

การสร้างพีแชนแนลดีมอสทรานซิสเตอร์เอ็นฮานซ์เมนท์โหมดแบบเกตโลหะ  
FABRICATION OF METAL GATE P-CHANNEL ENHANCEMENT MODE  
DMOS TRANSISTOR



โดย

นายอริคม ศิริรัตนกุล

นายอนุจิน ขวัญจิตรพิทักษ์

เลขที่.....  
เลขทะเบียน 42640  
วัน, เดือน, ปี 5 ส.ย. 2545

b.....  
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างพีเชนแนลดีมอสทรานซิสเตอร์เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดแบบเกตโลหะ  
FABRICATION OF METAL GATE P-CHANNEL ENHANCEMENT MODE  
DMOS TRANSISTOR



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2543

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างพีเซนแนลคิมอสทรานซิสเตอร์เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดแบบเกตโลหะ

ผู้จัดทำ

1. นายอริคม ศิริรัตนกุล รหัส 40010934
2. นายอนุนจิน ขวัญจิตรพิทักษ์ รหัส 40010940

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การสร้างพีเชนแนลดีมอสทรานซิสเตอร์เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดแบบเกตโลหะ  
FABRICATION OF METAL GATE P-CHANNEL ENHANCEMENT MODE  
DMOS TRANSISTOR

ชื่อนักศึกษา 1. นายอริคม ศิริรัตนกุล รหัส 40010934

2. นายอนุจิน ขวัญจิตรพิทักษ์ รหัส 40010940

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



*ด.ต.ท. น. น. น.*

(อาจารย์สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสร้างพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดแบบเกตโลหะ

นายอริคม ศิริรัตนกุล

นายอนุจิน ขวัญจิตรพิทักษ์

อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2543

### บทคัดย่อ

ในปฏิญานพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาการสร้างพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ รวมถึงการควบคุมค่าแรงดันขีดเริ่ม และความถี่รอยต่อของชั้นเอ็นเบสในพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ จากสาเหตุที่กล่าวมา จึงต้องทดลองสร้างเอ็นเวลบนแผ่นทดสอบ เพื่อควบคุมความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวและความถี่ของเวล พบว่าเอ็นเวลที่เหมาะสม จะมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวมีค่าเท่ากับ  $5.0 \times 10^{15} - 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  จากนั้นจึงสร้างมอสคาปาซิเตอร์ เพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเวลที่ได้ ซึ่งมอสคาปาซิเตอร์ที่สร้างขึ้นนั้น มีค่าแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ  $-6.0 \text{ V}$  แล้วจึงนำไปสร้างเป็นพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ หลังจากนั้นจึงนำไปวัดคุณสมบัติทางกายภาพ เพื่อตรวจสอบความถี่ของชั้นเอ็นเบส และวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบค่าของแรงดันขีดเริ่มและการทำงานของพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ พบว่าคีมอสที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ดี คือ ตัวที่มีความกว้างของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ  $800 \text{ }\mu\text{m}$  และความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ  $10 \text{ }\mu\text{m}$  จะมีทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัว ( $g_{m(\text{sat})}$ ) เท่ากับ  $2 \text{ mS}$  ความต้านทานในภาวนำกระแส ( $R_{\text{on}}$ ) เท่ากับ  $500 \text{ }\Omega$  แรงดันขีดเริ่มเท่ากับ  $-6.0 \text{ V}$  และทนแรงดันได้สูงสุด  $170 \text{ V}$  จากการศึกษาข้อมูลที่ได้ สามารถนำไปสร้างพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ที่มีการนำกระแสได้สูงต่อไป

FABRICATION OF METAL GATE P-CHANNEL ENHANCEMENT MODE  
DMOS TRANSISTOR

Mr. Athikom Siriratanakul

Mr. Anuchin Kwanchitpitak

Mr. Surasak Niemcharoen (Advisor)

Education Year 2000

**Abstract**

This thesis is P-channel DMOS Transistor study about fabrication, threshold voltage control and junction depth of N-base control in P-channel DMOS Transistor. As reason mentioned above, it has to fabricate N-well on test wafer in order to control surface impurity atom concentration and depth of well. It is found that the suitable N-well has surface impurity atom concentration, equal to  $5.0 \times 10^{15} - 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Then fabricate MOS capacitor in order to test threshold voltage values of well received. MOS capacitor fabricated has threshold voltage values at -6.0 V. Then bring it to fabricates P-channel DMOS Transistor. After that bring it to measure physical characteristic for testing depth of well and measures electrical characteristic for testing threshold voltage values and function processing of P-channel DMOS Transistor. Find that DMOS fabricated is good function processing, that is unit cell which has 800  $\mu\text{m}$  channel width and 10  $\mu\text{m}$  channel length has 2 mS transconductance in saturation region ( $g_{m(\text{sat})}$ ), 500  $\Omega$  ON resistance ( $R_{\text{on}}$ ), -6.0 V threshold voltage and endures maximum voltage at 170 V. As this study, data received can fabricate next P-channel DMOS Transistor which conducts high current.

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VIII
สัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของดีมอสทรานซิสเตอร์	3
2.1 โครงสร้างของดีมอส	3
2.2 หลักการทำงานของดีมอส	4
2.3 แรงดันขีดเริ่ม	6
2.3.1 ศักย์สัมผัส	6
2.3.2 ค่าฟังก์ชันงาน	8
2.3.3 ประจุบวกคงที่ที่ผิวสัมผัส	9
2.3.4 การวิเคราะห์หุ้มอสคาปาซิเตอร์	12
2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีมอส	15
2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนซอล ในช่วงไม่อิ่มตัว	15
2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนซอล ในช่วงอิ่มตัว	16
2.4.3 ทรานคอนดักแตนซ์	16
2.4.4 ความนำและความต้านทานในภาชนะนำกระแส	17
2.4.5 แรงดันพังทลาย	18
บทที่ 3 ทฤษฎีการแพร่สารเจือ	19
บทที่ 4 กระบวนการสร้าง	27
4.1 กระบวนการสร้างแผ่นทดสอบ	27
4.2 กระบวนการสร้างมอสคาปาซิเตอร์	28
4.3 กระบวนการสร้างดีมอสทรานซิสเตอร์	31



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างอย่างง่ายและสัญลักษณ์ของดีมอส	3
(ก) พีแชนแนลดีมอส	
(ข) เอ็นแชนแนลดีมอส	
2.2 การเหนี่ยวนำประจุของพีแชนแนลดีมอส	5
(ก) $V_G \gg 0$ ไม่เกิดช่องทางเดินกระแส	
(ข) $V_G \ll 0$ เกิดช่องทางเดินกระแส	
2.3 ลักษณะการไหลของกระแสผ่านบริเวณแตรนดริฟท์ของพีแชนแนลดีมอส	5
2.4 การเกิดจุดพินช์ออฟเมื่อ $ V_{DS}  =  V_{GS} - V_{th} $	6
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $N_A$ ที่แพร่เข้าไปในชั้นเอ็นเบสกับความลึก $x$	7
2.6 บริเวณปลอดพาหะระหว่างขอสกับเบส ขณะเกิดช่องทางเดินกระแส	8
2.7 ระดับพลังงานของพีแชนแนลดีมอสที่มีส่วนเกตเป็นอลูมิเนียม	8
2.8 ตำแหน่งประจุต่างๆ ในพีแชนแนลดีมอส	10
2.9 (ก) โครงสร้างแบบมอส	12
2.9 (ข) ระดับพลังงานของมอสที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	12
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C/C_{ox}$ กับ $V_G$ ของโครงสร้างแบบมอสที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	14
2.11 ความสัมพันธ์ของ $I_D$ กับ $V_{DS}$ เมื่อ $V_{GS}$ คงที่	16
3.1 solid solubility ของสารเจือแต่ละชนิดเทียบกับอุณหภูมิ	19
3.2 การแทรกซึมของอะตอมสารเจือระหว่างการ predeposition	20
3.3 ส่วนของชั้นการแพร่ที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ	20
3.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือแต่ละชนิดเทียบกับอุณหภูมิ	21
3.5 อนุภาคแพร่เข้าไปในเนื้อสารในทิศทาง $x$	22
3.6 predeposition	23
3.7 drive-in	24
4.1 ภาพถ่ายของพีแชนแนลดีมอสที่สร้างเสร็จแล้ว	35
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเอ็นเวลบนแผ่นทดสอบกับพีแชนแนลดีมอส	36
5.2 กราฟความลึกของพีเวลเทียบกับเวลา	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
5.3 กราฟความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของพีแวลเทียบกับเวลา	39
5.4 กราฟความลึกของเอ็นเวลเทียบกับเวลา	39
5.5 กราฟความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเอ็นเวลเทียบกับเวลา	40
5.6 กราฟความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวเทียบกับความลึกของพีแวล (drive-in 14 ชม.)	40
5.7 กราฟความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวเทียบกับความลึกของเอ็นเวล (drive-in 14 ชม.)	41
5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C/C_{ox}$ กับ $V_G$	43
5.9 (ก) ลวดลายโครงสร้างด้านบนและภาพตัดขวางของพีแชนแนลดีมอส	46
(ข) ภาพถ่ายลวดลายโครงสร้างด้านบนของพีแชนแนลดีมอส ที่มี $W = 800 \mu m$ และ $L = 40 \mu m$	
5.10 ตัวอย่างลวดลายโครงสร้างของพีแชนแนลดีมอส	47
(ก) $W = 800 \mu m$ , $L = 100 \mu m$	
(ข) $W = 1600 \mu m$ , $L = 10 \mu m$	
5.11 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อระหว่างซอส-เดรน	48
5.12 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อระหว่างเกต-เดรน	48
5.13 กราฟคุณสมบัติของกระแสรั่วไหล	49
5.14 กราฟคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม	49
5.15 กราฟคุณสมบัติของแรงดันพังทลาย	50
5.16 กราฟคุณสมบัติของกระแสเดรนและแรงดันเดรนซอส	50
5.17 วงจรที่ใช้ในการวัดแรงดันขีดเริ่มของพีแชนแนลดีมอส	51
5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I_D$ กับ $V_{GS}$ เมื่อ $V_{DS} = -5 V$	52
5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกราฟที่สองของ $I_D$ กับ $V_{GS}$ ได้ $V_{th} = -6.4 V$	52
5.20 วงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติของกระแสเดรนและแรงดันเดรนซอสของพีแชนแนลดีมอส	53
5.21 กราฟคุณสมบัติของกระแสเดรนและแรงดันเดรนซอสของพีแชนแนลดีมอส	
แผ่นที่ 1 ที่มี $W = 800 \mu m$ และ $L = 40 \mu m$	53
5.22 กระแสเดรนของพีแชนแนลดีมอสที่ $W/L$ ค่าต่างๆ โดยที่ $V_{DS} = -8 V$ และ $V_{GS} = -12 V$	58
5.23 ค่าความคล่องตัวของโฮลที่เปลี่ยนไปตามผลต่างของแรงดันเกตซอสกับ แรงดันขีดเริ่มของพีแชนแนลดีมอสที่มี $W = 800 \mu m$ และ $L = 40 \mu m$	59
5.24 กระแสรั่วไหลของพีแชนแนลดีมอสที่ $W$ ค่าต่างๆ เมื่อ $L = 10 \mu m$	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
5.25 กระแสรั่วไหลของพีแชนแนลคิมอสที่ L ค่าต่างๆ เมื่อ $W = 800 \mu\text{m}$	61
5.26 ทรานคอนคัคแดนซ์ในช่วงอิมิตัวของพีแชนแนลคิมอสที่ W ค่าต่างๆ เมื่อ $L = 10 \mu\text{m}$	63
5.27 ทรานคอนคัคแดนซ์ในช่วงอิมิตัวของพีแชนแนลคิมอสที่ L ค่าต่างๆ เมื่อ $W = 800 \mu\text{m}$	63
5.28 ความต้านทานในภาวนำกระแสของพีแชนแนลคิมอสที่ W ค่าต่างๆ เมื่อ $L = 10 \mu\text{m}$	65
5.29 ความต้านทานในภาวนำกระแสของพีแชนแนลคิมอสที่ L ค่าต่างๆ เมื่อ $W = 800 \mu\text{m}$	65
ค.1 การปลูกผลึกแบบโซคราลสกี	72
ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของออกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชันแบบแห้ง	74
ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของออกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชันแบบชื้น	74
ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการ การแพร่ของอะตอมสารเกี่ยวกับช่วงเวลาที่ใช้ในการแพร่	75
(ก) อะตอมสารเจือโบรอน	
(ข) อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส	
ค.5 เครื่องปรับชั้นกระจกดันแบบ (Mask Aligner)	76
ค.6 เตาแพร่สารเจือชนิดเอ็น	78
ค.7 เตาแพร่สารเจือชนิดพี	79
ค.8 เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ	80
ง.1 กระจกดันแบบที่ใช้ในการสร้างมอสคาปาซิเตอร์	83
ง.2 กระจกดันแบบที่ใช้ในการสร้างพีแชนแนลคิมอส	83
จ.1 เครื่อง SR-210	84
จ.2 (ก) การวัดของ probe 2 หัว	85
(ข) วงจรเสมือนของการวัด	
จ.3 ภาพตัดขวางของแท่นยัดชิ้นงาน	85
จ.4 เครื่อง Probe Station และ Curve Tracer	86
จ.5 เครื่อง HP-VEE	86
จ.6 โปรแกรมวัดแรงดันขั้วเริ่มที่เชื่อมต่อถึงกัน	87
จ.7 โปรแกรมวัดแรงดันขั้วเริ่มที่ใช้งาน	87
จ.8 เครื่อง HP-4061	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการ predeposition เป็นเวลา 30 นาทีของแผ่นทดสอบแต่ละแผ่น	27
4.2 ช่วงเวลาในการ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C ของแผ่นทดสอบแต่ละส่วน	27
5.1 ความลึกของเวลที่ได้จากการแพร่สารเจือโบรอน (predeposition เป็นเวลา 30 นาที และ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C)	37
5.2 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเวลที่ได้จากการแพร่สารเจือโบรอน (predeposition เป็นเวลา 30 นาที และ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C)	37
5.3 ความลึกของเวลที่ได้จากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (predeposition เป็นเวลา 30 นาที และ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C)	37
5.4 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเวลที่ได้จากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (predeposition เป็นเวลา 30 นาที และ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C)	38
5.5 คุณสมบัติทางกายภาพของพีแชนแนลคีมอส	45
5.6 พีแชนแนลคีมอสแผ่นที่ 1 ที่มี $W = 400 \mu\text{m}$ , $L = 10 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	54
5.7 พีแชนแนลคีมอสแผ่นที่ 2 ที่มี $W = 400 \mu\text{m}$ , $L = 10 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	55
5.8 พีแชนแนลคีมอสที่มี $W = 600 \mu\text{m}$ , $L = 10 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	55
5.9 พีแชนแนลคีมอสที่มี $W = 800 \mu\text{m}$ , $L = 10 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	56
5.10 พีแชนแนลคีมอสที่มี $W = 1600 \mu\text{m}$ , $L = 10 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	56
5.11 พีแชนแนลคีมอสที่มี $W = 800 \mu\text{m}$ , $L = 20 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	56
5.12 พีแชนแนลคีมอสที่มี $W = 800 \mu\text{m}$ , $L = 40 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	57
5.13 พีแชนแนลคีมอสที่มี $W = 800 \mu\text{m}$ , $L = 60 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	57
5.14 พีแชนแนลคีมอสที่มี $W = 800 \mu\text{m}$ , $L = 100 \mu\text{m}$ ที่ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	57
5.15 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของกระแสทรานจากการทดลองและจากการคำนวณ ที่ $V_{DS} = -8 \text{ V}$ และ $V_{GS} = -12 \text{ V}$ ที่ $W$ และ $L$ ค่าต่างๆ	58
5.16 แรงดันขีดเริ่มของพีแชนแนลคีมอสที่ $W$ และ $L$ ค่าต่างๆ	59
5.17 กระแสรั่วไหลของพีแชนแนลคีมอสที่มี $W = 400 \mu\text{m}$ และ $L = 10 \mu\text{m}$	60
5.18 แรงดันพังทลายเฉลี่ยของพีแชนแนลคีมอสที่ $W$ และ $L$ ค่าต่างๆ	61
5.19 ทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงเชิงเส้นของพีแชนแนลคีมอสที่ $W$ และ $L$ ค่าต่างๆ	62
5.20 ทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิมิตัวของพีแชนแนลคีมอสที่ $W$ และ $L$ ค่าต่างๆ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่	หน้า
5.21 ความนำและความต้านทานในภาวนำกระแสของพีเซนแนลดีมอสแผ่นที่ 1 ที่ W และ L ค่าต่างๆ เมื่อ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	64
5.22 ความนำและความต้านทานในภาวนำกระแสของพีเซนแนลดีมอสแผ่นที่ 2 ที่ W และ L ค่าต่างๆ เมื่อ $V_{GS} = -12 \text{ V}$	64



## สัญลักษณ์

A	พื้นที่เกต ( $\text{cm}^2$ )
C	ค่าความจุไฟฟ้ารวม (F)
$C_{fb}$	ค่าความจุไฟฟ้ารวมในสภาวะ flat band ต่อพื้นที่ 1 หน่วย ( $\text{F}/\text{cm}^2$ )
$C_{ox}$	ค่าความจุไฟฟ้าของเกตต่อพื้นที่ 1 หน่วย ( $\text{F}/\text{cm}^2$ )
$C_{min}$	ค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด (F)
$C_{sfb}$	ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณปลดลอคพาหะในสภาวะ flat band (F)
$C_{Smin}$	ค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดที่บริเวณปลดลอคพาหะ (F)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
$E_C$	ระดับพลังงานแถบความนำ (eV)
$E_F$	ระดับเฟอร์มี (eV)
$E_{Fn}$	ระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (eV)
$E_{Fp}$	ระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (eV)
$E_i$	ระดับพลังงานกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (eV)
$E_O$	ระดับพลังงานสุญญากาศ (vacuum level reference) (eV)
$E_V$	ระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ (eV)
$g_{ds}$	ความนำ (mS)
$g_m$	ทรานคอนดักแตนซ์ (mS)
$g_m(\text{sat})$	ทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัว (mS)
$I_D$	กระแสเดรน (mA)
$I_O$	กระแสรั่วไหล ( $\mu\text{A}$ )
k	ค่าคงที่ของ โบสต์มันน์มีค่าเท่ากับ $8.62 \times 10^{-5}$ eV/K
$k_{ox}$	relative permittivity ของ $\text{SiO}_2$ มีค่าเท่ากับ 3.9
$k_{si}$	relative permittivity ของ Si มีค่าเท่ากับ 11.7
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $\mu\text{m}$ )
$N_A$	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือผู้รับ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_B$	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในชั้นเอ็นเบส ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_D$	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_O$	solid solubility ( $\text{cm}^{-3}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N(x,t)$	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ระยะทาง $x$ และเวลา $t$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$n_i$	ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนหรือโฮลในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$Q_B$	ความหนาแน่นประจุที่บริเวณปลอดพาหะใต้เกต ( $\text{C}/\text{cm}^2$ )
$Q_G$	ความหนาแน่นประจุที่เกต โลหะ ( $\text{C}/\text{cm}^2$ )
$Q_{SS}$	ประจุบวกคงที่ที่ผิวสัมผัส ( $\text{C}/\text{cm}^2$ )
$q$	ประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.6 \times 10^{-19}$ C
$R_{on}$	ความต้านทานในภาวะนำกระแส ( $\text{k}\Omega$ )
$R_S$	แผ่นความต้านทาน (sheet resistance) ( $\Omega/\square$ )
$T$	อุณหภูมิ (K)
$t$	เวลา (s)
$t_D$	เวลาที่ใช้ในการ drive-in (s)
$t_{OX}$	ความหนาของชั้นออกไซด์ภายใต้เกต (cm)
$t_p$	เวลาที่ใช้ในการ predeposition (s)
$V_{BV}$	แรงดันพังทลาย (V)
$V_{DS}$	แรงดันเดรนซอส (V)
$V_G$	แรงดันที่ขั้วเกต (V)
$V_{GS}$	แรงดันเกตซอส (V)
$V_{OX}$	แรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์ (V)
$V_{th}$	แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) (V)
$W$	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $\mu\text{m}$ )
$X_{mL}$	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (cm)
$x$	ระยะทางความลึกจากพื้นผิว ( $\mu\text{m}$ )
$x_j$	ความลึกจากพื้นผิวของรอยต่อพี-เอ็น ( $\mu\text{m}$ )
$\beta$	$(\mu C_{OX} W)/L$ ( $\text{mA}/\text{V}^2$ )
$\epsilon_0$	free space permittivity มีค่าเท่ากับ $8.85 \times 10^{-14}$ F/cm
$\phi_F$	ศักย์เฟอร์มี (fermi potential) ของสารกึ่งตัวนำ (V)
$\phi_M$	ค่าฟังก์ชันงานของเกตโลหะ (eV)
$\phi_{MS}$	ศักย์ความแตกต่างของระดับเฟอร์มีในเกตโลหะกับซิลิคอน (eV)
$\phi_S$	ค่าฟังก์ชันงานของซิลิคอน (eV)
$\rho$	ความต้านทานจำเพาะ (resistivity) ( $\Omega.\text{cm}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\bar{\rho}$  ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
- $\mu$  ค่าความคล่องตัว (mobility) ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )
- $\mu_n$  ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )
- $\mu_p$  ค่าความคล่องตัวของโฮล ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )
- $\Psi_0$  ศักย์สัมผัส (contact potential) (V)
- $\Psi_p$  ศักย์สัมผัสด้านพี (V)
- $\Psi_n$  ศักย์สัมผัสด้านเอ็น (V)



## บทที่ 1

### บทนำ

ในโครงการนี้ เป็นการศึกษาพีเซนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ (คีมอสทรานซิสเตอร์ชนิดช่องทางเดินกระแสที่) ที่มีเกตเป็นโลหะ และมีการทำงานแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ต้องการศึกษาดังต่อไปนี้ในการสร้างและการทำงานของพีเซนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ ดังนั้น จึงศึกษาคีมอสเฉพาะที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก เพื่อสะดวกต่อการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ นอกจากนี้ ยังต้องการควบคุมค่าแรงดันขั้วเริ่มของคีมอสที่จะสร้างขึ้นให้มีค่าอยู่ในช่วง 2.5-3 V และควบคุมการแพร่สารเจือในส่วนเบสให้ลึกประมาณ 3-4  $\mu\text{m}$  เพื่อที่จะสามารถแพร่สารเจืออีกชั้นหนึ่งลงไปบนส่วนเบสได้

ในการที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ข้างต้นได้นั้น จะต้องทำการทดลองสร้างเวล (หรือเบส) บนแผ่นทดสอบโดยวิธีการแพร่สารเจือ เพื่อควบคุมความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิว ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขั้วเริ่ม รวมทั้งควบคุมความลึกของเวลให้ได้ค่าตามที่ต้องการ โดยจะเริ่มสร้างพีเวลก่อน เนื่องจากง่ายต่อการควบคุมค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือ แล้วจึงสร้างเอ็นเวลในภายหลัง หลังจากนั้น จึงนำเอ็นเวลที่ได้ค่าตามที่ต้องการแล้ว มาสร้างเป็นมอสคาปาซิเตอร์ สำหรับตรวจสอบค่าแรงดันขั้วเริ่ม แล้วจึงนำมาสร้างเป็นพีเซนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ โดยอาจมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการแพร่สารเจือ เพื่อให้ได้แรงดันขั้วเริ่มอยู่ในช่วงที่ต้องการ

ขั้นตอนการทำงานทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีของคีมอสทรานซิสเตอร์ รวมทั้งแรงดันขั้วเริ่ม และมอสคาปาซิเตอร์ ในขั้นตอนนี้ จะทราบค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวที่ต้องการในการควบคุมแรงดันขั้วเริ่มให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ

2. ศึกษาทฤษฎีการแพร่สารเจือ และทำการสร้างพีเวลบนแผ่นทดสอบโดยใช้เงื่อนไขในการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน แล้วนำมาตรวจสอบผลที่ได้ จากนั้นจึงสร้างเอ็นเวลบนแผ่นทดสอบโดยมีขั้นตอนการทำงานเหมือนกับพีเวล หลังจากนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขในการแพร่สารเจือ เพื่อให้ได้ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวและความลึกให้มีค่าตามที่ต้องการ

3. สร้างมอสคาปาซิเตอร์ โดยใช้เงื่อนไขในการแพร่สารเจือที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 มาสร้างสำหรับส่วนของเวล หลังจากนั้นจึงนำมาวัดหาค่าแรงดันขั้วเริ่มว่าอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่ แล้วทำการสรุปเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่ใช้ในการสร้างเวลอีกครั้ง

4. สร้างพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ โดยใช้เงื่อนไขการแพร่สารเจือที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มาสร้างเป็นส่วนเอ็นเบส หลังจากที่ทำการสร้างเสร็จแล้วจึงนำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพว่า ชั้นเอ็นเบสที่ได้มีความลึกและความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวเท่าไร ทำให้สามารถคาดคะเนได้ว่าจะมีแรงดันขั้วเริ่มเป็นเท่าไร แล้วจึงนำมาตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานว่า พีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นนั้น สามารถทำงานได้หรือไม่ ซึ่งถ้าทำงานได้ จะนำมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป ซึ่งจะทราบค่าแรงดันขั้วเริ่มของพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้น
5. สรุปผลการทดลองและการทำงานทั้งหมด

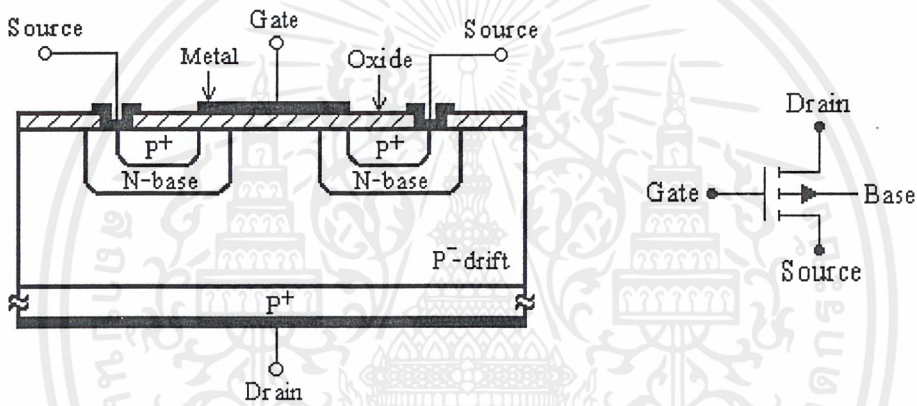
ในเนื้อหาปริญาานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยส่วนของทฤษฎี 2 บท คือ บทที่ 2 ทฤษฎีของคีมอสทรานซิสเตอร์ และบทที่ 3 ทฤษฎีการแพร่สารเจือ ส่วนในบทที่ 4 จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างของเวเลนบนแผ่นทดสอบ มอสคาปาซิเตอร์ และพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ ในบทที่ 5 จะกล่าวถึงการทดลองวัดค่าต่างๆ และผลการทดลองที่ได้ของเวเลนบนแผ่นทดสอบ มอสคาปาซิเตอร์ และพีแชนแนลคีมอสทรานซิสเตอร์ ในบทที่ 6 จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด และเสนอแนวทางในการปรับปรุงการสร้างคีมอสทรานซิสเตอร์ต่อไป

## บทที่ 2

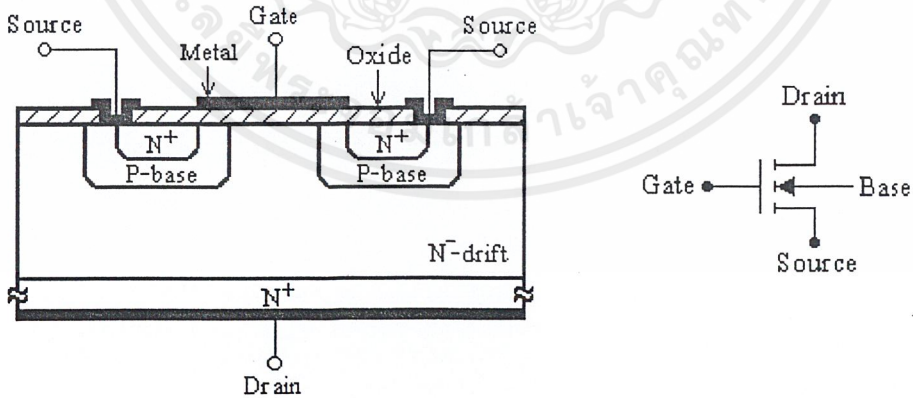
### ทฤษฎีของดีมอสทรานซิสเตอร์

ดีมอสทรานซิสเตอร์ (DMOST : Double-diffused MOS Transistor) คือ มอสทรานซิสเตอร์ที่มีความยาวช่องทางเดินกระแสสั้น และมีชั้นการแพร่สารเจือซ้อนกันอยู่ 2 ชั้น สำหรับปริยญา นิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาดีมอสที่เป็นแบบ Vertical DMOST เท่านั้น

#### 2.1 โครงสร้างของดีมอส



(ก) พีเชนแนลดีมอส (p-channel DMOST)



(ข) เอ็นเชนแนลดีมอส (n-channel DMOST)

รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางแสดง โครงสร้างอย่างง่ายและสัญลักษณ์ของดีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างและสัญลักษณ์ของคิมอสเป็นดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเอ็นแฮนซ์เมนต์โหมด (Enhancement Mode) รูปที่ 2.1(ก) เป็นโครงสร้างของพีแชนแนลคิมอสประกอบด้วยชั้น 2 ชั้นบนฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี/พีบวก ( $P/P^+$ -type substrate) ซึ่งฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีบวกนี้ จะเป็นเดรน (Drain) ของทรานซิสเตอร์ ส่วนชั้นอีก 3 ชั้น ได้แก่

1. บริเวณที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีบวก ( $P^+$ -type region) จะเป็นซอส (Source) ของทรานซิสเตอร์

2. บริเวณที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type bulk channel region) ซึ่งเป็นฐานรองของช่องทางเดินกระแส ซึ่งอาจเรียกเป็นเอ็นเบส (N-base) หรือเอ็นเวล (N-well)

3. บริเวณที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีลบ ( $P^-$ -type drain drift region) ซึ่งเป็นบริเวณที่สร้างด้วยวิธีอีพิแทกเซียล (epitaxial process) เรียกบริเวณนี้ว่า เดรนดริฟท์ (drain drift)

ช่องทางเดินกระแสจะเกิดขึ้นที่ผิวของเอ็นเบสใต้ส่วนที่เป็นเกต (Gate) ซึ่งเป็นชั้นโลหะ (Metal) โดยมีชั้นของออกไซด์ (Oxide) เป็นฉนวนคั่นอยู่

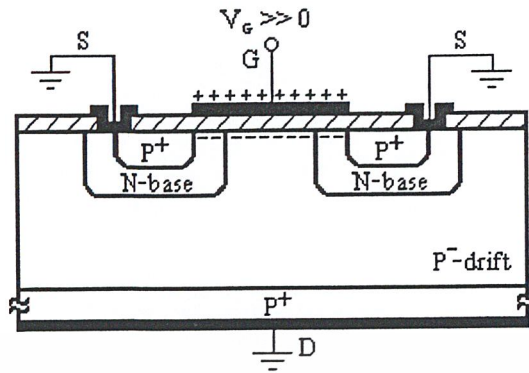
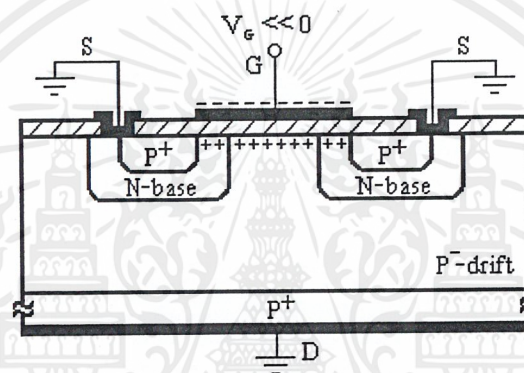
รูปที่ 2.1(ข) เป็นโครงสร้างของเอ็นแชนแนลคิมอส ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับพีแชนแนลคิมอส แต่ใช้ฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น/เอ็นบวก ( $N/N^+$ -type substrate) และแพร่สารเจือชนิดตรงข้ามกัน

## 2.2 หลักการทำงานของคิมอส

หลักการทำงานของคิมอสจะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำประจุของชั้นโลหะที่เป็นเกต เพื่อทำให้เกิดเป็นช่องทางเดินกระแสที่พื้นผิวของบริเวณเบส ซึ่งอยู่ใต้เกต ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในสถานะที่มีแรงดันป้อนที่ขาซอสและเดรนอย่างเหมาะสม ในที่นี้จะอธิบายหลักการทำงานของคิมอส โดยยกตัวอย่างการทำงานของพีแชนแนลคิมอส

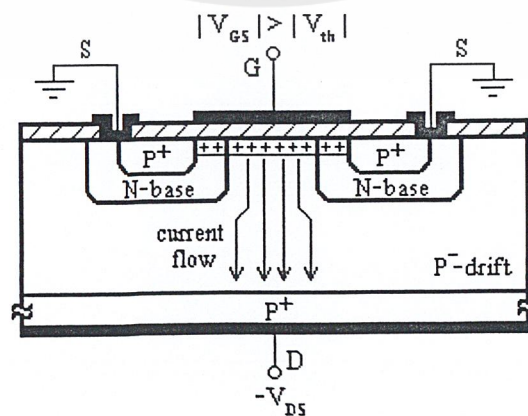
จากรูปที่ 2.2 ขั้วซอส (S) เดรน (D) และส่วนเอ็นเบส เชื่อมต่อกับกราวนด์ (ground) เมื่อ  $V_G$  เป็นบวกค่ามากดังรูปที่ 2.2 (ก) ประจุลบจะถูกดึงดูดไปยังบริเวณพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่อยู่ใต้เกต ทำให้บริเวณพื้นผิวของชั้นเอ็นเบสที่อยู่ใต้เกตมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนเกิดเป็นชั้นสะสม (accumulation layer) ในสถานะเช่นนี้จะไม่เกิดช่องทางเดินกระแส แต่สำหรับบริเวณพื้นผิวของชั้นพีเดรนดริฟท์ที่อยู่ใต้เกตจะมีความเข้มข้นน้อยลงจนเกิดเป็นชั้นกลับ (inversion layer)

