



การสร้างซีมอส แนนเกต นอเกต

CMOS NAND GATE NOR GATE FABRICATION



โดย

นายนพพร ชัยพงษ์ รหัส 37013247

นายวันชัย อรุณเจริญฉาย รหัส 37013262

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเศษ

- ๒๓๑ ๒๕๖๑

วัน เดือน ปี.....

เลขทะเบียน..... 038413

เลขเรียกหนังสือ..... T-34302.16124

ปริญญาบัตรสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ชื่อโครงการภาษาไทย การสร้างชิมอส แนนเกต นอเกต

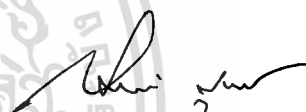
ชื่อโครงการภาษาอังกฤษ CMOS NAND GATE NOR GATE FABRICATION

ชื่อนักศึกษาและเลขประจำตัว

นายนพพร ชัยพงษ์ รหัส 37013247

นายวันชัย อรุณเจริญฉาย รหัส 37013262

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



(รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2539

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

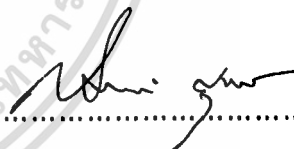
เรื่อง การสร้าง ซิมอส แนนเกต นอเกต

(CMOS NAND GATE NOR GATE FABRICATION)

ผู้จัดทำ

1. นายนพพร ชัยพงษ์ รหัส 37013247

2. นายวันชัย อรุณเจริญฉาย รหัส 37013262



(รศ. ดร. สมเกียรติ สุภเศษ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสร้างซิมอส แนนเกท นอเกท

นพพร ชัยพงษ์ เลขประจำตัว 37013247  
วันชัย อรุณเจริญฉาย เลขประจำตัว 37013262  
รศ.ดร.สมเกียรติ สุภคช อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2539

## บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบ และกระบวนการสร้าง วงจรรวมคิจริตอลพื้นฐานแบบซิมอส อันได้แก่ แนนเกท และ นอเกท ซึ่งเป็นการศึกษาต่อเนื่องจาก การสร้างซิมอสอินเวอร์เตอร์ โดยเนื้อหาภายในประกอบด้วยส่วนของทฤษฎี โครงสร้าง คุณสมบัติทางไฟฟ้า และกระบวนการสร้าง และในส่วนท้ายของรายงาน เป็นการแสดงการวัด คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ที่เราได้สร้างขึ้น เปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ

**CMOS NAND GATE , NOR GATE FRABRICATION****Nopporn Chaiphong****Wanchai Aroongharernchay****Assoc. Prof. Dr. Somkiat Supadech Advisor****1996****ABSTRACT**

This thesis introduced the method of design and fabrication of basic digital integrated circuits including nand and nor gates. This study follows the study fabrication of CMOS inverter. The thesis itself composed of theory structure electrical characteristic process and experimental results compared whit simulation .

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	XII
บทนำ	XIII
บทที่ 1 ทฤษฎีมอสเฟต	1
1.1 ลักษณะทั่วไป	1
1.2 โครงสร้างพื้นฐาน	1
1.2.1 การทำงาน ( Operation )	2
1.2.2 Square-Law Model	4
1.2.3 บอดี ไบอัส	6
1.2.4 โพรเซส พารามิเตอร์	7
1.3 มอสเฟต พาราซิติค	8
1.3.1 พาราซิติค คาปาซิแตนซ์	8
1.3.2 เครน - ซอส รีชีสแตนซ์	9
2.1 ซีมอส อินเวอร์เตอร์ ( CMOS INVERTER )	11
2.1.1 ซีมอส อินเวอร์เตอร์ คาแรคเตอร์ริสติกส์	11
2.1.2 Noise margins	17
2.1.3 ซีมอส ทรานซิชล เรสปอนส์	18
2.2 วงจรพื้นฐานแบบซีมอส	21
2.2.1 แนนเกตสองอินพุท	21
2.2.2 นอเกตสองอินพุท	25
3.1 ข้อกำหนดในการออกแบบ	28
3.2 การออกแบบมอสทรานซิสเตอร์	30
3.3 การออกแบบซีมอส	31
3.3.1 การออกแบบซีมอสอินเวอร์เตอร์	31
3.3.2 การออกแบบซีมอสแนนด์เกต และนอร์เกต	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
3.4 กระบวนการสร้างกระจกค้นแบบ	34
บทที่ 4 กระบวนการสร้างชิโมส	42
4.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน	42
4.1.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนครั้งแรก	42
4.1.2 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนแบบมาตรฐาน	42
4.1.3 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยการ Slice Etching	42
4.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)	42
4.2.1 คุณสมบัติและโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์	43
4.2.2 การสร้างออกไซด์ด้วยความร้อน (Thermal Oxidation)	44
4.2.3 ระบบของการสร้างออกไซด์	47
4.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography Process)	49
4.3.1 น้ำยาไวแสง(Photoresist)	49
4.4 กระบวนการแพร่สารเจือ (Impurity Diffusion Process)	51
4.5 กระบวนการสร้างลวดลายอะลูมิเนียม	59
บทที่ 5 ขั้นตอนการสร้าง ชิโมส แนน และ นอเกต	60
5.1 ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมแผ่นและการตรวจสอบคุณสมบัติแผ่นผลึกซิลิกอน	60
5.2 การทำความสะอาดผิวหน้าซิลิกอนครั้งแรก	60
5.3 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอนแบบมาตรฐาน	60
5.4 การ ซไลซ์ เอชซิ่ง ( slice etching )	61
5.5 กระบวนการออกซิเดชันครั้งแรก (First Oxidation)	62
5.6 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 1 (P - Well)	62
5.7 การใช้สารละลายกัดออกไซด์ (Oxide Etching)	64
5.8 กระบวนการลอกฟิล์ม	64
5.9 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอน	65
5.10 กระบวนการ ซไลซ์ เอชซิ่ง	66
5.11 กระบวนการ โบรอน เดปโพอซิชั่น (Boron deposition)	66
5.12 การลอกชั้น โบรอนกลาส ( Boron glass )	66
5.13 การทำความสะอาดผิวหน้า	66

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 5.14 กระบวนการ ขับลิ้ง โบรอน ( Bron Drive-in ) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.15	กระบวนการโฟโวลติโทกราฟี มาส์คที่ 2 (P <sup>+</sup> )	68
5.16	การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)	68
5.17	กระบวนการลอกฟิล์ม	68
5.18	การทำความสะอาดผิวหน้า	69
5.19	กระบวนการ ซไลช เอชซึ่ง	69
5.20	กระบวนการ โบรอน เคปโพซิชัน (Boron deposition)	69
5.21	กระบวนการลอกชั้น โบรอน-กลาส	70
5.22	การทำความสะอาดผิวหน้า	70
5.23	กระบวนการ Boron Drive-in	70
5.24	กระบวนการโฟโวลติโทกราฟี มาส์คที่ 3 (n <sup>+</sup> )	71
5.25	การใช้สารละลายสกัดออกไซด์ (Oxide Etching)	71
5.26	กระบวนการลอกฟิล์ม	71
5.27	การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอน	72
5.28	กระบวนการ ซไลช เอชซึ่ง	72
5.29	กระบวนการ ฟอสฟอรัส เคปโพซิชัน (Phosphorus Deposition)	72
5.30	กระบวนการลอกชั้น ฟอสฟอรัส กลาส (Phosphorus glass)	73
5.31	การทำความสะอาดผิวหน้า	73
5.32	กระบวนการ ขับลิค	73
5.33	กระบวนการโฟโวลติโทกราฟี มาส์คที่ 4 (Gate Oxide )	73
5.34	การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)	74
5.35	กระบวนการลอกฟิล์ม	74
5.36	การทำความสะอาดผิวหน้า	74
5.37	กระบวนการ ซไลช เอชซึ่ง	74
5.38	กระบวนการสร้างเกตออกไซด์(Gate Oxidation)	75
5.39	กระบวนการโฟโวลติโทกราฟี มาส์คที่ 5 (Contact)	76
5.40	การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)	76
5.41	กระบวนการลอกฟิล์ม	76
5.42	การทำความสะอาดผิวหน้า	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
5.44 กระบวนการโฟโวลติกกราฟฟี มาส์คที่ 6 (สร้างลวดลายอะลูมิเนียม)	79
5.45 กระบวนการสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-Etching)	79
5.46 กระบวนการลอกฟิล์ม	79
5.47 กระบวนการ Sintering	79
<b>บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>82</b>
6.1 การวัดคุณสมบัติในขณะที่ทำการสร้าง	82
6.1.1 วัดความหนาของแผ่นซิลิกอน	82
6.1.2 การวัดค่าความต้านทานที่ผิว ( sheet resistivity )	82
6.1.3 นำค่าต่างๆที่ได้ในข้อ 6.1.1 และ 6.1.2 มาคำนวณ	82
6.1.4 ผลของการสร้างออกไซด์ครั้งแรก	84
6.1.5 ผลของการขั้วลิกที่ P-Well	85
6.1.6 ผลของการขั้วลิกที่ ซอส-เดรน ของพีมอส	87
6.1.7 ผลของการขั้วลิกที่ ซอส-เดรน ของเอ็นมอส	87
6.1.8 ผลของการสร้างเกตออกไซด์	88
6.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	88
6.2.1 การวัดแรงดันขั้วเริ่ม	89
6.2.2 การวัดแรงดันพังทลาย	92
6.2.3 การวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน	93
6.2.4 การวัดคุณสมบัติความเป็นสวิทช์ (Switching Characteristic)	94
6.2.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟตรง ( Transfer characteristics )	105
6.2.6 การวัดช่วงเวลาหน่วง( Delay time )	110
6.3 การใช้คอมพิวเตอร์จำลองผลการวัดทางไฟฟ้า	110
6.3.1 การจำลองผลของคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	113
6.3.2 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์	115
6.3.3 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสแนนเกต	119
6.3.4 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสนอเกต	125
<b>บทที่ 7 บทสรุป</b>	<b>132</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>149</b>
<b>กิตติกรรมประกาศ</b>	<b>150</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของ เอ็น- แชนเนล มอสเฟต ( เอ็นมอส )	1
รูปที่ 1.2 ภาพของ เอ็น- แชนเนล ฟอสเฟต	2
รูปที่ 1.3 นิยามของแรงดันและกระแสในเอ็นมอส	4
รูปที่ 1.4 ( $I - V$ ) Characteristic ของ เอ็น - แชนเนล มอสเฟต	6
รูปที่ 1.5 แสดงผลของ บอดี ไบอัส ของมอสเฟต	7
รูปที่ 1.6 แสดง พาราซิติค คาปาซิแตนซ์ โมเดล ของมอสเฟต	8
รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐาน ซิมอสอินเวอร์เตอร์	12
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของ ซิมอสอินเวอร์เตอร์	13
รูปที่ 2.3 Noise margin Voltage	17
รูปที่ 2.4 CMOS transient analysis	20
รูปที่ 2.5 วงจรซิมอสเกต	22
รูปที่ 2.6 แสดงค่าตัวเก็บประจุในวงจรแนนเกต	24
รูปที่ 2.7 แสดงวงจรนอเกตแบบซิมอส	26
รูปที่ 2.8 แสดงค่าตัวเก็บประจุในวงจรนอเกต	27
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างลวดลายค่านบนซิมอส	29
รูปที่ 3.2 วงจรซิมอสอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ	31
รูปที่ 3.3 ลวดลายวงจรซิมอสอินเวอร์เตอร์ทางกายภาพ	32
รูปที่ 3.4 วงจรแนน และนอเกต	33
รูปที่ 3.5 ลวดลายทางกายภาพของ แนนเกตและนอเกต	34
รูปที่ 3.6 กระดาษกราฟไขคันแบบของซิมอสแนน และนอ เกท	34
รูปที่ 3.7 เครื่องตัดแผ่นโพลีเอสเตอร์(Micro Cutter)	35
รูปที่ 3.8 แสดงภาพของแผ่นโพลีเอสเตอร์ มาร์คที่ 1 (P - Well)	36
รูปที่ 3.9 แสดงภาพแผ่นโพลีเอสเตอร์มาร์คที่ 2 ( $p^+$ )	37
รูปที่ 3.10 แสดงภาพแผ่นโพลีเอสเตอร์มาร์คที่ 3 ( $n^+$ )	37
รูปที่ 3.11แสดงภาพแผ่นโพลีเอสเตอร์ มาร์คที่ 4 (Gate Oxide)	38
รูปที่ 3.12แสดงภาพแผ่นโพลีเอสเตอร์ มาร์คที่ 5 (Contact)	39
รูปที่ 3.13แสดงภาพมาร์คที่ 6 (Al - Metalization)	39

ภาพ	หน้า
รูปที่ 3.14 แสดงภาพเครื่องถ่ายภาพแบบย่อส่วน	40
รูปที่ 3.15 แสดงกระจกคันแบบที่พร้อมจะนำไปใช้งาน	41
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของซิลิกอน ไดออกไซด์	44
รูปที่ 4.2 จำนวนของซิลิกอนที่ใช้ไปในระหว่างการเกิดออกซิเดชัน	45
รูปที่ 4.3 อัตราการเกิดออกไซด์แบบชั้น	46
รูปที่ 4.4 อัตราการเกิดออกไซด์แบบแห้ง	47
รูปที่ 4.5 แสดงภาพของเตาที่ใช้สร้างออกไซด์	48
รูปที่ 4.6 ระบบของการออกซิเดชัน	48
รูปที่ 4.7 เครื่องปรับตำแหน่งกระจกคันแบบ และถ่ายแบบลงบนแผ่นผลึกชิ้นงาน	50
รูปที่ 4.8 กระบวนการโฟโวลติโทกราฟี	50
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างของระบบการแพร่สารเจือที่ใช้แหล่งจ่ายเป็นของเหลว	52
รูปที่ 4.10 แสดงการแพร่สารเจือลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอน	52
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Solid Solubility ของ สารเจือต่าง ๆ ในซิลิกอน	53
รูปที่ 4.12 แสดงความเข้มข้นของอะตอมสารเจือที่เกิดจากการแพร่	53
รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของรอยต่อที่เกิดขึ้น	54
รูปที่ 4.14 แสดงการพล็อตระหว่างสัมประสิทธิ์ของการแพร่และอุณหภูมิ	55
รูปที่ 4.15 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังจากการ Predeposition	56
รูปที่ 4.16 กราฟอนุกรมลอการิทึมเพื่อหาการกระจายของสารเจือทั้งแบบ erfc และ Gaussian	57
รูปที่ 4.17 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังจากการขับลึก	58
รูปที่ 4.18 แสดงภาพของเตาแพร่อะตอมสารเจือ	59
รูปที่ 5.1 เครื่อง อุลตราโซนิค	61
รูปที่ 5.2 แสดงภาพในภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอน	61
รูปที่ 5.3 แสดงภาพในภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนเมื่อผ่านการออกซิเดชันแล้ว	62
รูปที่ 5.4 เครื่อง สปินเนอร์ ที่ใช้สำหรับเคลือบน้ำยาไวแสง	63
รูปที่ 5.5 คู่มือแผ่นซิลิกอน	64
รูปที่ 5.6 แสดงภาพกระจกคันแบบในมาร์กที่ 1	65
รูปที่ 5.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการล้างฟิล์ม	65
รูปที่ 5.8 แสดงภาพของเตาแพร่สารเจือ	67
รูปที่ 5.9 แสดงภาพในภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนหลังจากการสร้าง P-Well	67

ภาพ	หน้า
รูปที่ 5.10 แสดงภาพของกระจกต้นแบบในมาร์คที่ 2	69
รูปที่ 5.11 แสดงภาพแผ่นผลึกชิ้นงานในภาคตัดขวาง เมื่อทำการสร้าง ฟิมอส แล้ว	70
รูปที่ 5.12 ภาพของกระจกต้นแบบ ในมาร์คที่ 3	72
รูปที่ 5.14 แสดงภาพของกระจกต้นแบบในมาร์คที่ 4	75
รูปที่ 5.15 โครงสร้างของแผ่นผลึกชิ้นงานหลังจากสร้างเทออกไซด์	76
รูปที่ 5.16 แสดงภาพของกระจกต้นแบบในมาร์คที่ 5	77
รูปที่ 5.13 เครื่องเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Evaporator)	78
รูปที่ 5.18 แสดงภาพตัดขวางแผ่นซิลิกอน ที่ผ่านกระบวนการเคลือบอะลูมิเนียม	78
รูปที่ 5.19 โครงสร้างของ ซิมอส เมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้ว	80
รูปที่ 5.20 ภาพลวดลายทางกายภาพด้านบนของซิมอสอินเวอร์เตอร์	80
รูปที่ 5.21 ภาพลวดลายทางกายภาพด้านบนของซิมอสแนนเกท	81
รูปที่ 5.22 ภาพลวดลายทางกายภาพด้านบนของซิมอสนอเกท	81
รูปที่ 6.1 เครื่องวัดความหนา	83
รูปที่ 6.2 เครื่อง Four point probe	83
รูปที่ 6.3 แสดงเครื่อง grooving	85
รูปที่ 6.4 แสดงภาพของกล้องขยาย 100 เท่า(profile projector)	86
รูปที่ 6.5 แสดงแผนผังการสร้างตัวอุปกรณ์บนแผ่น ซิลิกอนที่เป็นแผ่นซิมอสอินเวอร์เตอร์	88
รูปที่ 6.6 กราฟที่ได้จากการวัดแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอส B1	89
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงการพล็อตระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนและแรงดันที่เกต	90
รูปที่ 6.8 แสดงภาพของเครื่องวัด HP-4061A	90
รูปที่ 6.9 กราฟที่ได้จากการวัดแรงดันขีดเริ่มของฟิมอส E5	91
รูปที่ 6.10 กราฟแสดงการพล็อตระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนและแรงดันที่เกต	91
รูปที่ 6.11 กราฟแรงดันฟังก์ทลายของเอ็นมอส	92
รูปที่ 6.12 กราฟแรงดันฟังก์ทลายของฟิมอส	92
รูปที่ 6.13 กราฟคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของเอ็นมอส B7	93
รูปที่ 6.14 กราฟคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของฟิมอส D3	93
รูปที่ 6.15 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติความเป็นสวิตช	94
รูปที่ 6.16 แสดงแผนผังของดีไวซ์ต่าง ๆ	95

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพ	หน้า
รูปที่ 6.18 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของของซีมอสอินเวอร์เตอร์ $C_4$	96
รูปที่ 6.19 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของของซีมอสอินเวอร์เตอร์ $D_4$	97
รูปที่ 6.20 แสดงภาพการต่อวงจรเพื่อวัดสวิตช์ของแนนเกท	98
รูปที่ 6.21 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของซีมอสแนนเกท $C_3$	99
รูปที่ 6.22 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของซีมอสแนนเกท $D_4$	100
รูปที่ 6.23 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของซีมอสแนนเกท $E_2$	101
รูปที่ 6.24 แสดงภาพการต่อวงจรเพื่อวัดสวิตช์ของนอเกท	102
รูปที่ 6.25 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของซีมอสนอเกท $C_4$	102
รูปที่ 6.26 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของซีมอสนอเกท $D_4$	103
รูปที่ 6.27 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของซีมอสนอเกท $E_4$	104
รูปที่ 6.28 กราฟเปรียบเทียบการตอบสนองความถี่ของแนนเกทและนอเกท	105
รูปที่ 6.29 กราฟคุณสมบัติทางไฟตรง ของซีมอสอินเวอร์เตอร์ $C_4$ และ $D_4$	106
รูปที่ 6.30 กราฟคุณสมบัติทางไฟตรง ของซีมอสแนนเกท $C_3$ $D_4$ และ $E_4$	108
รูปที่ 6.31 กราฟคุณสมบัติไฟตรงของซีมอสนอเกท $C_4$ $D_4$ และ $E_4$	109
รูปที่ 6.32 การกำหนด node ให้กับเอ็นมอส	113
รูปที่ 6.33 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติการระแแสและแรงดันของเอ็นมอส B7	114
รูปที่ 6.34 การกำหนด node ให้กับพีมอส	114
รูปที่ 6.35 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของพีมอส D3	115
รูปที่ 6.36 แสดงการกำหนด node ให้กับวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์	116
รูปที่ 6.37 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์ $C_4$	117
รูปที่ 6.38 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์ $D_4$	117
รูปที่ 6.39 กราฟเปรียบเทียบแรงดันจิกเริ่มของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการวัดและจำลองแบบ	119
รูปที่ 6.40 การกำหนด node ให้กับวงจรแนนเกท	120
รูปที่ 6.41 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสแนนเกท $C_3$	121
รูปที่ 6.42 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสแนนเกท $D_4$	122
รูปที่ 6.43 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสแนนเกท $E_2$	124
รูปที่ 6.44 การกำหนด node ให้กับวงจรรนอเกท	125
รูปที่ 6.45 กราฟจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสนอเกท $C_4$	126
รูปที่ 6.46 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติไฟตรงของซีมอสนอเกท $D_4$	127

ภาพ	หน้า
รูปที่ 6.47 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสนอกเกต E4	129
รูปที่ 7.1 แสดงวงจรสมมูลย์ในการวัดค่าตัวเก็บประจุ	135
รูปที่ 7.2 พื้นที่ของเกทออกไซด์ ของอินเวอร์เตอร์	136
รูปที่ 7.3 พื้นที่ของลวดลายอะลูมิเนียมของอินเวอร์เตอร์	136
รูปที่ 7.4 พื้นที่ เครน-ซอสเอ็นมอสของอินเวอร์เตอร์	137
รูปที่ 7.5 พื้นที่ เครน-ซอส พีมอสของอินเวอร์เตอร์	138
รูปที่ 7.6 แสดงวงจรเสมือนที่ใช้ในการจำลองแบบคุณสมบัติทางสวิตชิง	138
รูปที่ 7.7 พื้นที่ของเกทออกไซด์ ของแนนเกต	139
รูปที่ 7.8 พื้นที่ลวดลายอะลูมิเนียมของแนนเกต	139
รูปที่ 7.9พื้นที่ เครน-ซอสเอ็นมอสของแนนเกต	140
รูปที่ 7.10 พื้นที่ เครน-ซอสพีมอสของแนนเกต	140
รูปที่ 7.11 พื้นที่เกทออกไซด์ของนอเกต	141
รูปที่ 7.12 พื้นที่ลวดลายอะลูมิเนียมของนอเกต	141
รูปที่ 7.13 พื้นที่ เครน-ซอสเอ็นมอสของนอเกต	142
รูปที่ 7.14 พื้นที่ เครน-ซอสพีมอสของนอเกต	142
รูปที่ 7.15 ผลการจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟตรงของแนนเกต กรณี $\beta = 1$	145
รูปที่ 7.16 ผลการจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟตรงของแนนเกต กรณี $\beta > 1$	146
รูปที่ 7.17 ผลการจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟตรงของแนนเกต กรณี $\beta < 1$	147

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติที่สำคัญของซิลิกอน ไดออกไซด์	43
ตารางที่ 6.1 แสดงสีของออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ กัน	84
ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบเวลาในการสวิตช์ของซิมอสอินเวอร์เตอร์	97
ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบเวลาในการสวิตช์ของซิมอสแนนและนอเกต	104
ตารางที่ 6.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $V_{in}$ กับ $V_o$ ของซิมอสอินเวอร์เตอร์ $C_4$ และ $D_4$	106
ตารางที่ 6.5 แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของซิมอสอินเวอร์เตอร์	107
ตารางที่ 6.6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $V_{in}$ กับ $V_o$ ของซิมอสแนนเกต $C_3$ $D_4$ และ $E_4$	107
ตารางที่ 6.7 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $V_{in}$ กับ $V_o$ ของซิมอสนอเกต $C_4$ $D_4$ และ $E_4$	109
ตารางที่ 6.8 แสดงค่าคิเลย์ใหม่ของซิมอสชนิดต่าง ๆ	110
ตารางที่ 6.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ภายในที่ใช้ในการจำลองแบบ	112
ตารางที่ 6.10 แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของซิมอสอินเวอร์เตอร์ ที่ได้จากการจำลองแบบ	116
ตารางที่ 6.11 ค่าคุณสมบัติทางไฟตรงต่าง ๆ ของซิมอสแนนเกต ที่ได้จากการจำลองแบบ	124
ตารางที่ 6.12 แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟตรงค่าต่าง ๆ ของซิมอสนอเกตที่ได้จากการจำลองแบบ	129
ตารางที่ 6.13 แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของแนนและนอเกตที่ได้จากการวัด	130
ตารางที่ 6.13 แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของแนนและนอเกต ที่ได้จากการจำลองแบบ	130
ตารางที่ 7.1 แสดงค่าความแตกต่างของแรงดันจิกเริ่มของแนนเกตที่ $\beta$ ค่าต่าง ๆ	148
ตารางที่ 7.2 แสดงค่าความแตกต่างของแรงดันจิกเริ่มของนอเกตที่ $\beta$ ค่าต่าง ๆ	148

## บทนำ

จากการศึกษากระบวนการสร้าง สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ตั้งแต่ ในภาคเรียนที่ 1/2538 ซึ่งเป็นโครงสร้าง มอส(MOS) และต่อมาในภาคเรียนที่ 2/2538 ก็ได้ทำการสร้างซิมอสอินเวอร์เตอร์ ( CMOS Inverter ) ซึ่งเป็นโครงการที่มีรายละเอียดไม่สมบูรณ์ อันเกิดจากขั้นตอนในการสร้าง ( Process ) ที่ไม่ได้มาตรฐาน ฉะนั้นในโครงการนี้ จึงเป็นการสร้าง สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภท ซิมอส เช่นเดียวกันแต่เป็นชนิด แนน และ นอเกต โดยทำการสร้างในทุกขั้นตอนด้วยตัวเองอย่างละเอียด ในส่วนของขั้นตอนการสร้าง ได้ทำการหาขั้นตอนการสร้างที่มาตรฐานจากการสร้างซิมอสอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในภาคเรียนที่ 1/2539 เป็นการทำงานในส่วนของหาขั้นตอนการสร้างที่มาตรฐาน และการออกแบบลวดลายด้านบน ของ แนน และนอเกต ในภาคเรียนที่ 2/2539 นี้เป็นการสร้างซิมอส แนนและนอเกต ตามขั้นตอนที่ได้กำหนดขึ้นเป็นมาตรฐาน

ในรายงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอรายละเอียดทั้งหมดตั้งแต่การออกแบบ การสร้าง การจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองวัดคุณสมบัติ เพื่อความสะดวกในการทำ ความเข้าใจ ได้มีการนำเสนอข้อมูลและเนื้อหาสาระต่าง ๆ แยกเป็นบท ๆ ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ทฤษฎีของ มอสทรานซิสเตอร์

บทที่ 2 ทฤษฎีของ ซิมอส ซึ่งประกอบด้วย ซิมอส อินเวอร์เตอร์ แนน และ นอเกต

บทที่ 3 การนำเสนอแนวทางการออกแบบ รวมไปถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการสร้างกระจกต้นแบบ ซึ่งจะนำมาใช้เป็นต้นแบบในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นการนำเสนอถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ในการออกแบบ และการสร้างกระจกต้นแบบ

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอกระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ว่า มีกระบวนการอะไรบ้าง และใช้ในขั้นตอนใด เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปสู่ขั้นตอนในการสร้าง โดย จะมีการแสดงรายละเอียดของกระบวนการต่าง ๆ รวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้าง

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอขั้นตอนในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการนำเอากระบวนการต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาไปแล้วในบทที่ 4 มาเรียงเป็นขั้นตอนการสร้างจนได้เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำออกมา ซึ่งในรายงานฉบับนี้เป็นขั้นตอนที่ได้มาตรฐานแล้ว

บทที่ 6 เป็นการแสดงผลการทดลอง การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งหมด ที่เกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทซิมอส ซึ่งจะเป็นผลการทดลองโดยละเอียด

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการปฏิบัติงานทั้งหมด ที่ได้เคยปฏิบัติมาตั้งแต่ภาคเรียนที่1/2538

จนถึงปัจจุบัน ซึ่งจะมีการเสนอแนวทางที่จะพัฒนากระบวนการต่าง ๆ ให้ก้าวหน้าต่อไปในอนาคต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการเปรียบเทียบกันระหว่างผลการวัดตัวอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นกับผลที่ได้จากการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ว่า มีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

จากที่กล่าวมาทางคณะผู้จัดทำโครงการนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่า คงจะได้รับความสนใจจากทุกท่านบ้างไม่มากก็น้อย หากมีความรู้ใดที่ก่อประโยชน์แก่ผู้อ่าน ก็ขอให้ความคิดนั้นจงบังเกิดแก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่เกี่ยวข้องที่ทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ทางคณะผู้จัดทำก็ขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย ซึ่งความผิดนี้ทางคณะผู้จัดทำขอรับไว้แต่ผู้เดียว

ขอขอบคุณทุก ๆ ท่าน

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## ทฤษฎีมอสเฟต

### 1.1 ลักษณะทั่วไป

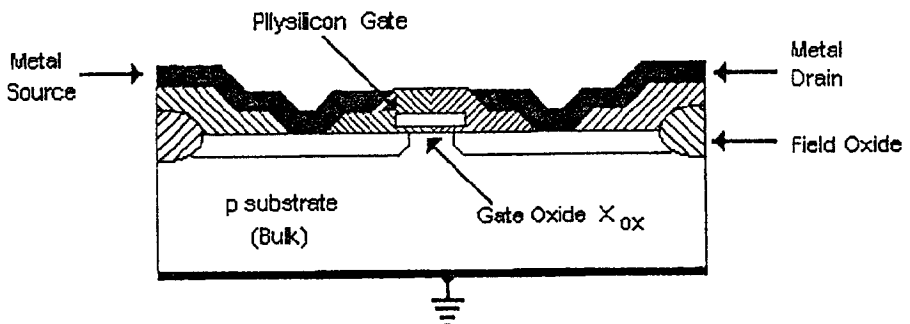
มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ขั้นพื้นฐานในการใช้สร้างวงจรรวม (Integrated Circuit, IC) แบบซีมอส ในความเป็นจริงโดยส่วนใหญ่ ลอจิกเน็ทเวอร์คต่าง ๆ จะมีโครงสร้างของมอสเฟตแทบทั้งสิ้น อุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ความต้านทาน (Resistor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) จะเกิดขึ้นก็เป็นเพียงแต่ พาราซิติค ที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างทางฟิสิกส์เท่านั้น ในส่วนนี้เราจะได้นำเสนอถึงการทำงานของมอสเฟต และวิธีการออกแบบอย่างไรที่จะทำให้เกิดผลกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า

มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ขั้นพื้นฐาน ซึ่งสามารถบรรจุลงใน IC ได้เป็นจำนวนมาก เพราะว่ามีขนาดเล็ก และสามารถสลับการทำงานกันระหว่าง ขาเดรน และ ขาซอส ซึ่งสามารถกระทำได้ภายใต้การออกแบบวงจรซีมอส อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ จะถูกเซตค่าโดยกระบวนการสร้าง การออกแบบนั้นเราจะใช้วิธีการแปรเปลี่ยนมิติ (dimension) ของทรานซิสเตอร์ เพราะว่า

- มิติของมอสเฟตจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์

### 1.2 โครงสร้างพื้นฐาน

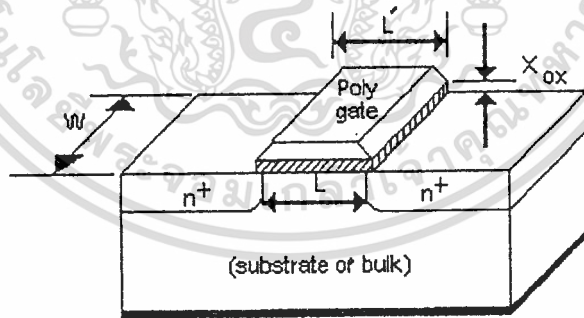
สมการกระแสและแรงดัน (I - V equation) ของมอสเฟตจะเป็นตัวที่ทำให้เราสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ ต่าง ๆ ของวงจรได้ ในส่วนนี้เราจะมาพิจารณาถึงโครงสร้างและการทำงานของทรานซิสเตอร์ในแง่ของปริมาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของ เอ็น- แชนเนล มอสเฟต ( เอ็นมอส )  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างทางฟิสิกส์ ของ เอ็นแชนเนลเมอสเฟต ( ส่วนมากเรามักจะเรียกว่า เอ็นเฟต หรือ เอ็นมอส ) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ในตัวของเอ็นมอส จะมีขั้วพื้นฐานอยู่ 3 ขั้วคือ เกท,เดรน และซอส ส่วนขั้วที่ 4 จะเป็นขั้วพิเศษ เรียกว่า ฐานรองชนิดพี ( p - type substrate ) โดยทั่วไปแล้วเรามักจะต่อฐานรองลงกราวด์เสมอ ในส่วนของ พี - แชนเนล เมอสเฟต ( พีเฟต หรือ พีมอส ) จะมีโครงสร้างคล้ายกันเพียงแต่เปลี่ยนการโด๊ป (doping) บริเวณขั้วเดรนและซอสจากสารชนิดเอ็น เป็นสารชนิดพีเท่านั้น ( ต้องอยู่บนฐานรองชนิด เอ็นด้วย ) พิลด์ออกไซด์ที่อยู่รอบ ๆ เมอสเฟตนั้นมีไว้เพื่อให้แน่ใจว่า ทรานซิสเตอร์ที่เราสร้างขึ้นมานั้นจะไม่มีผลทางไฟฟ้ากับ ทรานซิสเตอร์ตัวที่อยู่ข้างเคียง

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญมากของเมอสเฟตคือ ความหนาของเกตออกไซด์ ( Oxide thickness,  $X_{ox}$  หรือ  $t_{ox}$  ) ความยาวของแชนเนล ( Channel Length ,  $L$  ) และ ความกว้างของแชนเนล ( Channel Width ,  $W$  ) ค่าของ  $X_{ox}$  จะสามารถกำหนดได้ที่กระบวนการสร้าง ดังนั้นผู้ออกแบบวงจร จะไม่สามารถกำหนดความหนาของออกไซด์ส่วนนี้ได้ แต่ในส่วนของ ความยาวและความกว้างของแชนเนลเราสามารถที่จะกำหนดลงไปในช่วงตอนของการออกแบบได้ และในเบื้องต้นของการออกแบบนั้นเราจะใช้การเปลี่ยนแปลงค่าของ  $W$  และ  $L$  เป็นหลักในการออกแบบ รูปที่ 1.2 แสดงรูปร่างของฟอสเฟต เพื่อให้เข้าใจความหมายของความกว้างและความยาวของแชนเนลได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 1.2 ภาพของ เอ็น- แชนเนล ฟอสเฟต

### 1.2.1 การทำงาน ( Operation )

ค่าของกระแสเดรน ( $I_d$ ) ที่ไหลผ่านเมอสเฟต จะขึ้นกับการกำหนดค่าแรงดัน  $V_{GS}$  ( เกท - ซอส โวลท์เตจ ) ซึ่งจ่ายให้กับทรานซิสเตอร์ อีกทั้งแรงดันที่ฐานรอง ( body bias voltage ,  $V_{SB}$  ) ก็เอกสารนี้จะมีผลกับการไหลของกระแสด้วย การเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นของเกตออกไซด์ และ เซมิคอนดักเตอร์ เสมือนหนึ่งเป็นโครงสร้างของตัวเก็บประจุ โดยที่ออกไซด์เปรียบเสมือนฉนวนระหว่างตัวนำ ( Plate ) กำหนดให้เป็น  $C_{ox}$  ซึ่งมันคือเทอมของคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น  $farad/cm^2$  คำนวณได้จาก

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{X_{ox}} \quad (1.2 - 1)$$

ในสมการนี้  $\epsilon_{ox} = (3.9)(8.854 \times 10^{-14}) \approx 3.45 \times 10^{-13} \text{ farad/cm}^2$  มันคือ เพอร์มิตติวิตี้ ของ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( permittivity of silicon dioxide ) และ  $X_{ox}$  คือ ความหนาของออกไซด์มีหน่วยเป็นเซนติเมตร ตัวอย่างเช่น สมมติให้  $X_{ox} = 200 \times 10^{-8} \text{ cm}$  ( 200 Å ) จะให้ออกไซด์คาปาซิแตนซ์คือ

$$C_{ox} \approx 17.3 \times 10^{-8} \quad (1.2 - 2)$$

มีหน่วยเป็น  $farad/cm^2$  เพื่อความเหมาะสมในหน่วยของเมตริกจะใช้เป็น ไมครอน (micron,  $\mu m$ ) เมื่อ  $1 \mu m = 10^{-6} \text{ m}$  ดังนั้นค่าความจุจะเป็น

$$C_{ox} \approx 1.73 \text{ fF}/\mu m^2 \quad (1.2 - 3)$$

เมื่อ  $fF$  คือ เฟมโตฟารัด :  $1fF = 10^{-15} \text{ farad}$  เกตคาปาซิแตนซ์รวมกำหนดให้เป็น  $CG$  มีหน่วยเป็นฟารัด สามารถคำนวณได้จาก

$$CG \approx C_{ox} \cdot WL' \quad (1.2 - 4)$$

เมื่อ  $W$  คือ ความกว้างของแชนเนล และ  $L'$  คือความยาวจริงของแชนเนล (ความยาวของโพลี) ทั้งคู่มีหน่วยเป็นเซนติเมตร จะเห็นได้ว่า  $L$  และ  $L'$  จะมีความยาวที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยในความเป็นจริง  $L' > L$

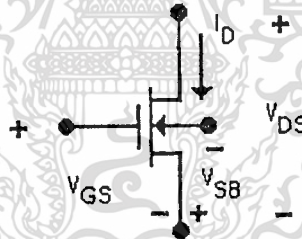
ในแง่ความคิดอย่างง่าย กระแสที่ไหลผ่าน เอ็น-แชนเนล มอสเฟต จะถูกควบคุมด้วยแรงดัน  $V_{GS}$  สำหรับ แรงดัน  $V_{GS}$  ที่มีค่าน้อย ๆ กระแสจะไหลจากขาเดรน ไปยังขาซอร์สได้ยากมาก เนื่องจาก บริเวณ  $n^+$  ขั้วดังกล่าวถูกแยกออกจากกันโดยฐานรองชนิดพี ( P-type Substrate ) ในกรณีนี้  $I_D \approx 0$  และเราสามารถพูดได้ว่าทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะ คัทออฟ ( Cutoff ) แต่ถ้าเพิ่ม  $V_{GS}$  จน

ถึงค่า  $V_{GS} > V_{Tn}$  เมื่อ  $V_{Tn}$  ก็คือค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) และแรงดัน  $V_{GS}$  นี้จะเหนี่ยวนำผ่านเกตออกไซด์ ให้เกิดชั้นของอิเล็กตรอน ภายใต้เกตออกไซด์นั้น เรียกว่าเกิดแชลแนลขึ้นระหว่างขาเกรน และขาซอส ทำให้เกิดกระแสไหลได้ ด้วยวิธีการนี้เราจะเรียกการไบอัสในช่วงนี้ว่า แอคทีฟ (Active) ค่าของ  $I_D$  จะถูกกำหนดโดย  $V_{GS}$  และ  $V_{DS}$  (แรงดัน เกรน - ซอส)

แรงดันขีดเริ่ม,  $V_{Tn}$  จะเกิดขึ้น กับลำดับขั้นตอนของการสร้าง และโดยปกติ การออกแบบวงจรนั้นจะใช้ค่าพอประมาณเท่านั้น ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าว จะมีความไวต่อฟังก์ชันความหนาของเกตออกไซด์ ( $X_{ox}$ ), ความหนาแน่นของสารเจือที่อยู่บนฐานรอง และ โครงสร้างทางฟิสิกส์ของวัสดุที่ใช้

### 1.2.2 Square-Law Model

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟต สามารถประมาณค่าอย่างง่าย โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส  $I_D$ , แรงดัน  $V_{DS}$  และ แรงดัน  $V_{GS}$  ดังแสดงในรูปที่ 1.3 สำหรับเอ็นมอส และแรงดันซอส - ฐานรอง ( $V_{SB}$ ) จะมีผลกับการไหลของกระแสในทรานซิสเตอร์ และจะมีผลกับแรงดันขีดเริ่มด้วย



รูปที่ 1.3 นิยามของแรงดันและกระแสในเอ็นมอส

มีย่านการทำงาน 2 ย่านที่เห็นได้ชัดในขณะมอสเฟตแอคทีฟ คือ ไม่อิ่มตัว (non-saturation) หรือลิเนียร์ (linear) และอิ่มตัว (saturation) แต่ละโหมดการทำงานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน  $V_{DS}$  และ แรงดัน  $V_{GS}$  โดยในขณะอิ่มตัวเราจะนิยามให้

$$V_{DS, sat} = (V_{GS} - V_{Tn}) \quad (1.2-5)$$

สำหรับค่าแรงดัน เกรน - ซอส ที่มีค่าน้อย ๆ เป็นไปตาม  $V_{DS} \leq V_{DS, sat}$  จะพูดได้ว่า มอสเฟตอยู่ในสถานะ ไม่อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_D = \frac{\beta_n}{2} [2(V_{GS} - V_{Tn})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (1.2 - 6)$$

เมื่อ

$$\beta_n = k'_n \left( \frac{W}{L} \right) \quad (1.2 - 7)$$

ถูกเรียกว่า ดีไวซ์ ทรานสคอนคักแตนท์ มีหน่วยเป็น  $Amps/Volts^2$   $k'_n$  ถูกเรียกว่า โพรเซส ทรานสคอนคักแตนท์ มีหน่วยเป็น  $Amps/Volts^2$  ด้วย และเราจะได้ว่า

$$K'_n = \mu_n \cdot C_{ox} \quad (1.2 - 8)$$

$\mu_n$  คือค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน ( electron surface mobility ) โดยทั่วไปในกระบวนการสร้างชิปมอส,  $\mu_n \approx 550 - 600 \text{ cm}^2/V\text{-sec}$  ส่วนแฟกเตอร์ (  $W/L$  ) คือมิติของการออกแบบที่ทราบโดยทั่วกันว่า แอสเปค เรโซ ( aspect ratio )

ถ้าค่าแรงดัน เทรน - ซอส ที่จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์มีค่า  $V_{DS} \geq V_{DS,sat}$  การทำงานของมอสเฟตในสภาวะนี้ จะอยู่ในภาวะอิ่มตัว ดังนั้นกระแส  $I_d$  จะอธิบายได้โดย

$$I_d = \frac{\beta_n}{2} (V_{GS} - V_{Tn})^2 [1 + \lambda(V_{DS} - V_{DS,sat})] \quad (1.2 - 9)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ แชลเนล - เลนซ์ มอดูเลชัน แฟกเตอร์ ( channel - length modulation factor ) มีหน่วยเป็น  $Volt^{-1}$  รูปที่ 1.4 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ ของมอสเฟต โดยแต่ละเส้นจะสอดคล้องกับแรงดัน  $V_{GS}$  และเส้นขอบเขตระหว่างอิ่มตัว และ ไม่อิ่มตัว จะเรียกว่า เส้นกระแสอิ่มตัว

$$I_{sat} = \frac{\beta_n}{2} V_{DS}^2, sat \quad (1.2 - 10)$$

การเพิ่มกระแสทรานในช่วงอิ่มตัวของมอสเฟตนั้น ค่า  $\lambda$  จะเป็นตัวแปรที่สำคัญ ในการออกแบบทางดิจิทัลเราจะประมาณค่า  $\lambda = 0$  เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ในกรณีนี้ กระแสอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์จะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_d \approx \left\{ \frac{\beta_n}{2} \right\} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \quad (1.2 - 11)$$

ในทางอะนาล็อก บ่อยครั้งที่ค่า  $\lambda$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่ลงไปในช่วงตอนของการออกแบบด้วย

### 1.2.3 บอดี้ ไบอัส

แรงดันขั้วเริ่ม ,  $V_{Tn}$  ได้รับผลกระทบจากแรงดัน  $V_{SB}$  สอดคล้องกับสมการ

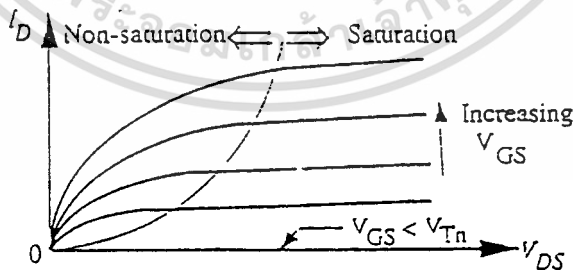
$$V_T = V_{T0} + \gamma \left( \sqrt{2|\phi_F| + V_{SB}} - \sqrt{2|\phi_F|} \right) \quad (1.2 - 12)$$

เมื่อ  $V_{T0}$  คือแรงดันขั้วเริ่ม ในกรณีที่  $V_{SB} = 0$ ,  $\gamma$  คือ บอดี้ไบอัส แฟกเตอร์

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s Na}}{Cox} \quad (1.2 - 13)$$

มีหน่วยเป็น  $[V^{1/2}]$  และ  $2|\phi_F|$  คือ บัลค์ เฟอร์มิ โปเทนเชียล ( bulk fermi potential )

$$2|\phi_F| = 2 \left( \frac{KT}{q} \right) \ln \left( \frac{Na}{ni} \right) \quad (1.2 - 14)$$



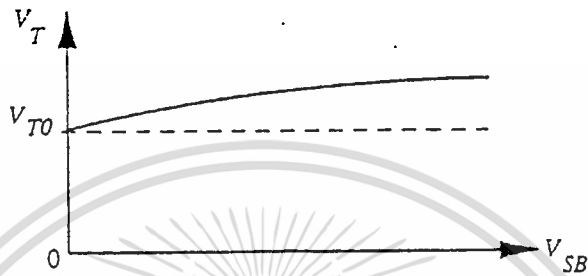
รูปที่ 1.4 ( $I - V$ ) Characteristic ของ เอ็น - แชนเนล มอสเฟต

ค่าพารามิเตอร์  $N_a$  ในทั้งสองสมการข้างต้นคือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ ( Boron ) ใน

ฐานรองชนิดพี โดยปกติ  $N_a$  จะมีค่าประมาณ  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  จากสมการจะแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของ  $V_{SB}$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ทรานซิสเตอร์ยากแก่การ turn on หรืออีกนัยหนึ่งก็หมายถึงจะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แสดงผลของ บอด้ ไบอัส ของมอสเฟต

#### 1.2.4 โพรเซส พารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าพื้นฐานของมอสเฟตจะถูกกำหนดจากกระบวนการสร้าง สำหรับ เอ็นแซมเนล ทรานซิสเตอร์ จะมีค่าต่าง ๆ ดังนี้

- $V_{T0n}$  คือ แรงดันขีดเริ่มกรณิของ ซีโร - บอด้ ไบอัส ซึ่งมีค่าเป็นบวก โดยปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.50 และ 1.00 Volts
- $K'_n$  คือ โพรเซส ทรานสคอนดักแตนซ์ [ $A/V^2$ ] จะถูกกำหนดโดยค่าของ  $C_{ox}$  และเป็นส่วนกลับกับความหนาของเกตออกไซด์  $X_{ox}$  ปกติจะมีค่า อยู่ระหว่าง 50 - 200 [ $A/V^2$ ]
- $\gamma$  คือ บอด้ - ไบอัส พารามิเตอร์ [ $V^{1/2}$ ] จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามจำนวน ของอะตอมสารเจือที่มีอยู่ในฐานรอง และ ค่าความจุของคาปาซิเตอร์ที่เกต
- $\lambda$  แชนเนล-เลนซ์ มอดูเลชัน แฟกเตอร์ [ $V^{-1}$ ] ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกิดจากประสพการณ์ จากการทดลอง

ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ สำหรับผู้ออกแบบวงจรแล้วควรจะต้องจำให้ได้ เพราะว่า เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปมากกว่านี้ ในการออกแบบเราจะใช้ค่าโดยประมาณเท่านั้น

แต่สำหรับการออกแบบที่ต้องการความเที่ยงตรงนั้น จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ให้เหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 มอสเฟต พาราซิติค

การออกแบบวงจรลอจิกแบบซีมอส นั้นในความเป็นจริง เราสามารถจำลองแบบของ สวิตช์ที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน โดยเห็นได้จากโหมดยุคของการทำงานแบบคัทออฟ และ แอคทีฟ ซึ่ง ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของแรงดัน  $V_{GS}$  กับ  $V_T$

ถึงแม้ว่าคุณสมบัติทางสวิตช์ซึ่งจะเป็นแบบตรงไปตรงมา แต่ว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ มอสเฟตจะขึ้นอยู่กับค่า พาราซิติค คาปาซิแตนซ์ และ รีซิสแตนซ์



รูปที่ 1.6 แสดง พาราซิติค คาปาซิแตนซ์ โมเดล ของมอสเฟต

#### 1.3.1 พาราซิติค คาปาซิแตนซ์

รูปที่ 1.6 แสดงความจุแฝงพื้นฐานที่เกิดขึ้นกับมอสเฟต กระบวนการทางสวิตช์ซึ่งจะถูก กำหนดโดยค่าของ  $C_{ox}$

เมื่อเรามองเข้าไปในเกตจะเห็น

- $C_G$ : เกตคาปาซิแตนซ์

ผลรวมของอินพุตคาปาซิแตนซ์สามารรถคำนวณได้จาก

$$C_G = C_{ox} \cdot WL' \quad (1.3 - 1)$$

เมื่อ  $L'$  คือ ความยาวของแชนเนล

ผลรวมของ พาราซิติค คัปปลิ่ง ระหว่างเกต และ ซอสหรือเดรนแสดงได้โดย

- $C_{GS}$ : เกต - ซอส คาปาซิแตนซ์ และ

- $C_{GD}$ : เกต - เดรน คาปาซิแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สื่อนี้ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการประมาณค่าอย่างหยาบ ๆ จะได้

$$C_{GS} \approx \frac{1}{2} C_G \approx C_{DS} \quad (1.3 - 2)$$

ถึงแม้ว่าสมการข้างบนจะเป็นการประมาณค่าที่จริงแต่มันก็มีประโยชน์มากสำหรับการออกแบบในเบื้องต้น

ดีพลีชันคาปาซิเตอร์ ( Depletion Capacitance ) จะถูกกำหนดโดยปริมาณของการโคปสารเจือบริเวณขั้ว เดรน - ซอส และ ซอส - ฐานรอง ผลอันนี้จะทำให้เกิด  $C_{SB}$  และ  $C_{DB}$  ในกรณีของ ซีโรไบอัส คาปาซิแตนซ์/ ซม.<sup>2</sup> จะกำหนดเป็น  $C_{JO}$  เช่น ผลรวมของคาปาซิแตนซ์ที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันไบอัสย้อนกลับ,  $V_r$  ใ้รับ

$$C = \frac{C_{JO} A}{\left(1 + \frac{V_r}{\phi_0}\right)^m} \quad (1.3 - 3)$$

ในสมการนี้  $A$  คือผลรวมของพื้นที่บริเวณรอยต่อ ( Junction ) และ  $\phi_0$  คือศักย์หยุดยั้ง ( built - in voltage หรือ potential barrier ) พารามิเตอร์  $m$  คือใช้สำหรับอธิบาย โคปปีง โพรไฟล์ ( doping profile ) ซึ่งมี 2 กรณีคือ  $m = 1/2$  ( step profile junction ) และ  $m = 1/3$  ( linear graded junction )

### 1.3.2 เดรน - ซอส รีชีธแดนซ์

ความต้านทาน เดรน - ซอส ของมอสเฟตจะถูกกำหนดโดยค่า รีชีธทิวิตี ของแชนเนล ถ้าเราพยายามที่จะกำหนดความต้านทาน  $R$  แบบลิเนียร์ สำหรับทรานซิสเตอร์จะใช้

$$R = \frac{V_{DS}}{I_D} \quad (1.3 - 4)$$

ในขณะที่ความไม่ลิเนียร์ของ ดีไวซ์ จะเห็นได้ชัดทันที เมื่อพยายามที่จะกำหนดรวมเข้ากับสมการกระแสครน เพื่อให้เป็นการง่าย เราสามารถจะคาดคะเนผลของความต้านทาน เดรน - ซอส ของเอ็นมอสโดยใช้ ลิเนียร์ ไทม์ อินวาเรียนท์ ( linear time invariant ) ซึ่งได้รับจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Rn \approx \frac{1}{K'_n \left(\frac{W}{L}\right) (V_{DD} - V_{Tn})} \quad (1.3 - 5)$$

