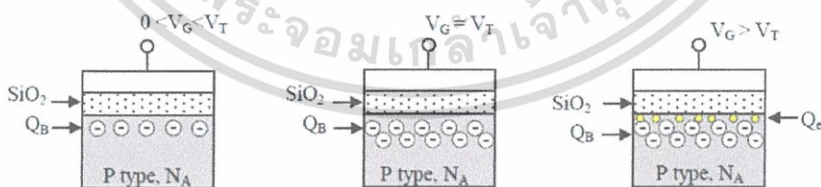
### 2.2.2 ประเภทของมอสทรานซิสเตอร์

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

MOSFET Type	Mode	Standby Condition	V <sub>CC</sub> Switching Requirements	Physical Structure
nMOS	Enhancement	Off	+	
nMOS	Depletion	On	-	
pMOS	Enhancement	Off	-	
pMOS	Depletion	On	+	

รูปที่ 2.19 การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ประเภทต่างๆ

### 2.2.3 แรงดันขีดเริ่ม (V<sub>TH</sub>) [5]



รูปที่ 2.20 สถานะภาพต่างๆในโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 2.20 หากแรงดันที่เกตมีค่าต่าง ๆ อิเล็กตรอนอิสระยังไม่สามารถที่จะทำให้อะตอมสารเจืออออนไนซ์ได้หมด เมื่อแรงดันเกตสูงขึ้นถึงค่าเฉพาะค่าหนึ่งก็จะทำให้การอออนไนซ์หมดพอดี และหากแรงดันเกตมากกว่าค่าเฉพาะนั้นก็จะมีอิเล็กตรอนอิสระเหลือ อิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หากมีความต่างศักย์ระหว่างซอกกับเดรน พาหะนี้ก็จะเป็ กระแส และแรงดันเกต ค่าเฉพาะนั้นก็เรียกว่า แรงดันขีดเริ่ม ; Threshold Voltage, V<sub>TH</sub>

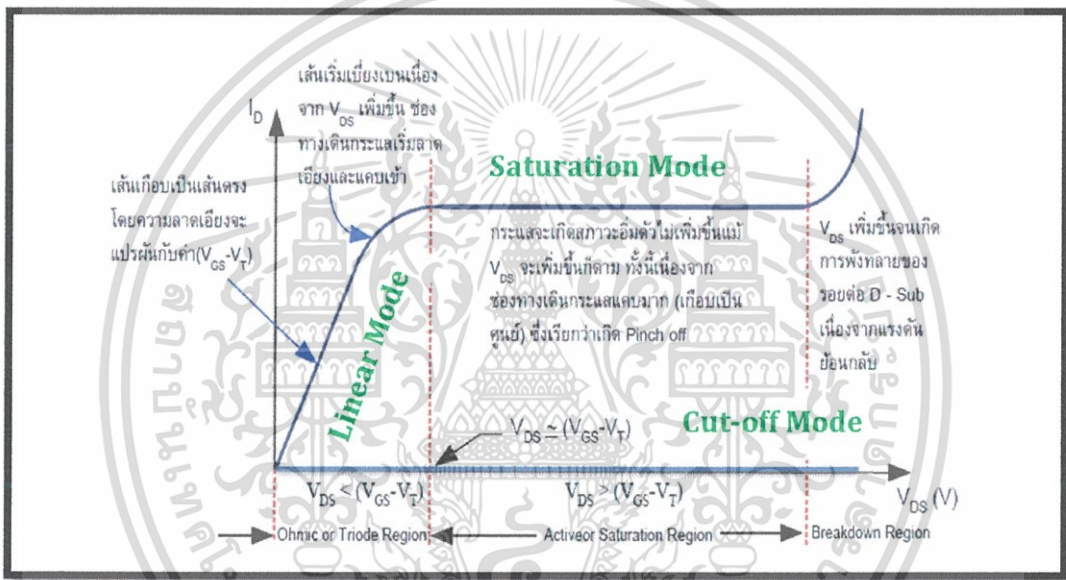
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์

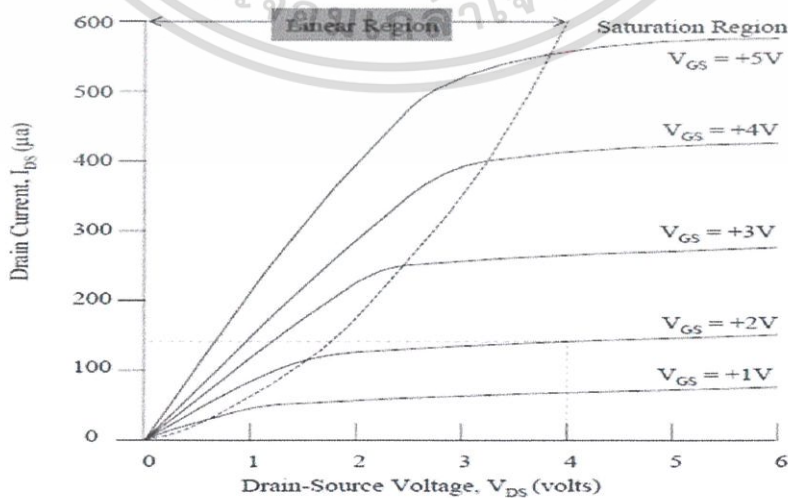
ลักษณะการทำงานของมอสเฟต (MOSFET) โดยสามารถที่แบ่งออกได้เป็น 3 สภาวะการทำงาน คือ

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

ซึ่งจากลักษณะการทำงานของอุปกรณ์มอสเฟต (MOSFET) ทั้ง 3 สภาวะการทำงานนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.21 คุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.22 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 สมการกระแสของมอสทรานซิสเตอร์

สมการกระแส  $I_D$  ของมอสทรานซิสเตอร์ ในแต่ละช่วงการทำงานสรุปได้ดังนี้

$$\text{Cut-off} \quad |V_{GS}| - |V_T| \leq 0, \quad I_D = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{Linear} \quad 0 < |V_{DS}| < |V_{GS}| - |V_T|, \quad I_D = \beta \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (2.6)$$

$$\text{Saturation} \quad 0 < |V_{GS}| - |V_T| < |V_{DS}|, \quad I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.7)$$

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

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

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

## 2.3 ฟินเฟต (finFET)

### 2.3.1 ที่มาของฟินเฟต [6]

ปัจจุบันอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว มีการแข่งขันสูงในภาคอุตสาหกรรม การผลิตและมีอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ชนิดใหม่ที่จะมาแทนที่ทรานซิสเตอร์แบบปัจจุบันที่ใช้อยู่ โดยเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับซีโพลิกที่มีประสิทธิภาพสูง โครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบใหม่ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในวงการอุตสาหกรรมไมโครชิปในชื่อว่า Fin Field Effect Transistor (FinFET) เป็นการใช้ประโยชน์จากแผ่น "Fin" แนวตั้งที่ทำจากซิลิคอน เพื่อสร้างประตูสัญญาณ 2 ประตู แทนที่จะมีเพียง 1 ประตู วิธีการดังกล่าวจะช่วยให้มีกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และช่วยปรับปรุงลักษณะการปิด-เปิดสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะทำให้ชิปมีความเร็วมากขึ้น และใช้พลังงานน้อยลง ช่วยเพิ่มสมรรถนะการทำงานและลดขนาดของชิปให้มีรูปทรงที่เล็กที่สุด นอกจากนี้เทคโนโลยีเกตที่ทำจากนิกเกิล ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของทรานซิสเตอร์ได้อย่างมาก โดยอาศัยการปรับปรุงการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวทรานซิสเตอร์

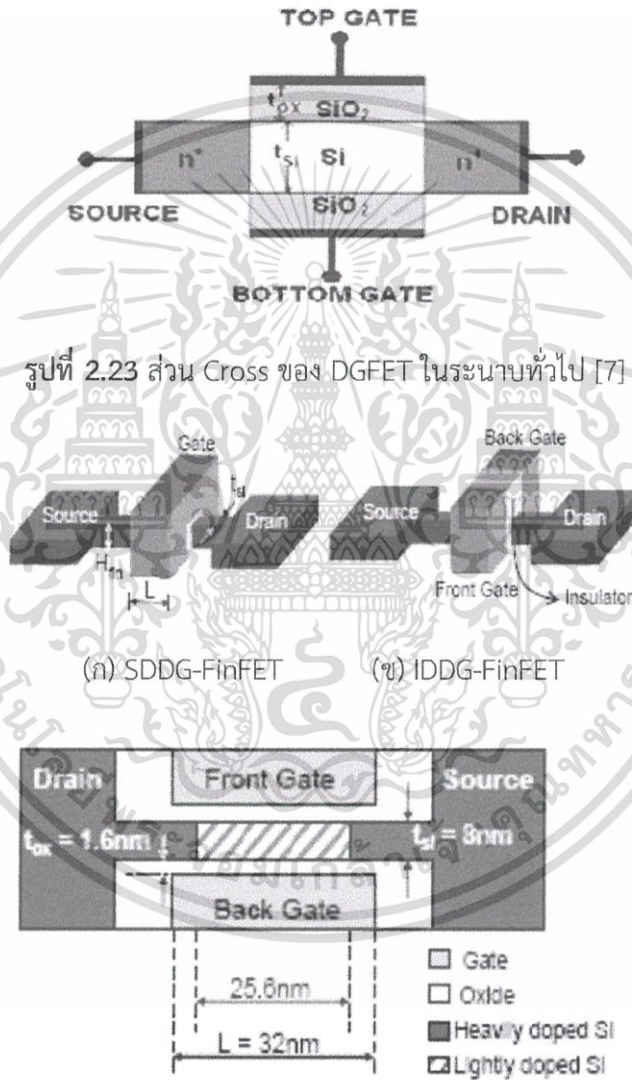
เกตแบบโลหะนี้จะทดแทนวิธีการแบบเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน นั่นคือ การเจือสารลงในช่องที่อยู่ใต้เกตของทรานซิสเตอร์เพื่อปรับปรุงลักษณะการปิด-เปิดสวิตช์ การยกเลิกวิธีการเจือสารดังกล่าวจะช่วยให้กระแสไฟมีการไหลเวียนที่ดีขึ้น และในทางกลับกัน ก็จะช่วยเพิ่มสมรรถนะการทำงานให้กับทรานซิสเตอร์ ยิ่งกว่านั้นการใช้เกตแบบนิกเกิลนี้คาดว่าจะมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีเกตแบบโลหะอื่นๆ ที่ได้มีการศึกษาวิจัยกันอยู่ในวงการอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ประโยชน์และการนำไปใช้งาน

เมื่อเทียบการทำงานระหว่างทรานซิสเตอร์ในปัจจุบันกับฟินเฟต จะพบว่าฟินเฟตมีขนาดเล็ก ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมีความเร็วมากขึ้นและใช้พลังงานน้อยและดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบทั่วไป ปัจจุบันมีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กในระดับที่ต่ำกว่า 15 nm และนิยมนำมาเป็นส่วนประกอบใน CPU

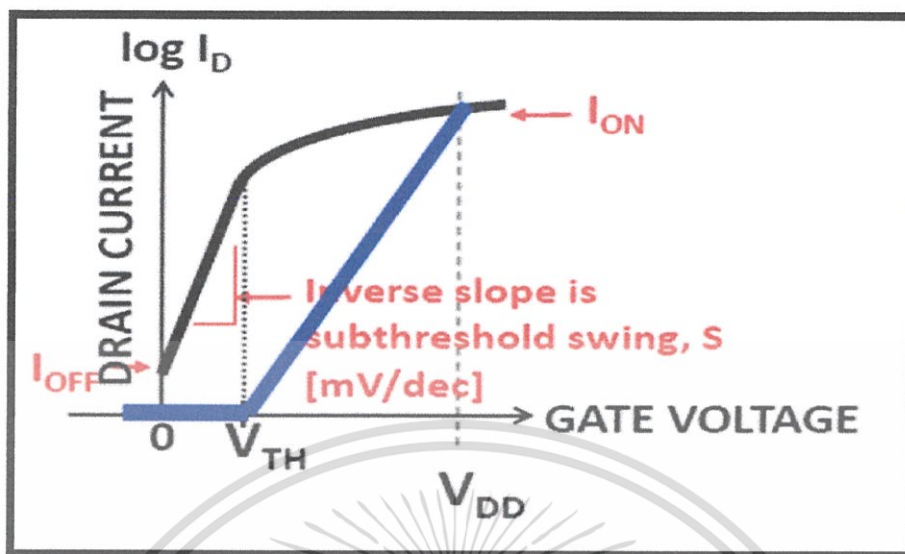
### 2.3.3 โครงสร้างของฟินเฟต



รูปที่ 2.24 โครงสร้าง FinFET. [8]

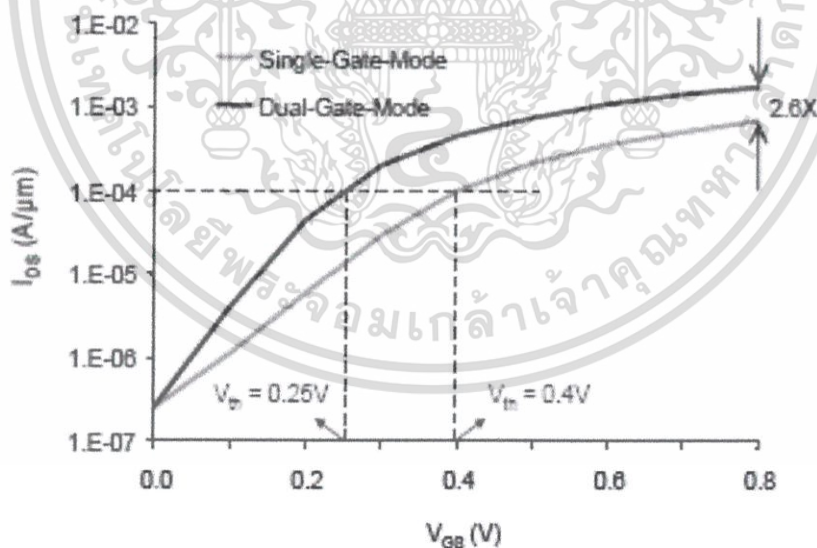
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 กราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิสิกส์



รูปที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

จากรูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตโดยแกน y เป็นกระแสเดรนที่พล็อตแบบล็อกกาลีทึม สามารถหาค่า subthreshold swing,  $S$  หน่วยเป็น  $mV/dec$  ได้โดยใช้ค่า  $V_{th}$  มาช่วย



รูปที่ 2.26 การหากระแสเดรน

จากรูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต โดยแกน y เป็นกระแสเดรนที่พล็อตแบบล็อกกาลีทึม สามารถหาค่ากระแสเดรนได้โดยใช้  $V_{th}$  ลากตัดแกน x แล้วใช้จุดตัดของ  $V_{th}$  บนเส้นกราฟลากไปตัดแกน y จุดตัดบนแกน y คือค่ากระแสเดรนที่ต้องการหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5 สมการกระแสของฟิสิกส์ทรานซิสเตอร์ [9]

ฟิสิกส์ทรานซิสเตอร์เฟสขณะทำงาน ( $V_{GS} > V_{TH}$ )

$$I_D = W \times v \times Q_{inv} \quad (2.8)$$

โดยที่  $W$  : width

$v$  : velocity ;  $v \propto \mu_{eff}$

$Q_{inv}$  : inversion-layer charge density ;  $Q_{inv} \propto C_{ox}(V_{GS} - V_{TH})^n$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 แนะนำโปรแกรม TCAD

#### 3.1.1 GTS Framework

GTS Framework เป็นโปรแกรมที่ครอบคลุมการทำงานสำหรับเทคโนโลยีโปรแกรมประยุกต์ CAD (TCAD) เช่น การจำลองอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ออกแบบโดยประกอบด้วยโปรแกรมย่อยต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกการใช้งาน 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 - โฟลเดอร์ )
- มีการแสดงผลแบบ 1D/2D/3D
- มีการดำเนินการจำลองระยะไกล/เครือข่ายคอมพิวเตอร์
- มีการจัดเก็บข้อมูลโครงการระยะไกล/แบ่งปันข้อมูลในเวิร์กกรุ๊ป
- การพิมพ์ผลงานอินเทอร์เน็ต/ การชมเต็มรูปแบบ 3 มิติ

#### 3.1.3 โปรแกรมย่อย

ภายใน GTS Framework สามารถใช้โปรแกรมย่อยต่างๆได้ ขึ้นอยู่กับใบอนุญาตที่ได้รับ ซึ่งในโปรแกรมย่อยที่ได้จาก GTS ที่สามารถใช้งานได้ในปัจจุบันมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3.1 Structure

GTS Structure เป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่ายใช้สำหรับการกำหนดและแก้ไขโครงสร้างอุปกรณ์ มีการอำนวยความสะดวกสำหรับผู้ใช้งานด้วย art graphical และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้งาน

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

นอกจากนี้ GTS Structure ยังใช้งานง่าย สอดคล้องสำหรับการสร้างโครงสร้างสุทธิตามที่ไม่มีโครงสร้างใน 2D และ3D 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 ช่วยในการจำลองชนิดโครงสร้างของอุปกรณ์ชั้นสูง เช่น อุปกรณ์ CMOS อุปกรณ์ซิลิคอนบนฉนวน (SOI) และอุปกรณ์อื่น โครงสร้าง คำนี้ถึงธรรมชาติของกับดักและสารเจือ minimos NT มีความน่าเชื่อถือและการเปลี่ยนแปลงการปรับแรงดันสูง เช่น เป็นอุปกรณ์ขนาดใหญ่และซิลิคอนระนาบบน finfets ฉนวนมีช่องความยาว 22nm หรือน้อยกว่า

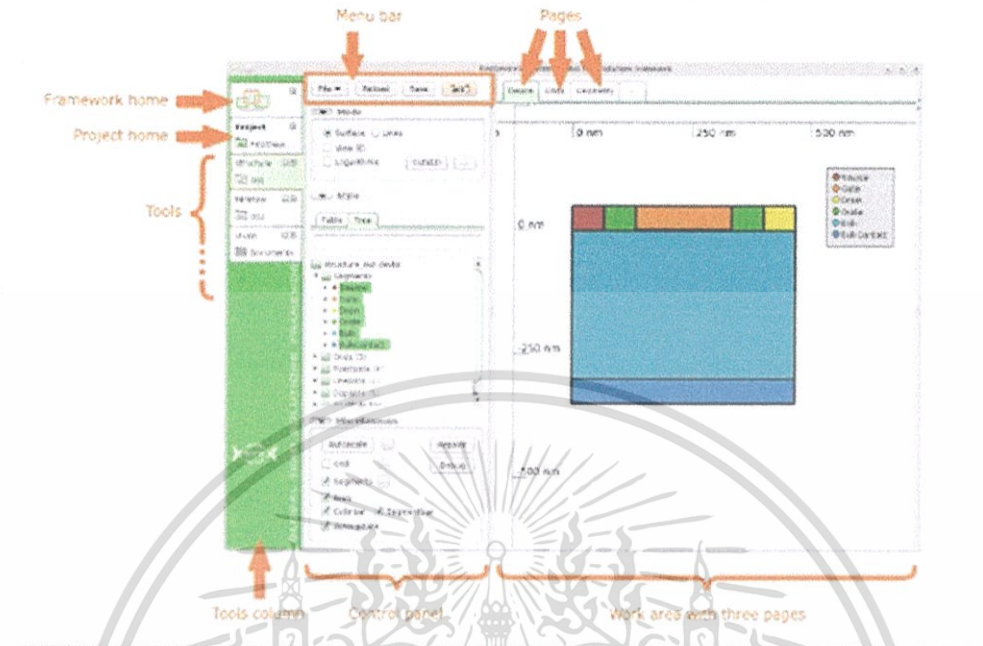
### 3.1.3.3 Vision

GTS Vision เป็นเครื่องมือสำหรับการสร้างอุปกรณ์หลายมิติและพล็อตกราฟแบบลือก เครื่องมือนี้สามารถใช้สำหรับการแสดงผลและการดูผลการจำลองของอุปกรณ์ GTS Vision แสดงได้ในหลายวิธี ช่วยในการแสดงภาพโครงสร้างอุปกรณ์ 1D/2D/3D การแสดงภาพเรขาคณิตและ doping profile การจำลองข้อมูล เวกเตอร์ชนิดสเกลาร์แสดงบนพื้นผิว SOI นอกจากนี้โมดูลการพล็อตเส้นโค้งจะแสดงพื้นพารามิเตอร์และปริมาณที่กำหนดโดยใช้ลักษณะเส้นสัญลักษณ์และสีต่างๆ

GTS Vision ช่วยให้การสร้างข้อมูลมีความชัดเจน โดยส่วนใหญ่ใช้งานง่ายช่วยให้วิศวกรทำนายผลการทดลองได้อย่างรวดเร็วและสร้างชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพในเวลาเพียงไม่นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม

### 3.2.1 The Tools Column

แถบเครื่องมือที่เป็นแนวตั้งแถบสีเขียว ที่ขอบซ้ายของหน้าต่างแสดงให้เห็นตัวแปรและจำนวนรายการในแถบอินเตอร์เฟซ เช่น

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

เครื่องมือที่ใช้งานในโหมดนี้จะแสดงแถบเครื่องมือและ ToolFolder ที่เกี่ยวข้อง ในขณะที่เครื่องมือที่อยู่ในสถานะ Stand-alone จะมีการแสดงไอคอนเป็นสีเทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีพื้นหลังสีเขียวแสดงให้เห็นว่าเป็นรายการที่ใช้งานในปัจจุบัน สามารถสลับการใช้งานระหว่างรายการได้โดยการใช้เมาส์เลื่อนขึ้นหรือลง เมื่อเครื่องมือ Bar ทำการโฟกัส (ถ้าไม่ได้กดปุ่ม Tab เพื่อย้ายโฟกัส)

รายการทั้งหมดในคอลัมน์เครื่องมือ จะมีปุ่มปิด การปิดเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง หรือการปิด Framework Home ออกจาก framework เมื่อใช้การปิดต้องมีการบันทึก files เพื่อที่จะเปิดเครื่องมือได้ในครั้งต่อไป

ปุ่มปิดเป็นทางเลือกเพื่อปิดตัวเลือกในเมนู 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
- 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 ได้ในกรณีที่ติดตั้งโปรแกรมครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

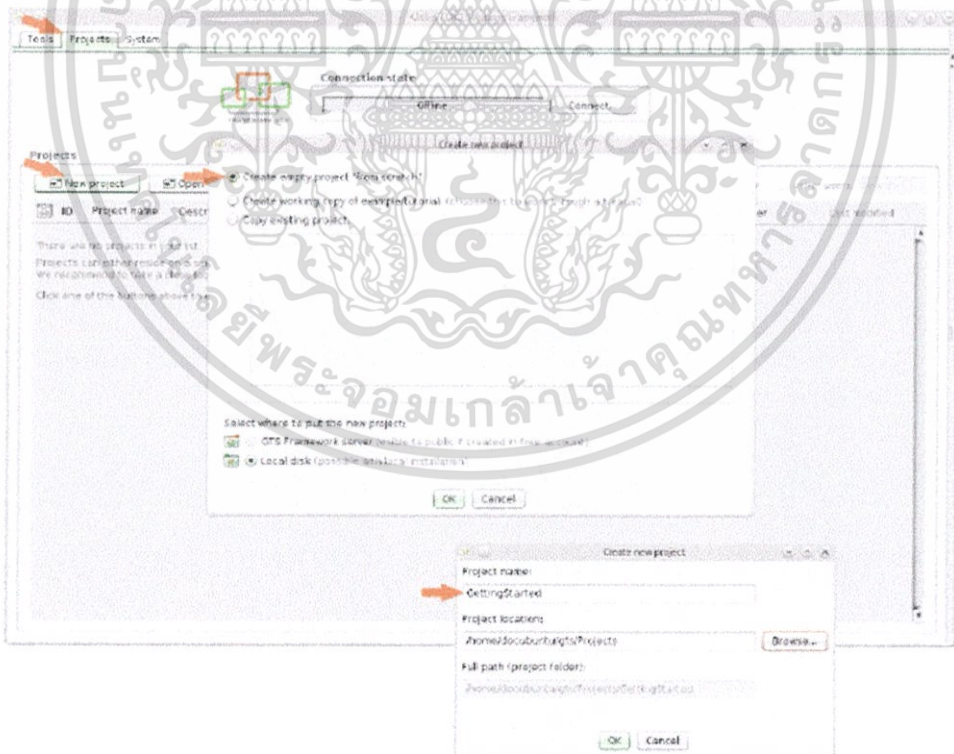
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองสร้างมอสรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นโดยใช้แม่แบบ (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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 วิธีการสร้างโครงสร้างใหม่ (New Structure)

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

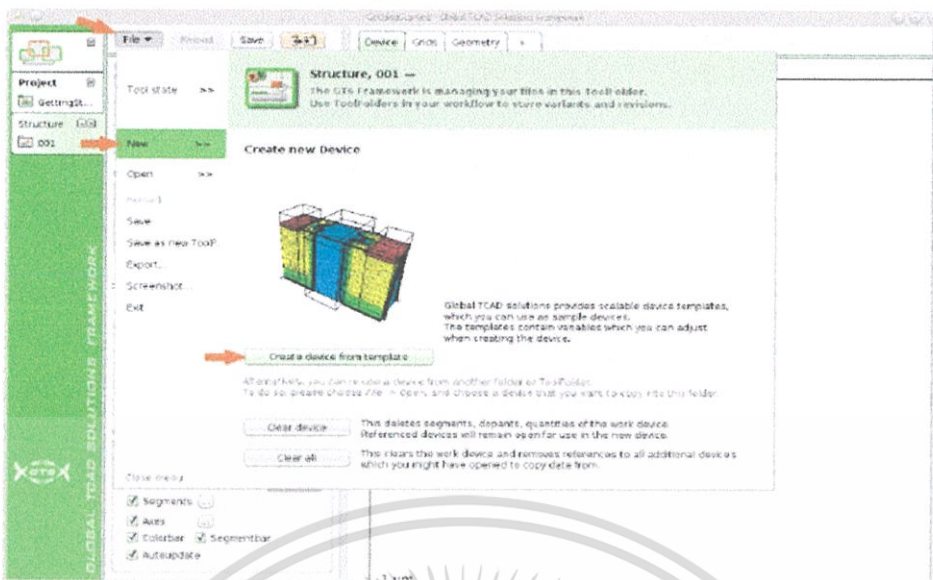


รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการสร้าง New Structure

#### 4.1.3 วิธีการสร้างอุปกรณ์ใหม่ (New Device)

ในหน้าของโปรแกรมย่อย Structure เพื่อสร้างอุปกรณ์ขึ้นมาใหม่โดยใช้ Template จากโปรแกรม ให้เลือกตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

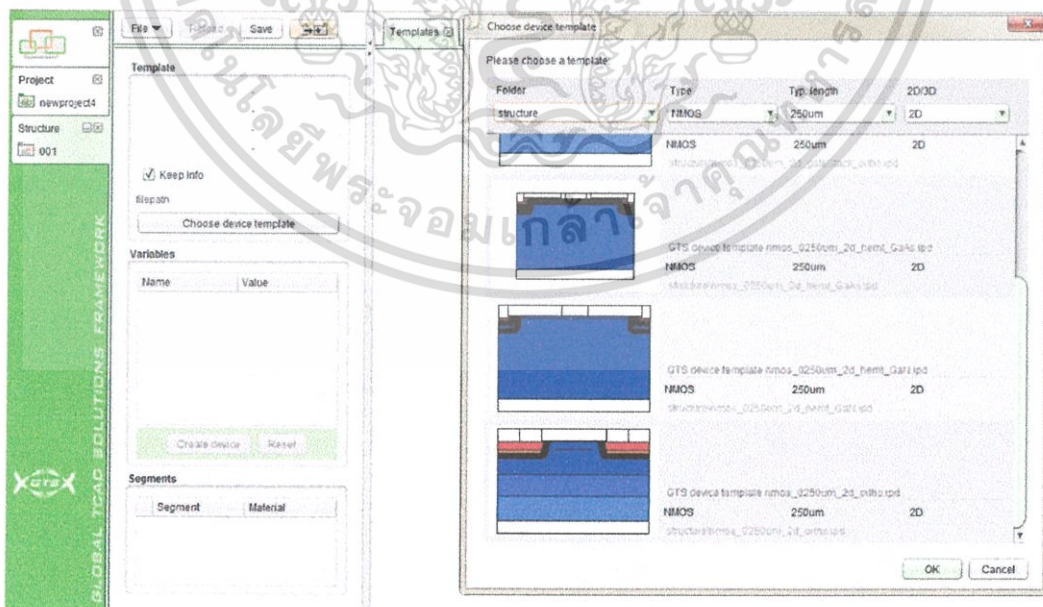


รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการสร้าง New Device

### 4.1.4 การใช้อุปกรณ์แม่แบบ (Device Template)

หลังจากทำตามขั้นตอนที่ 4.1.3 แล้วจะปรากฏแท็บที่มีชื่อว่า Template ขึ้นมา ซึ่งประกอบด้วยแม่แบบที่มีรูปแบบต่างๆ สามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการ การเลือกใช้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