เมื่อ  $V_G$  เป็นลบค่ามากดังรูปที่ 2.2 (ข) ประจุลบจะถูกผลักออก ประจุบวกจะถูกดึงดูดไปที่พื้นผิวส่วนที่อยู่ใต้เกต ทำให้พื้นผิวของชั้นเอ็นเบสที่อยู่ใต้เกตมีความเข้มข้นน้อยลงจนเกิดเป็นชั้นกลับซึ่งเป็นช่องทางเดินกระแส แต่พื้นผิวของชั้นพีเดรนดริฟท์ที่อยู่ใต้เกตจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนเกิดเป็นชั้นสะสม ทั้งสองบริเวณนี้จึงกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

(ก)  $V_G \gg 0$  ไม่เกิดช่องทางเดินกระแส(ข)  $V_G \ll 0$  เกิดช่องทางเดินกระแส

รูปที่ 2.2 การเหนี่ยวนำประจุของพีเซนแนลคิมอส

ค่าแรงดันเกตซอส  $V_{GS}$  ที่ทำให้ความหนาแน่นของโฮลที่บริเวณพื้นผิวของชั้นเอ็นเบสที่อยู่ใต้เกตเท่ากับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเอ็นเบสที่ไกลออกไปจากเกตเรียกว่า แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage ;  $V_{th}$ )

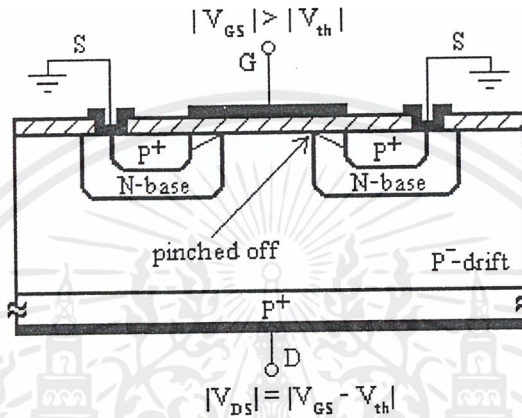


รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลของกระแสผ่านบริเวณแควนดริฟท์ของพีเซนแนลคิมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $|V_{GS}| > |V_{th}|$  จะทำให้เกิดเป็นช่องทางเดินกระแสขึ้น และถ้าป้อนแรงดันครนชอต  $V_{DS}$  ให้มีค่าลบ จะทำให้โฮลเคลื่อนที่จากชอตผ่านช่องทางเดินกระแสและชั้นสะสม แล้วจึงไหลผ่านบริเวณเดรนดริฟต์เข้าสู่เดรน ซึ่งมีลักษณะขยายออก [1] ดังรูปที่ 2.3

ค่าของ  $V_{DS}$  มีผลต่อช่องทางเดินกระแส ถ้า  $|V_{DS}|$  เพิ่มขึ้นจนมีขนาดเท่ากับ  $|V_{GS} - V_{th}|$  จะเกิดภาวะพินซ์ออฟ (pinched off) ที่ปลายช่องทางเดินกระแสดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดจุดพินซ์ออฟเมื่อ  $|V_{DS}| = |V_{GS} - V_{th}|$

หลังจากเกิดภาวะพินซ์ออฟแล้ว ถ้าเพิ่มขนาดของ  $|V_{DS}|$  อีก กระแสจะไม่เพิ่มขึ้นอีก คือ มีค่าคงที่ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าให้  $|V_{DS}|$  มากพอ ก็จะเกิดการพังทลายชั้นที่รอยต่อของชั้นเอ็นเบสกับชั้นพีเดรนดริฟต์ ทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเป็นจำนวนมากจนไม่สามารถควบคุมปริมาณของกระแสเดรนได้ และในทางปฏิบัติ ถ้าไม่มีการจำกัดปริมาณกระแสเดรน อาจทำให้มอสเฟตเกิดความเสียหายได้

## 2.3 แรงดันขีดเริ่ม

แรงดันขีดเริ่มของคิมอสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างดังนี้ [2]

### 2.3.1 ศักย์สัมผัส (contact potential ; $\Psi_0$ )

จากทฤษฎีของรอยต่อพี-เอ็น ค่าของศักย์สัมผัสมีค่าตามสมการ

$$\Psi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} = \Psi_P + \Psi_N \quad (2.1)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่ของโบสค์มันน์มีค่าเท่ากับ  $8.62 \times 10^{-5}$  eV/K

$T$  คือ อุณหภูมิ (K)

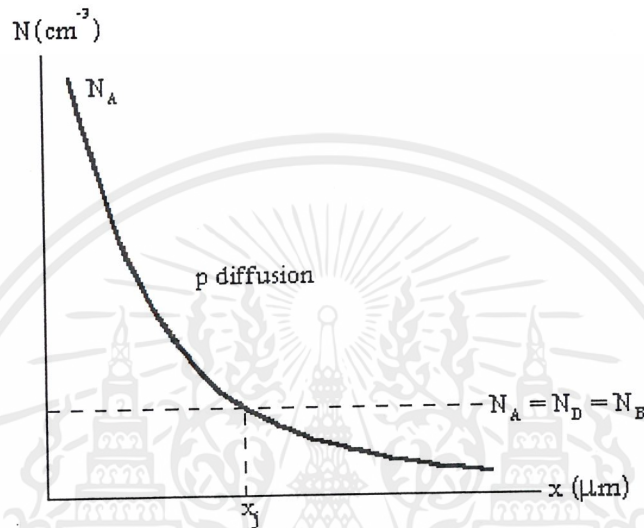
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

$N_A$  คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือผู้รับ ( $\text{cm}^{-3}$ )

$N_D$  คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $\text{cm}^{-3}$ )

$n_i$  คือ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนหรือโฮลในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ( $\text{cm}^{-3}$ )



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_A$  ที่แพร่เข้าไปในชั้นเอ็นเบสกับความลึก  $x$

จากรูปที่ 2.5  $N_B$  คือความเข้มข้นอะตอมสารเจือในชั้นเอ็นเบส จึงมีค่าเท่ากับ  $N_D$  ที่เอ็นเบส ค่าของ  $N_A$  ลดลงตามความลึก  $x$  ซึ่งที่  $x = x_j$  ค่าของ  $N_A$  เท่ากับ  $N_B$  ดังนั้น  $x_j$  จึงเป็นความลึกของรอยต่อพี-เอ็นที่เกิดขึ้น และจากสมการที่ 2.1 จะได้

$$\Psi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_B}{n_i} + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_B}{n_i} = 2\phi_F$$

$$\text{เมื่อ} \quad \phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_B}{n_i} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\phi_F$  คือ ศักย์เฟอร์มี (fermi potential) ของสารกึ่งตัวนำ (V)

$N_B$  คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในชั้นเอ็นเบส ( $\text{cm}^{-3}$ )

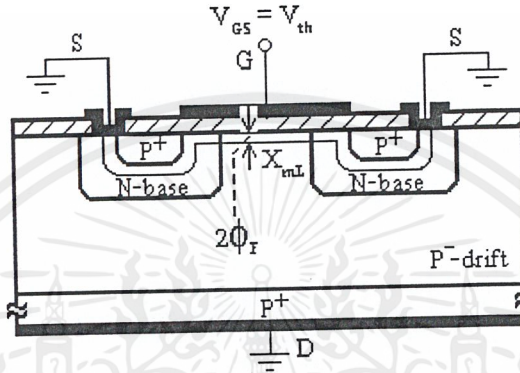
เมื่อ  $V_{GS} = V_{th}$  ศักย์สัมผัสที่ช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับ  $2\phi_F$  ดังรูปที่ 2.6 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ( $X_{ml}$ ) มีค่าดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{mL} = \sqrt{\frac{2k_{si}\epsilon_0(2\phi_F)}{qN_B}} \tag{2.3}$$

โดยที่  $k_{si}$  คือ relative permittivity ของ Si มีค่าเท่ากับ 11.7

$\epsilon_0$  คือ free space permittivity มีค่าเท่ากับ  $8.85 \times 10^{-14}$  F/cm

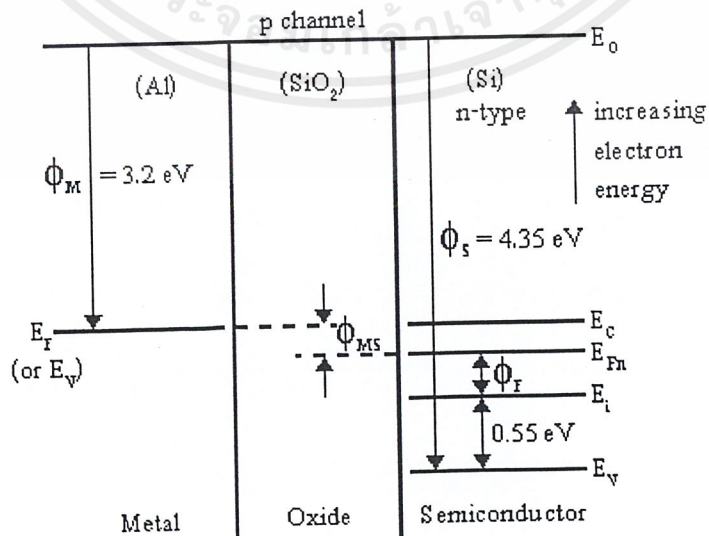


รูปที่ 2.6 บริเวณปลอดพาหะระหว่างซอสกับเบส ขณะเกิดช่องทางเดินกระแส

จากรูปที่ 2.6 ความหนาแน่นประจุที่บริเวณปลอดพาหะได้แก่จะมีค่าสูงสุดเป็น  $Q_B$  (คูอมบ์ต่อพื้นที่ 1 หน่วย)

$$Q_B = qN_B X_{mL} = \sqrt{2k_{si}\epsilon_0 qN_B(2\phi_F)} \tag{2.4}$$

### 2.3.2 ค่าฟังก์ชันงาน (work function)



รูปที่ 2.7 ระดับพลังงานของทีเซนแนลดีมอสที่มีส่วนเกาะเป็นอูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าฟังก์ชันงานเป็นพลังงานที่ต้องจ่ายแก่อิเล็กตรอน เพื่อให้มันสามารถหลุดออกจากพื้นผิวได้ ซึ่งมีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม โดยจะเริ่มพิจารณาจากพีเซนแนลคีมอสต์ที่มีส่วนเกทเป็นอลูมิเนียม (Al) และมีเอ็นเบสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ระดับพลังงานแสดงดังรูปที่ 2.7

โดยที่  $\phi_M$  คือ ค่าฟังก์ชันงานของเกตโลหะ (eV)

$\phi_S$  คือ ค่าฟังก์ชันงานของซิลิคอน (eV)

$E_O$  คือ ระดับพลังงานสุญญากาศ (vacuum level reference) (eV)

$E_F$  คือ ระดับเฟอร์มิ (eV)

$E_{Fn}$  คือ ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น (eV)

$E_i$  คือ ระดับพลังงานกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (eV)

$E_V$  คือ ระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ (eV)

$E_C$  คือ ระดับพลังงานแถบความนำ (eV)

$\phi_{MS}$  คือ ศักย์ความแตกต่างของระดับเฟอร์มิในเกตโลหะกับซิลิคอน (eV)

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันขีดเริ่ม คือ ค่าของ  $\phi_{MS}$  โดยที่ระดับเฟอร์มิในเอ็นเบส ( $E_{Fn}$ ) จะอยู่เหนือ  $E_i$  ด้วยค่า  $\phi_F$  (ในพีเซน  $E_{Fn}$  จะอยู่ต่ำกว่า  $E_i$  ด้วยค่า  $\phi_F$  เช่นกัน) จากรูปที่ 2.7 จะได้

$$\begin{aligned}\phi_{MS} &= \phi_M - [\phi_S - (E_i - E_V) - \phi_F] \\ &= 3.2 - [4.35 - 0.55 - \phi_F] \\ \phi_{MS} &= -0.6 + \phi_F\end{aligned}\tag{2.5 ก}$$

ค่าของ  $\phi_F$  ตามปกติมีค่าไม่เกิน 0.6 ดังนั้น  $\phi_{MS}$  จึงมีค่าลบ

ถ้าพิจารณาเอ็นเซนแนลคีมอสต์ที่มีเกทเป็นอลูมิเนียม จะได้

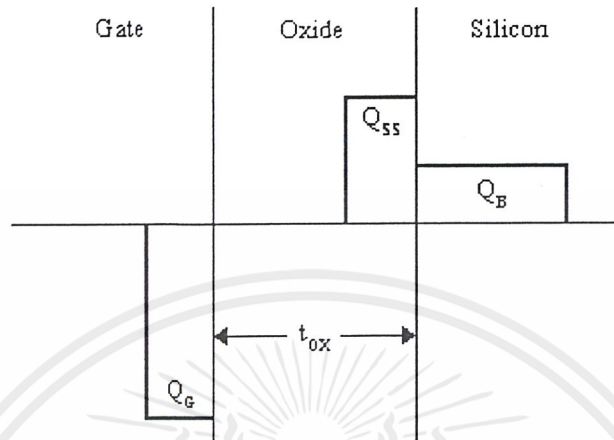
$$\begin{aligned}\phi_{MS} &= \phi_M - [\phi_S - (E_i - E_V) + \phi_F] \\ &= 3.2 - [4.35 - 0.55 + \phi_F] \\ \phi_{MS} &= -0.6 - \phi_F\end{aligned}\tag{2.5 ข}$$

ค่าของ  $\phi_{MS}$  จึงเป็นค่าลบ

### 2.3.3 ประจุบวกคงที่ที่ผิวสัมผัส (fixed positive surface-state charge ; $Q_{SS}$ )

ตำแหน่งของประจุบวก  $Q_{SS}$  (ต่อ 1 หน่วยพื้นที่) อยู่ที่ผิวสัมผัสระหว่างออกไซด์กับซิลิคอนดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีลักษณะเป็นค่าบวกคงที่ ค่าของ  $Q_{SS}$  ขึ้นอยู่กับระนาบของฐานรองซิลิคอน โดยระนาบ (111) > (110) > (100) ในอัตราส่วน 3:2:1 โดยประมาณ  $Q_{SS}/q$  ของระนาบ (100) มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ  $1.5 \times 10^{11}$  atom/cm<sup>2</sup> และขึ้นอยู่กับกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง หรือเปียก (dry or wet oxidation)



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งประจุต่างๆ ในที่แซนแนลดีมอส

เมื่อ  $\Psi_o = 2\phi_F$  จะได้ว่า

$$Q_G + Q_{SS} + Q_B = 0 \quad (2.6)$$

$$Q_G = -Q_{SS} - Q_B$$

ดังนั้น

$$V_{OX} = \frac{Q_G}{C_{OX}} = -\frac{Q_{SS}}{C_{OX}} - \frac{Q_B}{C_{OX}} \quad (2.7)$$

โดยที่  $Q_G$  คือ ความหนาแน่นประจุที่เกตโลหะ (C/cm<sup>2</sup>)

$V_{OX}$  คือ แรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์ (V)

$C_{OX}$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของเกตต่อพื้นที่ 1 หน่วย (F/cm<sup>2</sup>)

ค่าความจุไฟฟ้าของเกตต่อพื้นที่ 1 หน่วยหาได้จาก

$$C_{OX} = \frac{k_{OX}\epsilon_0}{t_{OX}} \quad (2.8)$$

$k_{OX}$  คือ relative permittivity ของ SiO<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 3.9

$t_{OX}$  คือ ความหนาของชั้นออกไซด์ภายใต้เกต (cm)

**สรุป** ค่าแรงดันขีดเริ่มขึ้นอยู่กับการปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.3.1-2.3.3 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีเชนแนล  $V_{th} = -2\phi_F + V_{OX} + \phi_{MS}$

$$V_{th} = -2\phi_F - \frac{Q_B}{C_{OX}} - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} - 0.6 + \phi_F$$

$$V_{th} = -0.6 - \phi_F - \frac{Q_B}{C_{OX}} - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} \quad (2.9 ก)$$

เอ็นเชนแนล  $V_{th} = 2\phi_F + V_{OX} + \phi_{MS}$

$$V_{th} = 2\phi_F + \frac{Q_B}{C_{OX}} - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} - 0.6 - \phi_F$$

$$V_{th} = -0.6 + \phi_F + \frac{Q_B}{C_{OX}} - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} \quad (2.9 ข)$$

### ตัวอย่างการคำนวณแรงดันขีดเริ่ม

พีเชนแนลคือมีอสที่มีฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) และแพร์สารเจือที่ส่วนเบสให้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือ  $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  มีชั้นเกตออกไซด์หนา  $1000 \text{ \AA}$  แรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเท่าไร

วิธีทำ หาค่าแรงดันขีดเริ่มจากสมการ 2.9 (ก) โดยมีค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

$$n_i \text{ ที่อุณหภูมิ } T = 300 \text{ K มีค่าเท่ากับ } 1.41 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$Q_{SS} = 1.5 \times 10^{11} \times 1.6 \times 10^{-19} = 2.4 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$$

$$t_{OX} = 1000 \text{ \AA} = 10^{-5} \text{ cm}$$

$$C_{OX} = \frac{k_{OX} \epsilon_O}{t_{OX}} = \frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-14}}{10^{-5}} = 3.45 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$$

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_B}{n_i} = 8.63 \times 10^{-5} \times 300 \ln \left( \frac{1 \times 10^{16}}{1.41 \times 10^{10}} \right) = 0.35 \text{ V}$$

$$Q_B = \sqrt{2k_{si} \epsilon_O q N_B (2\phi_F)}$$

$$= \sqrt{2 \times 11.7 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{16} \times 2 \times 0.35}$$

$$= 4.82 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

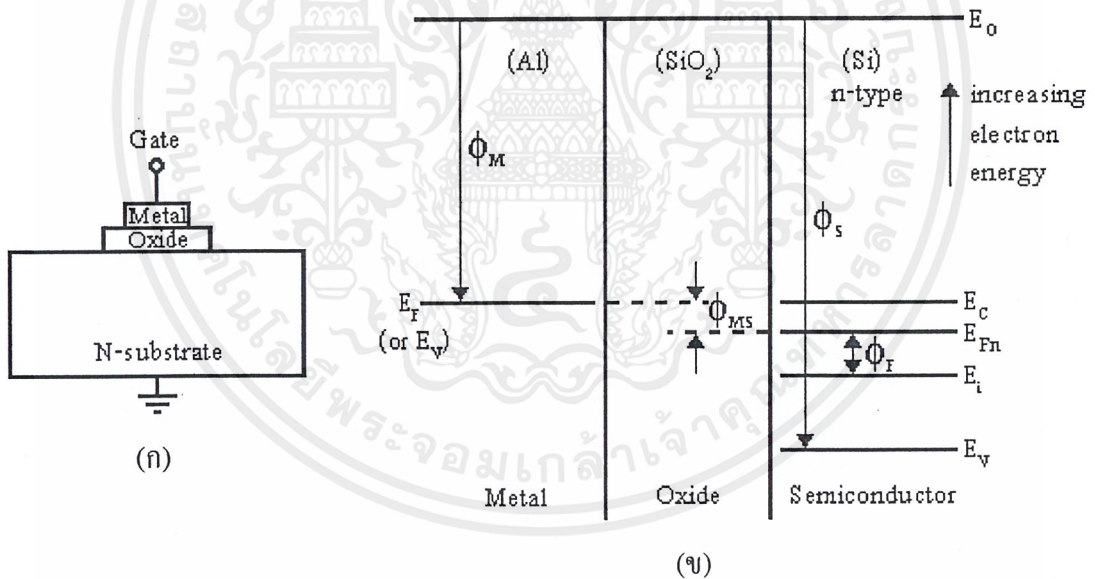
$$\frac{Q_B}{C_{OX}} = \frac{4.82 \times 10^{-8}}{3.45 \times 10^{-8}} = 1.4 \text{ V}$$

$$\frac{Q_{SS}}{C_{OX}} = \frac{2.4 \times 10^{-8}}{3.45 \times 10^{-8}} = 0.7 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} V_{th} &= -0.6 - \phi_F - \frac{Q_B}{C_{OX}} - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} \\ &= -0.6 - 0.35 - 1.4 - 0.7 = -3.05 \text{ V} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ  $-3.05 \text{ V}$

### 2.3.4 การวิเคราะห์หม้อสคาปาซิเตอร์ (MOS capacitor) [3]



รูปที่ 2.9 (ก) โครงสร้างแบบมอส

(ข) ระดับพลังงานของมอสที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างแบบมอส (MOS structure) และระดับพลังงานที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งเป็นโครงสร้างส่วนหนึ่งของมอสเฟต คือ จะไม่มีส่วนขอสและส่วนเดรน จะมีเพียงแต่ค่าความจุไฟฟ้าที่อยู่ใต้เกทที่กำลังพิจารณาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความจุไฟฟ้าใน โครงสร้างแบบมอสจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่ป้อนให้เกต  $V_G$  ซึ่ง จะแบ่งช่วงของการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วงคือ

ก) ช่วงสะสม (Accumulation) เป็นช่วงที่ทำการป้อนแรงดันให้  $V_G > 0$  ทำให้มี อิเล็กตรอนมาสะสมที่ใต้ผิวของชั้นออกไซด์ ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เท่ากับค่า  $C_{OX}$  ใน สมการที่ 2.8 คูณด้วยค่าพื้นที่เกต  $A$  และไม่แปรตามแรงดัน  $V_G$  ที่เป็นบวก

ข) ช่วงปลดพาหะ (Depletion) เป็นช่วงที่ทำการป้อนแรงดันให้  $0 > V_G > V_{th}$  โอลเริ่มไปสะสมที่ใต้ผิวของชั้นออกไซด์ ทำให้เกิดบริเวณปลดพาหะขึ้น ความกว้างของบริเวณ ปลดพาหะเปลี่ยนแปลงตามค่า  $V_G$  ดังสมการ

$$X_{mL} = \frac{k_{si} \cdot \epsilon_0}{C_{OX}} \left( \sqrt{1 + \frac{2C_{OX}^2 V_G}{qN_B k_{si} \epsilon_0}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณปลดพาหะมีค่า

$$C_S = \frac{A k_{si} \cdot \epsilon_0}{X_{mL}} \quad (2.11)$$

$A$  คือ พื้นที่เกต ( $cm^2$ )

ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้ารวม  $C$  คือ ค่าของ  $C_{OX}$  ต่ออนุกรมกับ  $C_S$  ซึ่งจะมีค่า

$$C = \frac{AC_{OX}}{\sqrt{1 + \frac{2C_{OX}^2 V_G}{qN_B k_{si} \epsilon_0}}} \quad (2.12)$$

จะเห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้ารวมในช่วงปลดพาหะมีค่าเปลี่ยนไปตามแรงดัน  $V_G$

ค) ช่วงกลับ (Inversion) เป็นช่วงที่ทำการป้อนแรงดันให้  $V_G \leq V_{th}$  โอลเป็น จำนวนมากไปสะสมที่ใต้ผิวของชั้นออกไซด์จนเกิดเป็นชั้นกลับ ความกว้างของบริเวณปลด พาหะในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เท่ากับสมการที่ 2.3 ซึ่งจะได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่ได้จาก  $C_{OX}$  ต่อ อนุกรมกับ  $C_{Smin}$  (ความจุไฟฟ้าต่ำสุดที่บริเวณปลดพาหะ) คือ

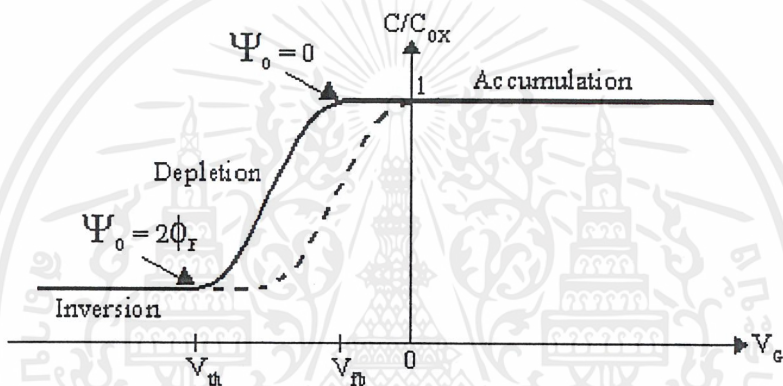
$$C = C_{min} = \frac{AC_{OX}C_{Smin}}{C_{OX} + C_{Smin}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ 
$$C_{Smin} = A \sqrt{\frac{qN_B k_{si} \epsilon_O}{2\phi_F}} \quad (2.13)$$

จะได้ 
$$C = C_{min} = \frac{AC_{OX}}{1 + C_{OX} \sqrt{\frac{2(2\phi_F)}{qN_B k_{si} \epsilon_O}}} \quad (2.14)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_{OX}$  กับ  $V_G$  แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_{OX}$  กับ  $V_G$  ของโครงสร้างแบบมอสที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

จากรูปที่ 2.10  $V_{fb}$  คือ flat band voltage มีค่าตามสมการ

$$V_{fb} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ss}}{C_{OX}} \quad (2.15)$$

จากรูปที่ 2.10 เส้นกราฟที่แสดงเป็นเส้นประ คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_{OX}$  กับ  $V_G$  เมื่อ  $V_{fb} = 0$  ซึ่งได้อธิบายไปในข้างต้น แต่ในทางปฏิบัติ  $V_{fb}$  จะไม่เท่ากับศูนย์ ทำให้รูปกราฟที่แท้จริงถูกเลื่อนไปเป็นเส้นกราฟที่แสดงเป็นเส้นทึบ

ซึ่งเมื่อ  $V_G = V_{fb}$  ทำให้ศักย์สัมผัส  $\Psi_0 = 0$  ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่  $V_G$  ค่านี้คือ

$$C = C_{fb} = \frac{AC_{OX} C_{sfb}}{C_{OX} + C_{sfb}}$$

$$\text{โดยที่} \quad C_{\text{sfb}} = A \sqrt{\frac{q^2 k_{\text{si}} \epsilon_0 N_B}{kT}} \quad (2.16)$$

ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ฐานรอง  $N_B$  ในกรณีนี้คือ  $N_D$  หาได้จาก

$$N_B = N_D = \frac{4\phi_F}{qk_{\text{si}}\epsilon_0} \left( \frac{C_{\text{Smin}}}{A} \right)^2 \quad (2.17)$$

## 2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคีมอส

### 2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนขอสในช่วงไม่อิ่มตัว

(non - saturation region)

กระแสเดรน ( $I_D$ ) ที่เกิดขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันเดรนขอส ( $V_{\text{DS}}$ ) และแรงดันเกตขอส ( $V_{\text{GS}}$ ) ในช่วงไม่อิ่มตัวเป็นไปตามสมการที่ 2.18 คือ

$$I_D = \beta \left[ (V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}) V_{\text{DS}} - \frac{V_{\text{DS}}^2}{2} \right] \quad (2.18)$$

โดยที่  $\beta = (\mu C_{\text{ox}} W)/L$

$\mu$  คือ ค่าความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอนหรือโฮล ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )

$W$  คือ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $\mu\text{m}$ )

$L$  คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $\mu\text{m}$ )

จากสมการที่ 2.18 ถ้า  $|V_{\text{DS}}|$  มีค่าน้อย เทอมของ  $V_{\text{DS}}^2/2$  จะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับเทอม  $(V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}) V_{\text{DS}}$  สมการที่ 2.18 จะเหลือเพียง

$$I_D = \beta (V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}) V_{\text{DS}} \quad (2.19)$$

จะเห็นได้ว่ากระแส  $I_D$  แปรค่าตาม  $V_{\text{DS}}$  อย่างเชิงเส้น จึงเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเชิงเส้น

(linear region)

## 2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรนขอสในขั้วอิมิตัว

(saturation region)

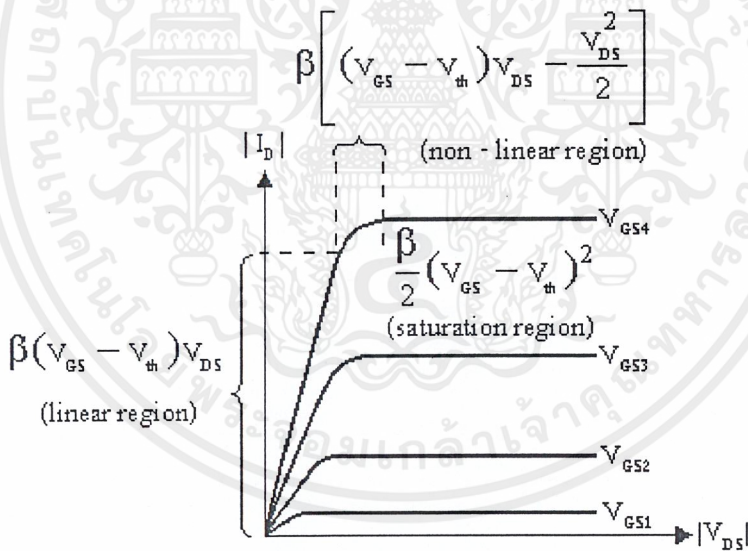
เมื่อ  $|V_{DS}|$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $|V_{GS} - V_{th}|$  พบว่า กระแสเดรนจะไม่ขึ้นกับแรงดันเดรนขอส แล้วแทนค่า  $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$  จะได้เป็น

$$I_D = \beta \left[ (V_{GS} - V_{th})(V_{GS} - V_{th}) - \frac{(V_{GS} - V_{th})^2}{2} \right]$$

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (2.20)$$

คุณสมบัติของกระแสเดรนในช่วงนี้ จะเรียกว่า ช่วงอิมิตัว

ความสัมพันธ์ของ  $I_D$  กับ  $V_{DS}$  ทั้งในช่วงไม่อิมิตัวและอิมิตัว แสดงได้ดังในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของ  $I_D$  กับ  $V_{DS}$  เมื่อ  $V_{GS}$  คงที่

## 2.4.3 ทรานคอนดักแตนซ์ (transconductance ; $g_m$ )

ทรานคอนดักแตนซ์ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$g_m = \left[ \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \right]_{V_{DS} = \text{constant}} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา  $g_m$  ในช่วงเชิงเส้น

$$g_m = \frac{dI_D}{d(v_{GS} - v_{th})} = \frac{d[\beta(v_{GS} - v_{th})v_{DS}]}{d(v_{GS} - v_{th})}$$

$$g_m = \beta|v_{DS}| \quad (2.22)$$

พิจารณา  $g_m$  ในช่วงอิ่มตัว

$$g_{m(sat)} = \frac{dI_{D(sat)}}{d(v_{GS} - v_{th})} = \frac{d\left[\frac{\beta}{2}(v_{GS} - v_{th})^2\right]}{d(v_{GS} - v_{th})}$$

$$g_{m(sat)} = \beta|v_{GS} - v_{th}| \quad (2.23)$$

#### 2.4.4 ความนำ (conductance ; $g_{ds}$ ) และความต้านทานในภาวะนำกระแส ( $R_{on}$ )

ความนำ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมขอส ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$g_{ds} = \left[ \frac{\Delta I_D}{\Delta v_{DS}} \right]_{v_{GS} = \text{constan t}} \quad (2.24)$$

พิจารณาค่า  $g_{ds}$

$$g_{ds} = \frac{dI_D}{dv_{DS}} = \frac{d\left[\beta\left[(v_{GS} - v_{th})v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2}\right]\right]}{dv_{DS}}$$

$$g_{ds} = \beta|v_{GS} - v_{th} - v_{DS}| \quad (2.25)$$

ค่าความต้านทานในภาวะนำกระแสมีค่าตามสมการ

$$R_{on} = \frac{1}{g_{ds}} = \frac{1}{\beta|v_{GS} - v_{th} - v_{DS}|} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.5 แรงดันพังทลาย (breakdown voltage ; $V_{BV}$ )

แรงดันพังทลายของดีมอส เป็นตัวแปรสำคัญที่แสดงถึงความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด และเป็นแรงดันพังทลายแบบอะวอลานซ์ (avalanche breakdown voltage) ซึ่งเหมือนกับแรงดันพังทลายของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่วไป

แรงดันพังทลายแบบอะวอลานซ์ คือแรงดันพังทลายที่เกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้น ทำให้พาหะอิสระที่วิ่งผ่านบริเวณปลดพาหะนี้มีพลังงานมากพอจนทำให้เกิดการชนกับอะตอมภายในบริเวณปลดพาหะ และเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นทวีคูณ จนไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ ปรากฏการณ์การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้เรียกว่า การเกิดไอออนกระทบ (impact ionization) โดยปกติแล้วแรงดันพังทลายแบบอะวอลานซ์จะเกิดขึ้นในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่าสูงๆ [4]