ถึงแม้ว่ามันจะพอเพียงสำหรับการประมาณค่า แต่ก็ไม่ค่อยนิยมใช้ในการนำไปคำนวณในกรณีของการออกแบบวงจรที่เป็นวิกฤติ (critical situations) การจำลองแบบบนคอมพิวเตอร์จะช่วยให้ได้มากในกรณีนี้ และสมการนี้จะใช้ประโยชน์ในกรณีของการเปรียบเทียบกับกรอกแบบวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### 2.1 ซิมอส อินเวอร์เตอร์ (CMOS INVERTER)

ซิมอส อินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยโครงสร้างของ พีมอส (pMOS) และ เอ็นมอส (nMOS) ต่อกันในลักษณะคอมพลีเมนทารี (Complementary) ซึ่งข้อเสียของพีมอสคือจะมีค่าความคล่องตัว (Mobility,  $\mu_p$ ) น้อยกว่า ค่าความคล่องตัวของเอ็นมอส ( $\mu_n$ ) จึงเป็นผลทำให้ค่าโปรเซส ทรานสคอนดักแตนซ์ ของพีมอส ( $K'_p$ ) มีค่าน้อยกว่า โปรเซส ทรานสคอนดักแตนซ์ ( $K'_n$ ) ของเอ็นมอส ซึ่งมันจะมีผลทำให้วงจรมี ทรานซิชล เรสปอนส์ ต่ำ เพราะฉะนั้นวงจรที่สร้างจากเอ็นมอส จะมี ทรานซิชล เรสปอนส์ สูงกว่าวงจรที่สร้างจากพีมอส

ซิมอส ซึ่งประกอบด้วย เอ็นมอส และ พีมอส นั้น จะมีประโยชน์มากกว่าวงจรที่สร้างขึ้นจากพีมอส หรือ เอ็นมอส เพียงอย่างเดียว เนื่องจากว่า ซิมอสจะดูคลื่นกำลังงานที่ต่อเมื่อมันทำงานในลักษณะสวิตช์ (Switching) เท่านั้น กระแสเฉลี่ยที่ซิมอส ต้องการนั้นมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน จะเห็นได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์กระเป๋าหิ้ว (Portable Computer) จะใช้เทคโนโลยีของซิมอส เป็นพื้นฐานในการสร้างเป็นส่วนมาก

ซิมอสอินเวอร์เตอร์จะมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งคือ มันสามารถให้เอาต์พุต (Output) ที่เป็น ไฮ และ โล คือ  $V_{OH} = V_{DD}$  และ  $V_{OL} = 0$  [V] ตามลำดับ และ โวลต์เตจ ทรานเฟอร์ คาแรคเตอร์ริสติก (VTC) จะเป็นตัวแสดงให้เราเห็นว่า ซิมอส ตัวนั้นจะสามารถทำงานในย่านของแหล่งจ่าย  $V_{DD}$  ได้มากน้อยเท่าใด แต่ข้อเสียของซิมอสก็มีเช่นกันคือในเรื่องของ แลชท์ - อัป ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของตัว ซิมอสเองจะมีลักษณะคล้ายกับ SCR (Silicon Control Rectifier) เมื่อเกิดกระแส แลชท์ - อัป ขึ้นก็อาจทำให้ ชิป (chip) เกิดความเสียหายได้ และวิธีแก้ไขก็คือสร้างวงแหวน (guard ring) รอบตัว ทรานซิสเตอร์

#### 2.1.1 ซิมอส อินเวอร์เตอร์ คาแรคเตอร์ริสติกส์

ซิมอสอินเวอร์เตอร์ พื้นฐานแสดงดังในรูปที่ 2.1 จากรูปจะเห็นได้ว่า เกท ของ ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวต่อถึงกันเป็นส่วนของอินพุต และ เดรน ของทรานซิสเตอร์ ก็ต่อถึงกัน ซึ่งเป็นส่วนของเอาต์พุต

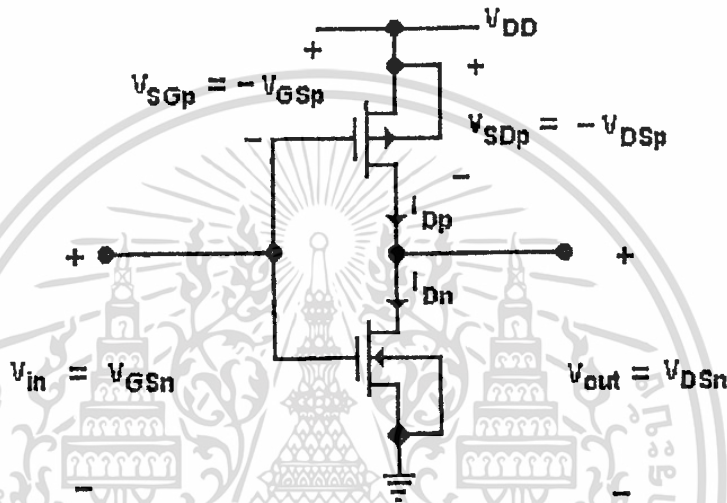
$$V_{in} = V_{GSn} = V_{DD} - V_{SGp} \quad (2.1 - 1)$$

$$\text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ } V_{out} = V_{DSn} = V_{DD} - V_{SDp} \text{ กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ (2.1 - 2)}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของ VTC ของ ซีมอส อินเวอร์เตอร์ เริ่มจาก อินพุตโวลต์เตจ  $V_{in} < V_{Tn}$  ทำให้ เอ็นมอส ทรานซิสเตอร์ กัทออฟ ,  $I_{Dn} = I_{Dp} = 0$  แต่ อย่างไรก็ตามพีมอสทรานซิสเตอร์ จะเกิดชั้นกลับ (Inversion layer) ขึ้น เพราะว่า  $V_{SGn}$  มีขนาดใหญ่ ทำให้เอาท์พุท โวลต์เตจเป็น

$$V_{out} = V_{OH} = V_{DD} - V_{SDp} \cong V_{DD} \quad (2.1 - 3)$$



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐาน ซีมอสอินเวอร์เตอร์

เมื่อ  $V_{in}$  เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีขนาดมากกว่า  $V_{Tn}$  , ทำให้ เอ็นมอสทรานซิสเตอร์อิมตัว ในขณะที่พีมอสไม่อิมตัว ตรงส่วนนี้ VTC สามารถอธิบายได้ว่า

$$\frac{\beta_n}{2} (V_{in} - V_{Tn})^2 = \frac{\beta_p}{2} \left[ 2(V_{DD} - V_{in} - |V_{TP}|)(V_{DD} - V_{out}) - (V_{DD} - V_{out})^2 \right] \quad (2.1 - 4)$$

เมื่อ  $V_{in}$  เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้  $V_{out}$  ตกลงเรื่อย ๆ จนกระทั่ง

$$(V_{DD} - V_{out}) > (V_{DD} - V_{in} - |V_{TP}|) \quad (2.1 - 5)$$

ทั้ง พีมอส และ เอ็นมอส อิมตัวทั้งคู่ ทำให้ที่ช่วงกลางของ VTC เป็น

$$\frac{\beta_n}{2} (V_{in} - V_{Tn})^2 = \frac{\beta_p}{2} (V_{DD} - V_{in} - |V_{TP}|)^2 \quad (2.1 - 6)$$

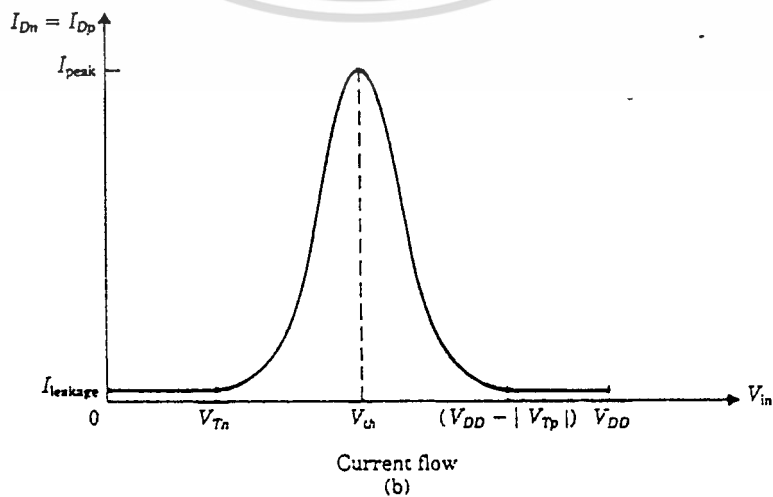
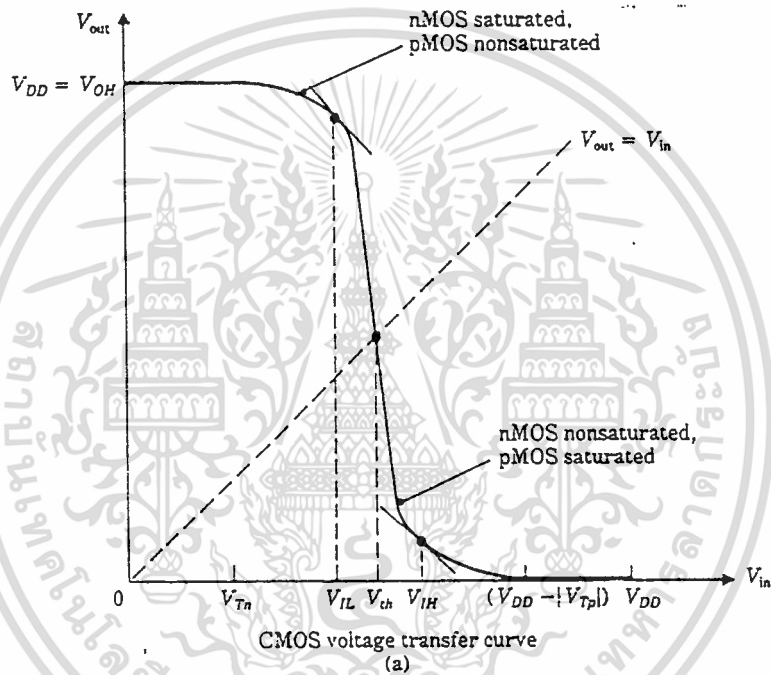
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เชิงนามเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อ  $V_{out}$  ตกลงมาอยู่ที่ระดับ

$$V_{out} < (V_{in} - V_{Th}) \tag{2.1-7}$$

เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ก็จะเข้าสู่สภาวะ ไม่อิมตัว ดังนั้น สมการ VTC ช่วงนี้คือ

$$\frac{\beta_n}{2} [2(V_{in} - V_{Th})V_{out} - V_{out}^2] = \frac{\beta_p}{2} (V_{DD} - V_{in} - |V_{Tp}|)^2 \tag{2.1-8}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของ ซิมอสอินเวอร์เตอร์  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายเมื่อ  $V_{in}$  เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่

$$(V_{DD} - V_{in}) < |V_{TP}| \quad (2.1 - 9)$$

ถือได้ว่า พีมอส เข้าสู่สภาวะคัทออฟ ทำให้  $I_{Dn} = I_{Dp} = 0$  และ ในช่วงนี้ เอ็นมอสจะเกิดชั้นกลับขึ้น  
คั้งนั้น

$$V_{out} = V_{OL} = V_{DSs} \cong 0[V] \quad (2.1 - 10)$$

VTC ที่ได้จะแสดงในรูปที่ 2.2 กำลังค่าสุดที่ต้องการของ ซิมอสอินเวอร์เตอร์ จะแสดงให้เห็นดังรูป  
2.2 (b) เมื่อเกิดเหตุการณ์  $V_{in} < V_{Tn}$  หรือ  $(V_{DD} - V_{in}) < |V_{TP}|$  จะไม่มีกระแสไหลผ่านระหว่าง  
 $V_{DD}$  ถึงกราวด์ ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ของการเกิด โลจิก (Logic) 0 และ 1

**การวิเคราะห์ (Analysis)**

$V_{OH}$  เกิดเมื่อ  $V_{in} < V_{Tn}$ , เอ็นมอส คัทออฟ ในขณะที่ พีมอส เกิดชั้นกลับ จึงประมาณ  
ได้ว่า

$$V_{OH} \cong V_{DD} \quad (2.1 - 11)$$

$V_{OL}$  เกิดเมื่อ  $(V_{DD} - V_{in}) < |V_{TP}|$ , พีมอส จะคัทออฟ ในขณะที่ เอ็นมอสจะเปรียบ  
เสมือนเป็นตัวนำ เชื่อมต่อเข้าที่พู่ทถึงกราวด์ คั้งนั้น

$$V_{OL} \cong 0[V] \quad (2.1 - 12)$$

$V_{IL}$  คือ แรงดันอินพุตต่ำสุดที่เกิดขึ้นเมื่อ เอ็นมอส ทรานซิสเตอร์ อิ่มตัว ขณะที่ พีมอส  
ไม่อิ่มตัว สมการกระแสจะได้ว่า

$$\frac{\beta_n}{2} (V_{IL} - V_{Tn})^2 = \frac{\beta_p}{2} [2(V_{DD} - V_{IL} - |V_{TP}|)(V_{DD} - V_{out}) - (V_{DD} - V_{out})^2] \quad (2.1 - 13)$$

ฟังก์ชันที่ขึ้นกับกระแสคือ  $I_{Dn}(V_{in}) = I_{Dp}(V_{in}, V_{out})$  ยูนิต สโลป (unit slope) ที่จุดนี้คือ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการเผยแพร่ หรือ การอื่นใด หากมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = \frac{\left(\frac{dI_{Dn}}{dV_{in}}\right) - \left(\frac{\partial I_{Dp}}{\partial V_{in}}\right)}{\frac{\partial I_{Dp}}{\partial V_{out}}} = -1 \quad (2.1 - 14)$$

หาค่า เควรีเวทึฟ ของสมการ

$$V_{IL} \left(1 + \frac{\beta_n}{\beta_p}\right) = 2V_{out} + \frac{\beta_n}{\beta_p} V_{Tn} - V_{DD} - |V_{Tp}| \quad (2.1 - 15)$$

$V_{IH}$  เกิดขึ้นเมื่อ  $V_{in} = V_{IH}$ , เอ็นมอส ทรานซิสเตอร์จะไม่อิมิตัวขณะที่ พีมอส อิมิตัว สมการกระแสจุดนี้ คือ

$$\frac{\beta_n}{2} \left[ 2(V_{IH} - V_{Tn})V_{out} - V_{out}^2 \right] = \frac{\beta_p}{2} (V_{DD} - V_{IH} - |V_{Tp}|)^2 \quad (2.1 - 16)$$

VTC derivative หาค่าโดย

$$\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = \frac{\left(\frac{dI_{Dp}}{dV_{in}}\right) - \left(\frac{\partial I_{Dn}}{\partial V_{in}}\right)}{\frac{\partial I_{Dn}}{\partial V_{out}}} = -1 \quad (2.1 - 17)$$

จะได้

$$V_{IH} \left(1 + \frac{\beta_p}{\beta_n}\right) = 2V_{out} + V_{Tn} + \frac{\beta_p}{\beta_n} (V_{DD} - |V_{Tp}|) \quad (2.1 - 18)$$

รวมสมการ (2.1 - 16) และ สมการ (2.1 - 18) ในฟอร์มของ ควอเทคราติก สำหรับ  $V_{IH}$  หาค่าโดย ใช้ สเตนดาร์ด เทคนิก

$V_{th}$  คือ อินเวอร์เตอร์ เทรชโฮล โวลท์เตจ ( Inverter Threshold Voltage )  $V_{th} = V_{in} = V_{out}$  เกิดขึ้นเมื่อ ทั้ง พีมอส และ เอ็นมอสอิมิตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $\frac{\beta_n}{2} (V_{th} - V_{Tn})^2 = \frac{\beta_p}{2} (V_{DD} - V_{th} - |V_{Tp}|)^2$  ให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.1 - 19)  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$V_{th} = \frac{V_{Tn} + \sqrt{\beta_p / \beta_n} (V_{DD} - |V_{Tp}|)}{1 + \sqrt{\beta_p / \beta_n}} \quad (2.1 - 20)$$

ซีมอสอินเวอร์เตอร์ จะให้เอาต์พุต  $V_{OH} = V_{DD}$  และ  $V_{OL} = 0$  [V] เว้นเสียแต่ว่าเกิดกระแสรั่ว (Leakage Current) ในการออกแบบ จะไม่คำนึงถึงค่านี้ ในการออกแบบเบื้องต้นเราต้องเข้าไปเกี่ยวข้องกับ  $V_{th}$  ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (2.1 - 20) และพารามิเตอร์  $\beta_n$  และ  $\beta_p$

$$\frac{\beta_p}{\beta_n} = \frac{\mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_p}{\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_n} \quad (2.1 - 21)$$

เมื่อกำหนดให้  $C_{ox}$  มีค่าเท่ากันทั้งสองตัว (เกตออกไซด์ เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน)

$$\sqrt{\frac{\beta_n}{\beta_p}} = \frac{(V_{DD} - V_{th} - |V_{Tp}|)}{V_{th} - V_{Tn}} \quad (2.1 - 22)$$

อินเวอร์เตอร์ในอุดมคติ มี  $V_{th} = V_{DD}/2$  โดยใช้ค่าในสมการ (2.1 - 22) จะได้

$$\frac{\left(\frac{W}{L}\right)_p}{\left(\frac{W}{L}\right)_n} = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (2.1 - 23)$$

โดยปกติ  $\mu_n / \mu_p \cong 2.5$  พื้นที่เล็กที่สุดของ ซีมอส อินเวอร์เตอร์ จะให้  $(W/L)_n \cong 1$  และ  $(W/L)_p \cong 2.5$

$V_{IL}$  สามารถหาได้โดยสมการ (2.1 - 15) อยู่ในรูป

$$V_{out} = V_{IL} + (1/2)V_{DD} \quad (2.1 - 24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะแทนในสมการ (2.1 - 13) ได้ แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{IL} = \frac{1}{4} \left( V_{Tn} + \frac{3}{2} V_{DD} \right) \quad (2.1 - 25)$$

และระดับอินพุตไฮก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน คือ

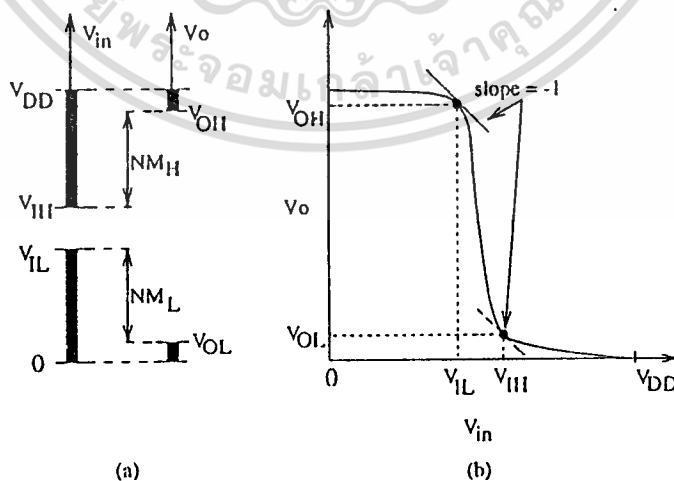
$$V_{IH} = \frac{1}{4} \left( \frac{5}{2} V_{DD} - V_{Tn} \right) \quad (2.1 - 26)$$

$$V_{IL} + V_{IH} = V_{DD} \quad (2.1 - 27)$$

ถึงแม้ว่าค่า  $V_{IL}$  และ  $V_{IH}$  จะขึ้นอยู่กับ เพาเวอร์ ซัพพลาย สมการ (2.1 - 28) แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของ CMOS VTC จะเปลี่ยนแปลงไปกับการเลือกค่า  $V_{DD}$  ดังนั้นวงจร ซิมอส สามารถทำงานได้ในย่านกว้าง ๆ ของค่า เพาเวอร์ ซัพพลาย ค่าเพาเวอร์ ซัพพลายต่ำสุด คือ  $V_{DD} = (V_{Tn} + |V_{Tp}|) = 2 V_{Tn}$  อย่างไรก็ตาม ค่า  $V_{DD} = 3 V_{Tn}$  ก็ค่าที่นำไปใช้ได้จริง ๆ มากกว่า และค่า  $V_{DD}$  สูงสุดจะขึ้นอยู่กับ เบนคควาน์โวลท์เตจ ของ เคนน - ซอส

### 2.1.2 Noise margins

Noise margin คือพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ logic ซึ่งมันจะเป็นตัวที่จะบอกให้รู้ว่าจะใช้แรงดันอินพุตเท่าไรที่จะไม่ทำให้เกิดผลกระทบกับแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 2.3 Noise margin Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งมิอาจเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
สามารถกำหนดระดับ logic ที่อินพุตได้โดย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม ผู้ใช้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Logic 0 : เมื่อ  $0 \leq V_{in} \leq V_{IL}$
- Logic 1 : เมื่อ  $V_{IH} \leq V_{in} \leq V_{DD}$

และที่เข้าที่พุด

- Logic 0 : เมื่อ  $0 \leq V_o \leq V_{OL}$
- Logic 1 : เมื่อ  $V_{OH} \leq V_o \leq V_{DD}$

นิยามของ Low noise margin คือ

$$NM_L = |V_{IL} - V_{OL}| \quad (2.1 - 28)$$

$$NM_H = |V_{OH} - V_{IH}| \quad (2.1 - 29)$$

ระดับแรงดัน  $V_{IL}$  และ  $V_{IH}$  สามารถกำหนดได้จากจุดที่ความชัน(Slope) ของ DC transfer characteristic มีค่าเท่ากับ -1

$$\frac{dV_o}{dV_{in}} = -1 \quad (2.1 - 30)$$

สำหรับวงจรมอส ระดับแรงดันเอาต์พุตสามารถกำหนดให้  $V_{OH} = V_{DD}$  และ  $V_{OL} = 0$  ได้

### 2.1.3 ซีมอส ทรานแซิล เรตปอนด์

พิจารณา คิสซาร์จ ไทม์,  $t_{HL}$  เมื่อ  $V_{in} = V_{OH}$  เอ็นมอส ทรานซิสเตอร์จะอยู่ในภาวะ ออน ในขณะที่ พีมอส ออฟ แสคดั่งในรูป 2.4 ช่วงเวลา  $t_{HL}$  สามารถพิจารณาได้จากการ คิสซาร์จ ของ  $C_{out}$  ผ่าน เอ็นมอส ดังรูปที่ 2.4 (a)

$V_i$  ถึง  $V_o$  มันก็คือช่วงของแรงดัน  $V_{out}$  ที่ 90% และ 10% ตามลำดับ



$$t_{HL} = \tau_n \left\{ \frac{2V_{Tn}}{(V_1 - V_{Tn})} + \ln \left[ \frac{V_1 - V_{Tn}}{V_o} - 1 \right] \right\} \quad (2.1 - 31)$$

เมื่อ

$$\tau_n = \frac{C_{out}}{\beta_n (V_1 - V_{Tn})} \quad (2.1 - 32)$$

การคำนวณช่วงเวลาขาขึ้น ( rise time ),  $t_{HL}$  นั้น ขณะที่  $V_{in} = V_{OL} = 0 [V]$  พีมอสทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสภาวะ ออฟ หรืออาจจะมองได้ว่า  $C_{out}$  ชาร์จประจุผ่านทางพีมอสทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (b) เพราะว่า  $t_{LH}$  สามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการ ( 2.1 - 32 ) จะเห็นได้ว่าในรูป 2.4 (b) ทิศทางการชาร์จประจุจะกลับทิศกับรูป 2.4 (a) ดังนั้น  $t_{LH}$  ก็จะมีรูปแบบเดียวกับ  $t_{HL}$  ในสมการ ( 2.1 - 31 ) โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเอ็นมอสเป็นพีมอสเท่านั้น ดังนี้

$V_{Tn} \rightarrow |V_{Tp}|$  และ  $\beta_n \rightarrow \beta_p$  จะได้

$$t_{LH} = \tau_p \left\{ \frac{2|V_{Tp}|}{(V_1 - |V_{Tp}|)} + \ln \left[ \frac{2(V_1 - |V_{Tp}|)}{V_o} - 1 \right] \right\} \quad (2.1 - 33)$$

จะทำให้ได้ แมกซ์ิมัม สวิตซิง ฟรีควเन्ซี,  $f_{max} = \frac{1}{t_{HL} + t_{LH}}$  (2.1 - 34)

เมื่อ พีมอส ไลน์ คอนสแตนท์ คำนวณได้จาก

$$\tau_p = \frac{C_{out}}{\beta_p (V_1 - |V_{Tp}|)} \quad (2.1 - 35)$$

ถ้าต้องการออกแบบในห้วงจรซิมอสมีคุณสมบัติ Symmetrical switching ก็ต้องกำหนดให้  $\beta_n = \beta_p$

และ  $V_{Tn} = |V_{Tp}|$  จะทำให้ได้  $t_{LH} = t_{HL}$

propagation delay time ของ ซิมอส อินเวอร์เตอร์ สามารถคำนวณได้โดยวิธีคล้าย ๆ กัน

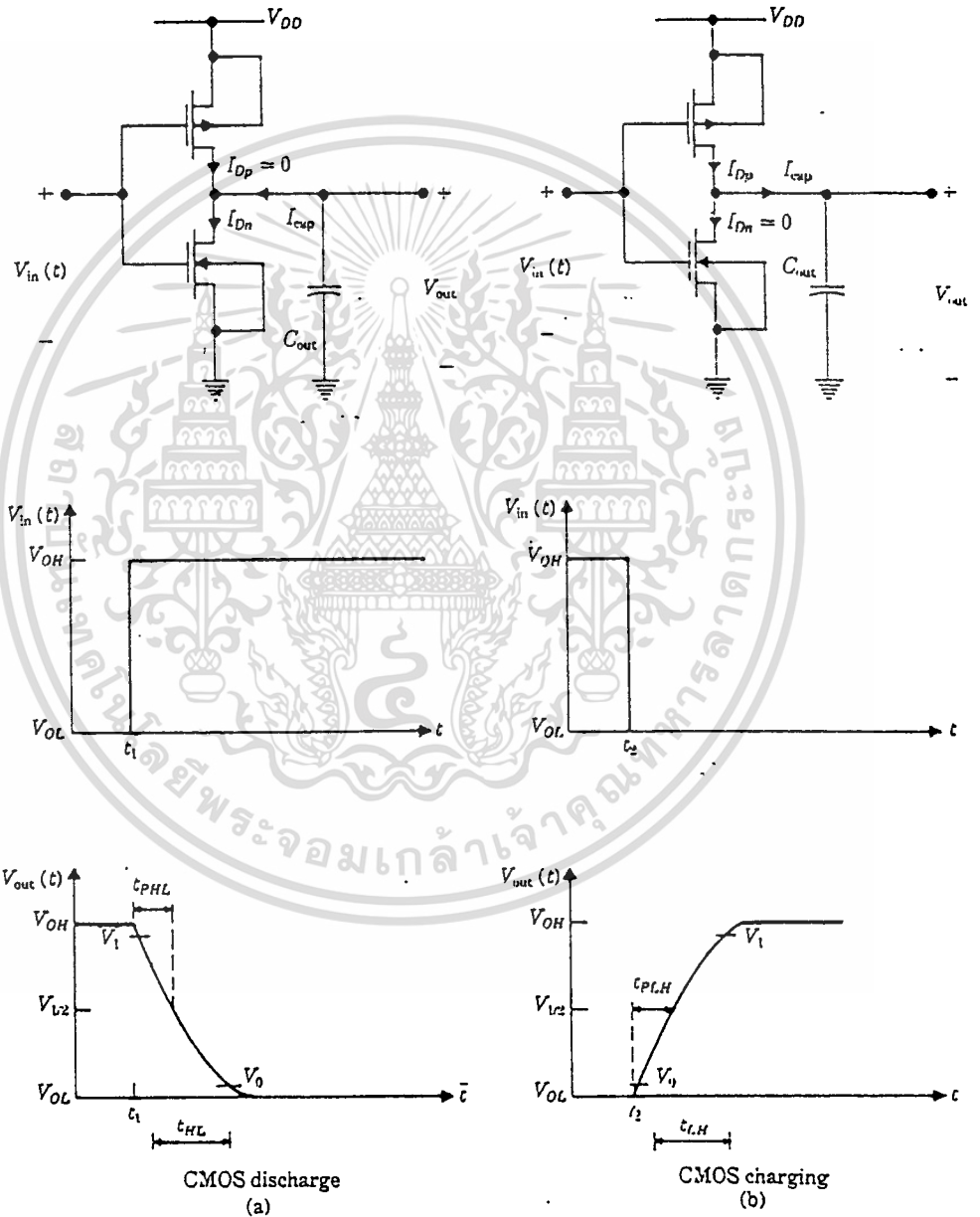
คือ อันดับแรก ,  $t_{PHL}$  สามารถหาได้โดยตรงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสเป็นไปได้

$$t_{PHL} = \tau_n \left\{ \frac{2V_{Tn}}{(V_{OH} - V_{Tn})} + \ln \left[ \frac{4(V_{OH} - V_{Tn})}{(V_{OH} + V_{OL})} - 1 \right] \right\} \quad (2.1 -36)$$

การหา  $t_{PLH}$  ก็เช่นเดียวกัน ก็ให้เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ เอ็นมอส เป็น พีมอส ดังนี้



รูปที่ 2.4 CMOS transient analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_{PLH} = \tau_p \left\{ \frac{2|V_{Tp}|}{(V_{OH} - |V_{Tp}|)} + \ln \left[ \frac{4(V_{OH} - V_{Tn})}{(V_{OH} + V_{OL})} - 1 \right] \right\} \quad (2.1 - 37)$$

ค่าเฉลี่ยของ propagation delay time คือ

$$t_p = \frac{1}{2}(t_{PHL} + t_{PLH}) \quad (2.1 - 38)$$

ถ้า ซีมอส อินเวอร์เตอร์ถูกออกแบบให้  $\beta_n = \beta_p$  และ  $V_{Tn} = |V_{Tp}|$  ดังนั้น  $t_{PHL} = t_{PLH}$  และ

$$t_p = \tau_n \left\{ \frac{2V_{Tn}}{(V_{DD} - V_T)} + \ln \left[ \frac{4(V_{DD} - V_T)}{V_{DD}} - 1 \right] \right\} \quad (2.1 - 39)$$

## 2.2 วงจรพื้นฐานแบบซีมอส

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรพื้นฐานแบบซีมอส ซึ่งวงจรพื้นฐานในที่นี้คือวงจรแนนเกต และ นอเกต เพราะว่าวงจรเหล่านี้จะสามารถประกอบเป็นวงจรดิจิทัลขนาดใหญ่มาก โดยจะขอแยกกล่าววงจรเกตแต่ละตัวดังต่อไปนี้

### 2.2.1 แนนเกตของอินพุท

ในการวิเคราะห์วงจรแนนเกต และนอเกต ซึ่งจะกล่าวต่อไป เรายังอาศัยหลักการวิเคราะห์ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์ คือในส่วนคุณสมบัติทางไฟตรง เราจะพิจารณาที่ค่า แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{th}$ ) ของวงจร และในส่วนสวิชชิง เราอาศัยค่าตัวเก็บประจุที่เป็นองค์ประกอบในวงจรมาทำการวิเคราะห์ และใช้กฎการออกแบบ เพื่อพยายามให้มีพื้นที่น้อย ๆ ในส่วนต่าง ๆ ให้มากที่สุด

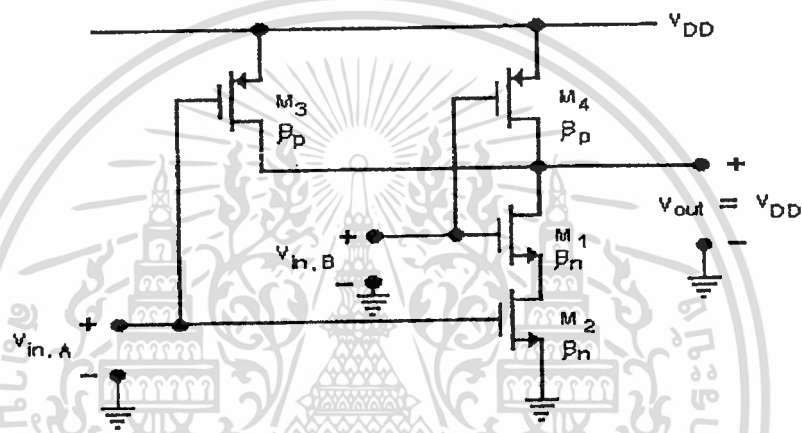
วงจรซีมอสแนนเกตสองอินพุท แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (ก) มีเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ M3 , M4 ต่อขนานกันอยู่ โดยอินพุททั้งสอง เกิดจากการเชื่อมระหว่างเอ็นมอส และ พีมอส M4 กับ M1 และ M3 กับ M2 เมื่ออินพุท A , B มีสถานะสูงที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยง เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ M1 และ M2 จะทำงาน ส่วน พีมอสทรานซิสเตอร์ M3 และ M4 จะคัทออฟ เอาท์พุทในขณะนี้จึงมีสถานะต่ำที่ระดับแรงดันอ้างอิง เมื่ออินพุท A มีสถานะสูง อินพุท B มีสถานะต่ำ ทำให้เอ็นมอส M2 และ พีมอส M4 ทำงาน และ เอ็นมอส M1 และ พีมอส M3 จะคัทออฟทำให้เอาท์พุทมีสถานะสูง ในทางกลับกันเมื่ออินพุท A มีสถานะต่ำ B มีสถานะสูง เอ็นมอส M1 และพีมอส M3 จะทำงาน เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

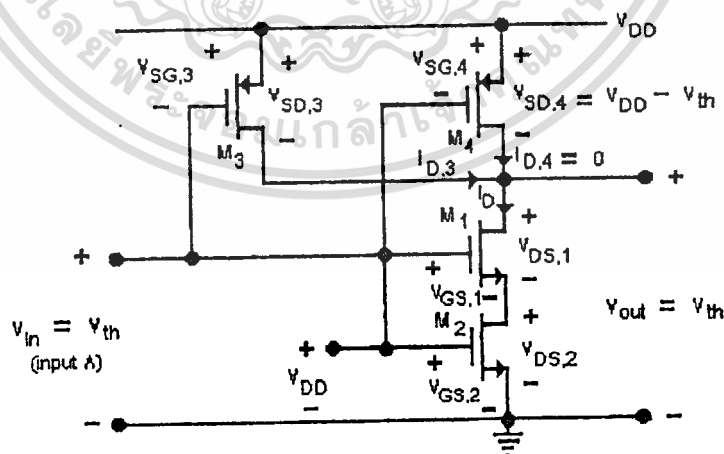
มอส M2 กับพีมอส M4 จะคัทออฟที่ยังคงให้เอาท์พุทสถานะสูงเช่นเดิมในกรณีที่อินพุท A และ B มีสถานะต่ำ เอ็นมอส M1, M2 จะคัทออฟ ส่วนพีมอส M3, M4 จะทำงานให้เอาท์พุทสถานะสูง

ในการวิเคราะห์หาสมการค่า  $V_{th}$  เพื่อใช้ในการออกแบบคุณสมบัติทางไฟตรง ในที่นี้เราจะพิจารณาที่อินพุท A และ B ต่อซ้อตกันเป็นการสวิชชิ่งที่พร้อมกัน ( simultaneous switching ) การหาค่าแรงดัน  $V_{th}$  คำนวณได้จากรูปที่ 2.5 แรงดันเกต - ซอสของเอ็นมอส

$$V_{GS,1} = V_{th} - V_{DS,2}, V_{GS,2} = V_{th} \quad (2.2 - 1)$$



ก. วงจรซีมอสเกตสองอินพุท



ข. วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์

รูปที่ 2.5 วงจรซีมอสเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก KVL

$$V_{th} = V_{DS,1} + V_{DS,2} \quad (2.2 - 2)$$

แทนค่า (2.1 - 2) ลงใน (2.2 - 1)

$$V_{GS,1} = V_{DS,1}$$

แสดงว่ามอสเฟต M1 ทำงานในช่วงอิ่มตัว จะได้สมการที่ไม่คิดผลของบอดีเอฟเฟก (Body effect)

$$I_D = \frac{\beta_n}{2} (V_{th} - V_{T_{on}} - V_{DS,2})^2 \quad (2.2 - 3)$$

มอสเฟตตัวที่สอง M2  $V_{GS,2} > V_{GS,1}$  ดังนั้นจะทำงานช่วงเชิงเส้น

$$I_D = \frac{\beta_n}{2} [2(V_{th} - V_{T_{on}})V_{DS,2} - V_{DS,2}^2] \quad (2.2 - 4)$$

จาก (2.2 - 3) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$V_{DS,2} = (V_{th} - V_{T_{on}}) - \sqrt{\frac{2I_D}{\beta_n}} \quad (2.2 - 5)$$

แทนค่าลงในสมการ (2.2 - 4) จะได้

$$V_{th} - V_{T_{on}} = 2\sqrt{\frac{I_D}{\beta_n}} \quad (2.2 - 6)$$

เช่นเดียวกันในกรณีที่มีมอสจะได้

$$V_{GS,3} = V_{GS,4} = (V_{DD} - V_{th}) \quad (2.2 - 7)$$

เพราะว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{SD,3} = V_{SD,4} = (V_{DD} - V_{th}) \quad (2.2 - 8)$$

ทั้ง M3 และ M4 ทำงานช่วงอิมิต์ทั้งคู่และมีกระแสทรานไฮลเท่ากัน ดังนั้นกระแสทั้งหมดที่ไหลในวงจรจะได้

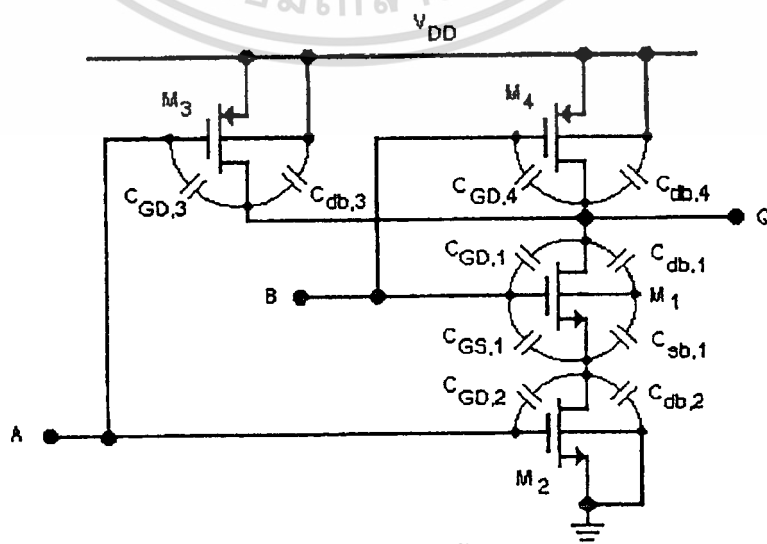
$$\begin{aligned} I_D &= I_{D,3} + I_{D,4} \\ &= \beta_p (V_{DD} - V_{th} - |V_{Tnp}|)^2 \end{aligned} \quad (2.2 - 9)$$

แทนค่า (2.2 - 9) ลงใน (2.2 - 6) จัดรูปจะได้

$$V_{th} = \frac{V_{Tnp} + 2\sqrt{\frac{\beta_p}{\beta_n}}(V_{DD} - |V_{Tnp}|)}{1 + 2\sqrt{\frac{\beta_p}{\beta_n}}} \quad (2.2 - 10)$$

สมการ (2.2 - 10) จะใช้ในการออกแบบคุณสมบัติทางไฟตรง เพื่อกำหนดอัตราส่วน ( $W/L$ ) ของเอ็นมอส และ พีมอสในวงจร

สำหรับค่าตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจรถูกแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 แยกได้เป็นค่าตัวเก็บประจุในส่วนเกทออกไซด์ซึ่งได้แก่  $C_{GD3}, C_{GD4}, C_{GD1}, C_{GS1}$  และ  $C_{GD2}$  ค่าตัวเก็บประจุในส่วนดีฟลิชันได้แก่  $C_{db4}, C_{db3}, C_{db}, C_{sb1}$  และ  $C_{db2}$  นอกจากนี้ยังมี ค่าตัวเก็บประจุที่เกิดจาก สวดลายอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า ดังนั้นสามารถหาค่า  $C_{ox}$  ได้เป็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.6 แสดงค่าตัวเก็บประจุในวงจรถูกแสดง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{out} = C_{GD3} + C_{GD4} + C_{GD1} + C_{GS1} + C_{GD2} + K(V_{OH}, V_{OL}) (C_{db1} + C_{sb1} + C_{db2} + C_{db4}) + C_{line}$$

### 2.2.2 นอเกตสองอินพุท

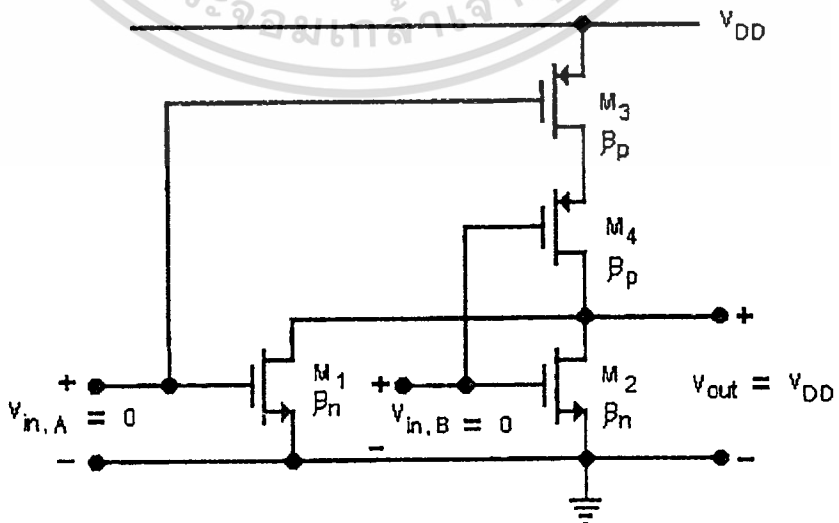
วงจรมนเกตสองอินพุทแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งหลักการทํางานก็ใช้ลักษณะคล้ายกันกับวงจรมนเกต ประกอบด้วยเอ็นมอส M1, M2 ต่อขนานกันอยู่และพีมอสทรานซิสเตอร์ M3, M4 ต่ออนุกรมกันอยู่ ด้วยหลักการที่สภาวะการทํางานของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ และพีมอสทรานซิสเตอร์ ทํางานในลักษณะคัทออฟ และนำกระแสในช่วงแอกทีฟ และอิมิตัว ในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ได้เอาต์พุทมีสถานะสูงเมื่ออินพุท A และ B เป็นสถานะต่ำทั้งคู่ นอกจากนี้แล้วจะทำให้สถานะเอาต์พุทมีค่าสถานะต่ำทั้งหมด

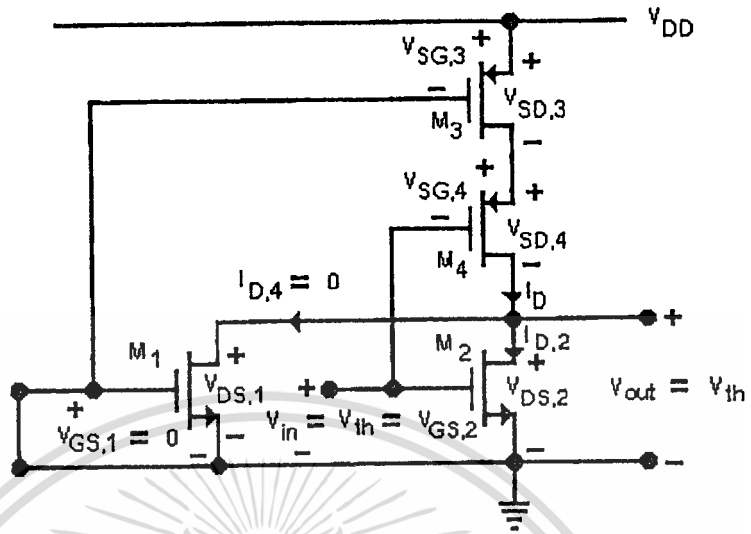
ในการวิเคราะห์เพื่อหาสมการในการออกแบบคุณสมบัติทางไฟตรง ในที่นี้จะพิจารณากรณีที่อินพุท A และ B ต่อซ้อกันเป็นแบบการสวิตช์ที่พร้อมกัน ( simultaneous switching ) การหาค่าแรงดัน  $V_{th}$  ของวงจรมนเกต คำนวณได้จากรูปที่ 2.8 แรงดันเกต-ซอสของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์

$$V_{GS,1} = V_{GS,2} = V_{th} = V_{DS,1} = V_{DS,2} \quad (2.1 - 11)$$

มอส ทั้งสองตัว ทํางานช่วงอิมิตัว กระแสเดรนทั้งหมดมีค่า

$$I_D = I_{D1} + I_{D2} = \beta_n (V_{th} - V_{Tn})^2 \quad (2.2 - 12)$$





ข. วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์

รูปที่ 2.7 แสดงวงจรนอกรูปแบบซิมอส

สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$V_{th} - V_{Tn} = \sqrt{\frac{I_D}{\beta_n}} \quad (2.2 - 13)$$

กรณีที่มีมอส พิจารณาที่แรงดันขอส-เกต

$$\begin{aligned} V_{SG,3} &= V_{DD} - V_{th}, \\ V_{SG,4} &= V_{DD} - V_{th} - V_{SD,3} \end{aligned} \quad (2.2 - 14)$$

KVL ที่เอาท์พุทจะได้ว่า

$$V_{DD} - V_{th} = V_{SD,3} + V_{SD,4} \quad (2.2 - 15)$$

แสดงว่า M3 ทำงานช่วงเชิงเส้น ขณะที่ M4 ทำงานช่วงอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 I_D &= \frac{\beta_n}{2} \left[ 2(V_{DD} - V_{th} - |V_{Tnp}|)V_{SD3} - V_{SD3}^2 \right] \\
 &= \frac{\beta_p}{2} (V_{DD} - V_{th} - |V_{Tnp}| - V_{SD3})^2
 \end{aligned} \tag{2.2-16}$$

แทนค่า (2.2-14) ลงใน (2.2-17)

$$\sqrt{\frac{2I_D}{\beta_p}} = V_{DD} - V_{th} - |V_{Tnp}| \tag{2.2-17}$$

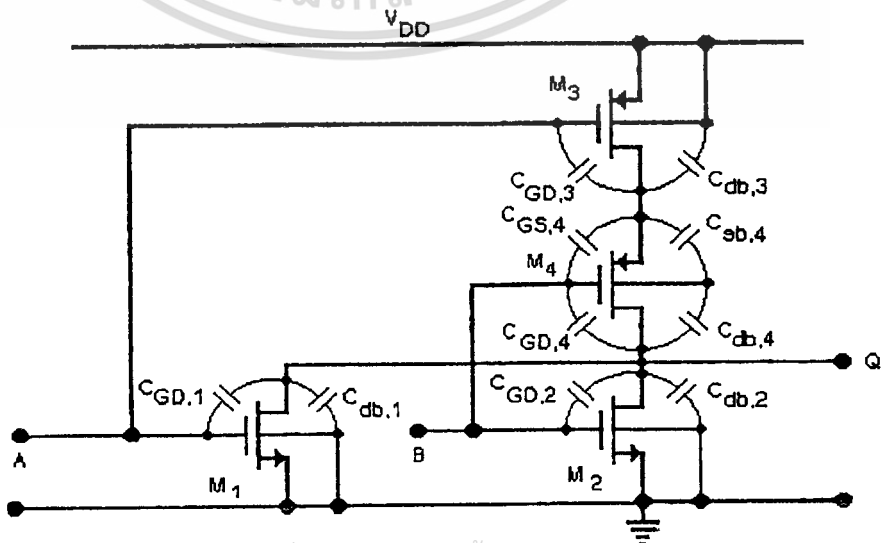
แทนค่าลงใน (2.2-3) จะได้

$$V_{th} = \frac{V_{Tnp} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta_p}{\beta_n}} (V_{DD} - |V_{Tnp}|)}{1 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta_p}{\beta_n}}} \tag{2.2-18}$$

สมการ (2.2-18) จะใช้เป็นสมการในการกำหนด  $V_{th}$  ของวงจรมอเกตในคุณสมบัติทางไฟตรง

ค่าตัวเก็บประจุในวงจรมอเกตแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ค่าตัวเก็บประจุในส่วนเกทมีค่า  $C_{GD1}, C_{GD3}, C_{GD4}, C_{GS4}$  และ  $C_{GD2}$  ค่าตัวเก็บประจุในส่วนของดีฟลิชัน ประกอบด้วย  $C_{db3}, C_{db4}, C_{sb4}, C_{db2}$  และ  $C_{db1}$  นอกจากนี้ตัวเก็บประจุในส่วนของการเชื่อมต่อภายใน และส่วนขั้วในการบอนด์ สัญญาณ กับตัวถัง เราสามารถสรุปเป็นค่า ของวงจรมอเกตได้

$$C_{out} = C_{GD1} + C_{GD3} + C_{GD4} + C_{GS4} + K(V_{OL}, V_{OH})(C_{db3} + C_{sb4} + C_{db2} + C_{db4} + C_{db1}) + C_{line}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.8 แสดงค่าตัวเก็บประจุในวงจรมอเกต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### แนวทางการออกแบบและการสร้างกระจกกันเบส

ในการออกแบบ สิ่งที่สำคัญ นอกจากการศึกษาทำความเข้าใจ ทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ต้องการจะออกแบบแล้ว สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เราจำเป็นต้องทราบถึงข้อจำกัดในการออกแบบและการสร้าง ซึ่งห้องปฏิบัติการแต่ละแห่งจะมีเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน เช่น ในโครงการนี้ จะทำการออกแบบ และสร้าง ซิมอส โดยจะเริ่มตั้งแต่ อินเวอร์เตอร์, แมนด์เกท และ นอร์เกท ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีข้อจำกัดต่าง ๆ ดังจะ ได้กล่าวต่อไป

#### 3.1 ข้อกำหนดในการออกแบบ

กฎการออกแบบคือ ชุดของข้อกำหนดสำหรับลวดลายของมาสก์ ( mask ) ซึ่งจะมีข้อมูลเกี่ยวกับรูปร่างทางเรขาคณิต อย่างเช่น ค่าความกว้างที่สุดในลวดลาย ค่าระยะห่างที่น้อยที่สุดสำหรับในแต่ละมาสก์ กฎการออกแบบจะเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบลวดลายของวงจรรวม ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ได้มาจากการวิเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการสร้าง ในกระบวนการสร้างหรือเทคโนโลยีที่แตกต่างกันก็จะมีกฎการออกแบบที่แตกต่างกัน สำหรับกฎการออกแบบในที่นี้ได้จากเทคโนโลยีการสร้างซิมอสในบทที่ 4 รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของลวดลายด้านบนของซิมอสทรานซิสเตอร์ แสดงให้เห็นส่วนของชั้นต่าง ๆ ตามเส้นที่แตกต่างกัน และสำหรับกฎการออกแบบของซิมอส สรุปได้ดังในตารางที่ 3.1 ซึ่งจะใช้ในการออกแบบลวดลายวงจรทั้งหมด ในตอนต่อไป

#### ตารางที่ 3.1

##### ข้อกำหนดการออกแบบซิมอส

##### ก) มาร์คพื้นที่ส่วนทรานซิสเตอร์

- |  |                       |
|--|-----------------------|
| 1) ค่าในส่วนที่แพร์สารเจือเล็กที่สุด         | 40 × 20 $\mu\text{m}$ |
| 2) ค่าน้อยที่สุดระหว่างพื้นที่การแพร์สารเจือ | 20 $\mu\text{m}$      |