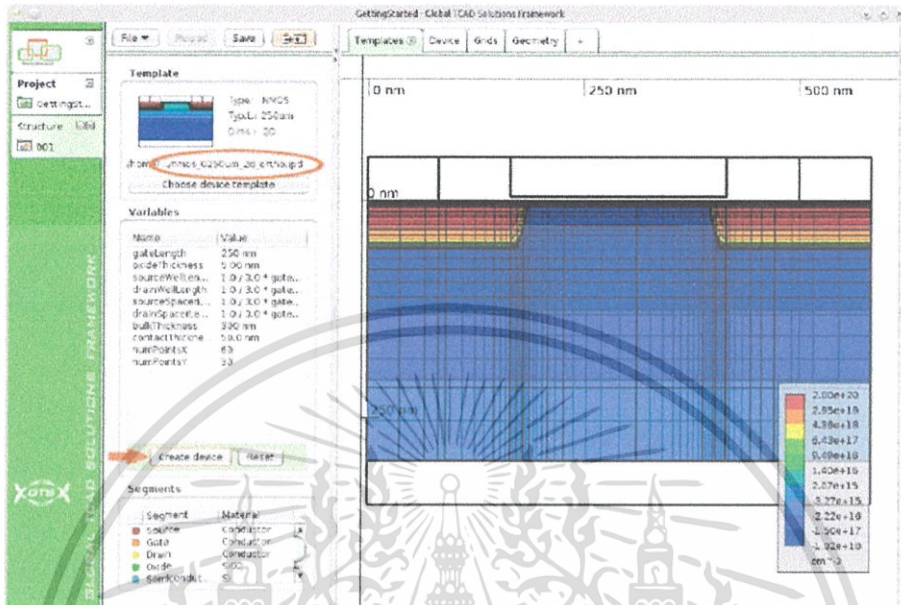
- คลิกเลือก Template ที่ต้องการซึ่งในการทดลองนี้ใช้ “nmos\_0250um\_2d\_ortho.ipd”



รูปที่ 4.4 การเลือกใช้ Template

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4.5 การสร้างอุปกรณ์จากแม่แบบ

#### 4.1.5 วิธีการการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของแม่แบบ

พารามิเตอร์ต่างๆจะปรากฏในกรอบสี่เหลี่ยมด้านซ้ายมือที่มีชื่อว่า Variables ดังนี้

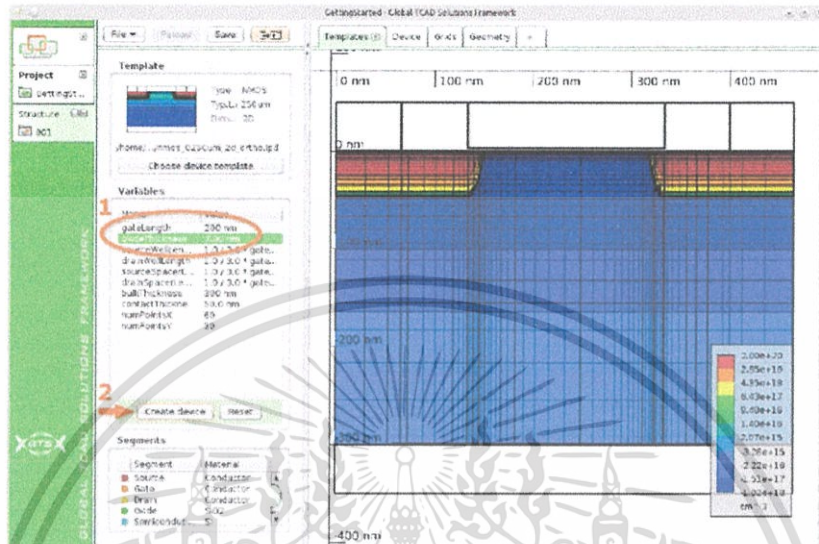
- gateLength
- oxideThickness
- sourceWellLength
- drainWellLength
- sourcespacerLength
- drainSpacerLength
- Bulkthickness
- contactThickness
- numPointsX
- numPointsY

สามารถเปลี่ยนค่าต่างๆได้โดยการคลิกที่ Value ของพารามิเตอร์นั้นๆ หลังจากเปลี่ยนพารามิเตอร์เสร็จแล้ว เลือก “Create device” อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


## หมายเหตุ

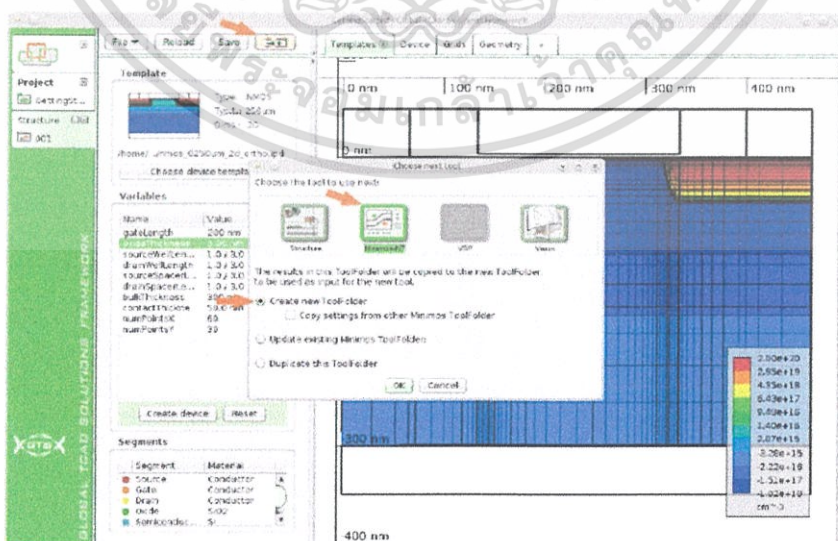
1. สามารถกดปุ่ม “Reset” เพื่อย้อนกลับไปที่ยารามิเตอร์เริ่มต้นได้
2. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าแก้ไขพารามิเตอร์เสร็จแล้วด้วยการคลิกที่ช่องอื่น



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

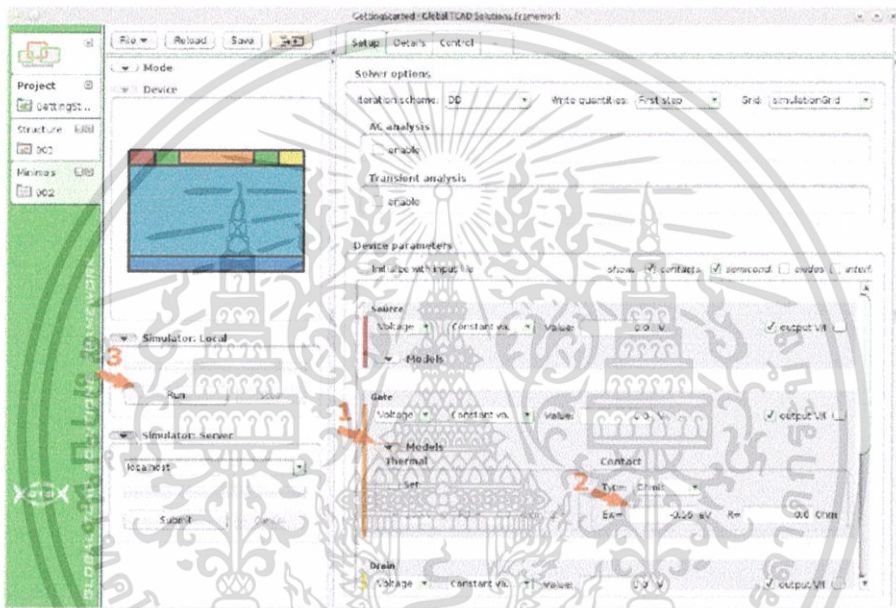
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 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. ในพื้นที่ฟังก์ชันชื่อ contact ตั้งค่า  $E_w = -0.56$  eV
3. กด “Run”



รูปที่ 4.8 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ gate

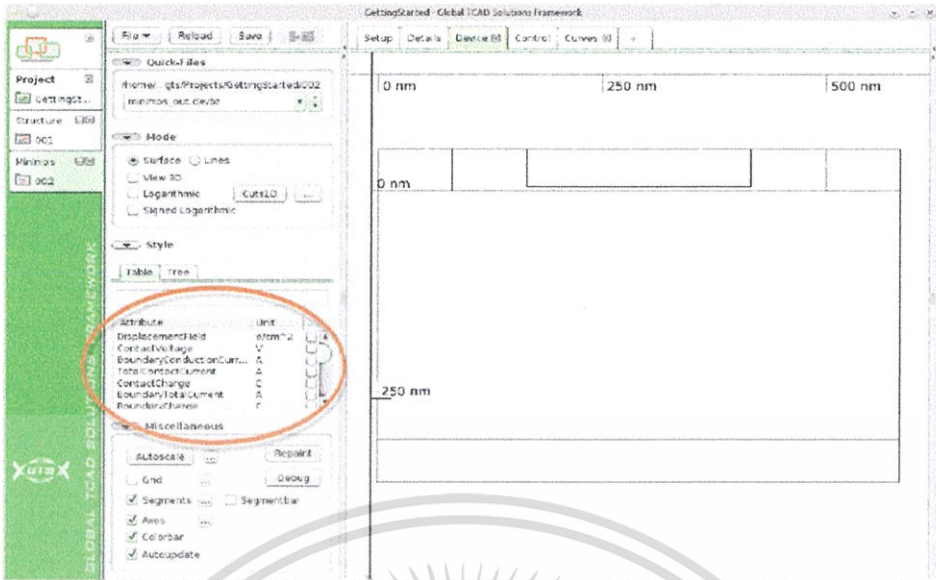
หมายเหตุ :

เมื่อกด “Run” อาจมีการถามเพื่อให้เลือกว่าจะบันทึกการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ หากต้องบันทึกให้กด “Yes” หลังจากนั้นจึงเริ่มการจำลองแบบ

##### 4.1.7.2 การวัดค่า Electron Concentration

เมื่อกดไปที่หน้าใช้งานที่ชื่อ “Device” จะปรากฏชื่อตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องดังรูปที่ 4.9 ซึ่งสามารถเลือกเพื่อวัดค่าของตัวแปรนั้นๆได้ตามต้องการ

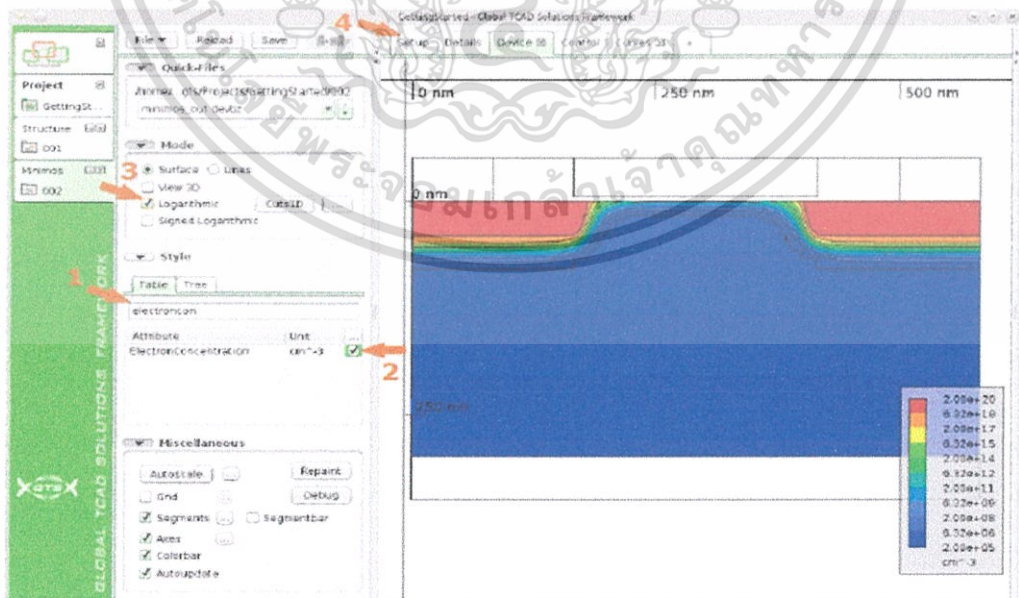
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 หน้าจอแสดงพื้นที่ใช้งานของเท็บ “Device”

ในการวัดค่า Electron Concentration สามารถทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. พิมพ์คำว่า “ElectronConcentration” ในช่องว่างดังรูปที่ 4.10 เพื่อความรวดเร็วในการหาตัวแปรที่ต้องการ
2. คลิกเครื่องหมาย  $\checkmark$  ที่ช่องสี่เหลี่ยมหลังคำว่า “ElectronConcentration”
3. เลือกการแสดงผลมุมมองแบบ logarithmic
4. หลังจากนั้นให้เปิดไปที่หน้า Setup เพื่อทำการตั้งค่าการไบอัส Gate

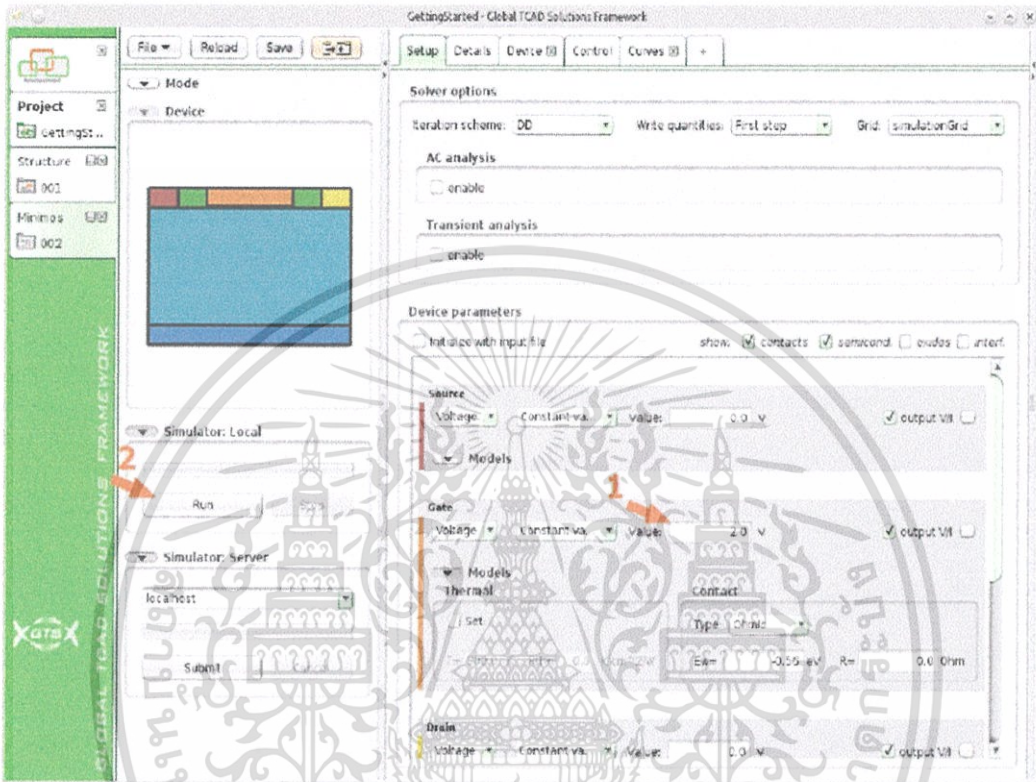


รูปที่ 4.10 การเลือกตัวแปรที่ต้องการวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองโดยตั้งค่าดังนี้

1. ป้อนค่า Gate voltage เป็น 2.0 V
2. กด “Run”

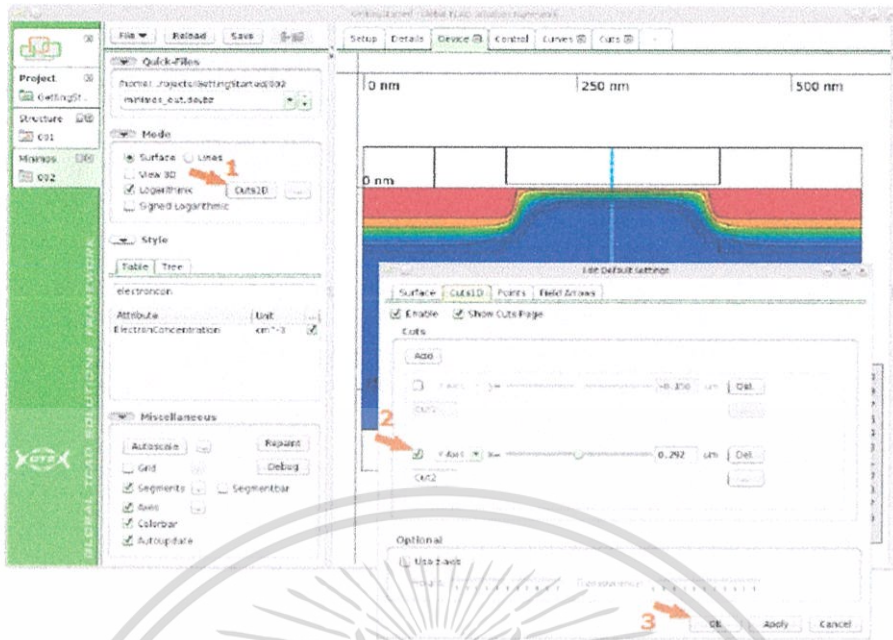


รูปที่ 4.11 การกำหนดค่าแรงดันเกต

หลังจากที่ทำการจำลองในขั้นตอนที่ 4.1.7.3 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้เปิดไปที่หน้า “Device” แล้วทำตามขั้นตอนดังนี้

1. คลิกที่ “Cuts1D” ที่แถบควบคุมด้านซ้ายดังรูป ที่ 4.12
2. คลิกเลือก Y-Axis สามารถกำหนดค่าให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่ต้องการวัดได้ด้วยการคลิกเลื่อนหรือพิมพ์เป็นตัวเลข
3. คลิก “OK” เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

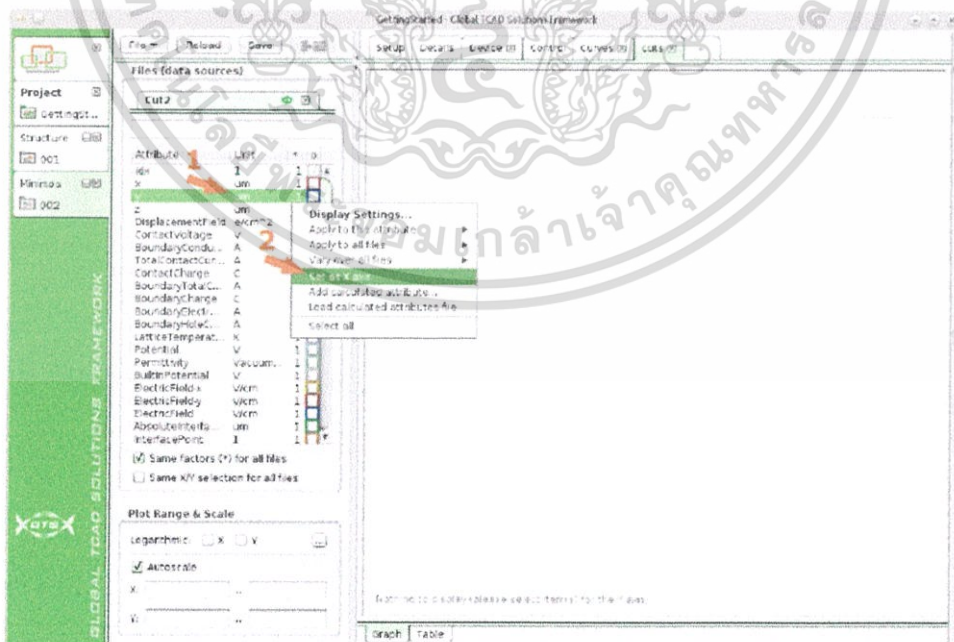


รูปที่ 4.12 การกำหนดพื้นที่ที่ต้องการวัดค่าอุปกรณ์

หลังจากนั้นให้เปลี่ยนไปที่หน้าที่ชื่อ “Cuts” เพื่อระบุปริมาณที่ต้องการวัดและกำหนดความสัมพันธ์ของกราฟที่ต้องการให้แสดง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. คลิกขวาที่ “y” ดังรูปที่ 4.13

2. เลือก “Set as X axis” ในเมนูที่ปรากฏเพื่อกำหนดให้เป็นค่าในแกน X

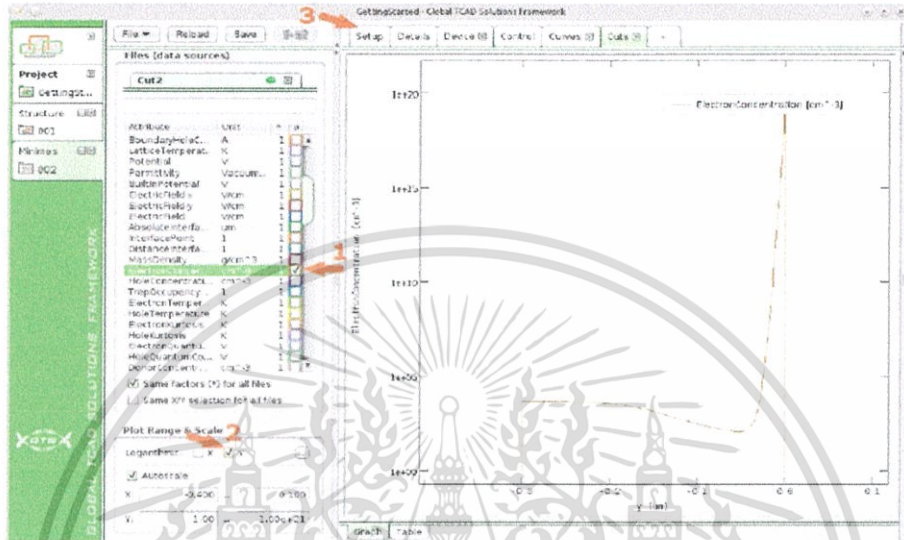


รูปที่ 4.13 การตั้งค่าสำหรับแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกปริมาณสำหรับแกน Y มีขั้นตอนดังนี้

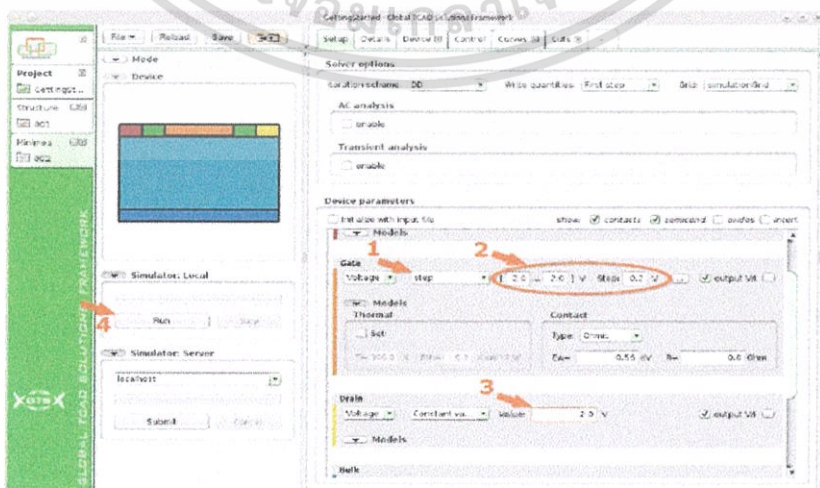
1. ค้นหา “ElectronConcentration” ในรายการที่ปรากฏด้านซ้าย และเลือกโดยการคลิกที่บล็อกให้เป็นเครื่องหมาย ✓
2. เลือกให้เป็นสเกลแบบ logarithmic สำหรับแกน Y ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ElectronConcentration กับความลึก

#### 4.1.7.3 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

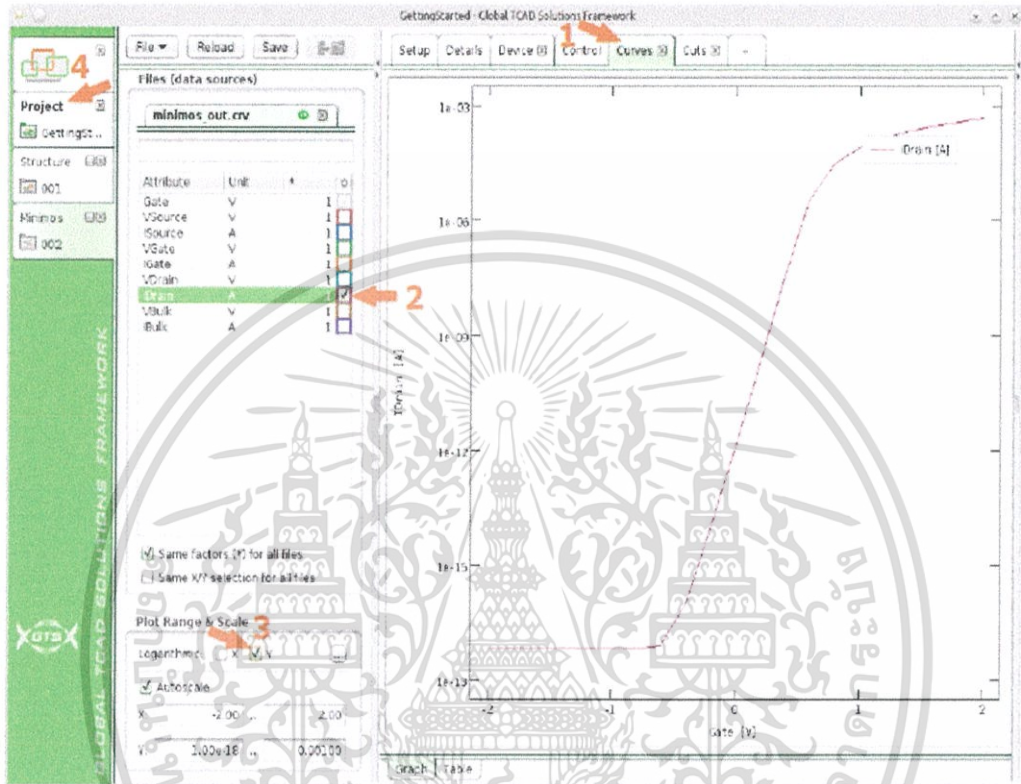


รูปที่ 4.15 การกำหนดค่าแรงดันที่เกตและเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจะปรากฏแถบเครื่องมือที่ชื่อ “Curves” ขึ้นมาให้ทำตามขั้นตอนดังนี้

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



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเตรนและแรงดันเกท

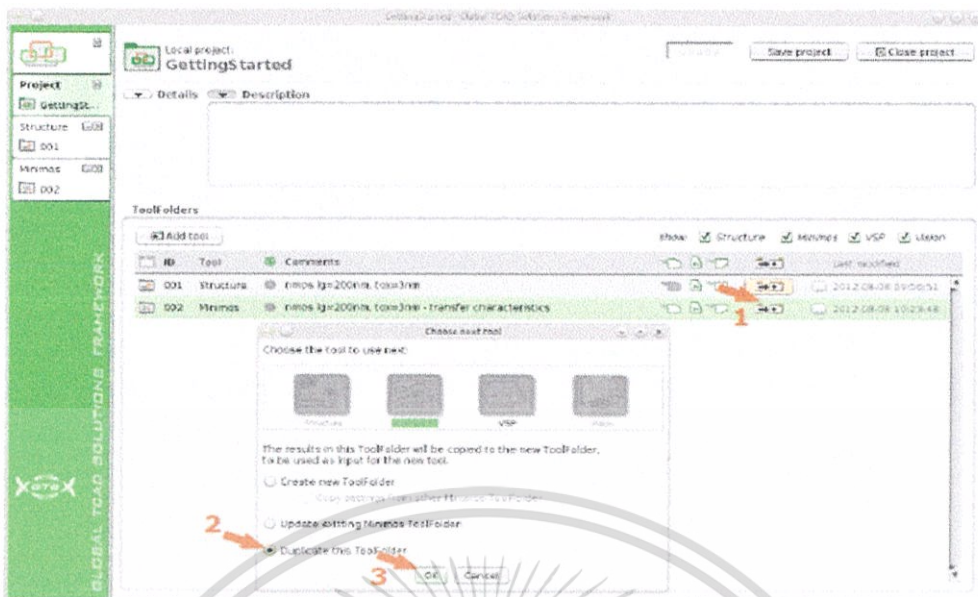
#### 4.1.7.4 กราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น

การเขียนกราฟคุณลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่เตรน มีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดไปที่หน้า “Project home” กดที่สัญลักษณ์ “Next tool” ของ Minimos-NT ToolFolder ก่อนหน้า
2. คลิกที่ “Duplicate this ToolFolder”
3. กด “OK” เพื่อยืนยัน

การกระทำข้างต้น เป็นการตัดลอกการจำลองก่อนหน้าให้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อทำการทดลองต่อไป

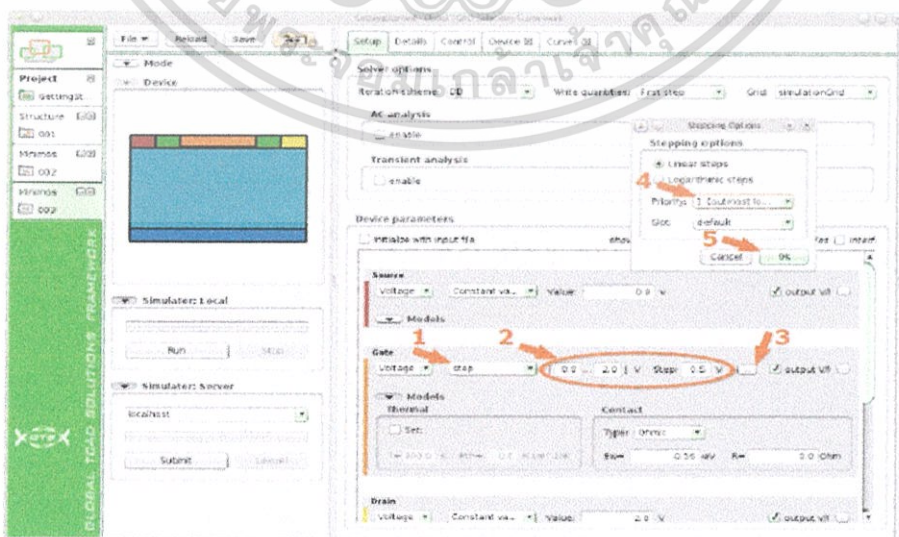
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การคัดลอกการจำลองก่อนหน้า

จากรูปที่ 4.17 เมื่อทำการคัดลอกการจำลองก่อนหน้าเสร็จแล้วให้ตั้งชื่อไฟล์ใหม่ก่อนการแก้ไขพารามิเตอร์เสมอเพื่อไม่ให้เกิดการสับสนชื่อไฟล์ หลังจากนั้นให้ไปที่หน้า Setup และกำหนดค่าต่างๆดังนี้

1. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าการจ่ายแรงดันที่เกทเป็นแบบ “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
5. กด “OK”

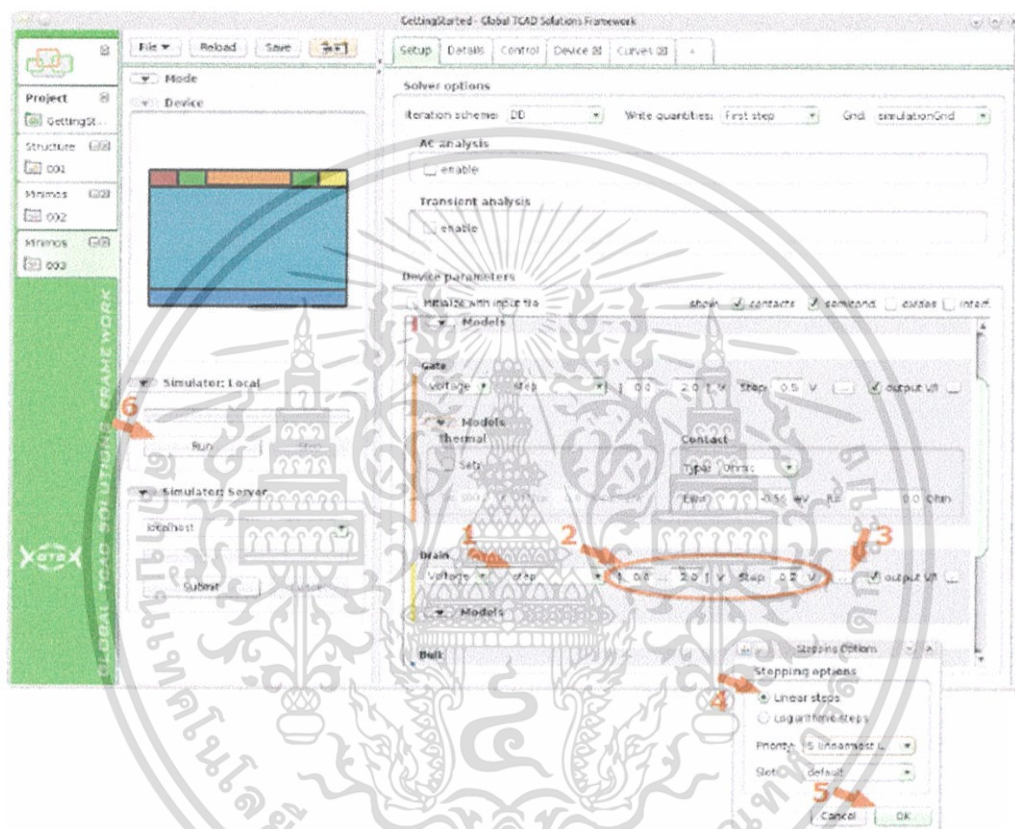


รูปที่ 4.18 การกำหนดค่าแรงดันเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 “...” เพื่อเปิดหน้าเมนู “Stepping Options”
4. เลือกที่ priority เป็น 5
5. กด Run

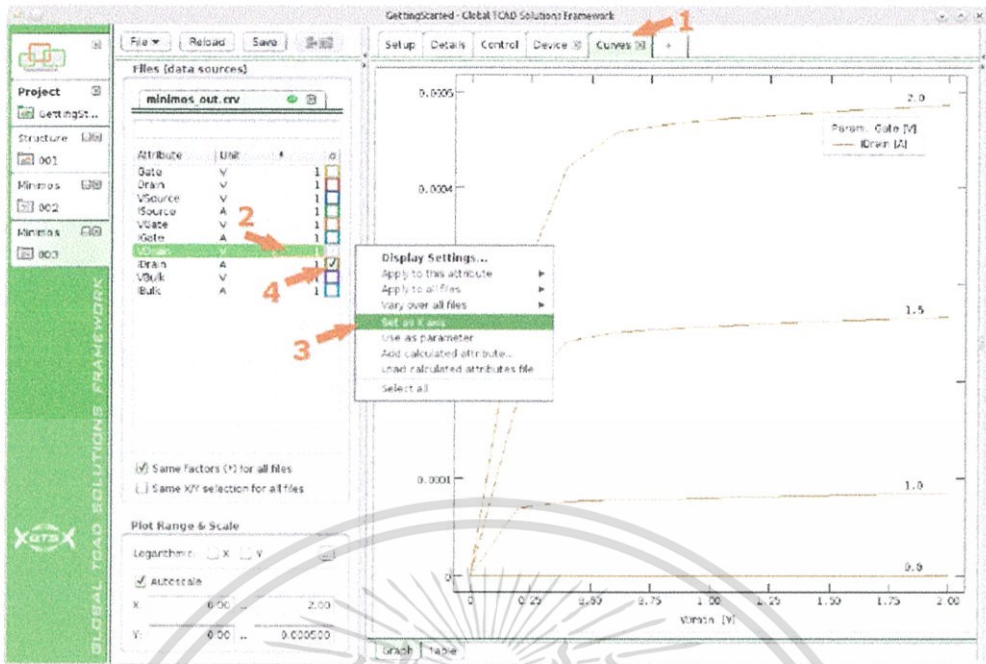


รูปที่ 4.19 การกำหนดค่าแรงดันเดรน

หลังจากนั้นจะปรากฏหน้า “Curves” ขึ้นที่แถบเครื่องมือด้านบน ให้ทำการกำหนดความสัมพันธ์ของปริมาณที่ต้องการพล็อตกราฟดังนี้

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

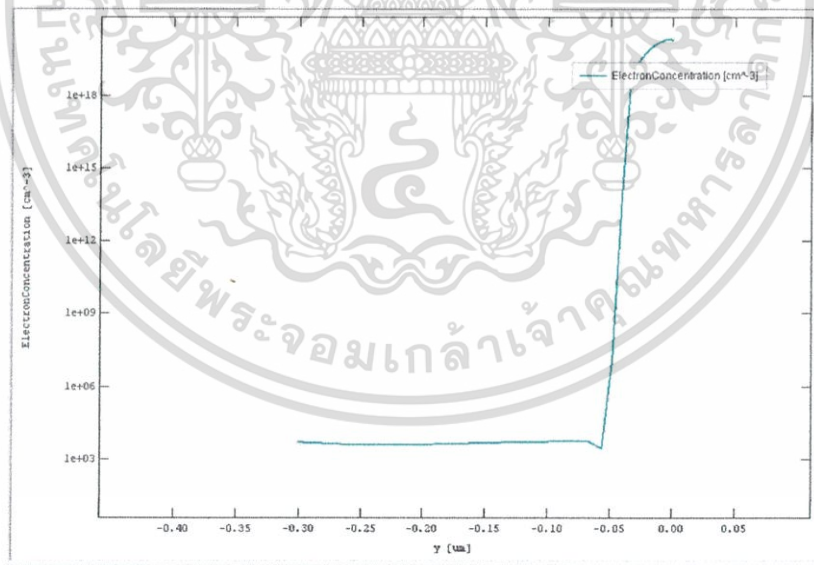
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 การกำหนดคุณสมบัติในแกน X และแกน Y

#### 4.1.8 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

##### 4.1.8.1 การวัดค่า Electron Concentration

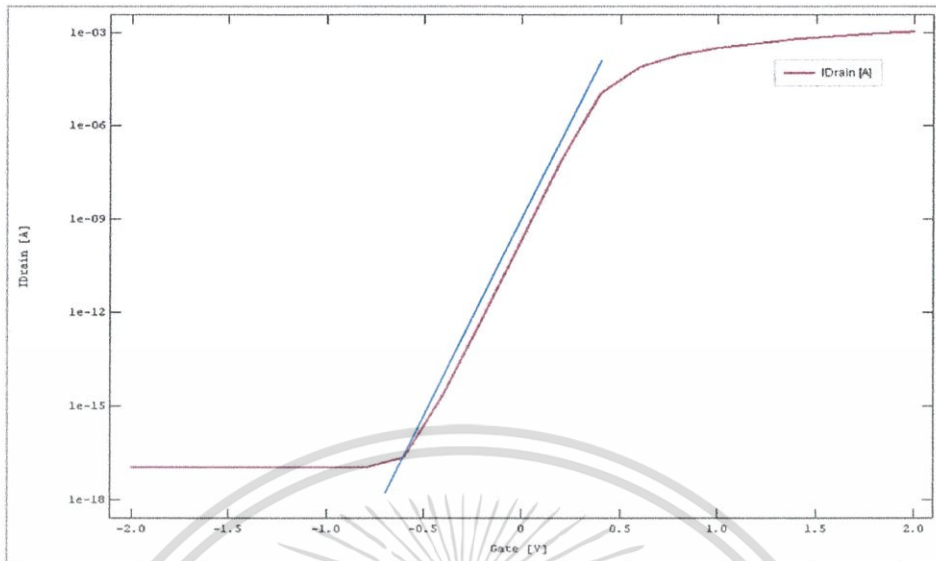


รูปที่ 4.21 ค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 4.21 แสดงค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอน (Electron Concentration) ของมอสทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้น พบว่าอิเล็กตรอนมีความเข้มข้นสูงสุดที่ผิวหน้าหรือที่ความลึกเป็นศูนย์ และมีการกระจายตัวเจือจางลงเรื่อยๆ ลักษณะเป็นเชิงเส้นที่ความลึกจากผิวหน้าจนถึงประมาณ -0.05 um หลังจากนั้นจะมีความเข้มข้นคงที่ จนไปถึงสิ้นสุดที่ -0.3 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

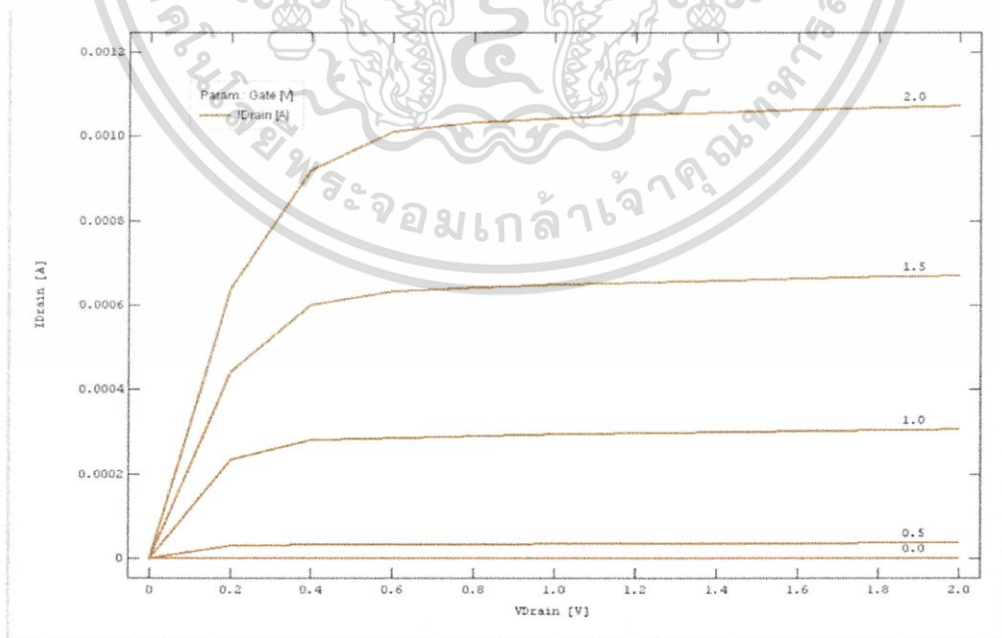
#### 4.1.8.2 การวัดค่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเกต

จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเกต ซึ่งพบว่ากระแสไหลน้อยมากเมื่อให้แรงดันที่ขั้วเกตต่ำกว่า -0.5 โวลต์ หลังจากนั้นกระแสจึงเริ่มไหลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในลักษณะเป็นเชิงเส้นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึง 0.5 โวลต์ และกระแสเริ่มไหลที่ค่าแรงดันเกตประมาณ 2.0 โวลต์ และแรงดันขีดเริ่มมีค่า -0.25 โวลต์

#### 4.1.8.3 กราฟคุณลักษณะของ nMOS



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้วเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

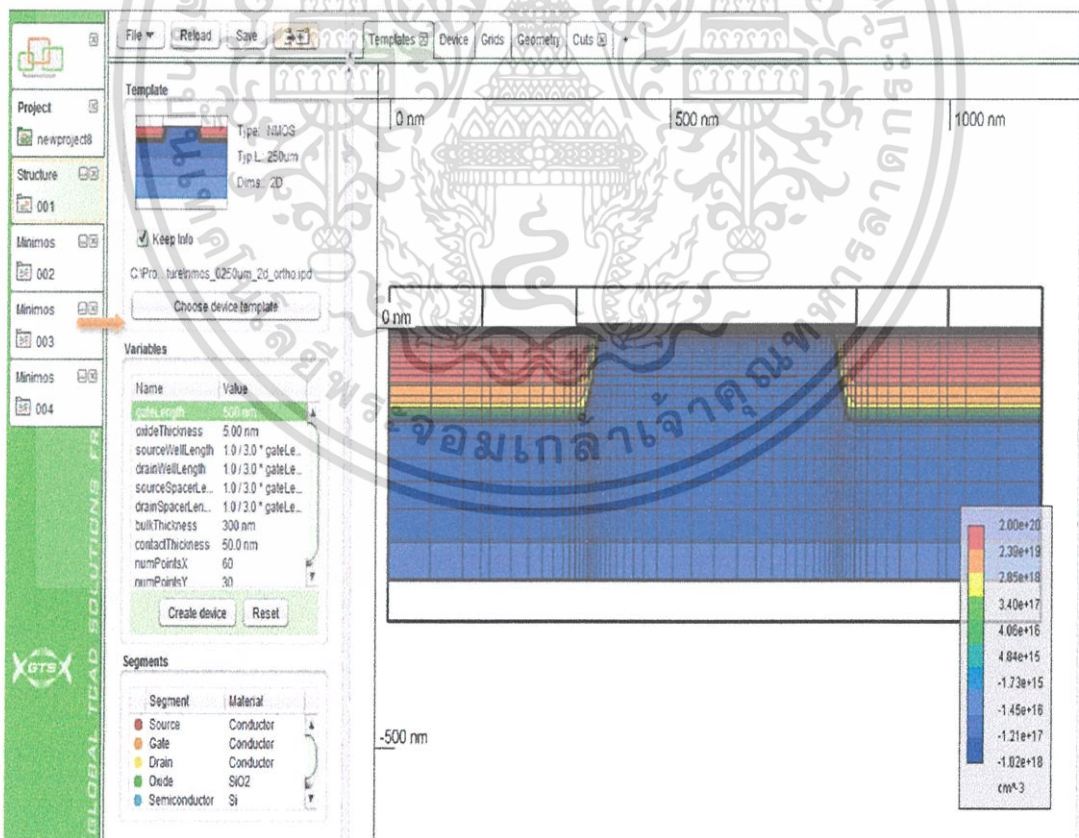
จากรูปที่ 4.23 คุณลักษณะของ nMOS โดยดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของขั้วเดรน เมื่อจ่ายแรงดันให้ขั้วเกตที่ค่าต่างๆ พบว่าเมื่อจ่ายแรงดันเกตเพิ่มขึ้นทำให้กระแสที่ขั้วเดรนเพิ่มขึ้น และที่แรงดันเกต 2 โวลต์ จะมีค่ากระแสเดรน 1 มิลลิแอมป์

## 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความยาวเกต (Gate Length, L)

การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

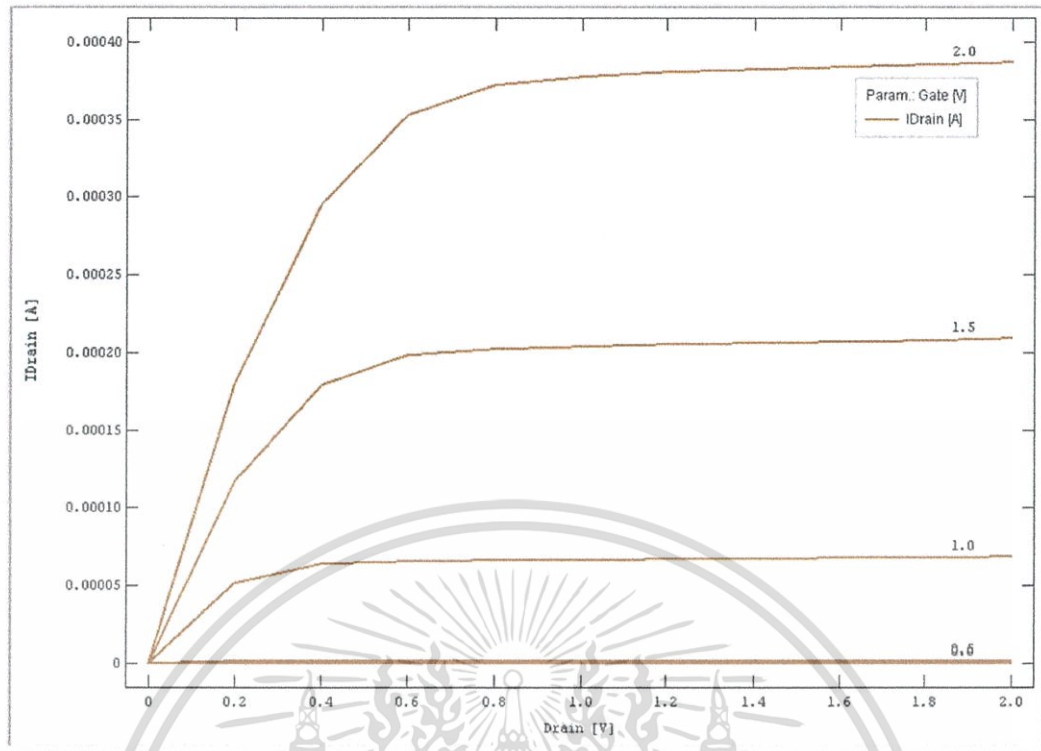
1. เปลี่ยนค่าความยาวเกต
2. กำหนดค่าความหนาออกไซด์เป็น 5 nm
3. วัดปริมาณกระแสที่ขั้วเดรน
  - กำหนดแรงดันขั้วเกตเป็นแบบ “step” จาก 0.0v ถึง 2.0v และให้ step = 0.5v
  - กำหนดค่าแรงดันขั้วเดรนเป็นแบบ “step” จาก 0.0v ถึง 2.0v และให้ step = 0.2v
  - กำหนด priority ของเกตและเดรน เป็น 1 และ 5 ตามลำดับ
  - เลือกแกน x เป็น vDrain และแกน y เป็น iDrain

### 4.2.1 ความยาวเกต = 500 nm และ ความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm



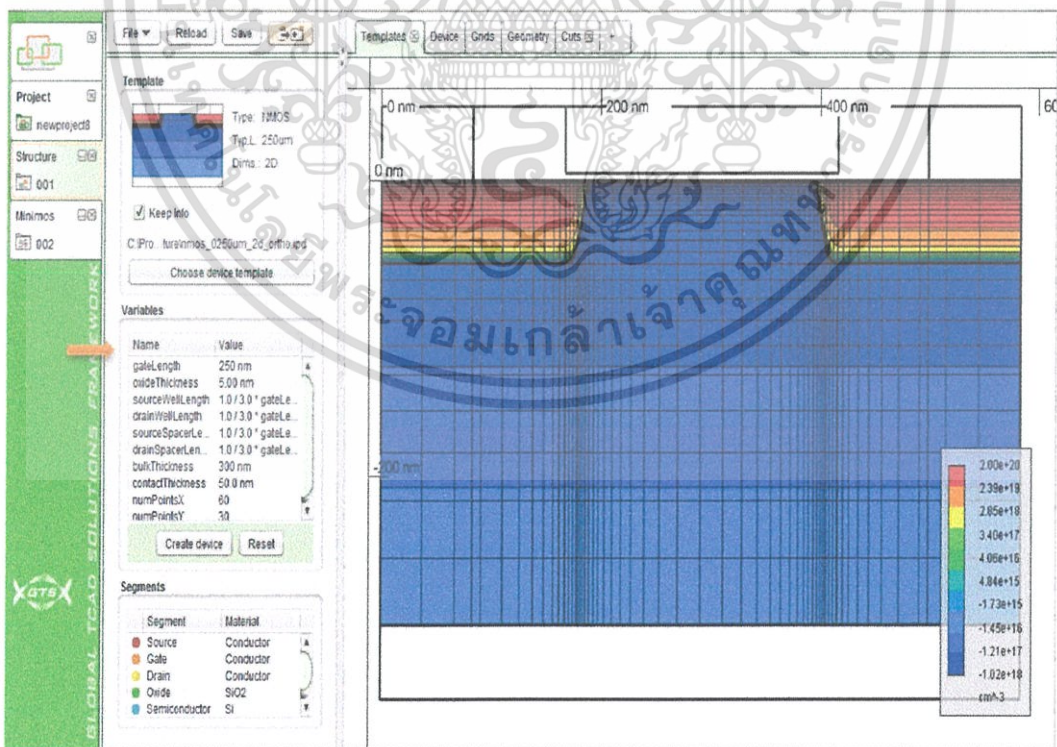
รูปที่ 4.24 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



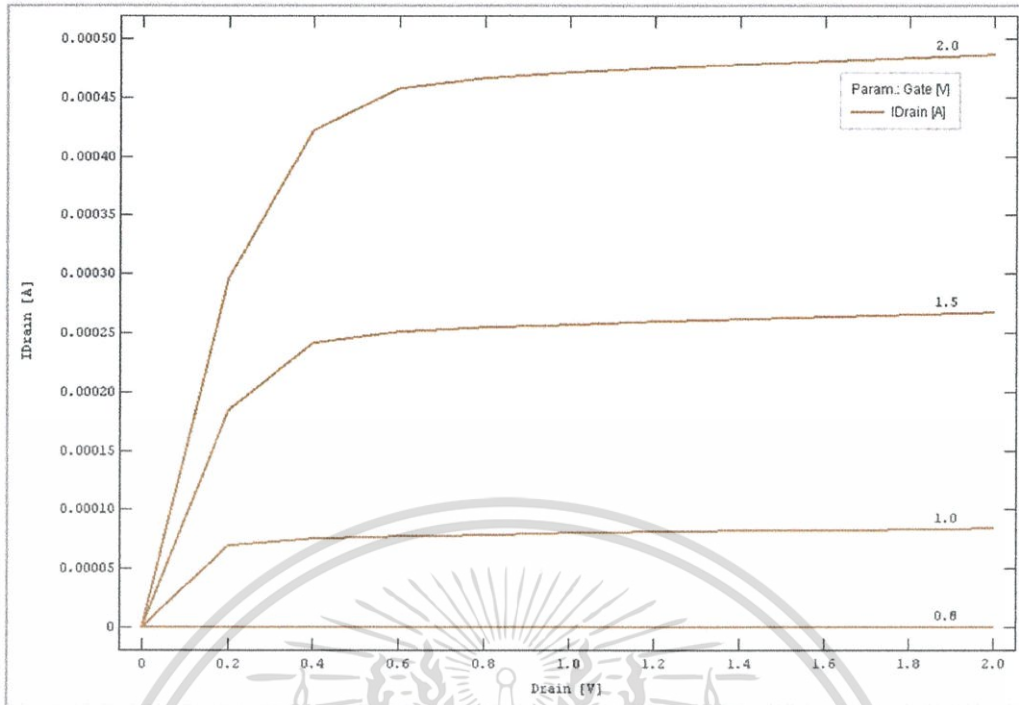
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $L = 500 \text{ nm}$  และ  $T_{ox} = 5 \text{ nm}$

#### 4.2.2 ความยาวเกต = 250 nm และ ความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm



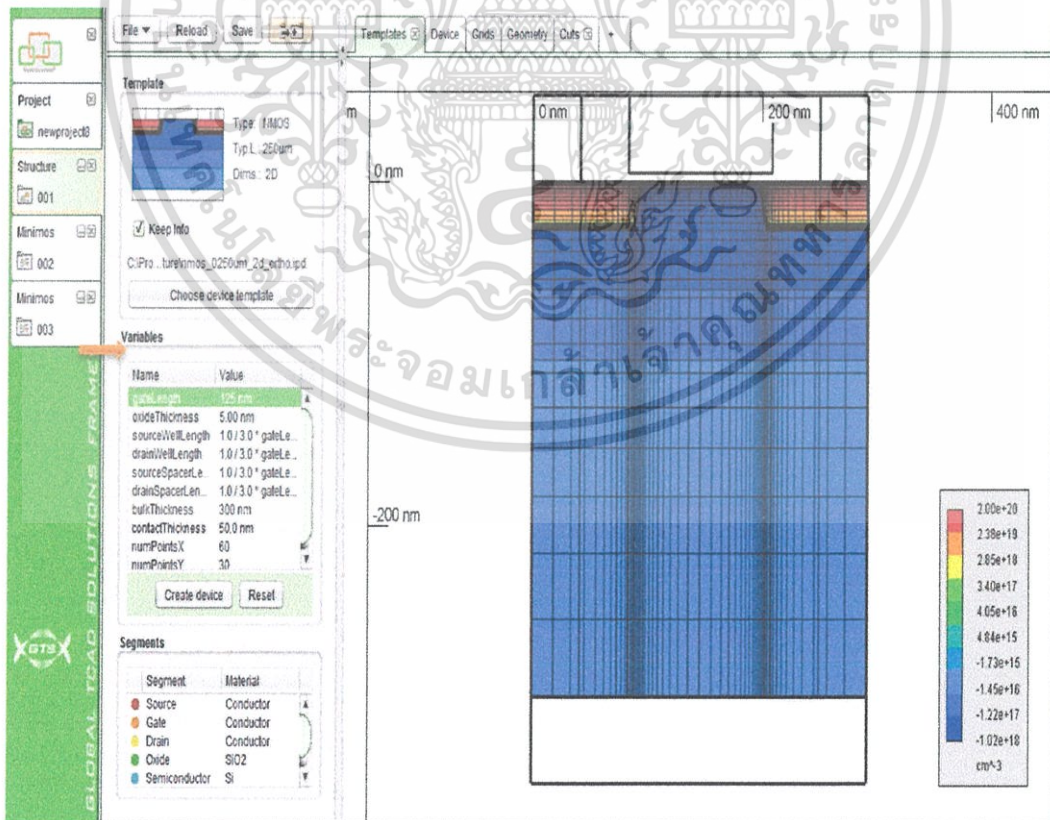
รูปที่ 4.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



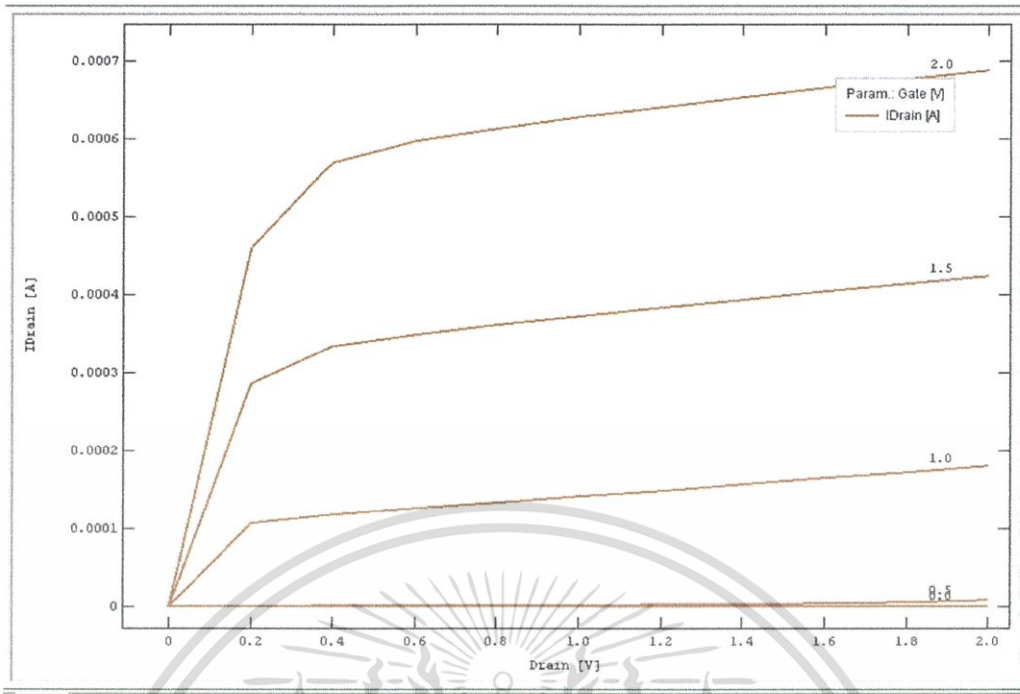
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $L = 250$  nm และ  $T_{ox} = 5$  nm