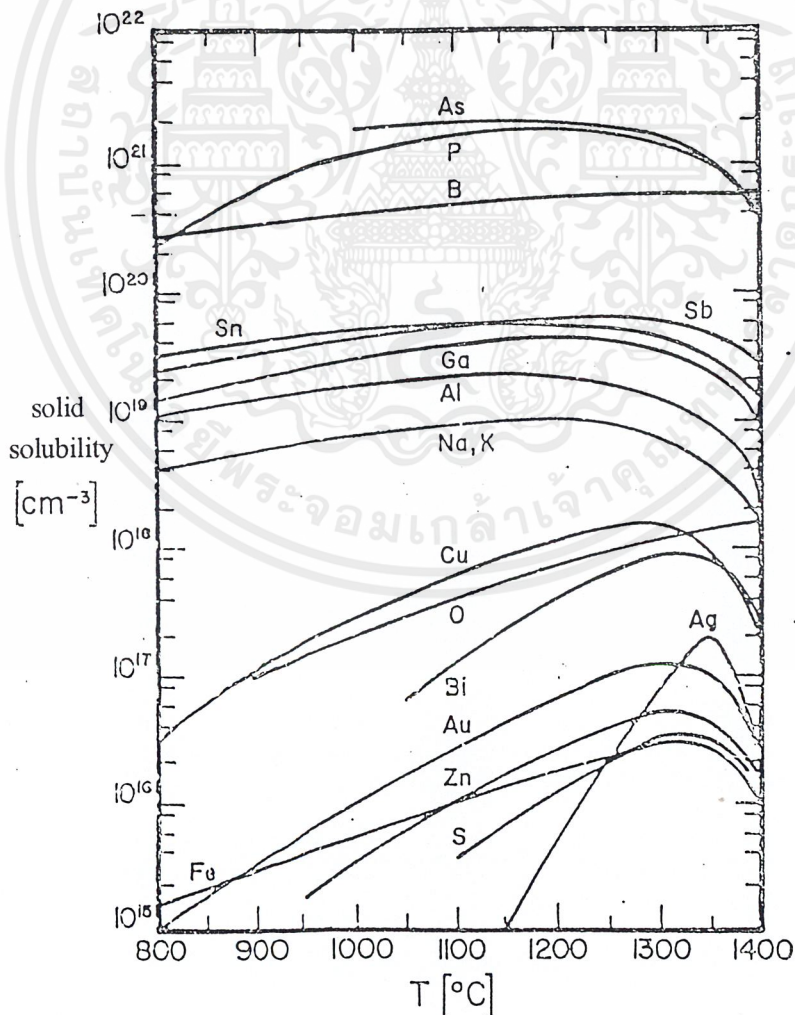
สำหรับดีมอสชนิดพีแชนแนล จะเกิดการพังทลายขึ้นที่รอยต่อของชั้นเอ็นเบสกับชั้นพีเดรนดริฟท์ เมื่อให้แรงดัน  $|V_{DS}|$  สูงพอ เนื่องจากเป็นรอยต่อของชั้นสารกึ่งตัวนำระหว่างชนิดพีกับชนิดเอ็น และเป็นรอยต่อที่ถูกไบอัสย้อนกลับ

### บทที่ 3

## ทฤษฎีการแพร่สารเจือ

เนื่องจากการควบคุมแรงดันชนิดเริ่ม และความลึกของรอยต่อในส่วนของชั้นเบส มีความสำคัญอย่างมากต่อโครงสร้างของดีมอส ดังนั้นการศึกษากการแพร่สารเจือจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจ ในบทนี้จึงกล่าวถึงทฤษฎีการแพร่สารเจือให้เข้าใจได้ดียิ่งขึ้น

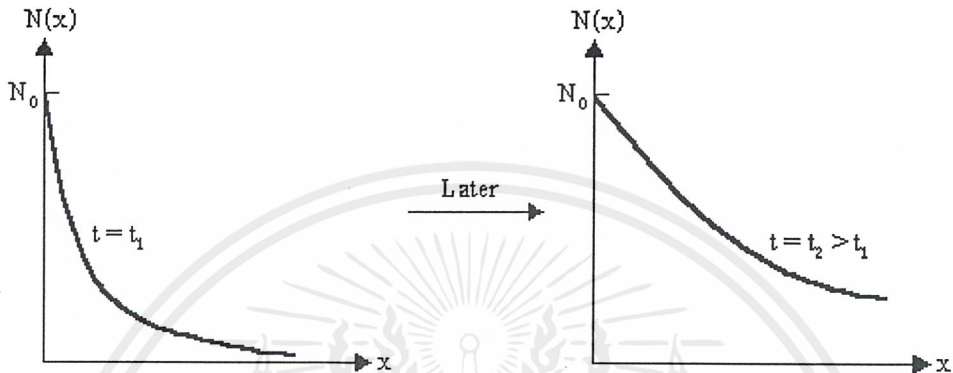
กระบวนการแพร่สารเจือ (diffusion process) [2] มีอยู่ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ predeposition จะเป็นการกำหนดความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ซึ่งถูกกำหนดขึ้นโดยตัวแปรของตัวอุปกรณ์ โดยเป็นการนำประจุ Q อะตอมต่อ 1 หน่วยพื้นที่ของสารเจือ เข้าไปในพื้นผิวของซิลิคอน แต่จะผ่านทะลุเข้าไปในแผ่นซิลิคอนได้เพียงเล็กน้อย ขั้นตอนที่สองคือ drive-in ประจุที่มีอยู่แล้วจากการ predeposition จะแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.1 solid solubility ของสารเจือแต่ละชนิดเทียบกับอุณหภูมิ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอน predeposition สารเจือจะเข้าถึงแผ่นซิลิคอนโดยใช้ก๊าซเป็นพาหะที่อุณหภูมิสูง และก่อดักรวมอยู่ที่พื้นผิว ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่สามารถเข้าไปในแผ่นซิลิคอน ได้จะมีค่าจำกัดสูงสุดค่าหนึ่งเรียกว่า solid solubility ;  $N_0$  ซึ่งมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิและมีค่าแตกต่างกันไปในสารเจือแต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

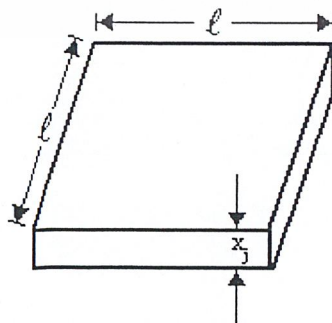


รูปที่ 3.2 การแพร่ซึมของอะตอมสารเจือระหว่างการ predeposition

จากรูปที่ 3.2 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ  $N(x)$  จะลดลงไปตามความลึก  $x$  แต่เมื่อเพิ่มเวลา  $t$  ในขั้นตอนนี้มากขึ้น อะตอมสารเจือก็จะแพร่เข้าไปในเนื้อสารได้มากขึ้น

สำหรับขั้นตอน drive-in เป็นการทำให้สารเจือแผ่ขยายจากบริเวณความเข้มข้นสูงที่ผิวไปสู่บริเวณความเข้มข้นต่ำในเนื้อสารที่อุณหภูมิเหมาะสม ซึ่งจะมีการสร้างชั้นออกไซด์ชั้นใหม่พร้อมกันด้วย เพื่อป้องกันบริเวณแพร่สารเจือจากสิ่งสกปรกต่างๆ จากขั้นตอนนี้ทำให้ได้รอยต่อพี-เอ็นที่ลึกขึ้นกว่าในขั้นตอนแรก

ชั้นการแพร่ที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือจะมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือไม่เท่ากันตามความลึก ดังนั้นจึงมีค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity ;  $\rho$ ) ที่ไม่คงที่ตามความลึก จึงต้องพิจารณาความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ( $\bar{\rho}$ )



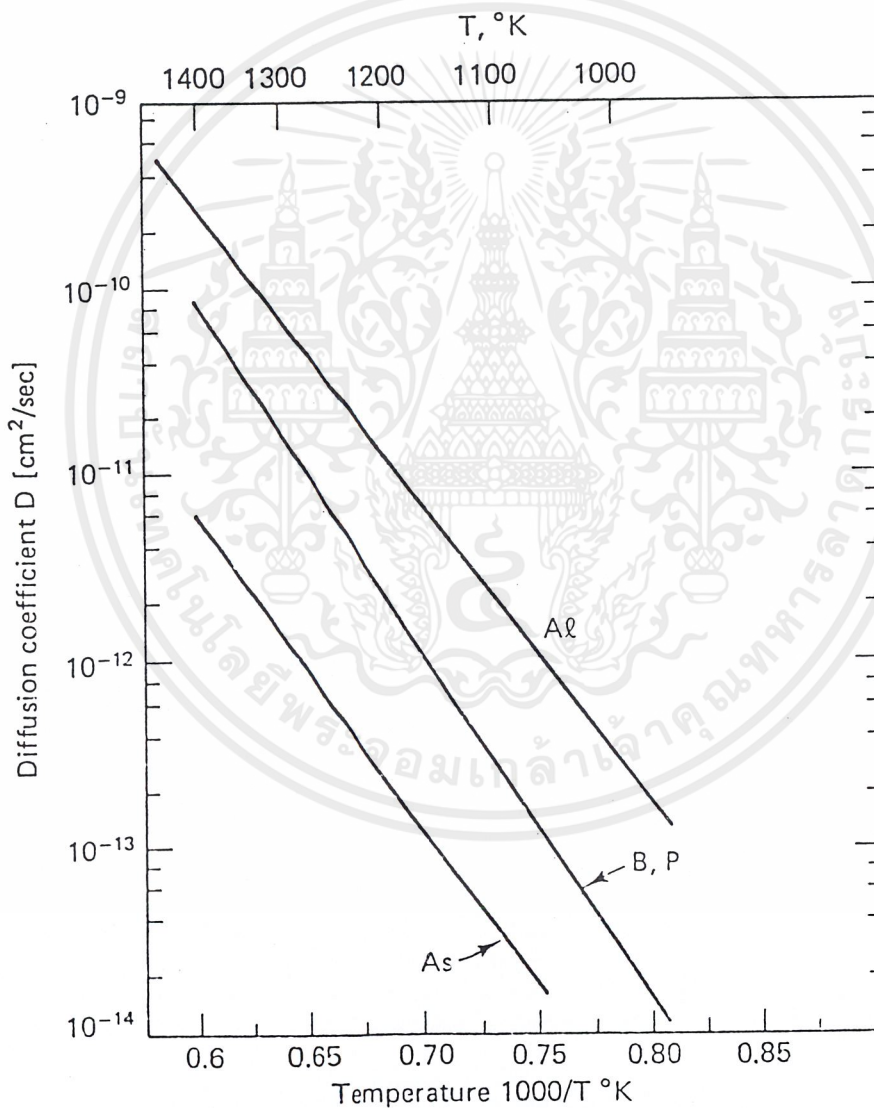
รูปที่ 3.3 ส่วนของชั้นการแพร่ที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 ความต้านทานที่พื้นผิว  $R_s$  คือ

$$R_s = \frac{\bar{\rho} \text{ length}}{\text{area}} = \frac{\bar{\rho} l}{lx_j} = \frac{\bar{\rho}}{x_j} \quad (3.1)$$

จะเห็นได้ว่า  $R_s$  มีค่าไม่ขึ้นกับ  $l$  และมีค่าเท่ากับไม่ว่าพื้นผิวจัตุรัสนั้นจะมีพื้นที่เท่าใด  $R_s$  เรียกว่า แผ่นความต้านทาน (sheet resistance) มีหน่วยเป็นโอห์ม โดยทั่วไปเรียกว่า ohms per square ( $\Omega/\square$ )



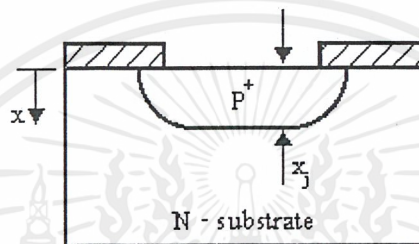
รูปที่ 3.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือแต่ละชนิดเทียบกับอุณหภูมิ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการแพร่สารเจือของทั้ง 2 ขั้นตอนมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient ;  $D$ ) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปในสารเจือแต่ละชนิด รูปที่ 3.4 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่  $D$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) เทียบกับอุณหภูมิของสารเจือแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

คณิตศาสตร์สำหรับการแพร่ [2]

ลักษณะของการแพร่สารเจือเข้าไปในเนื้อสารจะเกิดขึ้นทุกทิศทาง แต่จะวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารเจือ  $N(x,t)$  อดต่อต่อ 1 หน่วยลูกบาศก์ในทิศทางการแพร่  $x$  เพียงมิติเดียว ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อนุภาคแพร่เข้าไปในเนื้อสารในทิศทาง  $x$

predeposition ถูกกำหนดโดยความเข้มข้นพื้นผิวคงที่ ซึ่งเป็น solid solubility ของสารเจือ และมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมค่าของ  $N_0$  ให้มีค่าตามต้องการ การแพร่สารเจือในขั้นตอนนี้มีเงื่อนไขขอบเขตคือ  $N(0,t) = N_0$  ;  $N(\infty, t) = 0$  และ  $N(x,0) = 0$  ความเข้มข้นของสารเจือมีค่าดังสมการ

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3.2)$$

โดยที่  $\operatorname{erfc}(Z)$  คือ error function complementary มีค่าตามตารางในภาคผนวก ก.

$N_0$  คือ solid solubility ( $\text{cm}^{-3}$ )

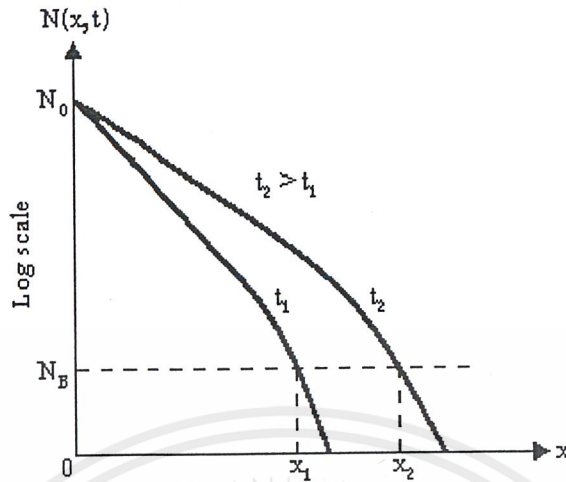
$x$  คือ ระยะทางความลึกจากพื้นผิว (cm)

$D$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$t$  คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการแพร่สารเจือ (s)

รูปที่ 3.6 เป็นความเข้มข้นสารเจือที่ได้จากสมการ 3.2 ที่เวลา 2 ค่า จากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความลึกระดับหนึ่ง ความเข้มข้นของสารเจือจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งเป็นการอธิบาย  $N(x,t)$  ในสัดส่วนแบบลอการิทึม (log scale)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 predeposition

ความเข้มข้น  $N(x, t)$  หมายถึงอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในเนื้อสารเท่านั้น ส่วน  $N_B$  เป็นค่าความเข้มข้นที่ฐานรองและมีความเข้มข้นเสมอกันตลอดความลึก ซึ่งแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 3.6 เนื่องจาก  $N(x, t)$  และ  $N_B$  เป็นสารเจือชนิดตรงข้ามกัน ดังนั้นผลรวมของความเข้มข้นสุทธิคือ  $N(x, t) - N_B$  ในรูปที่ 3.5 ที่ความลึก  $x_j$  จะได้  $N(x_j) - N_B = 0$  ในรูปที่ 3.6 ความลึก  $x_j$  ที่เวลา  $t_j$  คือ  $x_1$  และเพิ่มขึ้นเป็น  $x_2$  ที่เวลา  $t_2$

ถ้าให้  $N(x, t) = N_B$  และ  $x = x_j$  สมการ 3.2 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{N_B}{N_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x_j}{2\sqrt{Dt_p}}\right)$$

เมื่อ  $t_p$  คือเวลาที่ใช้ในกระบวนการ predeposition

ซึ่งเขียนใหม่เพื่อหาค่าความลึก  $x_j$  ได้เป็น

$$x_j = 2\sqrt{Dt_p} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_B}{N_0}\right) \quad (3.3)$$

ความหนาแน่นประจุต่อตารางพื้นที่หาได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$Q(t_p) = \int_0^{\infty} N(x, t_p) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{Dt_p} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

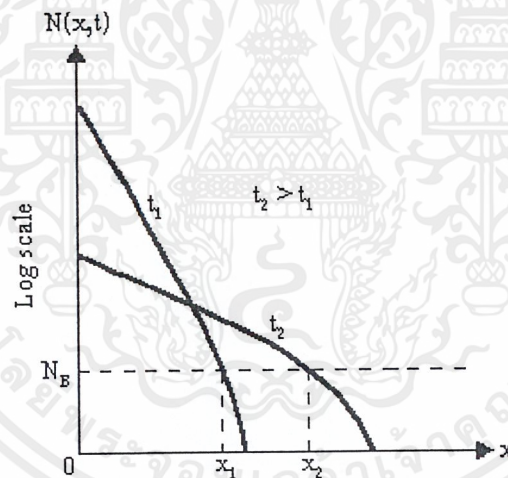
drive-in เป็นการทำให้ความเข้มข้นที่พื้นผิวแทรกผ่านเข้าไปในแผ่นซิลิคอนได้มากกว่าการ predeposition ความหนาแน่นประจุ  $Q(t_p)$  ก่อนการ drive-in จะอยู่ใกล้ผิวมากเมื่อเทียบกับความลึกสุดท้ายหลังจาก drive-in หลังจาก drive-in แล้วค่าความหนาแน่นประจุรวมทั้งหมดยังคงมีค่าเท่ากับ  $Q(t_p)$  ดังนี้

$$\int_0^{\infty} N(x, t_D) dx = Q(t_p)$$

เมื่อ  $t_p$  คือเวลาที่ใช้ในการ drive-in

ความเข้มข้นที่แทรกเข้าไปในเนื้อสารระหว่างการ drive-in คือ

$$N(x, t) = \frac{Q(t_p)}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/(4Dt)} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.7 drive-in

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า  $N(0,t)$  มีค่าลดลงตามเวลา เมื่อแทน  $x=0$  ในสมการ 3.5 จะได้

$$N(0, t) = \frac{Q(t_p)}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (3.6)$$

จากสมการ 3.5 เมื่อ  $x = x_j$  ทำให้  $N(x, t) = N_B$  แล้วเขียนเพื่อหาค่าความลึกได้

$$x_j = \sqrt{4Dt \ln \left( \frac{Q(t_p)}{N_B \sqrt{\pi Dt}} \right)} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดประสงค์สำคัญในการแพร่สารเจือคือ การทำให้เกิดมีอะตอมสารเจือผู้ให้และอะตอมสารเจือผู้รับขึ้น มีสารหลายชนิดที่จะทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้ แต่โดยทั่วไปแล้ว จะใช้กัน 2 ชนิด คือ การแพร่ฟอสฟอรัสสำหรับทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และโบรอนสำหรับทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิดพี

แหล่งจ่ายสารเจือจะอยู่ในรูปของสารประกอบทั้ง 3 สถานะคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การใช้แหล่งจ่ายสารเจือที่เป็นแผ่นแข็งเช่น BN หรือ  $\text{SiP}_2\text{O}_7$  จะทำให้มีความสะดวกมาก เพราะแผ่นแข็งสามารถวางสลับกับแผ่นเวเฟอร์ เมื่ออุณหภูมิสูงๆภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย อะตอมสารเจือจะแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้ [5]

### ตัวอย่างการคำนวณเกี่ยวกับการแพร่สารเจือ

การแพร่สารเจือโบรอนลงบนฐานรองชนิดเอ็นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ  $19 \Omega\cdot\text{cm}$  โดยทำการ predeposition ที่อุณหภูมิ  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที และทำการ drive-in ที่อุณหภูมิ  $1050^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 14 ชม. ให้หาค่าความลึกของรอยต่อที่เกิดจากการแพร่นี้

วิธีทำ 1. หาค่าความเข้มข้นของฐานรอง โดย

$$N_B = \frac{1}{q\mu_n\rho} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 1350 \times 19} = 2.44 \times 10^{14} \text{ atom/cm}^3$$

2. หาความลึกหลังจาก predeposition

ที่อุณหภูมิ  $1000^\circ\text{C}$  :  $N_0 = 3.9 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$ ,  $D = 3.3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$

เวลา 30 นาที :  $t = 1800 \text{ s}$

$$\begin{aligned} x_j &= 2\sqrt{Dt_P} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_B}{N_0}\right) = 2\sqrt{3.3 \times 10^{-14} \times 1800} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{2.44 \times 10^{14}}{3.9 \times 10^{20}}\right) \\ &= 1.54 \times 10^{-5} \operatorname{erfc}^{-1}(6.26 \times 10^{-7}) \\ &= 1.54 \times 10^{-5} \times 3.524 = 0.5427 \mu\text{m} \end{aligned}$$

ความหนาแน่นประจุที่ได้จากการ predeposition

$$Q(t_p) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{Dt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times 3.9 \times 10^{20} \times \sqrt{3.3 \times 10^{-14} \times 1800} = 3.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$$

### 3. หาคความลึกที่ได้จากการ drive-in

ที่อุณหภูมิ  $1050^{\circ}\text{C}$  :  $D = 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$

เวลา 14 ชม. :  $t = 50400 \text{ s}$

$$\begin{aligned} x_j &= \sqrt{4Dt \ln \left( \frac{Q(t_p)}{N_B \sqrt{\pi Dt}} \right)} \\ &= \sqrt{4 \times 10^{-13} \times 50400 \ln \left( \frac{3.4 \times 10^{15}}{2.44 \times 10^{14} \sqrt{\pi \times 10^{-13} \times 50400}} \right)} \\ &= 4.8383 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้ความลึกจากการแพร่สารเจือคือ  $4.8383 \text{ } \mu\text{m}$

## บทที่ 4

### กระบวนการสร้าง

ในบทนี้จะอธิบายถึง ขั้นตอนที่ทำกรสร้างแผ่นทดสอบ มอสคาปาซิเตอร์ และดีมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งกระบวนการสร้างส่วนใหญ่เป็นกระบวนการสร้างมาตรฐานที่ใช้สร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่วไป

#### 4.1 กระบวนการสร้างแผ่นทดสอบ

แผ่นทดสอบเป็นแผ่นที่ใช้ทดลองแพร่สารเจือเพื่อหาเงื่อนไขได้แก่ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแพร่สารเจือ เพื่อให้ได้ชั้นการแพร่ที่เป็นเวลและมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือตามต้องการ โดยจะทดสอบการแพร่สารเจือทั้งที่เวลและเย็นเวล ดังนั้นจึงต้องแพร่สารเจือ 2 ชนิดคือโบรอนและฟอสฟอรัส ซึ่งในกระบวนการสร้างแผ่นทดสอบนี้ ไม่จำเป็นต้องใช้กระจกต้นแบบ

สำหรับการทดสอบการแพร่สารเจือ ได้ทำการทดสอบโดยมีแผ่นทดสอบทั้งหมด 8 แผ่น แบ่งเป็นแผ่นที่ใช้ทดสอบที่เวลและเย็นเวลอย่างละ 4 แผ่น ในแต่ละแผ่นจะทำการ predeposition ที่อุณหภูมิต่างกัน แต่ใช้เวลา 30 นาทีเท่ากัน ดังตารางที่ 4.1 หลังจากนั้น จึงแบ่งแผ่นทดสอบแต่ละแผ่นออกเป็น 5 ส่วน แล้วทำการ drive-in ที่เวลาต่างกัน แต่ใช้อุณหภูมิเดียวกันคือ 1050°C ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการ predeposition เป็นเวลา 30 นาทีของแผ่นทดสอบแต่ละแผ่น

แผ่นทดสอบ	อุณหภูมิ predeposition	
	สารเจือโบรอน	สารเจือฟอสฟอรัส
แผ่นที่ 1	770°C	950°C
แผ่นที่ 2	810°C	1000°C
แผ่นที่ 3	850°C	1020°C
แผ่นที่ 4	940°C	1050°C

ตารางที่ 4.2 ช่วงเวลาในการ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C ของแผ่นทดสอบแต่ละส่วน

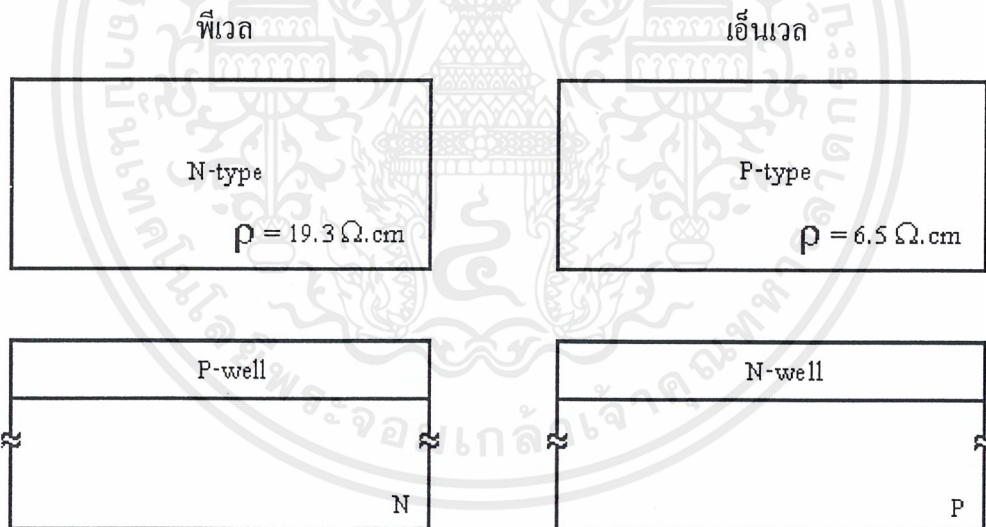
แผ่นทดสอบ	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 3	ส่วนที่ 4	ส่วนที่ 5
เวลา drive-in	ไม่ drive-in	4 ช.ม.	8 ช.ม.	12 ช.ม.	14 ช.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการสร้าง (รายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของการสร้าง แสดงในภาคผนวก ค.)

1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอนและการตรวจคุณสมบัติ  
แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น 4 แผ่น หนา 100) มีค่าความต้านทานจำเพาะ  $19.3 \Omega \cdot \text{cm}$   
แผ่นซิลิคอนชนิดพี 4 แผ่น หนา 100) มีค่าความต้านทานจำเพาะ  $6.5 \Omega \cdot \text{cm}$
2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก
3. การทำความสะอาดผิวหน้า
4. กระบวนการ predeposition
5. ลอกชั้น boron glass , phosphorus glass
6. การทำความสะอาดผิวหน้า
7. กระบวนการ drive-in
8. การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

รูปภาพสรุปขั้นตอนการสร้างของแผ่นทดสอบ



#### 4.2 กระบวนการสร้างมอสคาปาซิเตอร์

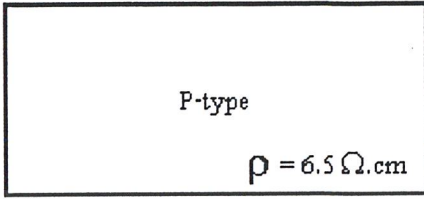
มอสคาปาซิเตอร์ที่ทำการสร้างเพื่อศึกษาค่าของแรงดันขีดเริ่ม จะเป็นมอสคาปาซิเตอร์ที่มีเวลเป็นทั้งสารกึ่งตัวนำเอ็น ในที่นี้จะเรียกว่า เอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์ สำหรับกระจัดต้นแบบที่ใช้ในกระบวนการสร้างนี้ แสดงในภาคผนวก ง. รูปที่ ง.1

## ขั้นตอนการสร้าง

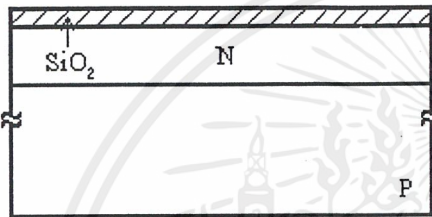
1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอนและการควบคุมสมบัติ  
แผ่นซิลิคอนชนิดพี 1 แผ่น หนา (100) มีค่าความต้านทานจำเพาะ 6.5  $\Omega$ .cm
2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก
3. การทำความสะอาดผิวหน้า
4. กระบวนการ predeposition
  - phosphorus predeposition Temp 900°C เวลา 30 นาที
5. ลอกชั้น phosphorus glass
6. การทำความสะอาดผิวหน้า
7. กระบวนการ drive-in Temp 1050°C เวลา 14 ชม. โดยสร้างชั้นออกไซด์ดังนี้
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 60 นาที
  - Wet Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1000 cc/min 60 นาที
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 60 นาที
8. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 1
9. การสกัดชั้นออกไซด์
10. กระบวนการลอกฟิล์ม
11. การทำความสะอาดผิวหน้า
12. Gate Oxidation Temp 1050°C
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 45 นาที
13. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 2
14. การสกัดชั้นออกไซด์
15. กระบวนการลอกฟิล์ม
16. การทำความสะอาดผิวหน้า
17. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ (Aluminium evaporation)
18. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 3
19. การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)
20. กระบวนการลอกฟิล์ม
21. กระบวนการ Sintering Temp 500°C เวลา 12 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

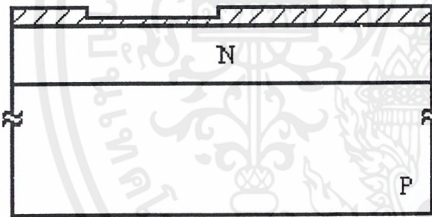
รูปภาพสรุปขั้นตอนการสร้างของเอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์



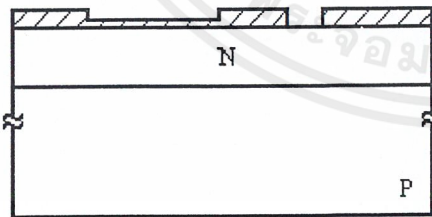
การเตรียมแผ่นฐานรองชนิดคอนกรีตพี และการทำความสะอาดผิวหน้า



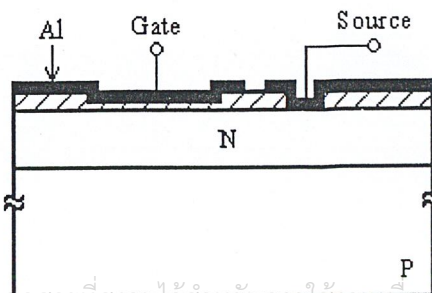
การแพร่สารเจือฟอสฟอรัส และสร้างชั้นชนิดคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน



กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เปิดช่องสำหรับเกตออกไซด์ และสร้างชั้นเกตออกไซด์ ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน



กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เปิดช่องเพื่อเชื่อมต่อกับโลหะ



การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสกัดอลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออก และกระบวนการ Sintering

#### 4.3 กระบวนการสร้างดีมอสทรานซิสเตอร์

ดีมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำการสร้าง เป็นพีแชนแนลดีมอส 2 แผ่นที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิในการแพร่สารเจือที่เอ็นเบสต่างกันคือ predeposition ที่อุณหภูมิ 870°C และ 900°C สำหรับกระจกต้นแบบที่ใช้ในกระบวนการสร้างนี้ แสดงในภาคผนวก ง. รูปที่ ง.2

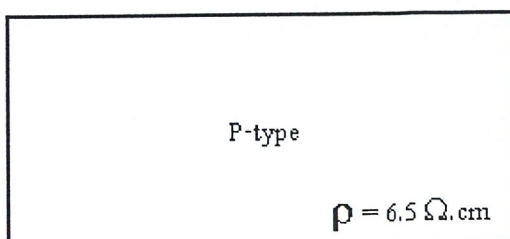
##### ขั้นตอนการสร้าง

1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอนและการตรวจคุณสมบัติ
  - แผ่นซิลิคอนชนิดพี 2 แผ่น หนา (100) มีค่าความต้านทานจำเพาะ 6.5  $\Omega$ .cm
2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก
3. การทำความสะอาดผิวหน้า
4. กระบวนการออกซิเดชัน
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 180 นาที
  - Wet Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1000 cc/min 90 นาที
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 90 นาที
5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 1
6. การสกัดชั้นออกไซด์
7. กระบวนการลอกฟิล์ม
8. การทำความสะอาดผิวหน้า
9. กระบวนการ predeposition
  - แผ่นที่ 1 phosphorus predeposition Temp 870°C เวลา 30 นาที
  - แผ่นที่ 2 phosphorus predeposition Temp 900°C เวลา 30 นาที
10. ลอกชั้น phosphorus glass
11. การทำความสะอาดผิวหน้า
12. กระบวนการ drive-in Temp 1050°C เวลา 14 ชม. โดยสร้างชั้นออกไซด์ดังนี้
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 60 นาที
  - Wet Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1000 cc/min 60 นาที
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 60 นาที
13. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 2
14. การสกัดชั้นออกไซด์
15. กระบวนการลอกฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

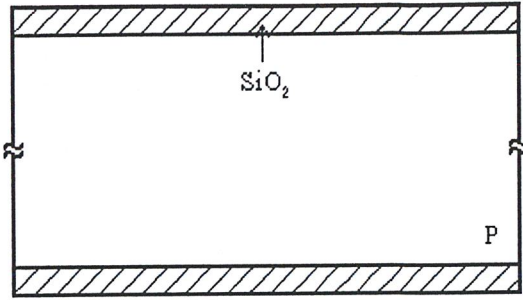
16. การทำความสะอาดผิวหน้า
17. กระบวนการ predeposition
  - boron predeposition Temp 980°C เวลา 20 นาที
18. ลอกชั้น boron glass
19. การทำความสะอาดผิวหน้า
20. กระบวนการ drive-in Temp 1050°C เวลา 5 นาที โดยสร้างชั้นออกไซด์ดังนี้
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 5 นาที
21. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 3
22. การสกัดชั้นออกไซด์
23. กระบวนการลอกฟิล์ม
24. การทำความสะอาดผิวหน้า
25. Gate Oxidation Temp 1050°C
  - Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O<sub>2</sub> 1200 cc/min 45 นาที
26. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 4
27. การสกัดชั้นออกไซด์
28. กระบวนการลอกฟิล์ม
29. การทำความสะอาดผิวหน้า
30. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมด้านหน้าแผ่นในสุญญากาศ
31. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 5
32. การสกัดชั้นอลูมิเนียม
33. กระบวนการลอกฟิล์ม
34. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมด้านหลังแผ่นในสุญญากาศ
35. กระบวนการ Sintering Temp 500°C เวลา 12 นาที