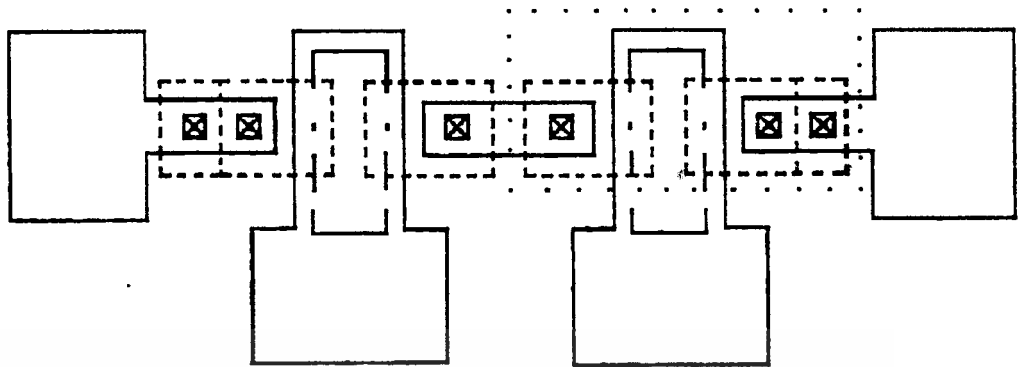
##### ข) มาร์คเกท

- |  |                       |
|--|-----------------------|
| 1) พื้นที่เล็กที่สุด                   | 20 × 40 $\mu\text{m}$ |
| 2) ระยะระหว่างเกทในกรณีที่มีเกทหลายเกท | 10 $\mu\text{m}$      |

##### ค) มาส์กคอนแทค

- |                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| 1) พื้นที่น้อยที่สุด | 20 × 20 $\mu\text{m}$ |
|----------------------|-----------------------|

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



..... Well diffusion  
 - - - - - Diffusion  
 - . - . - Gate  
 ——— Metal

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างลวดลายด้านบนบนซิลิคอน

- |  |                  |
|--|------------------|
| 2) ระยะห่างระหว่างขอบคอนแทกกับขอบของบริเวณแพร่สารเจือ  | 20 $\mu\text{m}$ |
| 3) ระยะห่างระหว่างขอบคอนแทกกับเกต                      | 20 $\mu\text{m}$ |
| ง) มาตรฐาน อะลูมิเนียม                                 |                  |
| 1) ค่าความกว้างน้อยสุด                                 | 40 $\mu\text{m}$ |
| 2) ค่าระยะห่างน้อยสุดระหว่างอะลูมิเนียมกับอะลูมิเนียม  | 10 $\mu\text{m}$ |
| 3) ค่าระยะห่างที่น้อยที่สุดของอะลูมิเนียมซ้อนกับคอนแทก | 10 $\mu\text{m}$ |
| จ) มาตรฐานการแพร่บ่อแยก                                |                  |
| 1) ระยะน้อยที่สุดระหว่างขอบบ่อแยกชนิดเอ็นกับ p+        | 20 $\mu\text{m}$ |
| 2) ระยะน้อยที่สุดจากขอบบ่อแยกกับ p+ ข้างนอก            | 20 $\mu\text{m}$ |
| 3) ระยะน้อยที่สุดจากขอบบ่อแยกกับ n+ ข้างนอก            | 20 $\mu\text{m}$ |
| 4) ระยะน้อยที่สุดระหว่างขอบบ่อแยกกับขอบบ่อแยก          | 20 $\mu\text{m}$ |

ข้อกำหนดต่าง ๆ เหล่านี้จะมีความสำคัญมากในกรณีที่เราต้องการออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุด เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ที่สูงสุดจากสมการ (2.1 - 29) และ (2.1 - 31) จะเห็นว่า การตอบสนองต่อความถี่ขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งค่าตัวเก็บประจุนี้นั้นขึ้นอยู่กับ พื้นที่ช่องทางเดินกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สำหรับเทคโนโลยีที่ห้องปฏิบัติการใช้ในการออกแบบคือ การเขียนแบบลงบนกระดาษ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงชื่อของวิศวกรที่ตรงตามการนำไปใช้

กราฟไฟ และทำการตัดตามแบบลงบนแผ่นโพลีเอสเตอร์ โดยใช้ ไมโครคัทเตอร์ ( Microcutter ) แล้วทำการถ่าข่อยส่วน 50 เท่าจะได้กระจกต้นแบบ ส่วนเทคโนโลยีในการสร้างใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือ และบ่อแยกจะเป็นชนิด พี

### 3.2 การออกแบบมอดุทรานซิสเตอร์

ในการศึกษามอดุทรานซิสเตอร์ตัวเด็วนี้ เราต้องการที่จะศึกษาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบ ดังนั้นเราจึงใช้สมการกระแสเดรนเป็นหลักในการออกแบบ และเพื่อความสะดวกจึงขอสมการกระแสมอดุทรานซิสเตอร์มากล่าวอีกครั้งหนึ่ง

สมการกระแสมอดุทรานซิสเตอร์ช่วงไม้อิมตัว

$$V_{DS} < V_{DS,sat}$$

$$I_D = \frac{\beta}{2} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

ช่วงอิมตัว  $V_{DS} \geq V_{DS,sat}$

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

พิจารณาค่าตัวแปรในสมการคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ค่าแรงดัน  $V_{GS}$  และ  $V_{DS}$  เป็นค่าแรงดันที่เรากำหนด เมื่อนำเอามอดุทรานซิสเตอร์มาใช้งาน หรือต่อเป็นวงจร ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของวงจร ค่า  $V_{TO}$  คือ ค่าแรงดันขีดเริ่มของ มอดุทรานซิสเตอร์ โดยในที่นี้เป็นแบบเอ็นชันชันเมนท์โหมด ค่าแรงดันขีดเริ่มในกระบวนการสร้างหนึ่ง ๆ จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ตัวอย่างต่อไปนี้คือค่า  $\beta$  โดยที่

$$\beta = k' \left( \frac{W}{L} \right),$$

$$k' = \mu_n C_{ox}$$

ค่า  $\mu$  คือค่าความคล่องตัวของพาหะที่ผิว ถ้าเป็นเอ็นมอดุทรานซิสเตอร์ พาหะในที่นี้ จะหมายถึง อิเล็กตรอน และเขียนแทนด้วย  $\mu_n$  และเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ถ้าเป็นพีมอดุทรานซิสเตอร์ ค่าพาหะจะหมายถึง โฮล ( Hole ) เขียนแทนด้วย  $\mu_p$  และเป็นค่าคงที่เช่นเดียวกัน สำหรับ  $C_{ox}$  คือค่าตัวเก็บ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุในส่วนออกไซด์ที่บริเวณเกต เป็นค่าคงที่ สำหรับกระบวนการสร้างแต่ละกระบวนการสร้าง ค่าตัวแปรตัวสุดท้ายคือ ( $W/L$ ) คืออัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของช่องทางเดินกระแสในส่วนเกต

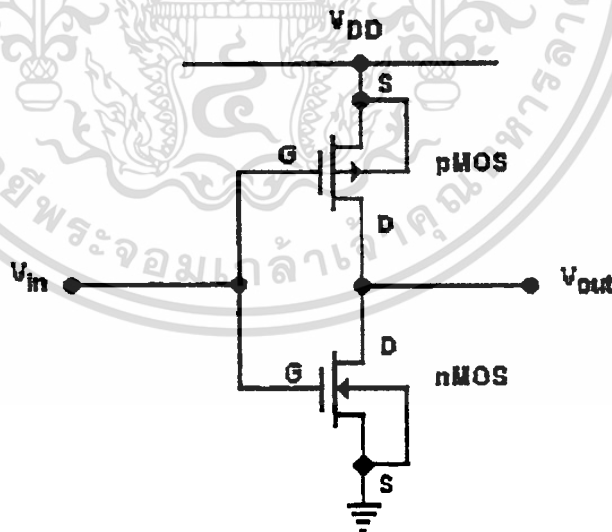
จากค่าตัวแปรทั้งหมดจะเห็นได้ว่า ในส่วนการออกแบบตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ได้คุณสมบัติ ค่ากระแส และ แรงดัน ในกระบวนการสร้างที่คงที่ อันใดอันหนึ่งคืออัตราส่วนความกว้างต่อความยาวช่องทางเดิน ( $W/L$ ) ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากก็จะได้กระแสเดรนที่มีค่ามากตามไปด้วย

### 3.3 การออกแบบซิมอส

ในการออกแบบอุปกรณ์ประเภท ซิมอสจะแตกต่างจาก มอสทรานซิสเตอร์ที่เห็นได้ชัดคือมีการรวมมอสทรานซิสเตอร์ทั้งแบบ พีมอส และ เอ็นมอส มาไว้ในวงจรเดียวกันโดยใช้บ่อ (Well) เพื่อแยกทรานซิสเตอร์ทั้งสองออกจากกัน และทำการเชื่อมต่อวงจรโดยใช้ อะลูมิเนียม

#### 3.3.1 การออกแบบซิมอสอินเวอร์เตอร์

การออกแบบซิมอสอินเวอร์เตอร์ จะทำการออกแบบโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีหลายแบบ สำหรับโครงการนี้ ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 3.2 เพื่อความสะดวก กล่าวคือจะมีการใช้ พีมอส และ เอ็นมอส ประกอบกันอย่างละ 1 ตัว

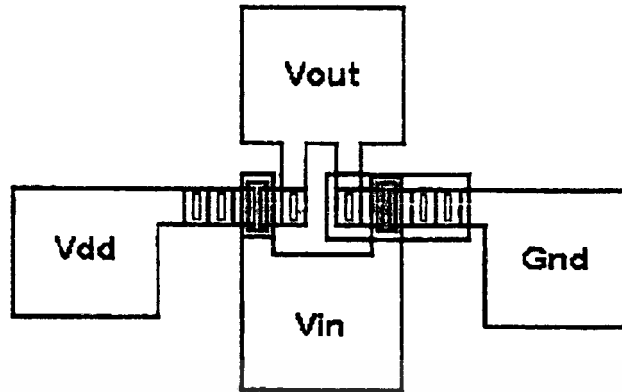


รูปที่ 3.2 วงจรซิมอสอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

ดำเนินการออกแบบโดยยึดข้อกำหนด ในข้อ 3.1 และหาความเหมาะสมในการออกแบบตาม

เทคโนโลยีที่ใช้ออกแบบและสร้าง จะได้ลวดลายวงจรของ ซิมอสอินเวอร์เตอร์ทางกายภาพ ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

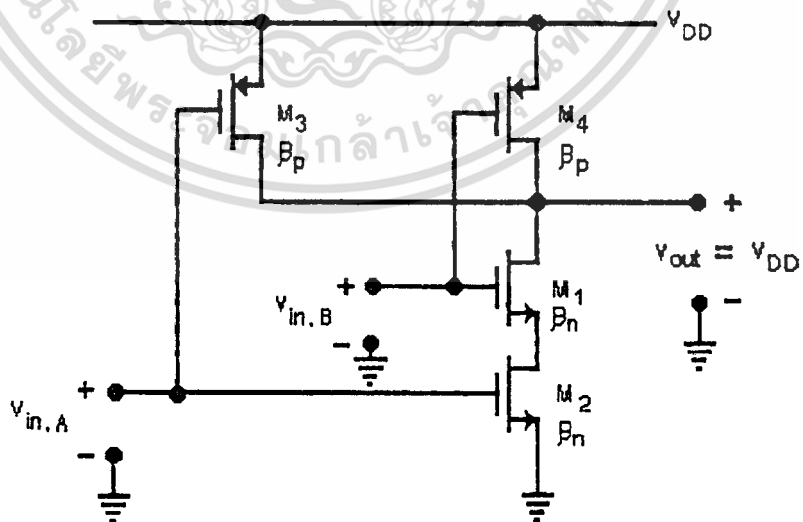
รูปที่ 3.3 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลวดลายวงจรซิมอสอินเวอร์เตอร์ทางกายภาพ

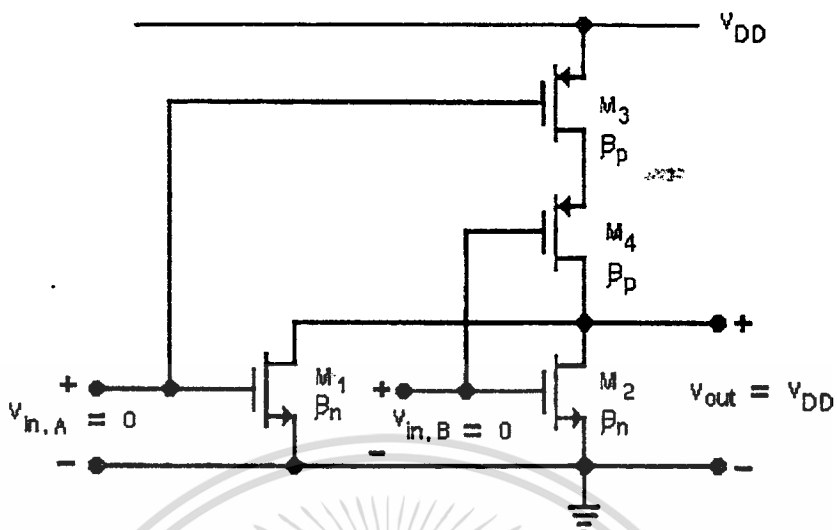
### 3.3.2 การออกแบบซิมอสแนนด์เกต และนอร์เกต

การออกแบบซิมอส แนนด์เกต และนอร์เกตที่อาศัยหลักการเดียวกันกับ ซิมอสอินเวอร์เตอร์ จะแตกต่างกันก็คือ ส่วนประกอบวงจรจะใช้ พีมอส และ เอ็นมอส เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุต โดยทำการออกแบบตามวงจรของแนนด์เกต และนอร์เกต ซึ่งก็มีอยู่หลายชนิดเช่นเดียวกัน สำหรับโครงงานนี้ เลือกใช้วงจรตามรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นวงจร แนนด์เกต และนอร์เกต 2 อินพุต ทำการออกแบบตามข้อกำหนดและวงจรในรูปที่ 3.4 จะได้ลวดลายทางกายภาพ ตามรูปที่ 3.5



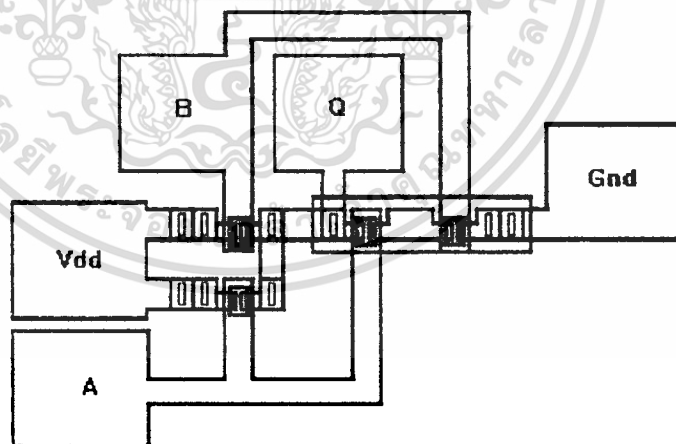
(ก) แนนด์เกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



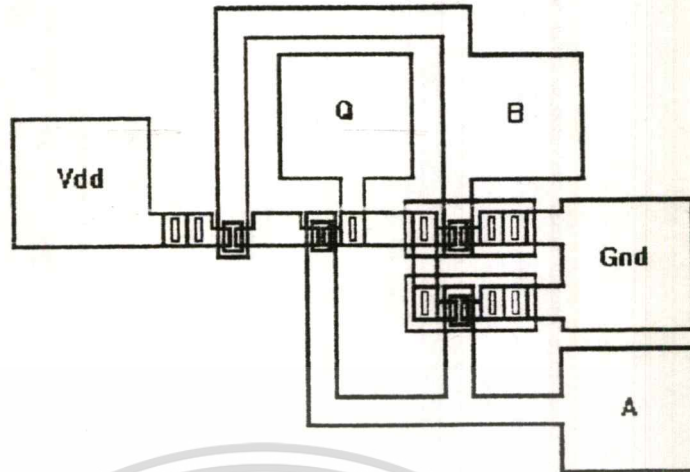
(ข) นอร์เกท

รูปที่ 3.4 วงจรแอมป์ และนอร์เกท



(ก) แอมป์เกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

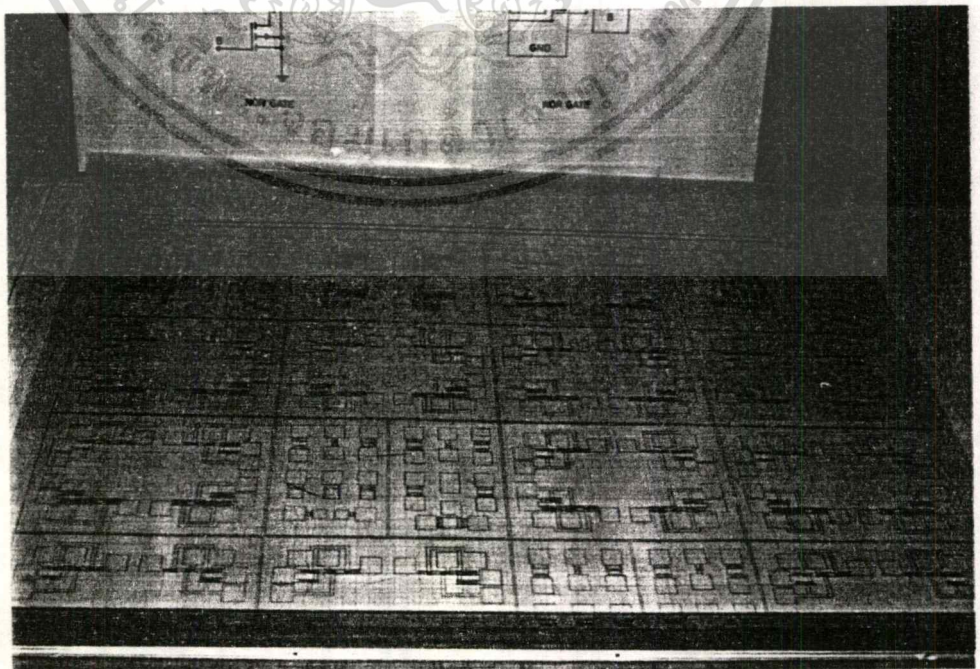


(ข) นอร์เกต

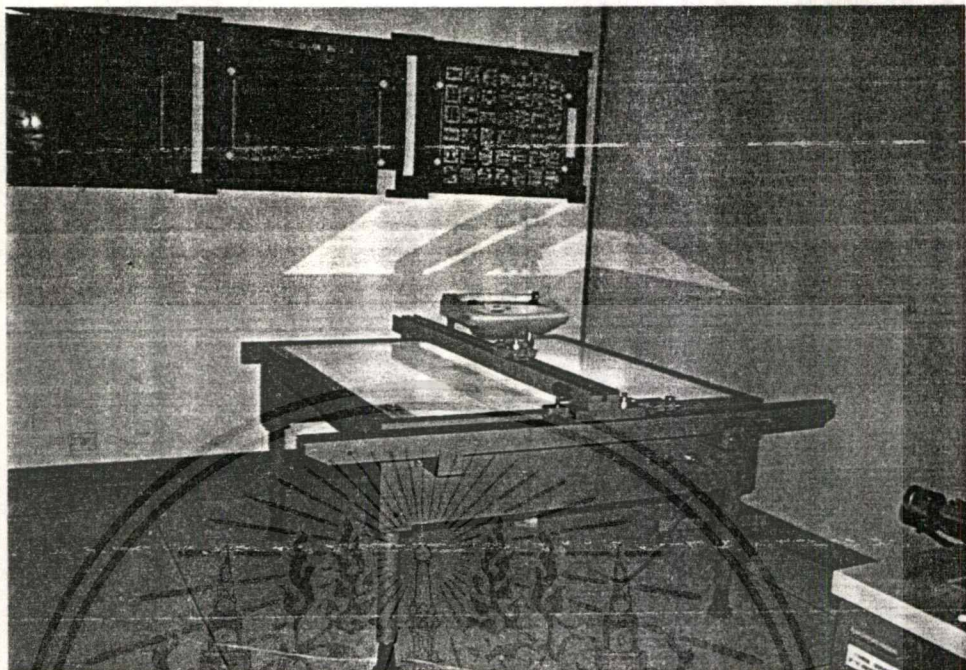
รูปที่ 3.5 ลวดลายทางกายภาพของ แมนด์เกต และนอร์เกต

### 3.4 กระบวนการสร้างกระจกต้นแบบ

ภายหลังจากทำการออกแบบและได้ลวดลายทางกายภาพที่เหมาะสมตามต้องการแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะทำการสร้างกระจกต้นแบบ โดยเริ่มจากการเขียนแบบลงบนกระดาษกราฟไข แล้วจึงนำไปวางเป็นต้นแบบบนไมโครลิทเทอร์ เพื่อทำการคัดแยกเป็นมาส์คต่าง ๆ บนแผ่นโปลิเอสเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.6 กระดาษกราฟไขต้นแบบของซิมอสแมน และนอเกต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

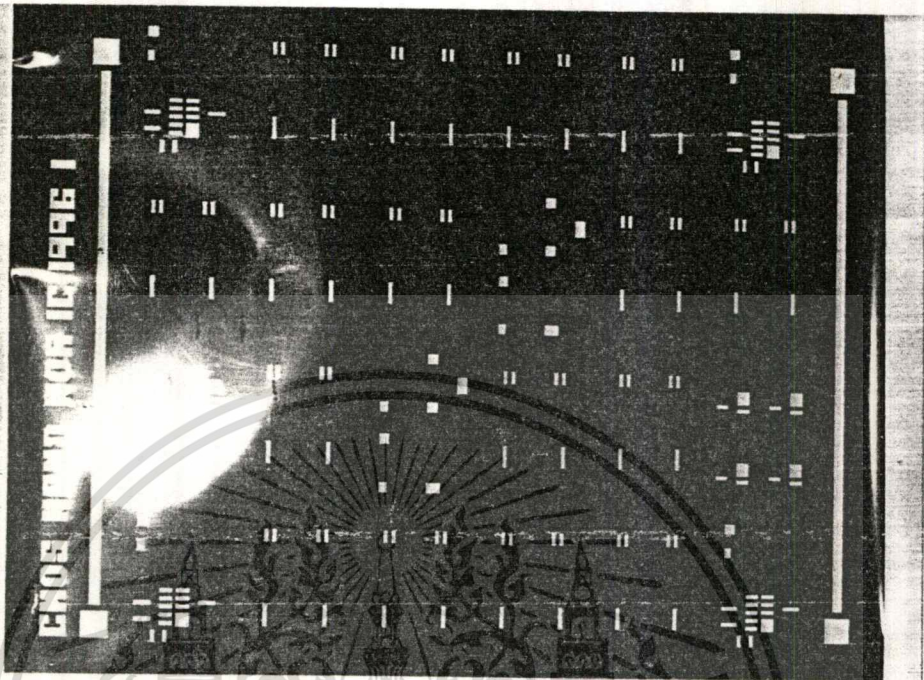


รูปที่ 3.7 เครื่องตัดแผ่นโพลีเอสเตอร์(Micro Cutter)

การนำกระดาษกราฟที่มีลวดลายของมาร์คต่างๆ ไปวางทับกับโต๊ะที่ใช้สำหรับตัดแผ่นโพลีเอสเตอร์ ในการวางจะต้องจัดกระดาษให้ได้มากกับแนวของการเลื่อนของหัวตัดทั้งทางแนวตั้งและแนวนอน เมื่อได้มากทั้งสองทางแล้วก็ตัดเทปใส เพื่อยึดกระดาษกราฟ ให้แนบสนิทกับโต๊ะให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

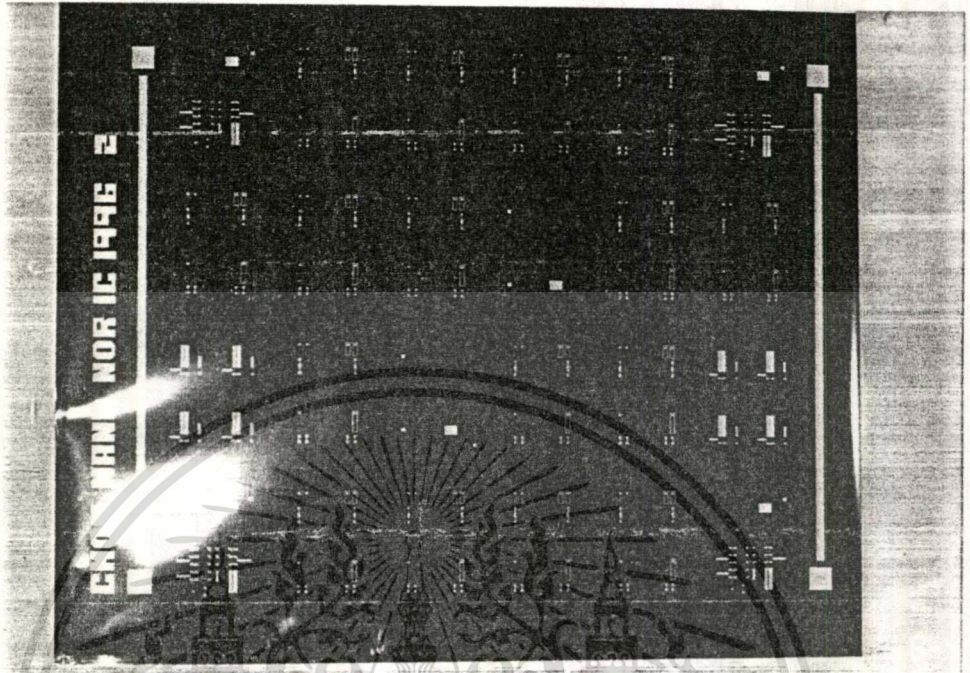
ในการตัดเทปใสต้องกระทำอย่างระมัดระวัง เพราะจะต้องคอยตรวจสอบอยู่เสมอว่ากระดาษกราฟที่นำมาติดนั้นยังก่ดตั้งมากอยู่ อีกทั้งจะต้องคอยรีดกระดาษให้เรียบสม่ำเสมอไม่มีการโค้งงอตรงส่วนใดส่วนหนึ่งของกระดาษ เพราะถ้าหากเกิดการโค้งงอแล้วจะทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมาในภายหลังได้ หลังจากติดกระดาษกราฟเรียบร้อยแล้ว จึงนำแผ่นโพลีเอสเตอร์มาวางทับไปบนกระดาษกราฟแล้วทำการติดเทปใสให้แน่นและเรียบ แผ่นโพลีเอสเตอร์ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนของการถ่ายแบบกระจกต้นแบบต่อไป

3.4.1 ทำการตัดแผ่นโพลีเอสเตอร์ตามกระดาษกราฟในมาร์คที่ 1 คือในส่วนที่จะแพร่สารเจือในส่วนของ P - Well หลังจากตัดในส่วนนี้เสร็จแล้วแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่ได้จะเป็น ดังรูปที่ 3.8



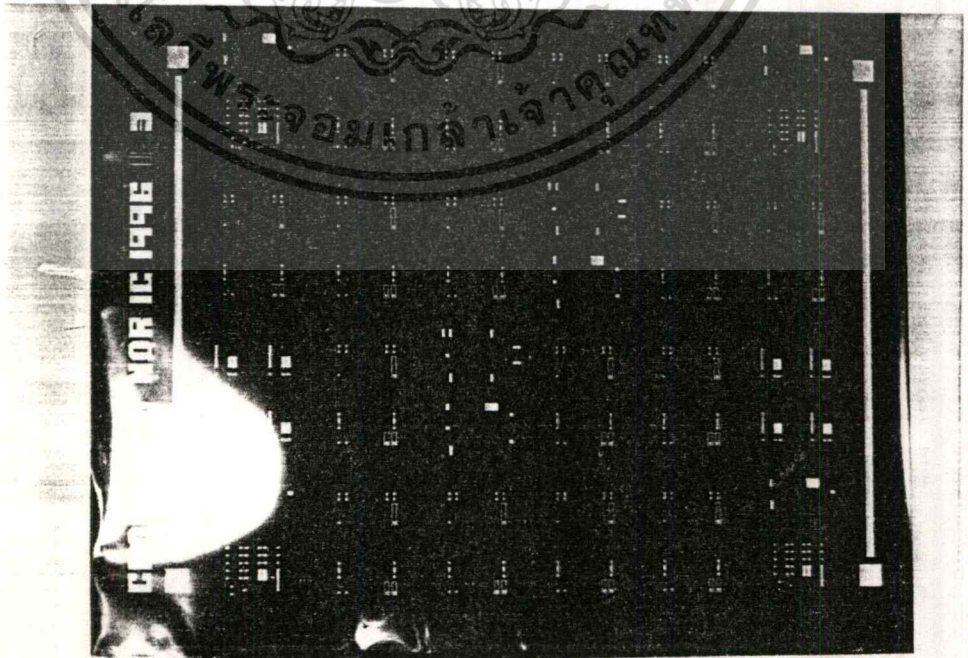
รูปที่ 3.8 แสดงภาพของแผ่นโพลีเอสเตอร์ มาร์คที่ 1 (P - Well)

3.4.2 ทำการแกะแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่ผ่านการตัดในส่วนของ P - Well ออกแล้วนำแผ่นใหม่เข้ามาติด เพื่อทำการตัดในส่วนของ มาร์คที่ 2 คือส่วนที่ต้องการแพรสารเจือชนิด  $P^+$  หลังจากตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะเป็นดังรูปที่ 3.9



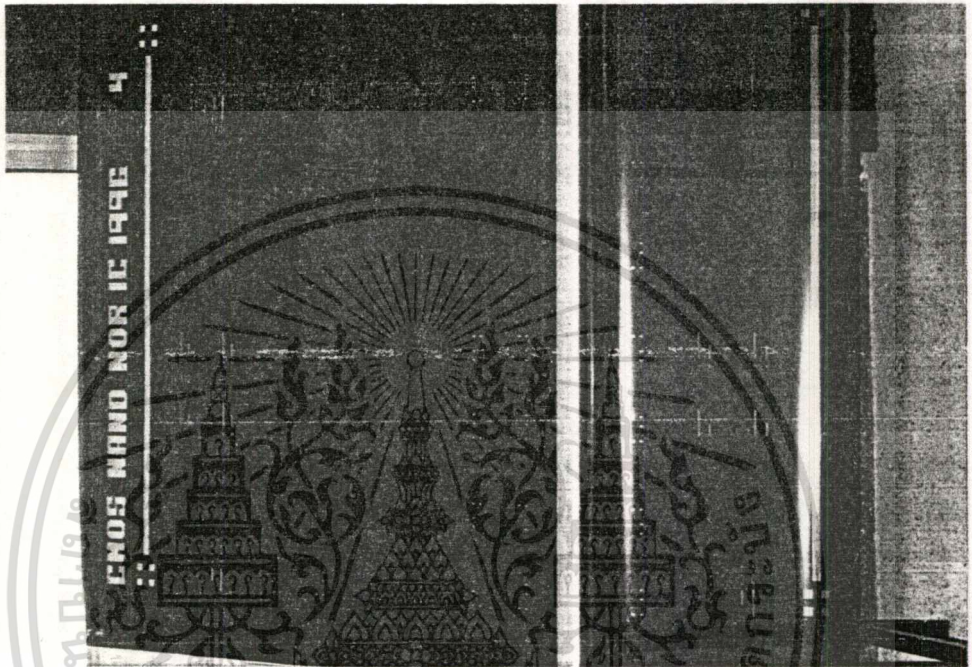
รูปที่ 3.9 แสดงภาพแผ่นโพลีเอสเตอร์มาร์คที่ 2 ( $p^+$ )

3.4.3 นำแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่ผ่านการตัดเสร็จแล้วออก หลังจากนั้นก็นำแผ่นใหม่มาติด แล้วทำการตัดในส่วนที่ต้องการจะแพร่สารเจือชนิด  $n^+$  หลังจากตัดเสร็จแล้วจะเป็นดังรูปที่ 3.10



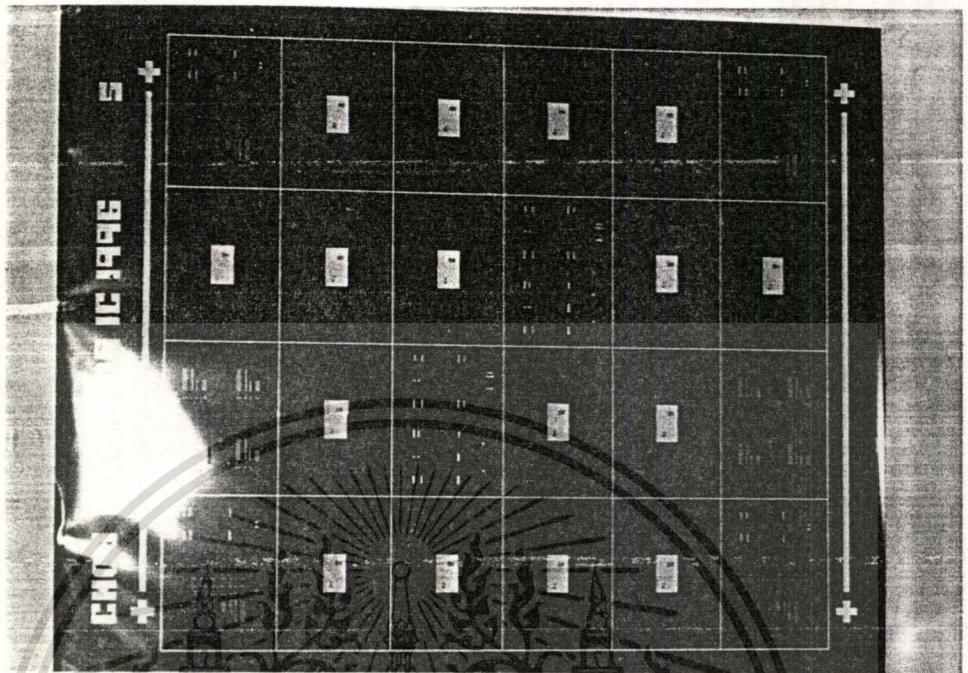
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในวงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.10 แสดงภาพแผ่นโพลีเอสเตอร์มาร์คที่ 3 ( $n^+$ )  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 นำแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่ผ่านการตัด ในส่วนของ  $n^+$  ออก แล้วนำแผ่นใหม่มาติด หลังจากนั้นทำการตัดในส่วนที่ต้องการสร้างเป็น เกทออกไซด์ (Gate Oxide) เป็นมาร์ค ที่ 4 หลังจากตัดเสร็จแล้ว จะแสดงดังในรูปที่ 3.11



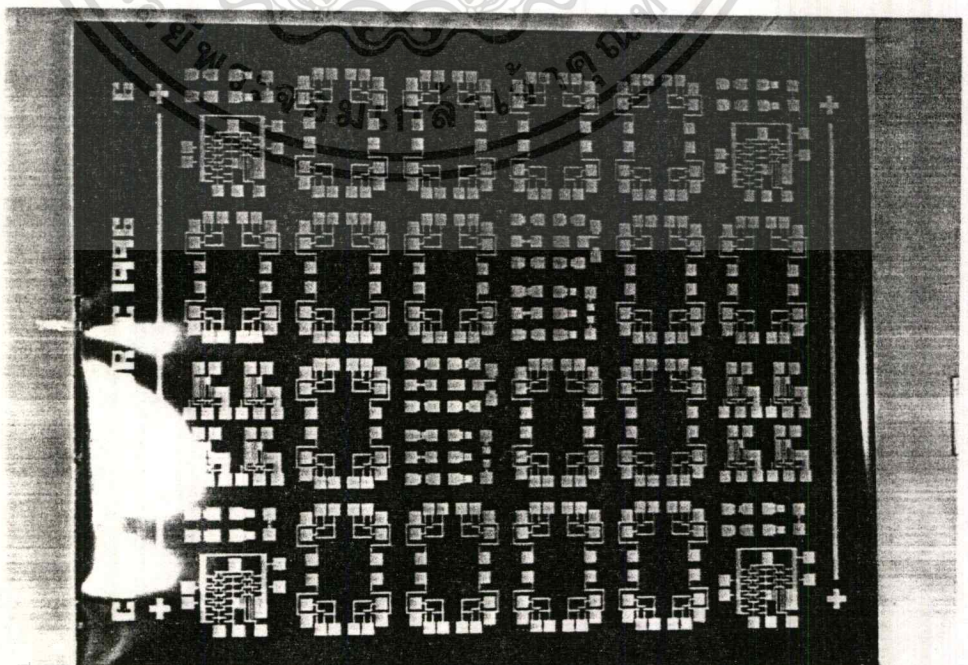
รูปที่ 3.11 แสดงภาพแผ่นโพลีเอสเตอร์ มาร์คที่ 4 (Gate Oxide)

3.4.5 นำแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่ผ่านการตัดในส่วนของเกตออกไซด์ เสร็จแล้วออกนำแผ่นใหม่มาติด เพื่อที่จะทำการตัดในส่วนที่ต้องการจะสร้างเป็นจุดสัมผัส (Contact) เป็น มาร์คที่ 5 หลังจากตัดเสร็จแล้วแสดงไว้ในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงภาพแผ่นโฟโตลิโอสเตอร์ มาร์คที่ 5 (Contact)

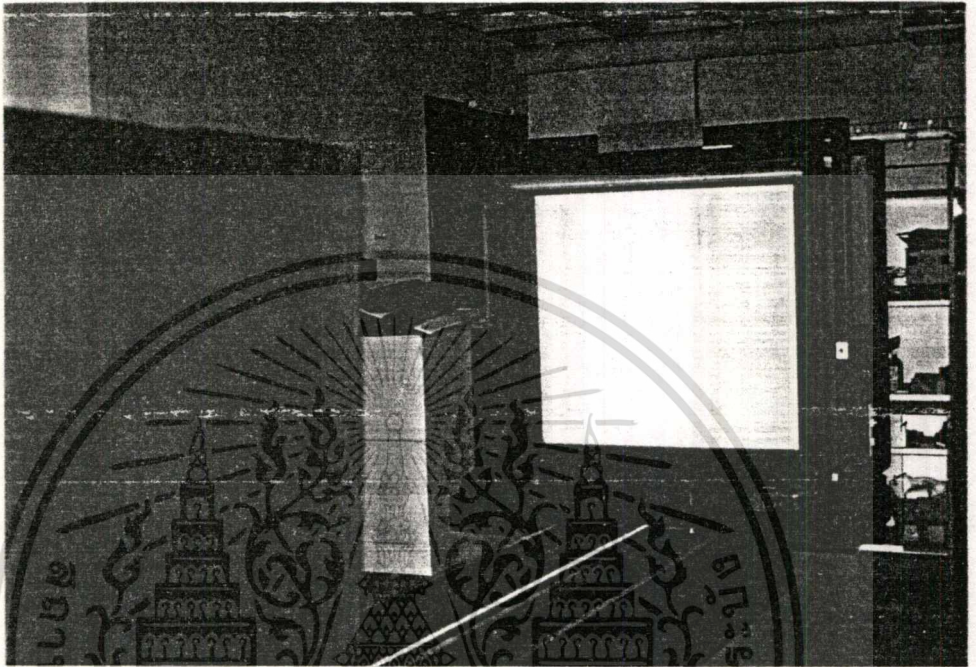
3.4.6 นำแผ่นโฟโตลิโอสเตอร์ที่ผ่านการตัดในมาร์คที่ 5 เสร็จแล้วออกนำแผ่นใหม่มาติด แล้วทำการตัดในส่วนที่ต้องการจะสร้างเป็นลวดลายอะลูมิเนียม (Al - Metalization) เป็นมาร์คที่ 6 ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.13 แสดงภาพมาร์คที่ 6 (Al - Metalization)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.7 หลังจากได้แผ่นโปรเจกเตอร์ครบทั้ง 6 มาร์คแล้ว จึงนำมาถ่ายแบบลงบนกระจกต้นแบบโดยใช้เครื่องถ่ายภาพส่วน ประมาณ 50 เท่า

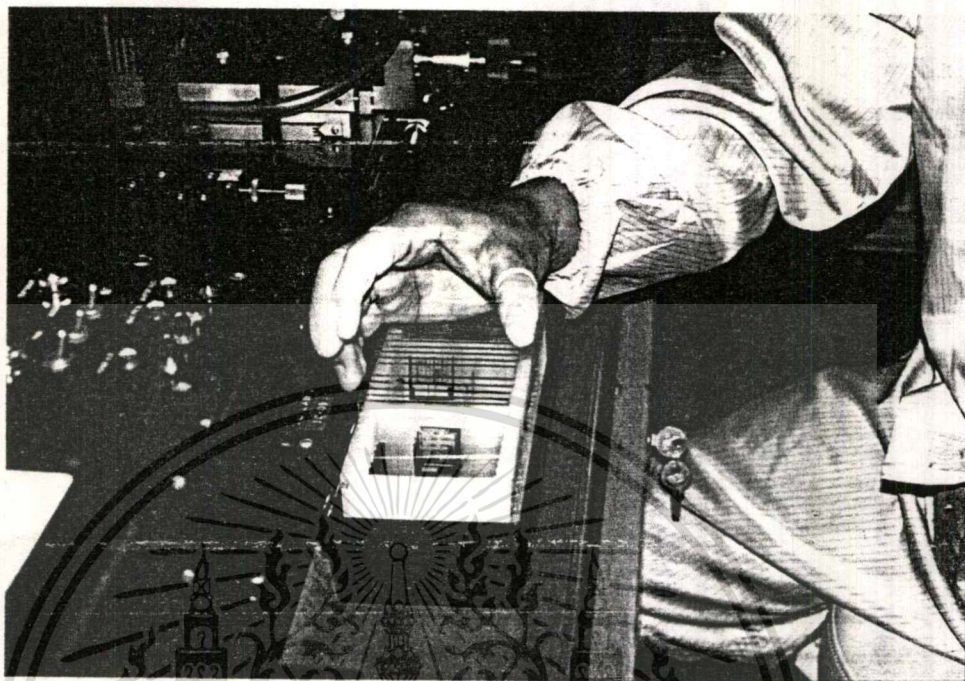


รูปที่ 3.14แสดงภาพเครื่องถ่ายภาพส่วน

เสร็จแล้วจึงนำกระจกต้นแบบที่ผ่านกระบวนการถ่ายแบบมา Develop ตามกระบวนการดังต่อไปนี้

- จุ่มแผ่นกระจกในสารละลาย Developer เป็นเวลา 6 นาที
- จุ่มแผ่นกระจกในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 2 นาที
- จุ่มในสารละลายคงสภาพ(Fixer) เป็นเวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์

หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้วจะได้แผ่นกระจกต้นแบบทั้ง 6 แผ่น ที่จะนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีต่อไป



รูปที่ 3.15 แสดงกระจกดันแบบที่พร้อมจะนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### กระบวนการสร้างซีมอส

กระบวนการสร้างซีมอส จะมีกระบวนการสร้างในขั้นตอนต่าง ๆ คล้ายกับกระบวนการสร้าง เอ็มมอส และ พีมอส โดยอาจจะกล่าวได้ว่า กระบวนการสร้าง ซีมอส ก็คือกระบวนการสร้าง เอ็มมอส และพีมอส รวมกันนั่นเอง ซึ่งจะมีดังต่อไปนี้

#### 4.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนทำได้หลายแบบตามความเหมาะสมในแต่ละสถานการณ์ดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนครั้งแรก

หลังจากได้แผ่นซิลิกอนที่จะนำมาสร้างเป็นมอสเฟตแล้ว ควรจะมีการทำความสะอาด ครั้งแรก ก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการสร้าง

##### 4.1.2 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนแบบมาตรฐาน

เป็นการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอน เพื่อความมั่นใจว่าแผ่นซิลิกอนมีความสะอาดจริง ๆ ปราศจากไขมันเกาะอยู่ที่ผิวหน้า การทำความสะอาดก็ควรใช้สารเคมี ที่ทำปฏิกิริยากับไขมัน โดยเฉพาะ

##### 4.1.3 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยการ Slice Etching

เป็นการทำความสะอาดด้วยการกัดออกไซด์ที่ผิวหน้าแผ่นซิลิกอน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้โดยการที่อะตอมของซิลิกอนทำปฏิกิริยากับอากาศ ซึ่งออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติเป็นแก้ว ในการทำความสะอาด ต้องใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับแก้ว

#### 4.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

กระบวนการออกซิเดชันเป็นกระบวนการสร้างฉนวนไปเคลือบที่ผิวของแผ่นซิลิกอน ซึ่งฉนวนดังกล่าวเกิดจากการทำปฏิกิริยาของอะตอมซิลิกอนกับออกซิเจน ซึ่งก็คือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) สามารถอธิบายถึงการเกิดได้ดังนี้

เมื่อซิลิกอนถูกผิงกับอากาศที่อุณหภูมิห้อง มันจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดฟิล์มบาง ๆ ของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ฟิล์มนี้บางครั้งถูกเรียกว่า native oxide โดยจะมีความหนาประมาณ 0.5 nm หลังจากเวลาผ่านไป 5 นาที 2 nm เมื่อเวลาผ่านไป 15 ชั่วโมง และ 4-5 nm หลังจากเวลาผ่านไป 1 ปี ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนและออกซิเจนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน และออกซิเจนจะต้องแพร่ผ่านออกไซด์ในขณะที่กำลังเกิดปฏิกิริยา เพราะฉะนั้นออกไซด์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน และต่อไปจากนี้อัตราการเกิดออกไซด์จะลดลง อัตราการเกิดออกไซด์ สามารถเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น โดยที่ใช้น้ำกับออกซิเจนหรือใช้ไอน้ำ การเปลี่ยนซิลิกอนให้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์นั้นเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญของการสร้างวงจรรวม ซึ่งขั้นตอนนี้ถูกเรียกว่า การสร้างออกไซด์ด้วยความร้อน(Thermal oxidation)

จุดประสงค์ของการสร้างออกไซด์ของซิลิกอนนั้นมีอยู่มากมายเช่น

- ใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวซิลิกอน เพื่อป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกมาทำปฏิกิริยากับซิลิกอน
- ใช้เป็นหน้าาก ในการป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ
- ใช้เป็นส่วนเกทออกไซด์ ซึ่ง เป็นส่วนที่สำคัญมาก ในอุปกรณ์มอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนียวทำให้เกิดช่องทางเดินกระแส
- เป็นฉนวนที่ผิวของซิลิกอนเพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอะลูมิเนียม กับผิวของซิลิกอนในส่วนอื่นๆ

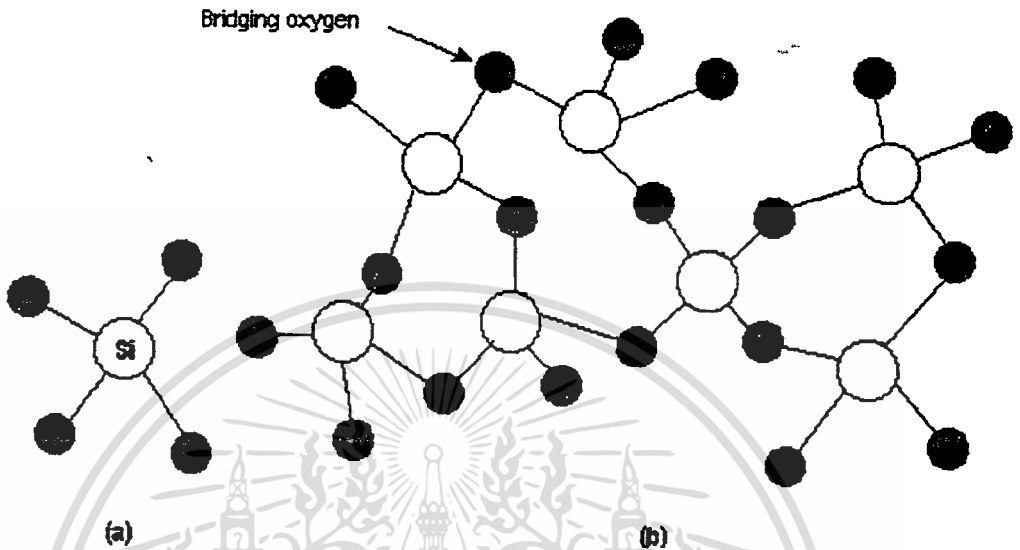
#### 4.2.1 คุณสมบัติและโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์

คุณสมบัติบางประการของซิลิกอนไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งออกไซด์นี้มีความสำคัญมาก ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรรวม

Molecular weight	60.1 g/mole
Density (thermal, dry/wet)	2.27/2.18 g/cm <sup>3</sup>
Molecules/cm <sup>3</sup>	2.3x10 <sup>22</sup> /cm <sup>3</sup>
Melting point	1700 °C
Thermal expansion coefficient	5.6x10 <sup>-7</sup> /K
Young's modulus	6.6x10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.17
Thermal conductivity	3.2x10 <sup>-3</sup> W/cm.K
Relative dielectric constant	3.7 - 3.9
Dielectric strength	10 <sup>7</sup> V/cm
Energy gap	8 eV
DC resistivity	≈ 10 <sup>17</sup> Ohm-cm
Infrared absorption band	9.3 μm
Index of refraction	1.459

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติที่สำคัญของซิลิกอนไดออกไซด์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างออกไซด์ในบรรยากาศของออกซิเจน( $O_2$ ) เรียกว่า การออกซิเดชันแบบแห้ง(dry oxidation) จะทำให้ได้ออกไซด์ที่มีคุณภาพดีคือจะมีความหนาแน่นสูง และมีรูพรุนน้อยกว่าการ



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์

ออกซิเดชันแบบชื้น(Wet Oxidation) ที่อยู่ในบรรยากาศของไอน้ำ ( $H_2O$ )

ซิลิกอนไดออกไซด์สามารถอธิบายโครงสร้างในสามมิติได้ โดยจะมีไอออนของออกซิเจน 4 ไอออนกระจายอยู่รอบ ๆ ไอออนของซิลิกอน 1 ไอออน รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์ใน 2 มิติที่เป็นโครงสร้างในอุดมคติเท่านั้น ความยาวของการเกาะเกี่ยวระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนจะมีค่าประมาณ 0.162 nm และระยะห่างระหว่างไอออนของซิลิกอนจะมีค่าประมาณ 0.227 nm

#### 4.2.2 การสร้างออกไซด์ด้วยความร้อน (Thermal Oxidation)

ในการสร้างออกไซด์นั้นเราต้องการที่จะได้ ซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีคุณภาพดีคือมีลักษณะที่ราบเรียบเสมอกัน(Uniform) และให้มีความหนาตามที่ต้องการ โดยเราจะสามารถเพิ่มหรือลดอัตราการเกิดของออกไซด์ได้โดยควบคุมอุณหภูมิและเวลา

#### ปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation Reaction)

การสร้างออกไซด์ด้วยวิธี Thermal oxidation นี้จะมีอยู่ 2 ชนิดคือแบบแห้งและแบบชื้น โดยที่แบบแห้งจะใช้วิธีการผ่านออกซิเจนเข้าไปในกระบวนการ ส่วนแบบชื้นนั้นจะใช้ไอน้ำสำหรับปฏิกิริยาเคมีของออกซิเดชันแบบแห้งจะเป็นดังนี้

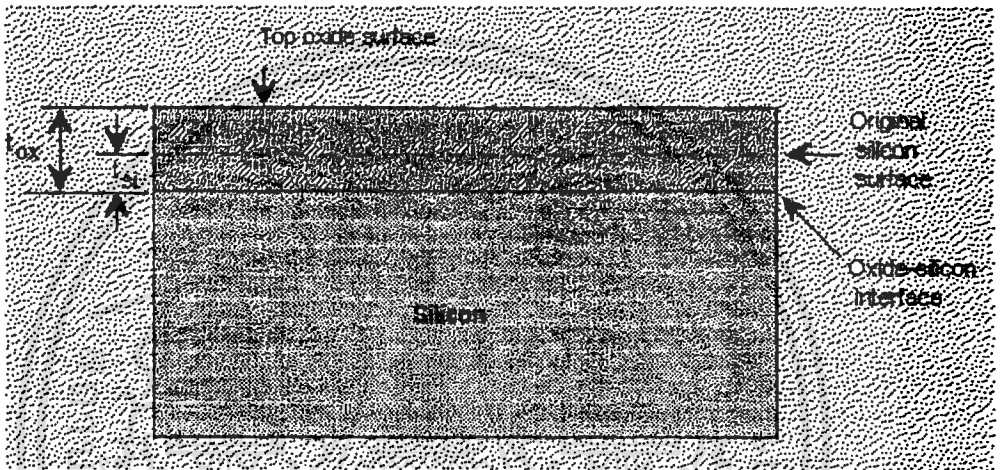
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