#### 4.2.3 ความยาวเกต = 125 nm และ ความหนาเกตออกไซด์ = 5 nm



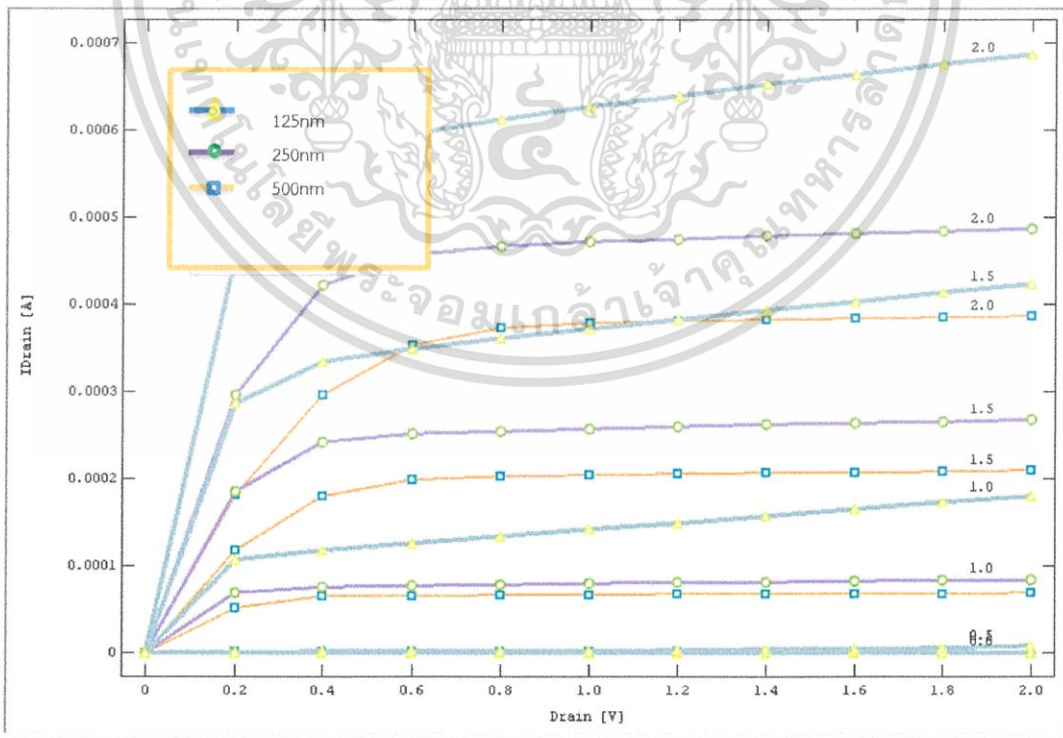
รูปที่ 4.28 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $L = 125 \text{ nm}$  และ  $T_{ox} = 5 \text{ nm}$

4.2.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



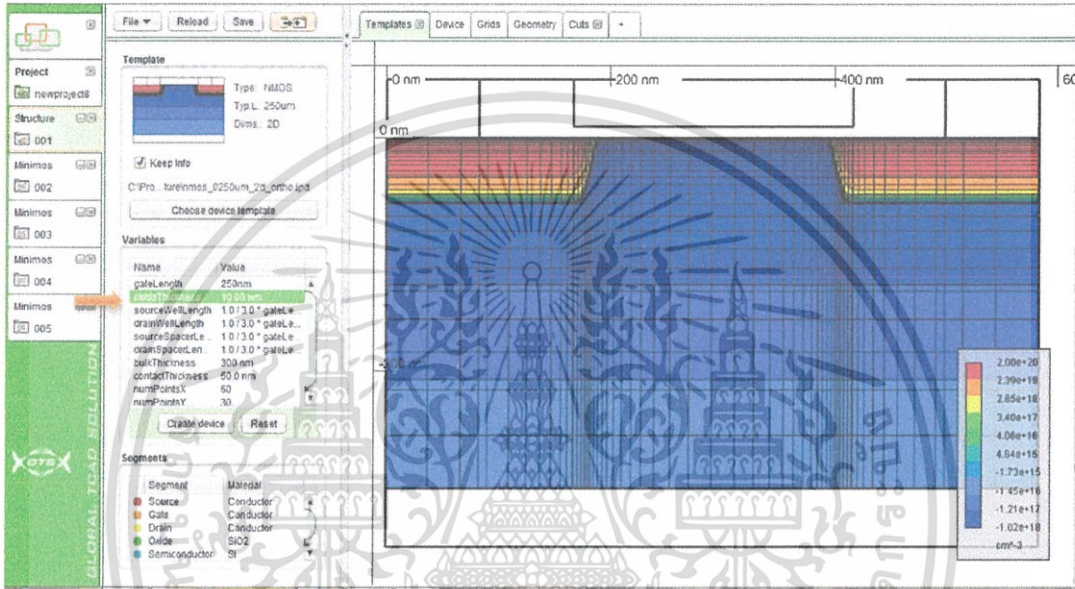
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของกระแสทรานเมื่อกำหนดความยาวเกตค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

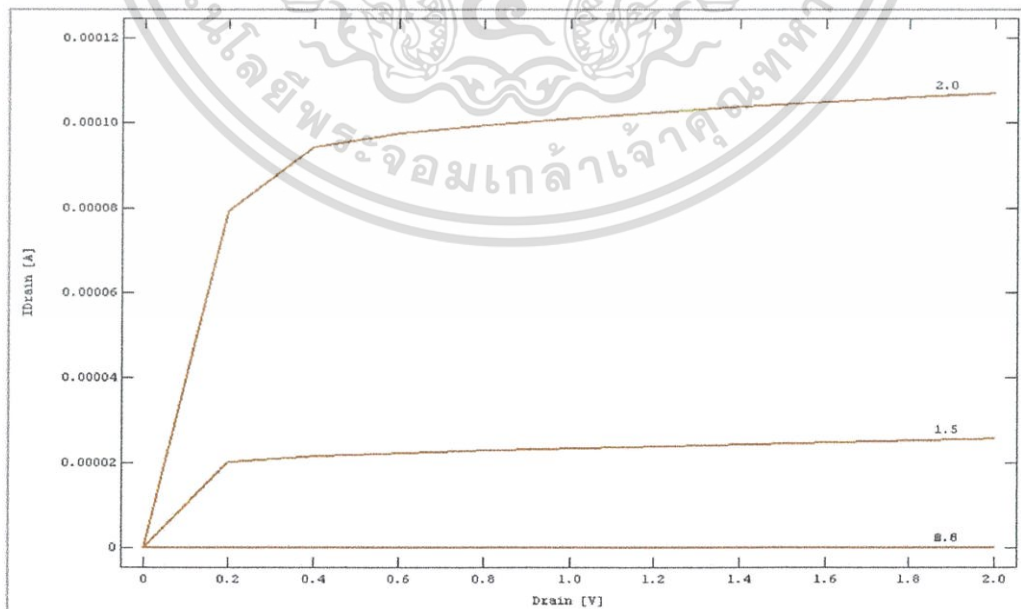
จากรูปที่ 4.30 เป็นกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าความยาวของเกตเป็น 125 nm, 250 nm และ 500 nm และกำหนดความหนาเกตออกไซด์เป็น 5 nm พบว่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผกผันกับความยาวของเกต คือความยาวเกตมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง

### 4.3 ความสัมพันธ์ของความหนาเกตออกไซด์ (OxideThickness)

#### 4.3.1 ความหนาเกตออกไซด์ = 10 nm และ ความยาวเกต = 250 nm



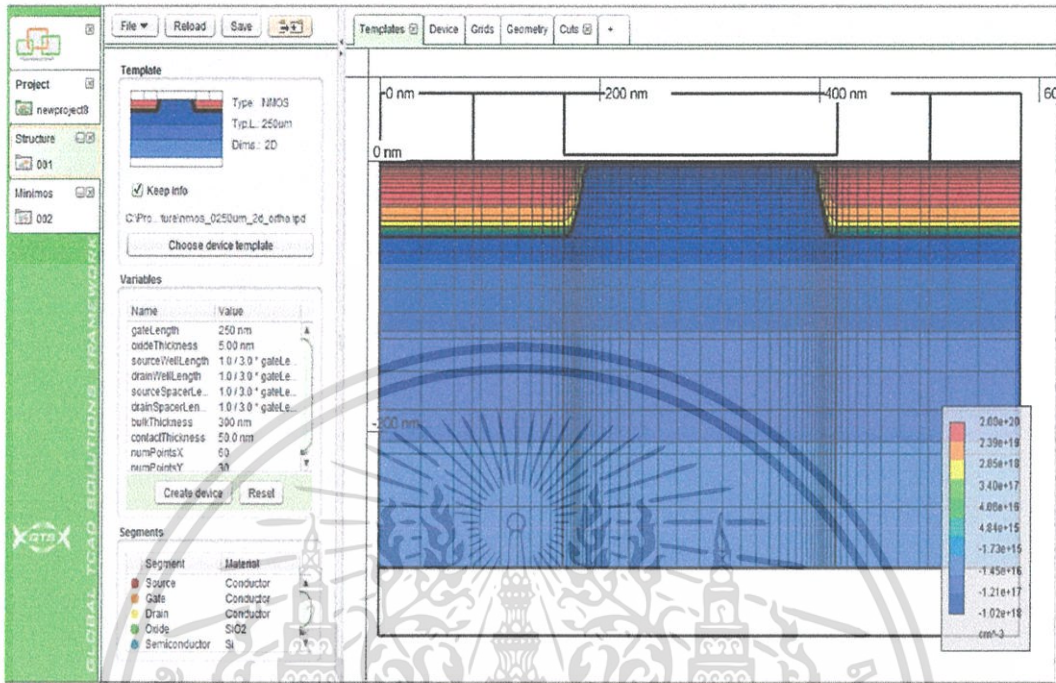
รูปที่ 4.31 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



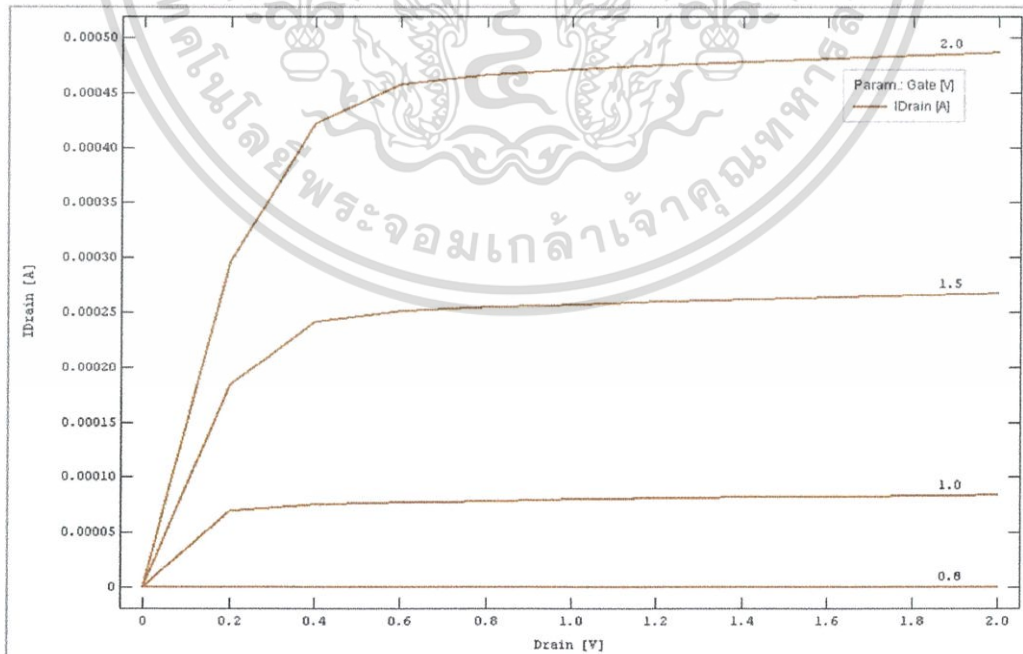
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $T_{\text{ox}} = 10$  nm และ  $L = 250$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 ความหนาเกทออกไซด์ = 5 nm และ ความยาวเกท = 250 nm



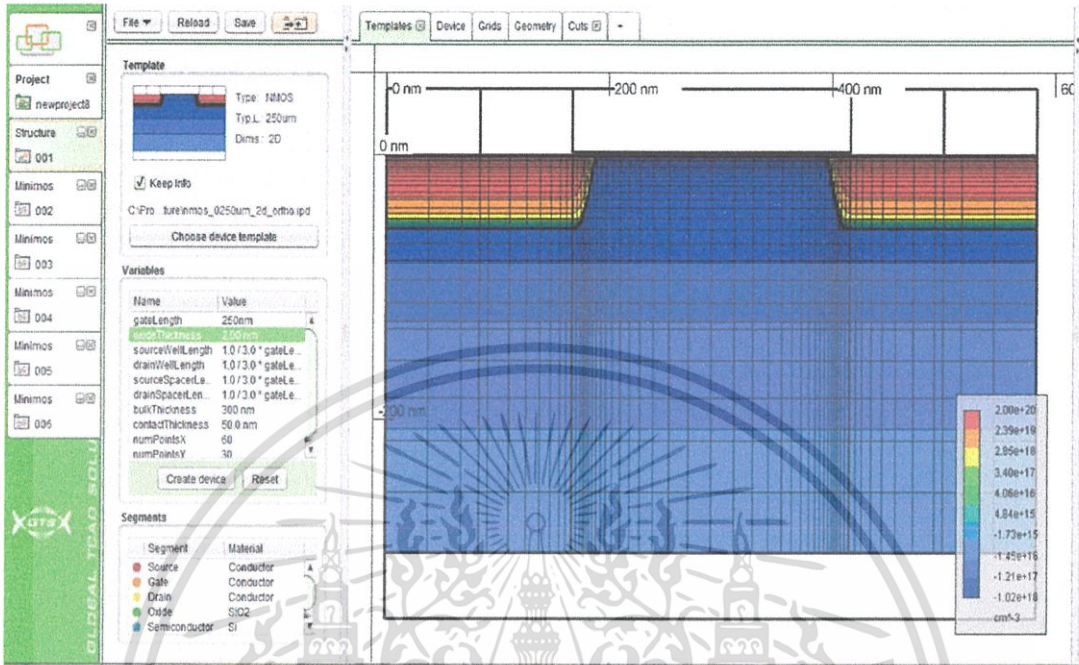
รูปที่ 4.33 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



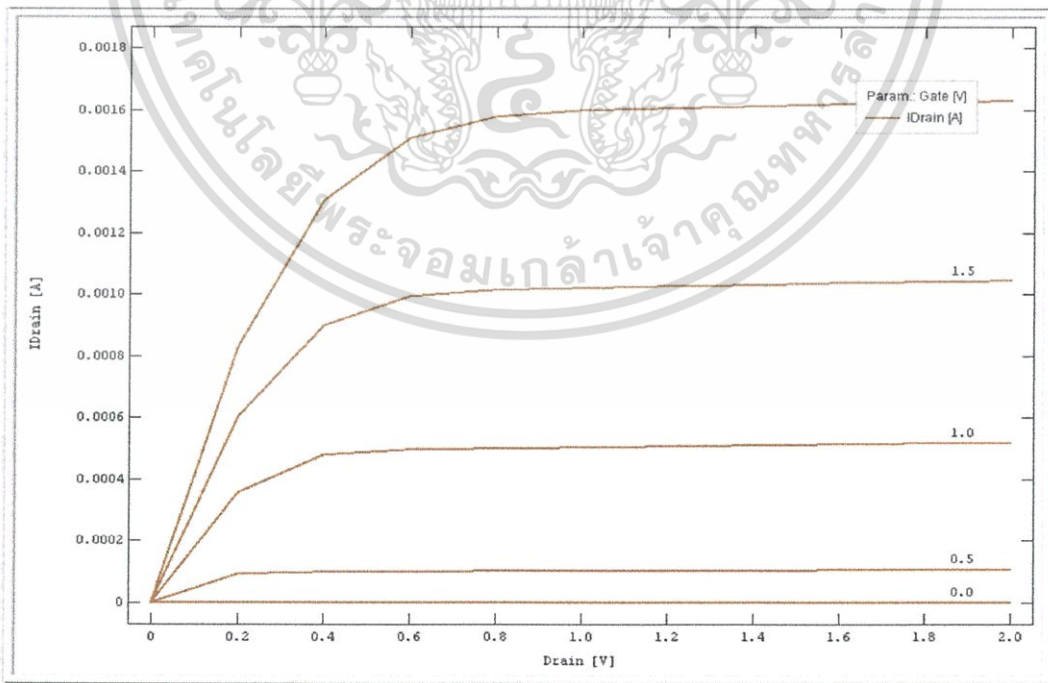
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $T_{ox} = 5$  nm และ  $L = 250$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ความหนาเกตออกไซด์ = 2 nm และ ความยาวเกต = 250 nm



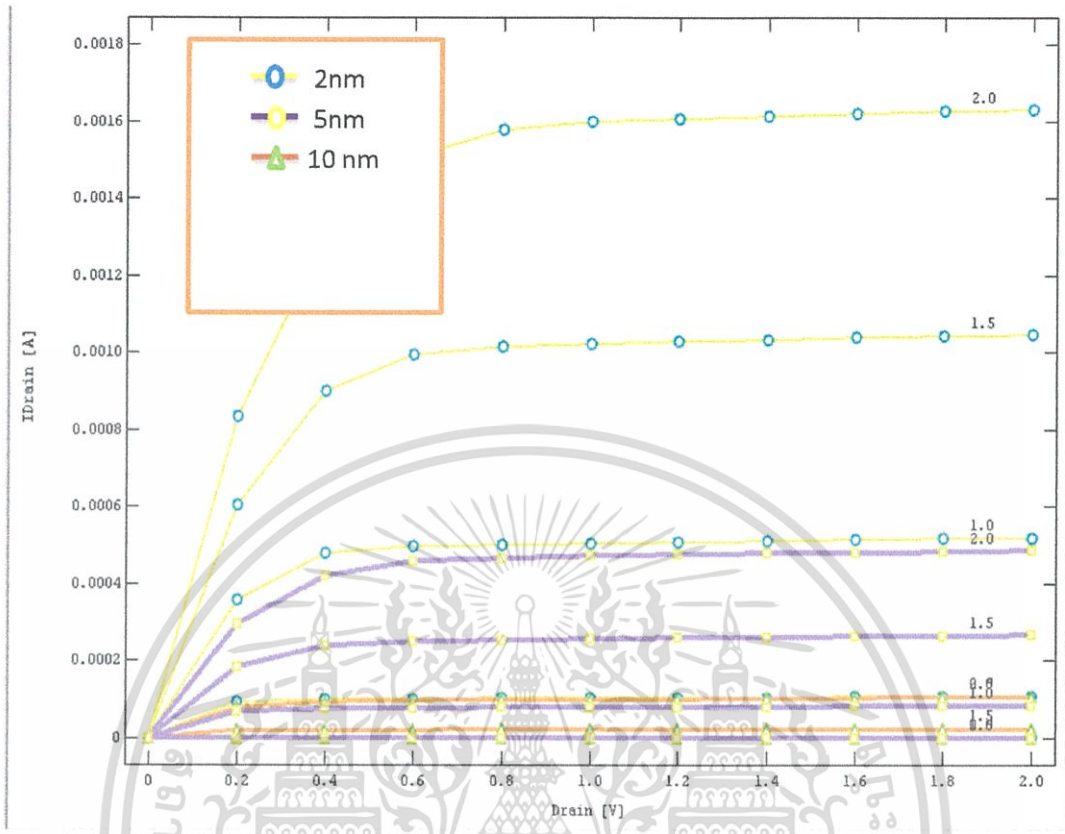
รูปที่ 4.35 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และโครงสร้างของอุปกรณ์



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ  $T_{\text{ox}} = 2$  nm และ  $L = 250$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



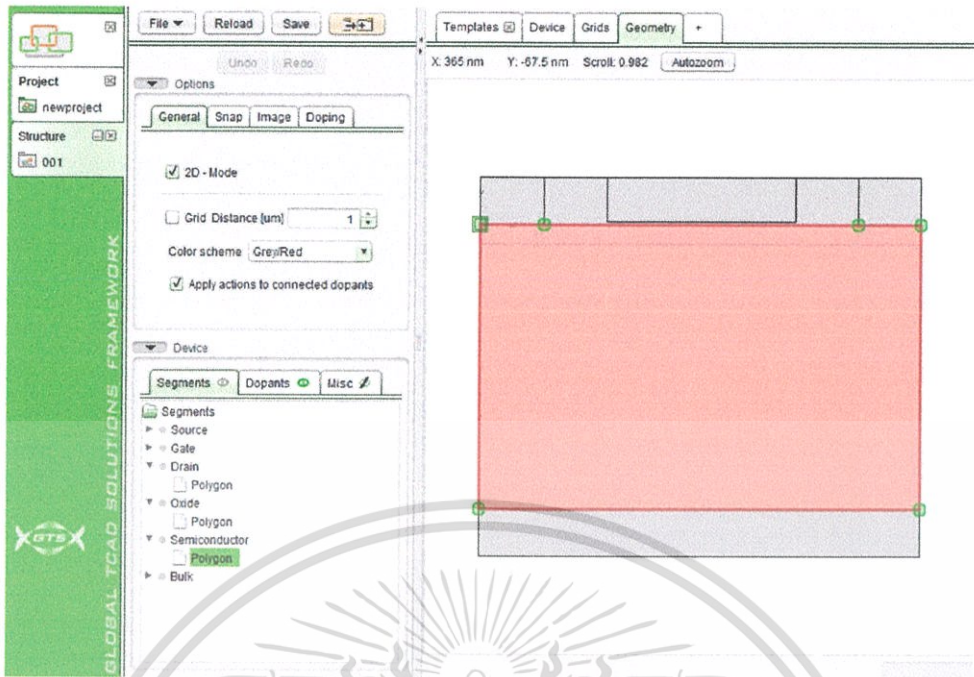
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนเมื่อกำหนดความหนาของเกตออกไซด์ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.37 เป็นกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าความหนาของเกตออกไซด์เป็น 2 nm, 5 nm และ 10 nm และกำหนดความยาวเกตเป็น 250 nm พบว่าปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนแปรผกผันกับความหนาของเกตออกไซด์ คือความหนาของเกตออกไซด์ มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดรนมีค่าลดลง

#### 4.4 การทดลองสร้างมอสทรานซิสเตอร์โดยไม่ใช้แม่แบบ

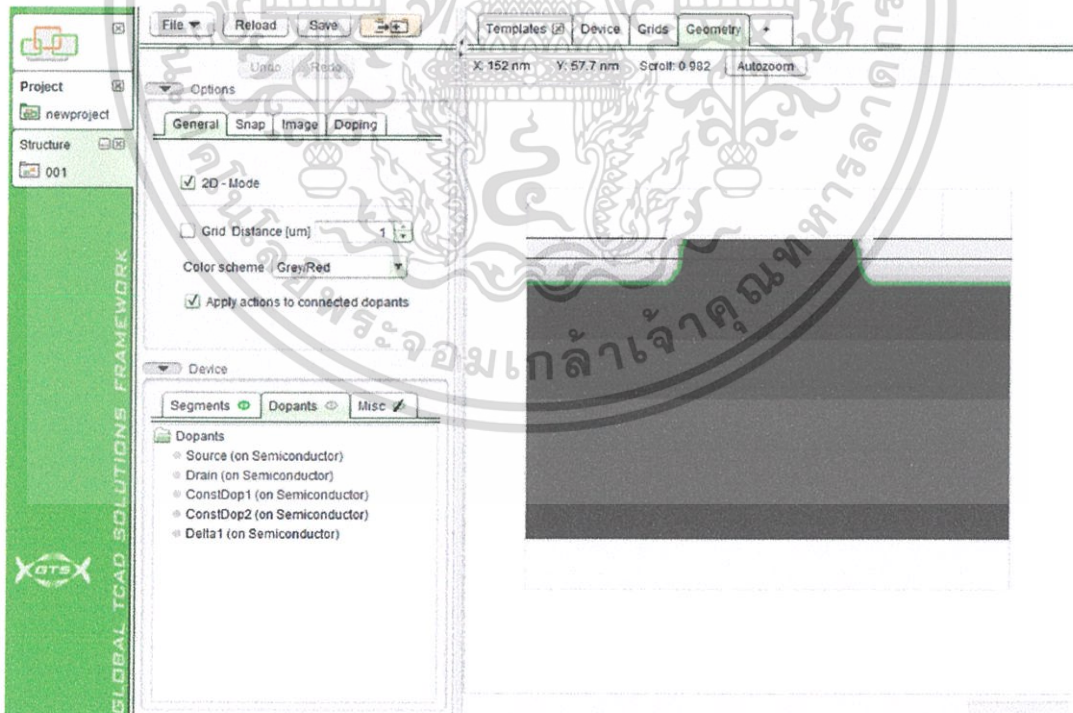
##### 4.4.1 วิธีการสร้าง

1. เปิดไปที่หน้า Geometry แล้วคลิก Segment
2. ทำการ Add Segment ขึ้นมาและสร้างเป็นโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์ดังรูป



รูปที่ 4.38 การ Add Segment

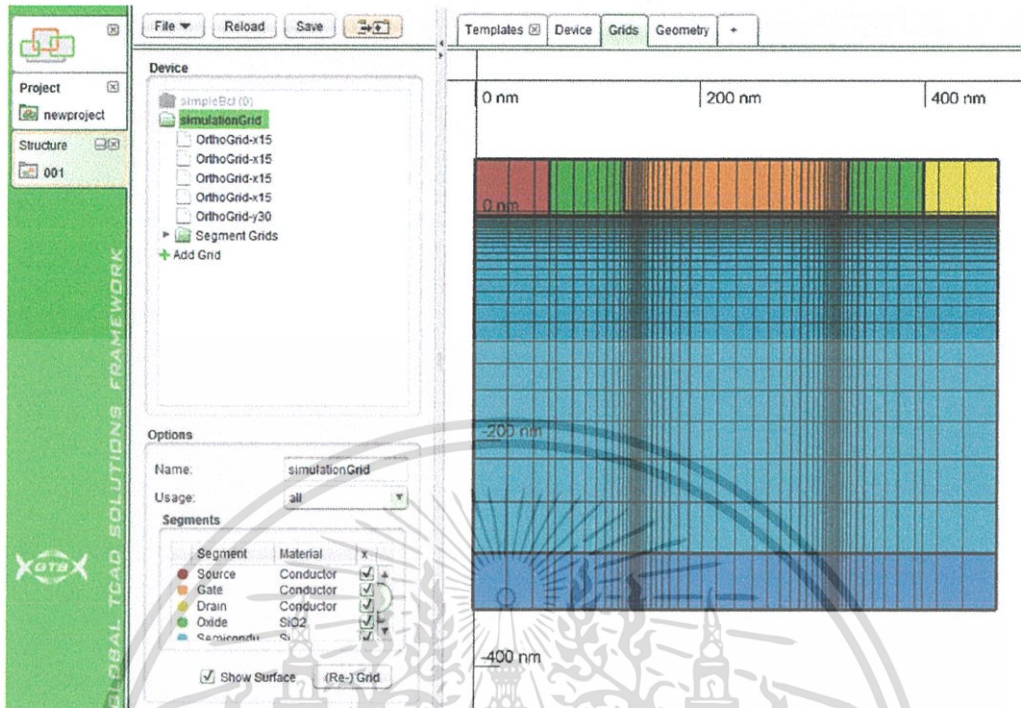
3. เลือก Dopants แล้วทำการ Add Dopants ให้ได้ส่วนของ source และ drain



รูปที่ 4.39 การ Dopants

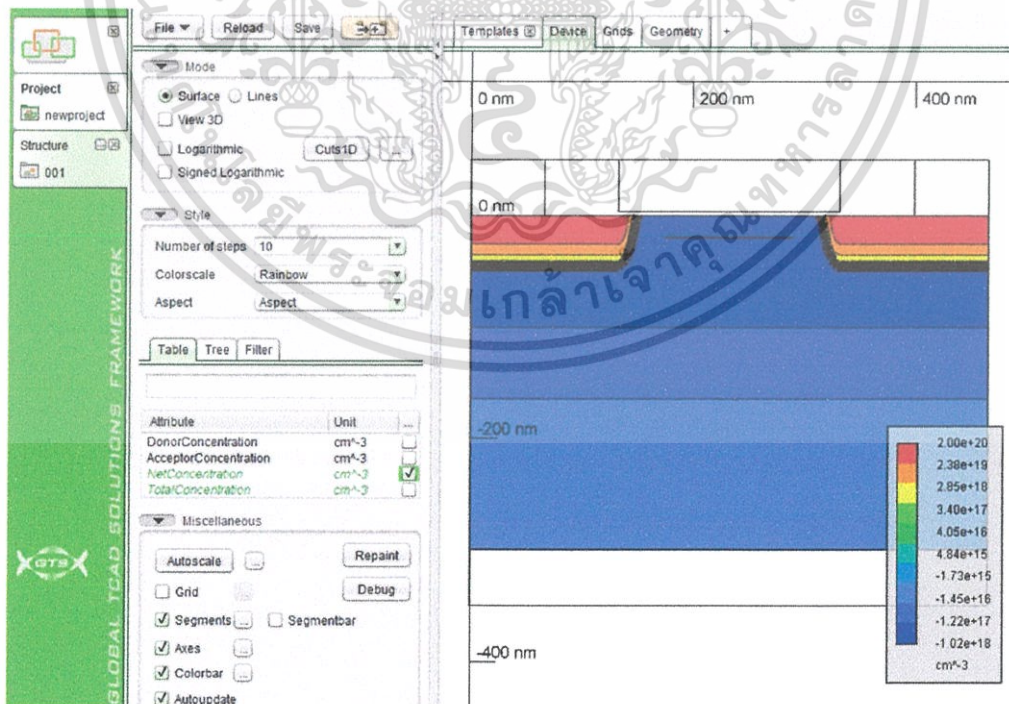
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. เปิดไปที่หน้า Grids และทำการ Add Grids จะปรากฏดังรูป



รูปที่ 4.40 การ Add Grids

#### 5. เปิดไปที่หน้า Device แล้วเลือก Netconcentration

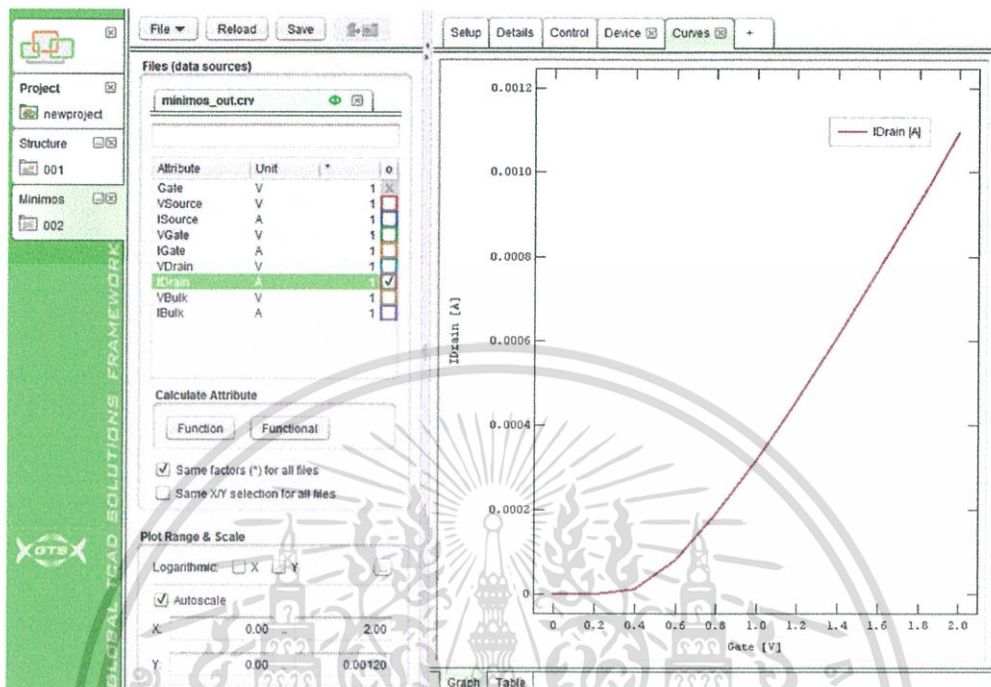


รูปที่ 4.41 ลักษณะความเข้มข้นสารเจือและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