รูปภาพสรุปขั้นตอนในการสร้างของพีแชนแนลดีมอส

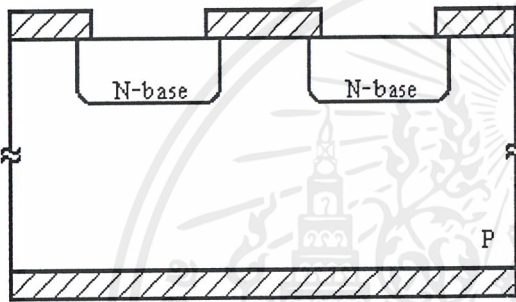


การเตรียมแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี  
และการทำความสะอาดผิวหน้า

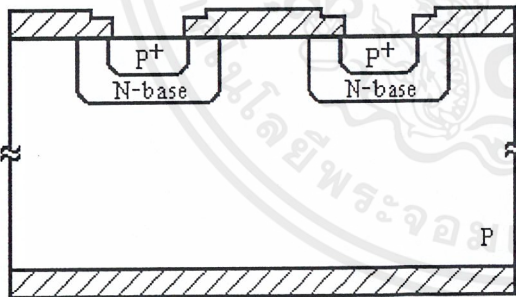
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



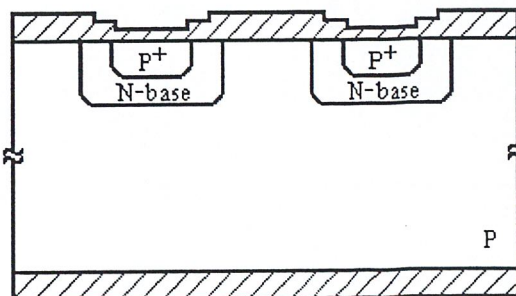
การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์  
ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน



กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี  
และแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วนเบส

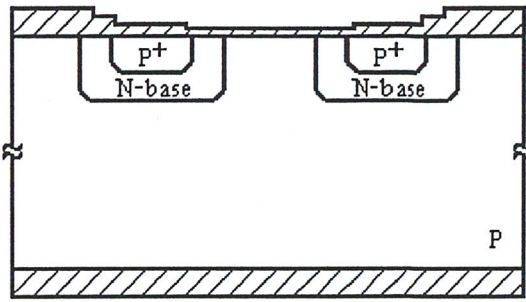


กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี  
และแพร่สารเจือโบรอนในส่วนซอส

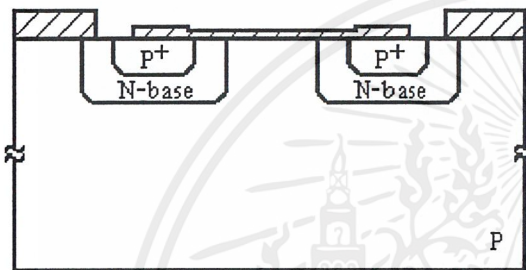


สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์  
ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน

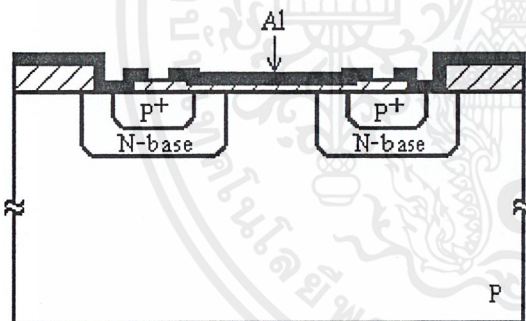
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



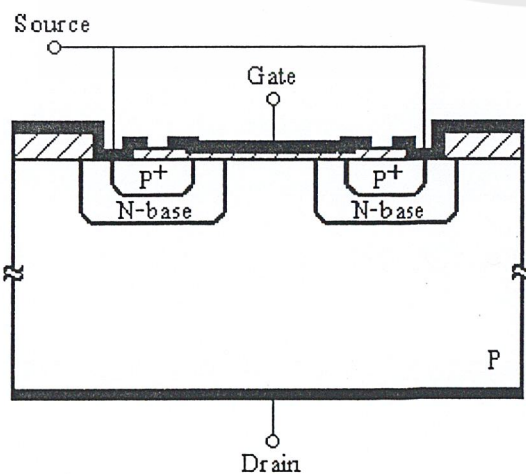
กระบวนการโฟโวลติโกราฟี  
เปิดช่องสำหรับเกตออกไซด์  
และสร้างชั้นเกตออกไซด์  
ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน



กระบวนการโฟโวลติโกราฟี  
เปิดช่องเพื่อเชื่อมต่อกับโลหะ  
และลอกชั้นออกไซด์ด้านหลังแผ่นออก



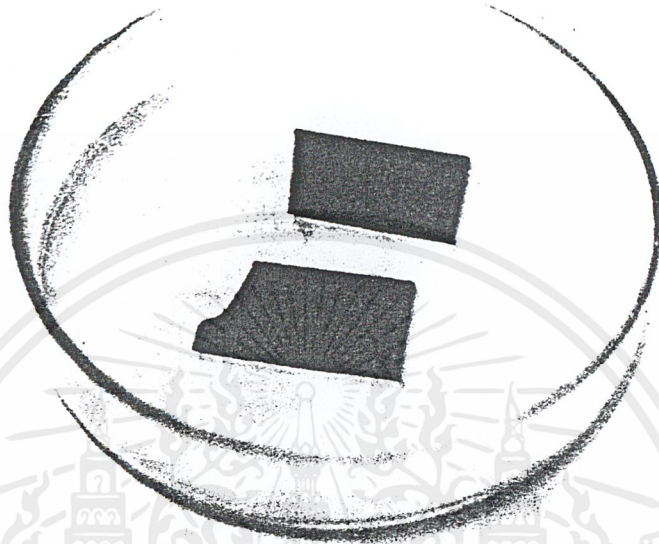
การเคลือบชั้นออกไซด์นิยมนำหน้า  
และกระบวนการโฟโวลติโกราฟี  
เพื่อสกัดออกไซด์ส่วนที่ไม่ต้องการออก



การเคลือบชั้นออกไซด์นิยมนำหลัง  
และกระบวนการ Sintering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายของพีแชนแนลคีมอสที่สร้างเสร็จแล้ว เป็นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของพีแชนแนลคีมอสที่สร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

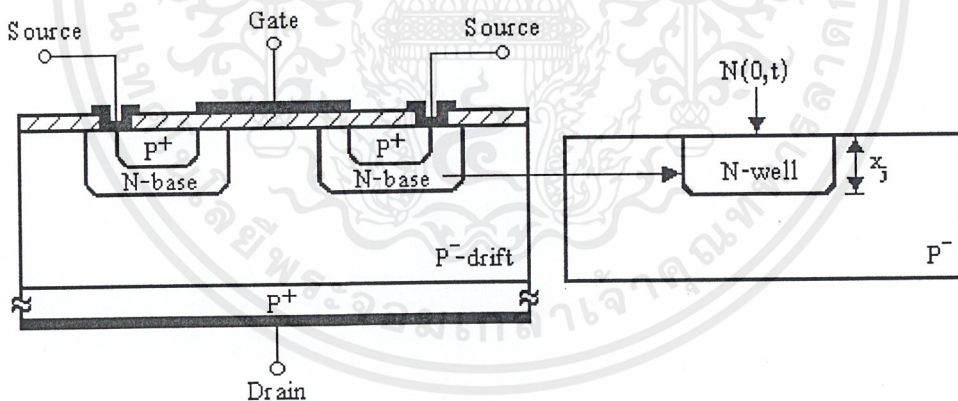
### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง การทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆ และผลการทดลองที่ได้ของเวเลนบนแผ่นทดสอบ เอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์ และพีแชนแนลดีมอส

สำหรับเวเลนบนแผ่นทดสอบ จะมีทั้งพีเวลและเอ็นเวลที่ต้องทำการตรวจสอบ ส่วนพีแชนแนลดีมอสจะมี 2 แผ่นที่ต้องทำการวัด ซึ่งทั้ง 2 แผ่นนี้ มีความแตกต่างกันของกระบวนการสร้าง ในขั้นตอนการทำ predeposition ของชั้นเอ็นเบส คือ แผ่นที่ 1 ใช้อุณหภูมิที่  $870^{\circ}\text{C}$  ส่วนแผ่นที่ 2 ใช้ อุณหภูมิที่  $900^{\circ}\text{C}$

#### 5.1 การตรวจสอบเวเลนบนแผ่นทดสอบ

การสร้างเวเลนบนแผ่นทดสอบนั้น ทำเพื่อหาเงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับการแพร่สารเจือในส่วนเบสของดีมอส ให้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิว  $[N(0,t)]$  และความลึก  $[x_j]$  ตามต้องการ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเอ็นเวลบนแผ่นทดสอบกับพีแชนแนลดีมอส

ในการตรวจสอบเวเลนบนแผ่นทดสอบ จะทำการวัดหาค่าความลึกและความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเวเลน โดยการวัดความต้านทานด้วยเทคนิค Spreading Profile Resistance จากเครื่อง SR-210 (รายละเอียดวิธีการวัดอยู่ที่ภาคผนวก จ. และภาพแสดงเครื่องมือวัดรูปที่ จ.1) ผลการวัดที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.1-5.4 ซึ่งมีการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี (วิธีการคำนวณเหมือนกับตัวอย่างการคำนวณเกี่ยวกับการแพร่สารเจือในบทที่ 3)

ตารางที่ 5.1 ความลึกของเวลที่ได้จากการแพร่สารเจือโบรอน (predeposition เป็นเวลา 30 นาที และ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C )

เวลา drive-in	4 ช.ม.		8 ช.ม.		12 ช.ม.		14 ช.ม.	
อุณหภูมิช่วง Predeposition	จำนวน ( $\mu\text{m}$ )	วัด ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน ( $\mu\text{m}$ )	วัด ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน ( $\mu\text{m}$ )	วัด ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน ( $\mu\text{m}$ )	วัด ( $\mu\text{m}$ )
770°C	1.76	1.57	2.42	2.09	2.90	2.44	3.11	2.79
810°C	1.92	1.75	2.64	2.27	3.17	2.62	3.41	3.32
850°C	2.02	2.27	2.79	2.62	3.36	2.97	3.61	3.49
940°C	2.24	2.62	3.10	2.79	3.75	3.49	4.03	4.19

ตารางที่ 5.2 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเวลที่ได้จากการแพร่สารเจือโบรอน (predeposition เป็นเวลา 30 นาที และ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C )

เวลา drive-in	4 ช.ม.		8 ช.ม.		12 ช.ม.		14 ช.ม.	
อุณหภูมิช่วง Predeposition	จำนวน ( $\text{cm}^{-3}$ )	วัด ( $\text{cm}^{-3}$ )	จำนวน ( $\text{cm}^{-3}$ )	วัด ( $\text{cm}^{-3}$ )	จำนวน ( $\text{cm}^{-3}$ )	วัด ( $\text{cm}^{-3}$ )	จำนวน ( $\text{cm}^{-3}$ )	วัด ( $\text{cm}^{-3}$ )
770°C	$1.1 \times 10^{17}$	$3.5 \times 10^{16}$	$8.0 \times 10^{16}$	$3.0 \times 10^{16}$	$6.5 \times 10^{16}$	$2.5 \times 10^{16}$	$6.0 \times 10^{16}$	$2.0 \times 10^{16}$
810°C	$3.0 \times 10^{17}$	$2.7 \times 10^{17}$	$2.1 \times 10^{17}$	$2.7 \times 10^{17}$	$1.7 \times 10^{17}$	$2.5 \times 10^{17}$	$1.6 \times 10^{17}$	$2.3 \times 10^{17}$
850°C	$5.9 \times 10^{17}$	$5.0 \times 10^{17}$	$4.2 \times 10^{17}$	$5.0 \times 10^{17}$	$3.4 \times 10^{17}$	$4.8 \times 10^{17}$	$3.2 \times 10^{17}$	$4.8 \times 10^{17}$
940°C	$3.0 \times 10^{18}$	$2.0 \times 10^{18}$	$2.1 \times 10^{18}$	$1.8 \times 10^{18}$	$1.7 \times 10^{18}$	$1.8 \times 10^{18}$	$1.6 \times 10^{18}$	$1.8 \times 10^{18}$

ตารางที่ 5.3 ความลึกของเวลที่ได้จากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (predeposition เป็นเวลา 30 นาที และ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C )

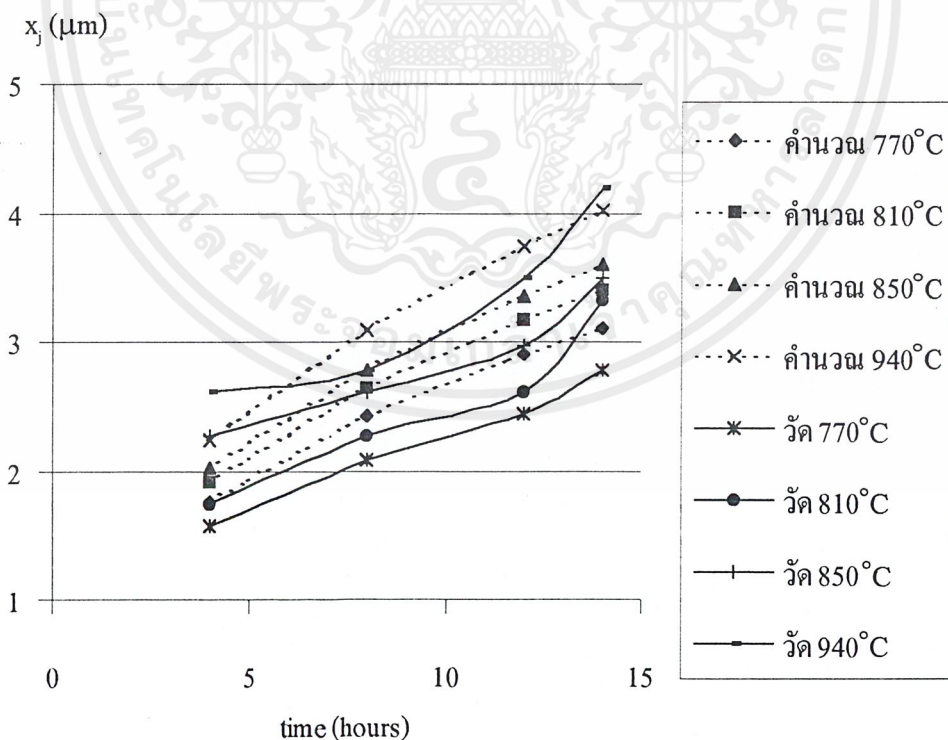
เวลา drive-in	4 ช.ม.		8 ช.ม.		12 ช.ม.		14 ช.ม.	
อุณหภูมิช่วง Predeposition	จำนวน ( $\mu\text{m}$ )	วัด ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน ( $\mu\text{m}$ )	วัด ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน ( $\mu\text{m}$ )	วัด ( $\mu\text{m}$ )	จำนวน ( $\mu\text{m}$ )	วัด ( $\mu\text{m}$ )
950°C	3.02	2.44	4.14	3.32	4.98	4.36	5.34	4.72
1000°C	3.27	2.62	4.50	3.49	5.43	4.53	5.83	5.41
1020°C	3.38	2.79	4.66	3.67	5.64	5.57	6.03	5.93
1050°C	3.46	3.32	4.78	3.84	5.77	6.63	6.19	8.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเวลที่ได้จากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (predeposition เป็นเวลา 30 นาที และ drive-in ที่อุณหภูมิ 1050°C)

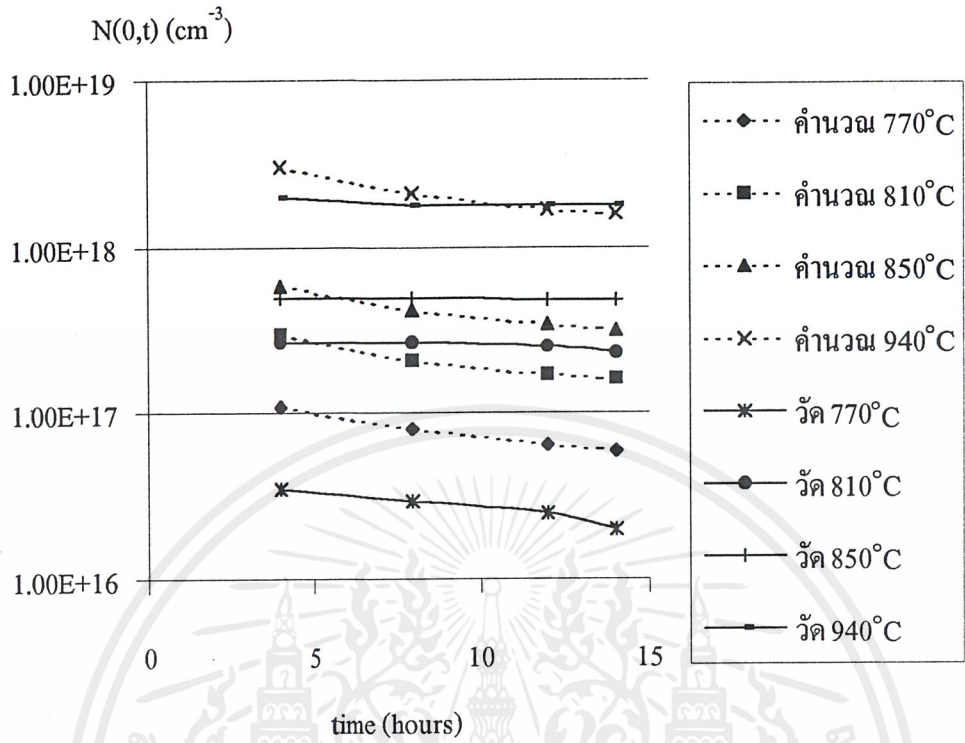
เวลา drive-in	4 ช.ม.		8 ช.ม.		12 ช.ม.		14 ช.ม.	
อุณหภูมิช่วง Predeposition	คำนวณ (cm <sup>-3</sup> )	วัด (cm <sup>-3</sup> )	คำนวณ (cm <sup>-3</sup> )	วัด (cm <sup>-3</sup> )	คำนวณ (cm <sup>-3</sup> )	วัด (cm <sup>-3</sup> )	คำนวณ (cm <sup>-3</sup> )	วัด (cm <sup>-3</sup> )
950°C	$6.4 \times 10^{17}$	$5.8 \times 10^{17}$	$4.5 \times 10^{17}$	$5.4 \times 10^{17}$	$3.7 \times 10^{17}$	$3.8 \times 10^{17}$	$3.4 \times 10^{17}$	$2.0 \times 10^{17}$
1000°C	$1.7 \times 10^{18}$	$7.4 \times 10^{17}$	$1.2 \times 10^{18}$	$7.0 \times 10^{17}$	$9.8 \times 10^{17}$	$4.4 \times 10^{17}$	$9.1 \times 10^{17}$	$3.9 \times 10^{17}$
1020°C	$2.7 \times 10^{18}$	$7.8 \times 10^{17}$	$1.9 \times 10^{18}$	$7.4 \times 10^{17}$	$1.6 \times 10^{18}$	$4.9 \times 10^{17}$	$1.4 \times 10^{18}$	$4.7 \times 10^{17}$
1050°C	$3.8 \times 10^{18}$	$9.0 \times 10^{18}$	$2.7 \times 10^{18}$	$8.0 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$6.8 \times 10^{18}$	$2.0 \times 10^{18}$	$5.8 \times 10^{18}$

หลังจากนั้นจึงนำมาแสดงผลเป็นรูปกราฟรูปที่ 5.2-5.5 และจากข้อมูลในช่วงเวลา drive-in 14 ช.ม. ของตารางที่ 5.1 , 5.2 นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5.6 และตารางที่ 5.3 , 5.4 นำมาแสดงเป็นกราฟรูปที่ 5.7

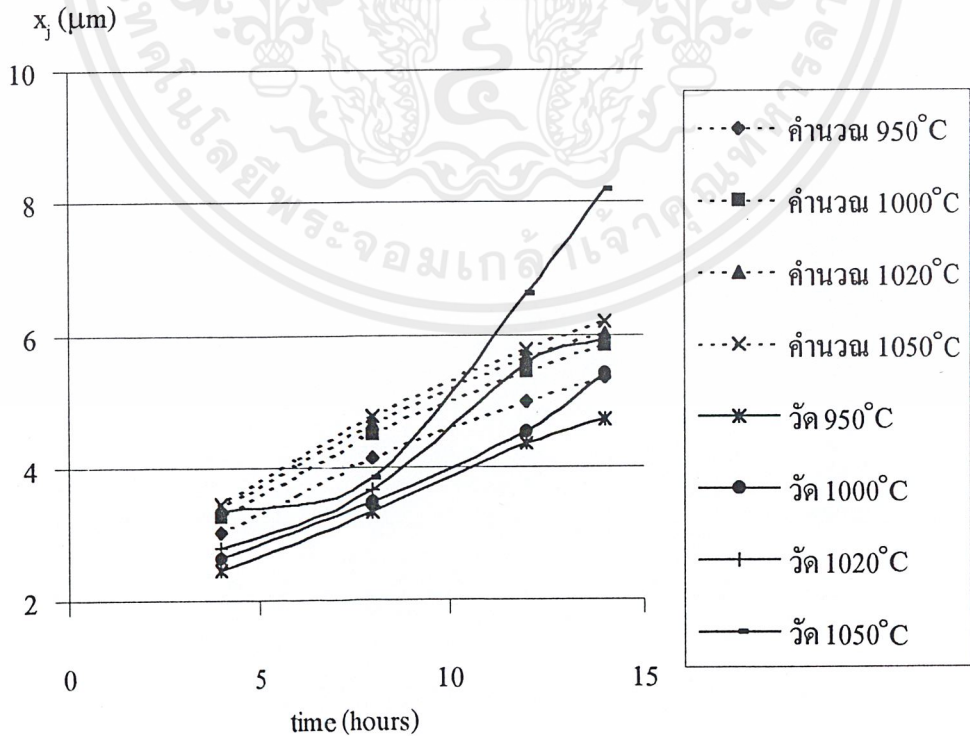


รูปที่ 5.2 กราฟความลึกของพีเวลเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

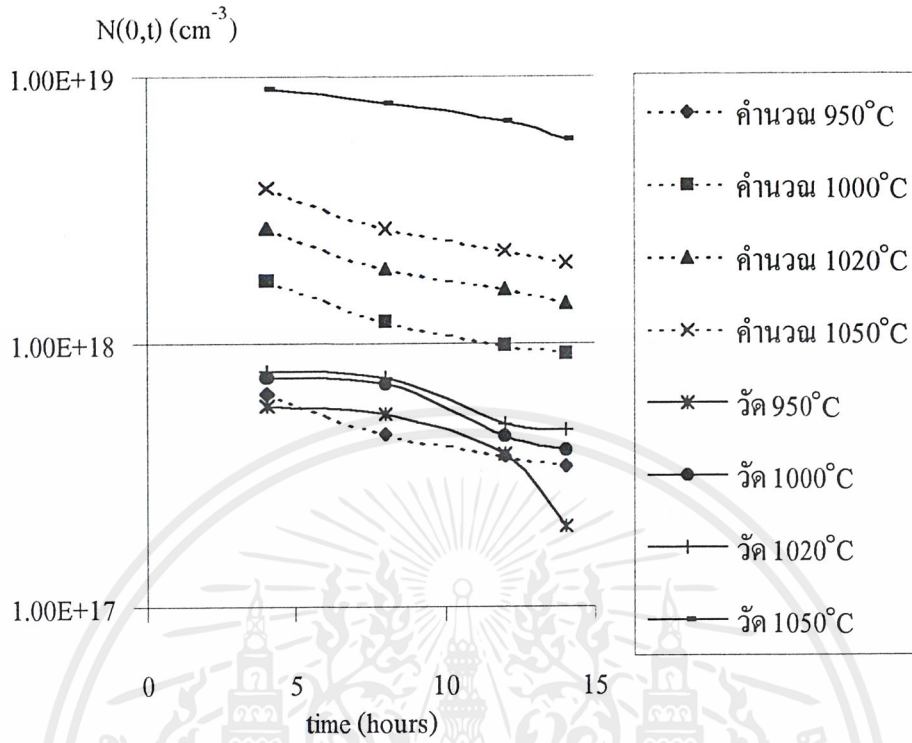


รูปที่ 5.3 กราฟความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของพีเวลเทียบกับเวลา

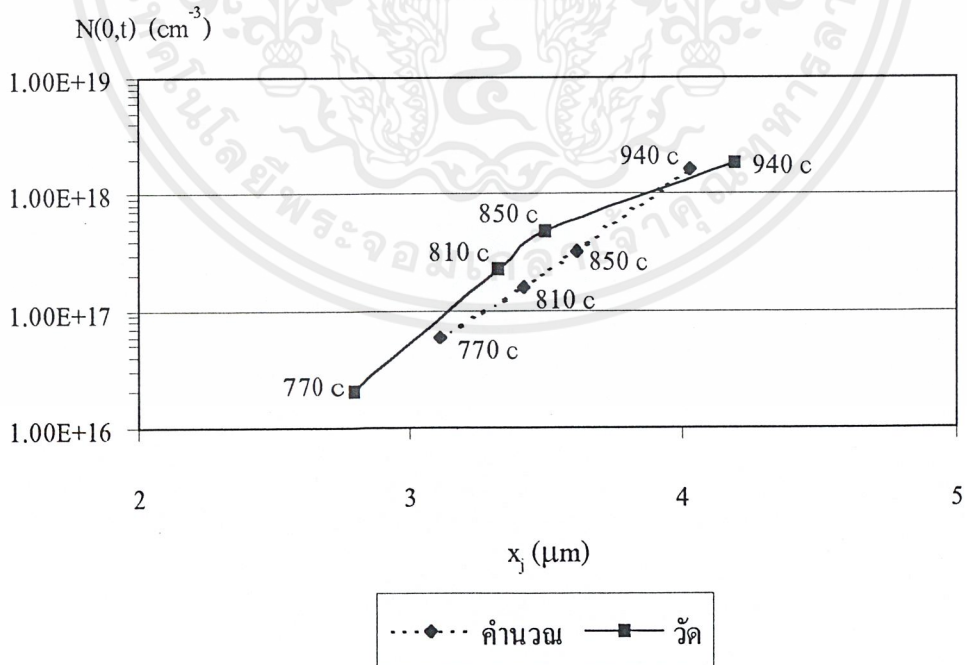


รูปที่ 5.4 กราฟความลึกของเอ็นเวลเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

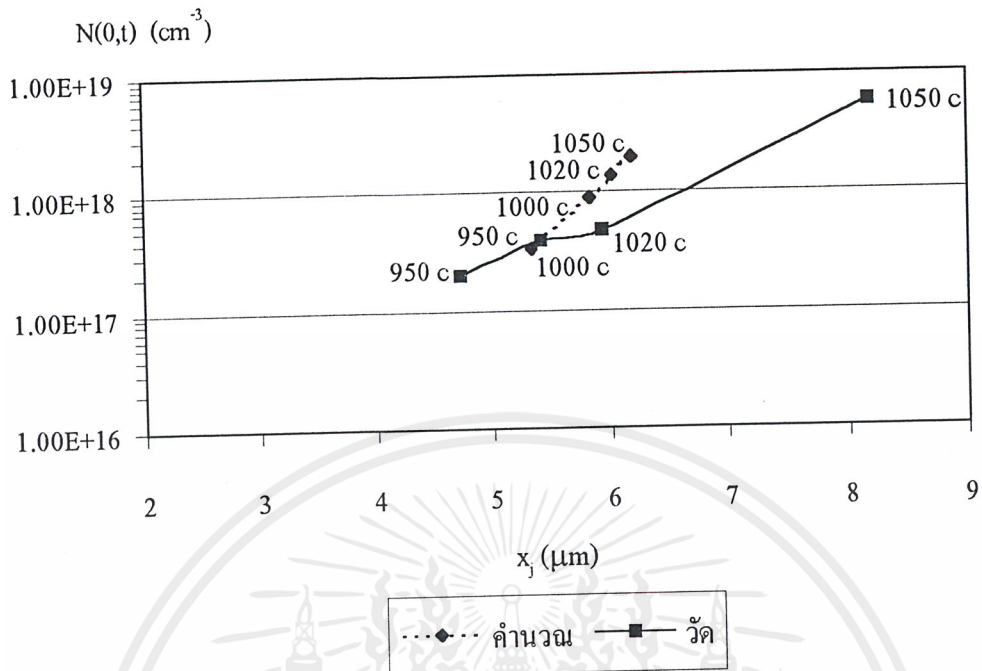


รูปที่ 5.5 กราฟความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเอ็นเวลเทียบกับเวลา



รูปที่ 5.6 กราฟความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวเทียบกับความลึกของพีเวลด (drive-in 14 ชม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวเทียบกับความลึกของเอ็นเวด (drive-in 14 ชม.)

จากรูปที่ 5.6 ถ้าต้องการสร้างเอ็นแชนแนลคีมอสให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 2.5-3.0 V จากกราฟแรงดันขั้วเริ่มต้นเทียบกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวในภาคผนวก ข. จะต้องทำการแพร่สารเจือให้ส่วนที่เบสมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวประมาณ  $6 \times 10^{16} - 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ดังนั้นจากผลการทดลองจึงต้องทำการแพร่สารเจือในขั้นตอน predeposition ที่อุณหภูมิ  $790^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที และแพร่สารเจือในขั้นตอน drive-in ที่อุณหภูมิ  $1050^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 14 ชม. จะได้ชั้นพีเบสลึก 3  $\mu\text{m}$  จากที่ต้องการให้มีความลึกประมาณ 3-4  $\mu\text{m}$

จากรูปที่ 5.7 ถ้าต้องการสร้างพีแชนแนลคีมอสให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 2.5-3.0 V จากกราฟแรงดันขั้วเริ่มต้นเทียบกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวในภาคผนวก ข. จะต้องทำการแพร่สารเจือให้ส่วนเอ็นเบสมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวประมาณ  $5 \times 10^{15} - 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ซึ่งจากการทดลอง ถ้าทำการแพร่สารเจือเพื่อให้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวดังกล่าว จะทำให้ได้ความลึกของชั้นเอ็นเบสมีค่าไม่ถึง 3  $\mu\text{m}$  ดังนั้น ถ้าเลือกทำการ predeposition ที่อุณหภูมิ  $870^{\circ}\text{C}$  30 นาที จะทำให้ได้ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวหลังจาก drive-in ที่อุณหภูมิ  $1050^{\circ}\text{C}$  14 ชม. มีค่าเท่ากับ  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และชั้นเอ็นเบสจะมีความลึก 2.6  $\mu\text{m}$  แล้วจึงทำการ drive-in ที่อุณหภูมิ  $1050^{\circ}\text{C}$  ต่ออีก 4 ชม.