และปฏิกิริยาของไอน้ำคือ



ทั้งสองกรณี จะเกิดออกซิเดชันได้ก็ต้องสูญเสียส่วนที่เป็นซิลิกอนด้วย เพื่อที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากซิลิกอนให้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 จำนวนของซิลิกอนที่ใช้ไปในระหว่างการเกิดออกซิเดชัน

ความหนาของซิลิกอนที่ถูกใช้ไป,  $t_{si}$

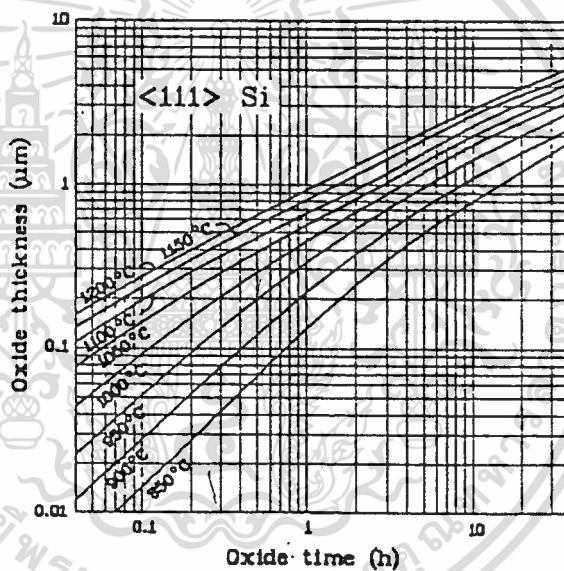
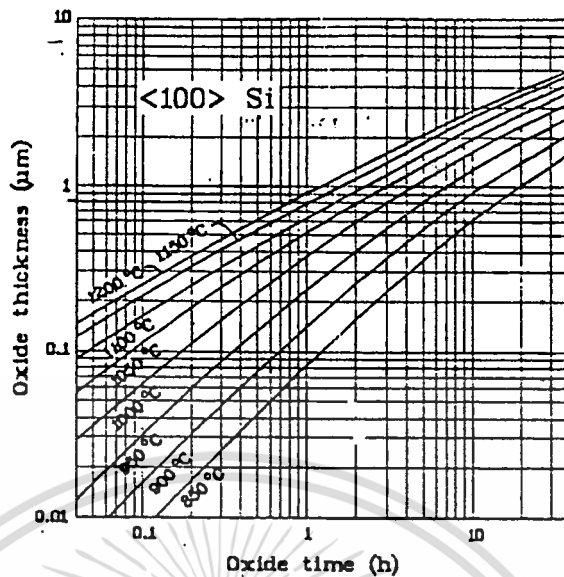
$$t_{si} = t_{ox} \frac{N_{ox}}{N_{si}} \approx 0.46t_{ox} \quad (4.2-3)$$

เมื่อ

- $t_{ox}$  = ความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์
- $N_{ox}$  = ความหนาแน่นโมเลกุลของออกไซด์ ( $\approx 2.3 \times 10^{22}$ )
- $N_{si}$  = ความหนาแน่นของอะตอมซิลิกอน ( $\approx 5 \times 10^{22}$ )

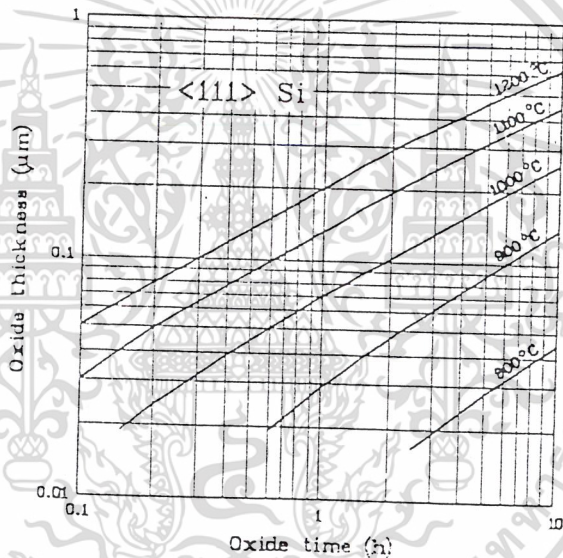
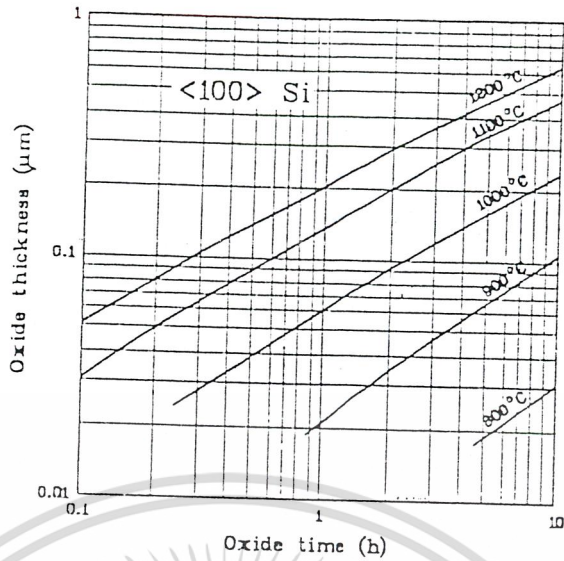
รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการออกซิเดชันแบบชั้นและแบบแห้ง โดยที่อัตราการเกิดของออกไซด์แบบชั้นนั้นจะเกิดมากกว่าแบบแห้ง แต่ผลของความชื้นจะทำให้ความหนา

แน่นของเนื้อออกไซด์น้อยกว่าออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบแห้ง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 อัตราการเกิดออกไซด์แบบขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 อัตราการเกิดออกไซด์แบบแห้ง

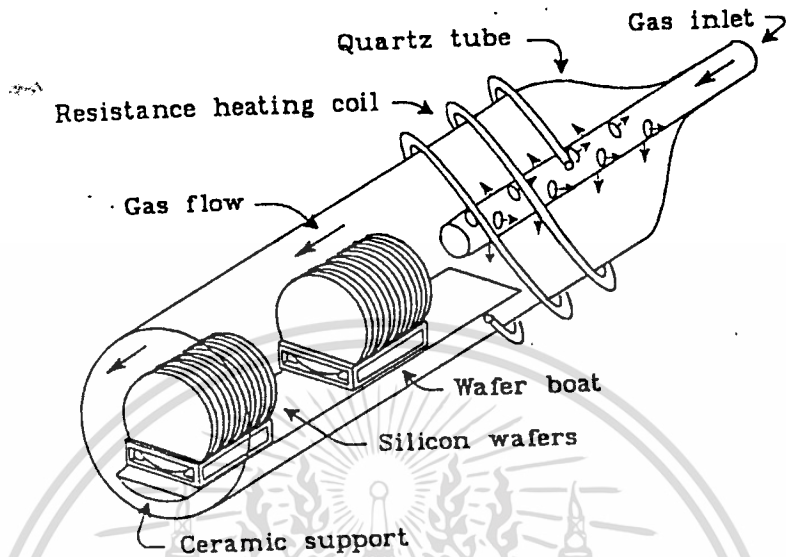
4.2.3 ระบบของการสร้างออกไซด์

ซิลิกอนไดออกไซด์โดยปกติจะสร้างขึ้นในอุณหภูมิ 400 °C -1150 °C สามารถกระทำ  
ได้โดยนำไปเข้าเตาความร้อนสูงที่สร้างขึ้นพิเศษ โดยใช้หลักการของลวดความร้อน  
เตาออกซิเดชั่น

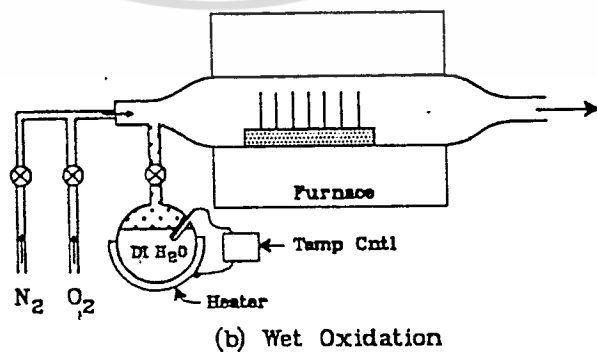
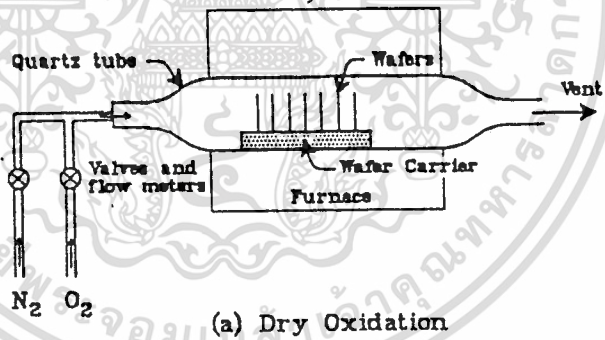
เตาออกซิเดชั่นแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.5 ส่วนภาชนะที่ใช้ใส่แผ่นเวเฟอร์เพื่อที่จะนำเข้า  
เตาไปอย่างช้า ๆ เรียกว่าโบ๊ท(boat) สำหรับการออกซิเดชั่นแบบแห้งจะใช้ออกซิเจนร่วมกับก๊าซที่  
เป็นพาหะเช่น ไนโตรเจน(Nitrogen) ผ่านเข้าไปในเตาที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.6(a) การ  
ออกซิเดชั่นแบบชื้น ทำได้โดยการผ่านออกซิเจนและไอน้ำบริสุทธิ์ เข้าไปซึ่งจะต้องคอยควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของน้ำไว้ที่ 85 °C - 95 °C แสดงได้ดังรูปที่ 4.6(b)



รูปที่ 4.5 แสดงภาพของเตาที่ใช้สร้างออกไซด์



รูปที่ 4.6 ระบบของการออกซิเดชัน (a) ออกซิเดชันแบบแห้ง (b) ออกซิเดชันแบบชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น สิ่งหนึ่งที่สำคัญที่ต้องพิจารณาในการทำออกซิเดชันด้วยความร้อนคือ ผลของการใช้

กระจายของสารเจือในบัลค์(Bulk) ของซิลิกอน และที่ผิวหน้าระหว่างชั้นของออกไซด์กับซิลิกอน เพราะว่าการเคลื่อนที่ของสารเจือจะมีผลกระทบกับขนาด และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีไวซ์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะต้องควบคุมให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุด ทั้งนี้ทำได้โดยควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการสร้างออกไซด์ให้เที่ยงตรงที่สุดและใช้เวลาให้น้อยที่สุดด้วย

จากความสำคัญของซิลิกอนไดออกไซด์ ดังกล่าวทำให้เกิดความต้องการใช้ความหนาของซิลิกอนที่แตกต่างกัน เช่น ถ้าเป็นเกตออกไซด์ต้องการความหนาของออกไซด์ ประมาณ 1,000 Å และต้องเป็นออกไซด์ ที่มีคุณภาพดี จึงต้องสร้างจากกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง ส่วนออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ระดมสารเจือ จำเป็นต้องมีความหนาประมาณ 4,000-5,000 Å ขึ้นไป ซึ่งความหนาขนาดนี้ถ้าใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งเพียงอย่างเดียวจะต้องใช้เวลานาน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีนี้จึงสร้างโดยอาศัยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง สลับกับแบบชื้น และสุดท้ายใช้แบบแห้งอีกครั้ง เพื่อให้ได้ออกไซด์ตามต้องการแต่ใช้เวลาสั้นลง

#### 4.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography Process)

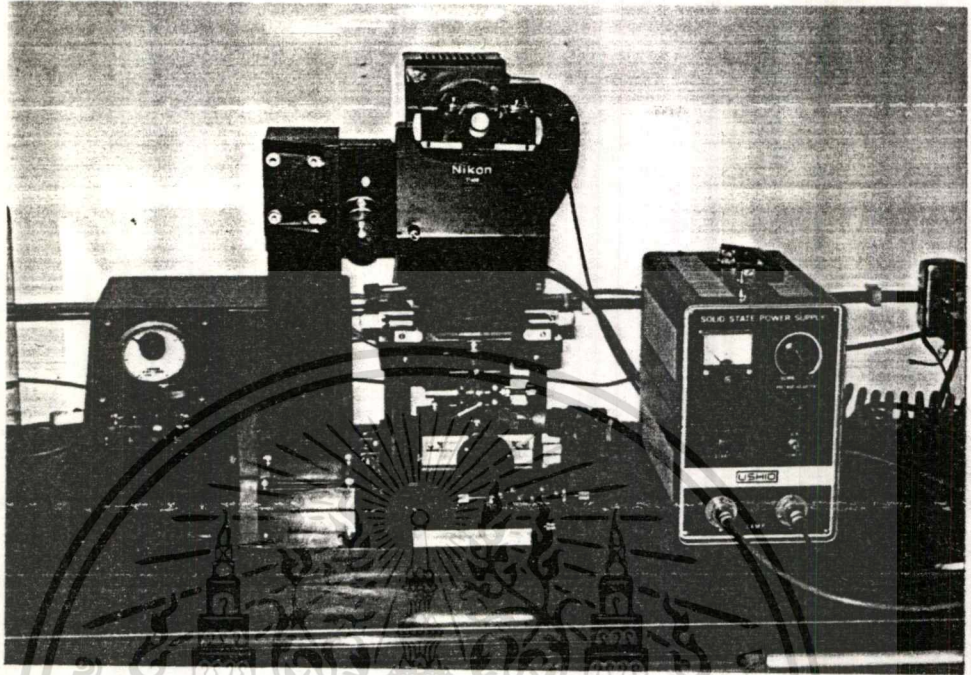
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เป็นกระบวนการที่ใช้ สำหรับถ่ายแบบจากระจกต้นแบบลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนชิ้นงาน ด้วยน้ำยาไวแสงเพื่อให้เกิดเป็นร่องสำหรับกัด SiO<sub>2</sub> เพื่อแพร่สารเจือ หรือทำลวดลายอะลูมิเนียมหรือลวดลายอื่น ๆ ซึ่งลวดลายต่าง ๆ มีขนาดเล็กมากเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของการทำลวดลาย จึงต้องมีการปรับตำแหน่ง (Alignment) น้ำยาไวแสงที่ผ่านกระบวนการนี้ จะสามารถป้องกันการทำปฏิกิริยาระหว่างผิวหน้าของผลึกชิ้นงานกับสารทำให้เกิดสภาพ ต่าง ๆ

##### 4.3.1 น้ำยาไวแสง(Photoresist)

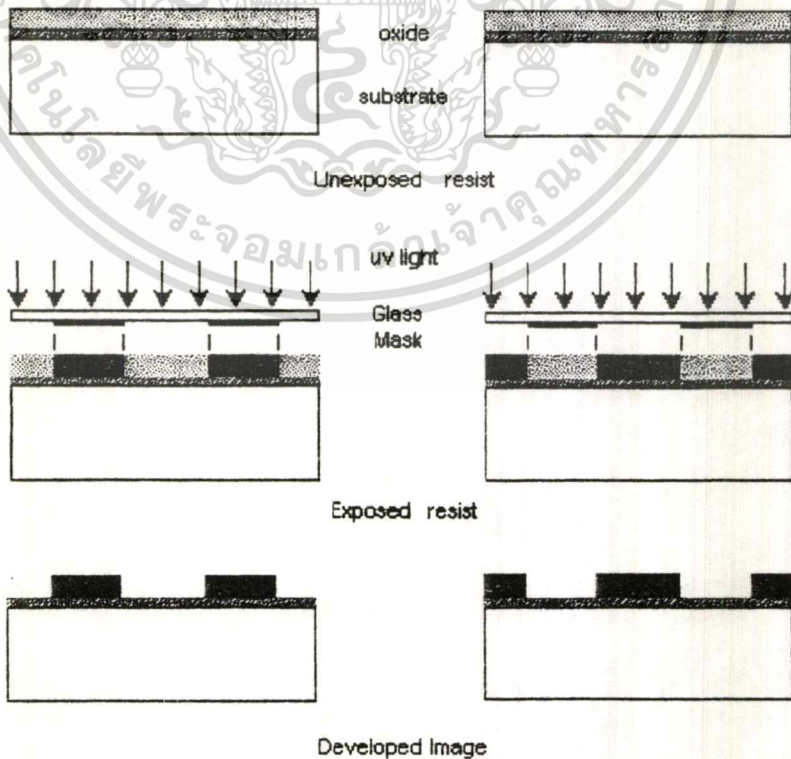
น้ำยาไวแสงจัดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต(ultraviolet light) โดยส่วนที่ถูกฉายด้วยแสงจะกลายเป็นส่วนที่ถูกละลายออกหรือจับตัวแข็ง ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของมัน เมื่อส่วนที่ถูกฉายแสงกลายเป็นส่วนที่ถูกละลายออก เราจะเรียกน้ำยาไวแสงชนิดนี้ว่าน้ำยาไวแสงชนิดบวก(positive resist) แต่ถ้าหากว่าส่วนที่ถูกแสงกลายเป็นส่วนที่จับตัวแข็ง เราจะเรียกน้ำยาไวแสงชนิดนี้ว่าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ(negative resist) น้ำยาไวแสงทั้งสองชนิดเมื่อผ่านกระบวนการฉายแสงโดยที่มีหน้ากักปิดบังแล้วจะทำให้มีทั้งส่วนที่จับตัวแข็งและส่วนที่ยังคงสภาพเดิม ซึ่งส่วนที่ยังคงสภาพเดิมนี้อาจล้างออกได้ด้วยน้ำยาล้าง(developer)

น้ำยาไวแสงชนิดลบที่ใช้ในการทำโครงการในครั้งนี่เรียกว่า Way Coat ส่วนน้ำยาไวแสงชนิดบวกนั้นเรียกว่า AZ 1350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เครื่องปรับตำแหน่งกระจกต้นแบบ และถ่ายแบบลงบนแผ่นผลึกชิ้นงาน



**Positive resist**

**Negative resist**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น สิ่งทั้งหลายนี้เป็นของของคณะ และต้องแจ้งเจตนาเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้การนำไปใช้  
 รูปที่ 4.8 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของน้ำยาไวแสงชนิดบวก

และลบ

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างน้ำยาไวแสงชนิดบวกและลบซึ่งก่อนที่จะทำการฉายแสงได้จะต้องมีหน้ากาก(Mask) ที่มีทั้งส่วนที่ทึบแสงและส่วนที่โปร่งใสป้องกันเอาไว้ เมื่อผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม(Development Process) แล้วฟิล์มในส่วนที่ขังคงเหลืออยู่บนเวเฟอร์จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ป้องกันออกไซด์ในระหว่างกระบวนการสกัดชั้นออกไซด์(oxide etching)

#### 4.4 กระบวนการแพร่สารเจือ (Impurity Diffusion Process)

การแพร่อะตอมสารเจือลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอน กระทำได้โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือจะต้องอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูง ในบรรยากาศที่เต็มไปด้วยอะตอมสารเจือ โดยอะตอมสารเจือจะเข้าไปสู่ผิวหน้าของแผ่นผลึกและยังสามารถเข้าไปสู่ข้างในแผ่นผลึกได้

การแพร่สารเจือก็จะมีลักษณะคล้าย ๆ กับการสร้างออกไซด์แต่จะต่างกันที่การแพร่สารนั้นจะอยู่ในบรรยากาศขององค์ประกอบทางเคมี ของสารเจือที่พอเหมาะ ซึ่งแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือ(Source) สามารถเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ

แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือที่ใช้กันเป็นส่วนมาก ได้แก่

	B(p-type)	As(n-type)	P(n-type)
Solid State	BN	As <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Liquid State	BBr <sub>3</sub>	AsCl <sub>3</sub>	POCl <sub>3</sub>
Gaseous State	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	AsH <sub>3</sub>	PH <sub>3</sub>

แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือจะถูกนำไปด้วยก๊าซ ด้วยอัตราการไหลที่สม่ำเสมอเพื่อควบคุมจำนวนโมเลกุลของแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นตัวอย่างของแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือที่เป็นของเหลว

ก๊าซที่รวมกับอะตอมสารเจือจะถูกผลักดันให้เข้าไปสู่เตาแพร่สารเจือที่ภายในบรรจุแผ่นซิลิกอนที่ต้องการแพร่สารเจือไว้ ที่ค่าอุณหภูมิหนึ่ง ที่ใดก็ตามของแผ่นซิลิกอนที่ถูกปกคลุมด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ จะทำให้บริเวณนั้นเปรียบเสมือนมีหน้ากากมาป้องกันไม่ให้อะตอมสารเจือแพร่ลงไปเนื้อซิลิกอนได้ โดยจะมีปฏิกิริยาของการเกิดดังนี้

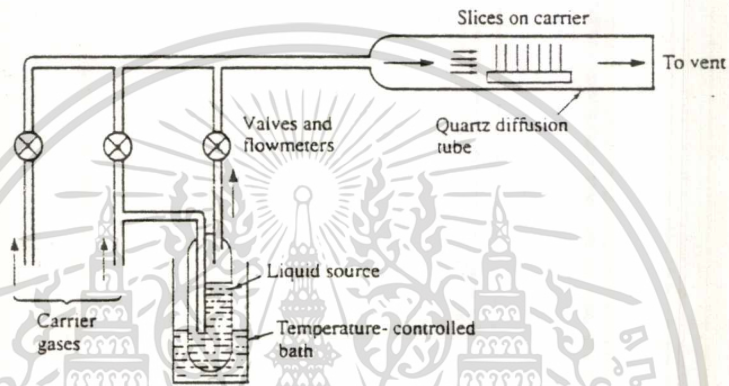
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $4BBr_3 + 3O_2 \rightarrow 6Br_2 + 2B_2O_3$  ตให้นำไปใช้ประโยชน์ได้ (4.4 ก 1)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

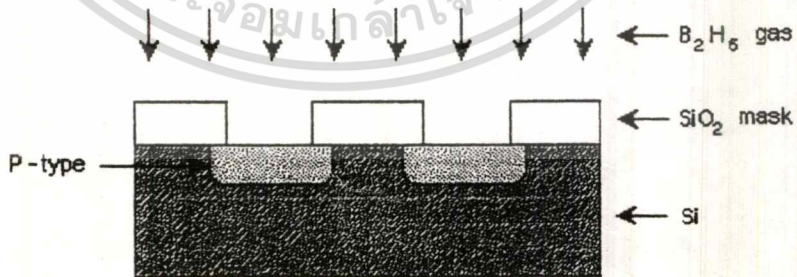
ที่ผิวหน้าของซิลิกอนจะเกิด



ความแตกต่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของสองสมการเนื่องจากส่วนผสมที่แตกต่างของก๊าซที่ใช้ ดังรูปที่ 4.9 เป็น

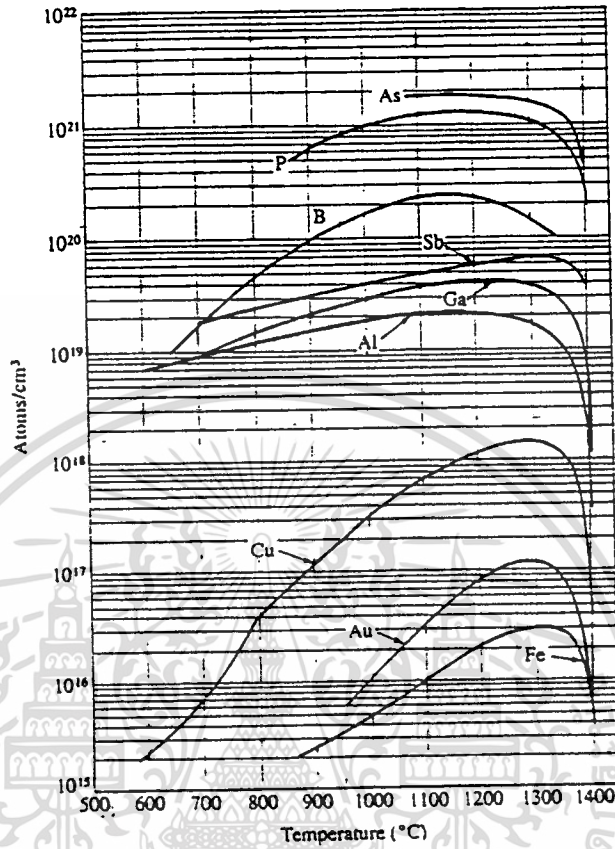


รูปที่ 4.9 เป็นตัวอย่างของระบบการแพร่สารเจือเข้าไปในเนื้อซิลิกอนที่ใช้แหล่งจ่ายเป็นของเหลว ตัวอย่างของการแพร่สารเจือเข้าไปในเนื้อซิลิกอน ก๊าซที่ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีของอะตอมสารเจือที่เข้มข้นจะสามารถแทรกซึมลงไปเนื้อซิลิกอนได้

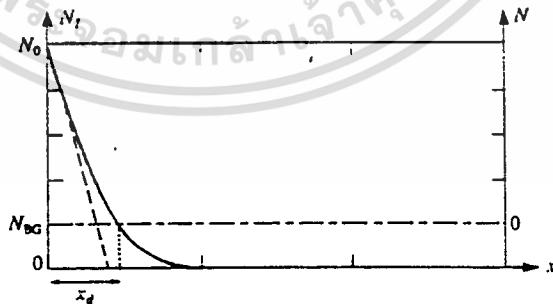


รูปที่ 4.10 แสดงการแพร่สารเจือลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอน

ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือบริเวณผิวหน้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งจ่ายและ ชนิดของแผ่นซิลิกอน ณ ที่อุณหภูมิและแรงดันค่าหนึ่งของก๊าซ ถ้าในข้อหลังนี้มีค่าสูงพอ ความเข้มข้นก็จะเท่ากับ Solid Solubility No ของการแพร่อะตอมสารเจือลงบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Solid Solubility ของ สารเจือต่าง ๆ ในซิลิกอน



รูปที่ 4.12 แสดงความเข้มข้นของอะตอมสารเจือที่เกิดจากการแพร่

เมื่อเวลาผ่านไปอะตอมสารเจือจะแพร่ลึกลงไปในเนื้อซิลิกอน ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ  $N_i(x)$  จะมีจำนวนลดลงจากผิวหน้างานลึกลงไปในเนื้อผลึก ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.12 ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตว่าถ้าฐานรองยังคงเป็นเอ็กพริเนติก กับการโคปที่สม่เสมอ ความเข้มข้นที่ฐานรอง,  $N_{BG}$  จะเกิดความเป็นไปได้ 2 อย่างคือ

1. ถ้าเป็นชนิดเดียวกับอะตอมสารเจือที่แพร่ลงไป (สารเจือผู้ให้หรือสารเจือผู้รับ) จะเป็นผลให้ความเข้มข้นสุทธิ  $N = N_I(x) + N_{BG}$
2. อย่างไรก็ตามถ้าหากว่าฐานรองและอะตอมสารเจือต่างชนิดกัน ความเข้มข้นสุทธิคือ  $N = N_I(x) - N_{BG}$  ซึ่งในกรณีนี้ถ้า  $N$  มีค่าเป็นบวกแสดงว่าแผ่นซิลิกอนส่วนที่ใช้เป็นฐานรองนั้นจะกลายเป็นชนิดเดียวกับอะตอมสารเจือที่แพร่ลงไป แต่ถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่าแผ่นซิลิกอนจะเป็นชนิดเดียวกับอะตอมสารเจือพื้นฐาน

ในรูปที่ 4.9  $N_{BG}$  แสดงให้เห็นเป็นเส้นประ-จุด (dash-dot) ให้  $x_d$  คือจุดที่เส้น  $N_I$  และ  $N_{BG}$  ตัดกัน และเราจะสังเกตได้ว่า ทุกจุดที่อยู่ทางซ้ายของ  $x_d$  ( $N_I > N_{BG}$ ) แผ่นซิลิกอนจะกลายเป็นชนิดเดียวกับอะตอมสารเจือ ส่วนทางด้านขวาของ  $x_d$  ( $N_I < N_{BG}$ ) แผ่นซิลิกอนจะเป็นชนิดเดียวกับอะตอมสารเจือพื้นฐาน

ที่ความลึก  $x = x_d$ , ( $N_I = N_{BG}$ ) ตรงบริเวณนี้ก็คือความลึกของรอยต่อ (Junction depth)

การแพร่อะตอมสารเจือภายใต้เงื่อนไขที่ได้อธิบายไปแล้วนั้นรู้กันทั่วไปว่า Predeposition สำหรับเงื่อนไขของการโคปเพื่อที่จะให้เกิดความลึกของรอยต่อมากขึ้น (ดังรูปที่ 4.13) นั้นในกระบวนการนี้เราจะเรียกว่า การขับลึก (Drive-in Diffusion)



รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของรอยต่อที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนของการแพร่สารเจือและการขับลึก

ในกระบวนการของการขับลึกนี้ก็เหมือนกับการแพร่สารเจือคือ จะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซ แต่จะปราศจากอะตอมสารเจือ ในระหว่างกระบวนการจะทำให้อะตอมสารเจือที่อยู่บริเวณผิวหน้าเคลื่อนที่ลึกกลงไปในผลึก จึงทำให้ความเข้มข้นอะตอมสารเจือบริเวณผิวหน้ามีค่าลดลง

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ของการแพร่นั้นจะใช้กฎของการแพร่ (Diffusion Law) ในระบบ 1 มิติ อัตราการแพร่อะตอมสารเจือคือ

$$F = -\frac{D \Delta N}{\Delta x} \quad (4.4-3)$$

เมื่อ  $N$  คือความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ และ  $D$  คือ Diffusivity ของอะตอมสารเจือ ในผลึกสารกึ่งตัวนำ

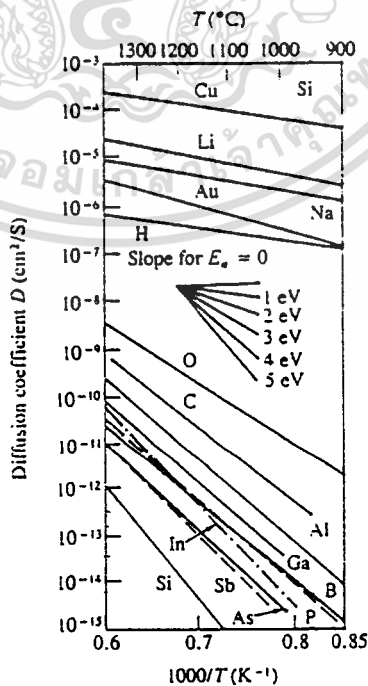
ใช้สมการ (4.4-3) ในสมการต่อเนื่อง (Continuity equation) ภายใต้ข้อสมมติฐานว่า การแพร่คืออะตอมสารเจือที่ได้จากแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือเท่านั้น

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( -D \frac{\Delta N}{\Delta x} \right) \quad (4.4-4)$$

รูปที่ 4.14 แสดงการพล็อตระหว่างสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusion Coefficients) และอุณหภูมิ สำหรับสารเจือโดยทั่วไปคือ ซิลิกอน (Si) และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs)

ภายใต้ข้อสมมติฐานของ *Concentration independent diffusivity* จาก (4.4-4)

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (4.4-5)$$



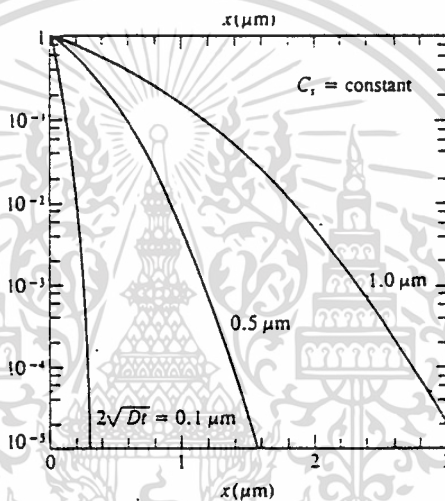
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือต่างชนิด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในแผ่นผลึกซิลิกอน กับอุณหภูมิ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ลงนิตยสารใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ในแผ่นผลึกซิลิกอน กับอุณหภูมิต่ำ

### ปริเคปโทซิชั่น (Predeposition)

เงื่อนไขขอบเขตคือ  $N(0) = N_0; N(\infty) = 0$  , เมื่อ  $N_0$  สามารถให้มีค่าเท่ากับ Solid State Solubility ของรูปที่ 4.11 การหาค่าของ partial differential equation ( 4.4 - 5 ) กลายเป็น

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4.4 - 6)$$



รูปที่ 4.15 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังจากการ Predeposition

สมการที่ ( 4.4 - 6 ) นี้จะเรียกว่า error function distribution

การพล็อตของ  $\operatorname{erfc}(x)$  แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 คุณสมบัติที่สำคัญของกระบวนการ ปริเคปโทซิชั่น คือ impurity dose

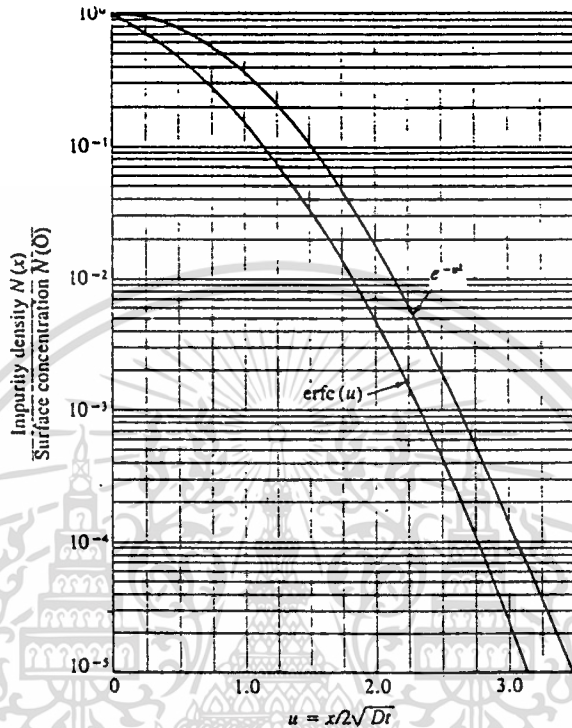
$$Q(t) = \int_0^{\infty} N(x,t) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{Dt} \quad (4.4 - 7)$$

impurity dose แสดงจำนวนผลรวมของอะตอมสารเจือที่เข้าไปในผลึกต่อหน่วยพื้นที่ เมื่อผ่านการ ปริเคปโทซิชั่น ในช่วงเวลา  $t$  สมการนี้มีความสำคัญมากในการคำนวณการขับลึก

สังเกตว่าสำหรับการ ปริเคปโทซิชั่น อะตอมสารเจือ เข้าไปในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค ที่มีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือพื้นฐาน  $N_{BG}$  โดยชนิดอะตอมสารเจือนั้นเป็นชนิดตรงข้ามกับ ชนิดของ  $N_{BG}$  จะทำให้เกิดรอยต่อพี เอ็นซึ้น กับการกระจายของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) - N_{BG} \quad (4.4-8)$$



รูปที่ 4.16 กราฟนอร์มอลไลซ์เพื่อหาการกระจายของสารเจือทั้งแบบ erfc และ Gaussian การหาค่าความลึกของรอยต่อ  $x_d$  กระทำได้โดยกำหนดค่า  $N=0$  ในสมการ (4.4-8) คือ

$$x_d = 2\sqrt{Dt} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_{BG}}{N_0}\right) \quad (4.4-9)$$

เมื่อฟังก์ชัน erfc สามารถคำนวณได้ง่าย ๆ จากรูปที่ 4.15 หรือจากรูปที่ 4.16 เวลาขึ้นอยู่กับปริมาณ

$$L_D = \sqrt{Dt} \quad (4.4-10)$$

#### การขับลึก ( Drive-in Diffusion )

ในกรณีนี้สิ่งที่คงที่จะไม่ใช่ความเข้มข้นของสารเจือที่ผิวหน้าแล้ว แต่เป็นผลรวมของจำนวนสารเจือที่ถูกฉีดเข้าไปภายในเนื้อซิลิกอน จาก (4.4-7) ดังนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

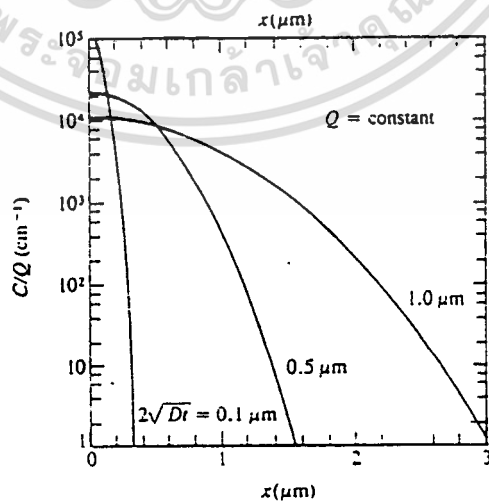
$$\int_0^{\infty} N(x, t_p) dx = Q(t_p) = \text{constant} \quad (4.4 - 11)$$

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแกสมการ ( 4.4 - 5 ) กรณีของการขับลึก เงื่อนไขขอบเขตอื่น ๆ คือ  $N(\infty, t) = 0$  สังเกตว่าโดยนัยแล้วที่เงื่อนไขขอบเขตแรก ตัวแปร  $t$  ในสมการ ( 4.4 - 5 ) นั้นเป็นตัวแปรในกระบวนการขับลึก ในขณะที่ในระหว่างกระบวนการปริศน์โพสิชั่น แสดงเป็น  $t_p$  แล้วแกสมการ ( 4.4 - 5 ) จะกลายเป็น Gaussian Profile ดังสมการที่ ( 4.4 - 12 )

$$N(x, t) = \frac{Q(t_p)}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/(4Dt)} \quad (4.4 - 12)$$

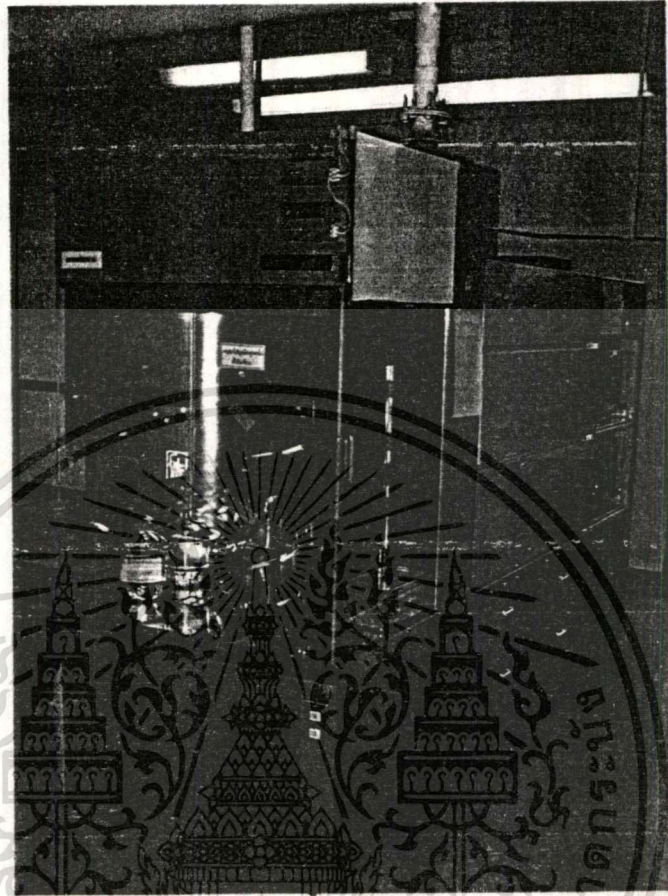
ในความเป็นจริง ความหนาแน่นสารเจือบริเวณผิวหน้า  $N(0, t)$  จะไม่คงที่ในระหว่างกระบวนการขับลึก แต่จะมีค่าลดลงในระหว่างกระบวนการ สอดคล้องกับสมการ ( 4.4 - 12 ) ที่  $t = 0 \rightarrow N(0, 0) = N_0$  และความเข้มข้นสารเจือบริเวณผิวหน้าจะเป็นส่วนกลับกับระยะการแพร่ (diffusion length),  $L_D$

$$N(0, t) = \frac{Q(t_p)}{\sqrt{\pi Dt}} \quad \text{สำหรับ } t > 0 \quad (4.4 - 13)$$



รูปที่ 4.17 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังจากการขับลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงภาพของเตาเพอร์อะตอมสารเจือ

#### 4.5 กระบวนการสร้างลวดลายอะลูมิเนียม

กระบวนการสร้างลวดลายอะลูมิเนียมจะสร้างขึ้น เพื่อใช้เป็นจุดสำหรับต่อขาอุปกรณ์ กับตัวถังภายนอก ทำได้โดยการเคลือบผิวผลึกซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียมในสุญญากาศโดยใช้เครื่องเคลือบสุญญากาศ (Vacuum Evaporator) ที่ความดัน  $2 \times 10^{-6}$  Torr ทำให้ได้อะลูมิเนียมที่มีความหนาประมาณ 1 ไมครอน หลังจากนั้นนำไปขึ้นลวดลายอะลูมิเนียมด้วย กระบวนการโวลติโทกราฟี โดยใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ-1350) แล้วจึงนำไปสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-etching) ทำให้ได้ลวดลายอะลูมิเนียมตามต้องการและ เพื่อให้ลวดลายที่เกิดขึ้นสัมผัสกับขั้วต่าง ๆ แบบ โอห์มิก (Ohmic) จึงต้องนำแผ่นผลึกซิลิกอนมาผ่านกระบวนการซินเทอริง (Sintering Process) ซึ่งทำได้โดยนำแผ่นผลึกเข้าสู่บรรยากาศที่มีอัตราการไหลของไนโตรเจน 1 ลิตร/นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที ก็จะได้แผ่นผลึกชิ้นงานที่สมบูรณ์ พร้อมทั้งจะนำไปผ่านกระบวนการทดสอบอุปกรณ์ และกระบวนการเคลือบลวดโลหะกับตัวถัง รวมถึงกระบวนการอื่น ๆ ที่ทำให้หมอสเฟท

เอกสารนี้เป็น **สมบัติที่สุด** ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการสร้าง ซีมอส แนน และ นอเกต

### 5.1 ขั้นตอนนี้เป็นเตรียมแผ่นซิลิกอนและการตรวจสอบคุณสมบัติแผ่นผลึกซิลิกอน

ในขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบแผ่นซิลิกอนว่าพร้อมที่จะนำมาสร้างซีมอส หรือไม่ โดยตรวจสอบชนิดของผลึกซิลิกอน ค่าพิคควมด้านทาน ความหนาของแผ่นผลึกและระนาบที่ใช้สร้าง ซึ่งในโครงการนี้คือระนาบ (100) เมื่อทราบคุณสมบัติเบื้องต้นเหล่านี้ ก็จะทำให้ทราบค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นฐาน ของผลึกซิลิกอนเพื่อประโยชน์ในการดำเนินการสร้างต่อไป

### 5.2 การทำความสะอาดผิวหน้าซิลิกอนครั้งแรก

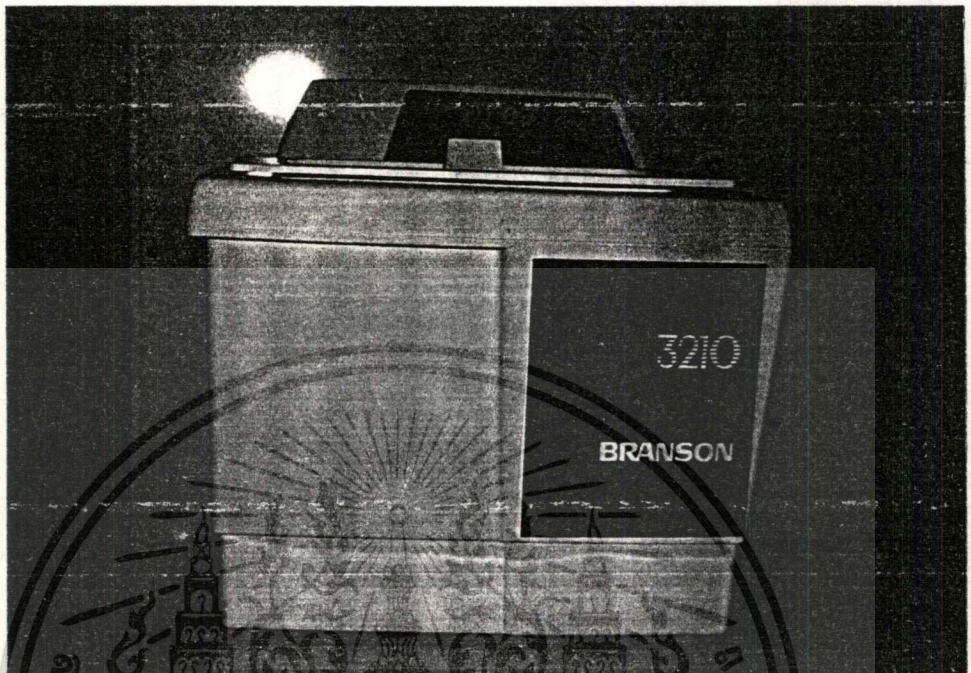
ในขั้นตอนนี้เป็นการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนก่อนที่จะดำเนินการสร้างเพื่อความมั่นใจว่า แผ่นผลึกซิลิกอนมีความสะอาดจริง ๆ โดยกระบวนการต่าง ๆ เป็นดังต่อไปนี้

- อุลตราโซนิค ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water : DI Water) 2 นาที
- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์
- ดัมในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) 10 นาที เพื่อกำจัด โลหะหนักต่าง ๆ
- รุ่มแผ่นซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์
- ดัมในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- รุ่มแผ่นซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.3 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอนแบบมาตรฐาน

ในขั้นตอนนี้เป็นการทำความสะอาดที่มีจุดประสงค์เพื่อละลายไขมัน และชำระล้างสิ่งสกปรก ในการทำความสะอาดแบบมาตรฐานนี้ จะทำทุกครั้งที่เริ่มกระบวนการต่าง ๆ เพราะไขมันอาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา การทำความสะอาดผิวหน้าแบบมาตรฐานจึงจำเป็นต้องทำทุกครั้ง โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

- ดัมใน ไตรโคโลเอทิลไฮไดรเจน (trichloroethylene) 5 นาทีเพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน
- อุลตราโซนิค (ultra sonic) ใน อะซีโตน (acetone) 5 นาทีเพื่อล้าง ไตรโคโลเอทิลไฮไดรเจน
- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน



รูปที่ 5.1 เครื่อง อุลตราโซนิก

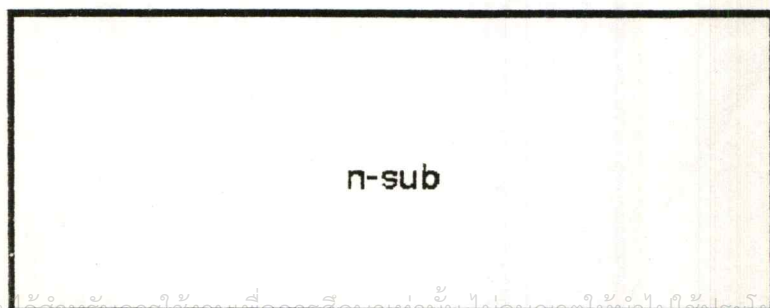
#### 5.4 การ ขัดลอก เอชซิง ( slice etching )

เป็นการทำความสะอาดแผ่น โดยการสกัดออกไซด์ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน ในขณะที่แผ่นสัมผัสกับอากาศภายในห้อง

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 5% (HF 5%) 10 วินาที
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

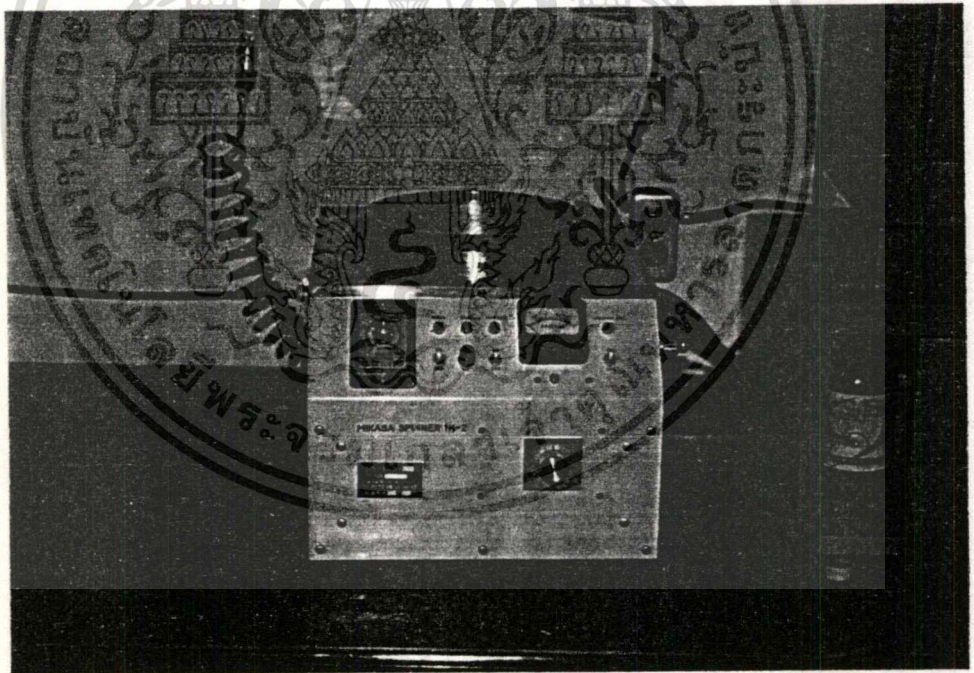
หลังจากผ่านขั้นตอนที่ 5.5 แล้วจะได้โครงสร้างของชิ้นงานตามรูปที่ 5.2





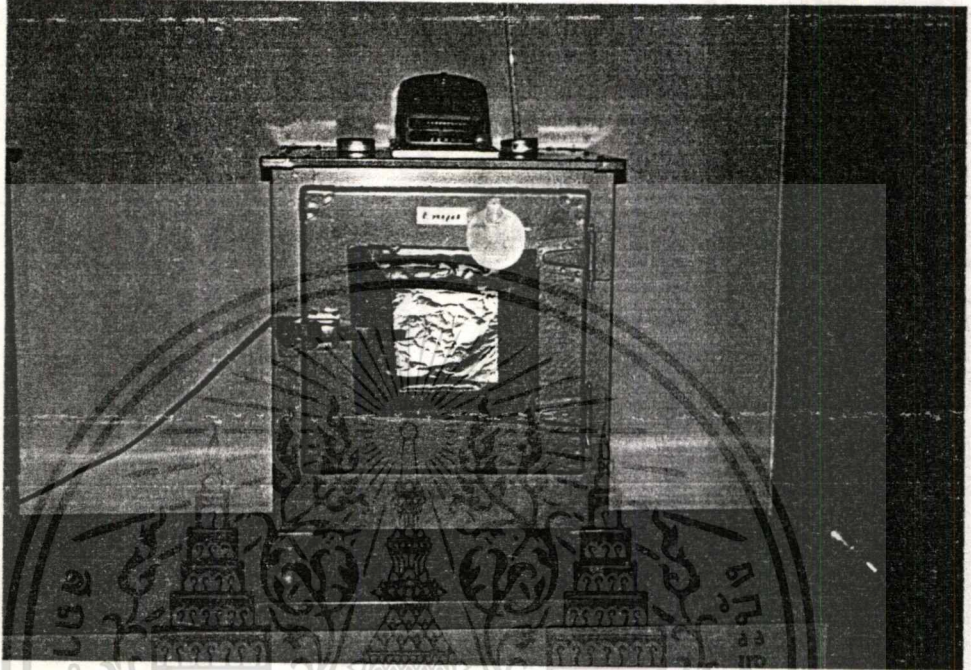
### ทำการ ล้าง ฟิล์ม โดย

- รุ่มแผ่นผลึกซิติกลงใน ไซลีน ( Xylene ) 2 แก้ว แก้วละ 90 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกซิติกลงใน ไอโซโพรพิล อัลกอฮอล์ ( Isopropyl Alcohol ) 3 แก้ว ๆ ละ 30 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกซิติกลงในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 10 นาที
- ทาด้านหลังแผ่นด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way Coat)
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที



รูปที่ 5.4 เครื่อง สปินเนอร์ ที่ใช้สำหรับเคลือบนำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ตู้อบแผ่นซิลิกอน

### 5.7 การใช้สารละลายกัดออกไซด์ (Oxide Etching)

เป็นการสกัดซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับแพร่สารเจือในส่วนของ บ่อแยกชนิด พี (P - Well) ทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลาย บัฟเฟอร์ ( Buffer ) ประมาณ 5 นาที
- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.8 กระบวนการลอกฟิล์ม

เมื่อทำการสกัดออกไซด์ได้ช่องที่จะทำการแพร่สารเจือแล้ว ต้องทำการลอกฟิล์มที่เคลือบไว้

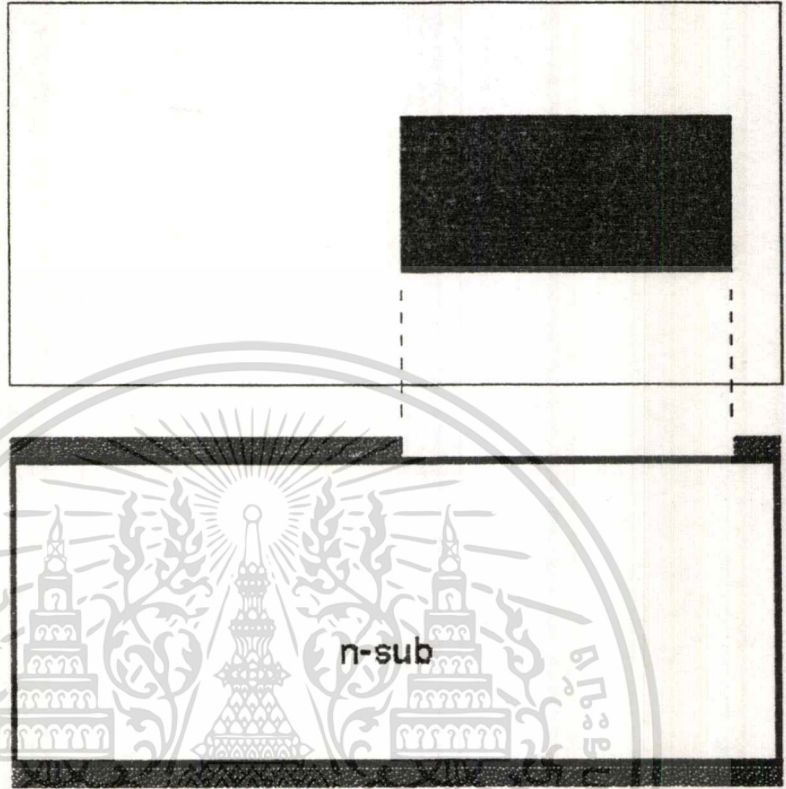
โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ต้มน้ำใน  $H_2SO_4$  2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที
- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มน้ำในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที

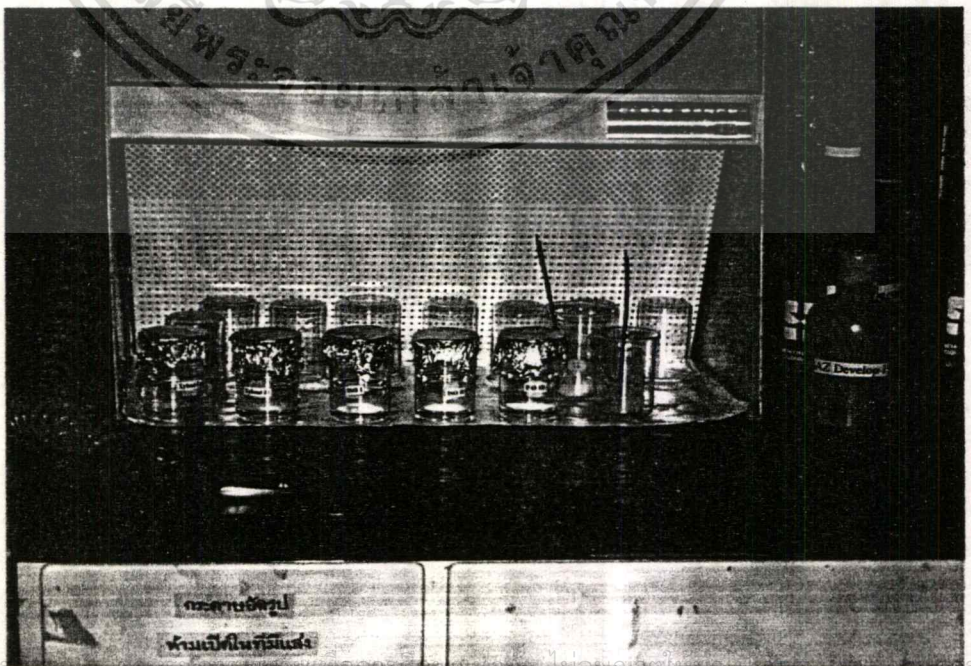
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

กระจก  
 สัมผัส  
 (ด้านบน)  
 ✱ 1



รูปที่ 5.6 แสดงภาพกระจกสัมผัสแบบโนมาร์กที่ 1 และภาพตัดขวางแผ่นซิลิกอนเมื่อผ่านกระบวนการลอกฟิล์มเสร็จแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้มาเผยแพร่หรือใช้ในทางที่ผิด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการล้างฟิล์ม

### 5.9 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอน

ในขั้นตอนนี้คือการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอนแบบมาตรฐาน เป็นขั้นตอนที่จำเป็น ดังที่ได้เคยกล่าวไว้แล้ว โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- คัมใน ไตรโคโลเอ็ทโซลีน 5 นาที เพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน
- อุลตราโซนิค ใน อะซิโตน 2 นาทีเพื่อล้าง ไตรโคโลเอ็ทโซลีน
- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.10 กระบวนการ ซิลิซ เอชซิง

- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 5% 10 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.11 กระบวนการ โบรอน เดปโอสิชัน (Boron deposition)

เป็นการแพร่สารเจือชนิดที่เข้าสู่แผ่นผลึกส่วนที่เปิดไว้ เป็นช่องสำหรับ P - Well ดังรูปที่

5.6 โดยใช้อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- Activate ในบรรยากาศที่มี อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที เป็นเวลา 30 นาที
- Stabilize ในบรรยากาศที่มีอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.7 ลิตร/นาที เป็นเวลา 10 นาที
- Deposited ในบรรยากาศที่มีอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.7 ลิตร/นาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็นบรรยากาศที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 5 นาที

### 5.12 การลอกชั้น โบรอนกลาส ( Boron glass )

เป็นการสกัดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการแพร่สารเจือ ทำได้ดังต่อไปนี้

- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.13 การทำความสะอาดผิวหน้า

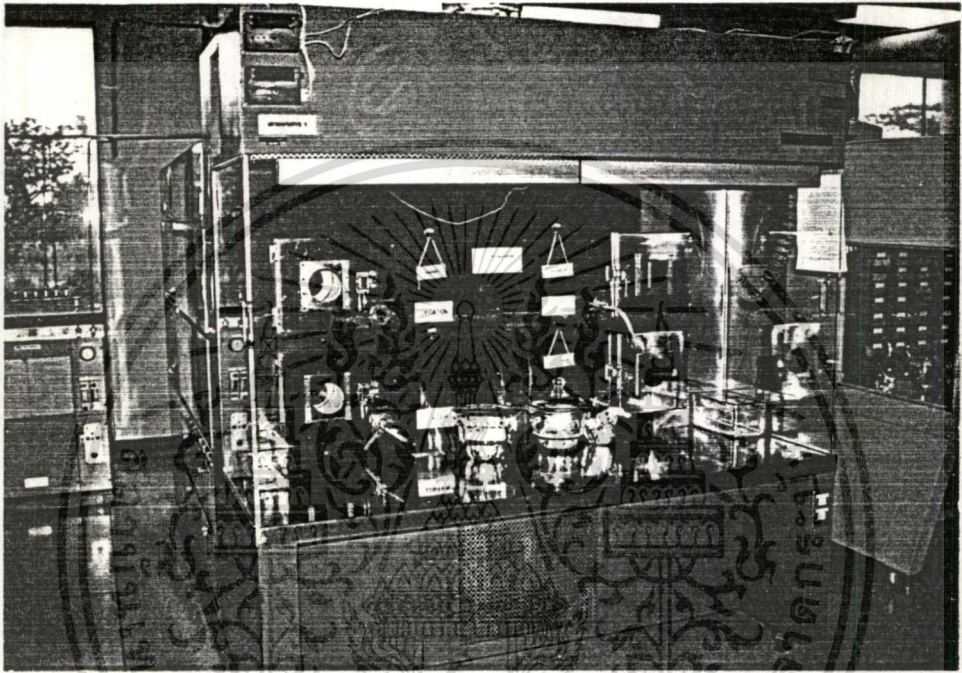
- คัมใน ไตรโคโลเอ็ทโซลีน 5 นาที เพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิว หน้าแผ่นผลึกซิลิกอน
- อุลตราโซนิค ใน อะซิโตน 5 นาทีเพื่อล้าง ไตรโคโลเอ็ทโซลีน
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.14 กระบวนการ ขับลึก - โบรอน ( Bron Drive-in )

เป็นกระบวนการขับลึก เพื่อให้อะตอมสารเจือที่เกิดขึ้นในส่วนของ P - Well มีความลึกที่

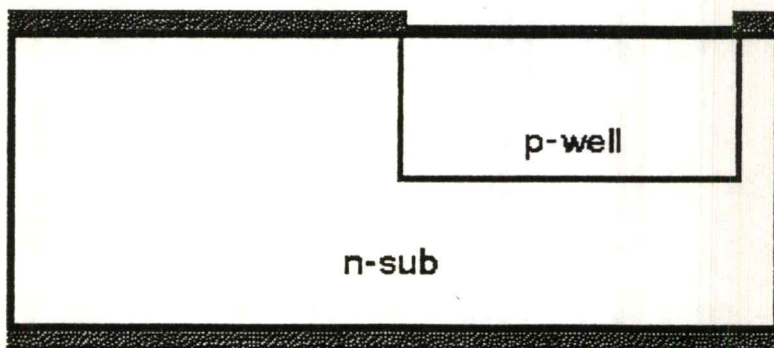
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมในการสร้าง เอ็มมอส ต่อไป โดยทำการขัปลิกที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และหลังจากนั้นก็เปลี่ยนเป็นอัตราการไหลของไนโตรเจน 1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 5.8 แสดงภาพของเตาแพร่สารเจือ

หลังจากผ่านกระบวนการขัปลิกแล้ว โครงสร้างของชิ้นงานจะเป็นดังรูป 5.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.9 แสดงภาพในภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนหลังจากการสร้าง P - Well  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.15 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์กที่ 2 (P<sup>+</sup>)

เป็นกระบวนการถ่ายแบบเพื่อทำการแพร่สารเจือในส่วนของพีมอส ต่อไปโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบไล่ความชื้นที่ 120 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เคลือบนำยาไวแสงชนิดลบ (Way Coat) ด้วยเครื่อง สปินเนอร์ ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที
- ปรับตำแหน่งของกระจกต้นแบบ ให้มีตำแหน่งที่ถูกต้องตรงกับแผ่นผลึกด้วยเครื่องปรับตำแหน่ง
- ทำการ ล้าง ฟิล์ม โดยจุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานลงใน Xylene 2 แก้ว แก้วละ 90 วินาที
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานลงใน Isopropyl Alcohol 3 แก้วๆละ 30 วินาที
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 10 นาที
- ทาน้ำยา ไวแสงชนิดลบด้านหลังแผ่น
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที

### 5.16 การกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

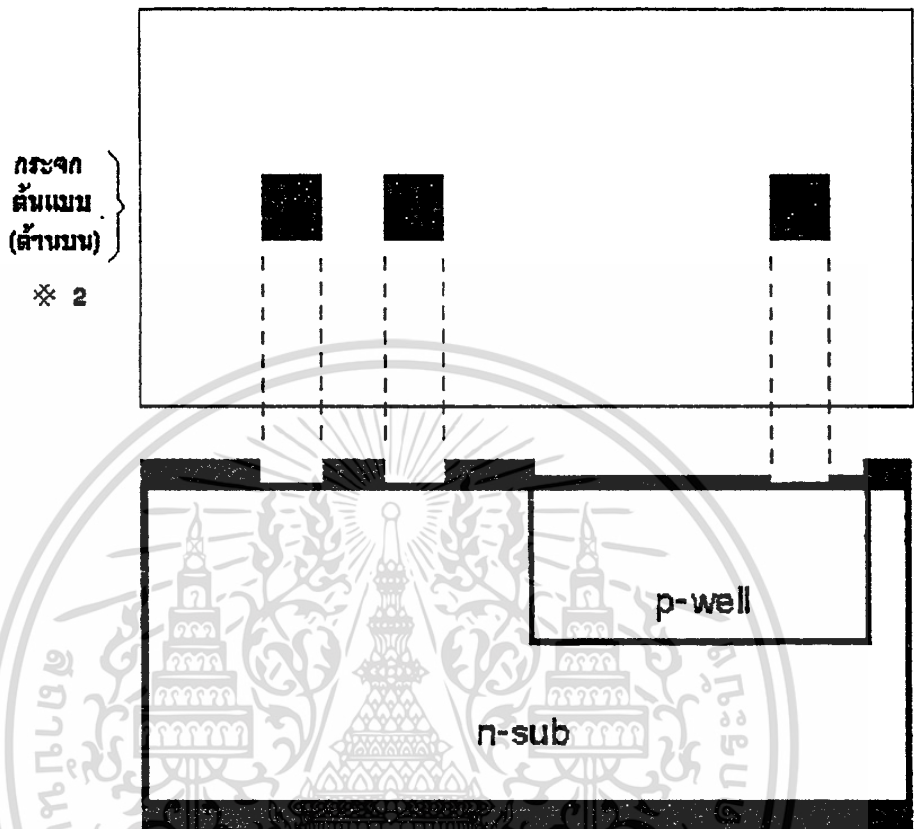
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในสารละลาย บัฟเฟอร์ (Buffer ) จนกระทั่งเห็นว่าออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการ ถูกกัดออกจนหมด
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.17 กระบวนการลอกฟิล์ม

เมื่อทำการสักรัชั้นออกไซด์ได้ตามต้องการแล้ว ต้องทำการลอกฟิล์มตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ดมน้ำใน H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์
- ดมในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงภาพของกระจกคัตแบบในมาร์คที่ 2 และภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอน เมื่อผ่านกระบวนการลอกฟิล์มเสร็จแล้ว

#### 5.18 การทำความสะอาดผิวหน้า

- คัมใน ไตร โคลเอ็ท ไรลีน 5 นาที เพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นผลึกชิ้นงาน
- อุลตราโซนิค ใน อะซีโตน 2 นาทีเพื่อล้าง ไตร โคลเอ็ท ไรลีน
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว

#### 5.19 กระบวนการ ซไลซ์ เอชซิง

- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 5% (HF 5%) 10 วินาที
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

#### 5.20 กระบวนการ โบรอน เดปโซิชัน (Boron deposition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใจขอสงวนสิทธิ์ใน  
 ขั้นตอนที่ต่อไป  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Deposited ในบรรยากาศที่มีอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.7 ลิตร/นาที เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็นบรรยากาศที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 5 นาที

### 5.21 กระบวนการลอกชั้น โบรอน-กลาส

เป็นการสกัดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการแพร่สารเจือ ทำได้ดังต่อไปนี้

- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.22 การทำความสะอาดผิวหน้า

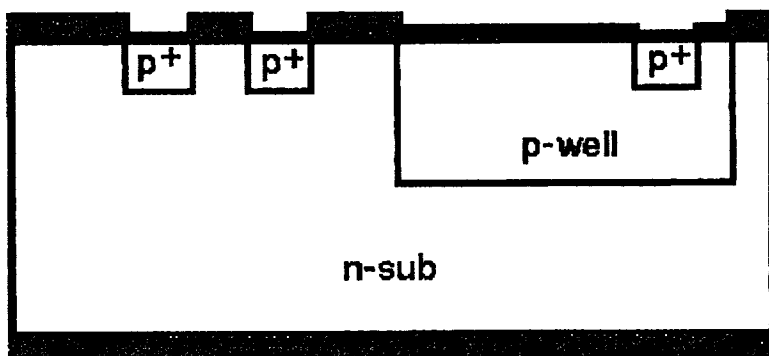
- ดั้มใน ไตรโคโลเอท โซลีน 5 นาที เพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน
- อุลตราโซนิค ใน อะซีโตน 2 นาทีเพื่อล้าง ไตรโคโลเอท โซลีน
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.23 กระบวนการ Boron Drive-in

เป็นกระบวนการขับลึก ในส่วนของขา เครน-ซอส ของพีมอส โดยใช้อุณหภูมิของเขา 1,100 องศาเซลเซียส มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทำการขับลึกโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง ด้วยการนำแผ่นผลึกชิ้นงาน เข้าสู่บรรยากาศ ที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1.1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 30 นาที
- ทำการขับลึกโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น ด้วยการนำแผ่นผลึกชิ้นงานเข้าสู่บรรยากาศ ที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1.1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 30 นาที
- ทำการขับลึกโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง ด้วยการนำแผ่นผลึกชิ้นงานเข้าสู่บรรยากาศ ที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1.1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 30 นาที

หลังจากผ่านขั้นตอนนี้โครงสร้างของชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 5.11



### 5.24 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาตรฐานที่ 3 ( $n^+$ )

กระบวนการนี้เป็นการถ่ายแบบเพื่อทำการเปิดช่องให้เป็นช่องที่ขาซอส-เดรนของเอ็นมอส สำหรับแพร์สารเจือชนิดเอ็น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบไล่ความชื้นที่ 120 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เคลือบนำยาไวแสงชนิดลบ (Way Coat) ด้วยเครื่อง สปินเนอร์ ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที
- ปรับตำแหน่งของกระจกต้นแบบ ให้มีตำแหน่งที่ถูกต้องตรงกับแผ่นผลึกด้วยเครื่องปรับตำแหน่ง

ทำการ ล้าง ฟิล์มโดย

- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานลงใน Xylene 2 แก้ว ๆ ละ 90 วินาที
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานลงใน Isopropyl Alcohol 3 แก้ว ๆ ละ 30 วินาที
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 10 นาที
- ทาด้านหลังแผ่นด้วยนำยาไวแสงชนิดลบ
- อบแผ่นที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที

### 5.25 การใช้สารละลายกัดออกไซด์ (Oxide Etching)

เป็นการสกัดซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อทำการเปิดช่องสำหรับแพร์สารเจือชนิดเอ็นในส่วน ของขา เดรน - ซอส ของ เอ็นมอส ทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

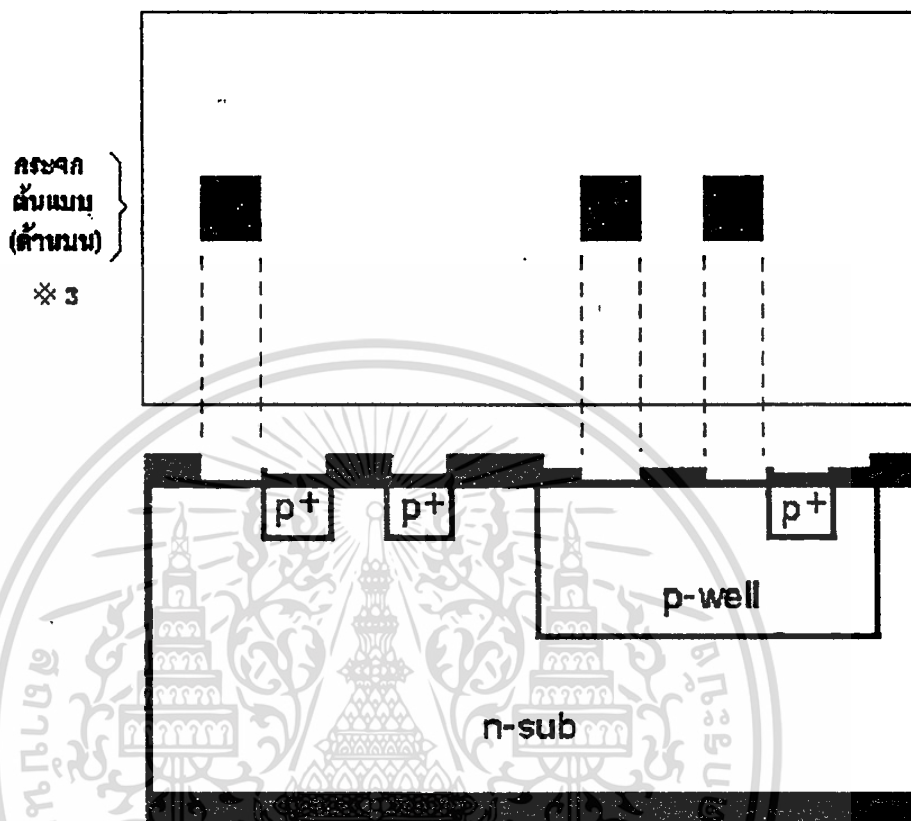
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลาย บัฟเฟอร์ ประมาณ 5 นาที
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.26 กระบวนการลอกฟิล์ม

เมื่อทำการสกัดออกไซด์ ได้ช่องที่จะทำการแพร์สารเจือแล้ว ต้องทำการลอกฟิล์มที่ เคลือบไว้ ออก โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ดมน้ำใน  $H_2SO_4$  2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์
- ดมในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน



รูปที่ 5.12 ภาพของกระจกต้นแบบในมาร์กที่ 3 และภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนเมื่อผ่านกระบวนการลอกฟิล์มเสร็จแล้ว

### 5.27 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอน

ในขั้นตอนนี้คือการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอนแบบมาตรฐาน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ดัมใน ไตรโคโลเอท์โซลีน 5 นาที เพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน
- อุลตราโซนิค ใน อะซีโตน 2 นาทีเพื่อล้าง ไตรโคโลเอท์โซลีน
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.28 กระบวนการ ซไอซ เอชซีง

- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 5% (HF 5%) 10 วินาที
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.29 กระบวนการ ฟอสฟอรัส เดปโทซิชัน (Phosphorus Deposition)

กระบวนการนี้เป็นการแพร่สารเจือชนิด เอ็น เพื่อสร้างเป็นส่วนของขา ซอส - เครื่องของ เอ็น มอส ทำได้โดยอาศัยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง โดยการนำแผ่นผลึกชิ้นงานเข้าสู่บรรยากาศของ ไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.7 ลิตร/นาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส

### 5.30 กระบวนการลอกชั้น ฟอสฟอรัส กลาส (Phosphorus glass)

เป็นการสกัดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการแพร่สารเจือ ทำได้ดังต่อไปนี้

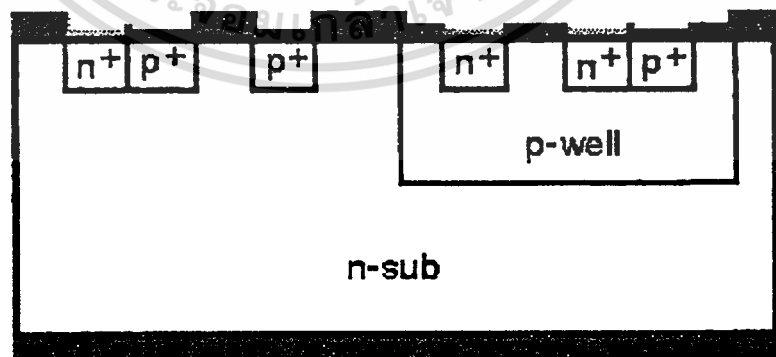
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.31 การทำความสะอาดผิวหน้า

- ดับใน ไตรโคโลเอท์ โซลีน 5 นาที เพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน
- อุลตราโซนิค ใน อะซีโตน 2 นาทีเพื่อล้าง ไตรโคโลเอท์ โซลีน
- จุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.32 กระบวนการ ขับลิท

เป็นกระบวนการขับลิทเพื่อให้ได้ความลึกของรอยต่อที่เอ็นมอสตามต้องการ โดยใช้ อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส โดยใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น ด้วยการนำแผ่นผลึกชิ้นงาน เข้าสู่บรรยากาศ ที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1.1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากผ่านขั้นตอนนี้โครงสร้างของชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 โครงสร้างของ แผ่นผลึกชิ้นงานที่ผ่านการแพร่สารเจือทั้งหมด

### 5.33 กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟีที่ มาดค์ที่ 4 (Gate Oxide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

เอ็นมอส และ ฟิมอส โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบไล่ความชื้นที่ 120 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เคลือบนำยาไวแสงชนิดลบ (Way Coat) ด้วยเครื่อง สปินเนอร์ ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที
- ปรับตำแหน่งของกระจกต้นแบบ ให้มีตำแหน่งที่ถูกต้องตรงกับแผ่นผลึกด้วยเครื่องปรับตำแหน่ง

#### ทำการ ล้าง ฟิล์มโดย

- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานลงใน Xylene 2 แก้ว ๆ ละ 90 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานลงใน Isopropyl Alcohol 3 แก้วๆ ละ 30 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที

#### 5.34 การกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในสารละลาย บัฟเฟอร์ สังกะจนกระทั่งออกไซด์บริเวณส่วนเกท ถูกกัดออกหมด
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

#### 5.35 กระบวนการลอกฟิล์ม

เมื่อทำการสกัดชั้นออกไซด์ได้ตามต้องการแล้ว ต้องทำการลอกฟิล์มตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ดม้มน้ำใน  $H_2SO_4$  2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์
- ดม้มน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

#### 5.36 การทำความสะอาดผิวหน้า

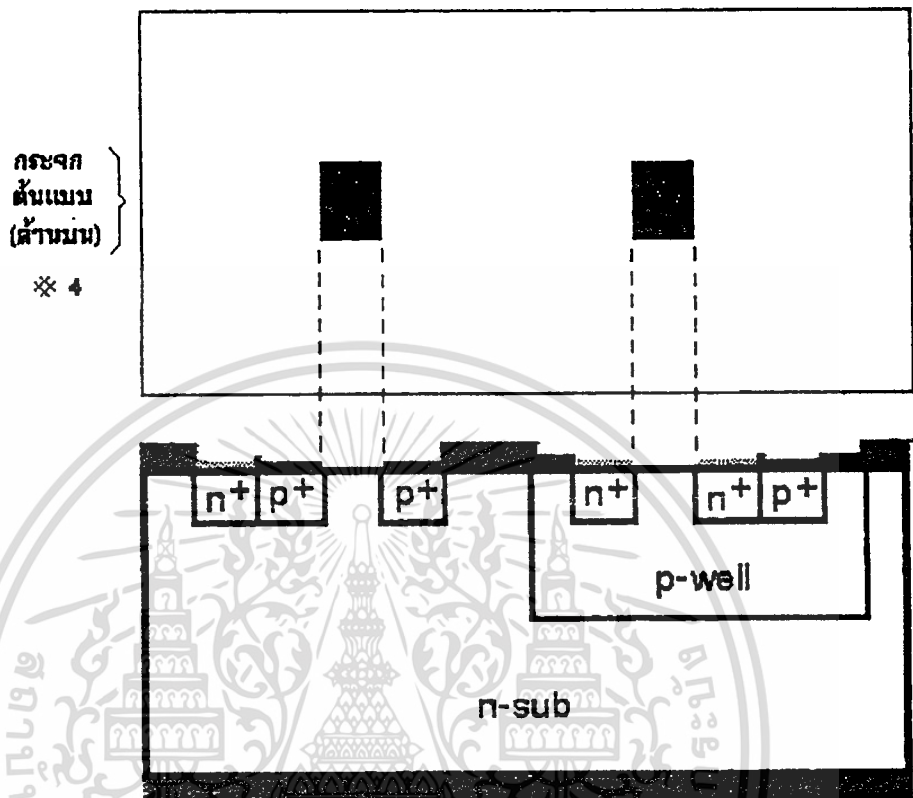
- ดม้มน้ำ ไตรโคโลเอทโรลีน 5 นาที เพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน
- อุลตราโซนิค ใน อะซีโตน 2 นาทีเพื่อล้าง ไตรโคโลเอทโรลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ เป้าแห้งด้วยไนโตรเจนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.37 กระบวนการ ซิลิซ เอชซิง

- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 5% (HF 5%) 10 วินาที



รูปที่ 5.14 แสดงภาพของกระจกต้นแบบในมาร์กที่ 4 และภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนเมื่อผ่านกระบวนการลอกฟิล์มเสร็จแล้ว

- รุ่มแผ่นผลึกซิลิกอนในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว

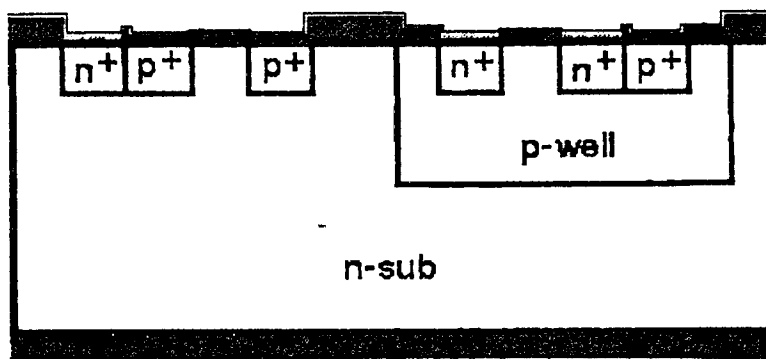
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.38 กระบวนการสร้างเกตออกไซด์ (Gate Oxidation)

เป็นกระบวนการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ขาทของทั้ง เอ็นมอส และ ฟิมอส โดยอาศัยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง ที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำแผ่นผลึกชิ้นงานเข้าสู่บรรยากาศ ที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1.1 ลิตร/นาทื เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 10 นาที

- นำแผ่นผลึกชิ้นงานเข้าสู่บรรยากาศที่มีอัตราการไหลของไนโตรเจน 1 ลิตร/ นาทื เป็นเวลา 10 นาที หลังจากผ่านขั้นตอนที่ 5.38 แล้วจะได้โครงสร้างของแผ่นผลึกชิ้นงานดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 โครงสร้างของแผ่นผลึกชิ้นงานหลังจากสร้างเกตออกไซด์

### 5.39 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์คที่ 5 (Contact)

เป็นกระบวนการถ่ายแบบเพื่อทำการเปิดช่องสำหรับสร้างเป็นจุดสัมผัส ออกสู่ภายนอก โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบไล่ความชื้นที่ 120 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way Coat) ด้วยเครื่อง สปินเนอร์ ที่ ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที
- ปรับตำแหน่งของกระจกค้นแบบ ให้มีตำแหน่งที่ถูกต้องตรงกับแผ่นผลึกด้วยเครื่องปรับตำแหน่ง (Alignment Expose)

ทำการ ล้าง ฟิล์มโดย

- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานลงใน Xylene 2 แก้ว ๆ ละ 90 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานลงใน Isopropyl Alcohol 3 แก้ว ๆ ละ 30 วินาที
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที

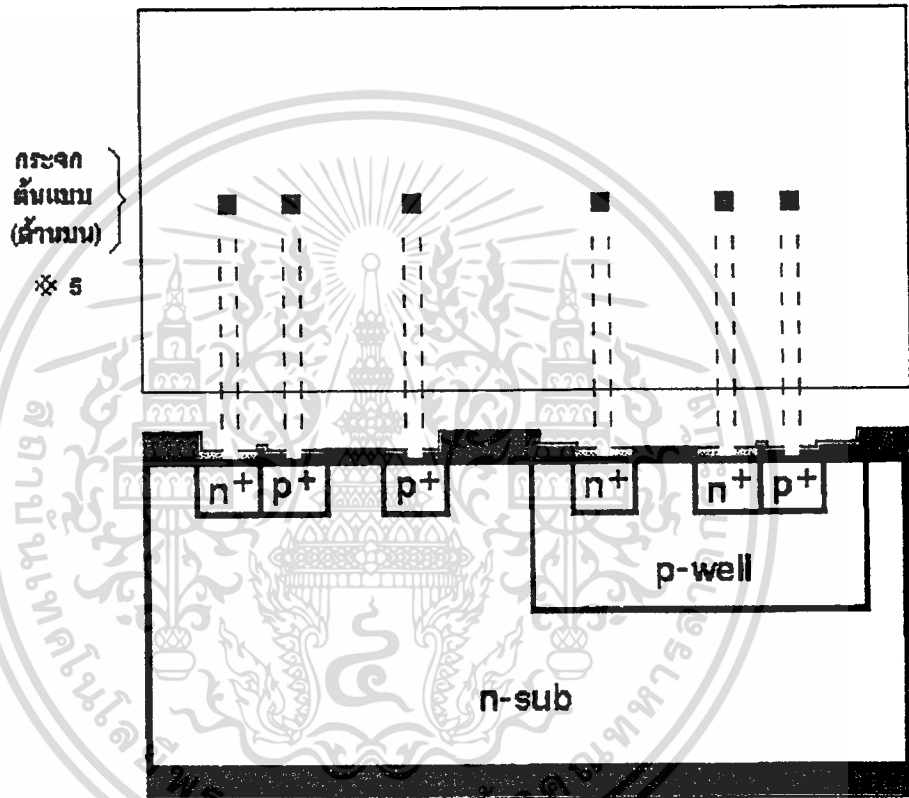
### 5.40 การกัดล้างออกไซด์ (Oxide Etching)

- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงาน ในสารละลาย Buffer
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงาน ในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

### 5.41 กระบวนการลอกฟิล์ม

เมื่อทำการสกัดชั้นออกไซด์ได้ตามต้องการแล้ว ต้องทำการลอกฟิล์มตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คัดน้ำใน  $H_2SO_4$  2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์
- คัดน้ำในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน



รูปที่ 5.16 แสดงภาพของกระจกต้นแบบในมาร์คที่ 5 และภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนเมื่อผ่านกระบวนการลอกฟิล์มเสร็จแล้ว

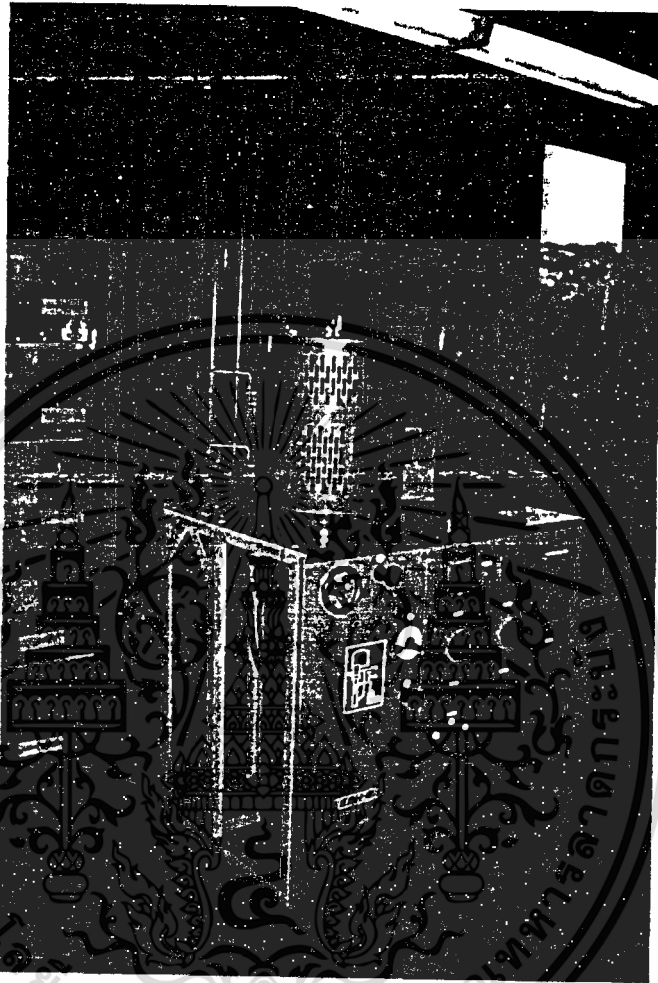
#### 5.42 การทำความสะอาดผิวหน้า

- คัดน้ำใน ไตรโคโลเอท ไซลีน 5 นาที เพื่อละลายไขมันที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นผลึกชิ้นงาน
- อุลตราโซนิค ใน อะซีโตน 2 นาทีเพื่อล้าง ไตรโคโลเอท ไซลีน
- รุ่มแผ่นผลึกชิ้นงานในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

#### 5.43 กระบวนการเคลือบชั้นอะลูมิเนียม ในสูญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator

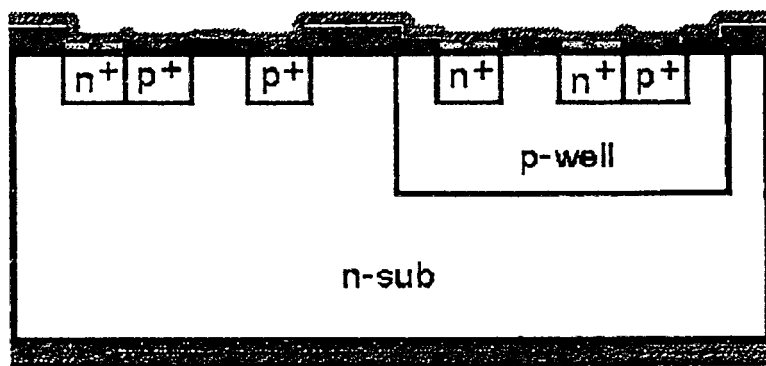
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เป็นกระบวนการสร้างชั้นอะลูมิเนียมเคลือบแผ่นชิ้นงาน เพื่อใช้ในการสร้างลวดลาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุแต่สงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมต่อไป โดยเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศ ด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator ที่ความดัน  $2 \times 10^{-6}$  Torr ให้ได้ความหนาของอะลูมิเนียม ประมาณ 1 ไมครอน



รูปที่ 5.13 เครื่องเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Evaporator)

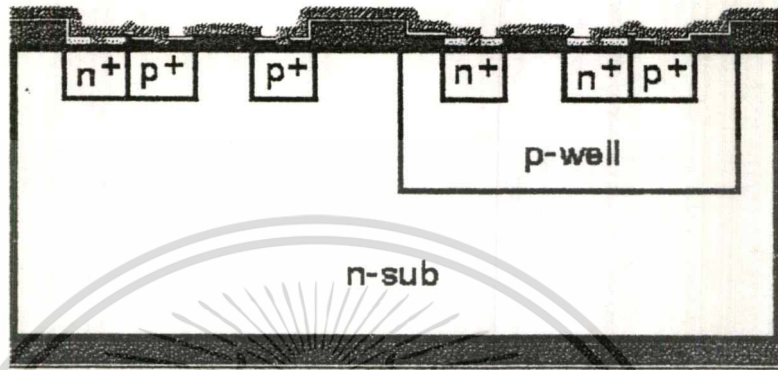
หลังจากผ่านการเคลือบอะลูมิเนียมแล้วจะเป็นดังรูปที่ 5.18



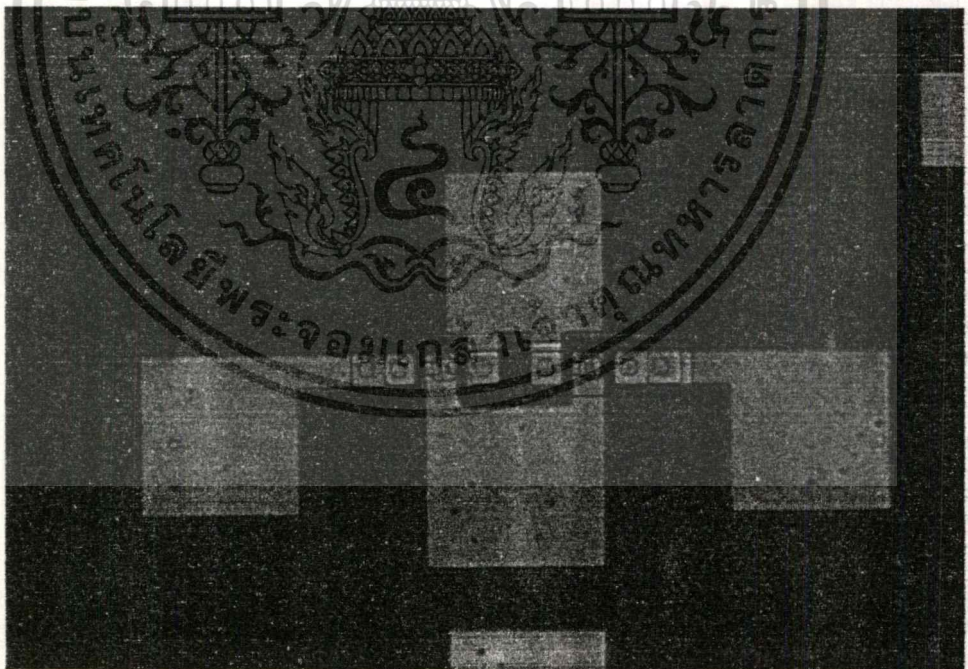
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด รุที่ 5.18 แสดงภาพตัดขวางแผ่นซิลิกอน ที่ผ่านกระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมด้วยสุญญากาศ



อินเวอร์เตอร์ แนนเกต และนอเกตที่สมบูรณ์ สามารถนำไปทำการทดลองวัดหาคุณสมบัติต่าง ๆ ได้โดยมีโครงสร้างในภาคตัดขวางแสดงในรูปที่ 5.19 และ ภาพลวดลายทางกายภาพด้านบน แสดงในรูปที่ 5.20 -5.22

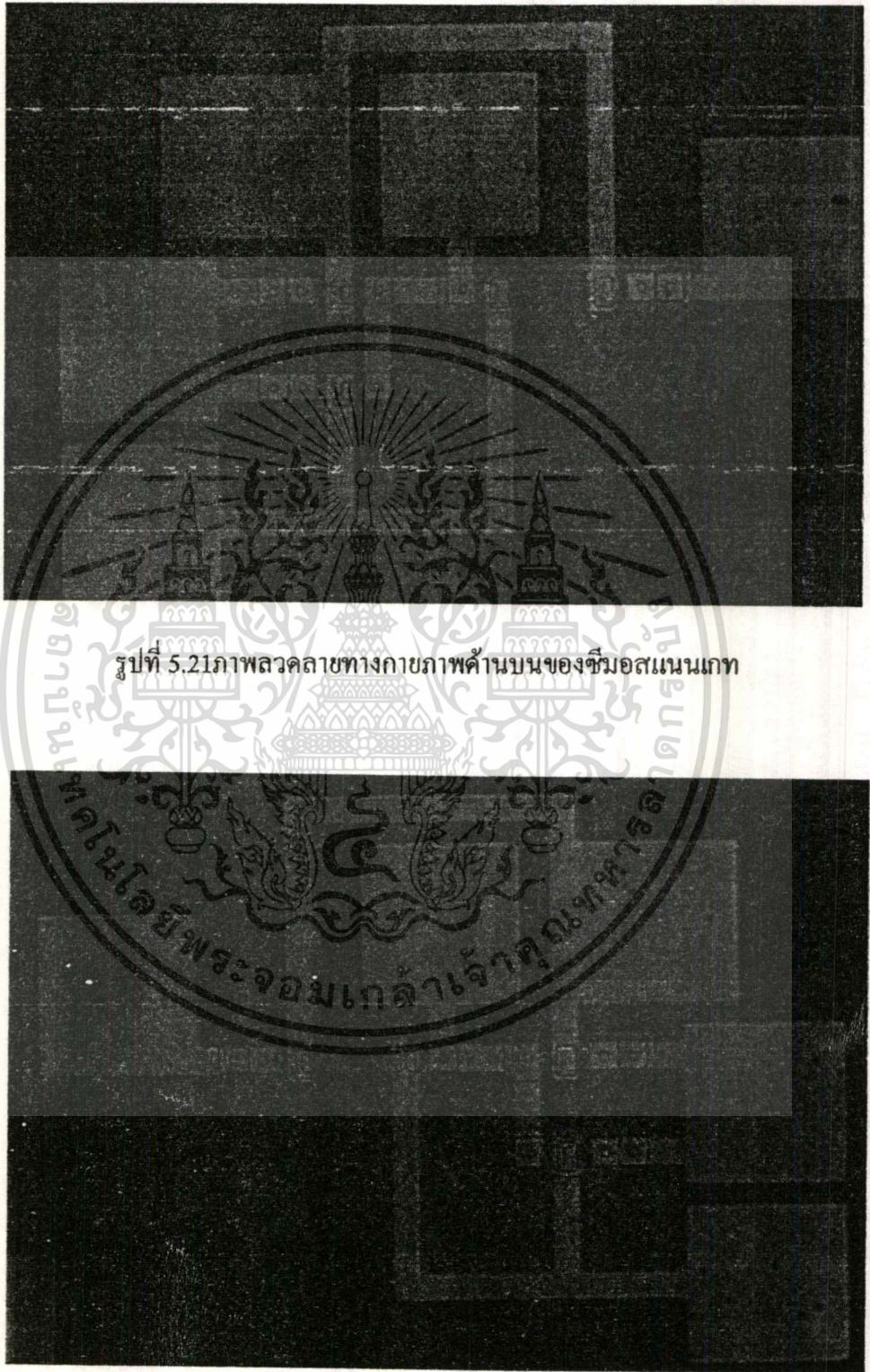


รูปที่ 5.19 โครงสร้างของ ซีมอส เมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 5.20 ภาพลวดลายทางกายภาพด้านบนของซีมอสอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ภาพลวดลายทางกายภาพด้านบนของซีโมสแนนเกท

รูปที่ 5.22 ภาพลวดลายทางกายภาพด้านบนของซีโมสนอเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การทดลองและผลการทดลอง

ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สิ่งสำคัญที่จะต้องทราบคือ คุณสมบัติต่าง ๆ เช่น แรงดันขีดเริ่ม แรงดันพังทลาย คุณสมบัติทางกระแสและแรงดัน และอื่น ๆ เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งาน รวมถึงลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งเกิดจากการสร้างตามกรรมวิธีที่กำหนดขึ้น จากทฤษฎีและการคำนวณที่เกี่ยวข้อง เพื่อเกิดการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ ทำให้ได้แนวความคิด ในการสร้างอุปกรณ์ที่ดีและมีประสิทธิภาพตามต้องการ รวมไปถึงสามารถสร้างอุปกรณ์ได้ตามต้องการ

ในบทที่ 6 นี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดีไวซ์ที่ได้สร้างขึ้น เพื่อความชัดเจนและง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- การวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ในขณะที่ทำการสร้าง
- การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า
- การใช้คอมพิวเตอร์จำลองผล ( Simulated )

#### 6.1 การวัดคุณสมบัติในขณะที่ทำการสร้าง

##### 6.1.1 วัดความหนาของแผ่นซิลิกอน

โดยใช้เครื่องวัดความหนาดังรูปที่ 6.1

จากการวัดจะได้ค่าความหนา ( $t_c$ )  $\cong$  400 ไมครอน

6.1.2 การวัดหาค่า ความต้านทานที่ผิว ( sheet resistivity ) ของแผ่นซิลิกอนที่ใช้เป็นฐานรอง และชนิดของอะตอมฉาบเจือพื้นฐาน โดยใช้ โฟร์พอยท์โพรบ ( four point probe )

- จากการวัดจะได้ แผ่นซิลิกอนชนิด n
- ความต้านทานที่ผิว ( $\rho_s$ ) = 84.05 ohm/square

6.1.3 นำค่าต่างๆที่ได้ในข้อ 6.1.1 และ 6.1.2 มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมฉาบเจือพื้นฐาน ( $N_{BG}$ )

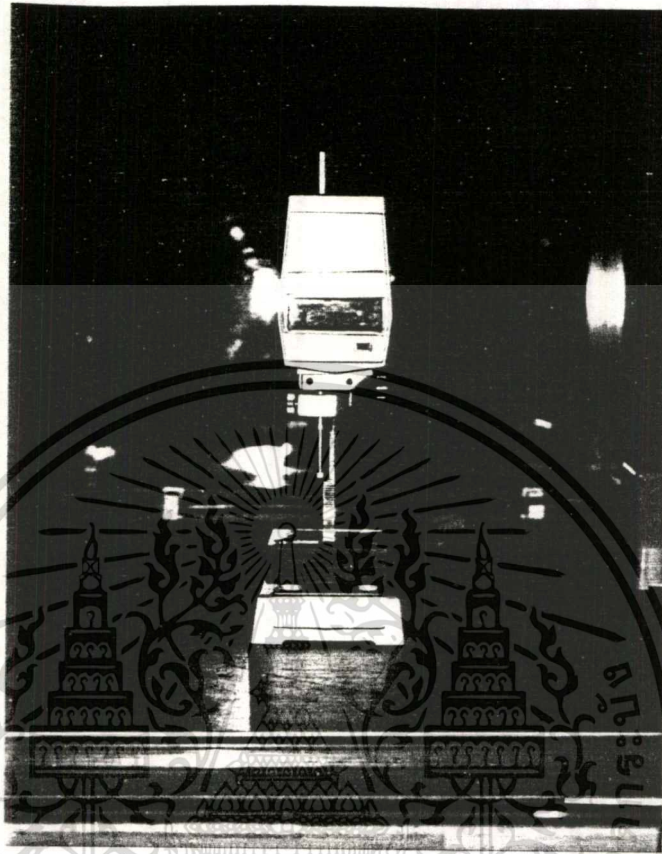
จะได้

$$N_{BG} = 1 / (84.05 \times 400 \times 10^{-4} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1,300)$$

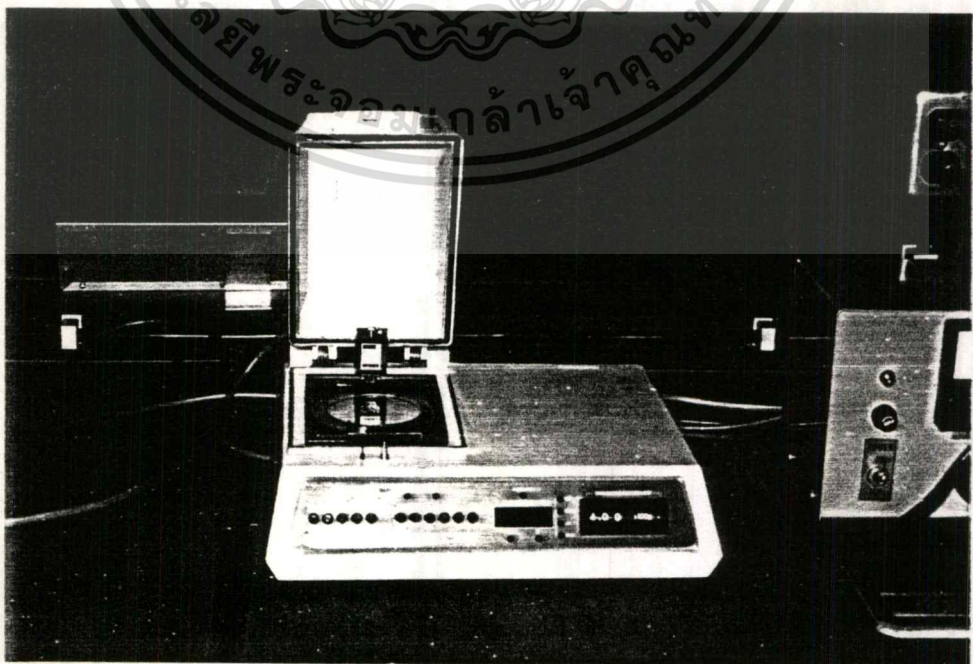
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $N_{BG}$  คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือชนิด เอ็น บริเวณฐานรอง



รูปที่ 6.1 เครื่องวัดความหนา



รูปที่ 6.2 เครื่อง Four point probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.4 ผลของการสร้างออกไซด์ครั้งแรก

จากบทที่ 5 ข้อ 5.5 กระบวนการออกซิเดชันทั้งแบบแห้งและแบบชื้น จะได้สีของออกไซด์เป็นสีเขียว (Blue Green) ออกไซด์ในส่วนนี้จะใช้เป็นหน้าากปกป้องกันการแพร่สารเจือ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบสีกับตารางที่ 6.1 จะได้ความหนาของออกไซด์ประมาณ 5,000 อังสตรอม