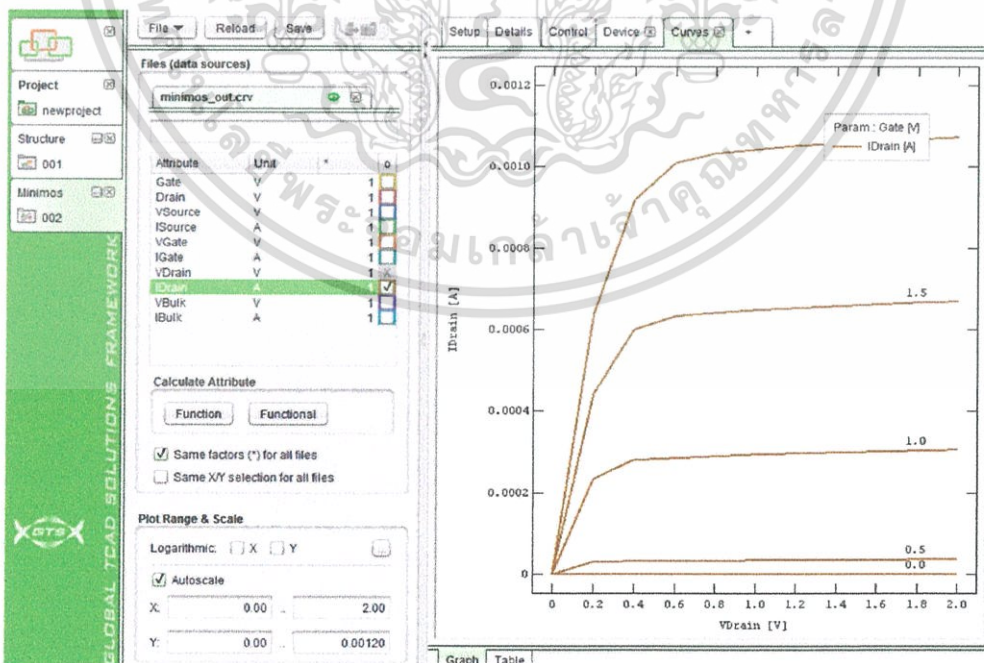
### 4.4.2 ผลการทดลอง

#### 1. Threshold Voltage



รูปที่ 4.42 กราฟ Threshold Voltage

#### 2. I-V Characteristics



รูปที่ 4.43 กราฟ I-V Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

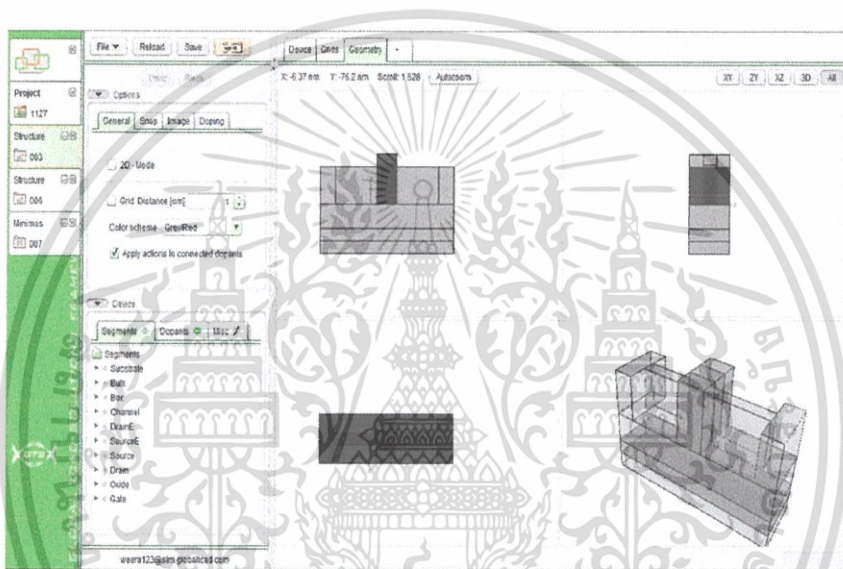
## 4.5 การทดลองสร้างฟิเนต

การทดลองนี้เป็นการจำลองสร้างฟิเนตโดยใช้โปรแกรม TCAD ในการออกแบบจากนั้นศึกษาค่ากระแสเดรนเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแส ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

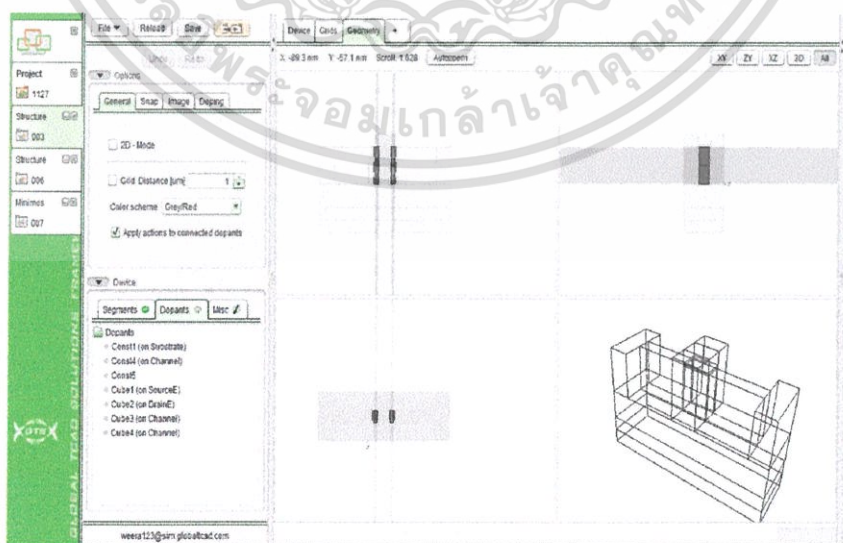
### 4.5.1 การศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับความยาวของช่องทางเดินกระแส

#### 4.5.1.1 ความยาว = 20 nm, ความกว้าง = 10 nm

##### 1) ขั้นตอนการสร้าง

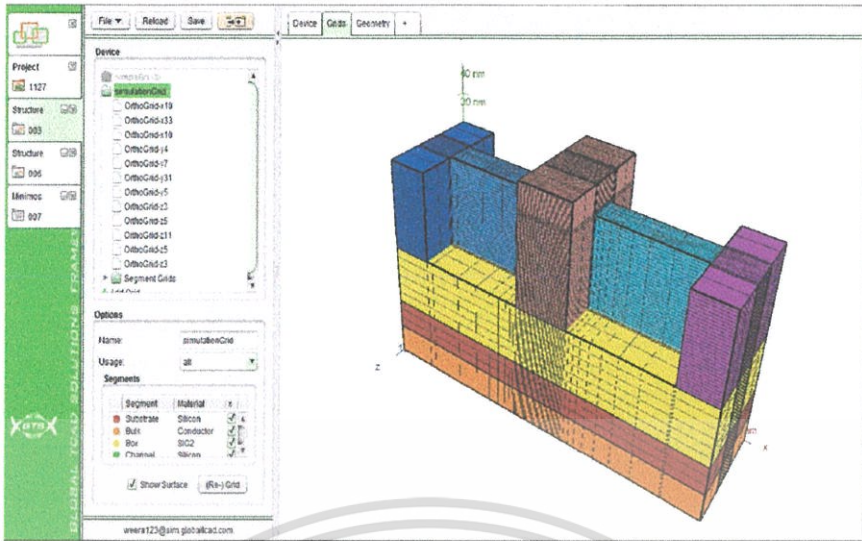


รูปที่ 4.44 การสร้างฟิเนตที่มี  $L=20$  nm,  $W=10$  nm



รูปที่ 4.45 การแพร่สารเจือของฟิเนตที่มี  $L=20$  nm,  $W=10$  nm

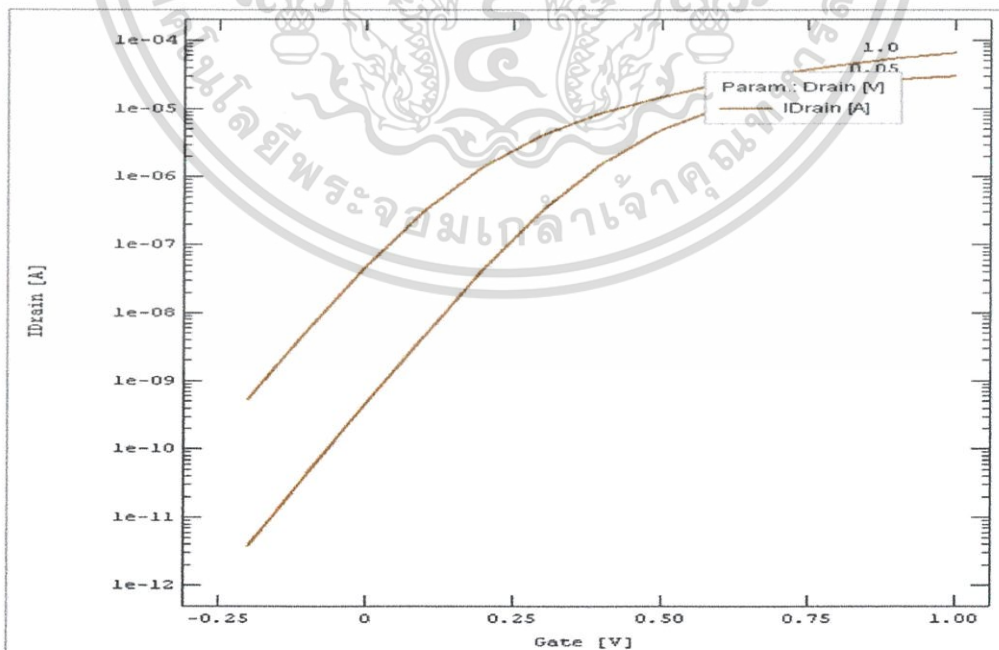
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี  $L = 20 \text{ nm}$ ,  $W = 10 \text{ nm}$

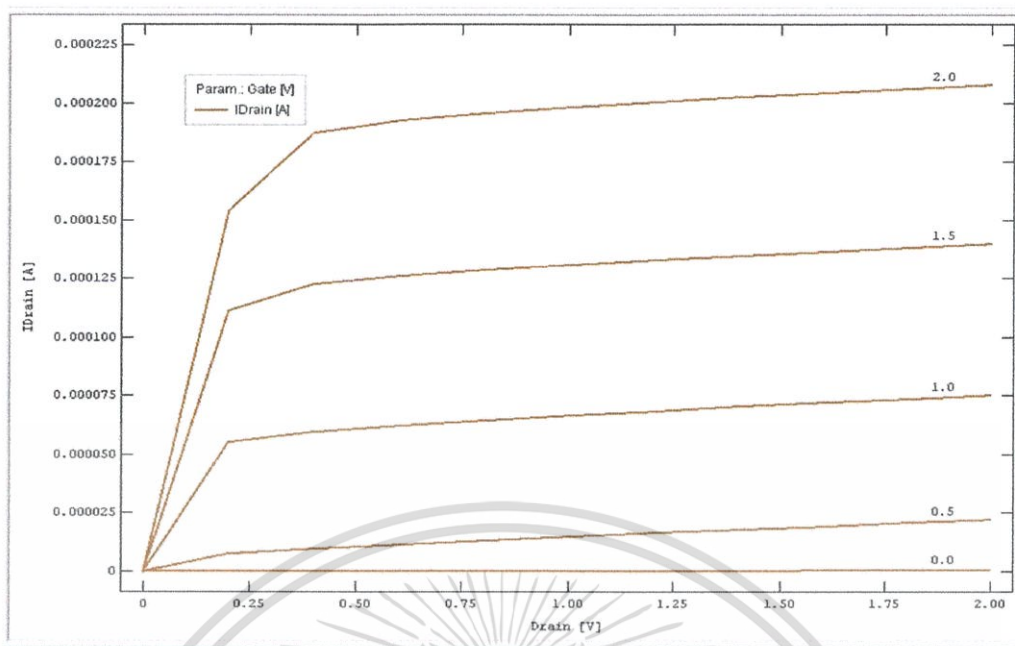
## 2) การวัดค่ากระแสเดรน

วัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ เทียบกับ  $V_{ds} = 1.0$  โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตดังรูปที่ 4.47 จากนั้นวัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันที่ขั้วเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 0.0$  โวลต์, 0.5 โวลต์, 1.0 โวลต์, 1.5 โวลต์ และ 2.0 โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

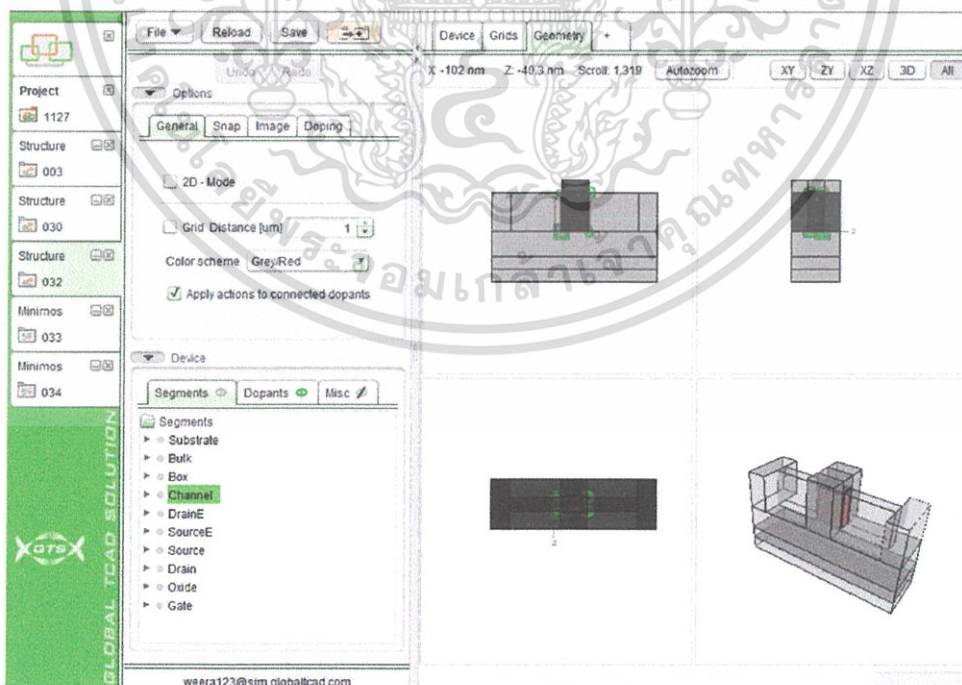
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน

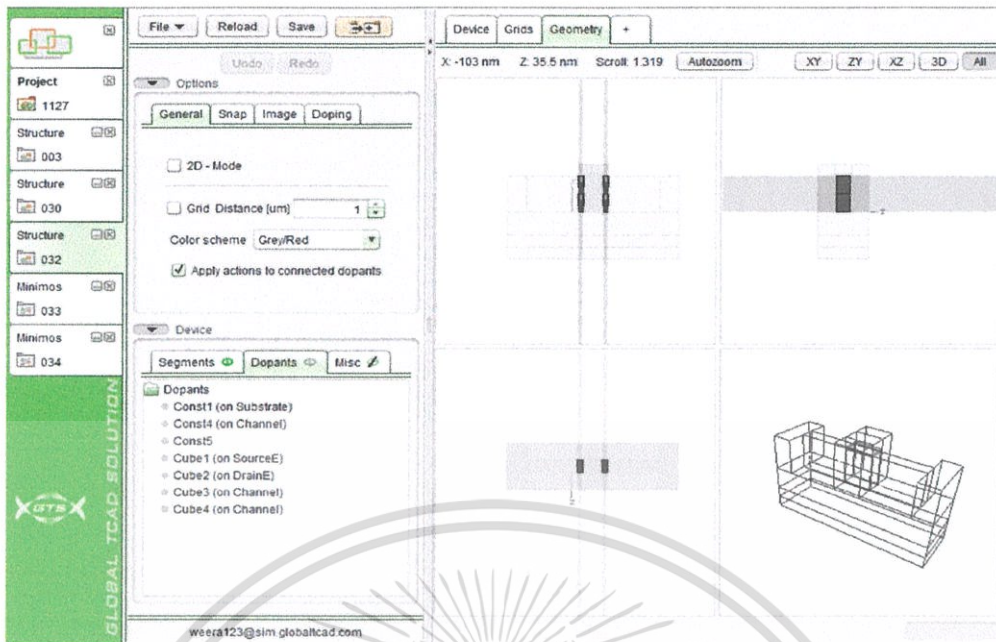
#### 4.5.1.2 ความยาว = 22 nm, ความกว้าง = 10 nm

##### 1) ขั้นตอนการสร้าง

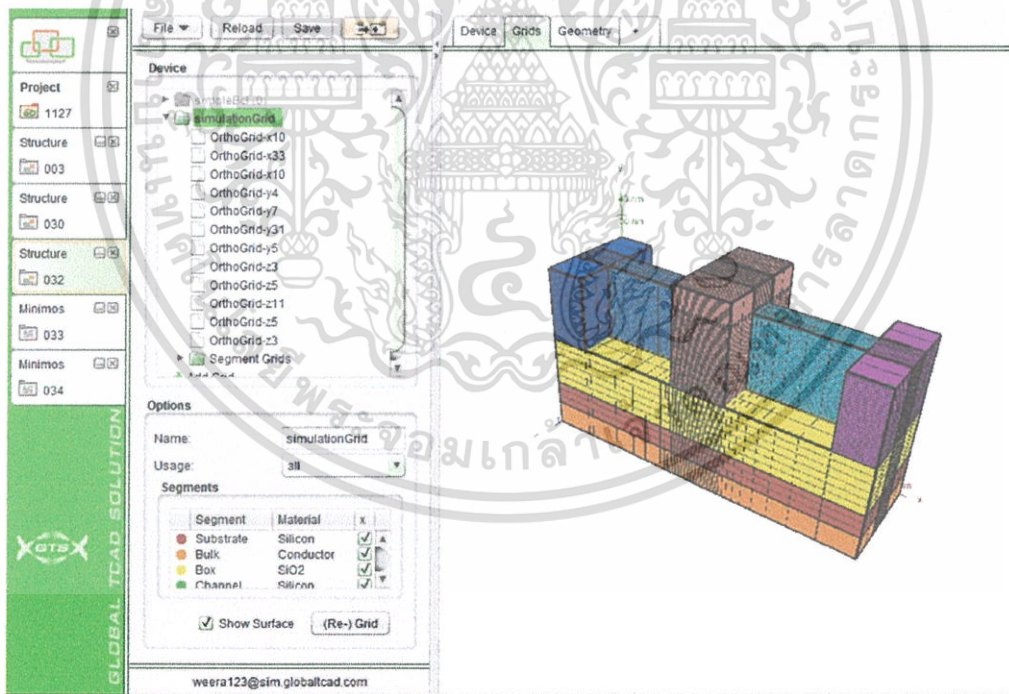


รูปที่ 4.49 การสร้างฟินเฟตที่มี  $L=22$  nm,  $W= 10$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี  $L = 22 \text{ nm}$ ,  $W = 10 \text{ nm}$

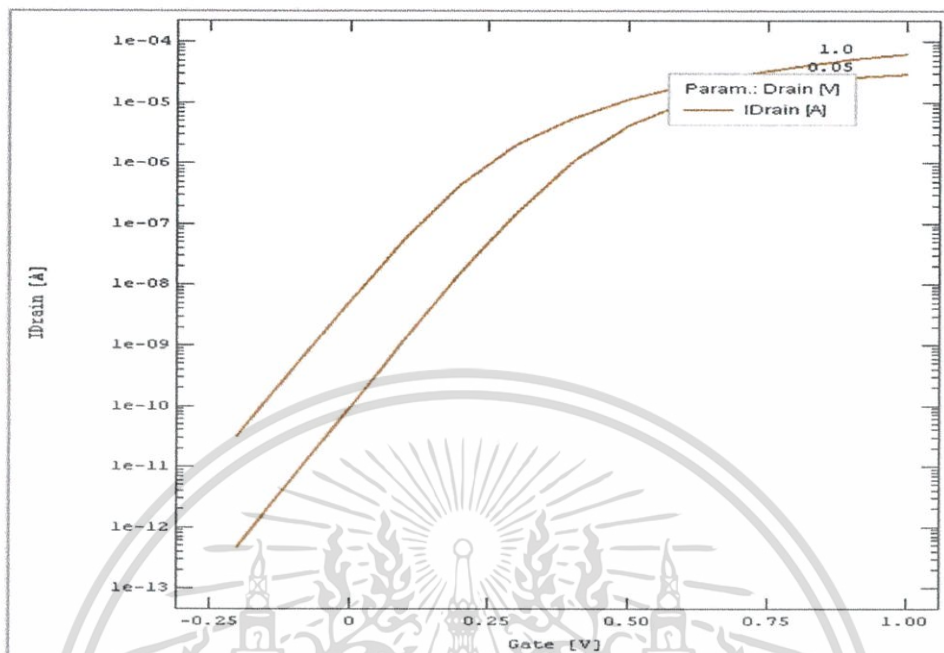


รูปที่ 4.51 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี  $L = 22 \text{ nm}$ ,  $W = 10 \text{ nm}$

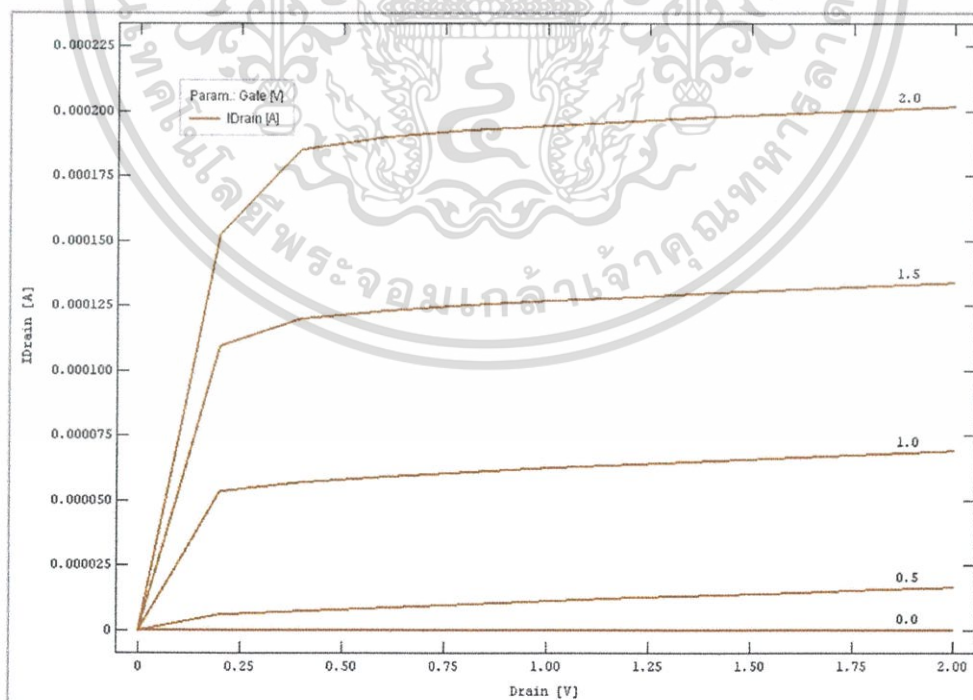
## 2) การวัดค่ากระแสเดรน

วัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ เทียบกับ  $V_{ds} = 1.0$  โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตดังรูปที่ 4.52 จากนั้นวัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเอกซาร์นเป็นเอกซาร์นที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ขั้วเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 0.0$  โวลต์, 0.5 โวลต์, 1.0 โวลต์, 1.5 โวลต์ และ 2.0 โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

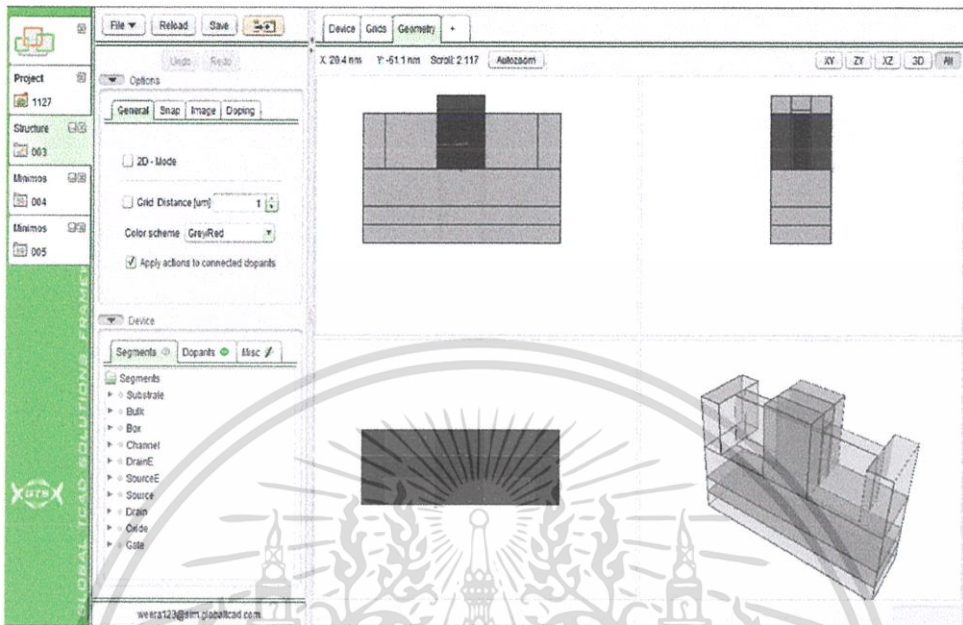


รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน

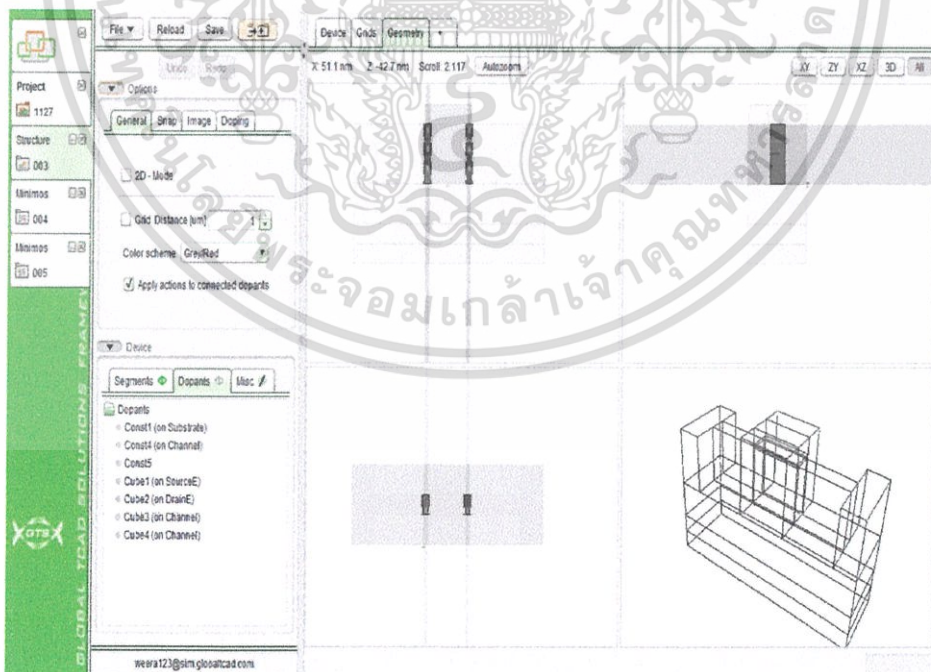
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5.1.3 ความยาว = 32 nm, ความกว้าง = 10 nm