## 5.2 เอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์

เอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์ที่สร้างขึ้น โดยการเลือกอุณหภูมิในการแพร่สารเจือในส่วนเอ็นเวลในขั้นตอน predeposition ที่  $900^{\circ}\text{C}$  จะได้รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_{\text{OX}}$  กับ  $V_G$  ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งวัดโดยใช้เครื่อง HP-4061 (ภาพแสดงเครื่องมือวัดอยู่ที่ภาคผนวก จ. รูปที่ จ.8)

จากรูปที่ 5.8 ค่าที่ใส่ให้กับเครื่อง HP-4061 เพื่อใช้ในการคำนวณ คือ ความถี่ (FREQ) , อุณหภูมิ (T) และพื้นที่เกต (AREA) ส่วนค่าที่วัดได้นั้น คือ ความหนาของออกไซด์ ( $D_{\text{OX}}$ ) , ความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์ ( $C_{\text{OX}}$ ) , ความจุไฟฟ้ารวมที่สภาวะ flat band ( $C_{\text{fb}}$ ) , แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{\text{th}}$ ) , แรงดัน flat band ( $V_{\text{fb}}$ ) , ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ฐานรอง ในที่นี้คือเอ็นเวล ( $N_{\text{sub}}$ ) , ประจุบวกคงที่ที่ผิวสัมผัส ( $Q_{\text{ss}}/q$ )

จากรูปที่ 5.8 ค่าของ  $AC_{\text{OX}}$  มีค่าเท่ากับ  $66.8 \text{ pF}$

$$\text{จะได้ } C_{\text{OX}} = \frac{66.8 \times 10^{-12}}{1.6 \times 10^{-3}} = 4.175 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$$

$$\text{จากสมการที่ 2.8 } C_{\text{OX}} = \frac{k_{\text{OX}} \epsilon_0}{t_{\text{OX}}}$$

$$\text{จะได้ } t_{\text{OX}} = \frac{k_{\text{OX}} \epsilon_0}{C_{\text{OX}}} = \frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-14}}{4.175 \times 10^{-8}} = 8.27 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

ดังนั้น จากการคำนวณ จะได้ชั้นเกตออกไซด์ที่สร้างขึ้นมีความหนา  $827 \text{ \AA}$

จากสมการที่ 2.15 และค่า  $V_{\text{fb}} = -1.3 \text{ V}$  ,  $\phi_{\text{MS}} = -0.6 + \phi_{\text{F}}$  ,  $Q_{\text{ss}}/q = 2.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  ,  $C_{\text{OX}} = 66.8 \text{ pF}$  จะได้ค่าของศักย์เฟอร์มิ โดย

$$V_{\text{fb}} = \phi_{\text{MS}} - \frac{Q_{\text{ss}}}{C_{\text{OX}}}$$

$$V_{\text{fb}} = -0.6 + \phi_{\text{F}} - \frac{Q_{\text{ss}}}{C_{\text{OX}}}$$

$$\phi_{\text{F}} = V_{\text{fb}} + 0.6 + \frac{Q_{\text{ss}}}{C_{\text{OX}}}$$

HP 4061A

## C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= MOSC

FREQ= 1MHz

T= 300K

AREA= 1.60E-03cm<sup>2</sup>

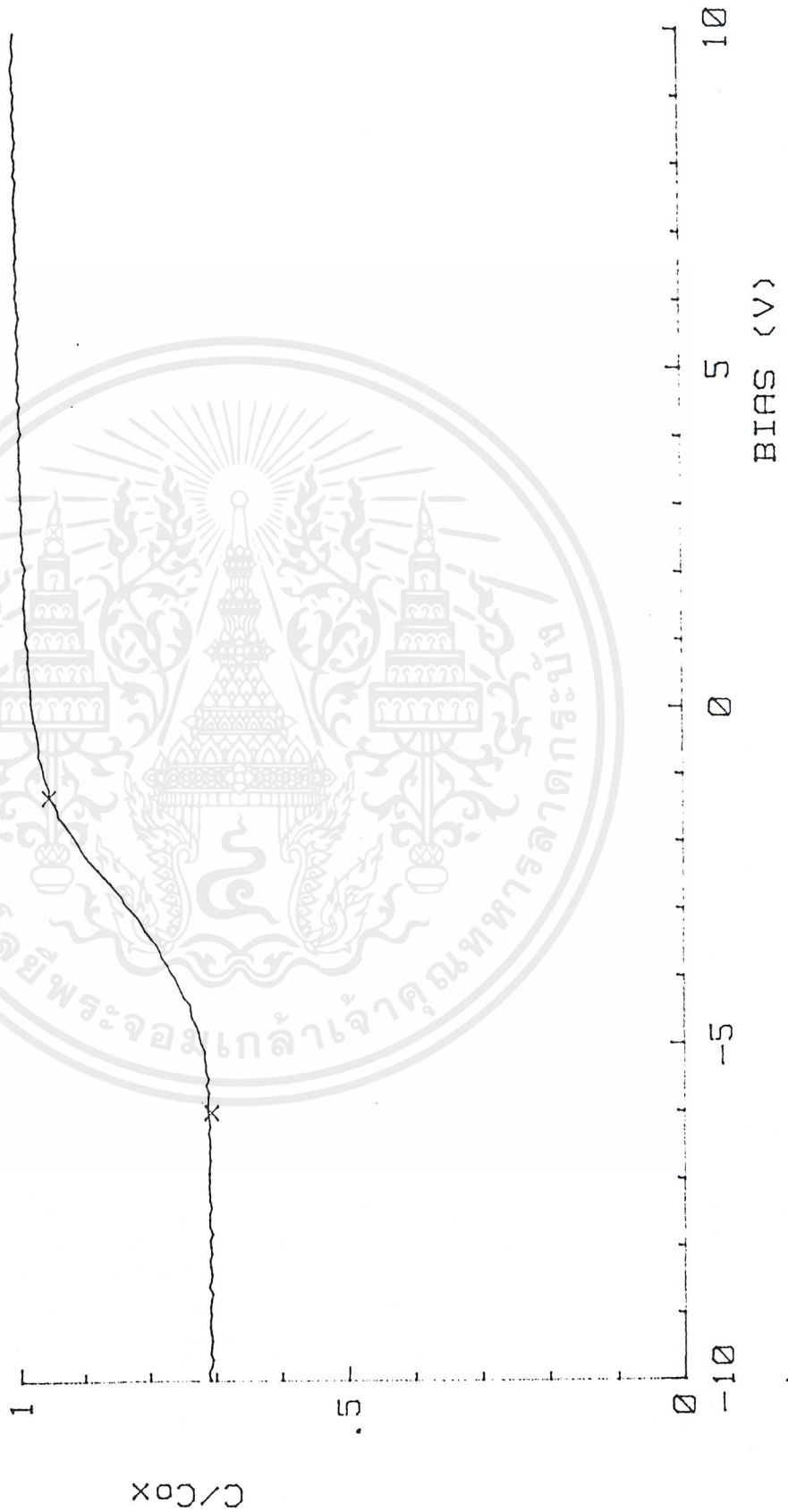
Dox= 830A

Cox= 66.80pF

Vth= -5.982V

Cfb= 63.43pF

Vfb= -1.3V

Nsub= 9.6E+16/cm<sup>3</sup>Qss/q= 2.9E+11/cm<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_{ox}$  กับ  $V_G$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_F = -1.3 + 0.6 + \frac{2.9 \times 10^{11} \times 1.6 \times 10^{-19}}{4.175 \times 10^{-8}}$$

$$\phi_F = -1.3 + 0.6 + 1.1 = 0.4 \text{ V}$$

จากสมการที่ 2.4 และจากผลการทดลอง  $N_{\text{sub}} = 9.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  จะหาความหนาแน่นประจุที่บริเวณพลาสมาได้แก่ได้โดย

$$\begin{aligned} Q_B &= \sqrt{2k_{\text{si}} \epsilon_0 q N_B (2\phi_F)} \\ &= \sqrt{2 \times 11.7 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 9.6 \times 10^{16} \times 2 \times 0.4} \\ &= 1.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \end{aligned}$$

$$\frac{Q_B}{C_{\text{OX}}} = \frac{1.6 \times 10^{-7}}{4.175 \times 10^{-8}} = 3.8 \text{ V}$$

คำนวณค่าแรงดันขั้วเริ่มจากสมการที่ 2.9 (ก)

$$\begin{aligned} V_{\text{th}} &= -0.6 - \phi_F - \frac{Q_B}{C_{\text{OX}}} - \frac{Q_{\text{SS}}}{C_{\text{OX}}} \\ &= -0.6 - 0.4 - 3.8 - 1.1 = -5.9 \text{ V} \end{aligned}$$

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.8 จะได้ค่าของแรงดันขั้วเริ่มเท่ากับ  $-6.0 \text{ V}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณแรงดันขั้วเริ่มข้างต้น ซึ่งเป็นการคำนวณโดยชั้นเกตออกไซด์มีความหนา  $827 \text{ \AA}$  และจากกราฟแรงดันขั้วเริ่มเทียบกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวในภาคผนวก ข. ถ้าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวมีค่าเท่ากับ  $9.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  จะได้แรงดันขั้วเริ่มมีค่าเท่ากับ  $-6.4 \text{ V}$  ซึ่งเป็นการคำนวณค่าของแรงดันขั้วเริ่มในกรณีที่ชั้นของเกตออกไซด์มีความหนา  $1000 \text{ \AA}$  จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันเพียง  $0.4 \text{ V}$  เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงควรมีค่าที่แตกต่างกันมากกว่านี้ ทั้งนี้เนื่องมาจากประจุบวกคงที่ที่ผิวสัมผัส ( $Q_{\text{SS}}$ ) ของเอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์ที่สร้างขึ้นนั้นมีมากกว่า โดยมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าที่ประมาณไว้ ดังนั้น ในการสร้างพีเชนแนลดีมอส จึงยังคงควบคุมค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์ในช่วงเดิม และใช้กระบวนการสร้างชั้นเกตออกไซด์ในเวลาที่เหมาะสมของมอสคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การวัดคุณสมบัติของพีแชนแนลดีมอส

ในการวัดคุณสมบัติของพีแชนแนลดีมอส จะทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

#### 5.3.1 การวัดคุณสมบัติทางกายภาพของพีแชนแนลดีมอส

คุณสมบัติทางกายภาพของพีแชนแนลดีมอสที่ทำการวัด คือ ความลึกของชั้นพีบวกชอสกับความลึกของชั้นเอ็นเบสจากผิวหน้าแผ่นซิลิคอน และความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของชั้นพีบวกชอส ชั้นเอ็นเบส และชั้นพีเดรนดริฟท์ โดยการวัดความต้านทานด้วยเทคนิค Spreading Profile Resistance ผลการวัดที่ได้ แสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 คุณสมบัติทางกายภาพของพีแชนแนลดีมอส

คุณสมบัติทางกายภาพ	ความลึกจากผิวหน้า ( $\mu\text{m}$ )		ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิว ( $\text{cm}^{-3}$ )	
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2
ชั้นการแพร่สารเจือ				
ชั้นพีบวกชอส ( $\text{P}^+$ -source)	1.4	1.9	$4 \times 10^{18}$	$4 \times 10^{18}$
ชั้นเอ็นเบส (N-base)	3.7	5.2	$9 \times 10^{16}$	$2 \times 10^{17}$
ชั้นพีเดรนดริฟท์ (P-drain drift)	-	-	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{15}$

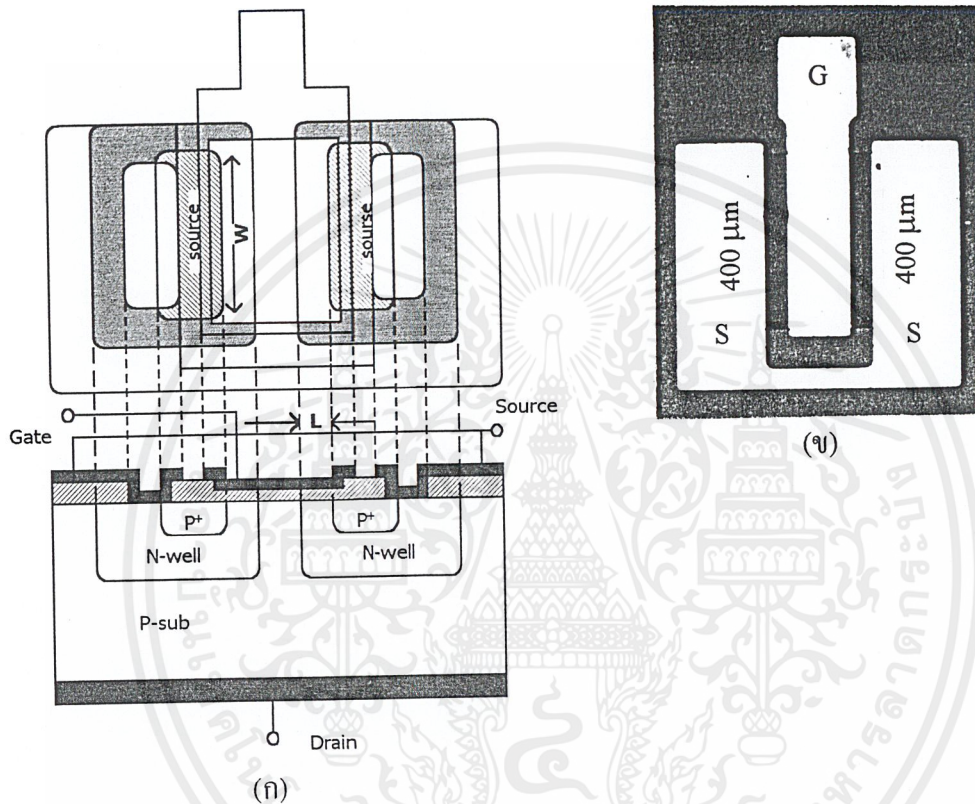
จากผลการทดลองตารางที่ 5.5 และจากกราฟแรงดันขั้วเริ่มเทียบกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวในภาคผนวก ข. จะได้ค่าแรงดันขั้วเริ่มของแผ่นที่ 1 มีค่าเท่ากับ  $-6.3 \text{ V}$  และแรงดันขั้วเริ่มของแผ่นที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $-9.2 \text{ V}$

เนื่องจากพีแชนแนลดีมอสที่สร้างขึ้นทั้ง 2 แผ่น ใช้กระบวนการสร้างชั้นเกตออกไซด์ในเวลาที่เท่ากับของมอสคาปาซิเตอร์ ดังนั้น ความหนาของชั้นเกตออกไซด์ของพีแชนแนลดีมอสทั้ง 2 แผ่น จึงมีค่าประมาณ  $830 \text{ \AA}$  และมีค่าแรงดันพังทลายไดโอดีทริกอยู่ในช่วง  $60-65 \text{ V}$

นอกจากนี้ ยังได้ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของมอสคาปาซิเตอร์ด้วย คือ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเอ็นเวลเท่ากับ  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  และชั้นเอ็นเวลมีความลึกจากผิวหน้าเท่ากับ  $5.0 \mu\text{m}$

### 5.3.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพีแชนแนลดีมอส

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของพีแชนแนลดีมอสที่ทำการวัด ได้แก่ แรงดันขีดเริ่ม คุณสมบัติของกระแสทรานและแรงดันทรานซอส กระแสรั่วไหล แรงดันพังทลาย ทรานคอนดักแตนซ์ ความนำ และความต้านทานในภาชนะนำกระแส



รูปที่ 5.9 (ก) ลวดลายโครงสร้างด้านบนและภาพตัดขวางของพีแชนแนลดีมอส

(ข) ภาพถ่ายลวดลายโครงสร้างด้านบนของพีแชนแนลดีมอส ที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$

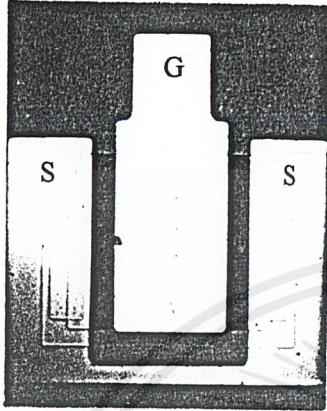
และ  $L = 40 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 5.9 (ก) โครงสร้างของพีแชนแนลดีมอสที่ทำการสร้างขึ้น จะมีค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแส ( $W$ ) และความยาวของช่องทางเดินกระแส ( $L$ ) ต่างกัน คือ  $W = 400 \mu\text{m}$ ,  $600 \mu\text{m}$ ,  $800 \mu\text{m}$ ,  $1600 \mu\text{m}$  และ  $L = 10 \mu\text{m}$ ,  $20 \mu\text{m}$ ,  $40 \mu\text{m}$ ,  $60 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  ดังนั้น ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพีแชนแนลดีมอส จะเสนอในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $W$  และ  $L$  ว่าจะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวอย่างไร

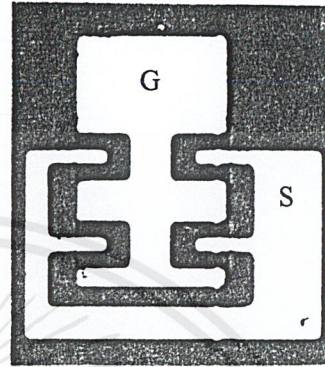
จากรูปที่ 5.9 (ข) ค่า  $W$  ของพีแชนแนลดีมอส จะเป็นการรวมกันระหว่าง  $W$  ในแต่ละข้าง คือ  $W = 400 \mu\text{m} + 400 \mu\text{m} = 800 \mu\text{m}$  ส่วน  $L$  จะอ่านค่าเพียงข้างเดียว คือ  $40 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างลวดลายโครงสร้างของพีแชนแนลคีมอสอื่นๆ ที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$  ,  $L = 100 \mu\text{m}$  และ  $W = 1600 \mu\text{m}$  ,  $L = 100 \mu\text{m}$  แสดงดังรูปที่ 5.10



(ก)  $W = 800 \mu\text{m}$  ,  $L = 100 \mu\text{m}$



(ข)  $W = 1600 \mu\text{m}$  ,  $L = 100 \mu\text{m}$

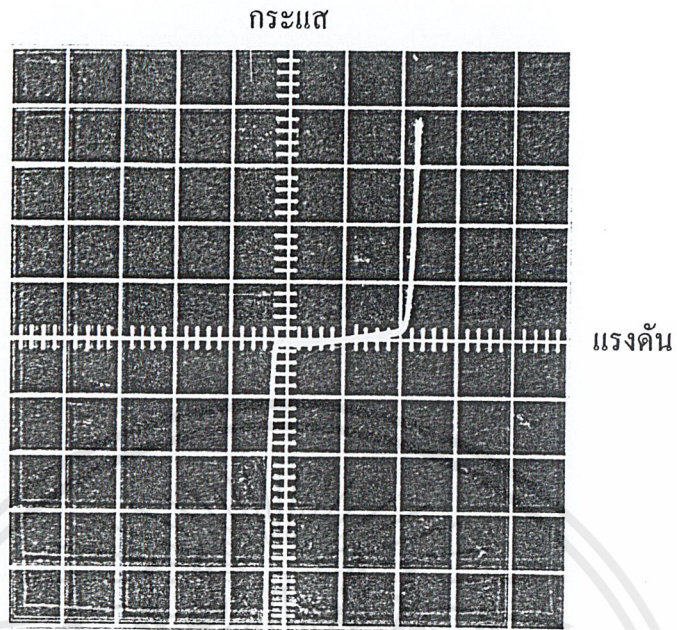
รูปที่ 5.10 ตัวอย่างลวดลายโครงสร้างของพีแชนแนลคีมอส

ก่อนที่จะทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กล่าวถึงนั้น จะทำการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของพีแชนแนลคีมอสก่อน

### 5.3.2.1 การตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้า

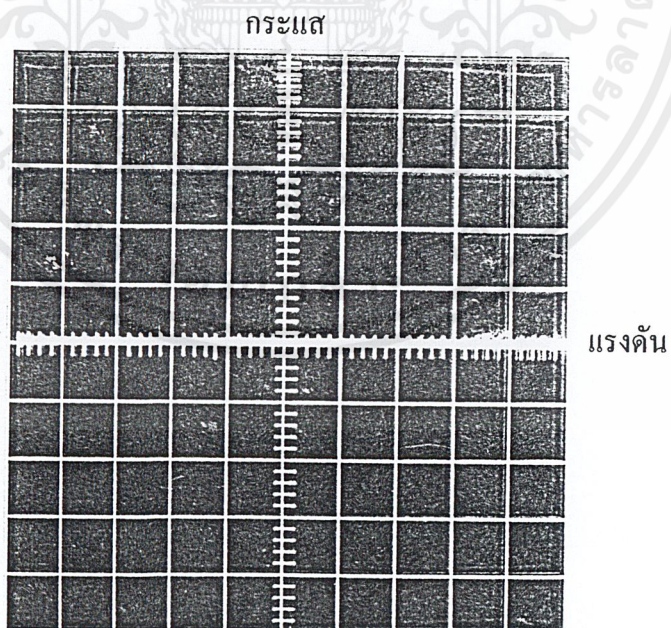
ก่อนที่จะทำการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพีแชนแนลคีมอสอย่างละเอียด จะทำการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานก่อน เพื่อที่จะทราบว่าพีแชนแนลคีมอสที่ทำการสร้างเสร็จแล้วนั้น สามารถทำงานได้จริง โดยนำมาตรวจสอบด้วยเครื่อง Probe Station และ Curve Tracer (ภาพแสดงเครื่องมือและวิธีการวัดอยู่ที่ภาคผนวก จ. รูปที่ จ.4)

ในการตรวจสอบพีแชนแนลคีมอสนั้น จะทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่าง ซอส-เดรน , เกท-เดรน , กระแสรั่วไหล , แรงดันขีดเริ่ม , แรงดันพังทลาย , คุณสมบัติของกระแสเดรนและแรงดันเดรนซอส ผลการวัดพีแชนแนลคีมอสตัวที่ทำงานได้แสดงดังรูปที่ 5.11-5.16



(Horizontal : 50 V/Div , Vertical : 1 mA/Div)

รูปที่ 5.11 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อระหว่างซอส-เดรน

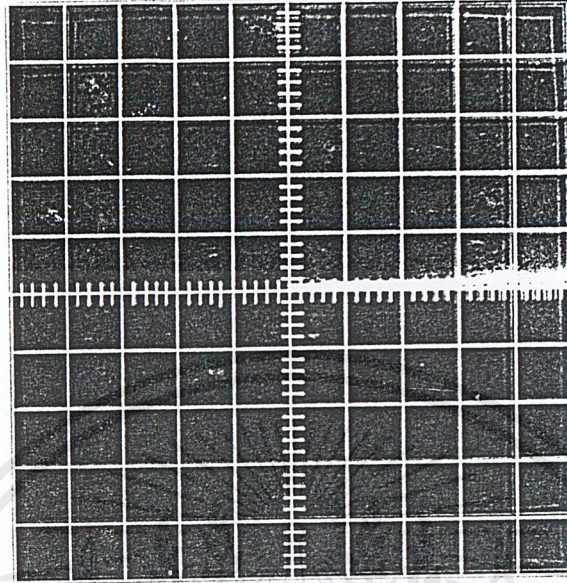


(Horizontal : 5 V/Div , Vertical : 1 mA/Div)

รูปที่ 5.12 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อระหว่างเกต-เดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส

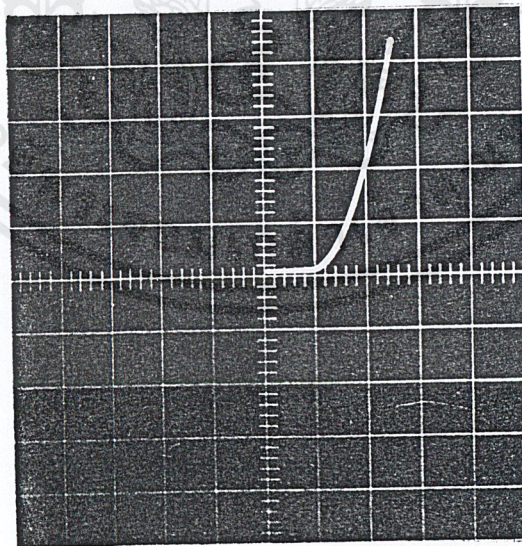


แรงดัน

(Horizontal : 5 V/Div , Vertical : 0.05 mA/Div)

รูปที่ 5.13 กราฟคุณสมบัติของกระแสรั่วไหล

กระแส



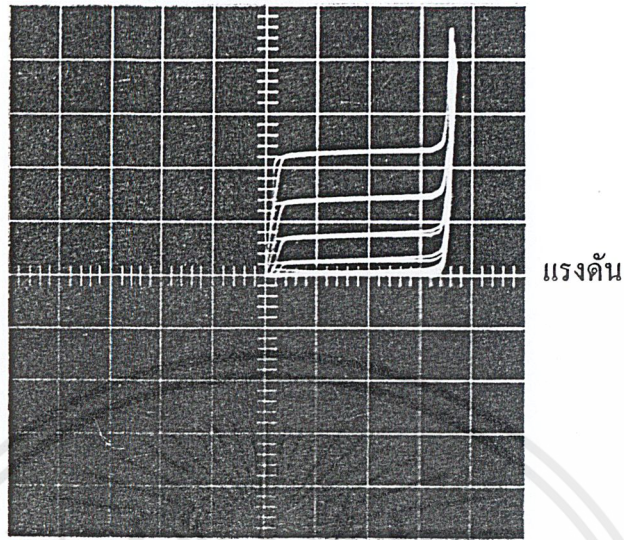
แรงดัน

(Horizontal : 5 V/Div , Vertical : 1 mA/Div)

รูปที่ 5.14 กราฟคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

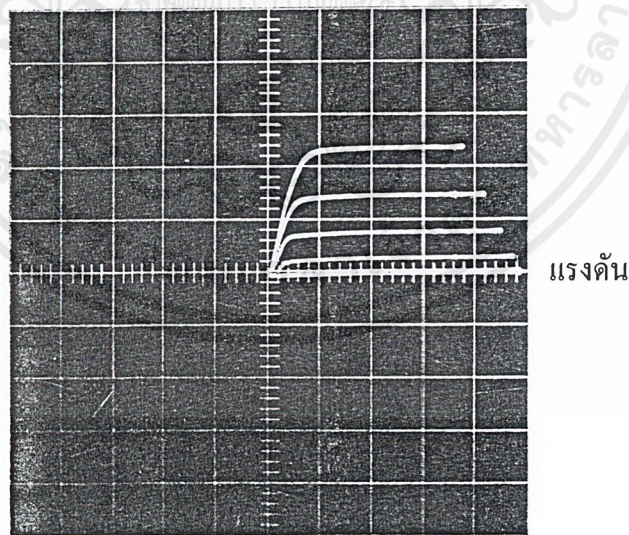
กระแส



(Horizontal : 50 V/Div , Vertical : 2 mA/Div)

รูปที่ 5.15 กราฟคุณสมบัติของแรงดันพังทลาย ;  $V_{BV} = 170 \text{ V}$ 

กระแส



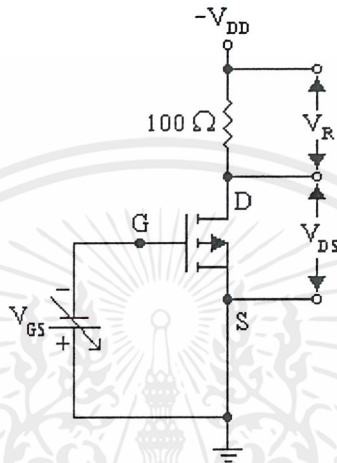
(Horizontal : 10 V/Div , Vertical : 2 mA/Div)

รูปที่ 5.16 กราฟคุณสมบัติของกระแสครนและแรงดันครนซอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2.2 แรงดันขั้วเริ่ม

ในการวัดค่าแรงดันขั้วเริ่มของพีแชนแนลดีมอส นั้น จะทำการวัดโดยใช้เครื่อง HP-VEE (รูปภาพแสดงเครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ในการวัดอยู่ที่ภาคผนวก จ. รูปที่ จ.5 , จ.6 , จ.7) โดยมีวงจรที่ใช้ในการวัดแสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 วงจรที่ใช้ในการวัดแรงดันขั้วเริ่มของพีแชนแนลดีมอส

ผลจากการวัดแรงดันขั้วเริ่มจะได้ดังรูปที่ 5.18 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_D$  กับ  $V_{GS}$  เมื่อ  $V_{DS}$  มีค่าคงที่เท่ากับ  $-5\text{ V}$  แต่ในการอ่านค่าแรงดันขั้วเริ่มนั้น จะต้องนำกราฟรูปที่ 5.18 ไปคำนวณเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของ  $I_D$  กับ  $V_{GS}$  ดังรูปที่ 5.19 และผลจากการวัดค่าแรงดันขั้วเริ่มของพีแชนแนลดีมอสที่มีค่า  $W$  และ  $L$  ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.23

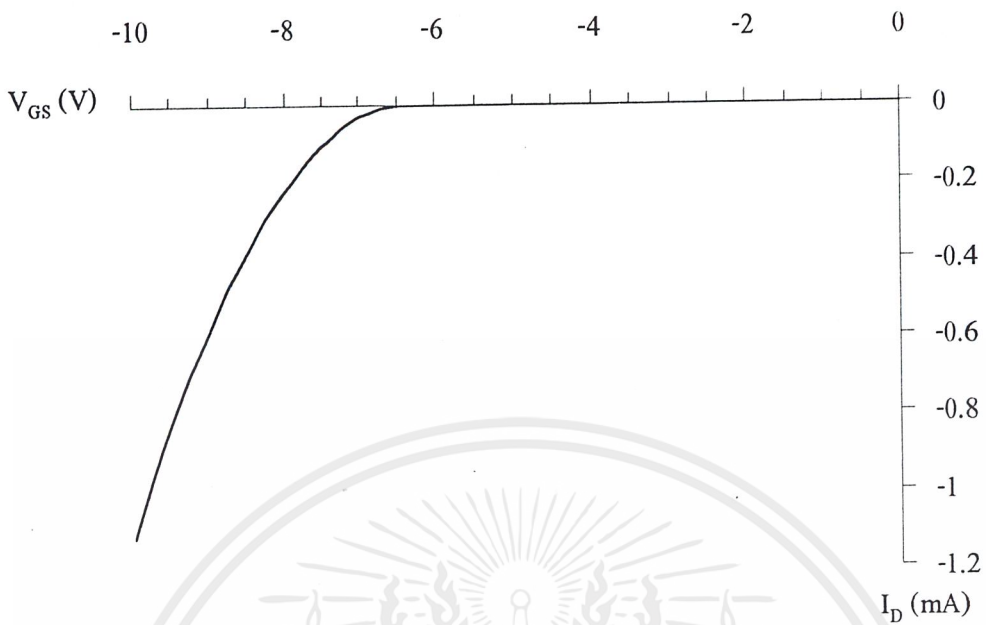
จากสมการที่ 2.20 ซึ่งเป็นสมการของกระแสเดรนในช่วงอิ่มตัว

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{th})^2$$

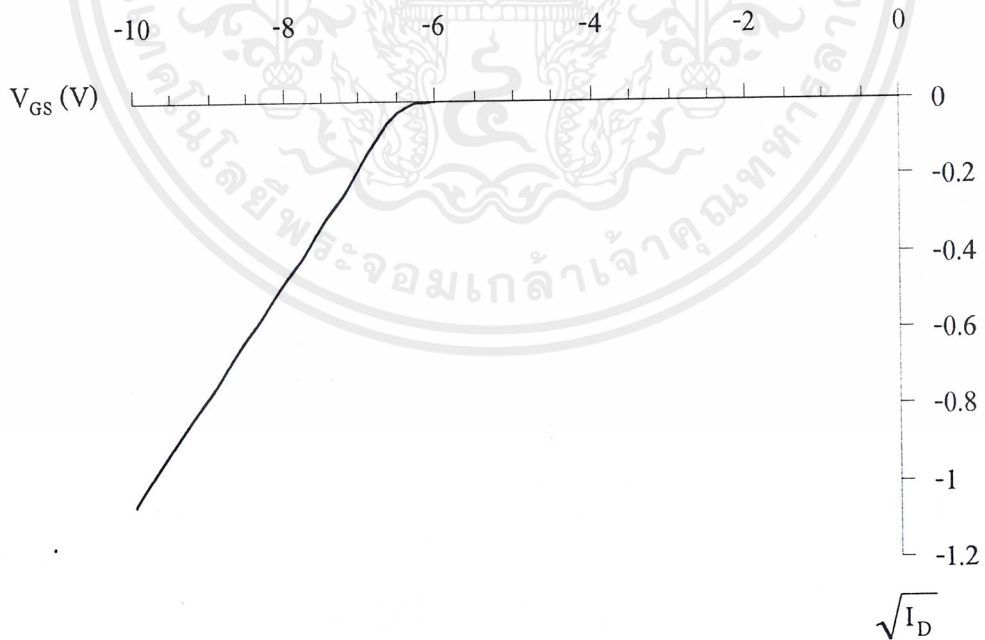
ทำการถอดรากที่สอง แล้วย้ายข้างสมการ จะได้

$$\sqrt{\frac{2}{\beta}} \sqrt{I_D} = V_{GS} - V_{th}$$

ถ้าให้  $\sqrt{I_D} = 0$  แล้ว  $V_{GS} = V_{th}$  ดังนั้น ในการอ่านค่าแรงดันขั้วเริ่มในรูปที่ 5.19 จะต้องลากเส้นตรงต่อจากเส้นกราฟมาตัดที่แกนของ  $V_{GS}$  ค่าที่ได้จะเป็นแรงดันขั้วเริ่มของดีมอส



รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_D$  กับ  $V_{GS}$  เมื่อ  $V_{DS} = -5$  V

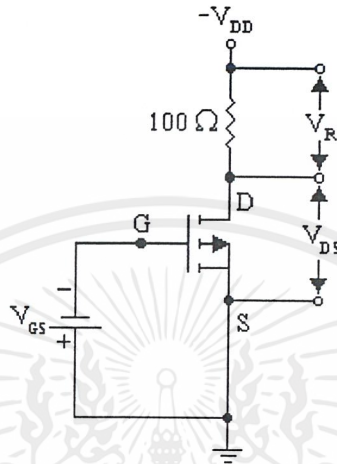


รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของ  $I_D$  กับ  $V_{GS}$  ได้  $V_{th} = -6.4$  V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

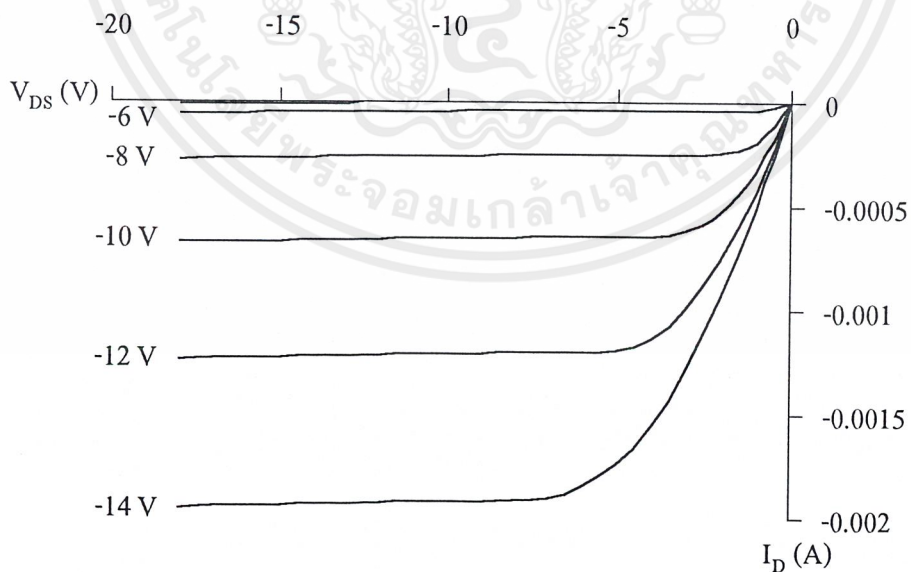
### 5.3.2.3 การวัดคุณสมบัติของกระแสทรานและแรงดันทรานซอสของพีแชนแนลดีมอส

คุณสมบัติของกระแสทรานและแรงดันทรานซอสของพีแชนแนลดีมอส จะวัดโดยใช้เครื่อง HP-VEE ซึ่งมีการต่อวงจรการวัดดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 วงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติของกระแสทรานและแรงดันทรานซอสของพีแชนแนลดีมอส

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง HP-VEE สามารถแสดงเป็นรูปกราฟได้ดังตัวอย่างรูปที่ 5.21 และนำมาแสดงผลเป็นข้อมูลที่ W และ L ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 5.6-5.14



รูปที่ 5.21 กราฟคุณสมบัติของกระแสทรานและแรงดันทรานซอสของพีแชนแนลดีมอส

แผ่นที่ 1 ที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$  และ  $L = 40 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 พีเซนแนลดีมอสแผ่นที่ 1 ที่มี  $W = 400 \mu\text{m}$ ,  $L = 10 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