Film thickness. $\mu\text{m}$	Color and comments	Film thickness. $\mu\text{m}$	Color and comments
0.05	Tan	0.63	Violet red
0.07	Brown	0.68	"Bluish" (Not blue but borderline between violet and blue green. It appears more like a mixture between violet red and blue green and looks grayish)
0.10	Dark violet to red violet		
0.12	Royal blue		
0.15	Light blue to metallic blue		
0.17	Metallic to very light yellow green		
0.20	Light gold or yellow—slightly metallic	0.72	Blue green to green (quite broad)
0.22	Gold with slight yellow orange	0.77	"Yellowish"
0.25	Orange to meion	0.80	Orange (rather broad for orange)
0.27	Red violet	0.82	Salmon
0.30	Blue to violet blue	0.85	Dull, light red violet
0.31	Blue	0.86	Violet
0.32	Blue to blue green	0.87	Blue violet
0.34	Light green	0.89	Blue
0.35	Green to yellow green	0.92	Blue green
0.36	Yellow green	0.95	Dull yellow green
0.37	Green yellow	0.97	Yellow to "yellowish"
0.39	Yellow	0.99	Orange
0.41	Light orange	1.00	Carnation pink
0.42	Carnation pink	1.02	Violet red
0.44	Violet red	1.05	Red violet
0.46	Red violet	1.06	Violet
0.47	Violet	1.07	Blue violet
0.48	Blue violet	1.10	Green
0.49	Blue	1.11	Yellow green
0.50	Blue green	1.12	Green
0.52	Green (broad)	1.18	Violet
0.54	Yellow green	1.19	Red violet
0.56	Green yellow	1.21	Violet red
0.57	Yellow to "yellowish" (not yellow but is in the position where yellow is to be expected. At times it appears to be light creamy gray or metallic)	1.24	Carnation pink to salmon
		1.25	Orange
		1.29	"Yellowish"
		1.32	Sky blue to green blue
		1.40	Orange
		1.45	Violet
0.58	Light orange or yellow to pink borderline	1.46	Blue violet
		1.50	Blue
0.60	Carnation pink	1.54	Dull yellow green

ตารางที่ 6.1 แสดงสีของออกไซด์ ที่ความหนาต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

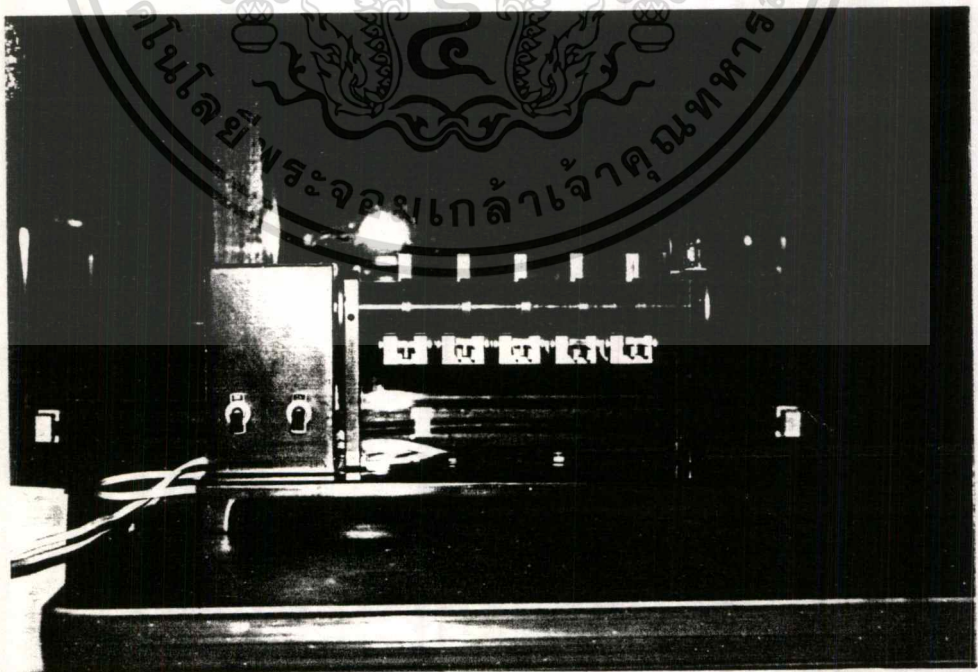
### 6.1.5 ผลของการขั้วลึกลับที่ P-Well

จากบทที่ 5 ข้อ 5.14 หลังจากที่ทำการแพร่สารเจือผสมแล้วก็ทำการนำแผ่นซิลิกอนมาทำการขั้วลึกลับซึ่งหมายถึง การทำให้สารเจือแพร่เข้าไปในบริเวณส่วนของ บ่อแยกชนิด พี (P-Well) เพื่อให้อะตอมสารเจือแพร่ลึกลงไป ตามที่เราต้องการ

โดยนำแผ่นผลึกชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขั้วลึกลับ (แผ่นทดสอบ) ไปเข้าเครื่อง Four point probe ดังรูปที่ 6.2 จะได้ค่าดังนี้

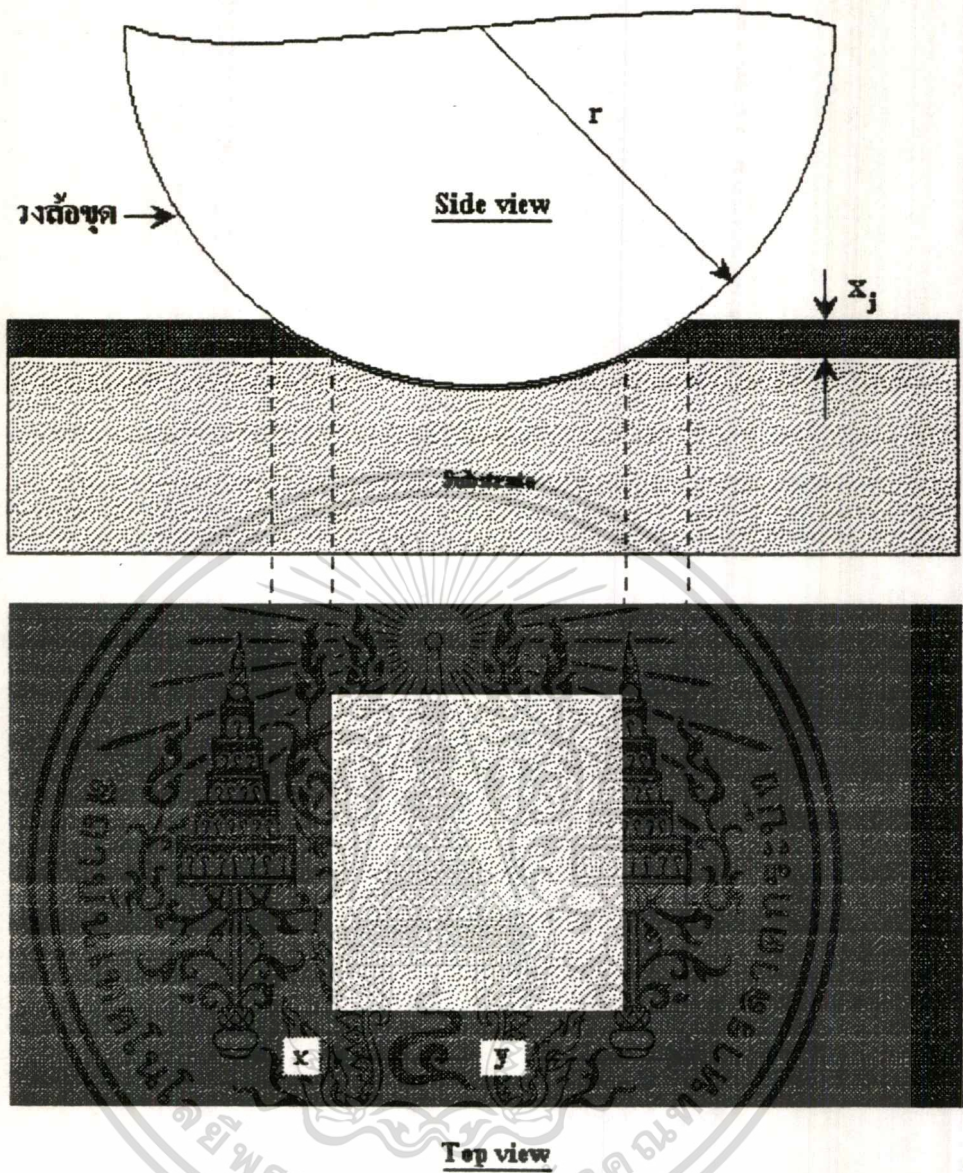
- อะตอมสารเจือ ชนิด  $p$
- ความต้านทานที่ผิว ( $\rho_s$ ) = 960 ohm/square

- นำแผ่นผลึกชิ้นงาน(แผ่นทดสอบ)ไปเข้าเครื่อง grooving เพื่อที่จะหาค่าความลึกของอะตอมสารเจือชนิด พี ที่แพร่ลงไป เครื่อง grooving แสดงในรูปที่ 6.3
- นำแผ่นผลึกที่ได้จากการgroove ไปกัดสีเพื่อทำให้เกิดชั้นของอะตอมสารเจือที่แพร่ลงไป และอะตอมสารเจือพื้นฐาน
- นำแผ่นผลึกชิ้นงานที่ผ่านการกัดสีด้วยน้ำยา Strain Etch แล้วนำไปเข้ากล้องจุลทรรศน์เพื่อคำนวณหาค่า  $X_j$



รูปที่ 6.3 แสดงเครื่อง grooving

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 แสดงภาพของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขุดด้วยเครื่อง grooving

สูตรการคำนวณ

$$X_j = \frac{xy}{D}$$

(6.1 - 1)

เมื่อ  $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของวงล้อชุด (มีค่าเท่ากับ 4 เซนติเมตร)

- ผลของการคำนวณจะได้ค่า  $X_j = 3.5$  ไมครอน

- ค่าวนหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ที่แพร่ลงไปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 3.72 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

เพราะฉะนั้น

จำนวนความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วนของ P-Well เท่ากับ  $3.72 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

#### 6.1.6 ผลของการขั้วลึกลับที่ ซอส-เดรน ของพีมอส

หลังจากผ่านกระบวนการขั้วลึกลับทั้งแบบแห้งและแบบชื้นแล้ว นำแผ่นผลึกชิ้นงาน (แผ่นทดสอบ) ไปวัดหาค่า ความต้านทานที่ผิว ชนิดของอะตอมสารเจือ ความลึกของรอยต่อ และความหนาแน่นอะตอมสารเจือ จะ ได้

- อะตอมสารเจือชนิด P
- ความต้านทานที่ผิว ( $\rho_s$ ) = 43 ohm/square
- $X_j = 1.5$  ไมครอน
- กำหนดหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่ลงไปดังนี้

$$Na = 1 / (43 \times 1.5 \times 10^{-4} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 500)$$

$$= 1.94 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

เพราะฉะนั้น

จำนวนความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วนของ ซอสและเดรน ของพีมอส มีค่าเท่ากับ  $1.94 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

#### 6.1.7 ผลของการขั้วลึกลับที่ ซอส-เดรน ของเอ็นมอส

จากบทที่ 5 ข้อ 5.32 หลังจากผ่านกระบวนการขั้วลึกลับแบบชื้นแล้ว นำแผ่นผลึกชิ้นงาน (แผ่นทดสอบ) ไปวัดหาค่า ต่าง ๆ ดังนี้

- อะตอมสารเจือชนิด n
- ความต้านทานที่ผิว ( $\rho_s$ ) = 10 ohm/square
- $X_j = 1$  ไมครอน

- กำหนดหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่ลงไปดังนี้

$$Nd = 1 / (10 \times 1 \times 10^{-4} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1,300)$$

$$= 4.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

เพราะฉะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
จำนวนความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วนของซอสและเดรน ของเอ็นมอส มีค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ  $4.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

### 6.1.8 ผลของการสร้างแก๊สออกไซด์

เป็นกระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ที่เกทเพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 850 อังสตรอม เมื่อแผ่นผลึกชิ้นงานได้ผ่านกระบวนการเสร็จเรียบร้อยแล้ว สังเกตสีที่ได้จะเป็นสีน้ำตาล (Brown) เมื่อนำสีที่ได้ไปเทียบกับตารางที่ 6.1 จะได้ความหนาของออกไซด์ประมาณ 700 อังสตรอม

เมื่อผ่านกระบวนการสร้างทุกขั้นตอน ตามบทที่ 5 เราจะได้ผลึกชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ พร้อมทั้งจะนำไปวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ต่อไป

### 6.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะทำการวัดภายหลังดำเนินการสร้างเสร็จแล้วทุกกระบวนการ โดยจะเริ่มวัดคุณสมบัติเบื้องต้นของเอ็นมอส และพีมอสก่อน โดยใช้แผ่นใช้แผ่นซิมอสอินเวอร์เตอร์ ทั้งนี้ก็เพื่อว่าข้อมูลที่ได้จาก ซิมอสอินเวอร์เตอร์นี้จะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์การทำงานของซิมอสแนน และนอกเกตต่อไป

แผนผังของตัววัด วัชของแผ่นซิมอสอินเวอร์เตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 6.5

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	C	D	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{40}{40}$	$\frac{40}{40}$	$\frac{60}{60}$	$\frac{60}{60}$
B	$\frac{80}{80}$	$\frac{80}{80}$	C	D	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{120}{120}$	$\frac{120}{120}$
C	$\frac{60}{40}$	$\frac{60}{40}$	$\frac{80}{40}$	$\frac{80}{40}$	C	D	$\frac{100}{40}$	$\frac{100}{40}$
D	$\frac{120}{40}$	$\frac{120}{40}$	$\frac{60}{40}$	$\frac{60}{40}$	$\frac{80}{40}$	$\frac{80}{40}$	C	D
E	$\frac{40}{60}$	$\frac{40}{60}$	C	D	$\frac{40}{80}$	$\frac{40}{80}$	$\frac{40}{100}$	$\frac{40}{100}$
F	C	D	$\frac{40}{120}$	$\frac{40}{120}$	$\frac{40}{60}$	$\frac{40}{60}$	$\frac{40}{80}$	$\frac{40}{80}$

รูปที่ 6.5 แสดงแผนผังการสร้างตัวอุปกรณ์บนแผ่น ซิลิกอนที่เป็นแผ่นซิมอสอินเวอร์เตอร์

C หมายถึง ตำแหน่งที่ใช้ทดสอบความเป็นคาปาซิเตอร์

D หมายถึง ตำแหน่งที่ใช้ทดสอบความเป็นไดโอด

$\frac{W_1}{W_2}$  หมายถึง ความกว้างของแชนเนลของเอ็นมอส/ความกว้างของแชนเนลของพีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

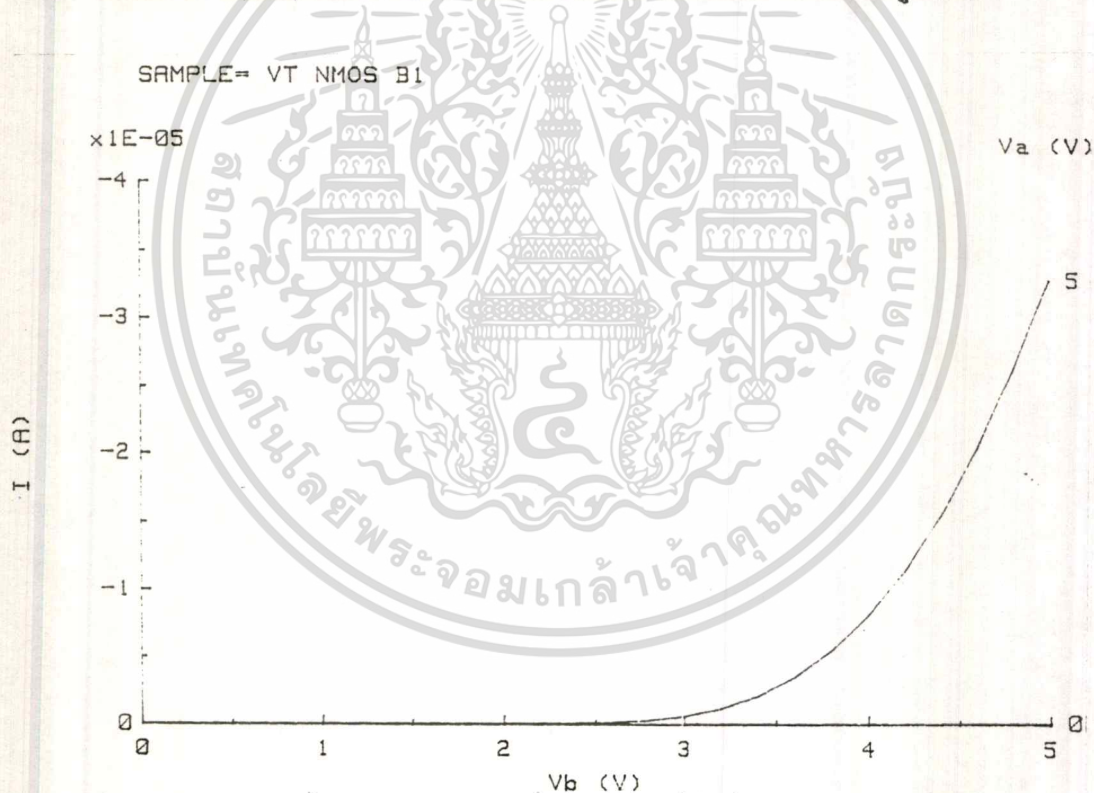
เช่น  $\frac{120}{40}$  ก็หมายถึง ซีโมสอินเวอร์เตอร์ 1 ตัว ที่มีความกว้างแชนแนลของ เอ็นมอส และพีมอสเท่ากับ 120 และ 40 ไมครอน ตามลำดับ

\*หมายเหตุ ความยาวของแชนแนลของดีไวซ์ทุกตัวยาวเท่ากับ 20 ไมครอน

## 6.2.1 การวัดแรงดันขีดเริ่ม

### 6.2.1.1 การวัดแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอส

ทำได้โดยการป้อนโปรแกรมควบคุมให้เครื่อง HP-4061A ให้  $V_a$  เป็น  $V_{dd}$  ที่มีค่าเป็นบวกป้อนเข้าที่ขาเดรน และ  $V_b$  เป็น  $V_g$  คือแรงดันที่ป้อนให้กับขาเกต(มีค่าเป็นบวก) ให้กับเอ็นมอส หลังจากทีรัน(Run) โปรแกรมจะได้กราฟของ แรงดันขีดเริ่มดังแสดงในรูปที่ 6.6

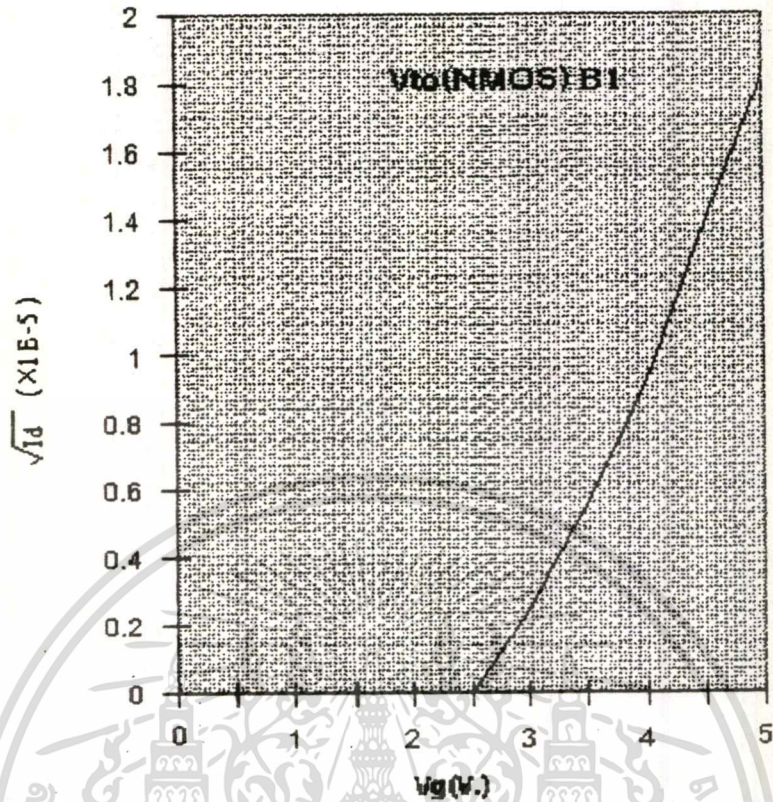


รูปที่ 6.6 กราฟที่ได้จากการวัดแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอส B1

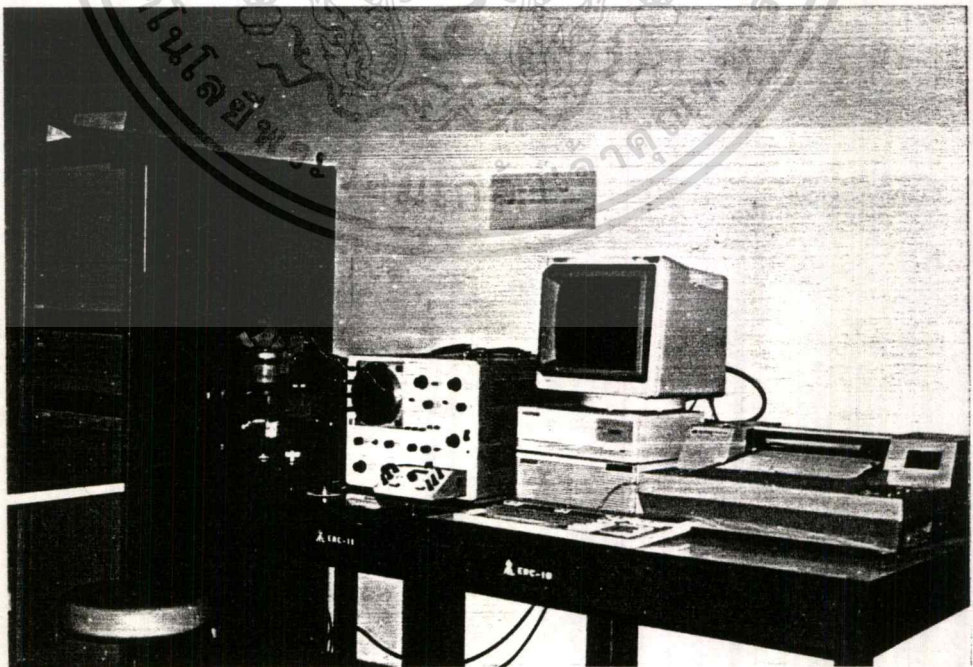
จากกราฟรูปที่ 6.6 สามารถนำค่ากระแสเดรน ( $I_d$ ) มาหารากที่สอง แล้วนำมาพล็อตกับ  $V_g$  ใหม่ ดังรูปที่ 6.7 ก็จะได้ค่าแรงดันขีดเริ่มที่ต้องการ

จากรูปที่ 6.7 จะได้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{to}$ ) ของเอ็นมอสเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $V_{ion}$  วิชาการศึกษา 2.5 น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงการพล็อตระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนและแรงดันที่เกต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 6.8 แสดงภาพของเครื่องวัด HP-4061A  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

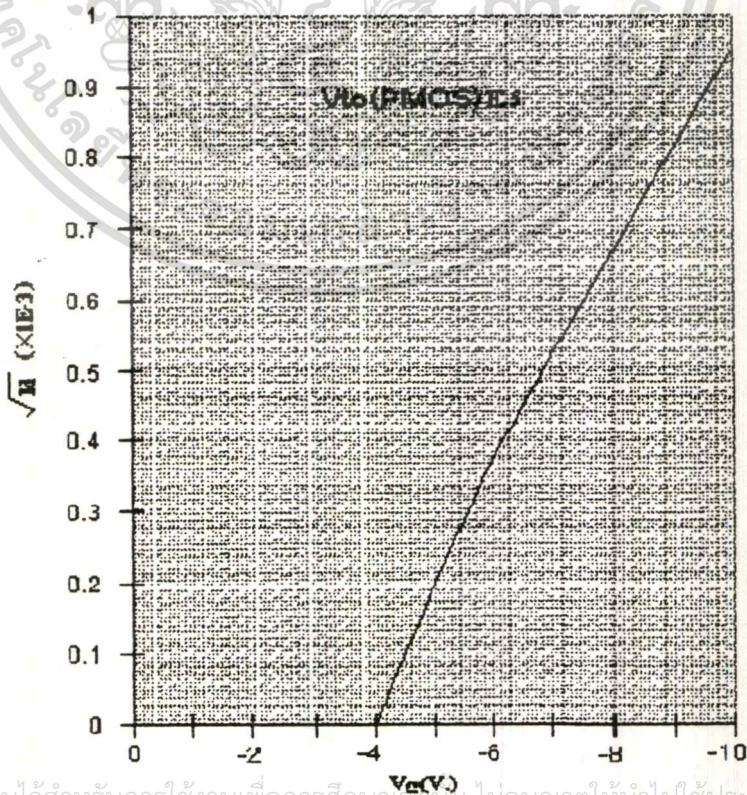
### 6.2.1.2 การวัดแรงดันขั้วเริ่มของพีเอ็มอส

ทำได้เช่นเดียวกับการวัดแรงดันขั้วเริ่มของเอ็นเอ็มอสเพียงแต่เปลี่ยนแหล่งจ่าย  $V_{dd}$  และ  $V_g$  เป็นโพลบเท่านั้น หลังจากรันโปรแกรม จะได้กราฟของแรงดันขั้วเริ่มดังในรูปที่ 6.9

SAMPLE= VT PMOS E5



รูปที่ 6.9 กราฟที่ได้จากการวัดแรงดันขั้วเริ่มของพีเอ็มอส E5

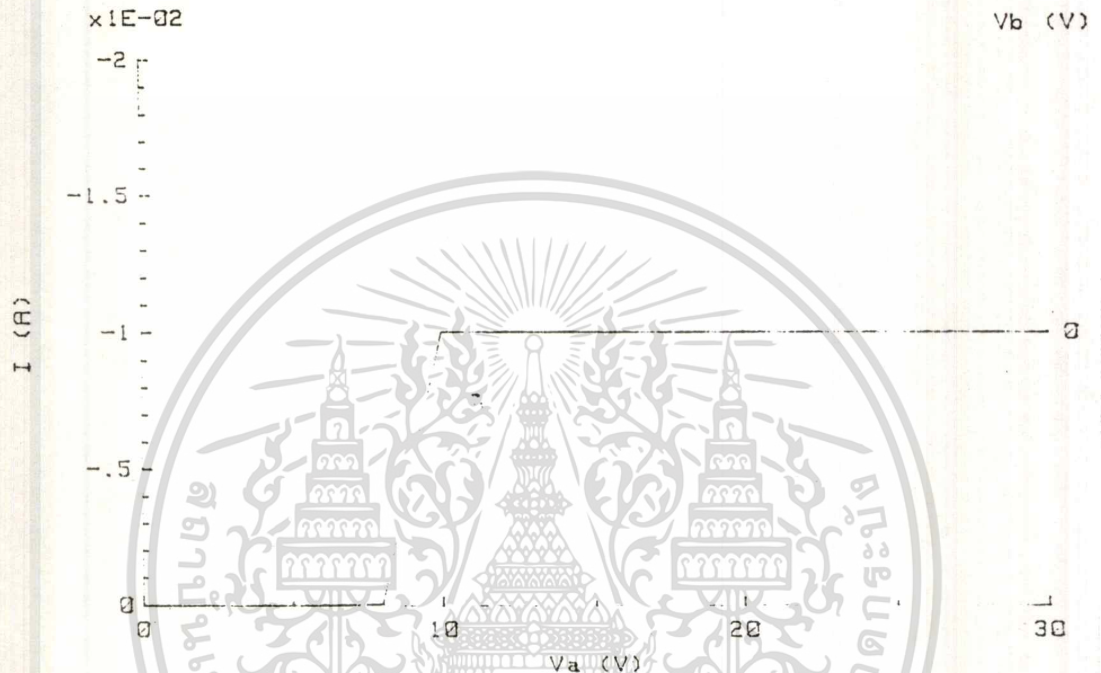


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 6.10 ก็กราฟแสดงการพล็อตระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนและแรงดันที่เกตไปใช้

## 6.2.2 การวัดแรงดันพังกาลาย

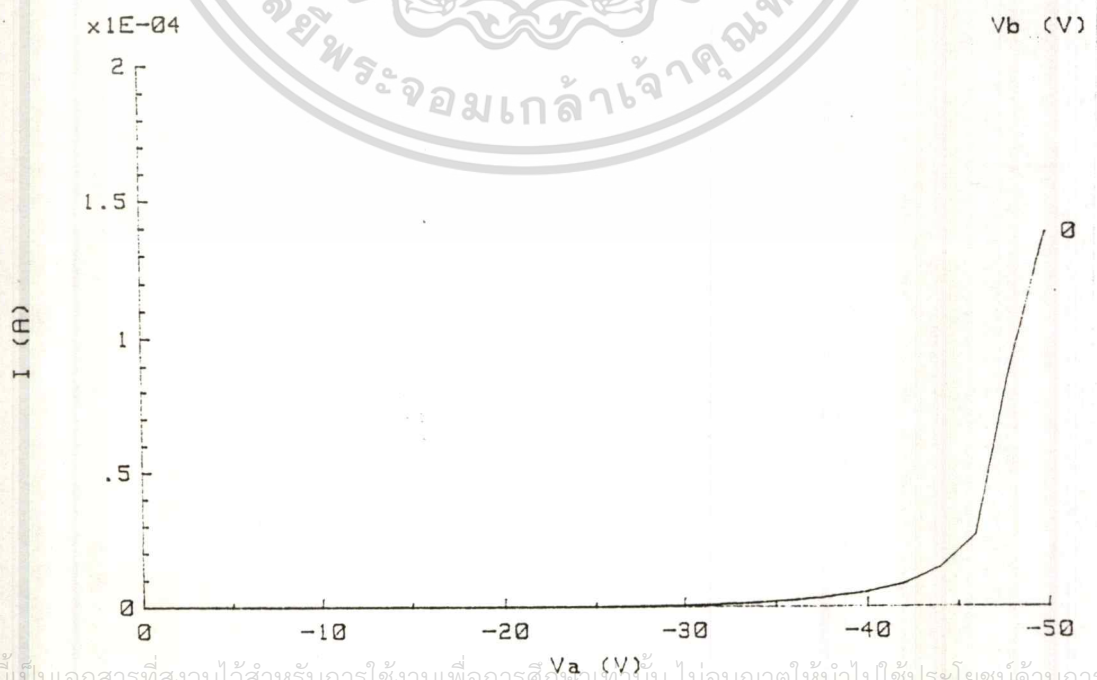
ในการวัดแรงดันพังกาลาย ก็ทำได้ในลักษณะเดียวกันคือ ใช้เครื่อง HP-4061A โดยป้อนโปรแกรมควบคุม ให้แรงดันไบอัสกลับที่ขาเกรน-ซอส หลังจากทีรันโปรแกรมจะได้กราฟของแรงพังกาลายดังแสดงในรูปที่ 6.11 และ 6.12

SAMPLE= VB NMOS B7



รูปที่ 6.11 กราฟแรงดันพังกาลายของเอ็นมอส

SAMPLE= VB PMOS E1



รูปที่ 6.12 กราฟแรงดันพังกาลายของพีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงสื่อใดๆ และต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 การวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน

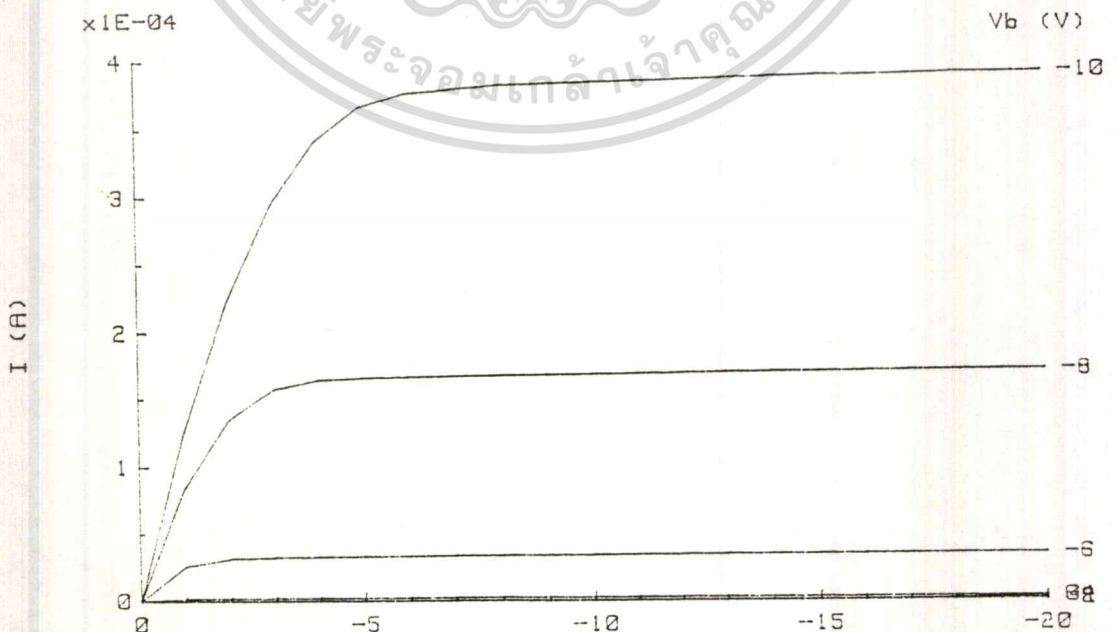
การวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดันทำได้โดยป้อนโปรแกรมควบคุมให้กับเครื่อง HP-4061A โดยให้  $V_b$  เป็น  $V_g$  คือ และ  $V_a$  เป็น  $V_{ds}$  หลังจากทีรันโปรแกรมจะได้กราฟคุณสมบัติของกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 6.13 และ 6.14

SAMPLE= NMOS B7



รูปที่ 6.13 กราฟคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของเอ็นโมส B7

SAMPLE= PMOS D3

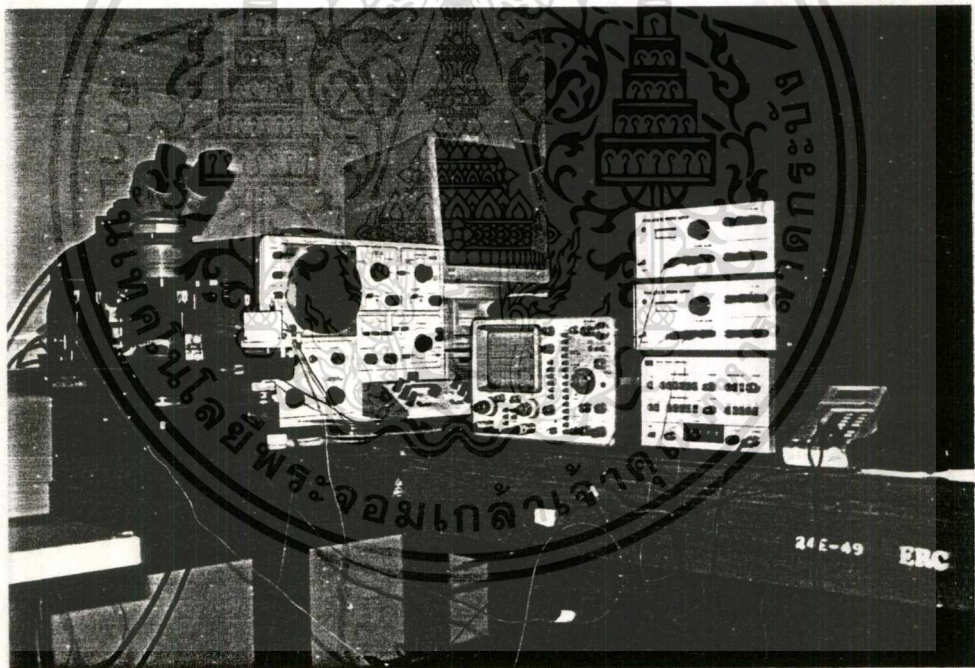


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรูปที่ 6.14 กราฟคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของพีโมส D3 ที่มีการนำไปใช้

#### 6.2.4 การวัดคุณสมบัติความเป็นสวิทช์ (Switching Characteristic)

การวัดคุณสมบัติความเป็นสวิทช์ หรือสวิทช์ซิ่งนั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากว่า ดีไวส์ที่เราได้สร้างขึ้นมาจะนำไปใช้งานทางด้านดิจิตอล (Digital) ซึ่งงานดิจิตอลส่วนมากแล้วจะมีสัญญาณนาฬิกา (Clock) เป็นตัวควบคุมการทำงาน โดยที่วงจรดิจิตอลนั้นจะทำงานได้เร็วหรือช้าก็ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ถ้าหากว่าวงจรใดทำงานที่ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาสูง ๆ แล้ว นั่นหมายถึงว่าวงจรนั้นสามารถประมวลผลได้เร็ว หรือทำงานได้เร็วนั่นเอง

ในการวัดสวิทช์ซิ่งนั้น เราจะวัดทั้งซิมอสอินเวอร์เตอร์ ซิมอสแนนและนอเกต ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการที่จะทราบว่าดีไวส์ที่สร้างขึ้นมาสามารถนำไปใช้งานกับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาได้สูงสุดเท่าใด



รูปที่ 6.15 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติความเป็นสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

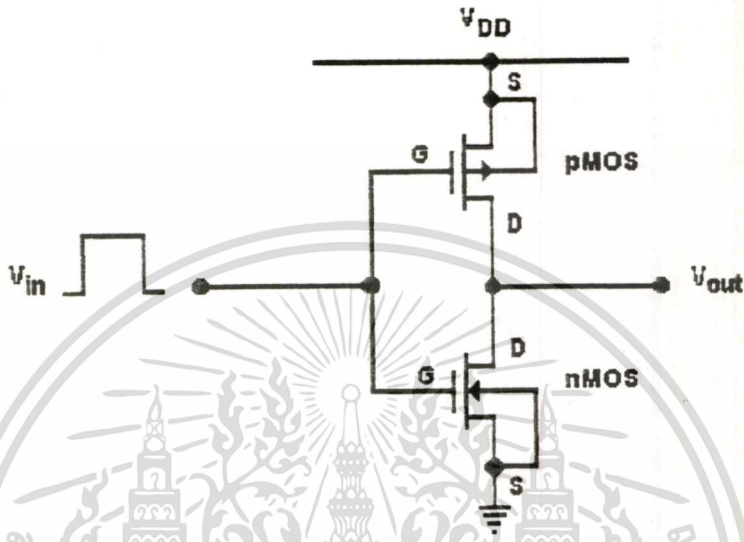
	1	2	3	4
A	State Ring Oscillator	Inverter Buffer	<u>Device</u> W/L = 20/5	State Ring Oscillator
B	<u>Device</u> W/L = 20/10	<u>Device</u> W/L = 20/10	<u>Device</u> W/L = 20/10	<u>Device</u> W/L = 20/10
C	<u>Device</u> W/L = 40/10	Monitor Capacitor&Diode	<u>Device</u> W/L = 40/10	<u>Device</u> W/L = 40/10
D	<u>Device</u> W/L = 20/20	<u>Device</u> W/L = 20/20	Monitor Capacitor&Diode	<u>Device</u> W/L = 20/20
E	<u>Device</u> W/L = 40/20	<u>Device</u> W/L = 40/20	<u>Device</u> W/L = 40/20	<u>Device</u> W/L = 40/20
F	State Ring Oscillator	Inverter Buffer	<u>Device</u> W/L = 40/5	State Ring Oscillator

รูปที่ 6.16 แสดงแผนผังของดีไวซ์ต่าง ๆ ที่จะทำการสร้างบนแผ่นซิลิกอน 1 แผ่น ซึ่งเป็นแผ่นของซีมอสแนมและนอเกต

\* Device คือส่วนที่ใช้สร้าง แนมและนอเกต ซึ่ง  $\frac{W}{L}$  คือความกว้างต่อความยาวแขนเลขของทั้งเอ็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มอสและพิมอส  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.4.1 การวัดสวิทชิงของซีมอสอินเวอร์เตอร์

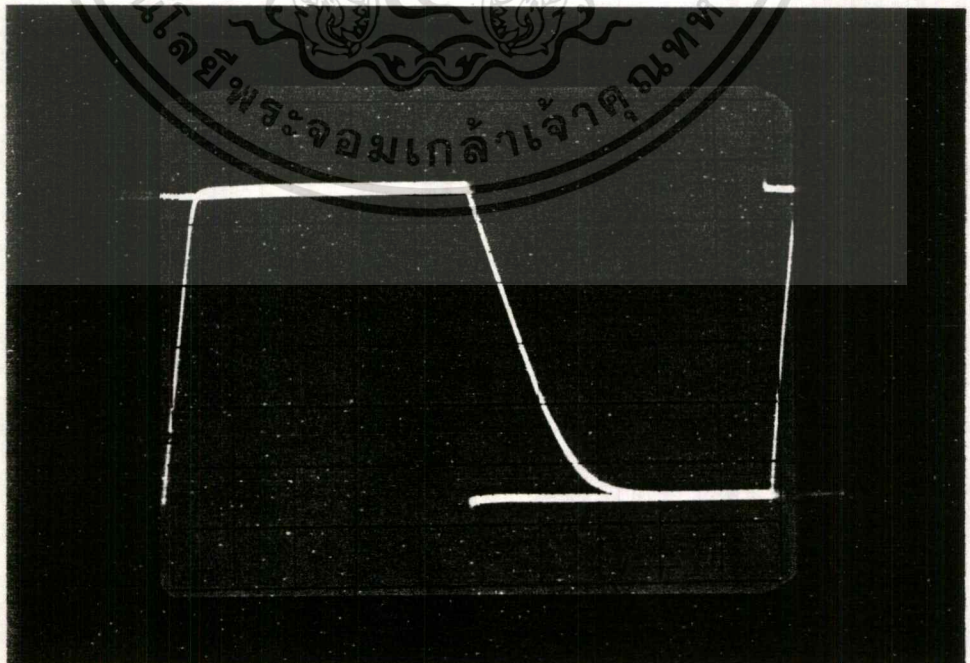
จากรูปที่ 6.5 จะยกตัวอย่างการวัดให้เห็น 2 ตัวคือ  $C_4$  และ  $D_4$  โดยทำการต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 วงจรที่ใช้ในการวัดสวิทชิงซีมอสอินเวอร์เตอร์

- ป้อนแรงดัน  $V_{dd} = 7 \text{ V}$ ,  $V_{in} = 7 \text{ V}_{pp}$  กับซีมอสอินเวอร์เตอร์  $C_4$  จะได้ผลการทดลองดังรูป

6.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 6.18 ภาพแสดงผลคุณสมบัติสวิทชิงของซีมอสอินเวอร์เตอร์  $C_4$  ที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.18 ได้ผลการวัดดังนี้

$$t_r = 14 \mu s$$

$$t_f = 4 \mu s$$

$$\therefore f_{\max} = \frac{1}{t_r + t_f} = 55.56 \text{ KHz}$$

- ป้อนแรงดัน  $V_{dd} = 7 \text{ V}$  ,  $V_{in} = 7 \text{ V}_{pp}$  กับซิมอสอินเวอร์เตอร์  $D_4$  จะได้ผลการทดลองดังรูป 6.19



รูปที่ 6.19 แสดงผลคุณสมบัติสวิทช์ของซิมอสอินเวอร์เตอร์  $D_4$

จากรูปที่ 6.19 ได้ผลการวัดดังนี้

$$t_r = 15 \mu s \quad t_f = 7 \mu s$$

$$\therefore f_{\max} = \frac{1}{t_r + t_f} = 45.45 \text{ KHz}$$

จากผลการวัดสวิทช์ของซิมอสอินเวอร์เตอร์ จะเห็นว่ามี การเปรียบเทียบกันระหว่างซิมอสอินเวอร์เตอร์  $C_4$  ที่มี  $W_n/W_p$  เท่ากับ 80/40 กับ ซิมอสอินเวอร์เตอร์  $D_4$  ซึ่งมี  $W_n/W_p$  เท่ากับ 60/40 (ความยาวของแขนเนลเท่ากับ 20 ไมครอนทุกตัว) ดังตารางที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ซีมอสอินเวอร์เตอร์	
	C4	D4
$t_r (\mu s)$	14	15
$t_f (\mu s)$	4	7
$f_{max} (KHz)$	55.56	45.45

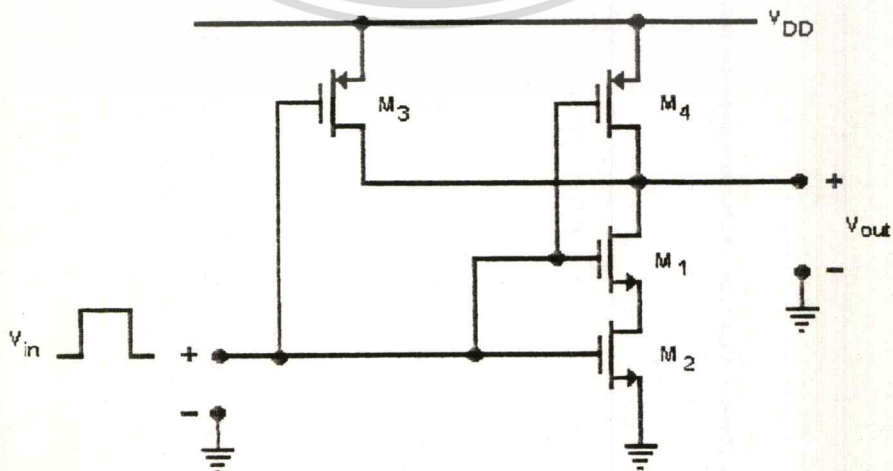
ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบเวลาในการสวิตชิง ของซีมอสอินเวอร์เตอร์

จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวมีค่า  $t_r$  มากกว่า  $t_f$  ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเอาต์พุตจะอยู่ในสถานะโลได้ก็หมายถึงอินมอสอยู่ในสถานะอิ่มตัว ส่วนเอาต์พุตไฮจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อพีมอสอิ่มตัว ซึ่งเป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในอินมอสนั้นมากกว่าความคล่องตัวของโฮลในพีมอส ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้เกิดความไม่สมมูลย์ขึ้นของ  $t_r$  และ  $t_f$

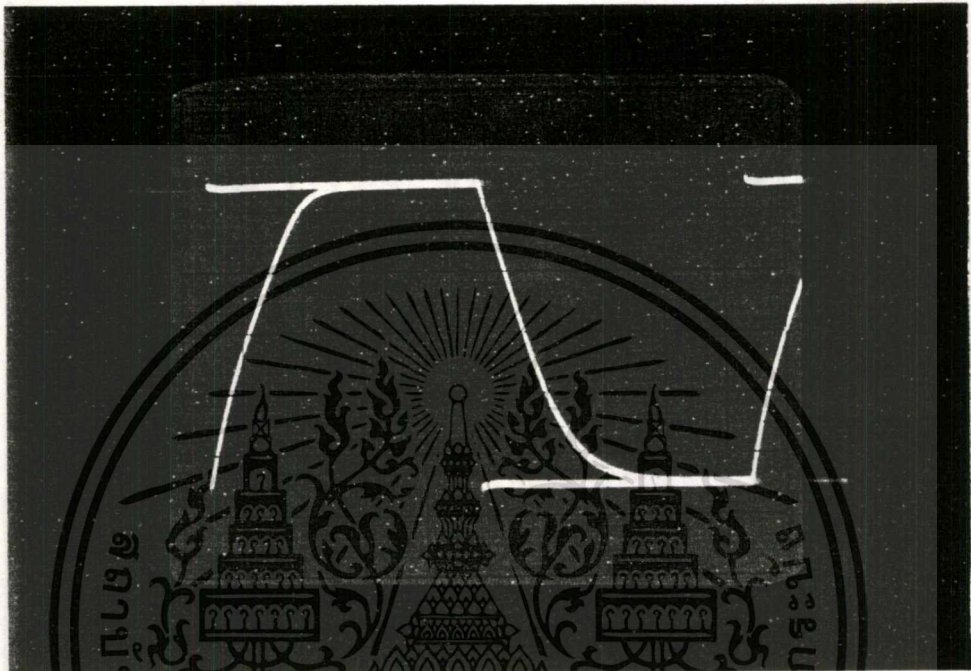
และจะเห็นได้อีกว่า C4 จะสามารถนำไปใช้งานกับความถี่ได้สูงกว่า D4 ทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก C4 มีความกว้างของแชนเนลมากกว่า D4 ถึง 1.3 เท่า แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ยิ่งถ้าดีไวซ์มีขนาดใหญ่มากเท่าไรก็ยิ่งสิ้นเปลืองเนื้อที่และยังเป็นการเพิ่มค่าความจุแฝงอีกด้วย ดังนั้นในการพิจารณาออกแบบจึงต้องคำนึงถึงความสมมูลย์ของ  $t_r$  และ  $t_f$  ด้วย โดยต้องมีการออกแบบให้  $W_p$  มีค่ามากกว่า  $W_n$  ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้กระแสเดรนของพีมอสมีขนาดใหญ่กว่าของอินมอสอย่างน้อย 2 เท่า

6.2.4.2 การวัดสวิตชิงของซีมอสแนนเกท

จากรูปที่ 6.16 จะยกตัวอย่างการวัดให้เห็น 3 ตัวคือ  $C_3$ ,  $D_4$  และ  $E_2$  โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 6.20



- ป้อนแรงดัน  $V_{dd} = 8\text{ V}$ ,  $V_{in} = 7\text{ V}_{pp}$  กับซิมอสแนมเกต  $C_3$  จะได้ผลการทดลองดังรูป 6.21



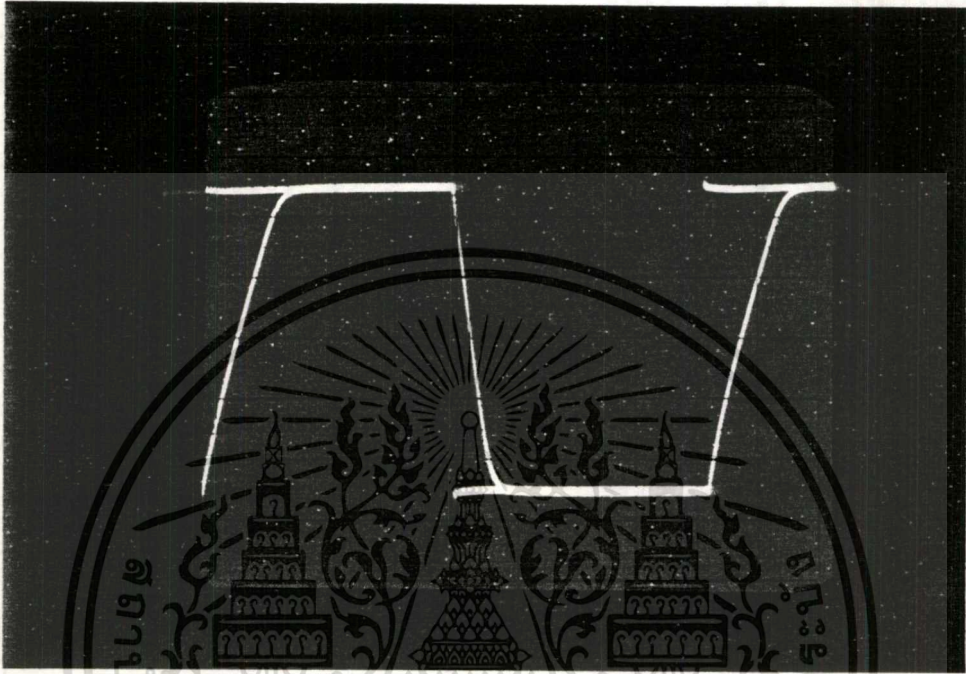
รูปที่ 6.21 แสดงผลคุณสมบัติสวิตช์ของซิมอสแนมเกต  $C_3$   
จากรูปที่ 6.21 ได้ผลการวัดดังนี้

$$t_r = 32\mu\text{s} \quad t_f = 28\mu\text{s}$$

$$\therefore f_{\max} = \frac{1}{t_r + t_f} = 16.67\text{ KHz}$$

- ป้อนแรงดัน  $V_{dd} = 8\text{ V}$ ,  $V_{in} = 7\text{ V}_{pp}$  กับซิมอสแนมเกต  $D_4$  จะได้ผลการทดลองดังรูป 6.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.22 แสดงผลคูณสมบัติสวิตชิ่งของซิมอสแนมเกต  $D_4$