#### 1) ขั้นตอนการสร้าง

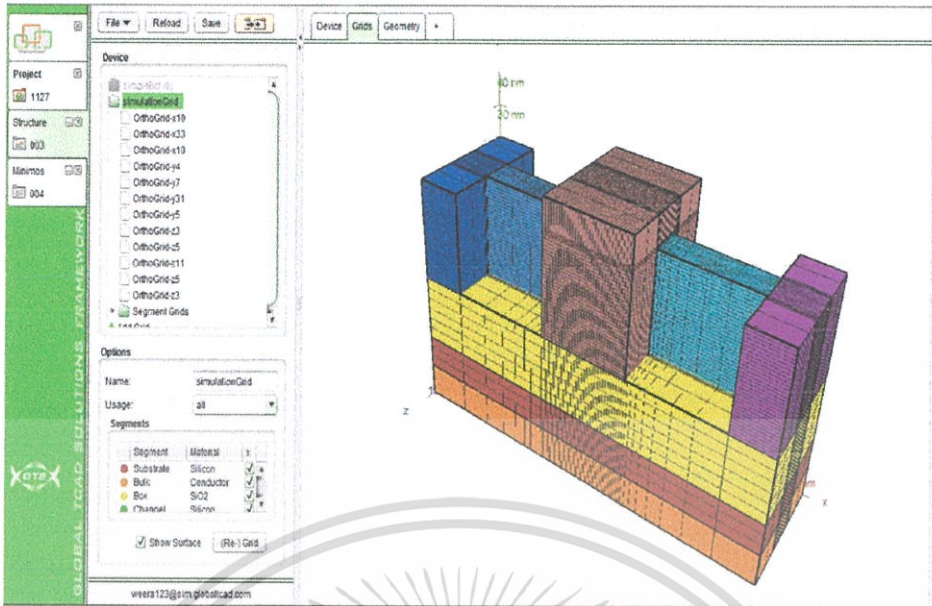


รูปที่ 4.54 การสร้างฟิล์มที่  $L=32$  nm,  $W=10$  nm



รูปที่ 4.55 การแพร่สารเจือของฟิล์มที่  $L=32$  nm,  $W=10$  nm

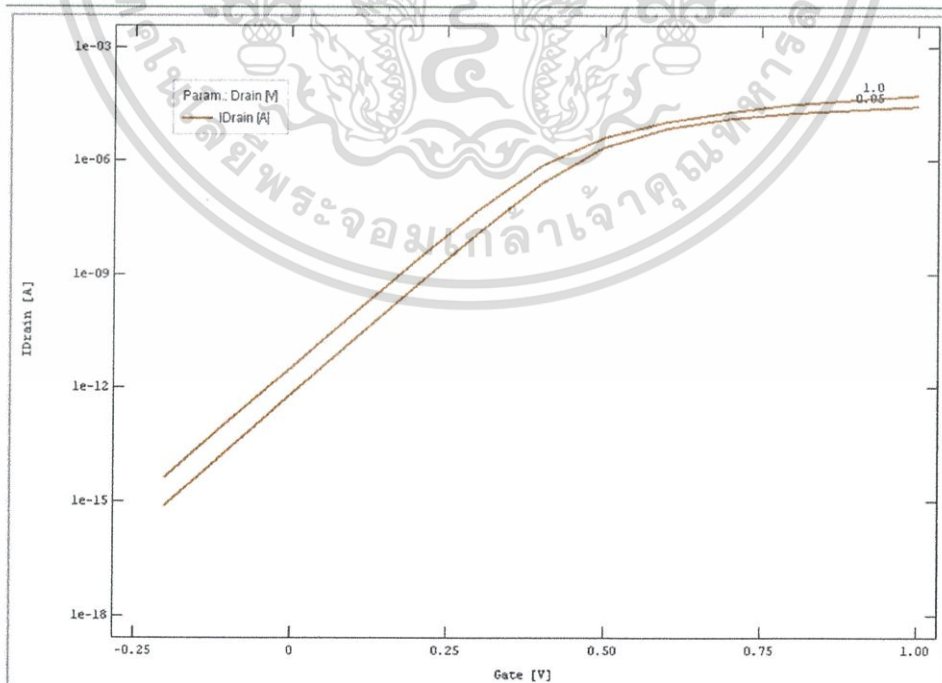
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี  $L = 32 \text{ nm}$ ,  $W = 10 \text{ nm}$

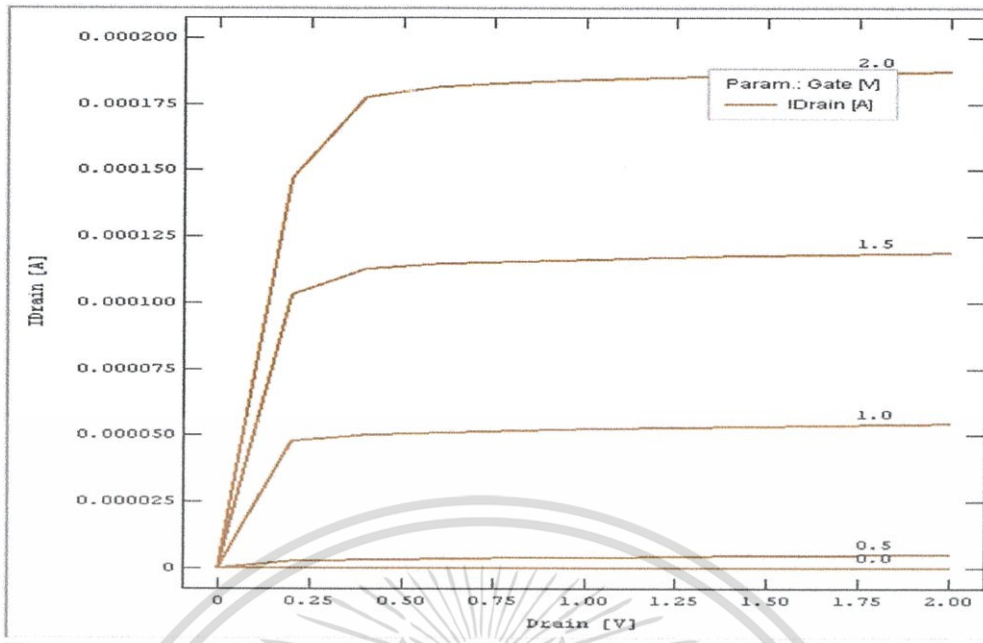
## 2) การวัดค่ากระแสเดรน

วัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่  $V_{ds} = 0.05 \text{ โวลต์}$  เทียบกับ  $V_{ds} = 1.0 \text{ โวลต์}$  ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตดังรูปที่ 4.57 จากนั้นวัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันที่ขั้วเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 0.0 \text{ โวลต์}, 0.5 \text{ โวลต์}, 1.0 \text{ โวลต์}, 1.5 \text{ โวลต์}$  และ  $2.0 \text{ โวลต์}$  ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 4.58



รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

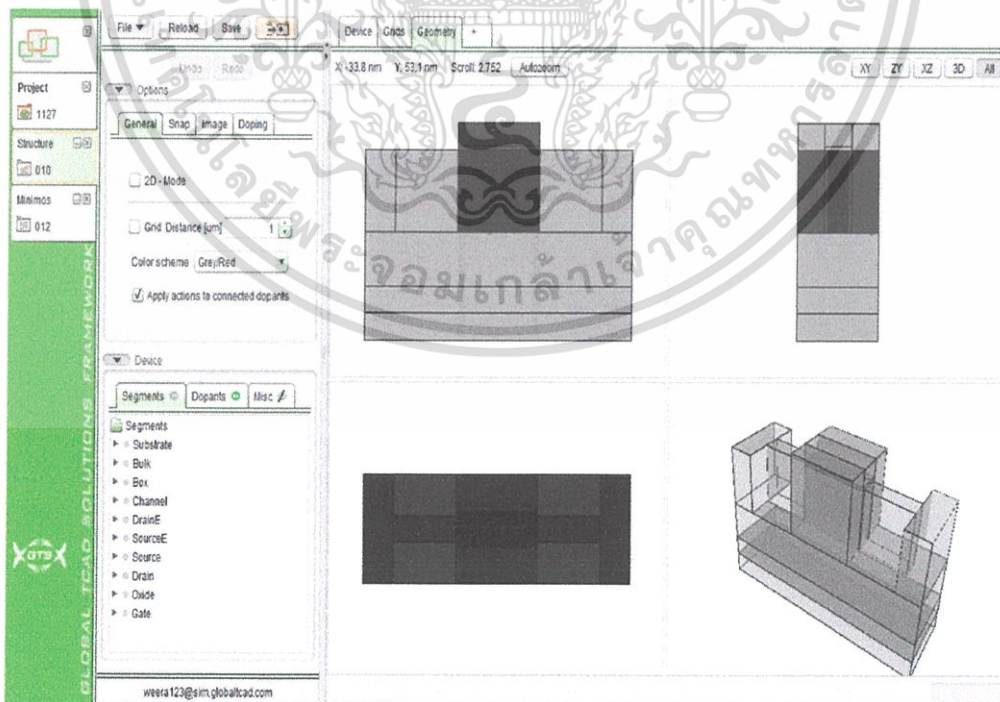
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน

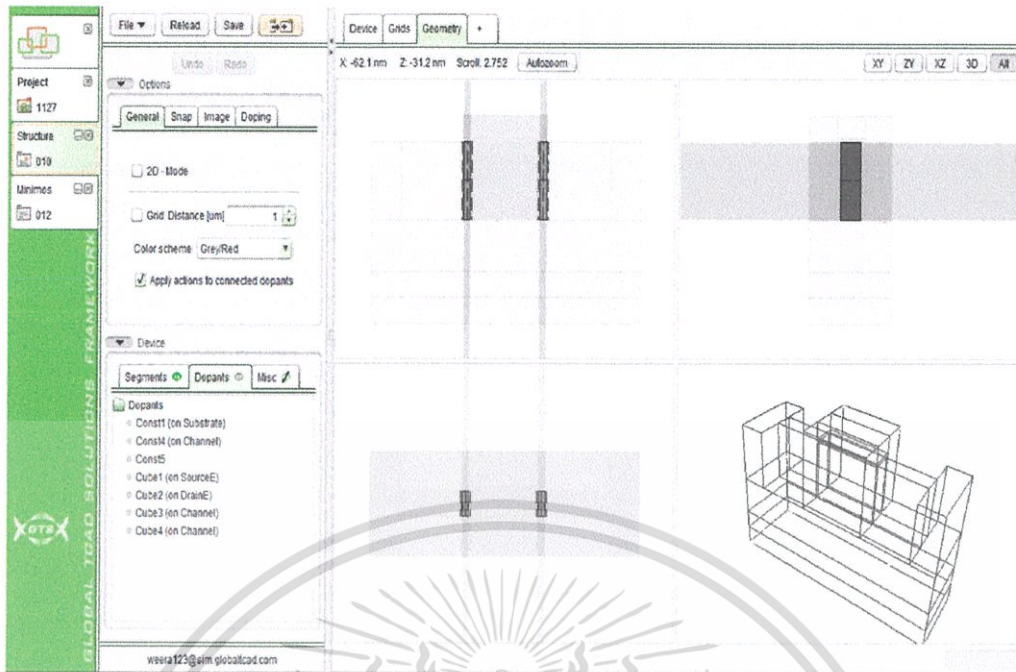
#### 4.5.1.4 ความยาว = 40 nm, ความกว้าง = 10 nm

##### 1) ขั้นตอนการสร้าง

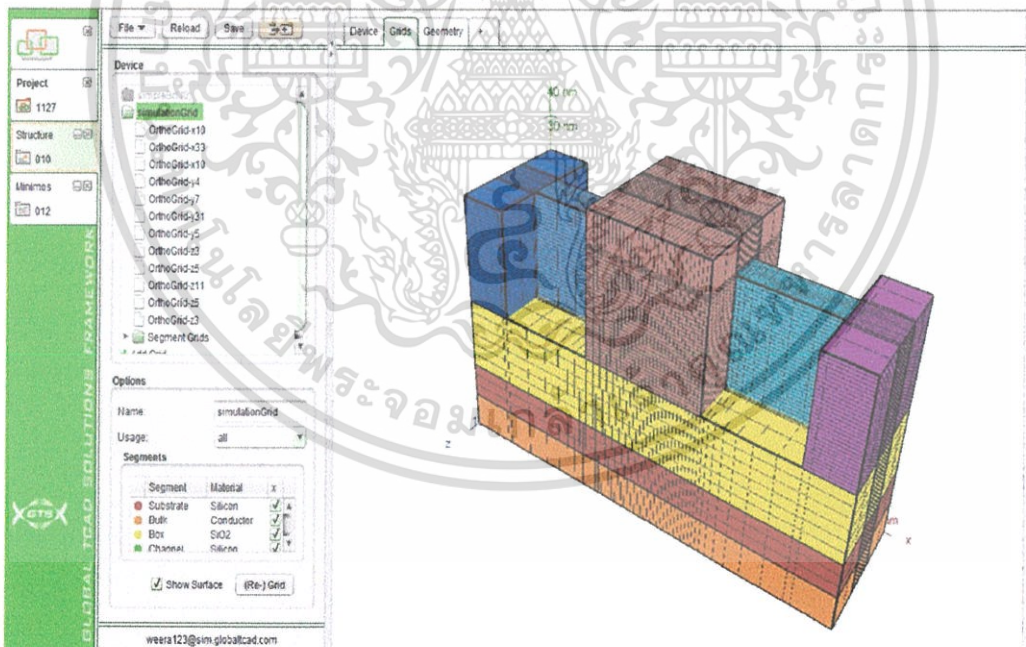


รูปที่ 4.59 การสร้างฟินเฟตที่มี  $L=40$  nm,  $W=10$  nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี  $L = 40 \text{ nm}$ ,  $W = 10 \text{ nm}$

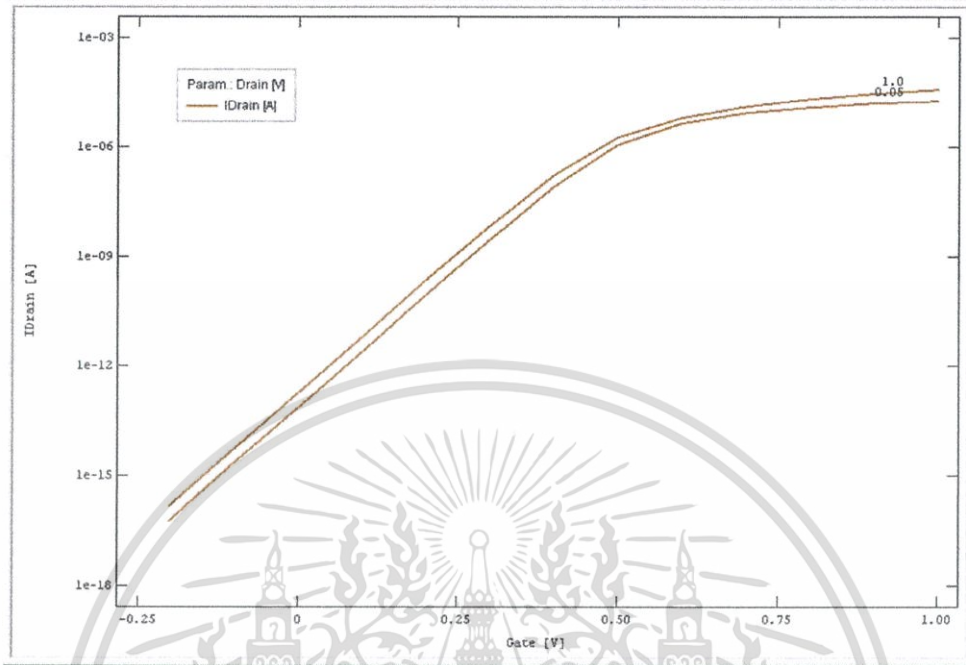


รูปที่ 4.61 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี  $L = 40 \text{ nm}$ ,  $W = 10 \text{ nm}$

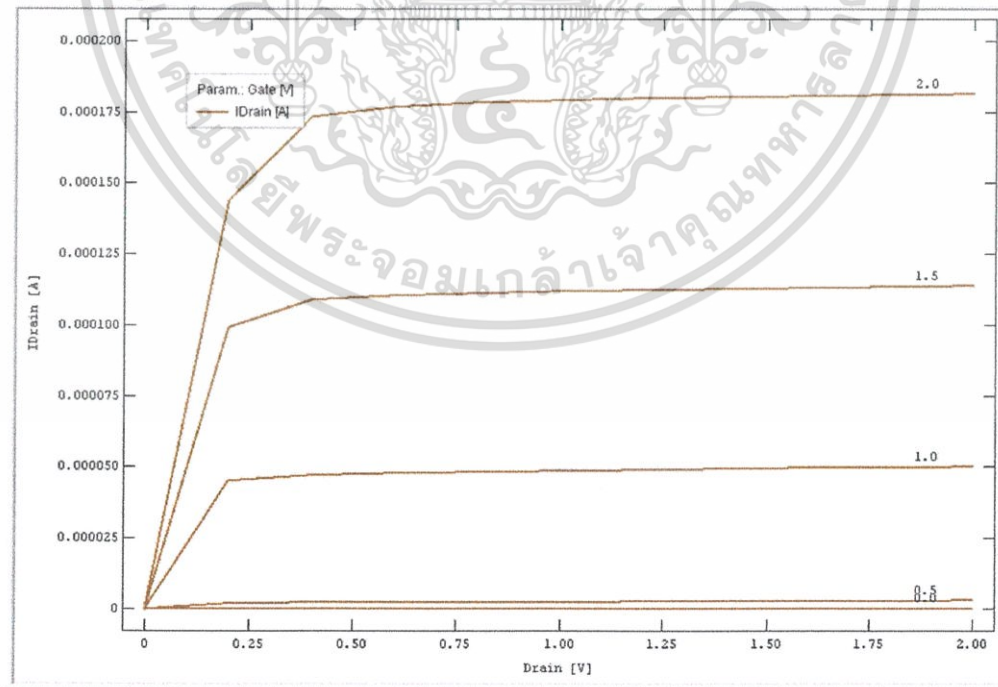
## 2) การวัดค่ากระแสเดรน

วัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ เทียบกับ  $V_{ds} = 1.0$  โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตดังรูปที่ 4.62 จากนั้นวัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ขั้วเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 0.0$  โวลต์, 0.5 โวลต์, 1.0 โวลต์, 1.5 โวลต์ และ 2.0 โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 4.63



รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

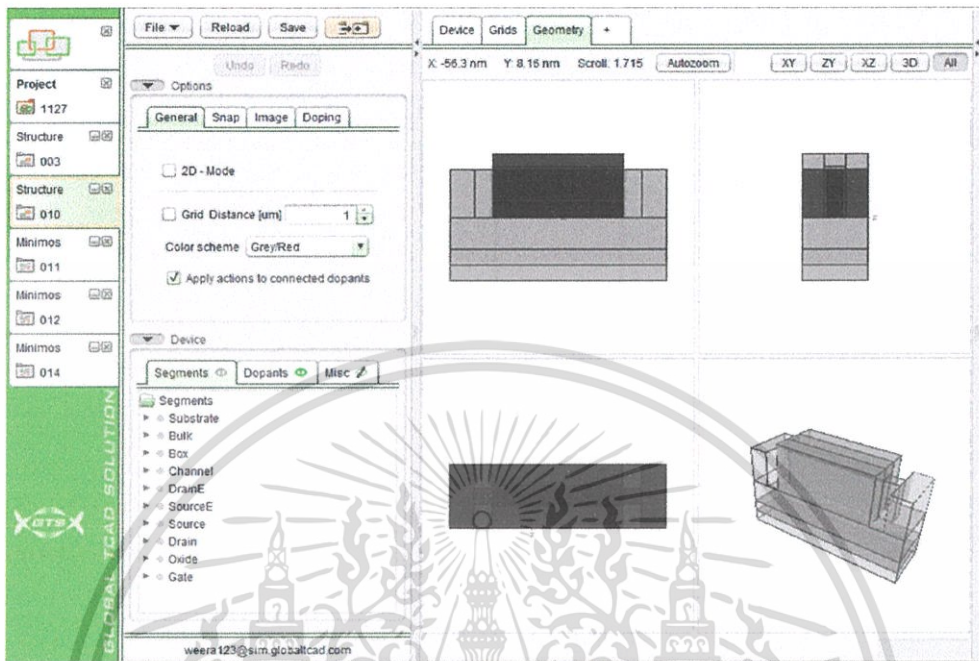
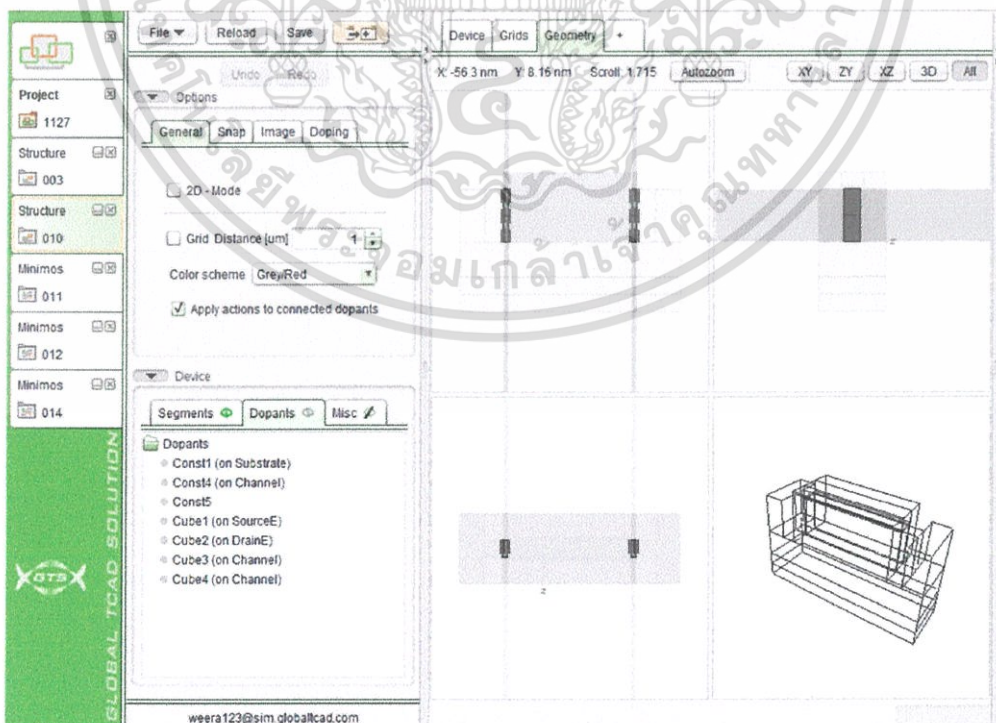


รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน

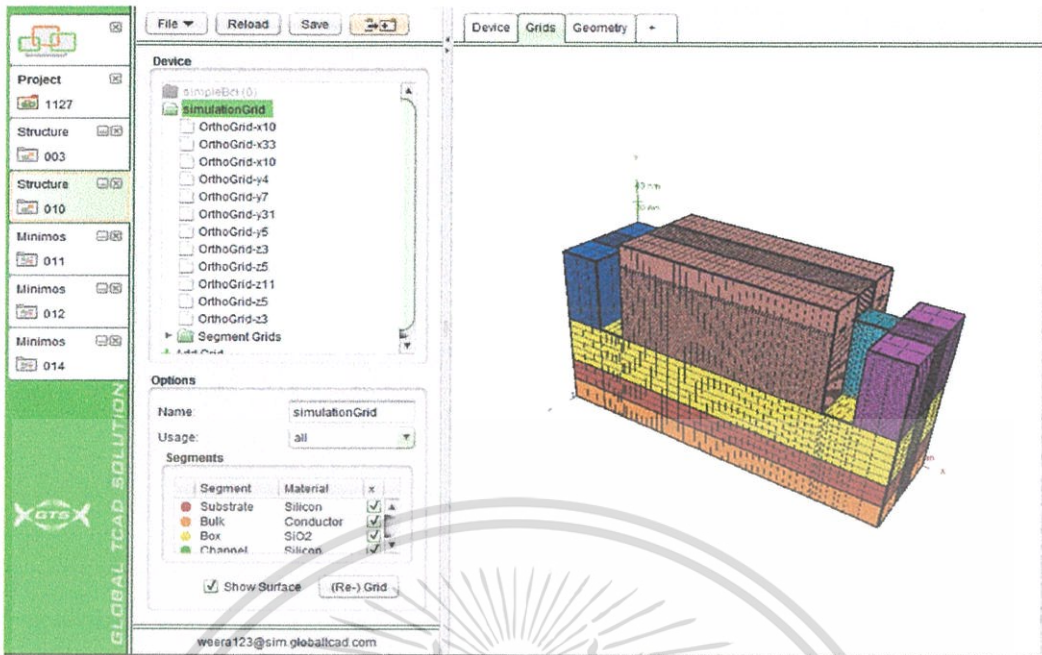
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5.1.5 ความยาว = 80 nm, ความกว้าง = 10 nm

## 1) ขั้นตอนการสร้าง

รูปที่ 4.64 การสร้างฟินเฟตที่มี  $L=80$  nm,  $W=10$  nmรูปที่ 4.65 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี  $L=80$  nm,  $W=10$  nm

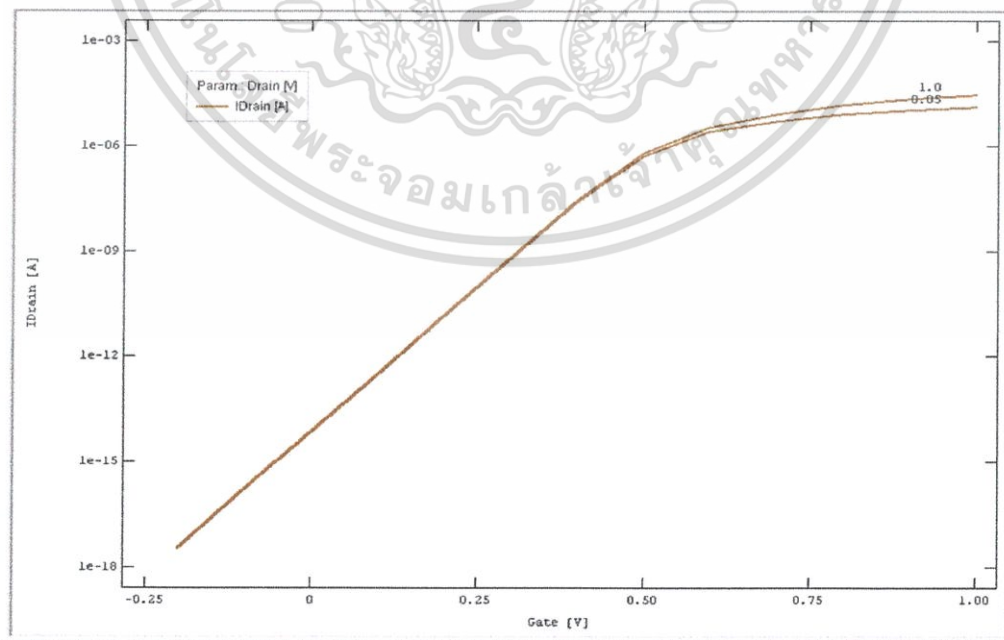
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.66 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี  $L = 80 \text{ nm}$ ,  $W = 10 \text{ nm}$

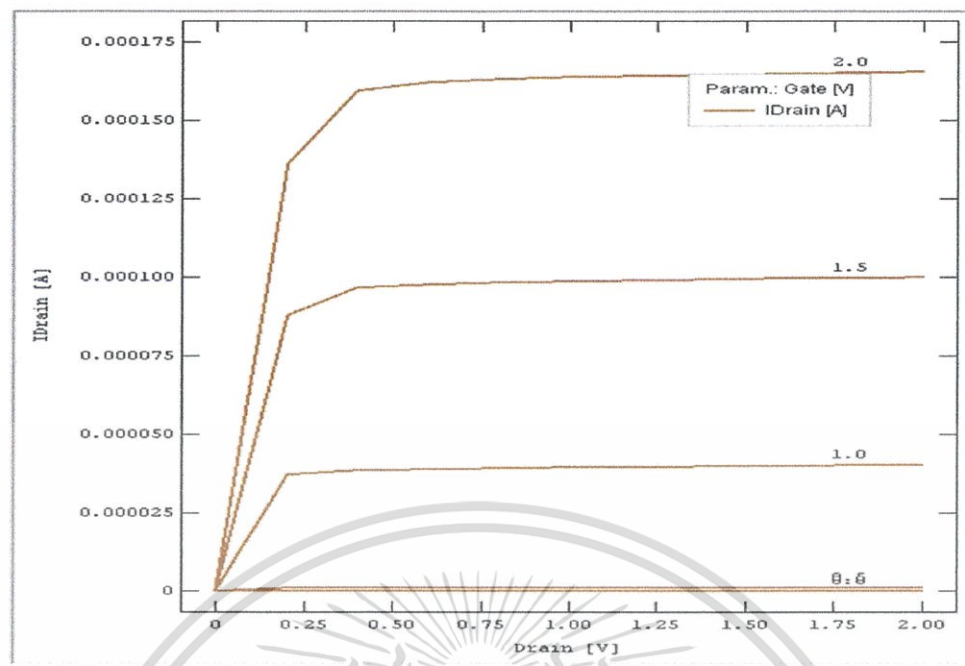
## 2) การวัดค่ากระแสเดรน

วัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ เทียบกับ  $V_{ds} = 1.0$  โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตดังรูปที่ 4.67 จากนั้นวัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันที่ขั้วเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 0.0$  โวลต์, 0.5 โวลต์, 1.0 โวลต์, 1.5 โวลต์ และ 2.0 โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 4.68



รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

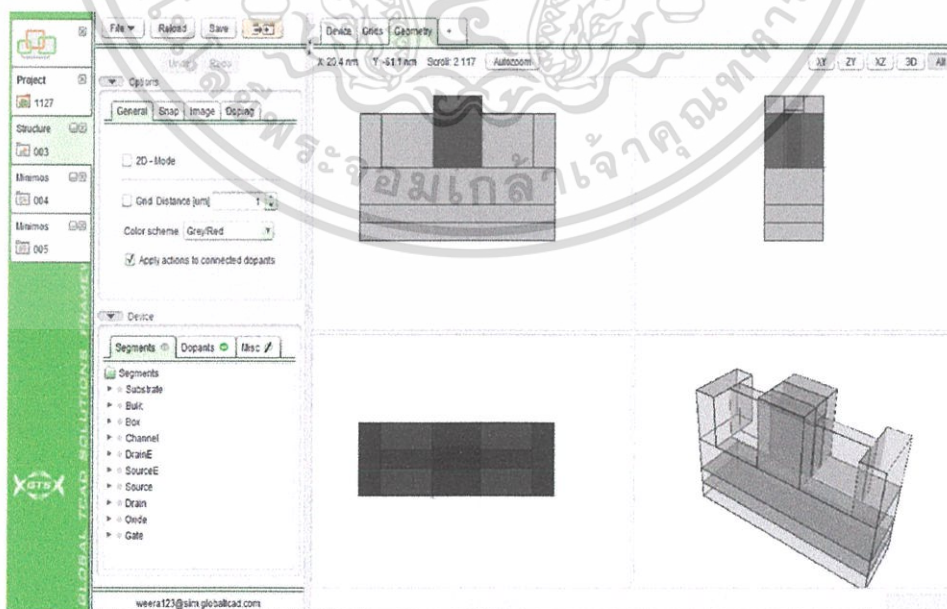


รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน

#### 4.5.2 การศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับความกว้างของช่องทางเดินกระแส

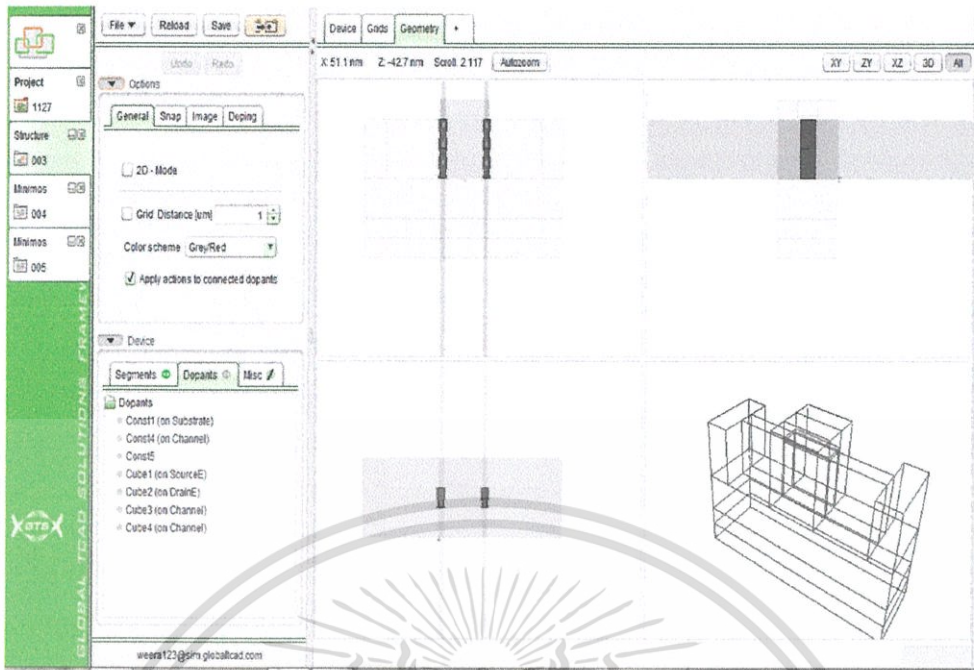
##### 4.5.2.1 ความกว้างของช่องทางเดินกระแส = 10 nm, ความยาว = 32 nm

##### 1) ขั้นตอนการสร้าง

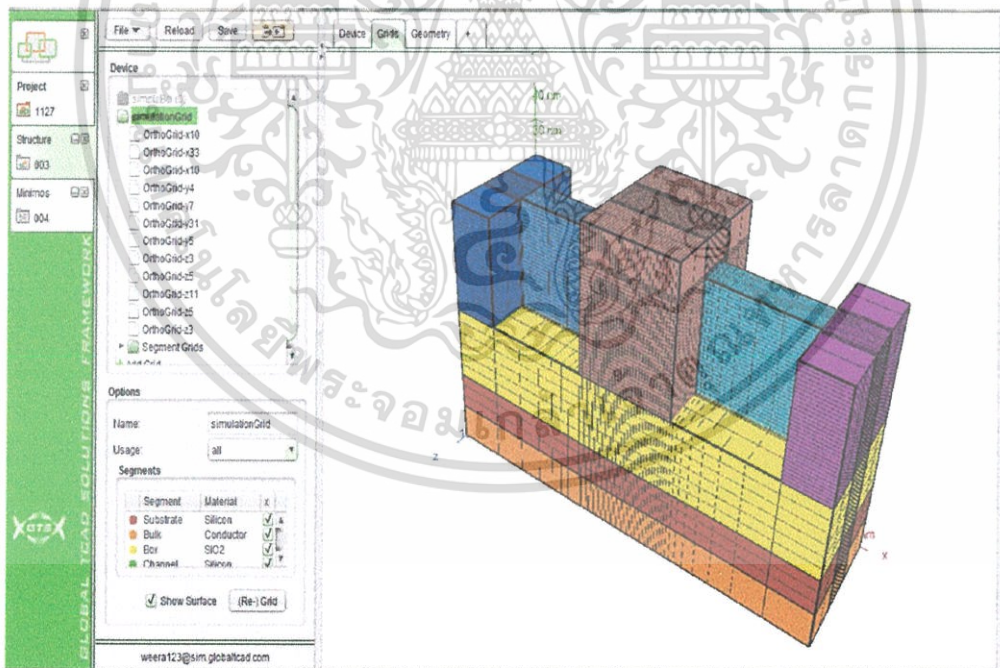


รูปที่ 4.69 การสร้างฟิสิกส์ที่มี  $W=10\text{ nm}$ ,  $L=32\text{ nm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี  $W = 10 \text{ nm}$ ,  $L = 32 \text{ nm}$



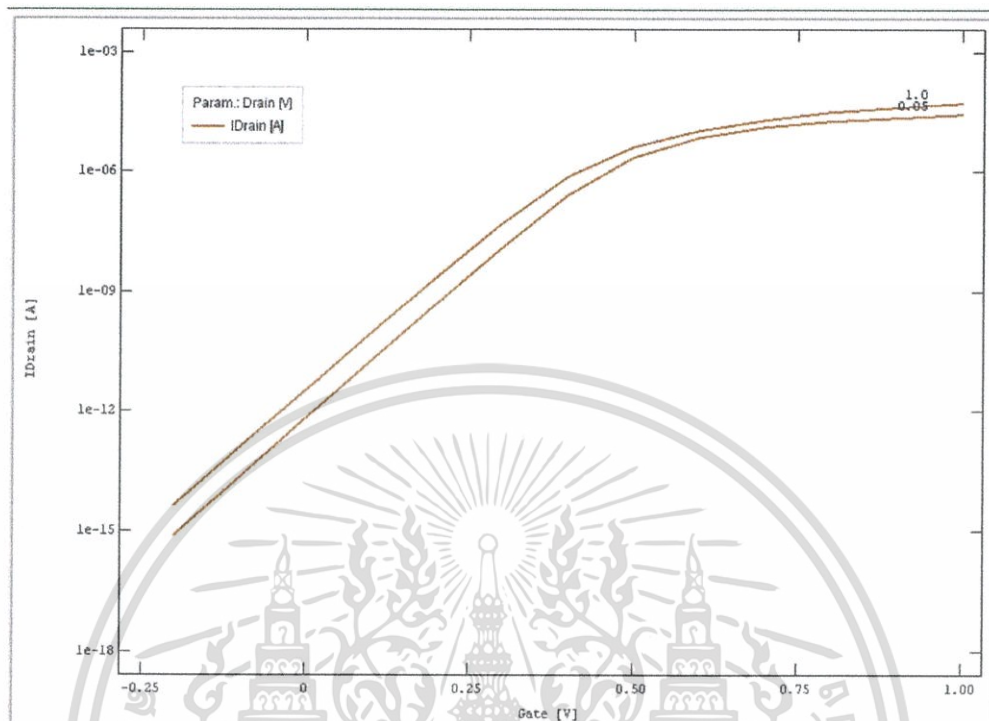
รูปที่ 4.71 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี  $W = 10 \text{ nm}$ ,  $L = 32 \text{ nm}$

## 2) การวัดค่ากระแสเดรน

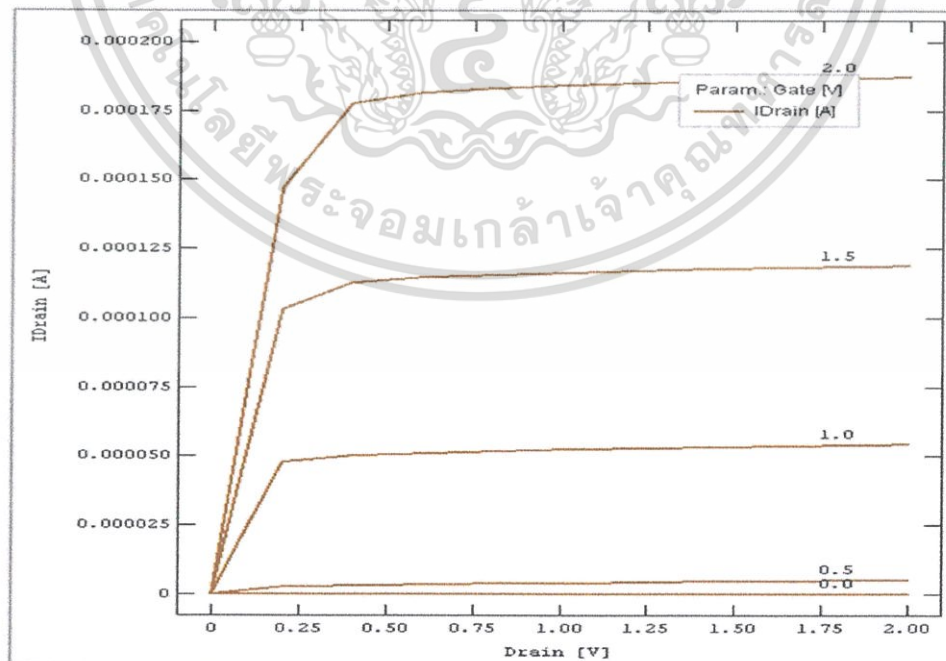
วัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ เทียบกับ  $V_{ds} = 1.0$  โวลต์ ได้กราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตดังรูปที่ 4.72 จากนั้นวัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ขั้วเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 0.0$  โวลต์, 0.5 โวลต์, 1.0 โวลต์, 1.5 โวลต์ และ 2.0 โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 4.73



รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

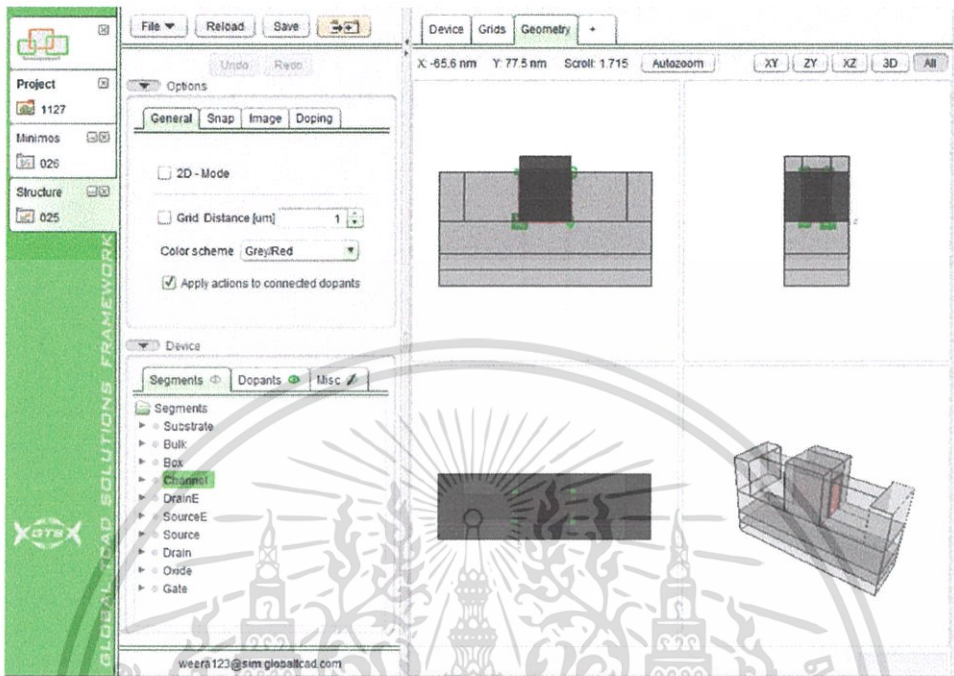


รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน

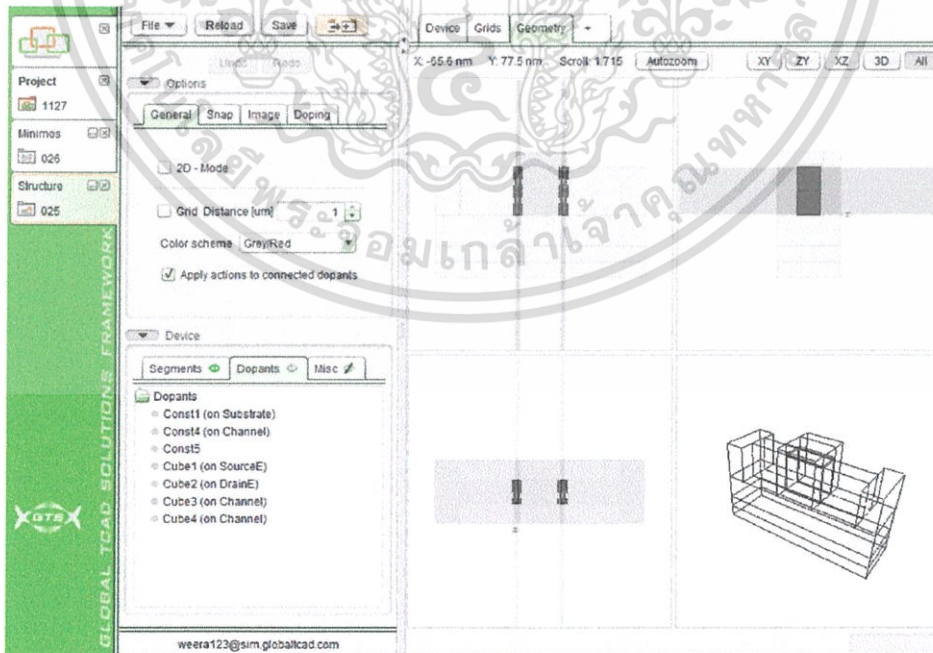
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2.2 ความกว้างของช่องทางเดินกระแส = 15 nm, ความยาว = 32 nm

##### 1) ขั้นตอนการสร้าง

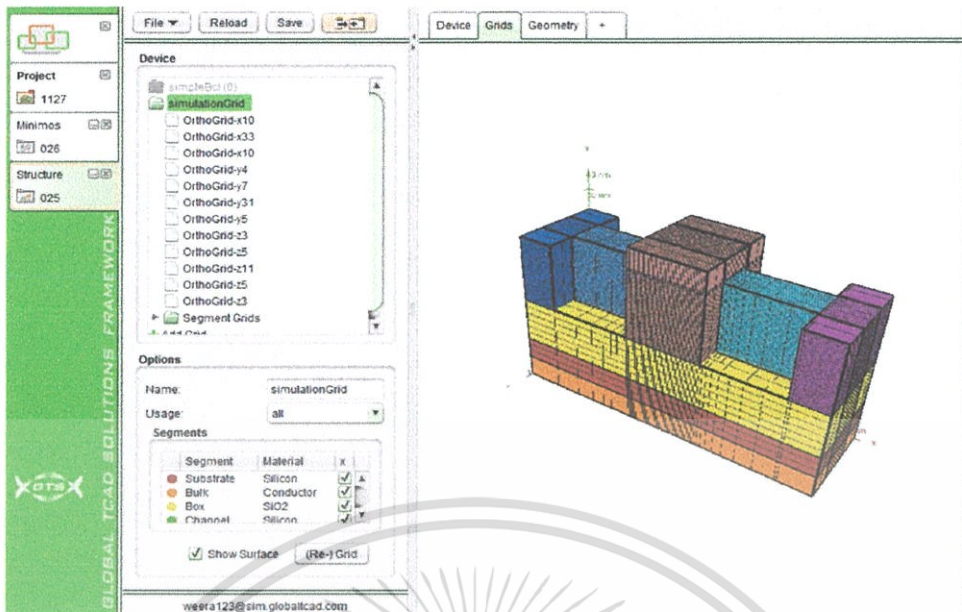


รูปที่ 4.74 การสร้างฟินเฟตที่มี  $W=15\text{ nm}$ ,  $L=32\text{ nm}$



รูปที่ 4.75 การแพร่สารเจือของฟินเฟตที่มี  $W=15\text{ nm}$ ,  $L=32\text{ nm}$

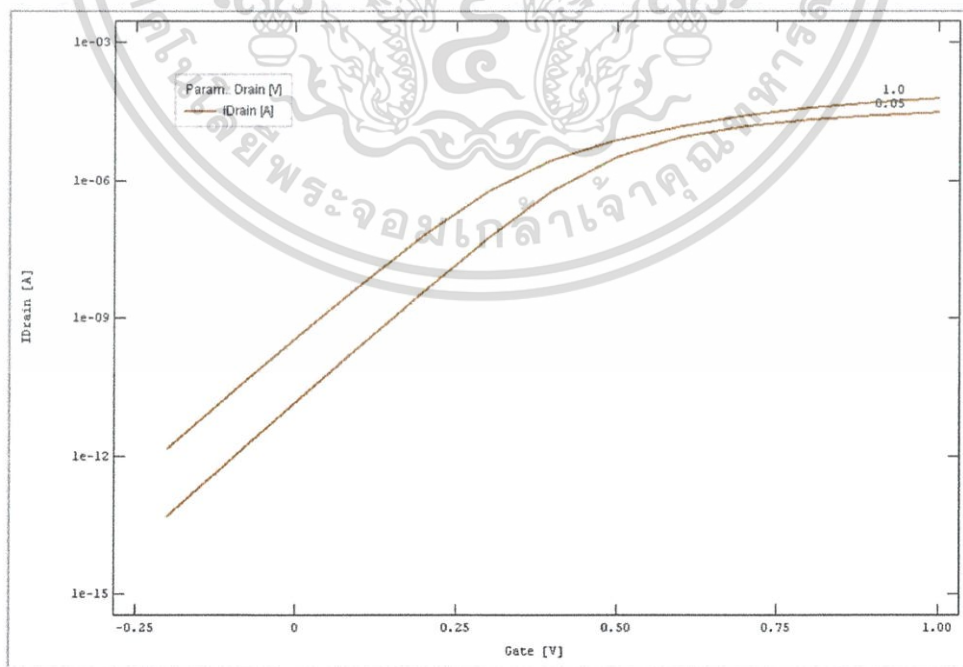
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.76 โครงสร้างของฟินเฟตที่มี  $W = 15 \text{ nm}$ ,  $L = 32 \text{ nm}$

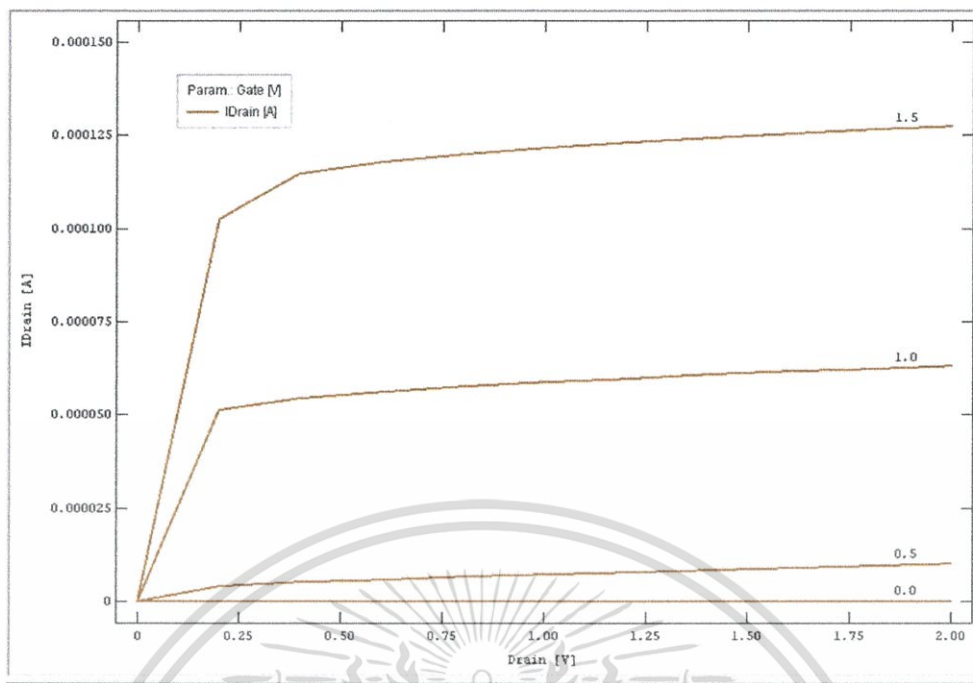
## 2) การวัดค่ากระแสเดรน

วัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ เทียบกับ  $V_{ds} = 1.0$  โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตดังรูปที่ 4.77 จากนั้นวัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันที่ขั้วเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 0.0$  โวลต์, 0.5 โวลต์, 1.0 โวลต์, 1.5 โวลต์ และ 2.0 โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 4.78



รูปที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

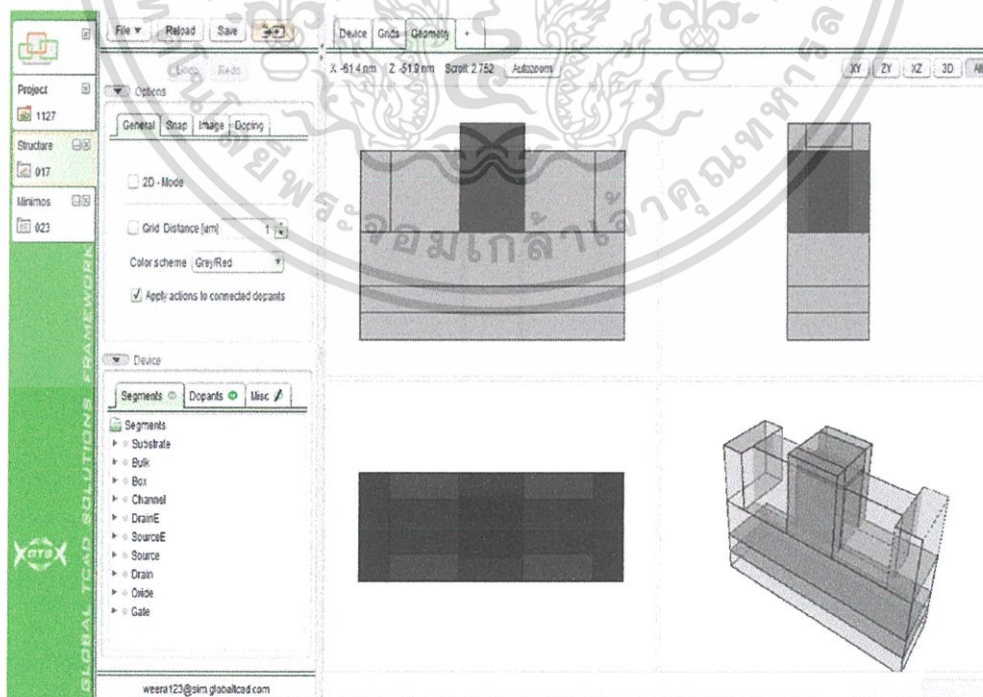
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน

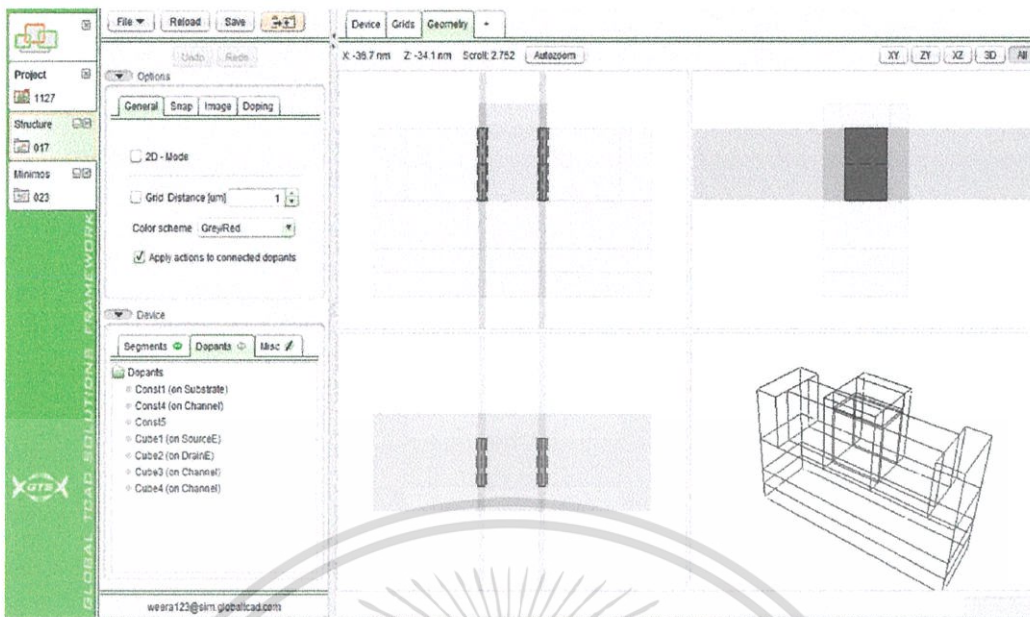
#### 4.5.2.3 ความกว้างของช่องทางเดินกระแส = 20 nm, ความยาว = 32 nm

##### 1) ขั้นตอนการสร้าง

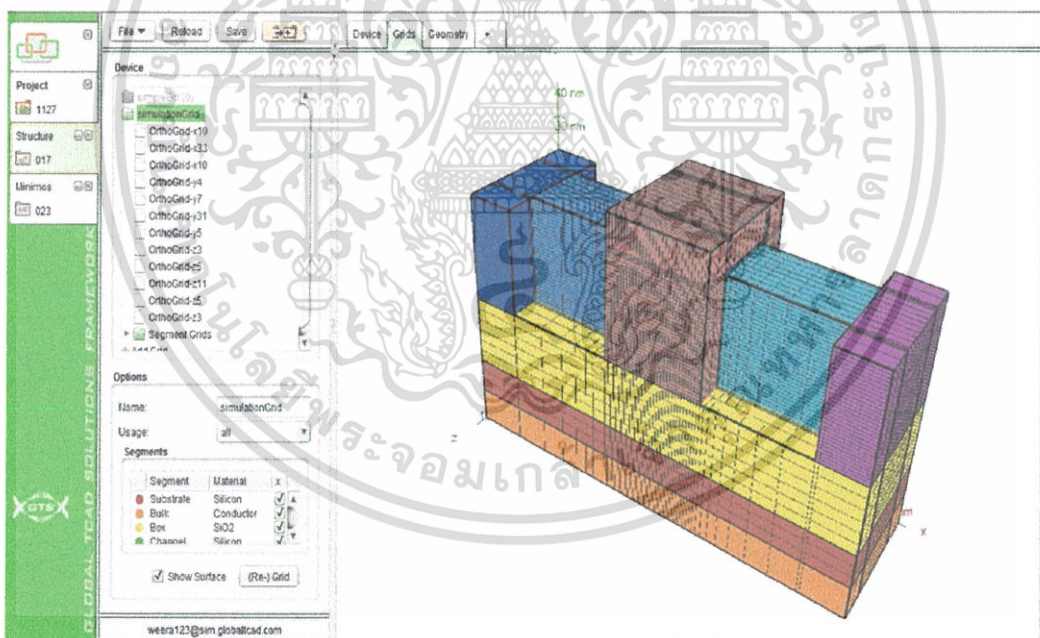


รูปที่ 4.79 การสร้างฟินเฟตที่มี  $W = 20 \text{ nm}$ ,  $L = 32 \text{ nm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.80 การแพร่สารเจือของฟิเนลที่มี  $W = 20 \text{ nm}$ ,  $L = 32 \text{ nm}$