$V_{DS}$ (V)	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8
$I_{D}$ ทดลอง (mA)	-0.69	-1.24	-1.65	-1.92	-2.05	-2.09	-2.10	-2.10
$I_{D}$ คำนวณ (mA)	-0.69	-1.24	-1.66	-1.93	-2.07	-2.09	-2.09	-2.09
$V_{DS}$ (V)	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16
$I_{D}$ ทดลอง (mA)	-2.10	-2.10	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11
$I_{D}$ คำนวณ (mA)	-2.09	-2.09	-2.09	-2.09	-2.09	-2.09	-2.09	-2.09

จากตารางที่ 5.6 มีวิธีการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. คำนวณค่าแรงดันขีดเริ่มโดยใช้สมการที่ 2.18 แทนค่าสมการที่  $V_{DS} = -1, -2 \text{ V}$

$$\text{จาก } I_D = \beta \left[ (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$\text{แทนค่า } V_{DS} = -1 \text{ V ; } -0.69 = \beta \left[ (-12 - V_{th})(-1) - \frac{(-1)^2}{2} \right]$$

$$\text{แทนค่า } V_{DS} = -2 \text{ V ; } -1.24 = \beta \left[ (-12 - V_{th})(-2) - \frac{(-2)^2}{2} \right]$$

นำ 2 สมการนี้มาหารกัน จะได้

$$1.8 = \frac{2(12 + V_{th}) - 2}{12 + V_{th} - 0.5}$$

$$1.8(12 + V_{th}) - 0.9 = 2(12 + V_{th}) - 2$$

$$1.1 = 0.2(12 + V_{th})$$

$$5.5 = 12 + V_{th}$$

$$V_{th} = -6.5 \text{ V}$$

2. คำนวณค่า  $\beta$  โดยนำค่าแรงดันขีดเริ่มที่ได้ไปแทนในสมการข้างต้น จะได้

$$0.69 = \beta \left[ (-12 + 6.5)(-1) - \frac{(-1)^2}{2} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta = 0.138 \text{ mA/V}^2$$

ค่า  $\beta$  ที่ได้จะนำไปคำนวณกระแสเดรนที่แรงดันเดรนขอค่าต่างๆได้ ซึ่งแสดงในตารางที่ 5.6 ที่ช่องผลการคำนวณ

3. คำนวณค่าความคล่องตัวของโฮล ( $\mu_p$ ) จากค่า  $\beta$  ที่ได้ ดังนี้

เพราะว่า

$$\beta = (\mu_p C_{OX} W)/L$$

โดยที่ 
$$C_{OX} = \frac{k_{OX}\epsilon_0}{t_{OX}} = \frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-14}}{8.3 \times 10^{-6}} = 4.16 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$$

และ 
$$W/L = 400/10 = 40$$

จะได้ 
$$\mu_p = \frac{0.138 \times 10^{-3}}{4.16 \times 10^{-8} \times 40} = 82.9 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

ตารางที่ 5.7 พีเชนแนลดีมอสแผ่นที่ 2 ที่มี  $W = 400 \mu\text{m}$ ,  $L = 10 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

$V_{DS}$ (V)	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8
$I_{D}$ ทดลอง (mA)	-0.68	-1.04	-1.15	-1.21	-1.25	-1.29	-1.33	-1.36
$I_{D}$ คำนวณ (mA)	-0.68	-1.04	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10
$V_{DS}$ (V)	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16
$I_{D}$ ทดลอง (mA)	-1.39	-1.42	-1.45	-1.48	-1.52	-1.54	-1.56	-1.58
$I_{D}$ คำนวณ (mA)	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10	-1.10

ตารางที่ 5.8 พีเชนแนลดีมอสที่มี  $W = 600 \mu\text{m}$ ,  $L = 10 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

$V_{DS}$ (V)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D}$ ทดลอง แผ่นที่ 1 (mA)	-2.10	-3.27	-3.54	-3.56	-3.58	-3.58	-3.58
$I_{D}$ คำนวณ แผ่นที่ 1 (mA)	-2.10	-3.33	-3.68	-3.68	-3.68	-3.68	-3.68
$V_{DS}$ (V)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D}$ ทดลอง แผ่นที่ 2 (mA)	-1.75	-1.95	-2.06	-2.15	-2.24	-2.31	-2.38
$I_{D}$ คำนวณ แผ่นที่ 2 (mA)	-1.75	-1.85	-1.85	-1.85	-1.85	-1.85	-1.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 พีเซนแนลดีมอสที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$ ,  $L = 10 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D \text{ ทดลอง}} \text{ แฉ่นที่ 1 (mA)}$	-3.59	-5.55	-5.95	-5.96	-5.98	-5.98	-5.99
$I_{D \text{ ค่าวณ}} \text{ แฉ่นที่ 1 (mA)}$	-3.59	-5.57	-6.02	-6.02	-6.02	-6.02	-6.02
$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D \text{ ทดลอง}} \text{ แฉ่นที่ 2 (mA)}$	-2.90	-3.28	-3.29	-3.30	-3.32	-3.35	-3.38
$I_{D \text{ ค่าวณ}} \text{ แฉ่นที่ 2 (mA)}$	-2.90	-3.21	-3.21	-3.21	-3.21	-3.21	-3.21

ตารางที่ 5.10 พีเซนแนลดีมอสที่มี  $W = 1600 \mu\text{m}$ ,  $L = 10 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D \text{ ทดลอง}} \text{ แฉ่นที่ 1 (mA)}$	-7.34	-11.58	-12.76	-12.77	-12.78	-12.78	-12.79
$I_{D \text{ ค่าวณ}} \text{ แฉ่นที่ 1 (mA)}$	-7.34	-11.61	-12.85	-12.85	-12.85	-12.85	-12.85
$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D \text{ ทดลอง}} \text{ แฉ่นที่ 2 (mA)}$	-5.09	-5.94	-5.99	-6.03	-6.07	-6.10	-6.12
$I_{D \text{ ค่าวณ}} \text{ แฉ่นที่ 2 (mA)}$	-5.09	-5.82	-5.82	-5.82	-5.82	-5.82	-5.82

ตารางที่ 5.11 พีเซนแนลดีมอสที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D \text{ ทดลอง}} \text{ แฉ่นที่ 1 (mA)}$	-1.55	-2.40	-2.60	-2.61	-2.61	-2.62	-2.62
$I_{D \text{ ค่าวณ}} \text{ แฉ่นที่ 1 (mA)}$	-1.55	-2.41	-2.60	-2.60	-2.60	-2.60	-2.60
$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D \text{ ทดลอง}} \text{ แฉ่นที่ 2 (mA)}$	-1.43	-1.75	-1.82	-1.89	-1.97	-2.01	-2.05
$I_{D \text{ ค่าวณ}} \text{ แฉ่นที่ 2 (mA)}$	-1.43	-1.69	-1.69	-1.69	-1.69	-1.69	-1.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 พีเซนแนลดีมอสที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$ ,  $L = 40 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D} \text{ ทดลอง ส่วนที่ 1 (mA)}$	-0.75	-1.14	-1.19	-1.20	-1.21	-1.22	-1.22
$I_{D} \text{ จำนวน ส่วนที่ 1 (mA)}$	-0.75	-1.16	-1.24	-1.24	-1.24	-1.24	-1.24
$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D} \text{ ทดลอง ส่วนที่ 2 (mA)}$	-0.62	-0.76	-0.81	-0.84	-0.88	-0.90	-0.92
$I_{D} \text{ จำนวน ส่วนที่ 2 (mA)}$	-0.62	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69

ตารางที่ 5.13 พีเซนแนลดีมอสที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$ ,  $L = 60 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

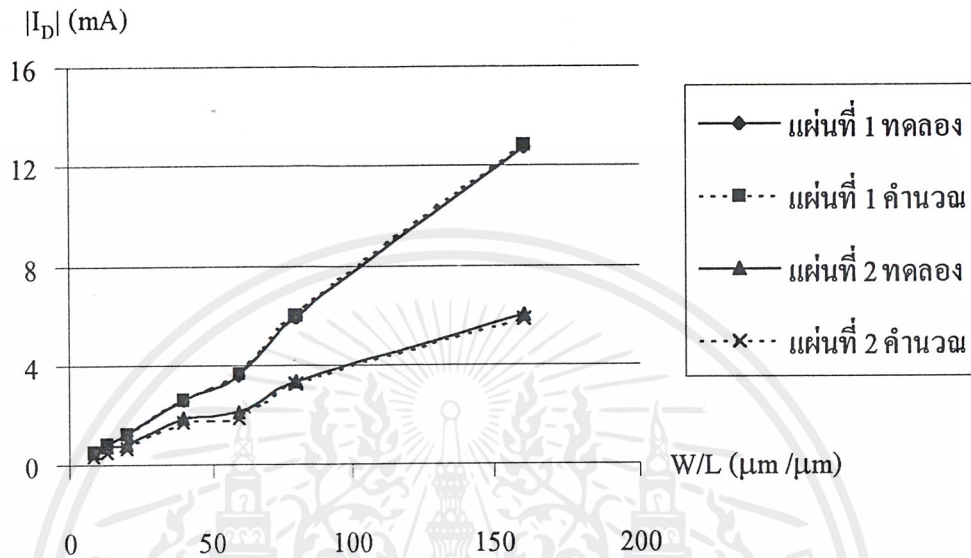
$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D} \text{ ทดลอง ส่วนที่ 1 (mA)}$	-0.50	-0.78	-0.82	-0.83	-0.83	-0.83	-0.83
$I_{D} \text{ จำนวน ส่วนที่ 1 (mA)}$	-0.50	-0.77	-0.81	-0.81	-0.81	-0.81	-0.81
$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D} \text{ ทดลอง ส่วนที่ 2 (mA)}$	-0.45	-0.59	-0.66	-0.73	-0.78	-0.82	-0.86
$I_{D} \text{ จำนวน ส่วนที่ 2 (mA)}$	-0.45	-0.48	-0.48	-0.48	-0.48	-0.48	-0.48

ตารางที่ 5.14 พีเซนแนลดีมอสที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$ ,  $L = 100 \mu\text{m}$  ที่  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D} \text{ ทดลอง ส่วนที่ 1 (mA)}$	-0.35	-0.50	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.53
$I_{D} \text{ จำนวน ส่วนที่ 1 (mA)}$	-0.35	-0.50	-0.51	-0.51	-0.51	-0.51	-0.51
$V_{DS} \text{ (V)}$	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{D} \text{ ทดลอง ส่วนที่ 2 (mA)}$	-0.31	-0.40	-0.45	-0.47	-0.49	-0.50	-0.52
$I_{D} \text{ จำนวน ส่วนที่ 2 (mA)}$	-0.31	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกระแสทรานและแรงดันทรานของพีแชนแนลดีมอสที่ได้นำมาแสดงเป็นกราฟรูปที่ 5.22 เพื่อเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากการคำนวณ



รูปที่ 5.22 กระแสทรานของพีแชนแนลดีมอสที่ W/L ค่าต่างๆ โดยที่  $V_{DS} = -8 \text{ V}$  และ  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

และถ้านำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง จะได้ดังตารางที่ 5.15 ได้โดย

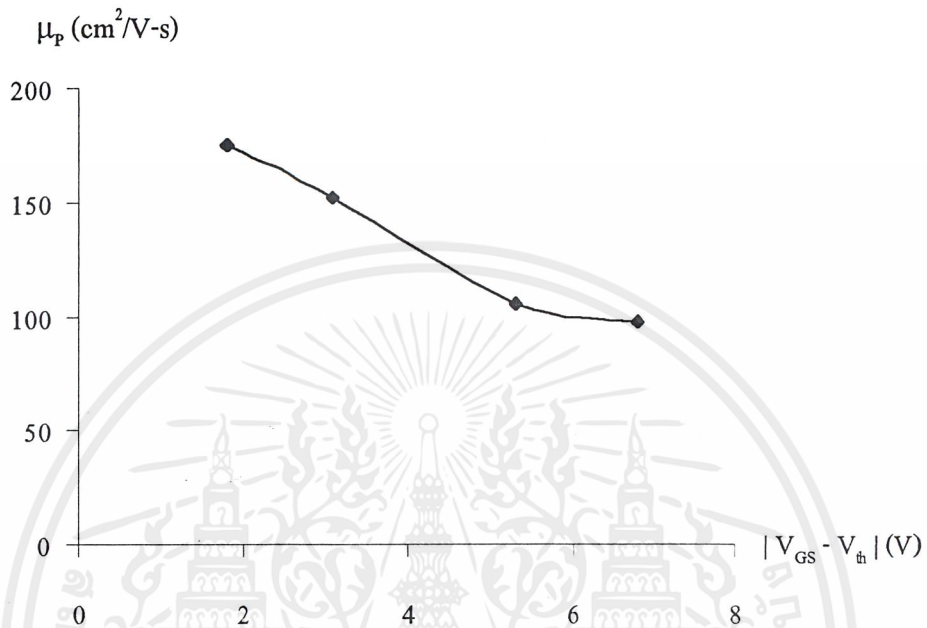
$$\% \text{ ความแตกต่าง} = \frac{\text{ผลจากการคำนวณ} - \text{ผลจากการทดลอง}}{\text{ผลจากการทดลอง}}$$

ตารางที่ 5.15 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกระแสทรานจากการทดลองและจากการคำนวณ

ที่  $V_{DS} = -8 \text{ V}$  และ  $V_{GS} = -12 \text{ V}$  ที่ W และ L ค่าต่างๆ

W/L ( $\mu\text{m} / \mu\text{m}$ )	% ความแตกต่างแผ่นที่ 1	% ความแตกต่างแผ่นที่ 2
400/10	-0.48	-19.12
600/10	3.37	-13.95
800/10	1.01	-2.73
1600/10	0.63	-3.48
800/20	-0.38	-10.58
800/40	-3.33	-17.86
800/60	-2.41	-34.25
800/100	-1.92	-29.79

จากผลการคำนวณค่าความคล่องตัวของโฮล พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างระหว่างแรงดันเกตขอสกับแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} - V_{th}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 ค่าความคล่องตัวของโฮลที่เปลี่ยนไปตามผลต่างของแรงดันเกตขอสกับแรงดันขีดเริ่มของพีเซนแนลคิมอสที่มี  $W = 800 \mu\text{m}$  และ  $L = 40 \mu\text{m}$

จากการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มในหัวข้อที่ 5.3.2.2 และจากการคำนวณแรงดันขีดเริ่มจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.3.2.3 สามารถสรุปค่าของแรงดันขีดเริ่มได้ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 แรงดันขีดเริ่มของพีเซนแนลคิมอสที่  $W$  และ  $L$  ค่าต่างๆ

$W/L$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	400/10	600/10	800/10	1600/10
$V_{th}$ แฉกที่ 1 (V)	-6.1, -6.5	-6.2, -6.2	-6.0, -6.5	-6.3, -6.2
$V_{th}$ แฉกที่ 2 (V)	-8.9, -9.4	-9.1, -9.4	-9.2, -9.1	-9.2, -8.9
$W/L$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	800/20	800/40	800/60	800/100
$V_{th}$ แฉกที่ 1 (V)	-6.4, -6.5	-6.4, -6.7	-6.5, -6.7	-6.5, -7.5
$V_{th}$ แฉกที่ 2 (V)	-8.9, -8.7	-9.3, -9.1	-9.0, -9.3	-9.0, -9.3

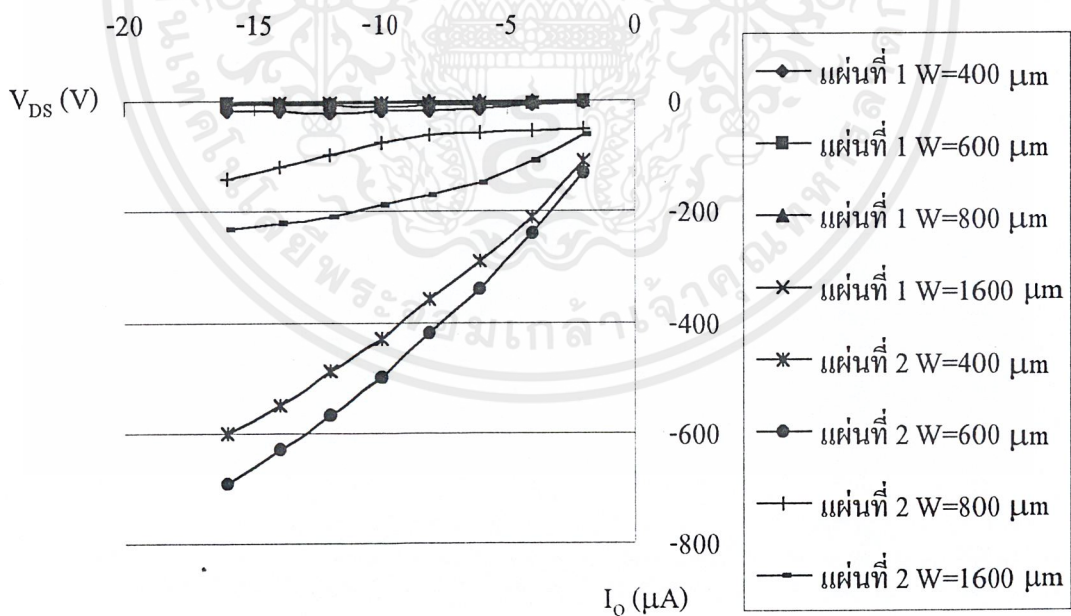
\* ตัวเลขด้านหน้าเป็นผลที่ได้จากหัวข้อ 5.3.2.2 , ตัวเลขด้านหลังเป็นผลที่ได้จากหัวข้อ 5.3.2.3

### 5.3.2.4 กระแสรั่วไหล

กระแสรั่วไหลของดีมอส ( $I_O$ ) คือ กระแสที่เกิดขึ้นเมื่อป้อนแรงดันที่เดรนซอส แต่ยังไม่ได้อ้อนแรงดันที่เกตซอส ( $V_{GS} = 0$  V) สำหรับกระแสรั่วไหลของพีเชนแนลดีมอส จะวัดด้วยเครื่อง HP-VEE โดยป้อนแรงดันเดรนซอสจาก 0 ถึง -16 V และให้  $V_{GS} = 0$  V ผลการวัดกระแสรั่วไหลของพีเชนแนลดีมอสที่มี  $W = 400 \mu\text{m}$  และ  $L = 10 \mu\text{m}$  แสดงดังตารางที่ 5.17 และนำผลการวัดกระแสรั่วไหลของพีเชนแนลดีมอสที่  $W$  และ  $L$  ค่าต่างๆ มาแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5.24, 5.25

ตารางที่ 5.17 กระแสรั่วไหลของพีเชนแนลดีมอสที่มี  $W = 400 \mu\text{m}$  และ  $L = 10 \mu\text{m}$

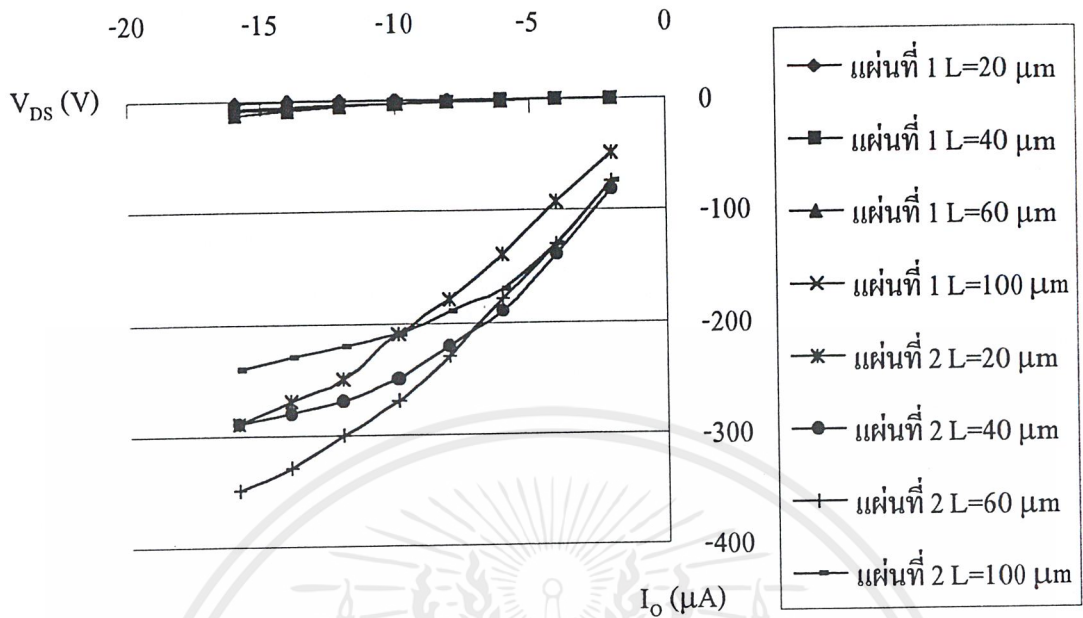
$V_{DS}$ (V)	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16
$I_{O}$ แผ่นที่ 1 ( $\mu\text{A}$ )	-2	-8	-13	-17	-19	-20	-19	-17
$I_{O}$ แผ่นที่ 2 ( $\mu\text{A}$ )	-110	-210	-290	-360	-430	-490	-550	-600



รูปที่ 5.24 กระแสรั่วไหลของพีเชนแนลดีมอสที่  $W$  ค่าต่างๆ เมื่อ  $L = 10 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 5.24 และ 5.25 จะเห็นได้ว่า ไม่สามารถควบคุมกระแสรั่วไหลของพีเชนแนลดีมอสแผ่นที่ 2 ให้มีค่าต่ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 กระแสรั่วไหลของพีแชนแนลคีมอสที่ L ค่าต่างๆ เมื่อ  $W = 800 \mu\text{m}$

### 5.3.2.5 แรงดันพังทลาย

จากการตรวจสอบแรงดันพังทลายของพีแชนแนลคีมอสด้วยเครื่อง Probe Station และ Curve Tracer จะได้แรงดันพังทลายเฉลี่ยดังตารางที่ 5.18 ถ้าต้องการให้แรงดันพังทลายมีค่าสูงขึ้น จะต้องทำการสร้างฟิวส์ริงค์ (field ring) และฟิวส์เพลต (field plate) [4] ซึ่งในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้ทำการศึกษาไว้

ตารางที่ 5.18 แรงดันพังทลายเฉลี่ยของพีแชนแนลคีมอสที่ W และ L ค่าต่างๆ

W/L ( $\mu\text{m} / \mu\text{m}$ )	$V_{BV}$ แผ่นที่ 1 (V)	$V_{BV}$ แผ่นที่ 2 (V)
400/10	150	160
600/10	150	160
800/10	170	170
1600/10	160	160
800/20	160	150
800/40	140	140
800/60	170	130
800/100	150	170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2.6 ทรานคอนดักแตนซ์

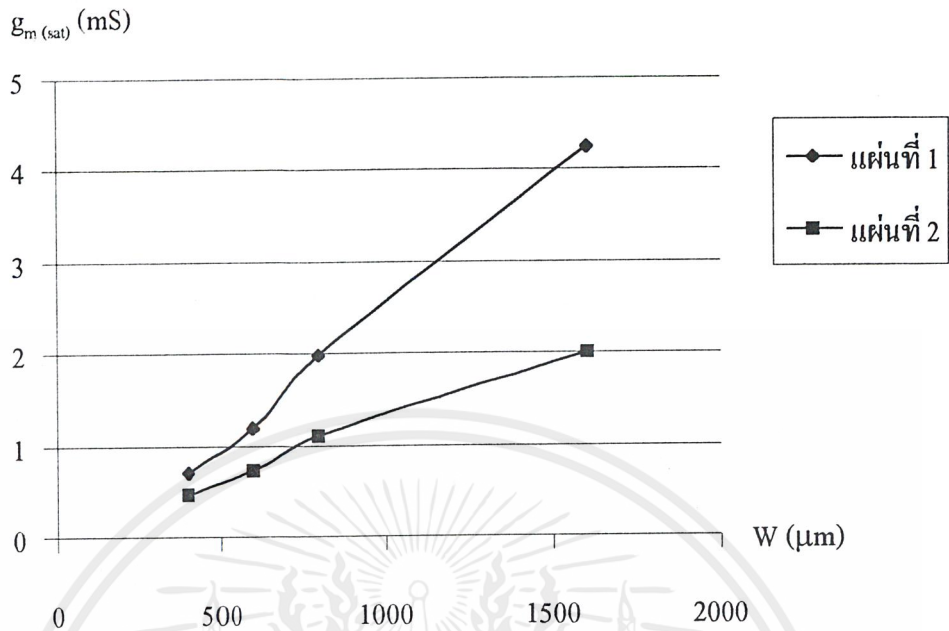
ทรานคอนดักแตนซ์ของพีแซนแนลคีมอส จะแบ่งออกเป็นทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงเชิงเส้น ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 5.19 และทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัว แสดงผลดังตารางที่ 5.20 โดยมีการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (ใช้สมการที่ 2.22 และ 2.23) หลังจากนั้นจึงนำทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัวมาแสดงเป็นกราฟรูปที่ 5.26 , 5.27

ตารางที่ 5.19 ทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงเชิงเส้นของพีแซนแนลคีมอสที่ W และ L ค่าต่างๆ

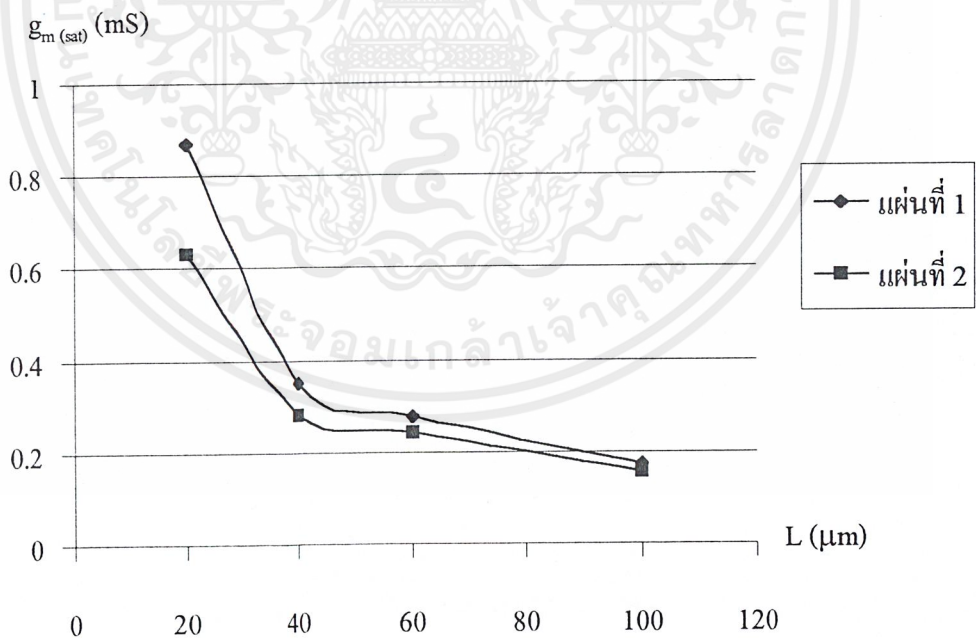
$g_m$ ช่วงเชิงเส้น	แผ่นที่ 1 (mS)		แผ่นที่ 2 (mS)	
	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ
W/L ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )				
400/10	0.087	0.138	0.114	0.324
600/10	0.146	0.219	0.192	0.548
800/10	0.249	0.398	0.306	0.763
1600/10	0.507	0.764	0.526	1.212
800/20	0.108	0.172	0.146	0.311
800/40	0.053	0.088	0.066	0.163
800/60	0.035	0.058	0.048	0.132
800/100	0.026	0.050	0.034	0.091

ตารางที่ 5.20 ทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัวของพีแซนแนลคีมอสที่ W และ L ค่าต่างๆ

$g_m$ ช่วงอิ่มตัว	แผ่นที่ 1 (mS)		แผ่นที่ 2 (mS)	
	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ
W/L ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )				
400/10	0.700	0.759	0.452	0.842
600/10	1.188	1.270	0.716	1.425
800/10	1.988	2.189	1.100	2.213
1600/10	4.256	4.431	2.012	3.757
800/20	0.872	0.946	0.632	1.026
800/40	0.350	0.466	0.280	0.473
800/60	0.276	0.307	0.244	0.356
800/100	0.172	0.225	0.156	0.246



รูปที่ 5.26 ทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัวของพีเซนแนลคิมอสที่ W ค่าต่างๆ เมื่อ L = 10 μm



รูปที่ 5.27 ทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัวของพีเซนแนลคิมอสที่ L ค่าต่างๆ เมื่อ W = 800 μm

### 5.3.2.7 ความนำและความต้านทานในภาวณำกระแส

ความนำและความต้านทานในภาวณำกระแสของพีแซนแนลดีมอส แสดงผลดังตารางที่ 5.21 - 5.22 โดยมีการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (ใช้สมการที่ 2.25 และ 2.26)

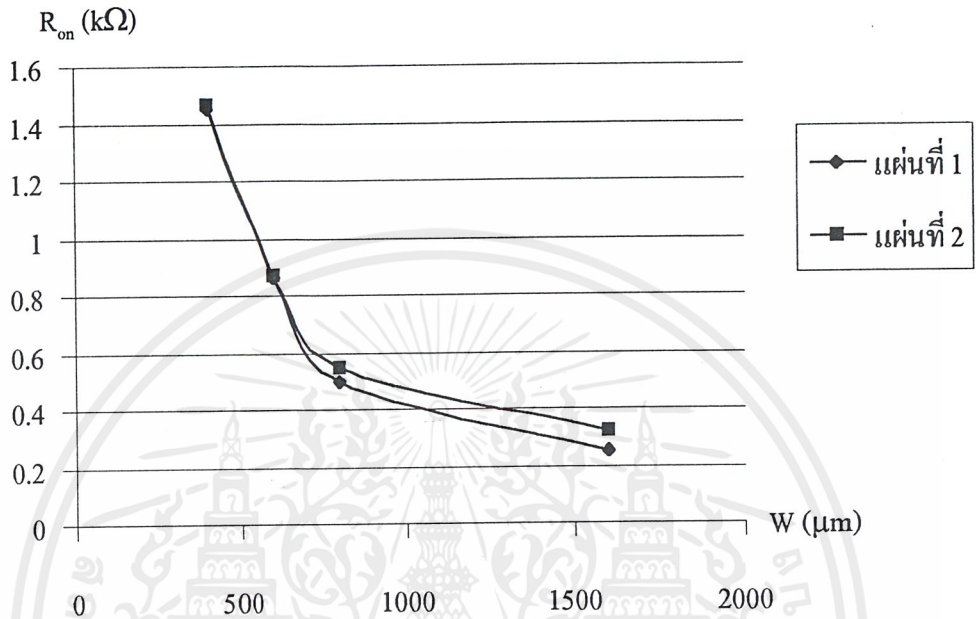
ตารางที่ 5.21 ความนำและความต้านทานในภาวณำกระแสของพีแซนแนลดีมอสแผ่นที่ 1 ที่ W และ L ค่าต่างๆ เมื่อ  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

แผ่นที่ 1 W/L ( $\mu\text{m} / \mu\text{m}$ )	$g_{ds}$ (mS)		$R_{on}$ (k $\Omega$ )	
	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ
400/10	0.69	0.62	1.45	1.61
600/10	1.16	1.05	0.86	0.95
800/10	1.99	1.79	0.50	0.56
1600/10	4.05	3.67	0.25	0.27
800/20	0.86	0.77	1.16	1.30
800/40	0.42	0.38	2.38	2.63
800/60	0.28	0.25	3.57	4.00
800/100	0.20	0.18	5.00	5.56

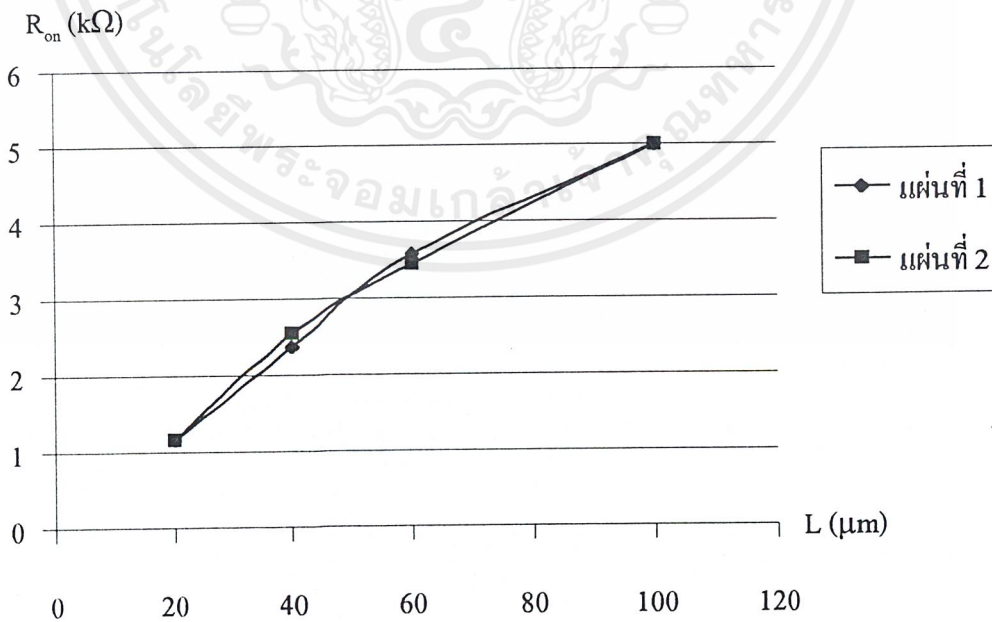
ตารางที่ 5.22 ความนำและความต้านทานในภาวณำกระแสของพีแซนแนลดีมอสแผ่นที่ 2 ที่ W และ L ค่าต่างๆ เมื่อ  $V_{GS} = -12 \text{ V}$

แผ่นที่ 2 W/L ( $\mu\text{m} / \mu\text{m}$ )	$g_{ds}$ (mS)		$R_{on}$ (k $\Omega$ )	
	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ
400/10	0.68	0.52	1.47	1.92
600/10	1.15	0.88	0.87	1.14
800/10	1.83	1.45	0.55	0.69
1600/10	3.15	2.55	0.32	0.39
800/20	0.87	0.72	1.15	1.39
800/40	0.39	0.31	2.56	3.23
800/60	0.29	0.22	3.45	4.55
800/100	0.20	0.15	5.00	6.67

หลังจากนั้นจึงนำค่าความต้านทานในภาวะนำกระแสที่ได้ มาแสดงเป็นกราฟดัง  
รูปที่ 5.28 , 5.29



รูปที่ 5.28 ความต้านทานในภาวะนำกระแสของพีแชนแนลดีมอสที่  $W$  ค่าต่างๆ เมื่อ  $L = 10 \mu\text{m}$



รูปที่ 5.29 ความต้านทานในภาวะนำกระแสของพีแชนแนลดีมอสที่  $L$  ค่าต่างๆ เมื่อ  $W = 800 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

จากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า จึงสรุปได้ว่า พีเซนแนลติมอสที่สร้างขึ้นทั้ง 2 แผ่นสามารถทำงานได้ โดยมีการนำกระแสอยู่ในช่วง 0.5-10 mA ส่วนค่าแรงดันขีดเริ่มนั้นไม่สามารถควบคุมให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ โดยพีเซนแนลติมอสแผ่นที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง -6.0 ถึง -7.5 V และแผ่นที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง -8.7 ถึง -9.4 V ส่วนความลึกของชั้นเอ็นเบสที่ได้จากการวัดคุณสมบัติทางกายภาพมีค่ามากกว่า 3  $\mu\text{m}$  คือ แผ่นที่ 1 มีความลึก 3.7  $\mu\text{m}$  และแผ่นที่ 2 มีความลึก 5.2  $\mu\text{m}$

การที่ไม่สามารถควบคุมค่าแรงดันขีดเริ่มได้นั้น เกิดจากหลายสาเหตุ ได้แก่

1. การแพร่สารเจือในแต่ละครั้งที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน ไม่สามารถควบคุมให้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวให้มีค่าใกล้เคียงกันได้ สังเกตได้จากการสร้างเอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์และเอ็นเวลในพีเซนแนลติมอสแผ่นที่ 2 โดยการแพร่สารเจือในขั้นตอน predeposition ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที และผ่านการ drive-in เป็นเวลา 14 ชม. เท่ากัน จะได้ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวมีค่าไม่เท่ากัน คือ มีค่า  $9.6 \times 10^{16}$  และ  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
2. ในการตรวจสอบความเข้มข้นอะตอมสารเจือทันที หลังจากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส จะให้ค่าที่ไม่ตรงกับความเป็นจริง คือได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งสังเกตจากการที่ได้ทำการทดลองแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในขั้นตอน predeposition ลงบนแผ่นทดสอบที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนการสร้างเอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์ จะได้ผลจากการตรวจสอบความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวทันทีที่มีค่าเท่ากับ  $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  แต่หลังจากที่นำเอ็อนไซในการแพร่สารเจือนี้ไปทำการสร้างเป็นเอ็นเวลมอสคาปาซิเตอร์และผ่านการ drive-in แล้ว จะได้ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของชั้นเอ็นเวลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $9.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
3. ค่าประจุบวกคงที่ที่ผิวสัมผัส ( $Q_{ss}$ ) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างแต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากัน สังเกตได้จากความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของเอ็นเวลในมอสคาปาซิเตอร์มีค่ามากกว่าเอ็นเวลในพีเซนแนลติมอสแผ่นที่ 1 แต่ได้ค่าแรงดันขีดเริ่มน้อยกว่า

สำหรับผลจากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพีเซนแนลติมอส สามารถสรุปได้ดังนี้

- คุณสมบัติของกระแสครนและแรงดันครนขอสของพีเซนแนลติมอส จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของอัตราส่วนระหว่าง W และ L ตามสมการของกระแสครนและแรงดันครนขอสรวมทั้งค่าความคล่องตัวของโฮล จะมีค่าลดลงเมื่อ  $|V_{gs}|$  มีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงดันขีดเริ่ม จะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตาม  $W$  และ  $L$  ค่าที่แตกต่างกันอาจเกิดจากการแพร่สารเจือไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นซิลิคอน

- กระแสรั่วไหล จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันครนซอส โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงดันครนซอสเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลของแผ่นที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง  $0.3 - 20 \mu A$  และแผ่นที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง  $50 - 700 \mu A$  ซึ่งค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะไปรวมกับกระแสครนในขณะที่ติมอสกำลังทำงาน สำหรับสาเหตุที่เกิดกระแสรั่วไหลที่มีค่ามากนั้น ยังไม่ทราบแน่ชัด ซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสร้าง

- แรงดันพังทลาย จะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตาม  $W$  และ  $L$  ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $140 - 170 V$

- ทรานคอนคัคแตนซ์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่าง  $W$  และ  $L$  มีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.3.2.6 ทรานคอนคัคแตนซ์ในช่วงอิมิตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า  $W$  ที่เพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น และมีค่าลดลงตามค่า  $L$  ที่เพิ่มขึ้นอย่างสมการกำลังสอง

- ความนำ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่าง  $W$  และ  $L$  มีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.3.2.7 ค่าความต้านทานในภาชนะนำกระแสจะมีค่าลดลงตามค่า  $W$  ที่เพิ่มขึ้นอย่างสมการกำลังสอง และมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า  $L$  ที่ลดลงอย่างเชิงเส้น

แนวทางในการควบคุมค่าแรงดันขีดเริ่มของพีแซนเนลติมอส หรือการควบคุมความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวของชั้นเอ็นเบสให้มีค่าต่ำ อาจทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า  $870^{\circ}C$  หรือการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูงผ่านชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางๆ หนาไม่เกิน  $1000 \text{ \AA}$  ที่สร้างขึ้นบนแผ่นซิลิคอน เพื่อควบคุมความเข้มข้นอะตอมสารเจือให้มีค่าต่ำลง

## ภาคผนวก ก.

## ตารางค่า error function complementary [6]

Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)
0.00	1.00000	0.41	0.562031	0.81	0.251997	1.21	0.870445E-01
0.01	0.988717	0.42	0.552532	0.82	0.246189	1.22	0.844661E-01
0.02	0.977435	0.43	0.543113	0.83	0.240476	1.23	0.819499E-01
0.03	0.966159	0.44	0.533775	0.84	0.234857	1.24	0.794948E-01
0.04	0.954889	0.45	0.524518	0.85	0.229332	1.25	0.770999E-01
0.05	0.943628	0.46	0.515345	0.86	0.223900	1.26	0.747640E-01
0.06	0.932378	0.47	0.506255	0.87	0.218560	1.27	0.724864E-01
0.07	0.921142	0.48	0.497250	0.88	0.213313	1.28	0.702658E-01
0.08	0.909922	0.49	0.488332	0.89	0.208157	1.29	0.681014E-01
0.09	0.898719	0.50	0.479500	0.90	0.203092	1.30	0.659920E-01
0.10	0.887537	0.51	0.470756	0.91	0.198117	1.31	0.639369E-01
0.11	0.876377	0.52	0.462101	0.92	0.193232	1.32	0.619348E-01
0.12	0.865242	0.53	0.453536	0.93	0.188436	1.33	0.599850E-01
0.13	0.854133	0.54	0.445061	0.94	0.183729	1.34	0.580863E-01
0.14	0.843053	0.55	0.436677	0.95	0.179109	1.35	0.562378E-01
0.15	0.832004	0.56	0.428384	0.96	0.174576	1.36	0.544386E-01
0.16	0.820988	0.57	0.420184	0.97	0.170130	1.37	0.526876E-01
0.17	0.810008	0.58	0.412077	0.98	0.165768	1.38	0.509840E-01
0.18	0.799064	0.59	0.404063	0.99	0.161492	1.39	0.493267E-01
0.19	0.788160	0.60	0.396144	1.00	0.157299	1.40	0.477149E-01
0.20	0.777297	0.61	0.388319	1.01	0.153190	1.41	0.461476E-01
0.21	0.766478	0.62	0.380589	1.02	0.149162	1.42	0.446238E-01
0.22	0.755704	0.63	0.372954	1.03	0.145216	1.43	0.431427E-01
0.23	0.744977	0.64	0.365414	1.04	0.141350	1.44	0.417034E-01
0.24	0.734300	0.65	0.357971	1.05	0.137564	1.45	0.403050E-01
0.25	0.723674	0.66	0.350623	1.06	0.133856	1.46	0.389465E-01
0.26	0.713100	0.67	0.343372	1.07	0.130227	1.47	0.376271E-01
0.27	0.702582	0.68	0.336218	1.08	0.126674	1.48	0.363459E-01
0.28	0.692120	0.69	0.329160	1.09	0.123197	1.49	0.351021E-01
0.29	0.681716	0.70	0.322199	1.10	0.119795	1.50	0.338949E-01
0.30	0.671373	0.71	0.315334	1.11	0.116467	1.51	0.327233E-01
0.31	0.661092	0.72	0.308567	1.12	0.113212	1.52	0.315865E-01
0.32	0.650874	0.73	0.301896	1.13	0.110029	1.53	0.304838E-01
0.33	0.640721	0.74	0.295322	1.14	0.106918	1.54	0.294143E-01
0.34	0.630635	0.75	0.288844	1.15	0.103876	1.55	0.283773E-01
0.35	0.620618	0.76	0.282463	1.16	0.100904	1.56	0.273719E-01
0.36	0.610670	0.77	0.276178	1.17	0.979996E-01	1.57	0.263974E-01
0.37	0.600794	0.78	0.269990	1.18	0.951626E-01	1.58	0.254530E-01
0.38	0.590990	0.79	0.263897	1.19	0.923917E-01	1.59	0.245380E-01
0.39	0.581261	0.80	0.257899	1.20	0.896860E-01	1.60	0.236516E-01
0.40	0.571608						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)
1.61	0.227932E-01	2.06	0.357654E-02	2.51	0.385705E-03	2.96	0.283823E-04
1.62	0.219619E-01	2.07	0.341785E-02	2.52	0.365499E-03	2.97	0.266662E-04
1.63	0.211572E-01	2.08	0.326559E-02	2.53	0.346286E-03	2.98	0.250491E-04
1.64	0.203782E-01	2.09	0.311954E-02	2.54	0.328021E-03	2.99	0.235256E-04
1.65	0.196244E-01	2.10	0.297947E-02	2.55	0.310660E-03	3.00	0.220905E-04
1.66	0.188951E-01	2.11	0.284515E-02	2.56	0.294163E-03	3.01	0.207390E-04
1.67	0.181896E-01	2.12	0.271639E-02	2.57	0.278489E-03	3.02	0.194664E-04
1.68	0.175072E-01	2.13	0.259298E-02	2.58	0.263600E-03	3.03	0.182684E-04
1.69	0.168474E-01	2.14	0.247471E-02	2.59	0.249461E-03	3.04	0.171409E-04
1.70	0.162095E-01	2.15	0.236139E-02	2.60	0.236034E-03	3.05	0.160798E-04
1.71	0.155930E-01	2.16	0.225285E-02	2.61	0.223289E-03	3.06	0.150816E-04
1.72	0.149972E-01	2.17	0.214889E-02	2.62	0.211191E-03	3.07	0.141426E-04
1.73	0.144215E-01	2.18	0.204935E-02	2.63	0.199711E-03	3.08	0.132595E-04
1.74	0.138654E-01	2.19	0.195406E-02	2.64	0.188819E-03	3.09	0.124292E-04
1.75	0.133283E-01	2.20	0.186285E-02	2.65	0.178488E-03	3.10	0.116487E-04
1.76	0.128097E-01	2.21	0.177556E-02	2.66	0.168689E-03	3.11	0.109150E-04
1.77	0.123091E-01	2.22	0.169205E-02	2.67	0.159399E-03	3.12	0.102256E-04
1.78	0.118258E-01	2.23	0.161217E-02	2.68	0.150591E-03	3.13	0.957795E-05
1.79	0.113594E-01	2.24	0.153577E-02	2.69	0.142243E-03	3.14	0.896956E-05
1.80	0.109095E-01	2.25	0.146272E-02	2.70	0.134333E-03	3.15	0.839821E-05
1.81	0.104755E-01	2.26	0.139288E-02	2.71	0.126838E-03	3.16	0.786174E-05
1.82	0.100568E-01	2.27	0.132613E-02	2.72	0.119738E-03	3.17	0.735813E-05
1.83	0.965319E-02	2.28	0.126234E-02	2.73	0.113015E-03	3.18	0.688545E-05
1.84	0.926405E-02	2.29	0.120139E-02	2.74	0.106649E-03	3.19	0.644190E-05
1.85	0.888897E-02	2.30	0.114318E-02	2.75	0.100622E-03	3.20	0.602576E-05
1.86	0.852751E-02	2.31	0.108758E-02	2.76	0.949176E-04	3.21	0.563542E-05
1.87	0.817925E-02	2.32	0.103449E-02	2.77	0.895197E-04	3.22	0.526935E-05
1.88	0.784378E-02	2.33	0.983805E-03	2.78	0.844127E-04	3.23	0.492612E-05
1.89	0.752068E-02	2.34	0.935430E-03	2.79	0.795818E-04	3.24	0.460435E-05
1.90	0.720957E-02	2.35	0.889267E-03	2.80	0.750132E-04	3.25	0.430278E-05
1.91	0.691006E-02	2.36	0.845223E-03	2.81	0.706933E-04	3.26	0.402018E-05
1.92	0.662177E-02	2.37	0.803210E-03	2.82	0.666096E-04	3.27	0.375542E-05
1.93	0.634435E-02	2.38	0.763142E-03	2.83	0.627497E-04	3.28	0.350742E-05
1.94	0.607743E-02	2.39	0.724936E-03	2.84	0.591023E-04	3.29	0.327517E-05
1.95	0.582066E-02	2.40	0.688514E-03	2.85	0.556563E-04	3.30	0.305771E-05
1.96	0.557372E-02	2.41	0.653798E-03	2.86	0.524012E-04	3.31	0.285414E-05
1.97	0.533627E-02	2.42	0.620716E-03	2.87	0.493270E-04	3.32	0.266360E-05
1.98	0.510800E-02	2.43	0.589197E-03	2.88	0.464244E-04	3.33	0.248531E-05
1.99	0.488859E-02	2.44	0.559174E-03	2.89	0.436842E-04	3.34	0.231850E-05
2.00	0.467773E-02	2.45	0.530580E-03	2.90	0.410979E-04	3.35	0.216248E-05
2.01	0.447515E-02	2.46	0.503353E-03	2.91	0.386573E-04	3.36	0.201656E-05
2.02	0.428055E-02	2.47	0.477434E-03	2.92	0.363547E-04	3.37	0.188013E-05
2.03	0.409365E-02	2.48	0.452764E-03	2.93	0.341828E-04	3.38	0.175259E-05
2.04	0.391419E-02	2.49	0.429288E-03	2.94	0.321344E-04	3.39	0.163338E-05
2.05	0.374190E-02	2.50	0.406952E-03	2.95	0.302030E-04	3.40	0.152199E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)	Z	erfc(Z)
3.41	0.141793E-05	3.61	0.330251E-06	3.81	0.711851E-07	4.01	0.141969E-07
3.42	0.132072E-05	3.62	0.306423E-06	3.82	0.657933E-07	4.02	0.130707E-07
3.43	0.122994E-05	3.63	0.284259E-06	3.83	0.607981E-07	4.03	0.120314E-07
3.44	0.114518E-05	3.64	0.263647E-06	3.84	0.561711E-07	4.04	0.110726E-07
3.45	0.106605E-05	3.65	0.244483E-06	3.85	0.518863E-07	4.05	0.101882E-07
3.46	0.992201E-06	3.66	0.226667E-06	3.86	0.479189E-07	4.06	0.937269E-08
3.47	0.923288E-06	3.67	0.210109E-06	3.87	0.442464E-07	4.07	0.862073E-08
3.48	0.858995E-06	3.68	0.194723E-06	3.88	0.408473E-07	4.08	0.792756E-08
3.49	0.799025E-06	3.69	0.180429E-06	3.89	0.377021E-07	4.09	0.728870E-08
3.50	0.743098E-06	3.70	0.167151E-06	3.90	0.347922E-07	4.10	0.670003E-08
3.51	0.690952E-06	3.71	0.154821E-06	3.91	0.321007E-07	4.11	0.615769E-08
3.52	0.642341E-06	3.72	0.143372E-06	3.92	0.296117E-07	4.12	0.565816E-08
3.53	0.597035E-06	3.73	0.132744E-06	3.93	0.273103E-07	4.13	0.519813E-08
3.54	0.554816E-06	3.74	0.122880E-06	3.94	0.251829E-07	4.14	0.477457E-08
3.55	0.515484E-06	3.75	0.113727E-06	3.95	0.232167E-07	4.15	0.438468E-08
3.56	0.478847E-06	3.76	0.105236E-06	3.96	0.213999E-07	4.16	0.402583E-08
3.57	0.444728E-06	3.77	0.973591E-07	3.97	0.197214E-07	4.17	0.369564E-08
3.58	0.412960E-06	3.78	0.900547E-07	3.98	0.181710E-07	4.18	0.339186E-08
3.59	0.383387E-06	3.79	0.832821E-07	3.99	0.167392E-07	4.19	0.311245E-08
3.60	0.355863E-06	3.80	0.770039E-07	4.00	0.154173E-07	4.20	0.285549E-08
						4.21	0.261924E-08
						4.22	0.240207E-08
						4.23	0.220247E-08
						4.24	0.201907E-08
						4.25	0.185057E-08
						4.26	0.169581E-08
						4.27	0.155369E-08
						4.28	0.142319E-08
						4.29	0.130341E-08
						4.30	0.119347E-08

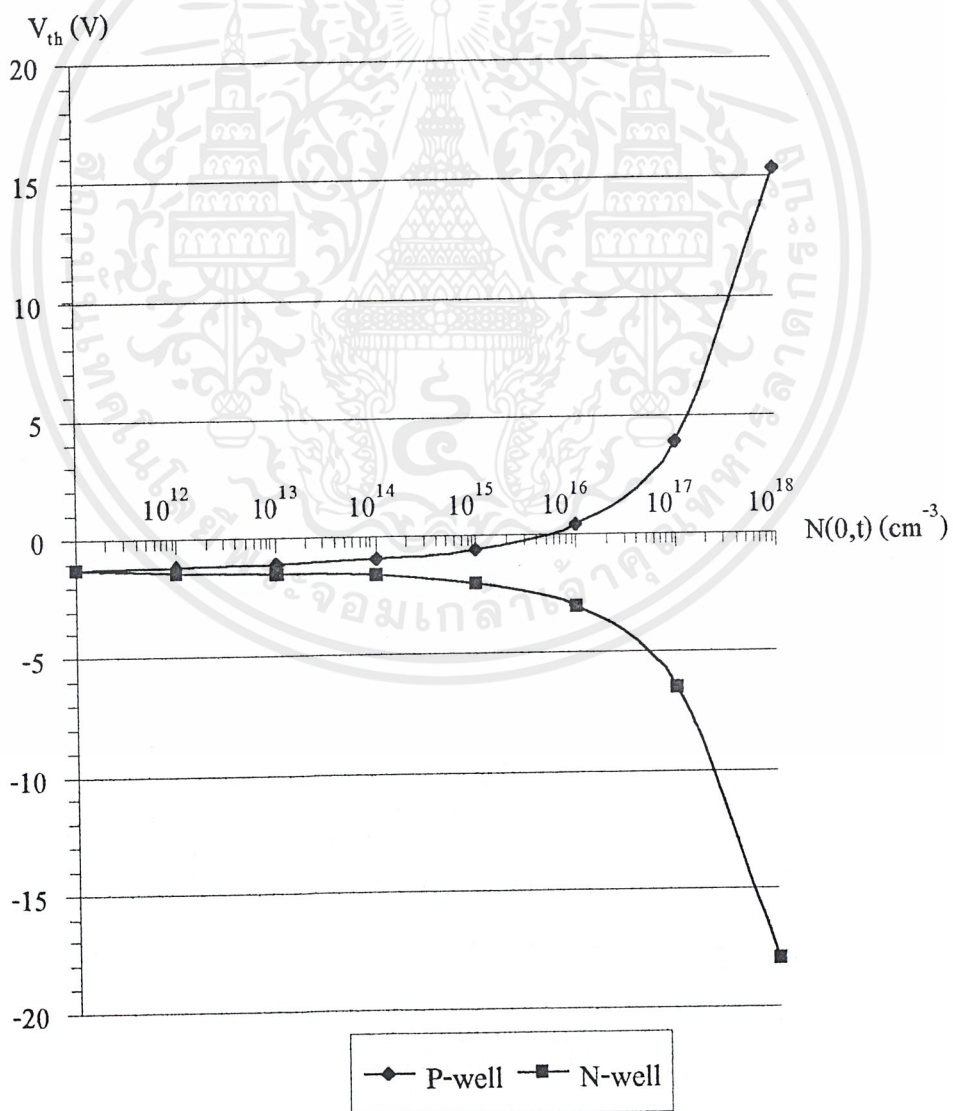
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## กราฟแรงดันขีดเริ่มในทางทฤษฎี

จากทฤษฎีของแรงดันขีดเริ่มในบทที่ 2 จากตัวอย่างการคำนวณแรงดันขีดเริ่มในหัวข้อที่ 2.3 จะเห็นว่าถ้าคำนวณตามตัวอย่าง โดยเปลี่ยนค่าของความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ส่วนเบสไปเป็น  $10^{11}, 10^{12}, \dots, 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  จะได้รูปกราฟมีลักษณะดังนี้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตกำลังแบบคิมอสกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ผิวในส่วนเบส



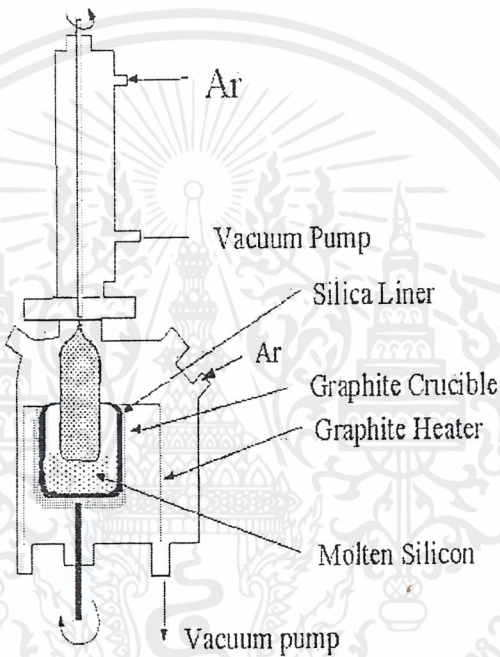
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### รายละเอียดกระบวนการสร้างมาตรฐาน [5],[7]

#### การปลูกผลึกซิลิคอน

ปัจจุบันนิยมใช้กันอยู่ 2 วิธี คือ วิธีของโซคราลสกี (Czochralski:CZ) และวิธีฟลอตโซน (Float Zone:FZ) แต่จะกล่าวถึงวิธีที่นำมาใช้ คือ วิธีโซคราลสกี ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การปลูกผลึกแบบโซคราลสกี

#### วิธีโซคราลสกี

การนำผลึกหลายรูปแบบของซิลิคอนไปหลอมละลายในเบ้าหลอมควอทซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) ที่อุณหภูมิ  $1416^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ภายในจะมีแกนหมุนอยู่ตลอด เพื่อให้ทุกส่วนได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิของซิลิคอนคงที่และสม่ำเสมอ จะใช้แท่งที่มีเมล็ดผลึกเป็นตัวล่ออยู่ที่ปลาย แล้วนำไปหลอมเป็นเนื้อเดียวกับซิลิคอนในเบ้าหลอม และค่อยๆ ดึงขึ้นช้าๆ ทำให้ซิลิคอนติดเมล็ดผลึกขึ้นมา เราสามารถควบคุมขนาดของเมล็ดผลึกและแท่งผลึกได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิของเบ้าหลอมและอัตราการหมุนของเบ้าหลอม นอกจากนี้ยังสามารถเติมอะตอมสารเจือชนิดต่างๆ ลงไปละลายในเบ้าหลอมได้ ทำให้ได้ผลึกสารกึ่งตัวนำที่ต้องการ จากนั้นนำมาตัดเป็นแผ่น ขัดผิวหน้า และกัดด้วยสารเคมีให้มีลักษณะเป็นกระຈก (polishing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก (initial cleaning)

ก่อนที่จะนำแผ่นผลึกซิลิคอนไปทำการสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ จะต้องเริ่มจากการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรกก่อน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในสารละลาย HF 5% 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) 10 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 5 นาที
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

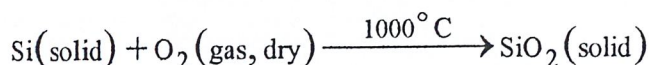
กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

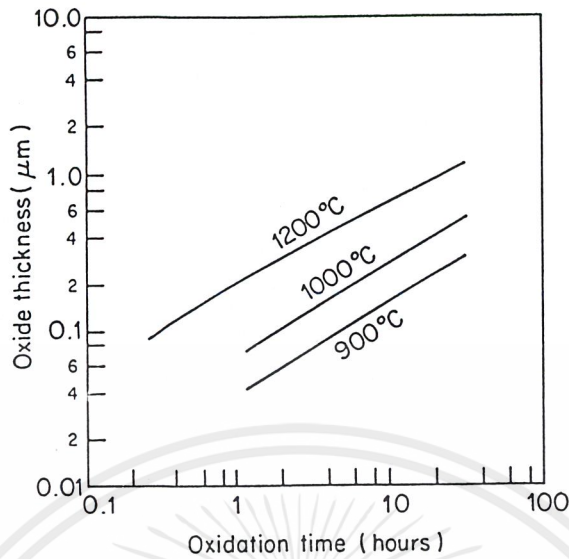
กระบวนการออกซิเดชันเป็นกระบวนการสำหรับสร้างชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ขึ้นมา ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์จะมีคุณสมบัติในการป้องกันสารเจือปนแปลกปลอมต่างๆ ได้ดี ดังนั้นในการแพร่บางส่วนของสารเจือ จึงต้องเปิดช่องของชั้นออกไซด์ในตำแหน่งที่ต้องการเสมอ กระบวนการออกซิเดชันในทางปฏิบัติ นั้น จะกำหนดความหนาของชั้นออกไซด์ได้โดยการควบคุมเวลา อุณหภูมิ และลักษณะของการออกซิเดชันจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ การออกซิเดชันแบบแห้ง และการออกซิเดชันแบบชื้น

การออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation)

การทำออกซิเดชันแบบแห้งมักจะทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาขึ้นไป ภายใต้สถานะเช่นนี้ ก๊าซออกซิเจน (บริสุทธิ์) จะถูกผ่านเข้าไปรวมตัวกับซิลิคอน ทำให้ได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและเป็นไดอิเล็กตริกที่ดี ซึ่งอัตราการเกิดของออกไซด์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ช่วงเวลา และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

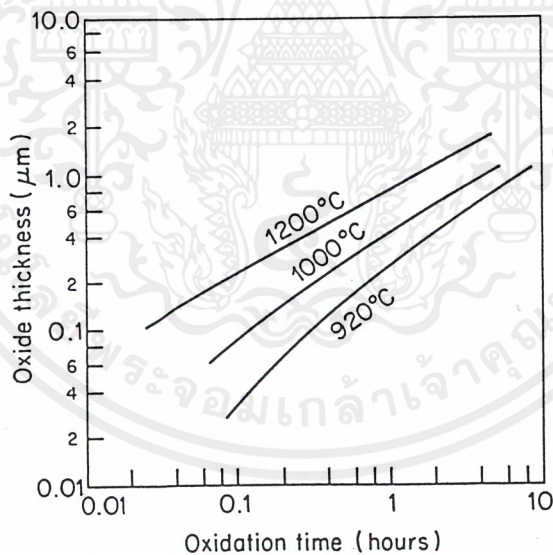
การออกซิเดชันแบบแห้งนี้มักจะมีข้อเสียที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง อัตราการเกิดของออกไซด์ช้า ทำให้ต้องใช้เวลาในการให้ความหนาของออกไซด์ที่เท่ากัน แต่ออกไซด์ที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ดี (ดูกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ ค.2) สมการเคมีเขียนได้ดังนี้





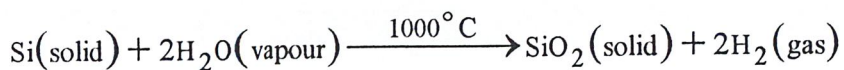
รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของออกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชันแบบแห้ง [2]

การออกซิเดชันแบบชื้น (wet oxidation)



รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของออกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชันแบบชื้น [2]

กระบวนการทำออกซิเดชันแบบนี้จะทำให้อัตราการเกิดของชั้นออกไซด์ที่เร็วมากกว่าที่อุณหภูมิเท่ากัน (ดูกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ ค.3) ดังปฏิกิริยาเคมี คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติแล้วความแตกต่างก็คือ ในการออกซิเดชันแบบนี้จะต้องผ่านไอน้ำเข้าไปในท่อออกซิเดชัน

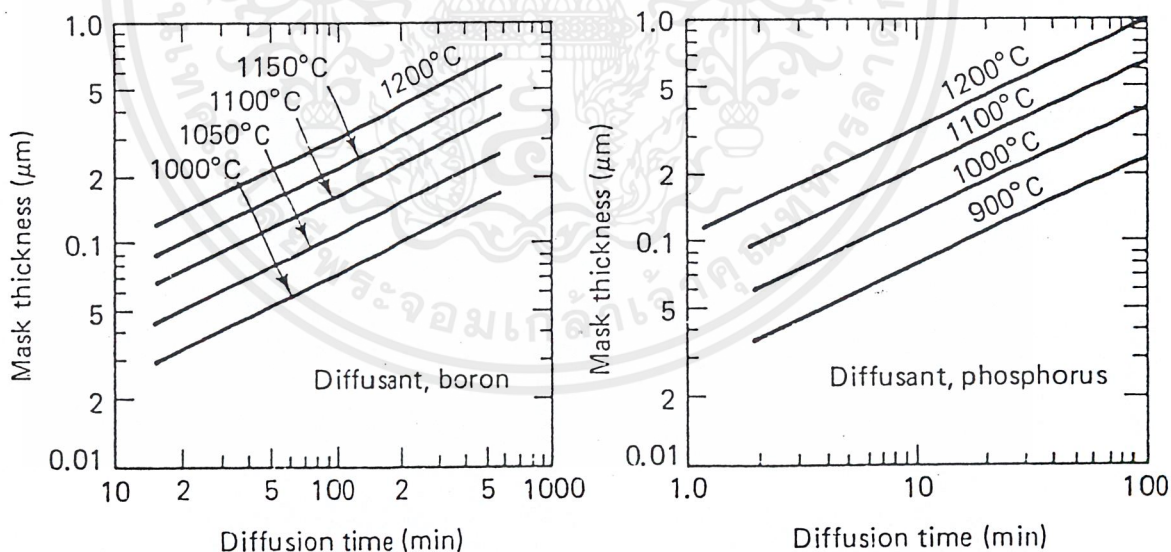
**ตัวอย่างการพิจารณาการสร้างชั้นเกตออกไซด์**

การสร้างชั้นเกตออกไซด์ให้มีความหนา 1000 Å โดยการออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ 1000°C จะต้องใช้เวลาในการออกซิเดชันนานเท่าใด

**วิธีทำ** จากรูปที่ ค.2 ชั้นออกไซด์ที่หนา 1000 Å จะต้องใช้เวลาในการออกซิเดชันนาน 1.7 ชั่วโมง หรือคิดเป็น  $1.7 \times 60$  นาที = 102 นาทีโดยประมาณ

**ความหนาน้อยสำหรับการป้องกันการแพร่**

ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้น จะต้องมีการแพร่สารเจือเป็นบางพื้นที่ ส่วนพื้นที่ที่เหลือ สำหรับกระบวนการสร้างแบบพลาสมาแล้วจะต้องสร้างชั้น SiO<sub>2</sub> ขึ้นมาป้องกันไว้เสมอ โดยที่สารเจือจะแพร่เข้าไปใน SiO<sub>2</sub> ได้ช้า เพราะสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือใน SiO<sub>2</sub> มีค่าต่ำกว่าในซิลิคอน และต่อสารเจือต่างชนิดกัน ก็จะแพร่เข้าไปได้ในระยะทางที่ไม่เท่ากัน ซึ่งกราฟรูปที่ ค.4 จะแสดงถึงความสัมพันธ์กันนี้



(ก) อะตอมสารเจือโบรอน

(ข) อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือกับช่วงเวลาที่ใช้ในการแพร่ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

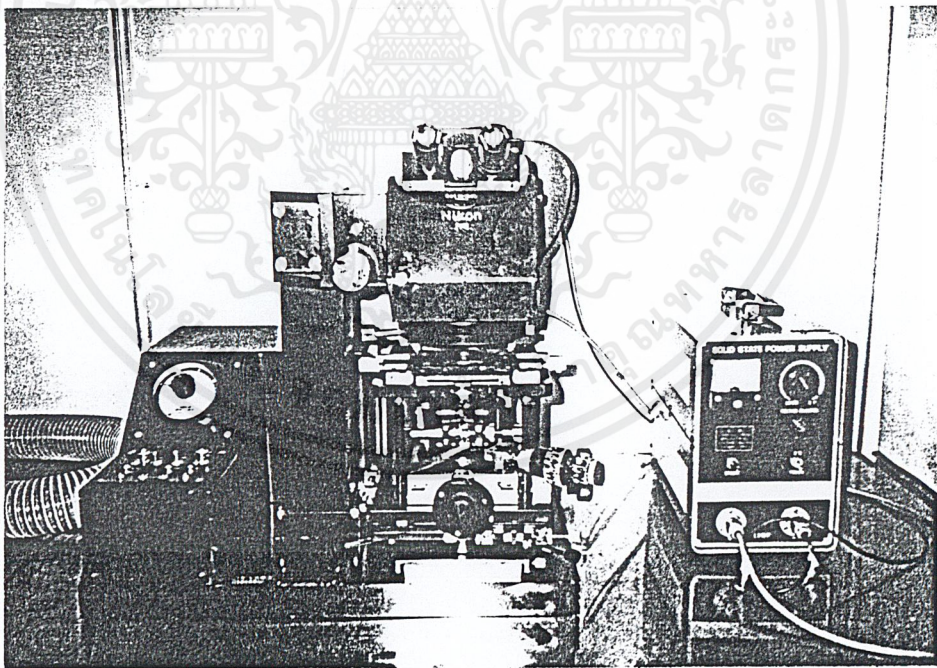
ตัวอย่างการพิจารณาความหนาของชั้นออกไซด์สำหรับป้องกันการแพร่

การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในชั้นตอน predeposition ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที จะต้องสร้างชั้นออกไซด์ให้มีความหนาเท่าใดสำหรับป้องกันการแพร่นี้

วิธีทำ จากรูปที่ ค.4 (ข) ที่เวลา 30 นาที จะต้องสร้างชั้นออกไซด์อย่างน้อยประมาณ  $2200 \text{ \AA}$  เพื่อป้องกันการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของซิลิคอนโดยใช้น้ำยาไวแสง เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและความถูกต้องแม่นยำ จะขึ้นอยู่กับ การปรับตำแหน่ง (Alignment) โดยใช้เครื่องปรับซ็อนกระจกต้นแบบ (Mask Aligner) แสดงดังรูปที่ ค.5 และความคมชัดของกระจกต้นแบบ



รูปที่ ค.5 เครื่องปรับซ็อนกระจกต้นแบบ (Mask Aligner)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนโฟโตลิโธกราฟี มีดังนี้

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 85°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่ 85°C 30 นาที (prebake)
- Alignment expose
- Develop ฟิล์มโดย
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟิล์มที่ 85°C 40 นาที (postbake)

หลังจากนั้น จึงใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching) ดังนี้

- จุ่มในสารละลาย buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

แล้วจึงนำไปลอกฟิล์ม ดังนี้

- ดมใน H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ดมใน H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> แก้วที่สอง 5 นาที
- ดมในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ดมในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การทำความสะอาดผิวหน้า โดย

- ต้มใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

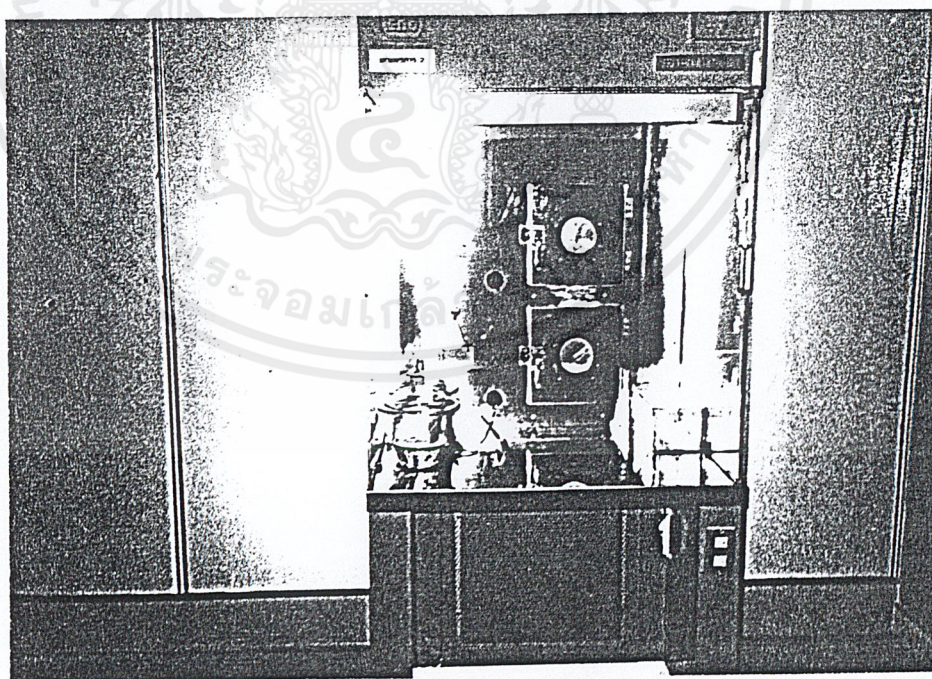
#### กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion Process)

กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การแพร่โดยใช้อุณหภูมิ (Thermal Diffusion)
2. การแพร่โดยการฝังไอออน (Ion Implantation)

ซึ่งภายในห้องปฏิบัติการสร้างสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. เลือกใช้การแพร่โดยใช้อุณหภูมิ โดยสามารถแสดงขั้นตอนในการทำงานได้ดังนี้

- เริ่มต้นโดยการเปิดเตาแพร่อะตอมสารเจือในรูปที่ ค.6 แล้วรอกจนกระทั่งอุณหภูมิเตาคงที่ตามที่ต้องการ โดยใช้เวลาประมาณ 45 นาที – 1 ชม.