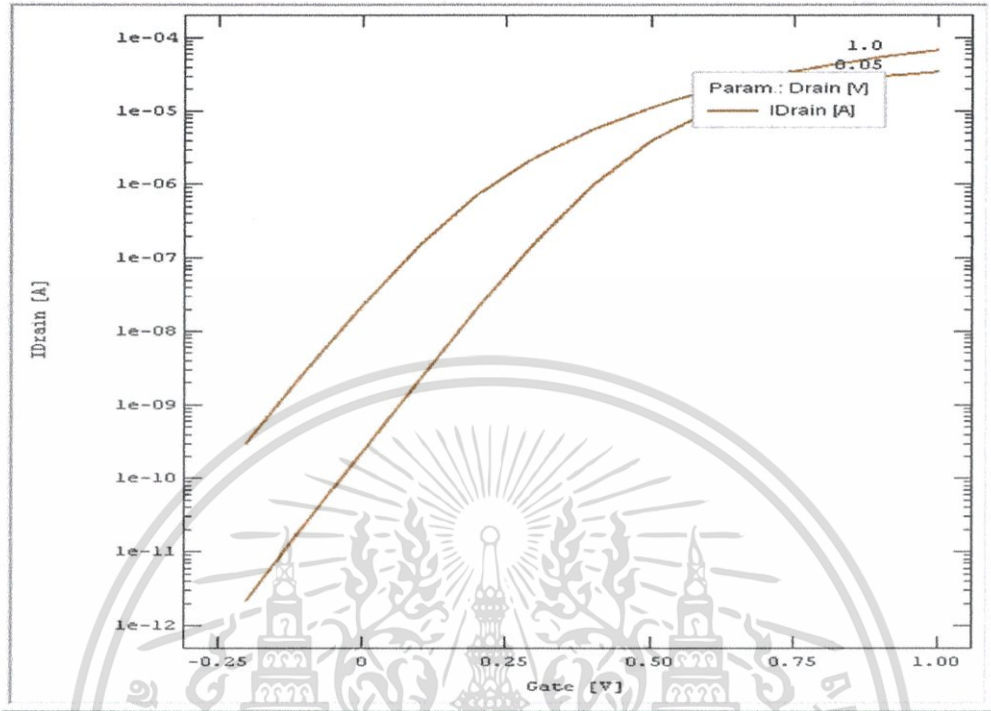


รูปที่ 4.81 โครงสร้างของฟิเนลที่มี  $W = 20 \text{ nm}$ ,  $L = 32 \text{ nm}$

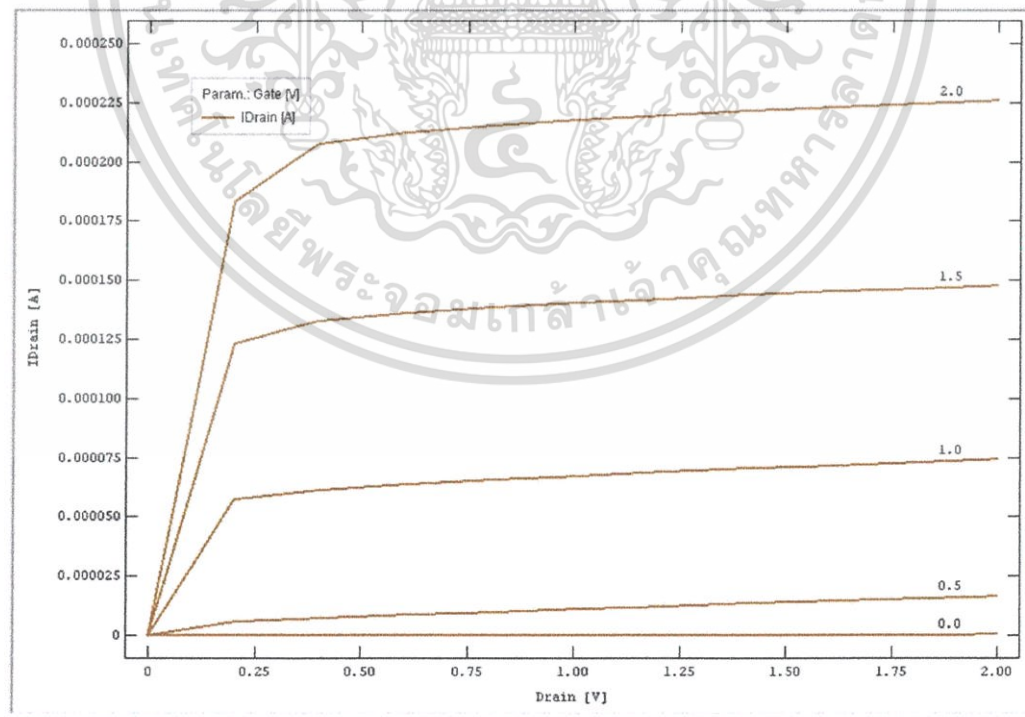
2) การวัดค่ากระแสเดรน

วัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ เทียบกับ  $V_{ds} = 1.0$  โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตดังรูปที่ 4.82 จากนั้นวัดกระแสเดรนเทียบกับแรงดันเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ขั้วเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 0.0$  โวลต์, 0.5 โวลต์, 1.0 โวลต์, 1.5 โวลต์ และ 2.0 โวลต์ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันที่ขั้วเดรน ดังรูปที่ 4.83



รูปที่ 4.82 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต



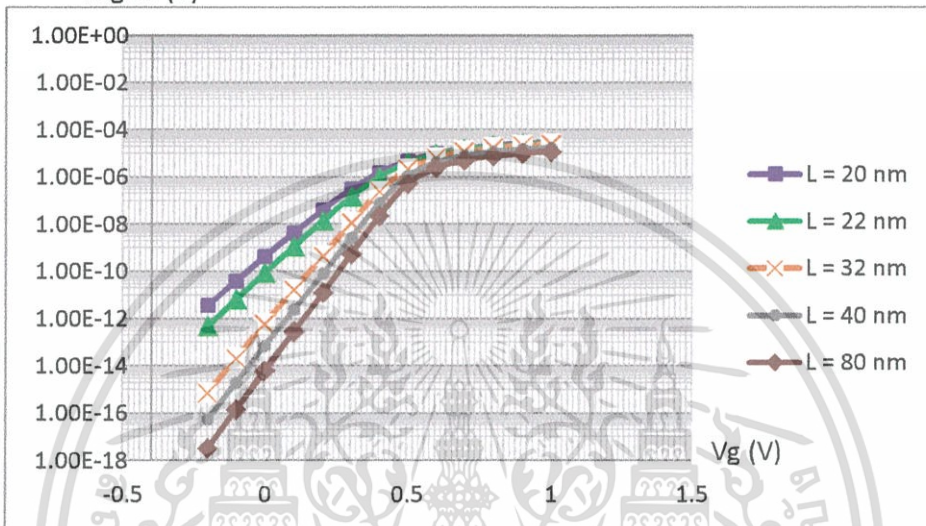
รูปที่ 4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต

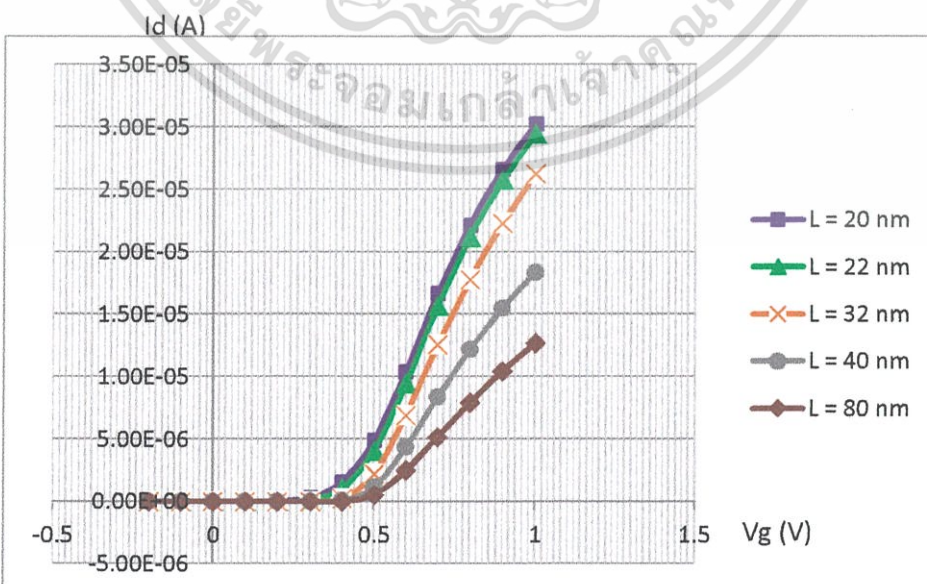
เมื่อกำหนดให้ความกว้าง (W) ของช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับ 10 nm แล้วเปลี่ยนค่าความยาว (L) ของช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับ 20 nm, 22 nm, 32 nm, 40 nm และ 80 nm แล้ววัดค่ากระแสเดรนเทียบกับแรงดันเกตที่ค่า  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.84



รูปที่ 4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ความยาวช่องทางเดินกระแสค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต เมื่อให้  $V_{ds} = 0.05$  โวลต์ พบว่าความยาวช่องทางเดินกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเดรนมีค่าลดลง

#### 4.5.3.2 ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Vth)



รูปที่ 4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ความยาวช่องทางเดินกระแสค่าต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.85 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ความยาวช่องทางเดินกระแสค่าต่างๆ พบว่าความยาวของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ฟินเฟตเริ่มทำงานเร็วขึ้น

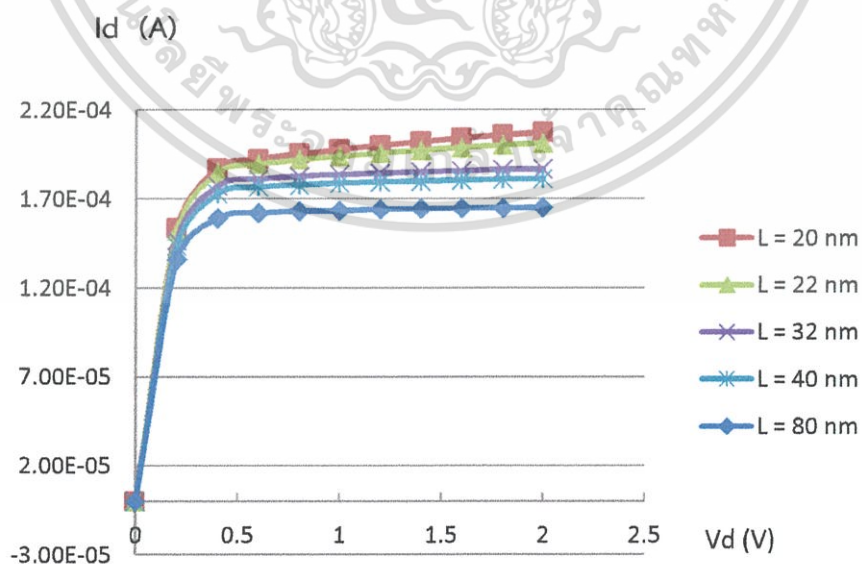
#### 4.5.3.3 ค่า Subthreshold Swing, SS

ตารางที่ 1 ค่า Subthreshold Swing ที่ความยาวของช่องทางเดินกระแสค่าต่างๆ

L (nm)	Vth (V)	ss (mV/dec)
20	0.42	140
22	0.44	130
32	0.47	100
40	0.48	80
80	0.50	70

จากตารางที่ 1 แสดงการหาค่า Subthreshold Swing โดยค่าความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับ 20 nm, 22 nm, 32 nm, 40 nm และ 80 nm ตามลำดับ ที่ความยาวช่องทางเดินกระแสมีเท่าเท่ากับ 10 nm พบว่าเมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสเพิ่มจะทำค่า Subthreshold Swing มีค่าลดลง

#### 4.5.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรนเมื่อเปลี่ยนความยาวของช่องทางเดินกระแส (L)

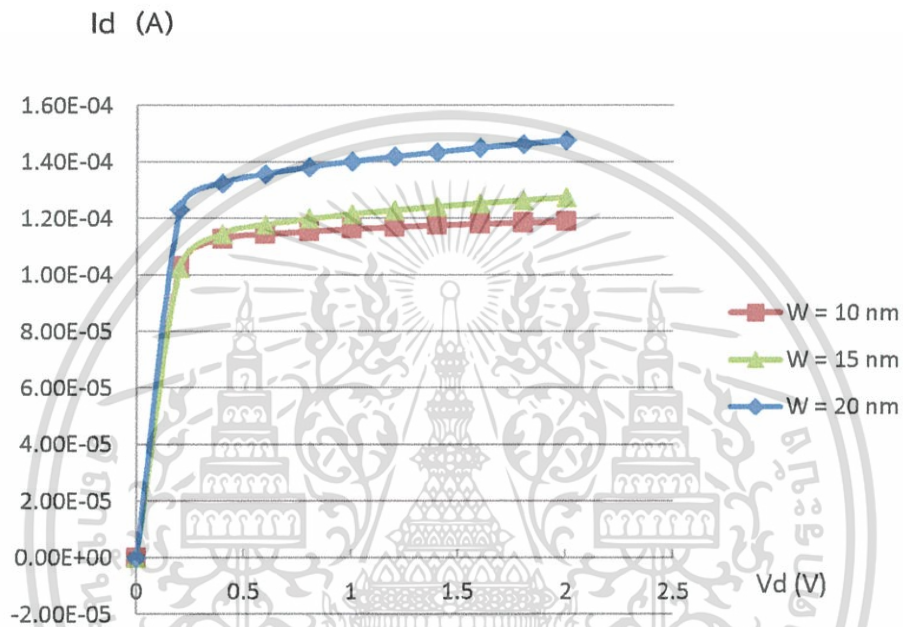


รูปที่ 4.86 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเดรนที่ความยาวของช่องทางเดินกระแสค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.86 เมื่อกำหนดให้ความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับ 10 nm จากนั้นเปลี่ยนค่าความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น 20 nm, 22 nm, 32 nm, 40nm และ 80 nm ตามลำดับ แล้ววัดค่ากระแสเทียบกับแรงดันเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 2$  โวลต์ พบว่าเมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเดรนมีค่าลดลง

#### 4.5.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรนเมื่อเปลี่ยนความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W)



รูปที่ 4.87 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเดรนที่ความกว้างของช่องทางเดินกระแสค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.87 เมื่อกำหนดให้ความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับ 32 nm จากนั้นเปลี่ยนค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแสเป็น 10 nm, 15 nm และ 20 nm ตามลำดับ แล้ววัดค่ากระแสเดรนเทียบกับแรงดันเดรน ที่ค่า  $V_{gs} = 2$  โวลต์ พบว่าเมื่อความกว้างของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์และการใช้โปรแกรม TCAD ในการทดลองสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าสามารถสร้างอุปกรณ์จากแม่แบบที่มีอยู่ในโปรแกรมและสามารถวัดค่าต่างๆได้ทันที และยังสามารถแก้ไขพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของอุปกรณ์ได้ เช่น ความยาวของเกต ความหนาของเกตออกไซด์ และค่าอื่นๆด้วยการเปลี่ยนตัวเลขของพารามิเตอร์นั้นๆ จากการทดลองสร้างมอสทรานซิสเตอร์ พบว่าความหนาของเกตออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดนมี่ค่าลดลง และพบว่าความยาวของเกตมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่ขั้วเดนมี่ค่าลดลง และจากการสร้างฟินเฟต พบว่าเมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเดนมี่ค่าลดลง และจากการหาค่า  $V_{th}$  กับ SS พบว่าเมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้  $V_{th}$  เพิ่มขึ้นแต่ค่า SS จะลดลง และพบว่าเมื่อความกว้างของช่องทางเดินกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเดนมี่ค่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้จากการศึกษาการใช้โปรแกรมยังพบว่าโปรแกรม TCAD มีความสะดวกรวดเร็วในแสดงผลออกมาเป็นกราฟ โดยปริมาณที่ต้องการวัดจะปรากฏให้อัตโนมัติสามารถเลือกได้ทันทีและยังสามารถกำหนดรูปแบบกราฟที่แตกต่างได้ สามารถรวมกราฟหลายๆการทดลองได้ ซึ่งโปรแกรมนี้นี้มีประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก และสามารถพัฒนาไปสู่การสร้างอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้นได้

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจทำการออกแบบอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลง
2. สามารถใช้โปรแกรมได้ทั้งแบบติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์และแบบออนไลน์ แต่การใช้งานแบบออนไลน์อาจมีการล่าช้าของอินเทอร์เน็ต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบอินเทอร์เน็ตของแต่ละพื้นที่
3. ในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจทำการสร้างหรือพัฒนาอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] โยธิน วงประเสริฐ. กระบวนการผลิตวัสดุสารกึ่งตัวนำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [2] การสร้างวงจรถนแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Fabrication). ค้นเมื่อ 18 ตุลาคม 2557, จาก <http://sanong2003.tripod.com/icm1-03.htm>.
- [3] W. Scot Ruska. *Microelectronics Processing : An Introduction to the Manufacture of Integrated Circuits*. International Edition. Singapore. McGraw-Hill, Inc. 1998
- [4] ธนันต์ ศรีสกุล. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Mosfet. ค้นเมื่อ 18 ตุลาคม 2557, จาก <http://www.wara.com/article-801.html>.
- [5] Somsak. แร่งตันซีดีเริ่ม. ค้นเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2557, จาก [http://www.kmitl.ac.th/~kchsomsa/somsak/crse\\_int\\_icd/mos\\_transistor.pdf](http://www.kmitl.ac.th/~kchsomsa/somsak/crse_int_icd/mos_transistor.pdf)
- [6] ที่มาของฟินเฟต. ค้นเมื่อ 23 เมษายน 2558, จาก <http://www.ryt9.com/s/prg/123901>
- [7] Asif I. Khan and Muhammad K. Ashraf, "Study of Electron Distribution of Undoped UltraThin Body Symmetric Double Gate SOI MOSFET in Gate Confinement Direction," pp. 1-6
- [8] Sherif A. Tawfik, Zhiyu Liu, and Volkan Kursun, "Independent-Gate and Tied-Gate FinFET SRAM Circuits: Design Guidelines for Reduced Area and Enhanced Stability," IEEE ICM, 2007
- [9] Tsu Jae, King Liu. *FinFET History, Fundamentals and Future*. ค้นหาเมื่อ 1 เมษายน 2558, จาก [http://www.eecs.berkeley.edu/~tking/presentations/KingLiu\\_2012VLSI-Tshortcourse](http://www.eecs.berkeley.edu/~tking/presentations/KingLiu_2012VLSI-Tshortcourse)
- [10] บริษัท GTS. *การใช้งานโปรแกรม GTS Framework*. ค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.globaltcad.com/en/home.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

ก. กำหนดค่า  $L(\text{nm})$ ,  $W(\text{nm})$ ,  $V_g(\text{V})$  และ  $V_{ds}(\text{V})$

$$W = 32 \text{ nm}$$

$$L = 20, 22, 32, 40, 80 \text{ nm}$$

$$V_{ds} = 0.05, 1 \text{ V}$$

$$V_g = -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 \text{ V}$$

ตารางที่ ก. ข้อมูล Current Drain (A)

$V_g$ (V)	$L = 20 \text{ nm}$		$L = 22 \text{ nm}$		$L = 32 \text{ nm}$	
	Id (A)		Id (A)		Id (A)	
	$V_{ds} = 0.05$	$V_{ds} = 1$	$V_{ds} = 0.05$	$V_{ds} = 1$	$V_{ds} = 0.05$	$V_{ds} = 1$
-0.2	$3.74 \times 10^{-12}$	$5.50 \times 10^{10}$	$4.70 \times 10^{13}$	$3.26 \times 10^{11}$	$7.69 \times 10^{-16}$	$4.27 \times 10^{-15}$
-0.1	$4.16 \times 10^{11}$	$5.35 \times 10^{-9}$	$6.62 \times 10^{12}$	$4.20 \times 10^{10}$	$2.20 \times 10^{-14}$	$1.19 \times 10^{-13}$
0	$4.48 \times 10^{10}$	$4.64 \times 10^{-8}$	$9.09 \times 10^{11}$	$5.06 \times 10^{-9}$	$6.28 \times 10^{-13}$	$3.28 \times 10^{-12}$
0.1	$4.58 \times 10^{-9}$	$3.18 \times 10^{-7}$	$1.20 \times 10^{-9}$	$5.37 \times 10^{-8}$	$1.76 \times 10^{-11}$	$8.80 \times 10^{-11}$
0.2	$4.22 \times 10^{-8}$	$1.42 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-8}$	$4.25 \times 10^{-7}$	$4.81 \times 10^{-10}$	$2.25 \times 10^{-9}$
0.3	$3.15 \times 10^{-7}$	$4.05 \times 10^{-6}$	$1.51 \times 10^{-7}$	$1.98 \times 10^{-6}$	$1.23 \times 10^{-8}$	$5.11 \times 10^{-8}$
0.4	$1.58 \times 10^{-6}$	$8.49 \times 10^{-6}$	$1.06 \times 10^{-6}$	$5.54 \times 10^{-6}$	$2.51 \times 10^{-7}$	$7.39 \times 10^{-7}$
0.5	$4.92 \times 10^{-6}$	$1.48 \times 10^{-5}$	$4.06 \times 10^{-6}$	$1.13 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-6}$	$4.03 \times 10^{-6}$
0.6	$1.04 \times 10^{-5}$	$2.29 \times 10^{-5}$	$9.46 \times 10^{-6}$	$1.91 \times 10^{-5}$	$6.93 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-5}$
0.7	$1.67 \times 10^{-5}$	$3.24 \times 10^{-5}$	$1.57 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^{-5}$	$1.26 \times 10^{-5}$	$1.92 \times 10^{-5}$
0.8	$2.22 \times 10^{-5}$	$4.30 \times 10^{-5}$	$2.12 \times 10^{-5}$	$3.90 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-5}$	$2.94 \times 10^{-5}$
0.9	$2.66 \times 10^{-5}$	$5.44 \times 10^{-5}$	$2.57 \times 10^{-5}$	$5.04 \times 10^{-5}$	$2.23 \times 10^{-5}$	$4.06 \times 10^{-5}$
1	$3.03 \times 10^{-5}$	$6.64 \times 10^{-5}$	$2.95 \times 10^{-5}$	$6.24 \times 10^{-5}$	$2.63 \times 10^{-5}$	$5.24 \times 10^{-5}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. ข้อมูล Current Drain (A) (ต่อ)

V <sub>g</sub> (V)	L = 40 nm		L = 80 nm	
	I <sub>d</sub> (A)		I <sub>d</sub> (A)	
	V <sub>ds</sub> = 0.05	V <sub>ds</sub> = 1	V <sub>ds</sub> = 0.05	V <sub>ds</sub> = 1
-0.2	$5.71 \times 10^{-17}$	$1.43 \times 10^{-16}$	$3.27 \times 10^{-18}$	$3.59 \times 10^{-18}$
-0.1	$2.03 \times 10^{-15}$	$5.05 \times 10^{-15}$	$1.47 \times 10^{-16}$	$1.62 \times 10^{-16}$
0	$7.16 \times 10^{-14}$	$1.77 \times 10^{-13}$	$6.56 \times 10^{-15}$	$7.30 \times 10^{-15}$
0.1	$2.50 \times 10^{-12}$	$6.11 \times 10^{-12}$	$2.93 \times 10^{-13}$	$3.29 \times 10^{-13}$
0.2	$8.59 \times 10^{-11}$	$2.06 \times 10^{-10}$	$1.30 \times 10^{-11}$	$1.47 \times 10^{-11}$
0.3	$2.85 \times 10^{-9}$	$6.60 \times 10^{-9}$	$5.72 \times 10^{-10}$	$6.56 \times 10^{-10}$
0.4	$8.23 \times 10^{-8}$	$1.71 \times 10^{-7}$	$2.37 \times 10^{-8}$	$2.77 \times 10^{-8}$
0.5	$1.13 \times 10^{-6}$	$1.80 \times 10^{-6}$	$5.27 \times 10^{-7}$	$6.39 \times 10^{-7}$
0.6	$4.35 \times 10^{-6}$	$6.18 \times 10^{-6}$	$2.49 \times 10^{-6}$	$3.43 \times 10^{-6}$
0.7	$8.37 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^{-5}$	$5.18 \times 10^{-6}$	$8.25 \times 10^{-6}$
0.8	$1.22 \times 10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-5}$	$7.91 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-5}$
0.9	$1.55 \times 10^{-5}$	$2.80 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-5}$	$2.12 \times 10^{-5}$
1	$1.84 \times 10^{-5}$	$3.65 \times 10^{-5}$	$1.27 \times 10^{-5}$	$2.85 \times 10^{-5}$

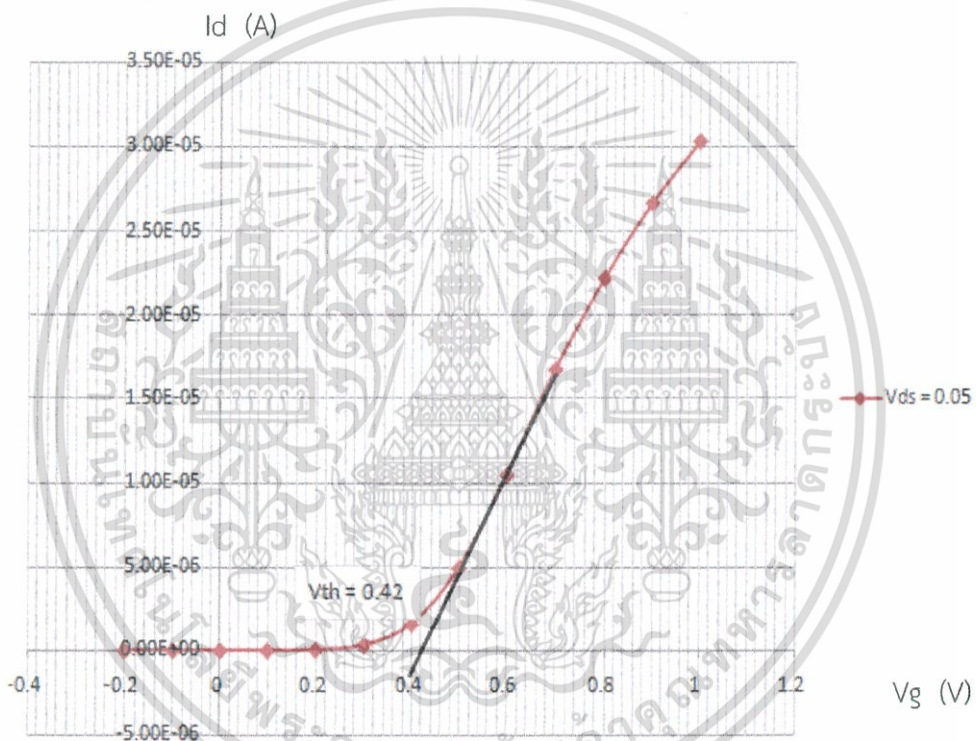
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## การคำนวณค่าแรงดันขีดเริ่มและค่า Subthreshold swing (ss)

## ข.1 หาค่า Threshold Voltage

โดยเลือกข้อมูลของเส้นกราฟที่  $V_{ds} = 0.05$  V



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต เมื่อ  $V_{ds} = 0.05$  ของ  $L=20$  nm

จากรูปที่ ข.1 จะหาค่า  $V_{th}$  ได้ออกมาเท่ากับ  $0.42$  V นำค่าที่ได้ไปใช้ในการหา ss ในขั้นต่อไป

## ข.2 คำนวณหา Subthreshold swing (ss)

การคำนวณหาค่า ss ได้จากการอ่านกราฟจาก กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (scale log) กับแรงดันเกต

ใน 1 ช่วง log

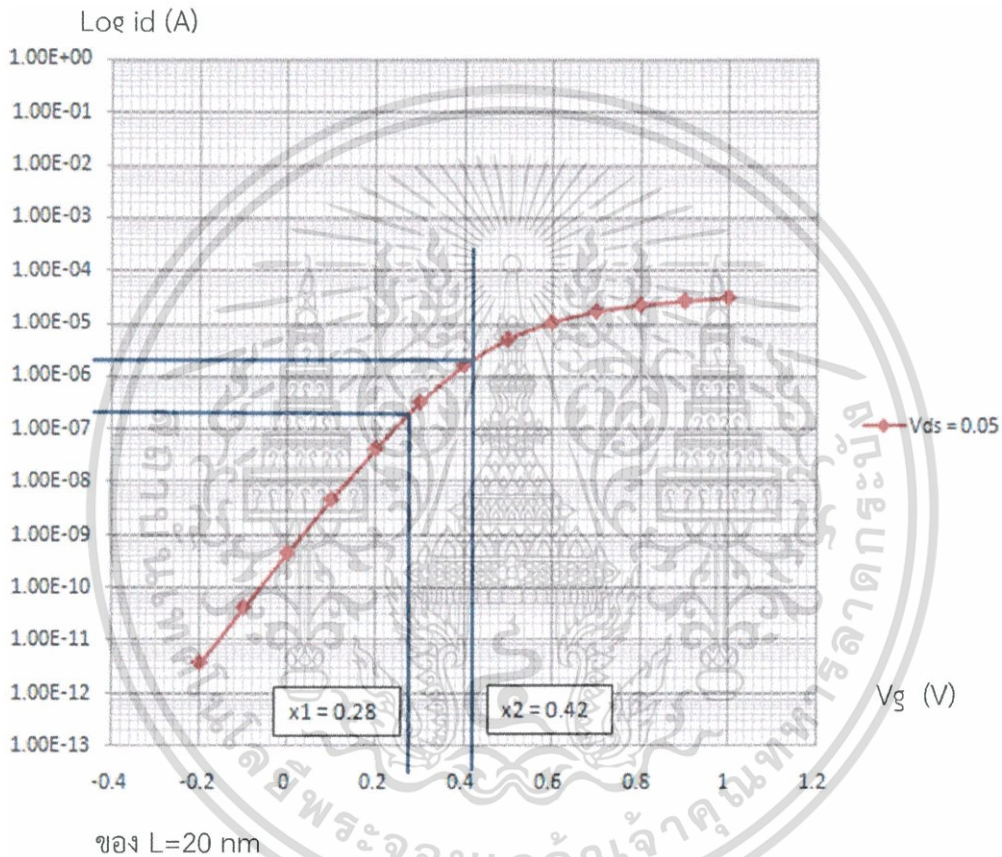
$$\text{Subthreshold swing (ss)} = V_{g2} - V_{g1} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $V_{G2}$  คือ ค่าแรงดันขีดเริ่ม หรือ  $V_{th}$  (V)  
 $V_{G1}$  คือ ค่าแรงดันเกจ ใน 1 ช่วง log (V)

นำข้อมูลจากตารางที่ ข.2 เมื่อ  $V_{ds} = 0.05$  V มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน(scale log)กับแรงดันเกจ

รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน(scale log)กับแรงดันเกจ เมื่อ  $V_{ds} = 0.05$  V



หมายเหตุ :  $V_{th} = V_{G2} = x_2$  ,  $V_{G1} = x_1$

- วิธีการคือ
1. นำค่า  $V_{th}$  ที่ได้จากขั้นตอน ข.2.1 ลากขึ้นไปตัดเส้นกราฟ
  2. จากนั้นลากจากจุดตัดบนเส้นกราฟลากเข้าหาแกน y หรือ  $\log I_{d2}$
  3. หาค่า  $\log I_{d1}$  จากการเว้น 1 ช่วง log ลากมาตัดเส้นกราฟ
  4. จากจุดตัดเส้นกราฟลากลงตัดแกน x หรือ  $V_g$  จะได้  $x_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่า ss จากสมการ (1)

แทนค่าลง โดยที่  $V_{g2} = 0.42 \text{ V}$ ,  $V_{g1} = 0.28 \text{ V}$

$$\text{Subthreshold swing} = 0.42 - 0.28 \text{ V/dec}$$

$$= 0.14 \text{ V/de} = 140 \text{ mV/dec}$$

จากการคำนวณข้างต้น เมื่อทำงานครบทุกค่า คือ  $L = 20, 22, 32, 40, 80 \text{ nm}$  สามารถสรุปค่า ss ได้เป็นดังตารางที่ ข

ตารางที่ ข ผลการคำนวณค่า ss

L (nm)	$V_{g1}$ (V)	$V_{g2}$ (V)	ss (mV/dec)
20	0.28	0.42	140
22	0.31	0.44	130
32	0.37	0.47	100
40	0.40	0.48	80
80	0.43	0.50	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้