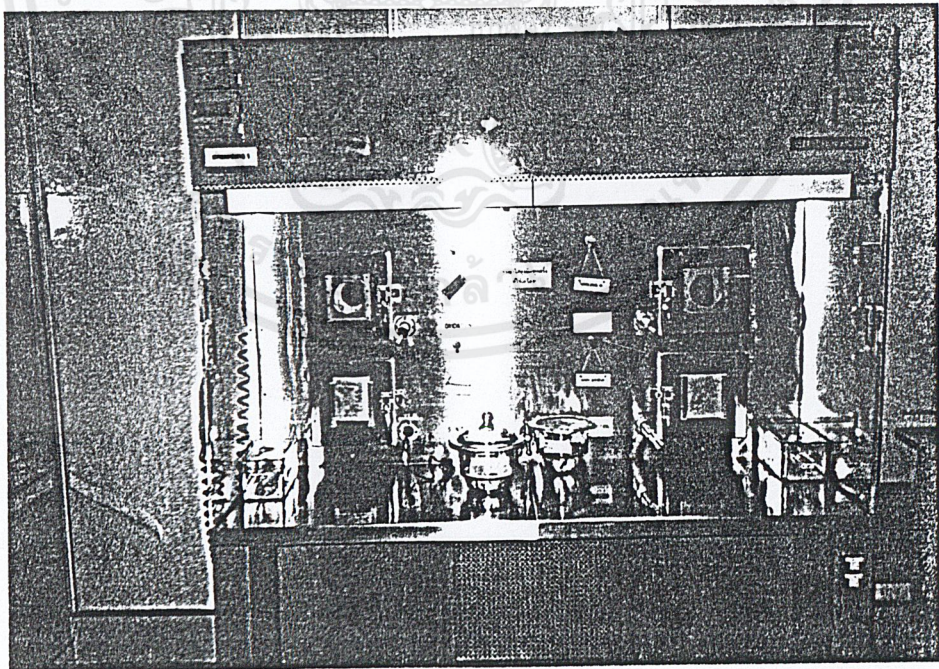
รูปที่ ค.6 เตาแพร่สารเจือชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

▪ ทำการเลือกชนิดของแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือ

ถ้าต้องการแพร่สารเจือชนิดพี จะต้องใช้แหล่งจ่ายที่เป็นธาตุในหมู่ 3 เช่น โบรอน ซึ่งแหล่งจ่ายที่ใช้จะอยู่ในรูป BN (โบรอนไนไตรด์) ในการใช้งานจะต้องเปลี่ยนในรูปของออกไซด์  $B_2O_3$  (โบรอนไดรอกไซด์) โดยการนำแหล่งจ่ายสารเจือเข้าไปในเตาแพร่สารเจือ โดยการพักไว้ที่หน้าเตา 5 นาที แล้วทำการเลื่อนแหล่งจ่ายเข้าไปในเตาโดยใช้เวลา 5 นาทีแล้วทำการกระตุ้น (Activate) คือ การทำให้เป็นออกไซด์ โดยการไหลผ่านด้วยก๊าซออกซิเจน  $1000 \text{ cm}^3/\text{s}$  เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการรักษาสถานะ (Stabilize) โดยการไหลผ่านด้วยก๊าซไนโตรเจน  $800 \text{ cm}^3/\text{s}$  เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำออกจากเตาโดยใช้เวลา 5 นาที และพักที่หน้าเตาอีก 5 นาทีแล้วจึงนำมาใช้งาน

ถ้าต้องการแพร่สารเจือชนิดเอ็น จะต้องใช้แหล่งจ่ายที่เป็นธาตุในหมู่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส, สารหนู, พลวง แต่ที่ใช้บ่อยคือ ฟอสฟอรัสที่มีสมบัติในการแพร่สูง โดยแหล่งจ่ายที่ใช้จะอยู่ในรูปของ  $P_2O_5$  (ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์) ซึ่งอยู่ในรูปของออกไซด์อยู่แล้ว จึงไม่ต้องทำการกระตุ้นก่อน สามารถนำมาใช้ได้เลย

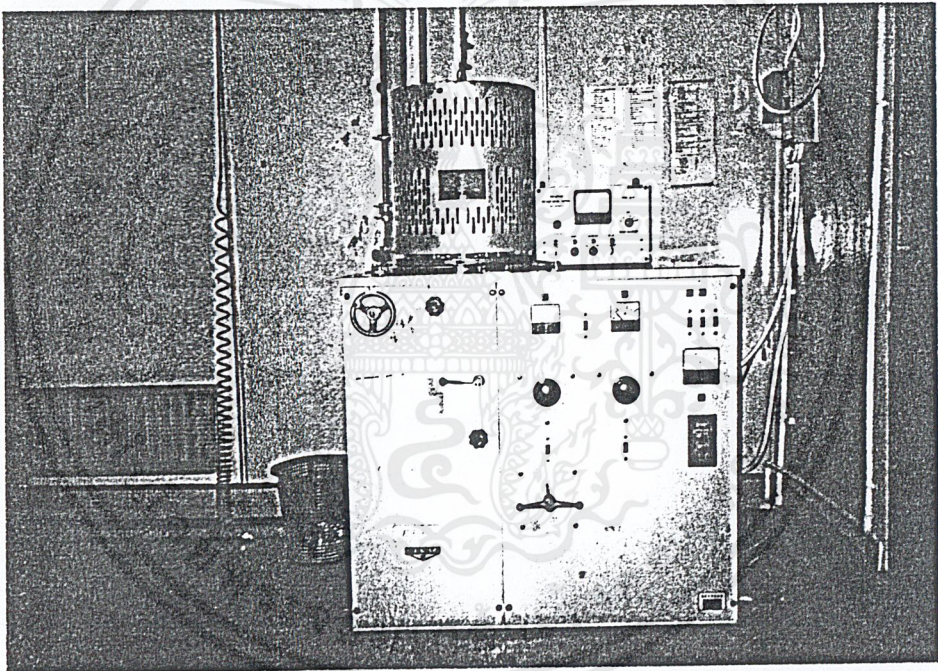


รูปที่ ค.7 เตาแพร่สารเจือชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลังจากกระตุ้นแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือแล้ว ในการแพร่สารเจือจะนำชิ้นงานประกบกับแหล่งจ่ายสารเจือ แล้ววางไว้ที่หน้าเตา 5 นาที เพื่อปรับอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับภายในเตาแพร่สารเจือ แล้วจึงดันแท่งวาง (Boat) เข้าไปในเตา ใช้เวลา 5 นาที แล้วปล่อยให้แพร่สารเจือภายในเวลาที่ต้องการ แล้วจึงนำออกโดยใช้เวลา 5 นาที และพักที่หน้าเตา 5 นาทีเท่ากัน แล้วนำแผ่นชิ้นงานมาวัดหาค่าความต้านทาน โดยต้องทำการลอกชั้นออกไซด์ที่เกิดในระหว่างการแพร่ โดยแช่ใน HF (ไฮโดรฟลูออริก หรือ กรดกัดแก้ว) ใช้เวลาประมาณ 10 วินาที แล้วจึงทำการวัด

### กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ (Metalization)



รูปที่ ๘.๘ เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporator)

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ เป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวบนแผ่นสลิค เพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก หรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างถึงประติขันธ์ต่างๆ ในวงจรรวม หรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่จะสร้างรอยสัมผัสที่เคลือบ จะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติต่อไปนี้ คือ

1. ทำให้เกิดรอยสัมผัสกับซิลิคอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำให้ติดแน่นกับผิวซิลิคอนไดออกไซด์ หรือสารไดอิเล็กทริกอื่นๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับลวดตัวนำภายนอกได้ดี

ในกระบวนการสร้างลวดลายโลหะ ภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. จะเลือกใช้โลหะอลูมิเนียม (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporator) ดังแสดงในรูปที่ ค.8 ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ โดยมีความหนาประมาณ  $1 \mu\text{m}$  แล้วจึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกัดเป็นลวดลายตามที่ต้องการไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการซิงเตอร์ริง (Sintering) ที่อุณหภูมิประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาประมาณ 10 นาที เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี หลังจากการเคลือบชั้นอลูมิเนียมแล้ว เป็นดังนี้

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ film) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่  $85^{\circ}\text{C}$  20 นาที (prebake)
- Alignment expose
- Develop ฟิล์มโดย
  - จุ่มลงใน AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน AZ Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
  - เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$
- อบฟิล์มที่  $85^{\circ}\text{C}$  20 นาที (postbake)

หลังจากนั้น จึงนำไปสกัดชั้นอลูมิเนียมออก (Al-Etching)

- จุ่มลงในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

แล้วจึงนำไปลอกฟิล์มออก โดย

- จุ่มลงใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

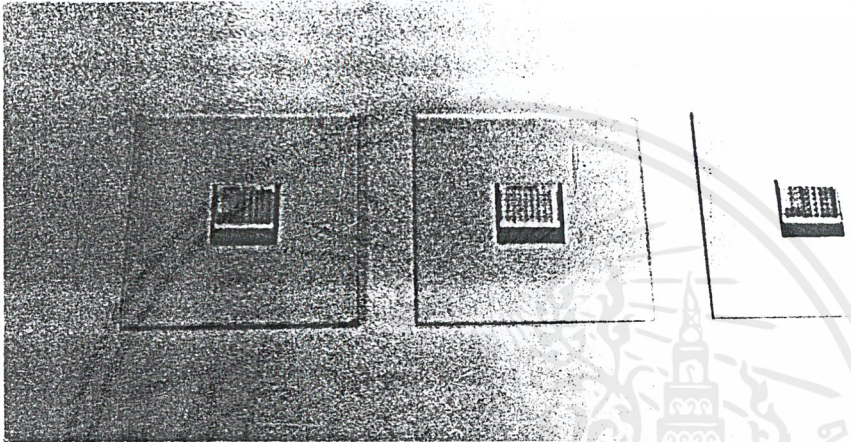


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

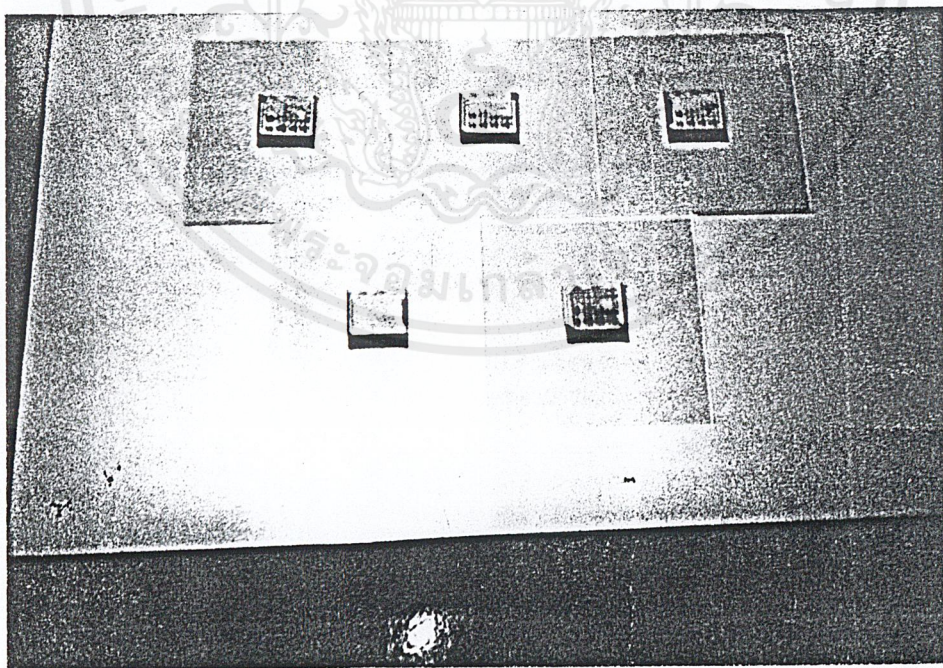
## ภาคผนวก ง

### กระจกตันแบบ

กระจกตันแบบที่ใช้ในการสร้างมอสคาปาซิเตอร์ แสดงดังรูปที่ ง.1 และกระจกตันแบบที่ใช้ในการสร้างพีเซนแนลคีมอส แสดงดังรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.1 กระจกตันแบบที่ใช้ในการสร้างมอสคาปาซิเตอร์



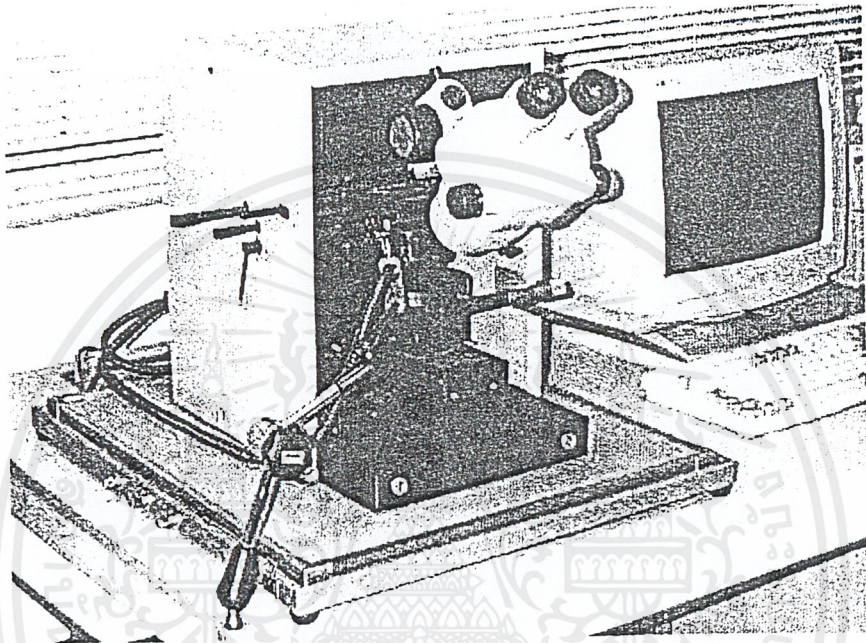
รูปที่ ง.2 กระจกตันแบบที่ใช้ในการสร้างพีเซนแนลคีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ.

## เครื่องมือวัด

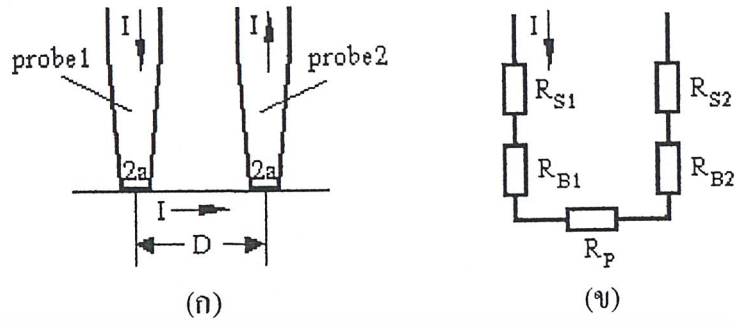
## การวัดความต้านทานด้วยเทคนิค Spreading Profile Resistance



รูปที่ จ.1 เครื่อง SR-210

เครื่อง SR-210 จะทำการวัดด้วยเข็ม probe ที่มีความนำไฟฟ้าสูง ซึ่งเข็ม probe จะมีขนาดของรัศมี  $a$  ที่เล็กมาก ( $a = 1-10 \mu\text{m}$ ) ที่แนบติดอยู่กับพื้นผิวของชิ้นงานสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า ( $\rho$ ) และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข็มทั้งคู่จากเข็มหนึ่งไปสู่อีกเข็มหนึ่ง ความต้านทาน  $R_{sp}$  ที่จุดที่วัดจะเพิ่มขึ้นทำให้กระแสที่ไหลผ่านเข็ม probe ลดลง และเป็นสัดส่วนกับค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานสารกึ่งตัวนำ

จากรูปที่ จ.2 (ข)  $R_{S1}$  และ  $R_{S2}$  คือความต้านทานของ probe1 และ probe2 ตามลำดับ  $R_{B1}$  และ  $R_{B2}$  คือความต้านทานที่จุดสัมผัสของ probe กับชิ้นงานสารกึ่งตัวนำ  $R_p$  คือความต้านทานของชิ้นงานสารกึ่งตัวนำ และเนื่องจากค่าความต้านทานของ  $R_{S1}, R_{S2}, R_{B1}, R_{B2}$  มีค่าน้อยมาก จึงไม่มีผลต่อค่า  $R_p$  ดังนั้นในการใช้งานจึงถือว่าค่าความต้านทานที่วัดได้คือค่าความต้านทานของชิ้นงาน



รูปที่ ๒.๒ (ก) การวัดของ probe 2 หัว

(ข) วงจรเสมือนของการวัด

ในการวัดค่าความต้านทานด้วยเทคนิค Spreading Profile Resistance ดังกล่าว จะต้องทำการเตรียมชิ้นงานก่อน โดยเริ่มต้นจากการตัดแผ่นทดสอบให้มีขนาดที่เหมาะสม นำไปติดบนแท่นยึดชิ้นงาน (sample carrier) แล้วจึงนำชิ้นงานไปขัดด้วยครีมเพชร (diamond paste) ซึ่งจะได้รอยขัดที่เอียงทำมุม 1 องศา กับพื้นที่ผิวชิ้นงานที่ไม่ได้ถูกขัด ดังรูปที่ ๒.๓ ซึ่งแสดงการปักของเข็ม probe เข้าไปในเนื้อสารตั้งแต่ผิวของชิ้นงานลึกลงไป ในรอยขัดเรื่อยๆ ซึ่งในการปักเข็มลงไปในแต่ละครั้ง เครื่องจะใช้แรงกดที่เท่ากัน และปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเนื้อสารจากปลายเข็มหนึ่งไปสู่อีกปลายเข็มหนึ่งในปริมาณคงที่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลระหว่างเข็มจึงขึ้นอยู่กับความต้านทานของเนื้อสารที่จุดๆ นั้น

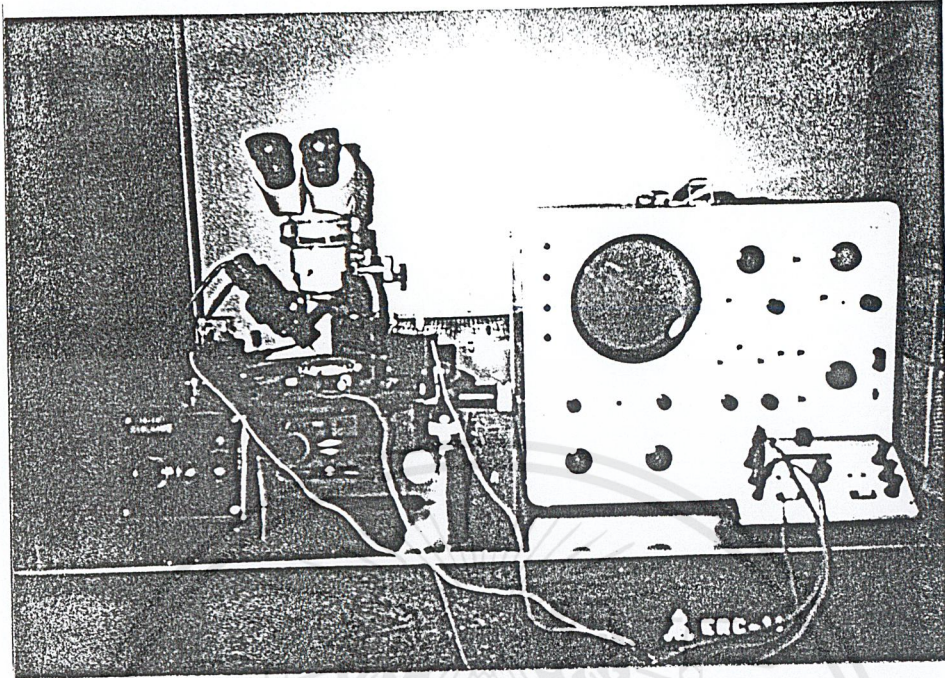


รูปที่ ๒.๓ ภาพตัดขวางของแท่นยึดชิ้นงาน

### เครื่อง Probe Station และ Curve Tracer

ภาพแสดงเครื่อง Probe Station และ Curve Tracer ขณะทำการวัดเป็นดังรูปที่ ๒.๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.4 เครื่อง Probe Station และ Curve Tracer

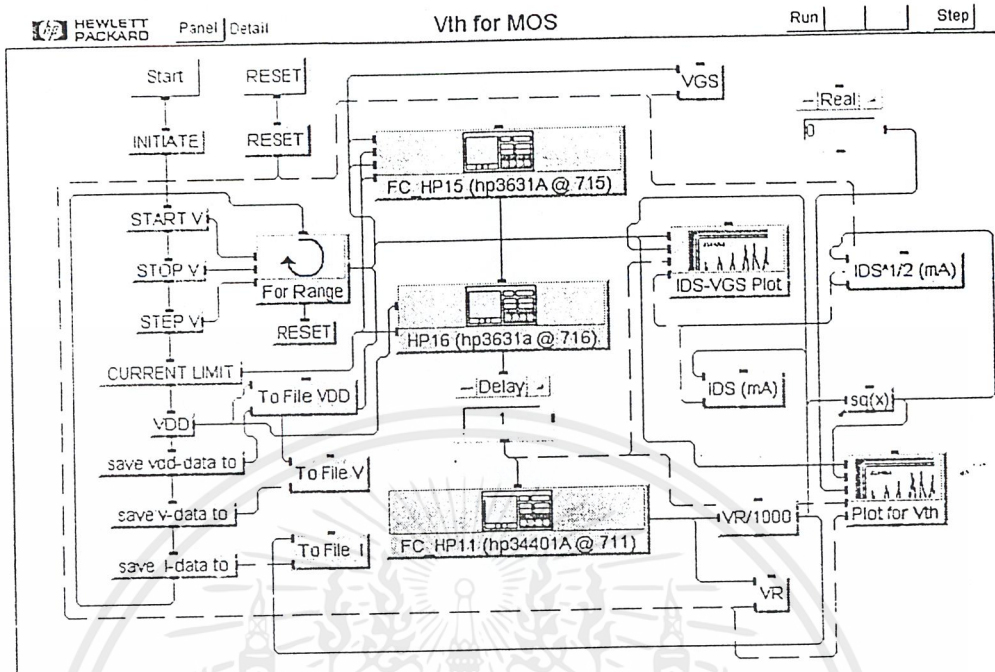
เครื่อง HP-VEE

ภาพแสดงเครื่อง HP-VEE ขณะทำการวัด แสดงดังรูปที่ จ.5

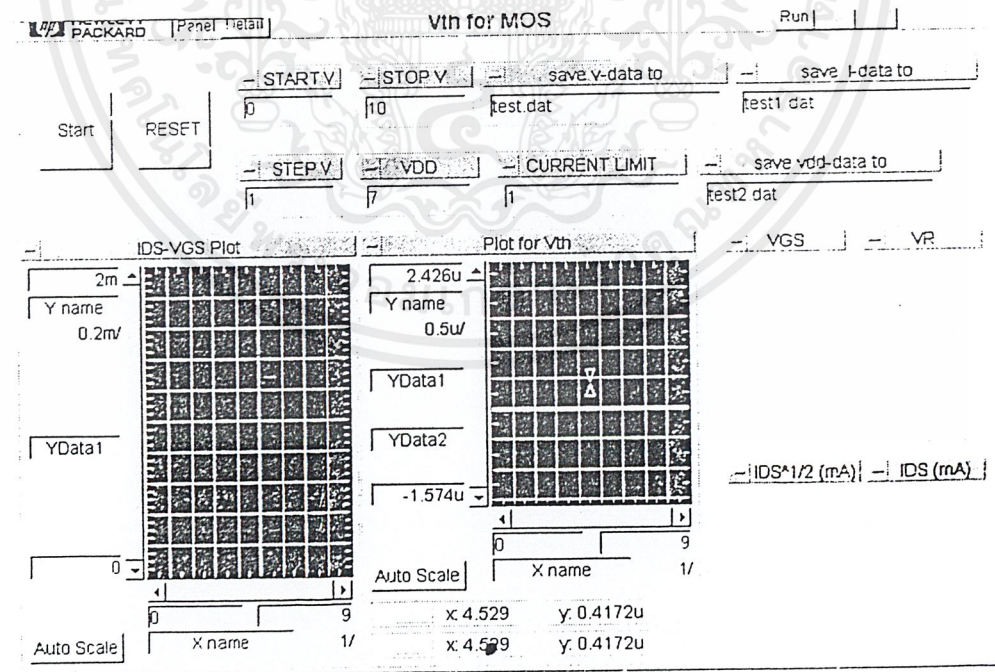


รูปที่ จ.5 เครื่อง HP-VEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.6 โปรแกรมวัดแรงดันขีดเริ่มที่เชื่อมต่อกัน

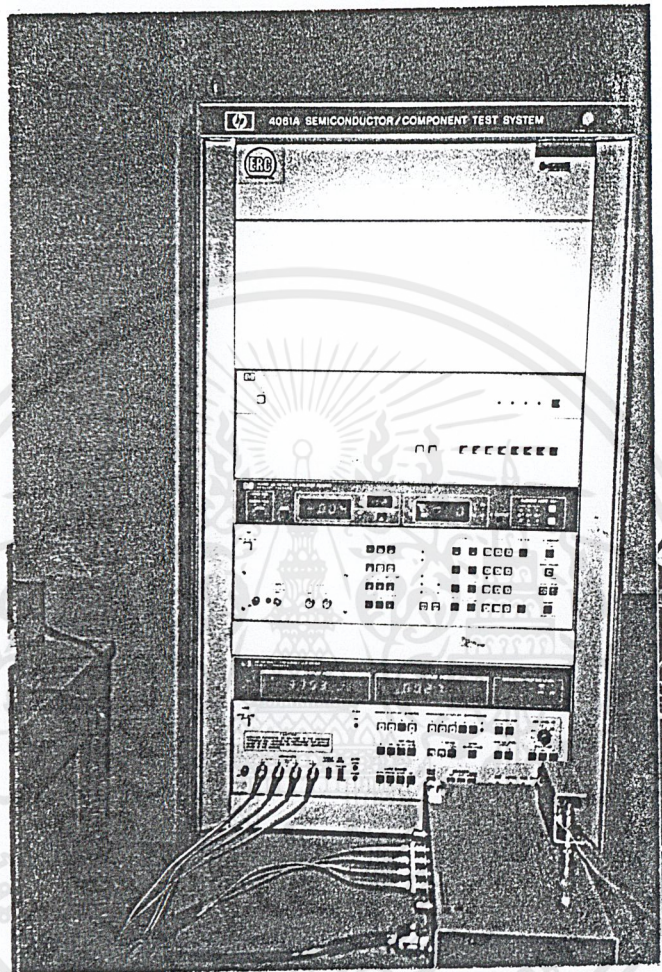


รูปที่ จ.7 โปรแกรมวัดแรงดันขีดเริ่มที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่อง HP-4061

ภาพแสดงเครื่อง HP-4061 ขณะทำการวัด แสดงดังรูปที่ จ.8



รูปที่ จ.8 เครื่อง HP-4061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

### ขอขอบคุณ

- คุณภควัต สรวยสุวรรณ เจ้าหน้าที่ ที่คอยช่วยเหลืออย่างใกล้ชิดโดยตลอด ให้คำปรึกษาและสั่งสอนในทุกๆ เรื่อง
- คุณรังสรรค์ เมืองเหลือ เจ้าหน้าที่ ที่อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด
- คุณสรายุทธ วิสวแสงสุข และคุณเนาวรัตน์ สังข์จีน นักศึกษาปริญญาโทที่ให้ความช่วยเหลือ เมื่อเกิดปัญหาหรืออุปสรรคต่างๆ
- อาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ทุกคน ที่ช่วยให้คำแนะนำและสั่งสอนจนทำให้เกิดปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้นมาได้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. Adolph blicher , “Field-Effect and Bipolar Power Transistor Physics” , Academic Press , 1981, p. 281
2. Oliver J.Mecarthy , “Mos Device And Circuit Design” , John Wiley & Sons , 1982 , p. 37-39, p. 47-50, p. 64-70, p. 245
3. Mauro Zambuto , “Semiconductor Devices” , McGraw-Hill , 1989 , p. 289-303
4. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ , “การศึกษา ออกแบบ สร้าง และพัฒนามอสเฟตกำลัง” , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535 หน้า 17, หน้า 32-34, หน้า 78-86
5. สมศักดิ์ ชุมช่วย , “Oxidation & Diffusion (Theory-Technique)” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2528 , หน้า 1-10
6. Andres Fortino , “Fundamentals of Computer Aided Analysis and Design (CAA/CAD) of Integrated Circuit Processes and Devices , Prentice-Hall , 1983 , p. 75-76, p. 125-126
7. กนกพรณ อินทรจุฑกุล และ กนกพรณ ฉาวรภูด , “การศึกษาโครงสร้างและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดอื่นในแนวระนาบที่มีเกทเป็นฉนวน” , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542 หน้า 23-27