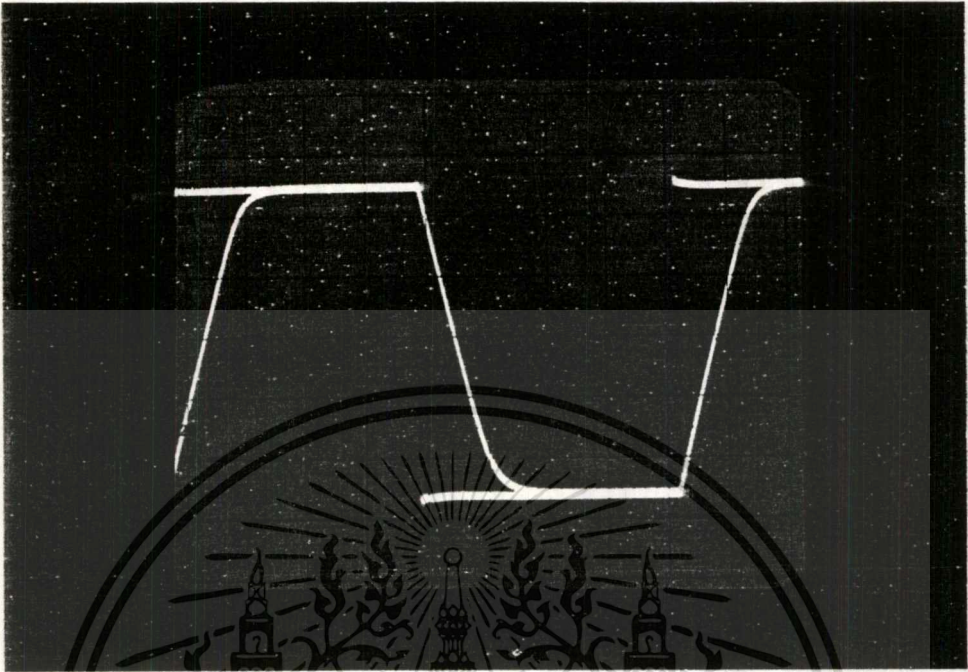
จากรูปที่ 6.22 ได้ผลการวัดดังนี้

$$t_r = 11\mu s \quad t_f = 5\mu s$$

$$\therefore f_{max} = \frac{1}{t_r + t_f} = 62.5KHz$$

- ป้อนแรงดัน  $V_{dd} = 8V$ ,  $V_{in} = 7V_{pp}$  กับซิมอสแนมเกต  $E_2$  จะได้ผลการทดลองดังรูป 6.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 แสดงผลคูณสมบัติสวิทชิงของซิมอสแนนเกท  $E_2$

จากรูปที่ 6.23 ได้ผลการวัดดังนี้

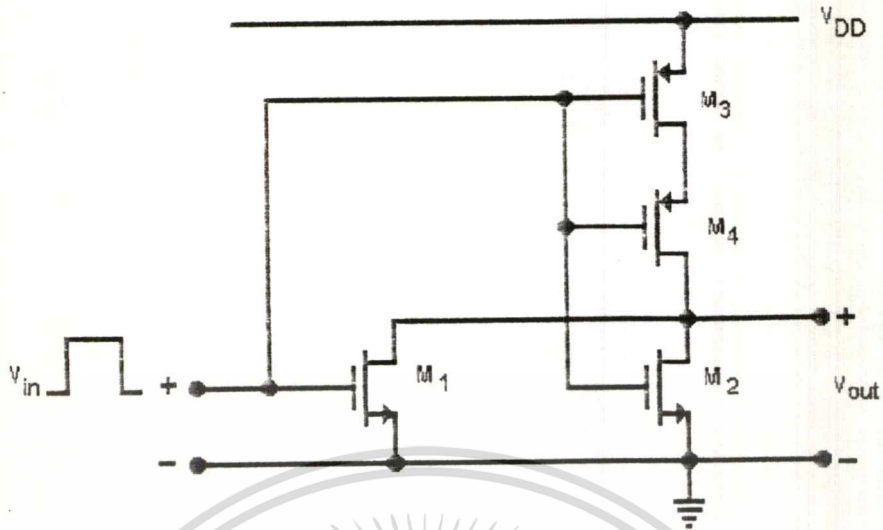
$$t_r = 11 \mu s \quad t_f = 10 \mu s$$

$$\therefore f_{\max} = \frac{1}{t_r + t_f} = 47.62 \text{ KHz}$$

#### 6.2.4.3 การวัดสวิทชิงของซิมอสนอกเกต

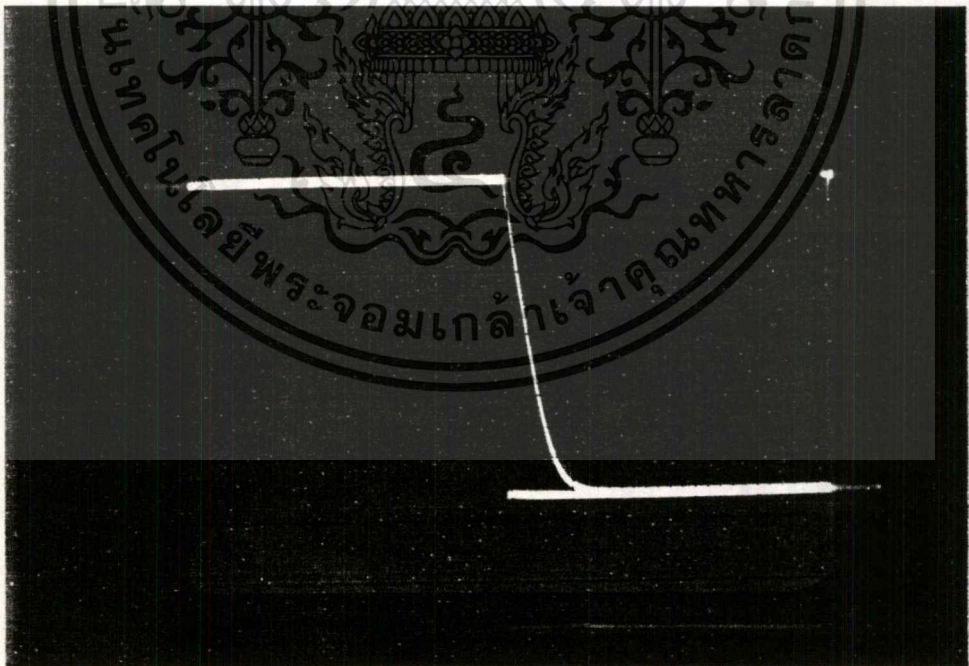
จากรูปที่ 6.16 จะขกตัวอย่างการวัดให้เห็น 3 ตัวคือ  $C_4$   $D_4$  และ  $E_4$  โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 6.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.24 แสดงภาพการต่อวงจรเพื่อวัดสวิตชิงของนอเกต

- ป้อนแรงดัน  $V_{dd} = 8\text{ V}$ ,  $V_{in} = 7\text{ Vpp}$  กับซิมูเลชันนอเกต  $C_4$  จะได้ผลการทดลองดังรูป 6.25



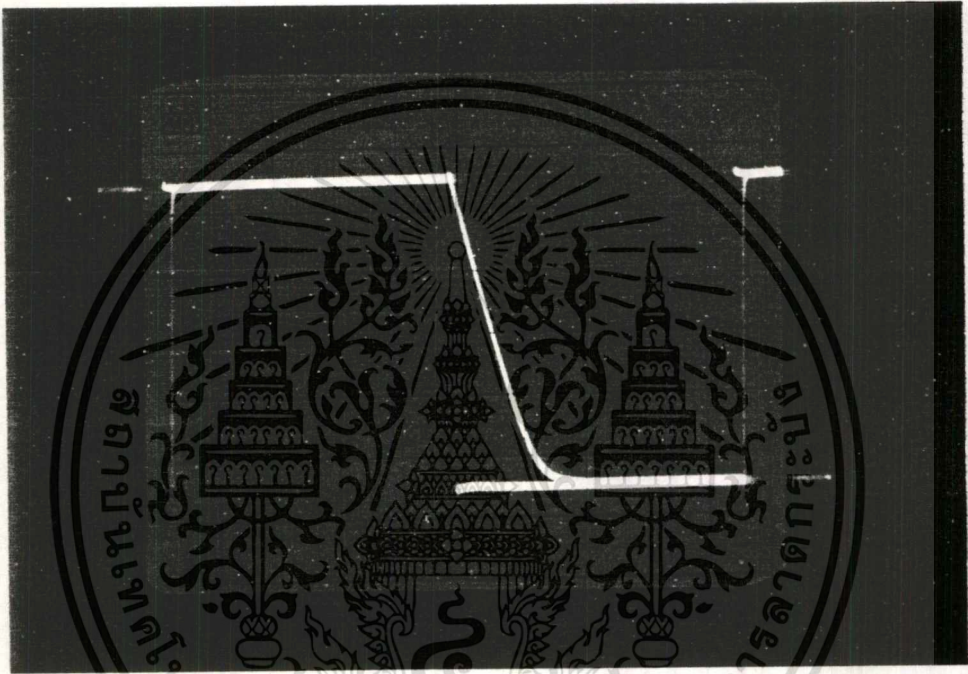
รูปที่ 6.25 แสดงผลคุณสมบัติสวิตชิงของซิมูเลชันนอเกต  $C_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รอบนที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 จากรูปที่ 6.25 ได้ผลการวัดดังนี้  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_r = 70 \mu s \quad t_f = 6 \mu s$$

$$\therefore f_{\max} = \frac{1}{t_r + t_f} = 13.16 \text{ KHz}$$

- ป้อนแรงดัน  $V_{dd} = 8 \text{ V}$  ,  $V_{in} = 7 \text{ V}_{pp}$  กับซิมอสถอเกต  $D_4$  จะ ได้ผลการทดลองดังรูป 6.26



รูปที่ 6.26 แสดงผลคุณสมบัติสวิตชิงของซิมอสถอเกต  $D_4$

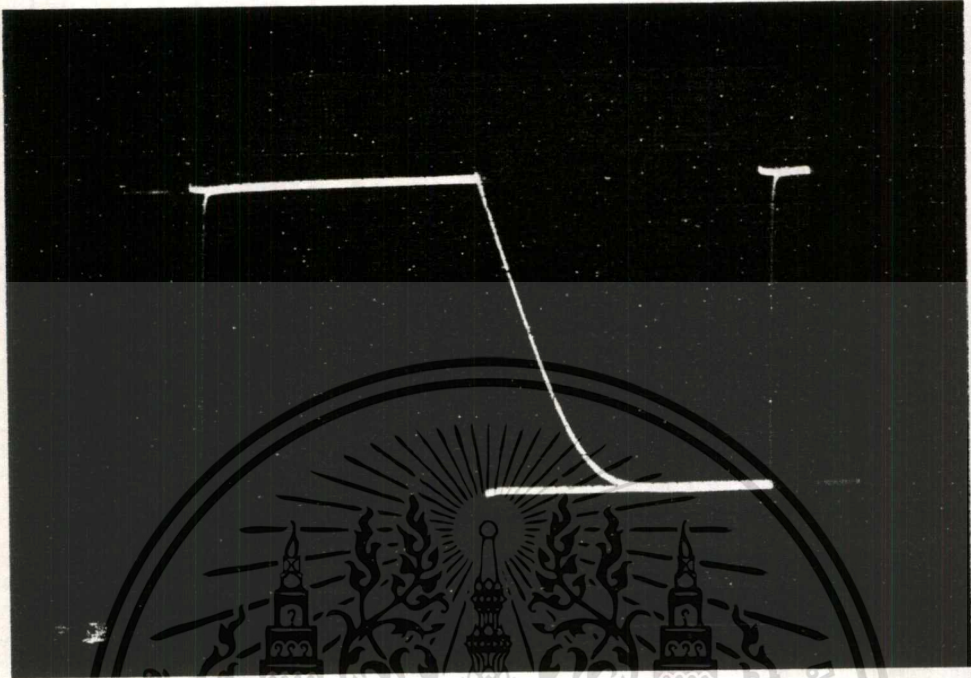
จากรูปที่ 6.26 ได้ผลการวัดดังนี้

$$t_r = 22 \mu s \quad t_f = 2 \mu s$$

$$\therefore f_{\max} = \frac{1}{t_r + t_f} = 41.67 \text{ KHz}$$

- ป้อนแรงดัน  $V_{dd} = 8 \text{ V}$  ,  $V_{in} = 7 \text{ V}_{pp}$  กับซิมอสถอเกต  $E_4$  จะ ได้ผลการทดลองดังรูป 6.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.27 แสดงผลคุณสมบัติสวิตซ์ของซิมอสถนอเกท E<sub>4</sub>

จากรูปที่ 6.27 ได้ผลการวัดดังนี้

$$t_r = 30 \mu s \quad t_f = 4 \mu s$$

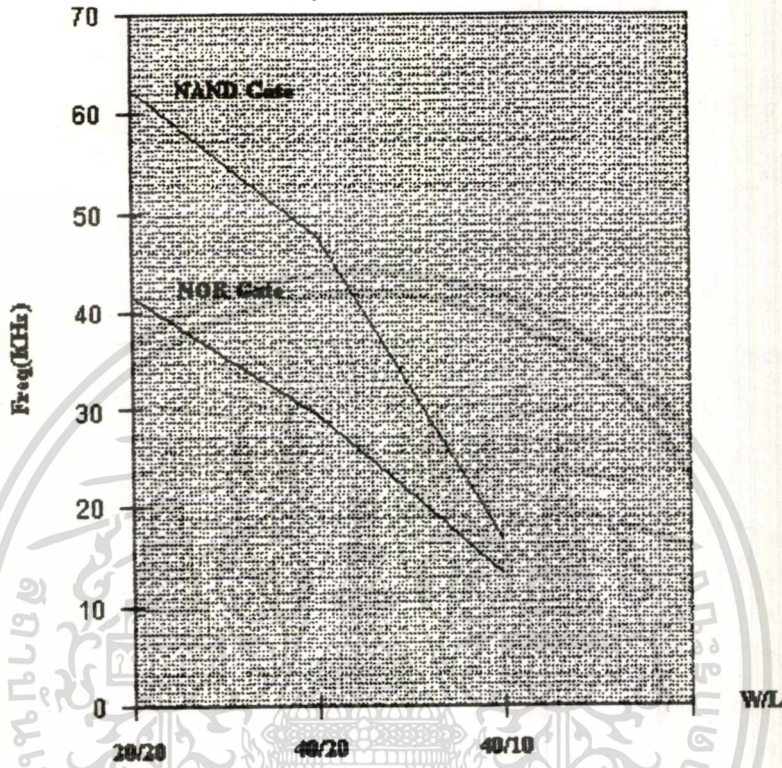
$$\therefore f_{\max} = \frac{1}{t_r + t_f} = 29.41 \text{ KHz}$$

ผลการวัดสวิตซ์ของซิมอสถนอเกทและนอเกทสามารถสรุปให้เห็นได้ดังตารางที่ 6.3

	ซิมอส					
	แนนเกท			นอเกท		
	C3	D4	E2	C4	D4	E4
$t_r (\mu s)$	32	11	11	70	22	30
$t_f (\mu s)$	28	5	10	6	2	4
$f_{\max} (\text{KHz})$	16.67	62.5	47.62	13.16	41.67	29.41
$\frac{W}{L}$	$\frac{40}{10}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{40}{20}$	$\frac{40}{10}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{40}{20}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบเวลาในการสวิตซ์ของซิมอสแนนและนอเกท  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 6.3 สามารถนำมาพล็อตเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง แนนเกตและนอเกตที่ค่า W/L ค่าต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 6.28



รูปที่ 6.28 กราฟเปรียบเทียบการตอบสนองความถี่ของแนนและนอเกต

### 6.2.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟตรง (Transfer characteristics)

การวัดคุณสมบัติทางไฟตรง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการวัด Transfer Characteristics ซึ่งการวัดนี้จะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงสถานะการทำงานของมันคือเราสามารถคำนวณลอจิก 0 และ 1 ได้ว่าอยู่ในช่วงของแรงดันอินพุตเท่าไร ด้วยหลักการของ Noise margins

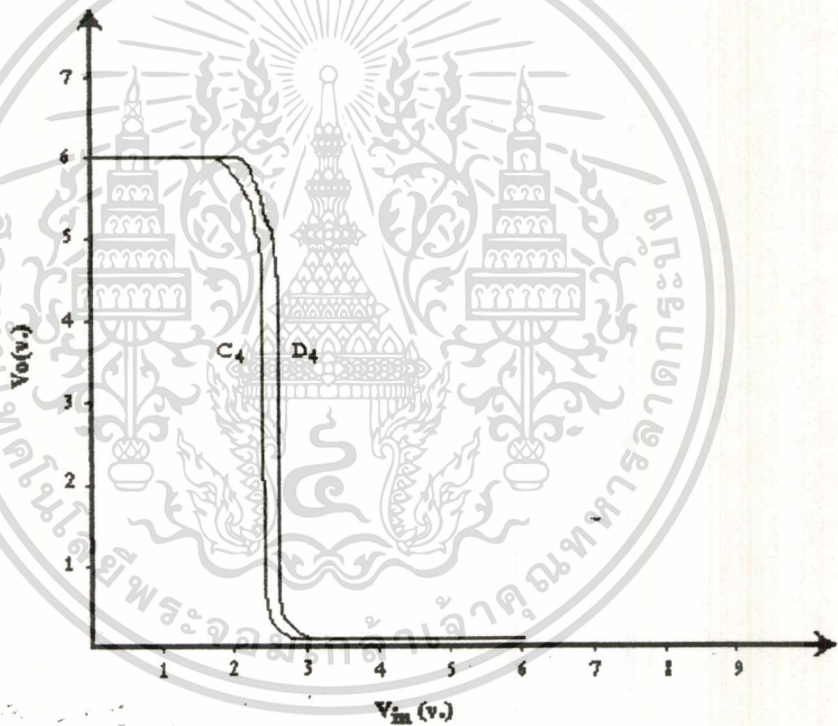
#### 6.2.5.1 การวัด คุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์

ตัวอย่างวงจรรูปที่ 6.17 โดยป้อน  $V_{DD} = 7\text{ V}$ . แล้วป้อนค่า  $V_{in}$  ค่าต่าง ๆ พร้อมกับวัดแรงดันเอาต์พุตที่ได้ ซึ่งแสดง ได้ดังตารางที่ 6.2

		$V_{in}$										
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
C4	$V_o$	6	5.5	4.5	3.5	2.7	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
D4	$V_o$	6.4	5.9	5.4	4.77	3.5	1.12	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน  $V_{in}$  กับ  $V_o$  ของซิมอสอินเวอร์เตอร์ C<sub>4</sub> และ D<sub>4</sub>

นำค่าที่ได้จากตารางที่ 6.4 มาเขียนกราฟคุณสมบัติทางไฟตรง ดังรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.29 กราฟคุณสมบัติทางไฟตรง ของซิมอสอินเวอร์เตอร์ C<sub>4</sub> และ D<sub>4</sub>

จากรูปที่ 6.29 สามารถหาค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของซิมอสอินเวอร์เตอร์ C<sub>4</sub> และ D<sub>4</sub> ได้ดังตารางที่ 6.5

	ซีมอสอินเวอร์เตอร์	
	C4	D4
$V_{IL}$ (v.)	2.3	2.5
$V_{IH}$ (v.)	2.5	2.7
$V_{OL}$ (v.)	0	0
$V_{OH}$ (v.)	6	6.4
$NM_L$ (v.)	2.3	2.5
$NM_H$ (v.)	3.5	3.7
$V_{th}$ (v.)	2.4	2.5

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการวัด

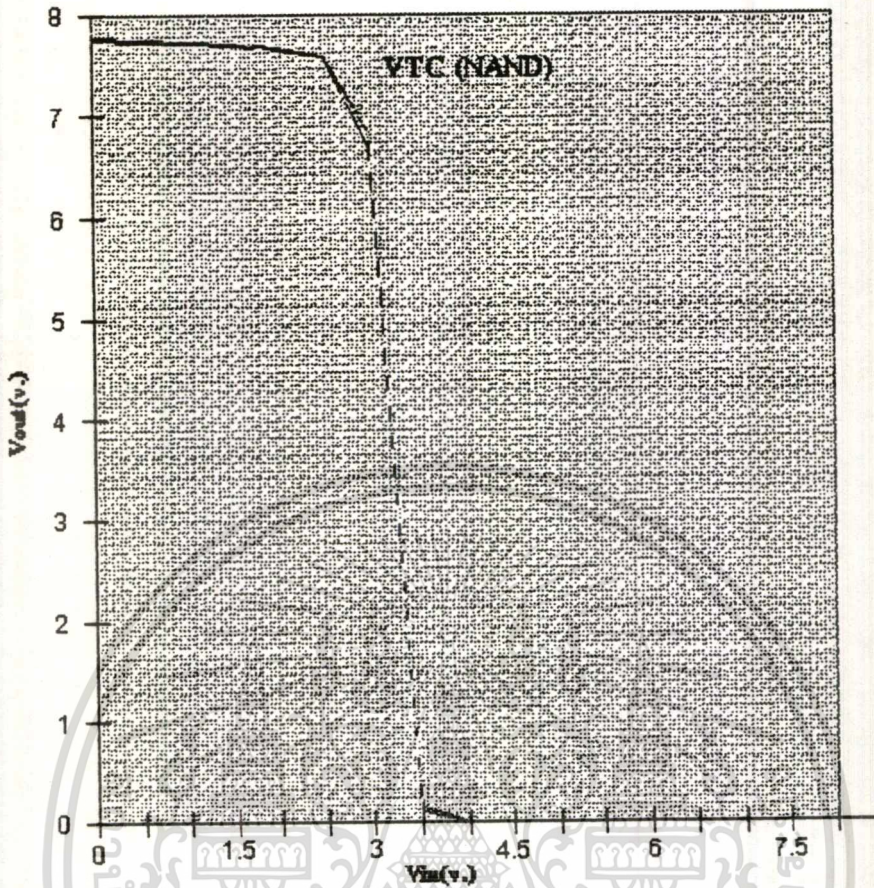
#### 6.2.5.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสแนนเกต C3 D4 และ E4

ต่อวงจรดังรูปที่ 6.20 โดยป้อน  $V_{DD} = 8$  V. แล้วป้อนค่า  $V_{in}$  ค่าต่าง ๆ พร้อมกับวัดแรงดันเอาต์พุตที่ได้ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 6.6

		$V_{in}$										
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
C3	$V_o$	7.77	7.76	7.73	7.72	7.68	7.6	6.85	0.1	0.1	0.1	0
	$V_o$	7.75	7.73	7.72	7.70	7.65	7.59	6.71	0.15	0.12	0.11	0
D4	$V_o$	7.83	7.78	7.76	7.74	7.64	7.44	6.83	0.2	0	0	0
	$V_o$	7.83	7.78	7.76	7.74	7.64	7.44	6.83	0.2	0	0	0

ตารางที่ 6.6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน  $V_{in}$  กับ  $V_o$  ของซีมอสแนนเกต C3 D4 และ E2

นำค่าที่ได้จากตารางที่ 6.6 มาเขียนกราฟคุณสมบัติทางไฟตรง ได้ดังรูปที่ 6.30



รูปที่ 6.30 กราฟคุณสมบัติทางไฟตรง ของซีมอสแนนเกต  $C_3 D_4$  และ  $E_2$

\* จากรูปที่ 6.30 เนื่องจากว่าค่ามิติของพีมอสและเอ็นมอสทุกตัวยาวเท่ากัน จึงทำให้เส้นกราฟคุณสมบัติทางไฟตรงของแนนเกตทุกตัวแทบจะเป็นเส้นเดียวกัน ดังนั้นค่าคุณสมบัติทางไฟตรงที่ได้จึงถือว่าเป็นค่าเดียวกันดังนี้

$$V_{IL} = 3v.$$

$$V_{IH} = 3.5v.$$

$$V_{OL} = 0$$

$$V_{OH} = 7.78v.$$

$$NM_L = 2.8v.$$

$$NM_H = 4.28v.$$

$$V_{th} = 3.25v.$$

#### 6.2.5.3 การวัดคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสนอเกต $C_4 D_4$ และ $E_4$

ต่อวงจรดังรูปที่ 6.24 โดยป้อน  $V_{DD} = 8v.$  แล้วป้อนค่า  $V_{in}$  ค่าต่าง ๆ พร้อมกับ

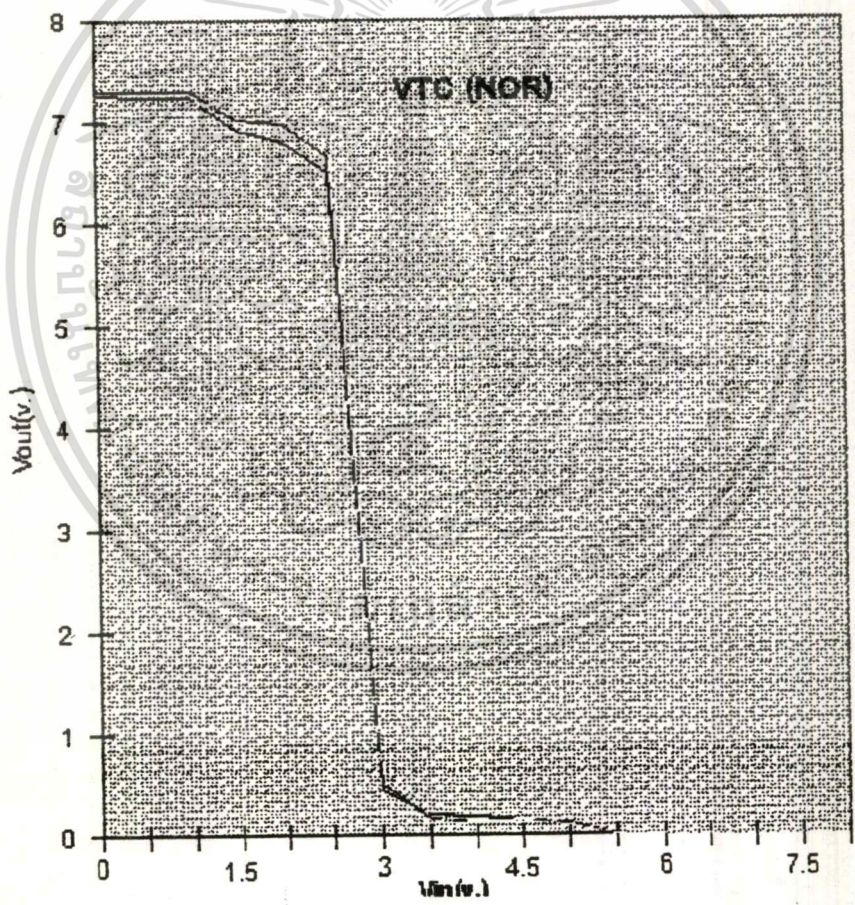
วัดแรงดันเอาต์พุตที่ได้ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 6.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		$V_{in}$										
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
C4	$V_o$	7.26	7.25	7.24	6.93	6.8	6.5	0.43	0.2	0.17	0.13	0.09
D4	$V_o$	7.3	7.3	7.3	7.02	6.98	6.67	0.5	0.15	0.13	0.13	0.12
E4	$V_o$	7.2	7.2	7.2	7.14	7.1	6.8	0.6	0.17	0.14	0.13	0.1

ตารางที่ 6.7 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน  $V_{in}$  กับ  $V_o$  ของซีมอสถอเกท C4 D4 และ E4

นำค่าที่ได้จากตารางที่ 6.7 มาเขียนกราฟคุณสมบัติทางไฟตรงได้ดังรูปที่ 6.31



รูปที่ 6.31 กราฟคุณสมบัติไฟตรงของซีมอสถอเกท C4 D4 และ E4

\* จากรูปที่ 6.31 เนื่องจากว่าค่ามิติของพิมอสและเอ็นมอสทุกตัวยาวเท่ากัน จึงทำให้เส้นกราฟคุณสมบัติทางไฟตรงของนอเกททุกตัวแทบจะเป็นเส้นเดียวกัน(เช่นเดียวกับแนมเกท) ดังนั้นค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟตรงที่ได้จึงถือว่าเป็นค่าเดียวกันดังนี้

$$V_{IL} = 2.5v.$$

$$V_{IH} = 3v.$$

$$V_{OL} = 0$$

$$V_{OH} = 7.25v.$$

$$NM_L = 2.5v.$$

$$NM_H = 4.25v.$$

$$V_{th} = 2.75v.$$

### 6.2.6 การวัดช่วงเวลาดำเนิน (Delay time)

การวัดช่วงเวลาดำเนิน หรือ คีเลย์ไทม์นั้น จะทำให้เราทราบช่วงเวลาระหว่างที่ป้อนอินพุตกับเอาต์พุตที่เกิดขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการที่จะวัดว่าต้องใช้เวลาานเท่าไรถึงจะทำให้ได้เอาต์พุตเมื่อป้อนแรงดันอินพุต ซึ่งจะเรียกอย่างหนึ่งว่า Propagation delay time ( $t_p$ )

เมื่อ

$$t_p = \frac{1}{2}(t_{PHL} + t_{PLH}) \quad (2.1 - 38)$$

การวัดคีเลย์ไทม์นี้สามารถวัดได้จากขั้นตอนของการวัดสวิตชิงในข้อ 6.2.4 ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นค่าของ  $t_{PHL}$   $t_{PLH}$  และ  $t_p$  ของชิปออสต่าง ๆ ดังตารางที่ 6.8

	ชิปออส							
	อินเวอร์เตอร์		แฉก			นอกรอก		
	C4	D4	C3	D4	E2	C4	D4	E4
$t_{PHL} (\mu S)$	6	8	16	3	10	2	2	4
$t_{PLH} (\mu S)$	8	8	30	6	14	16	3	8
$t_p (\mu S)$	7	8	23	4.5	12	9	2.5	6

ตารางที่ 6.8 แสดงค่าคีเลย์ไทม์ของชิปออสชนิดต่าง ๆ

### 6.3 การใช้คอมพิวเตอร์จำลองผลการวัดทางไฟฟ้า

ในการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้น เพื่อให้จะได้วงจรที่มีคุณสมบัติที่ดี วงจรที่ออกแบบจะต้องถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นก่อน โดยปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานด้านต่าง ๆ ซึ่งโปรแกรมทางด้านวิเคราะห์วงจร

เอกสารนี้ ไฟฟ้าก็มีหลายชนิดเช่น SPICE ORCAD และ WORKBENCH เป็นต้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้นโปรแกรม SPICE เป็นโปรแกรมที่ช่วยให้เราสามารถจำลองแบบวงจรที่ออกแบบไว้

ก่อนที่จะทำการสร้างจริง ทำให้เราทราบผลลัพธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการทำการสร้างจริง

การใช้โปรแกรม SPICE ในรายงานนี้จะใช้ SPICE เวอร์ชัน (Version) ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ (Operating system) คอส (DOS) ซึ่งการเขียนโปรแกรมจะต้องมีการเขียนข้อความ (Statement) เข้าไปเพื่อให้สามารถประมวลผลได้ โปรแกรม SPICE มีแบบจำลองสำหรับอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต 3 แบบด้วยกัน ซึ่งมีความแตกต่างกันในสูตรของคุณสมบัติกระแสและแรงดันโดย LEVEL จะเป็นตัวแปรที่เลือกแบบจำลองที่แตกต่างกันดังนี้

- LEVEL = 1 เป็นแบบจำลอง Shichman-Hodges ( $L > 10$  ไมครอน)
- LEVEL = 2 เป็นแบบจำลอง Geometry-based, analytic ( $L > 5$  ไมครอน)
- LEVEL = 3 เป็นแบบจำลอง Semi-empirical, short-channel ( $L < 5$  ไมครอน)

\* เนื่องจากโครงการนี้เป็น การสร้างชิปอสที่มีเทคโนโลยี  $L \geq 10$  ไมครอน ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงเฉพาะ LEVEL 1 เท่านั้น

โปรแกรม SPICE กำหนดสถานะของมอสเฟตเป็น 2 สถานะคือ

#### (ค). สถานะทั่วไปของมอสเฟต

บอกถึงการเชื่อมต่อ (connection) ของมอสเฟตในวงจร โดยมีชื่อของมอสเฟตในวงจรเริ่มต้นด้วยอักษร M เช่น M1 M20 หรือ MLOAD เป็นต้น ซึ่งสถานะทั่วไปนี้จะกำหนดจุด "node" ที่ขั้ว เกรน เกท ซอส และฐานรองของมอสเฟตที่ถูกเชื่อมต่อในวงจรตามลำดับ นอกจากนี้ยังกำหนดตัวแปรทางเรขาคณิต (geometric parameter) เช่น ความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส โดยมีรูปแบบดังนี้

M(name) (ND) (NG) (NS) (NB) (model name) [L=value] [W=value]

โดยที่

ND = node drain

NG = node gate

NS = node source

NB = node bulk/substrate

L = channel length

W = channel width

ตัวอย่างเช่น

M1 4 4 2 6 nmos\_enhancement\_mosfet L=3um w=9um

เอกสารนี้ (ข) สถานะภายในของมอสเฟต ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บอกถึงค่าตัวแปรที่อยู่ภายในแบบจำลองมอสเฟต รูปแบบของสถานะแบบจำลองนี้ (MODEL) จะถูกใช้เป็น SPICE input file เพื่ออ้างอิงให้กับมอสเฟตของโปรแกรม ค่าตัวแปรภายในจะเป็นค่าตัวแปรทางไฟฟ้า และกระบวนการสร้าง (electrical and process) ถ้าไม่มีการกำหนดค่าตัวแปรที่ต้องการให้กับโปรแกรม ค่าตัวแปรมาตรฐานของ SPICE จะถูกอ้างอิงโดยมีรูปแบบดังต่อไปนี้

.MODEL (model name) (type) [model parameter]

โดยที่

type = NMOS หรือ PMOS

model parameter ประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ดังนี้

$V_{to}$  = threshold voltage (no body bias)

$K_p$  = process transconductance

$\gamma$  = body bias coefficient

$\lambda$  = channel length modulation factor

$\Phi_{fs}$  = bulk fermi potential

ตัวอย่างเช่น

.MODEL nmos\_enhancement\_mosfet NMOS  $V_{to}=0.8$   $K_p=12.5u$   $\gamma=0.344$   
+ $\lambda=0.04$   $\Phi=0.8$

ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม PSPICE LEVEL 1 นี้ จะใช้ค่าพารามิเตอร์ภายในดังนี้คือ

Symbol	Name	NMOS	PMOS	Units
$V_{to}$	Vto	2.5	-4	V
$k'$	Kp	$5.3 \times 10^{-5}$	$2.03 \times 10^{-5}$	A/V <sup>1/2</sup>
$\gamma$	Gamma	2.74	0.54	V <sup>1/2</sup>
$2 \Phi_{fs} $	Phi	0.76	0.6	V <sup>-1</sup>

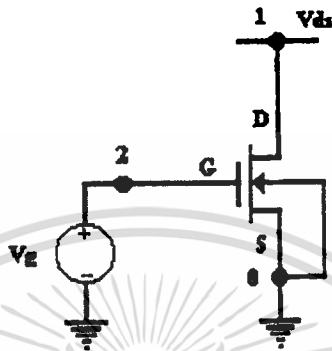
ตารางที่ 6.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ภายในที่ใช้ในการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.1 การจำลองผลของคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

#### 6.3.1.1 การจำลองผลของคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอส

ทำได้โดยกำหนด node ต่าง ๆ ให้กับเอ็นมอสดังรูปที่ 6.32



รูปที่ 6.32 การกำหนด node ให้กับเอ็นมอส

จากรูปที่ 6.32 สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองแบบ ได้ดังนี้

#### I-V Characteristic for NMOS B7

Vds 1 0 dc 0

Vg 2 0 dc 0

M1 1 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=120um

.MODEL nmos\_enhancement\_mosfet NMOS Vto=2.5 gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

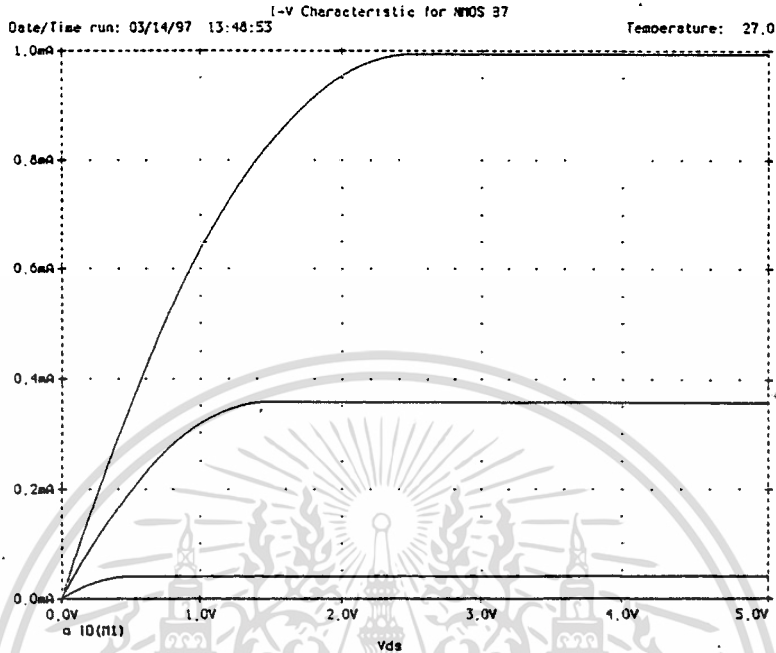
.DC Vds 0 5 0.01 Vg 0 5 1

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมจะได้ผลดังรูปที่ 6.33

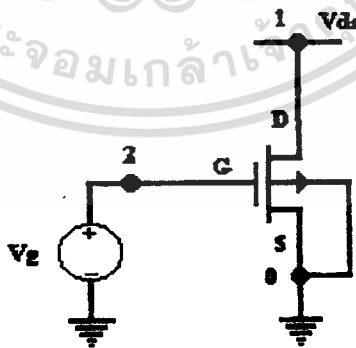
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.33 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเอ็นมอส B7

### 6.3.1.2 การจำลองผลของคุณสมบัติกระแสและแรงดันของทีมอส

ทำได้โดยกำหนด node ต่าง ๆ ให้กับทีมอสดังรูปที่ 6.34



รูปที่ 6.34 การกำหนด node .ให้กับทีมอส

จากรูปที่ 6.34 สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองแบบได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### I-V Characteristic for PMOS D3

Vds 1 0 dc 0

Vg 2 0 dc 0

M1 1 2 0 0 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

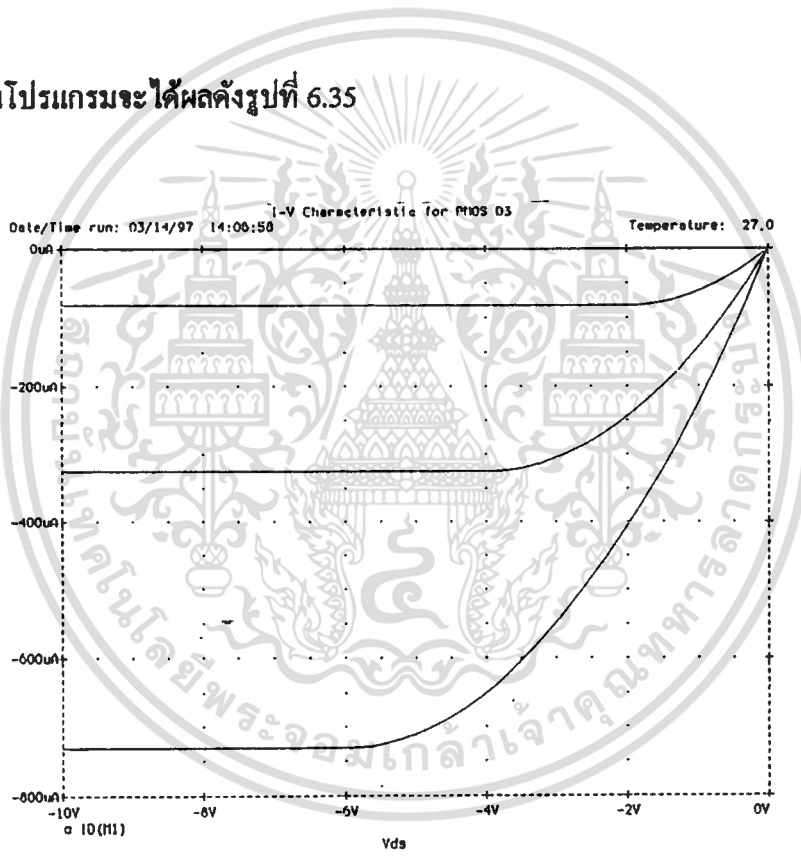
.MODEL pmos\_enhancement\_mosfet PMOS Vto=-4 gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6

.DC Vds 0 -10 -0.1 Vg 0 -10 -2

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมจะได้ผลดังรูปที่ 6.35

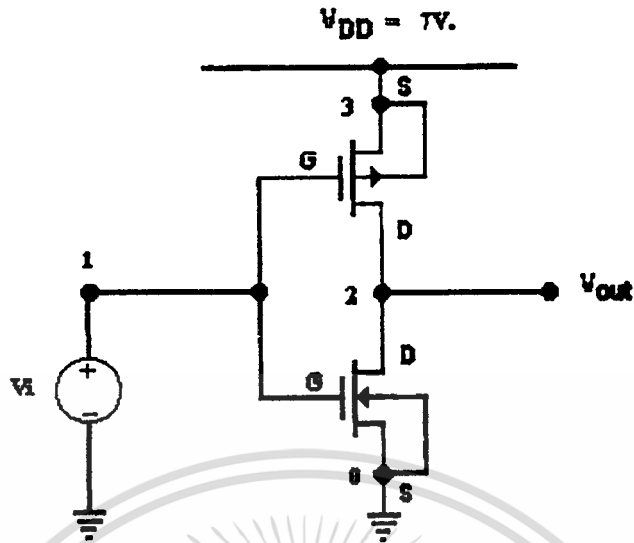


รูปที่ 6.35 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของพีมอส D3

### 6.3.2 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์

โดยกำหนด node ให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ดังแสดง ในรูปที่ 6.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.36 แสดงการกำหนด node ให้กับวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์

### 6.3.2.1 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์ C4

เขียนโปรแกรมเพื่อจำลองผลได้ดังนี้

#### Transfer Characteristics CMOS Inverter C4

VDD 3 0 DC 7

Vi 1 0 DC 0

M1 2 1 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20u W=80u

M2 2 1 3 3 pmos\_enhancement\_mosfet L=20u W=40u

.MODEL nmos\_enhancement\_mosfet NMOS Vto=2.5 Gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

.MODEL pmos\_enhancement\_mosfet PMOS Vto=-4 Gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6

.DC Vi 0 8 0.01

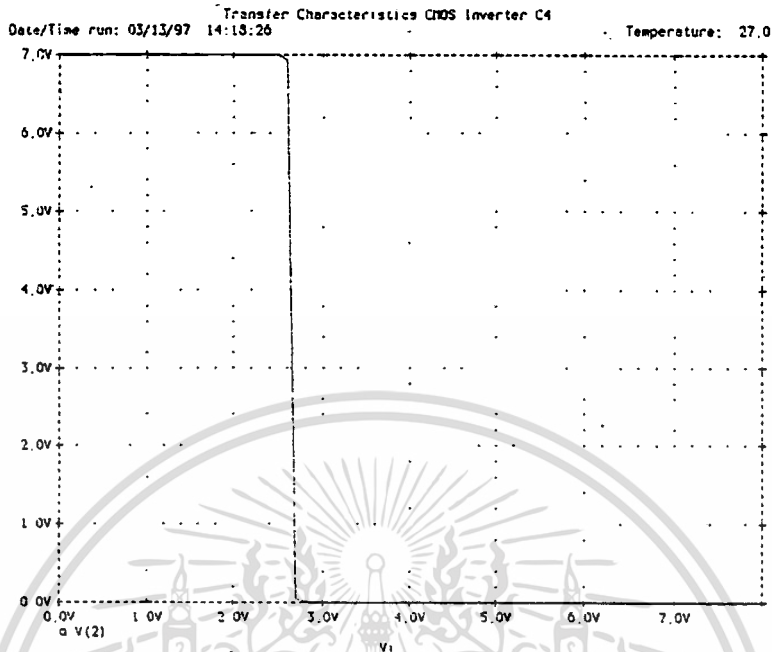
.OP

.PROBE

.END

หลังจากรันโปรแกรมแล้วจะได้ดังรูปที่ 6.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์ C4

### 6.3.2.2 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสอินเวอร์เตอร์ D4

เขียนโปรแกรมเพื่อจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงได้ดังนี้

#### Voltage Transfer Characteristics CMOS Inverter D4

VDD 3 0 DC 7

Vi 1 0 DC 0

M1 2 1 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20u W=60u

M2 2 1 3 3 pmos\_enhancement\_mosfet L=20u W=40u

.MODEL nmos\_enhancement\_mosfet NMOS Vto=2.5 Gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

.MODEL pmos\_enhancement\_mosfet PMOS Vto=-4 Gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6

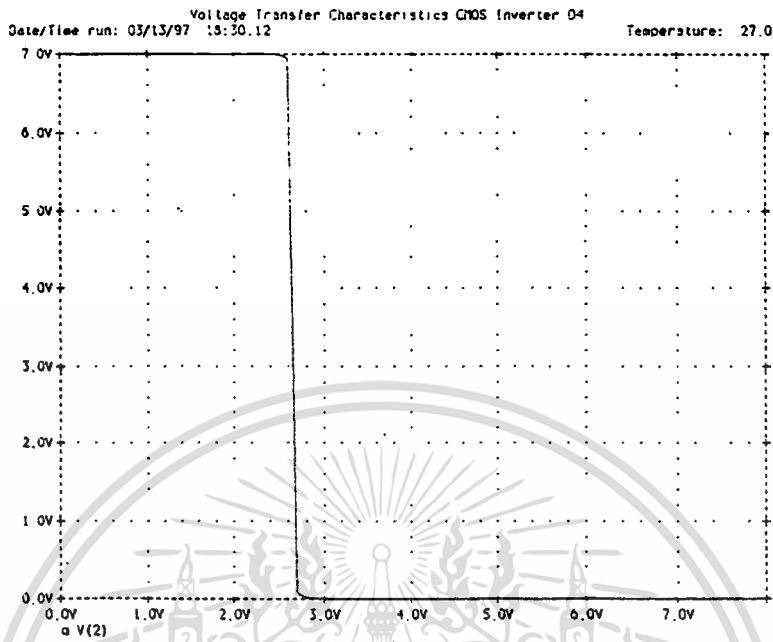
.DC Vi 0 8 0.01

.OP

.PROBE

.END

หลังจากรันโปรแกรมแล้วจะได้ดังรูปที่ 6.38  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเรียงใหม่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.38 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของ ซิมอสอินเวอร์เตอร์ D4

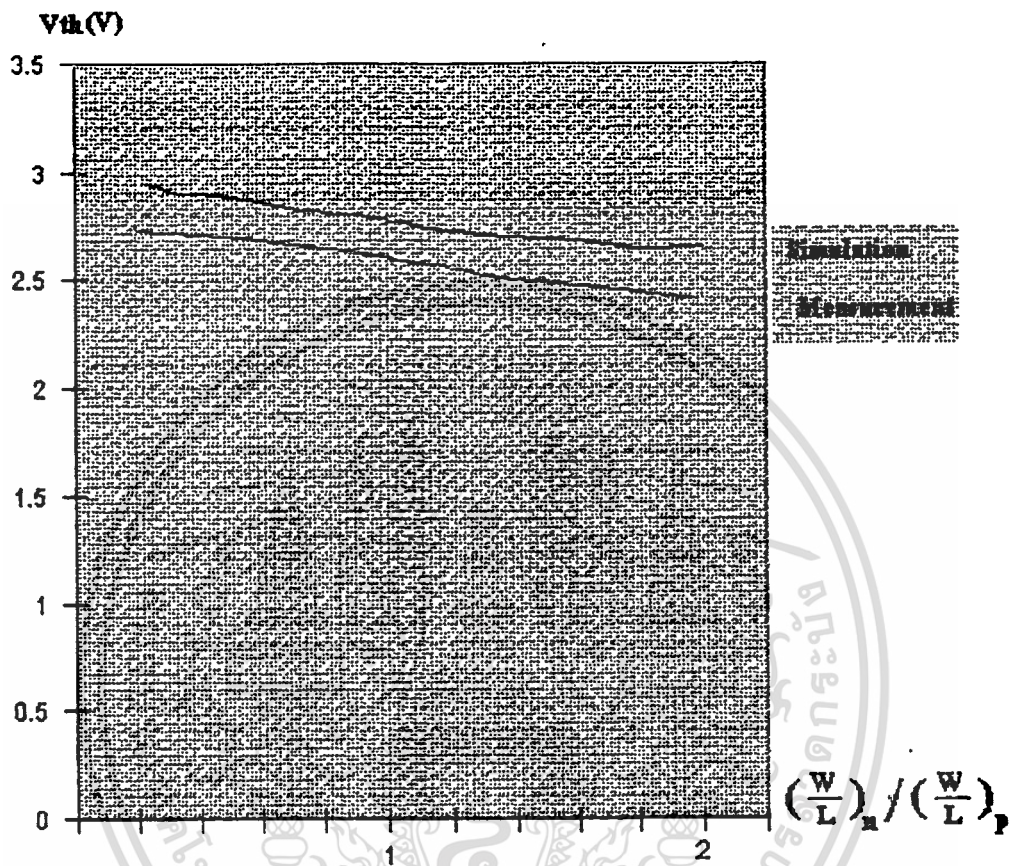
จากรูปที่ 6.37 และ 6.38 จะได้ค่าคุณสมบัติทางไฟตรงต่าง ๆ ดังนี้

	ซิมอสอินเวอร์เตอร์	
	C4	D4
$V_{IL}$ (v.)	2.57	2.6
$V_{IH}$ (v.)	2.7	2.71
$V_{OL}$ (v.)	0	0
$V_{OH}$ (v.)	7	7
$NM_L$ (v.)	2.57	2.6
$NM_H$ (v.)	4.3	4.29
$V_{th}$ (v.)	2.66	2.7

ตารางที่ 6.10 แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของซิมอสอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองแบบ

มาเปรียบเทียบให้เห็นดังแสดงในรูปที่ 6.39

จากรูปที่ 6.39 ค่าที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการจำลองแบบจะพบว่ามีความแตกต่างกันประมาณ 8.6 %

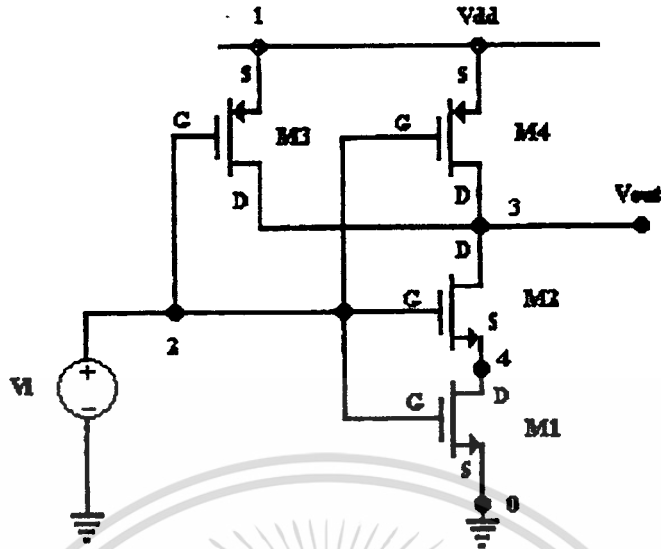


รูปที่ 6.39 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันขีดเริ่ม จากการวัดและการจำลองแบบของอินเวอร์เตอร์

### 6.3.3 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสแนนเกท

#### 6.3.3.1 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสแนนเกท C3

โดยการกำหนด node ให้กับวงจรดังรูปที่ 6.40



รูปที่ 6.40 การกำหนด node ให้กับวงจรมานเกต

ป้อนโปรแกรมเพื่อจำลองผลดังนี้

### Voltage Transfer Characteristic NAND Gate C3

\*\* Circuit Description \*\*

\*dc supplies

Vdd 1 0 DC 8v

\* input digital signal

Vi 2 0 dc 0v

\* MOSFET circuit

M1 4 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M2 3 2 4 4 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M3 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M4 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

\* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

.Model pmos\_enhancement\_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6

\*\* Analysis Request \*\*

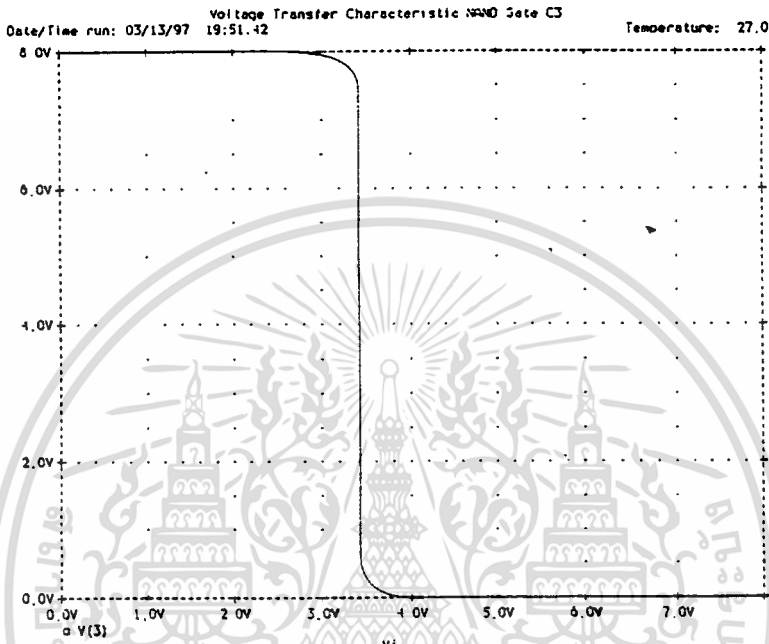
.DC Vi 0 8 0.005

.Probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.End

หลังจากรันโปรแกรมแล้วจะได้ผลดังรูปที่ 6.41



รูปที่ 6.41 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสเนนเกท C3

### 6.3.3.2 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสเนนเกท D4

โดยการป้อนโปรแกรมดังนี้

#### Voltage Transfer Characteristic NAND Gate D4

**\*\* Circuit Description \*\***

\* dc supplies

Vdd 1 0 DC 8v

\* input digital signal

Vi 2 0 dc 0v

\* MOSFET circuit

M1 4 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=20um

เอกสาร M2 3 2 4 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=20um ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M3 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=20um

M4 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=20um

\* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

.Model pmos\_enhancement\_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6

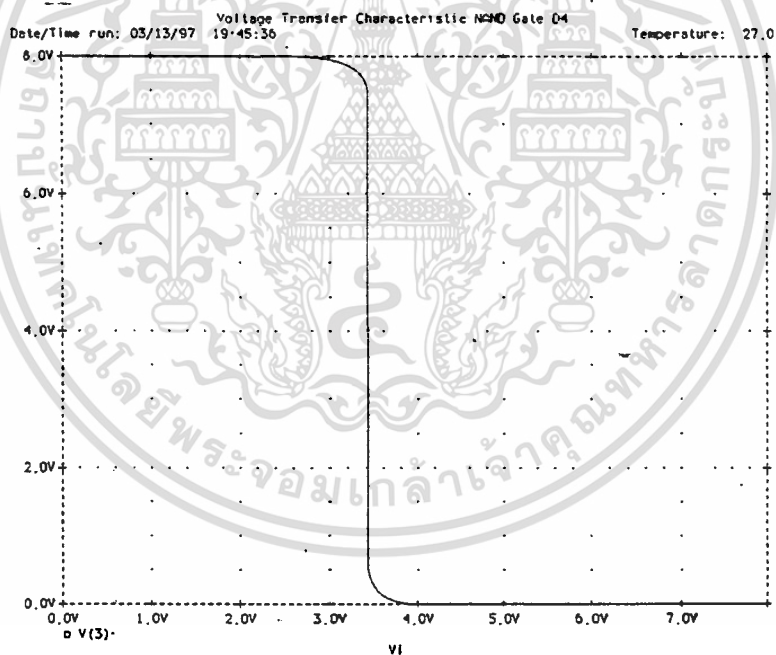
\*\* Analysis Request \*\*

.DC Vi 0 8 0.005

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมจะได้ผลดังรูปที่ 6.42



รูปที่ 6.42 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสเนนเกท D4

### 6.3.3.3 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสเนนเกท E2

ทำได้โดยป้อนโปรแกรมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Voltage Transfer Characteristic NAND Gate E2

**\*\* Circuit Description \*\***

\* dc supplies

Vdd 1 0 DC 8v

\* input digital signal

Vi 2 0 dc 0v

\* MOSFET circuit

M1 4 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

M2 3 2 4 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

M3 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

M4 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

\* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

.Model pmos\_enhancement\_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6

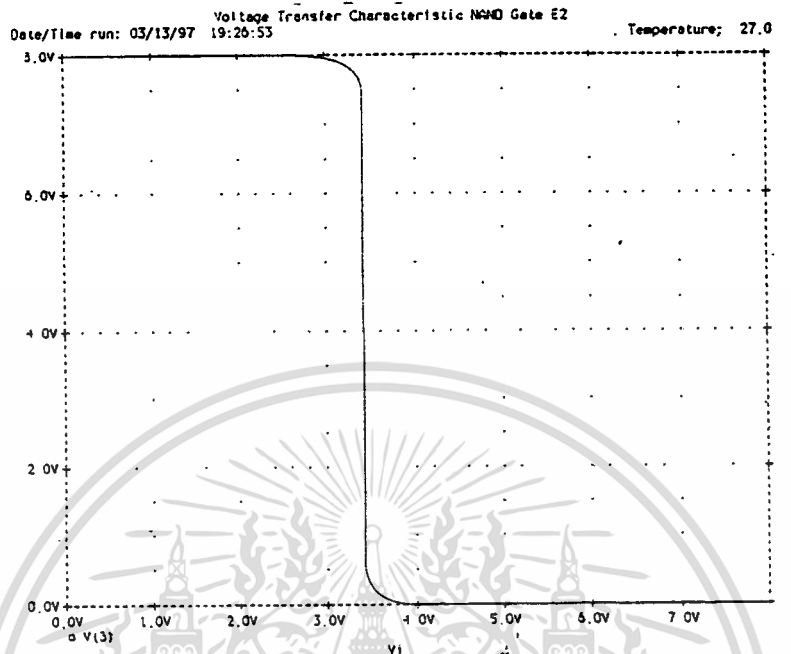
**\*\* Analysis Request \*\***

.DC Vi 0 8 0.005

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมจะได้ผลดังรูปที่ 6.43



รูปที่ 6.43 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสแนนเกท E2

จากรูปที่ 6.41, 6.42 และ 6.43 สามารถหาค่าคุณสมบัติทางไฟตรงต่าง ๆ ได้ดังนี้

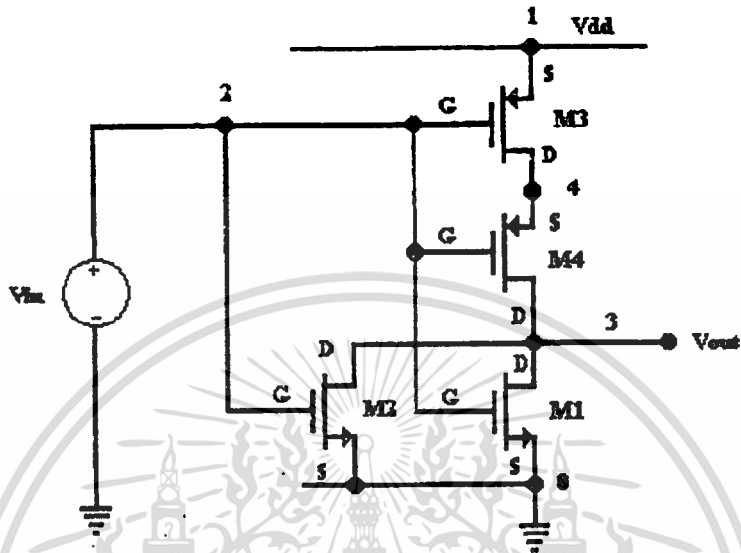
	ซีมอสแนนเกท			* ค่าเฉลี่ย
	C3	D4	E2	
$V_{IL}(v.)$	3.18	3.275	3.28	3.245
$V_{IH}(v.)$	3.54	3.565	3.57	3.56
$V_{OL}(v.)$	0	0	0	0
$V_{OH}(v.)$	8	8	8	8
$NM_L(v.)$	3.18	3.275	3.28	3.245
$NM_H(v.)$	4.46	4.435	4.43	4.44
$V_{th}(v.)$	3.325	3.41	3.41	3.382

ตารางที่ 6.11 ค่าคุณสมบัติทางไฟตรงต่าง ๆ ของซีมอสแนนเกทที่ได้จากการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.4 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสทรานซิสเตอร์

โดยการกำหนด node ให้กับวงจรดังรูปที่ 6.44



รูปที่ 6.44 การกำหนด node ให้กับวงจรนอเกต

#### 6.3.4.1 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสทรานซิสเตอร์ C4

โดยการป้อนโปรแกรมดังนี้

##### Voltage Transfer Characteristic NOR Gate C4

\*\* Circuit Description \*\*

\* dc supplies

Vdd 1 0 DC 8v

\* input digital signal

Vi 2 0 dc 0v

\* MOSFET circuit

M1 3 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M2 3 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M3 4 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M4 3 2 4 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

\* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

```
.Model pmos_enhancement_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6
```

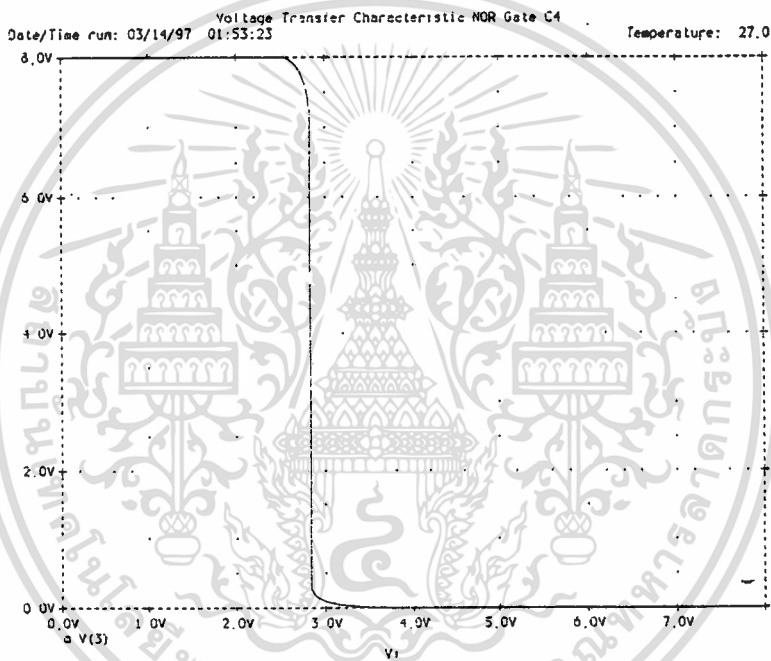
```
** Analysis Request **
```

```
.DC Vi 0 8 0.005
```

```
.Probe
```

```
.End
```

หลังจากรันโปรแกรมจะ ได้ผลดังรูปที่ 6.45



รูปที่ 6.45 กราฟจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสเกต C4

#### 6.3.4.2 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสเกต D4

โดยการป้อนโปรแกรมดังนี้

##### **Voltage Transfer Characteristic NOR Gate D4**

```
** Circuit Description **
```

```
* dc supplies
```

```
Vdd 1 0 DC 8v
```

```
* input digital signal
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vi 2 0 dc 0v

\* MOSFET circuit

M1 3 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=20um

M2 3 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=20um

M3 4 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=20um

M4 3 2 4 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=20um

\* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

.Model pmos\_enhancement\_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6

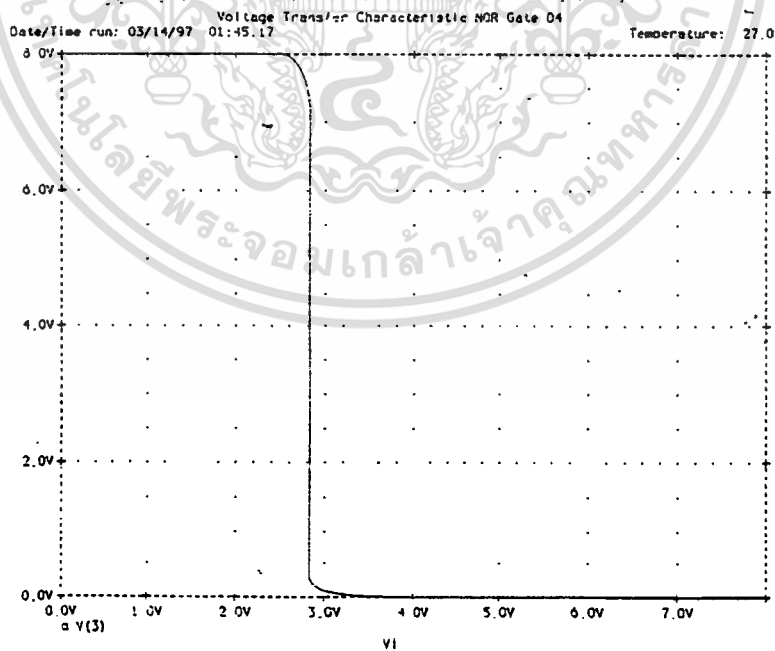
\*\* Analysis Request \*\*

.DC Vi 0 8 0.005

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมจะได้ผลดังรูปที่ 6.46



รูปที่ 6.46 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติไฟตรงของทรานซิสเตอร์ NMOS D4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.4.3 การจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสนอเกต E4 โดยการป้อนโปรแกรมดังนี้

#### Voltage Transfer Characteristic NOR Gate E4

##### \*\* Circuit Description \*\*

##### \* dc supplies

Vdd 1 0 DC 8v

##### \* input digital signal

Vi 2 0 dc 0v

##### \* MOSFET circuit

M1 3 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

M2 3 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

M3 4 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

M4 3 2 4 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=20um W=40um

##### \* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.74 Kp=5.3e-5 Phi=0.76

.Model pmos\_enhancement\_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5 Phi=0.6

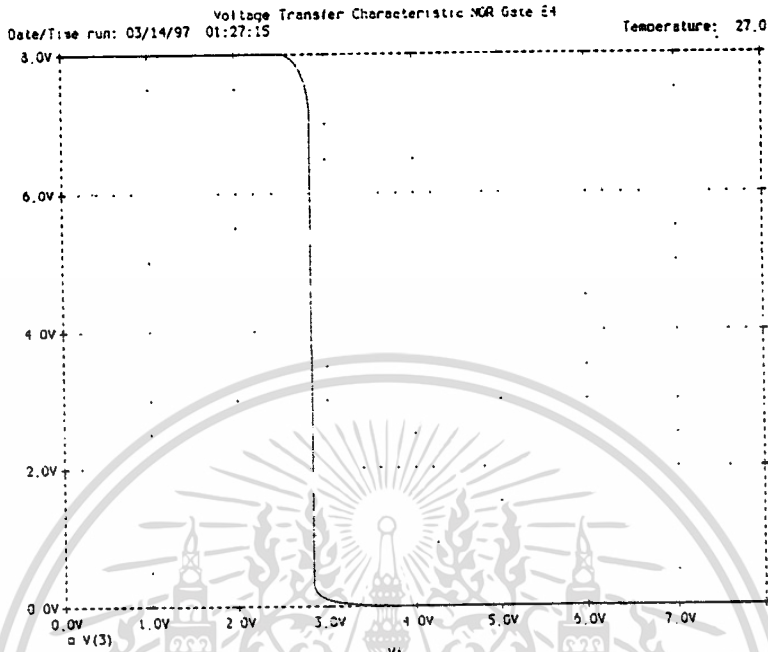
##### \*\* Analysis Request \*\*

.DC Vi 0 8 0.005

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมจะได้ผลดังรูปที่ 6.47



รูปที่ 6.47 กราฟการจำลองผลคุณสมบัติทางไฟตรงของซีมอสเกต E4

จากรูปที่ 6.45, 6.46 และ 6.47 สามารถหาค่าคุณสมบัติไฟตรงต่าง ๆ ได้ดังนี้

พารามิเตอร์	
C4, D4, E4	
$V_{IL}$ (v.)	2.6
$V_{IH}$ (v.)	2.95
$V_{OL}$ (v.)	0
$V_{OH}$ (v.)	8
$NM_L$ (v.)	2.6
$NM_H$ (v.)	5.095
$V_{th}$ (v.)	2.834

ตารางที่ 6.12 แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟตรงค่าต่าง ๆ ของซีมอสเกตที่ได้จากการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
 \*\*\* ในการวัดผลจะพบข้อผิดพลาดของการออกแบบแผน และนอเกตอยู่อย่างหนึ่งคือ  
 'ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้'

การกำหนดค่า  $\left(\frac{W}{L}\right)_n = \left(\frac{W}{L}\right)_p$  ของทุก ๆ ดีไวซ์ ซึ่งจากผลการทดลองและผลการจำลองแบบก็แสดงให้เห็นแล้วว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของแนนเกตจะเท่ากันทุกตัว และค่าแรงดันขีดเริ่มของนอเกตก็จะเท่ากันทุกตัวเช่นกัน จึงไม่มีข้อเปรียบเทียบในเรื่องของความกว้างและความยาวของแชนเนลที่มีผลต่อแรงดันขีดเริ่มแต่อย่างใด

	ซิมอสแนนเกต	ซิมอสนอเกต
	C3 ,D4 ,E2	C4 , D4 , E4
$V_{IL}(v.)$	3	2.5
$V_{IH}(v.)$	3.5	3
$V_{OL}(v.)$	0	0
$V_{OH}(v.)$	7.78	7.25
$NM_L(v.)$	2.8	2.5
$NM_H(v.)$	4.28	4.25
$V_{th}(v.)$	3.25	2.75

ตารางที่ 6.13 แสดงค่าคุณสมบัติทาง ไฟตรงของแนน และนอเกตที่ได้จากการวัด

	ซิมอสแนนเกต	ซิมอสนอเกต
	C3 ,D4 ,E2	C4 , D4 , E4
$V_{IL}(v.)$	3.245	2.6
$V_{IH}(v.)$	3.56	2.95
$V_{OL}(v.)$	0	0
$V_{OH}(v.)$	8	8
$NM_L(v.)$	3.245	2.6
$NM_H(v.)$	4.44	5.095
$V_{th}(v.)$	3.328	2.834

ตารางที่ 6.14 แสดงค่าคุณสมบัติทาง ไฟตรงของแนน และนอเกตที่ได้จากการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของการวัดและการจำลองแบบ มีค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันขีดเริ่มที่ได้จากการวัด และการจำลองแบบประมาณ 3 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### บทสรุป

จากการทำงานในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ ภาคเรียนที่ 1/2538 ถึง ภาคเรียนที่ 2/2539 คณะผู้จัดทำได้ผ่านการทำงานในขั้นตอนต่างๆของกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอส และ ซิมอส มาพอสมควร ดังนั้นในบทนี้ จึงได้ทำการรวบรวมประสบการณ์ต่างๆ ที่ได้จากการทำงานซึ่งอาจจะเป็นประโยชน์ สำหรับผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย โดยมีการแบ่งการสรุปออกเป็นช่วงๆ ดังต่อไปนี้

ช่วงแรกจะเป็นการสรุปการทำงานในห้องปฏิบัติการ ทำการสรุปไว้ดังนี้

1. การออกแบบลวดลายวงจรด้านบน ในขั้นตอนนี้จะทำได้ก็ต่อเมื่อได้มีการศึกษาโครงสร้างของอุปกรณ์ที่จะออกแบบโดยละเอียด หลังจากนั้นต้องทำความเข้าใจ เกี่ยวกับกฎการออกแบบของห้องปฏิบัติการ ซึ่งในแต่ละแห่งจะมีความแตกต่างกัน เมื่อทำความเข้าใจดีแล้วก็เริ่มออกแบบ เมื่อได้แบบตามต้องการแล้วจะทำการสร้างต้นแบบต่อไป

2. การสร้างกระจกต้นแบบ สำหรับขั้นตอนนี้ที่ศูนย์วิจัยฯ ถือว่าเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความอดทนที่สุด เพราะการสร้างกระจกต้นแบบจะเริ่มจากการตัดลวดลายของมาร์คต่างๆบนแผ่นโพลีเอสเตอร์ ซึ่งจะใช้เวลายาวนานพอสมควร เมื่อได้แล้วก็ต้องนำมาถ่ายแบบลงบนกระจกในห้องมืด ซึ่งต้องมีความระมัดระวังในเรื่องแสงอย่างมาก รวมไปถึงเรื่องความสะอาดด้วย

3. กระบวนการถ่ายแบบจากกระจกต้นแบบลงบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งกระบวนการต่างๆจะทำในห้องมืด หลังจากผ่านกระบวนการนี้เกิดลวดลายขึ้นบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งลวดลายที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นสิ่งที่ต้องเน้นมากสำหรับขั้นตอนนี้ก็คือความสะอาดและความแม่นยำในการถ่ายแบบ เพราะฉะนั้นในขณะที่ดำเนินการในกระบวนการนี้ต้องทำด้วยความระมัดระวังและไม่ประมาท เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา

4. กระบวนการต่างๆในห้องแพร่สารเจือ หลังจากทำการถ่ายแบบลงบนแผ่นซิลิกอนแล้วก่อนจะทำการแพร่สารเจือ ก็ต้องมีการสกัดชั้นซิลิกอนออกไซด์ ซึ่งมีการใช้สารเคมีประเภทกรดเข้มข้นอาจเกิดอันตรายได้ ต้องมีการป้องกันให้ดี กระบวนการนี้จะทำในอ่างที่จัดไว้ซึ่งจะมีพัดลมดูดอากาศเพิ่มความปลอดภัย นอกจากการแพร่สารเจือแล้วในห้องนี้จะมีการทำกระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนออกไซด์ การสร้างชั้นอะลูมิเนียม รวมไปถึงการวัดคุณสมบัติเบื้องต้นของแผ่นซิลิกอน สำหรับขั้นตอนต่างๆเหล่านี้ก็เช่นเดียวกันต้องเน้นความสะอาดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ทำกรสร้างเสร็จแล้ว ซึ่งจะทำการในห้องทำการวัดโดยเฉพาะซึ่งจะทำการวัดเบื้องต้นคือ แรงขั้วเริ่ม แรงดันพังทลาย คุณสมบัติทางกระแสและแรงดันและการวัดค่าตัวเก็บประจุ หลังจากนั้นจึงจะดำเนินการวัดคุณสมบัติทางสวิตช์ และการวัดคุณสมบัติต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในการวัดแต่ละแบบจะใช้วิธีการและขั้นตอนที่แตกต่างกัน ข้อมูลเหล่านี้ได้จากรายงานฉบับนี้และเอกสารซึ่งมีอยู่ภายในศูนย์ฯ ก็จะทำให้การทำงานสะดวกขึ้น

ในส่วนของการวัดผลนั้นจะเริ่มจากการวัดแรงดันพังทลายของมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งดำเนินการวัดแรงดันพังทลายของพีมอสแล้ว ถ้าหากพิจารณาให้ดีแล้วมันก็คือการวัดแรงดันพังทลายในส่วนของ n-sub กับ  $p^+$  และดำเนินการวัดแรงดันพังทลายของเอ็นมอสมันก็จะเป็นการวัดแรงดันพังทลายระหว่าง  $n^+$  กับ p-Well จากการทดลองจะ ได้รับความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

$$n\text{-sub} = 1.43 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p\text{-Well} = 3.72 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$p^+ = 1.94 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$n^+ = 4.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

และเนื่องจากว่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือบริเวณ  $n^+$  กับ p-Well มีค่าสูงทั้งคู่ จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์พังทลายแบบชันเนอร์ ึ่งปรากฏการณ์นี้จะมีแรงดันพังทลายที่มีค่าจำ สังกเหตุได้จากแรงดันพังทลายของพีมอสมีค่าประมาณ 45 - 50 โวลต์ ส่วนแรงดันพังทลายที่เกิดจากเอ็นมอสจะมีค่าเพียง 8 โวลต์เท่านั้น และค่าแรงดันนี้จะเป็นตัวกำหนดแรงดันสูงสุดที่ใช้ในวงจรรวมต่อไป

ค่าแรงดันขั้วเริ่มที่ได้จากกระบวนการสร้างจะเห็นว่าเอ็นมอสมีค่า 2.5 โวลต์ ส่วนพีมอสมีค่าถึง -4 โวลต์ ซึ่งจะเห็นว่ามีความขัดแย้งกับสมการแรงดันขั้วเริ่มคือ

$$V_{to} = 2|\phi_F| + \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}N_a(2|\phi_F|)}}{C_{ox}} + V_{FB} \quad (7-1)$$

$$V_{FB} = \Phi_{GS} - \frac{1}{C_{ox}}(Q_{ss} + Q_{ox}) \quad (7-2)$$

ซึ่งได้กล่าวไว้อย่างคร่าว ๆ แล้วในบทที่ 1 จะเห็นว่าค่าแรงดันขั้วเริ่มจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือบริเวณฐานตอง(Bulk) ซึ่งในที่นี้คือ  $N_a$

จากกระบวนการสร้างนี้ฐานรองของพีมอสคือ n-sub และ ฐานรองของเอ็นมอสคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเจือของ p-Well มาก ดังนั้นถ้าหากทำให้เทอมต่าง ๆ นอกเหนือจาก  $N_a$  ในสมการที่ (7-1) มีค่าเท่ากันทั้งของเอ็นมอสและพีมอสแล้ว จะเห็นได้ชัดเจนเลยว่าแรงดันขั้วเริ่มของเอ็นมอสจะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันขั้วเริ่มของพีมอสอย่างแน่นอน หากว่าในการทดลองมันกลับเป็นไปในทางตรงข้าม คำนึงว่าเราจึงจะมาทำการวิเคราะห์ว่าเทอมใดที่มีผลทำให้ค่าแรงดันขั้วเริ่มของมอสทั้งสองชนิดเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

พิจารณาเทอม  $2|\phi_F|$  ซึ่งเรียกว่า bulk Fermipotential และมีค่า

$$2|\phi_F| = \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (7-3)$$

จากการคำนวณจะได้ว่า  $2|\phi_F|$  ของเอ็นมอส = 0.76 และของพีมอส มีค่าเท่ากับ 0.6 ซึ่งจะเห็นว่าไม่แตกต่างกันมากนัก และมีค่าไม่เพียงพอที่จะมีผลกระทบกับแรงดันขั้วเริ่ม

พิจารณา

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0}{t_{ox}} \quad (7-4)$$

ในเทอมของ  $\epsilon_{ox}\epsilon_0$  เท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนค่าความหนาของเกตออกไซด์ ( $t_{ox}$ ) นั้นคือว่ามีค่าเท่ากันเพราะเกิดขึ้นจากขั้นตอนการสร้างเดียวกัน ดังนั้นเทอมนี้ก็อยู่ในกรณี

และสุดท้ายคงจะเหลือเฉพาะสมการ (7-2) เท่านั้นที่จะมีผลต่อแรงดันขั้วเริ่มมากที่สุด

เมื่อ

$$\Phi_{GS} = \Phi_G - \Phi_S \quad (7-5)$$

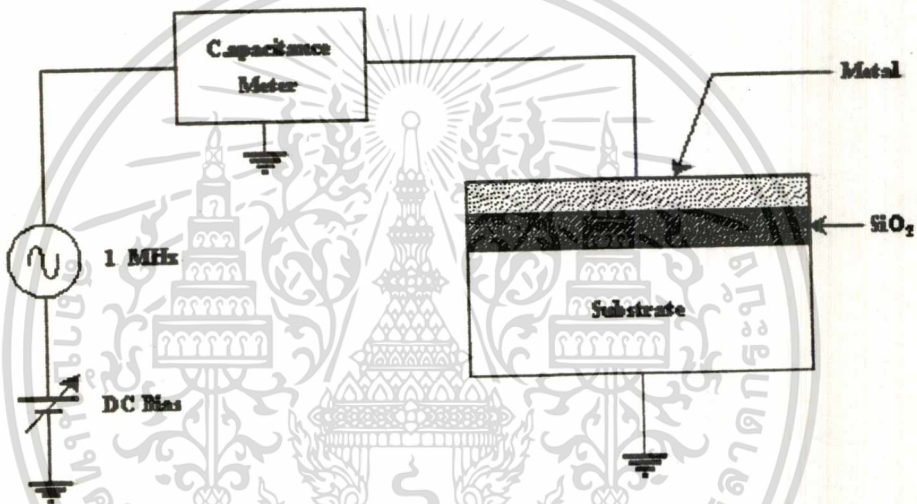
สมการที่ (7-5) คือค่าความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (Work function) ระหว่างวัสดุที่ใช้สร้างเกตและวัสดุที่ใช้สร้างฐานรอง ส่วน  $Q_{ox}$  และ  $Q_{ss}$  คือ oxide และ surface state charge density ตามลำดับ มีหน่วยเป็น  $C/cm^2$  ซึ่งโดยปกติแล้วทั้ง  $Q_{ox}$  และ  $Q_{ss}$  จะมีค่าเป็นบวก ส่วนค่าของ  $\Phi_{GS}$  จะมีค่าเป็นเท่าไรหรือมีเครื่องหมายเป็นบวกหรือลบนั้นก็ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นเกตและฐานรอง และเนื่องจากว่าวัสดุที่ใช้ทำเกตนั้นคือซิลิกอนออกไซด์ และฐานรองนั้นก็เป็นซิลิกอน ทั้งของเอ็นมอสและพีมอส

ดังนั้นจึงสรุปว่าตัวแปรที่สำคัญที่จะทำให้ค่าแรงดันขั้วเริ่มเปลี่ยนแปลงคือ  $Q_{ss}$  ซึ่งจะได้เห็นได้ชัดเจนว่าแรงดันขั้วเริ่มของพีมอสจะมีค่าเป็นลบมากได้ก็เพราะ  $Q_{ss}$  มีค่ามากเกินไปนั่นเอง

และสาเหตุที่ทำให้เกิดนี้ก็มาจากในระหว่างขั้นตอนการสร้างนั้นไม่มีความสะอาดพอ อาจจะมีอะตอมสารเนื้อที่ปะปนเข้าไปอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนมากเกิน ไปจนเป็นเหตุให้เกิดความ

กระเทือนต่อแรงดันขั้วเริ่มของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นเพื่อต้องการที่จะให้ค่า  $Q_{ss}$  นี้มีค่าน้อย หรือมีค่าที่เหมาะสมจึงจำเป็นต้องระมัดระวังเรื่องความสะอาดในระหว่างขั้นตอนการสร้างให้ดี และเลือกค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ฐานรองให้เหมาะสมด้วย

ค่าความจุแสงในส่วนต่าง ๆ ก็เป็นสิ่งที่สำคัญมากอย่างหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลกระทบกับการทำงานของตัวอุปกรณ์โดยเฉพาะเมื่อนำตัวอุปกรณ์ไปใช้งานเกี่ยวกับความถี่ ค่าความจุที่เกิดขึ้นนั้นมีอยู่หลายชนิดเช่น ค่าความจุที่เกิดจากเกตออกไซด์ และออกไซด์ที่บริเวณโดยรอบ (Field oxide) และค่าความจุที่บริเวณรอยต่อต่าง ๆ



รูปที่ 7.1 แสดงวงจรสมมูลใช้ในการวัดค่าตัวเก็บประจุ

เนื่องจากว่าในช่วงนี้เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความจุ 4061 Semiconductor/component Test system มีปัญหาขัดข้องจึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าความจุได้ ทำให้ในรายงานฉบับนี้ไม่มีผลของการวัดค่าความจุที่ส่วนต่าง ๆ แต่ถึงอย่างไรก็ตามจะขออธิบายวิธีการวัดค่าความจุไว้ ณ ที่นี้

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 7.1 เมื่อต้องการทราบค่าความจุก็ให้ป้อนแรงดันไบอัสระหว่าง 10 โวลต์ ถึง -10 โวลต์ พร้อมกับให้ความถี่ 1 MHz ก็จะทราบค่าความจุที่เกตออกไซด์ ( $C_{ox}$ ) ซึ่งค่านี้จะเป็นกุญแจสำคัญที่จะนำไปใช้ในการจำลองแบบเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ส่วนการวัดค่าความจุของรอยต่อต่าง ๆ มีดังนี้คือ  $n^+$  กับ p-Well  $p^+$  กับ n-sub และ p-Well กับ n-sub

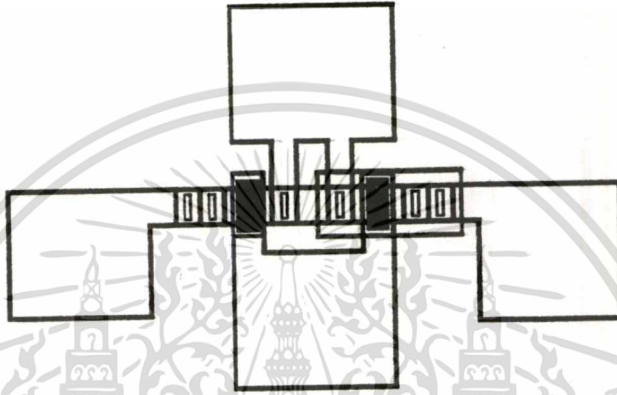
เมื่อการวัดค่าความจุไม่ได้ก็ไม่สามารถหาค่า  $C_{out}$  ที่จะนำไปใช้ในการจำลองแบบได้ แต่ถ้าหากวัดได้ก็จะสามารถหาค่าความจรรวมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การหาค่า Cout ของ ซีมอสอินเวอร์เตอร์

### - การหาค่าความจุที่เกิดขึ้นในส่วนของเกตออกไซด์

เราสามารถหาค่าความจุของเกตออกไซด์ได้โดยการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของเกตออกไซด์ ( $A_g$ ) ดังแสดงในส่วนที่แรเงาของรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 พื้นที่ของเกตออกไซด์

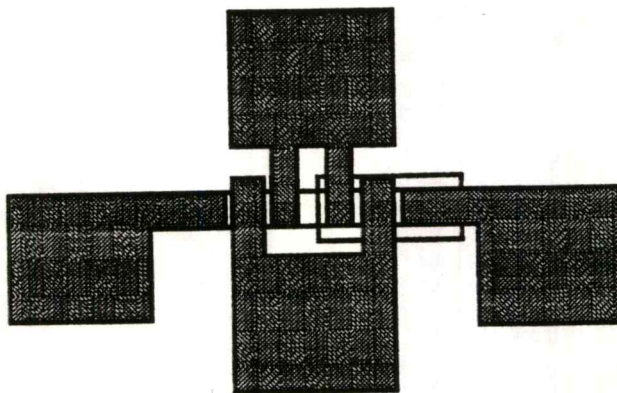
เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$C_g = C_{ox} A_g$$

(7-6)

### - การหาค่าความจุที่เกิดจากออกไซด์ทั่วไป

ทำได้โดยคูณค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ (ที่ได้จากการวัด) กับพื้นที่ส่วนที่เป็นลวดลายอะลูมิเนียมทั้งหมด ( $A_f$ ) ซึ่งแสดงในส่วนที่แรเงาของรูปที่ 7.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ 7.3 พื้นที่ของลวดลาย อะลูมิเนียม

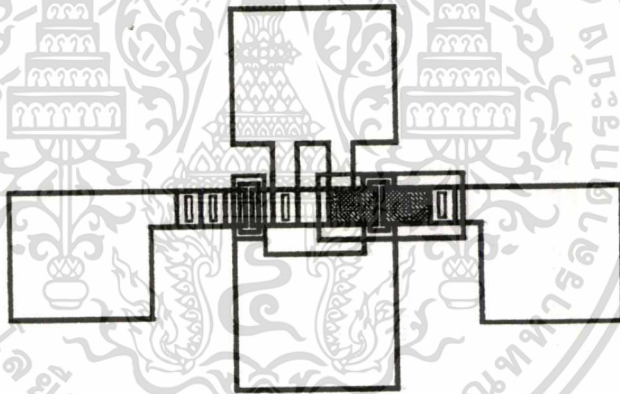
เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$C_f = C_{ox} A_f \quad (7-7)$$

-การหาค่าความจุตัวของรอยต่อ  $n^+$  กับ p-Well ในส่วนครน-ซอส ของเอ็นมอส โดยการคิดพื้นที่เดรน-ซอส ส่วนที่ถูกแพรวสารเจือลงไปคือบริเวณด้านล่าง ( Abottom) และด้านขอบพื้นที่ทั้งหมด( Aside wall )  
เนื่องจากว่า Abottom  $\gg$  Aside wall ดังนั้น

$$C_{NMOS} = C_{bottom} A \quad (7-8)$$

พื้นที่ของ Abottom แสดงให้เห็นส่วนที่แรเงาดังในรูปที่ 7.4



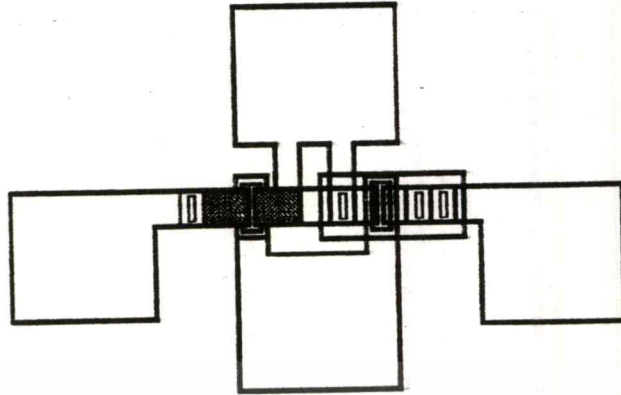
รูปที่ 7.4 พื้นที่ เดรน-ซอสของเอ็นมอส

-การหาค่าตัวเก็บประจุในส่วนของรอยต่อ  $p^+$  กับ n-sub ในส่วนครน-ซอสของทีมอส โดยใช้หลักการเดียวกันกับส่วนของเอ็นมอส ซึ่งพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ แสดงในส่วนที่แรเงาดังแสดงในรูปที่ 7.5 ดังนั้น

$$C_{PMOS} = C_{bottom} A \quad (7-9)$$

เพราะฉะนั้นการหาค่าความจุทั้งหมด ( Cout ) ของวงจรถูกสามารถทำได้โดยนำค่าความจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



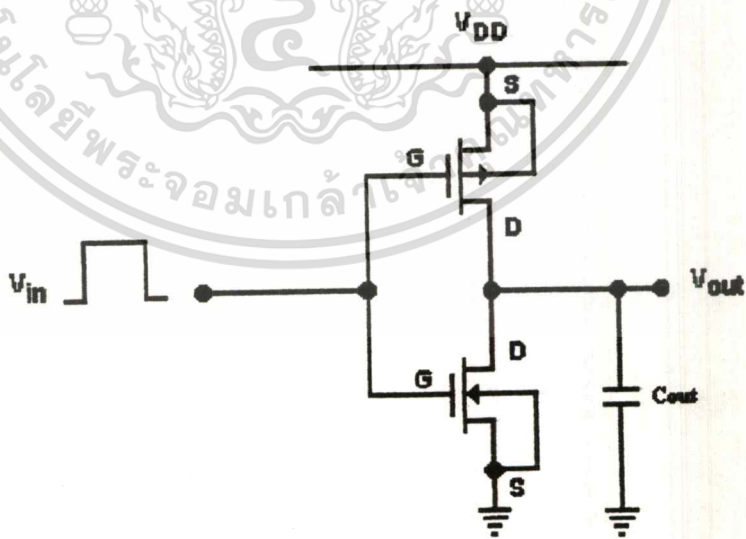
รูปที่ 7.5 พื้นที่ เคอร์น-ซอส ของพีมอส

ส่วนต่าง ๆ มารวมกัน นั่นคือ

$$C_{out} = C_g + C_f + C_{NMOS} + C_{PMOS}$$

(7-10)

เมื่อ ได้ค่า  $C_{out}$  แล้วก็สามารถนำค่าไปแทนในวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.6 เพื่อที่จะจำลองแบบคุณสมบัติทางสวิทซ์

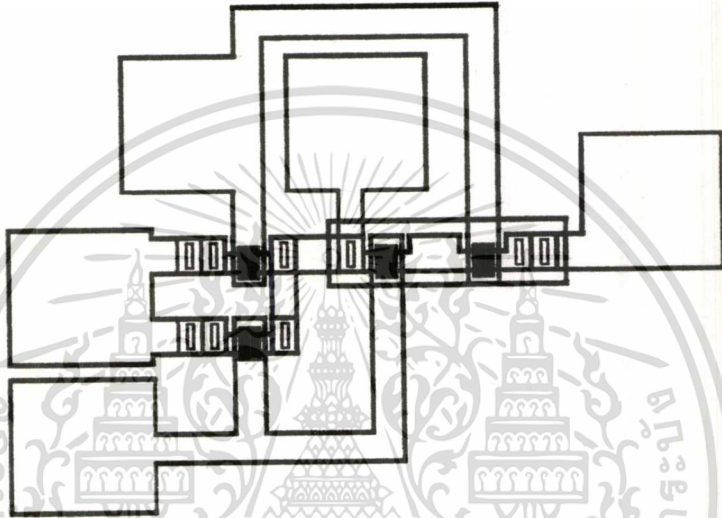


รูปที่ 7.6 แสดงวงจรเสมือนที่ใช้ในการจำลองแบบคุณสมบัติทางสวิทซ์

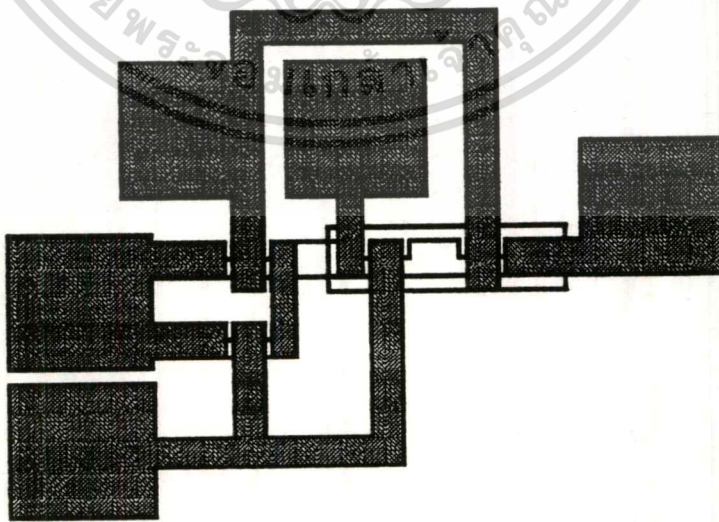
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การหาค่า Cout ของซิมอสแนมเกต

การหาค่า Cout ของซิมอสแนมเกตสามารถหาค่าได้ในลักษณะเดียวกับซิมอสอินเวอร์เตอร์ คือ หาค่าผลรวมของ  $C_g, C_f, C_{mms}$  และ  $C_{pms}$  โดยแสดงการหาพื้นที่ส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 7.7 - 7.10



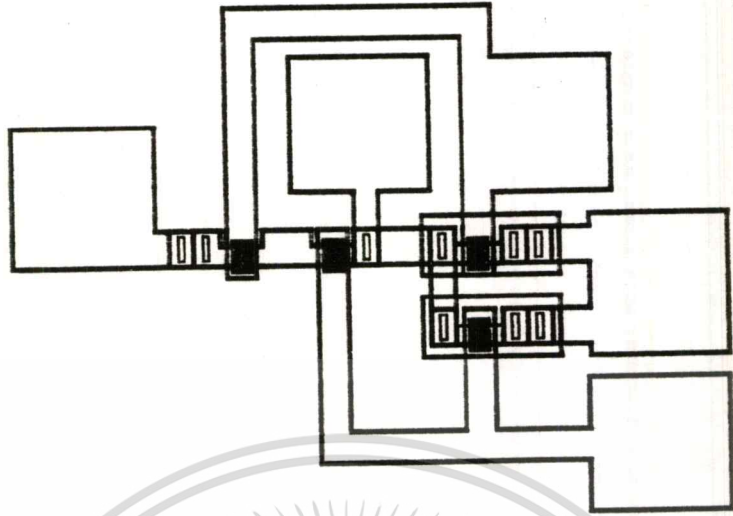
รูปที่ 7.7 พื้นที่ของเกทออกไซด์



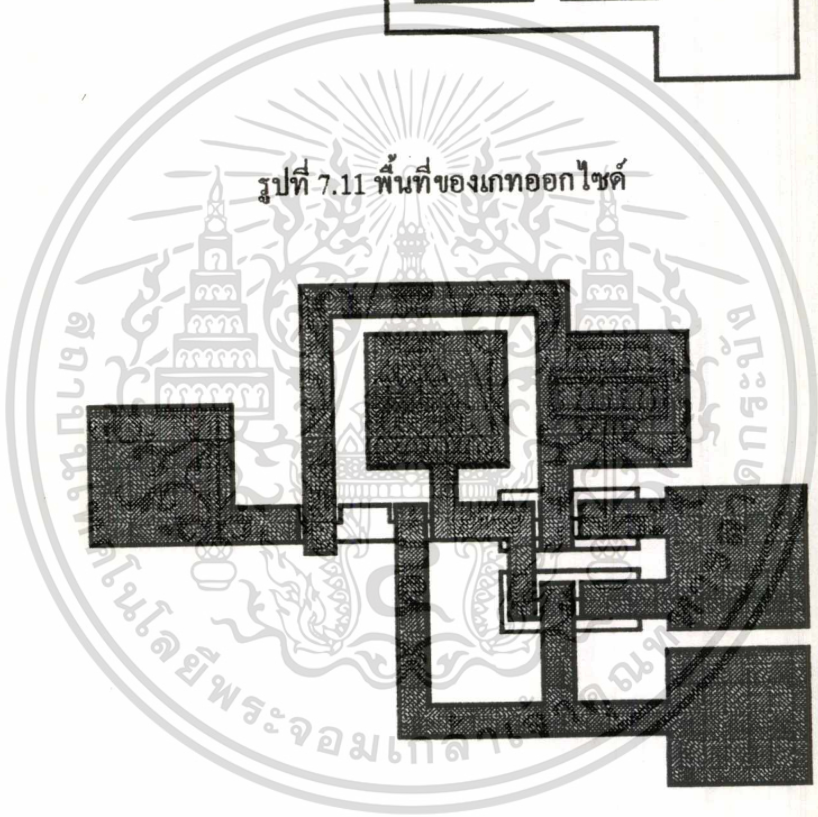
รูปที่ 7.8 พื้นที่ของลวดลายอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



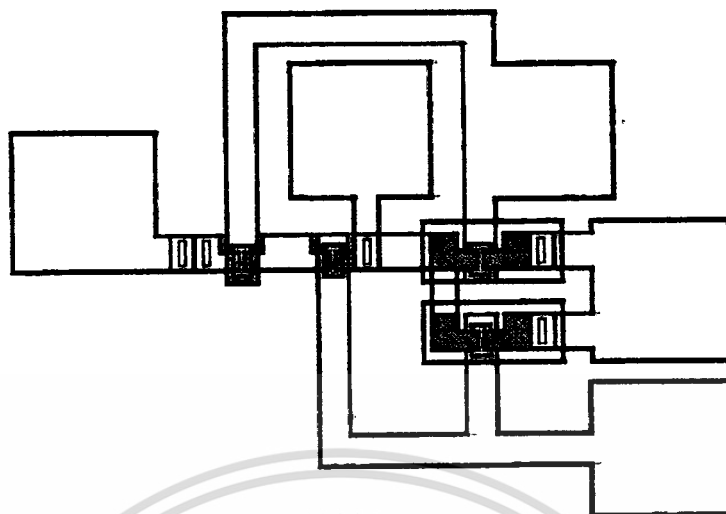


รูปที่ 7.11 พื้นที่ของเกทออกไซด์

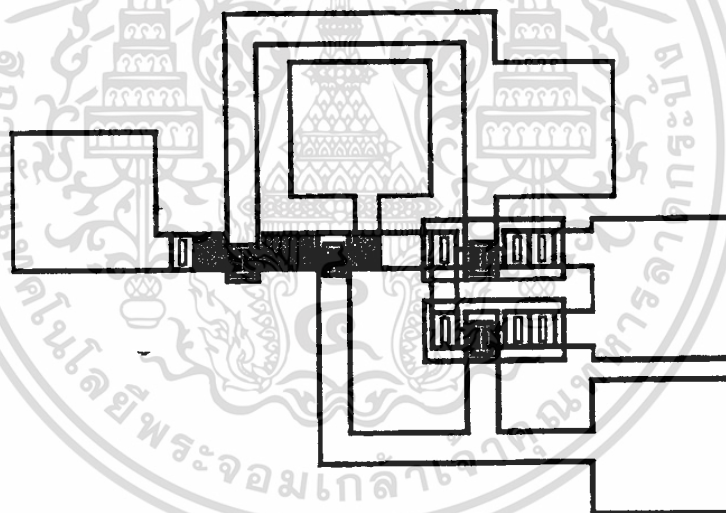


รูปที่ 7.12 พื้นที่ของลวดลายอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 พื้นที่ เครน-ฮอล ของเอ็นมอส



รูปที่ 7.14 พื้นที่ เครน-ฮอล ของพีมอส

เมื่อได้ค่า Cost ของทั้งเอ็นมอสและพีมอสแล้ว ก็สามารถนำค่าไปใช้ในการจำลองแบบ  
คุณสมบัติทางสวิตชิงได้เช่นเดียวกับกรณีของซีมอสอินเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองและการจำลองแบบก็ทำให้เราทราบแล้วว่า การออกแบบลวดลายของ  
แนบและนอเกทนั้น มีจุดประสงค์คือ การกำหนดให้มีมิติของเอ็นมอสและพีมอสมีค่าเท่ากันทุกตัว

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไม่สามารถมองเห็นถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีมิติของ เอ็น  
มอส และพีมอสไม่เท่ากันแต่เราก็สามารถแสดงให้เห็นว่า ความกว้างและความยาวของแกนแนล  
มีผลต่อแรงดันขั้วเริ่มอย่างไร โดยใช้วิธีการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้แบบเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนอื่นจะพิจารณาค่าโปรเซสทรานสกอนคัคแดนซ์ ( $\beta$ ) เสียก่อนดังนี้  
กำหนดให้

$$\beta = \frac{\beta_p}{\beta_n}$$

$$= \frac{k'_n \left( \frac{W}{L} \right)_p}{k'_p \left( \frac{W}{L} \right)_n} \quad (7-11)$$

เมื่อ

$$k' = \mu C_{ox} \quad (7-12)$$

และโดยทั่วไปแล้ว  $\mu_n \cong 2.5\mu_p$  และ  $C_{ox}$  ของทั้งเอ็นมอสและพีมอสถือว่าเท่ากันเนื่องจากเกตออกไซด์สร้างขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นสมการ (7-11) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\beta = \frac{0.4 \left( \frac{W}{L} \right)_p}{\left( \frac{W}{L} \right)_n} \quad (7-13)$$

กำหนดให้ความยาวของแชนเนลมีค่าเท่ากันดังนั้น

$$\beta = \frac{0.4(W)_p}{(W)_n} \quad (7-14)$$

ในกรณีนี้ต้องการจะทราบว่า ที่  $\beta=1$ ,  $\beta>1$  และ  $\beta<1$  จะมีผลต่อแรงดันขีดเริ่มของแชนเนลอย่างไร

กรณี  $\beta=1$

ทำให้ได้

$$(W)_n = 0.4(W)_p \quad (7-15)$$

กำหนดเงื่อนไขให้  $L$  เท่ากับ 10 ไมครอน และ  $(W)_n$  เท่ากับ 40 ไมครอน คงที่ ดังนั้น  $(W)_p$  จึงมีค่าเท่ากับ 100 ไมครอน

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม ออกแบบให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนโปรแกรม โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนกับที่เคยใช้ในการจำลองแบบที่ผ่านมา ดังนี้

### Voltage Transfer Characteristic NAND Gate test for B=1

**\*\* Circuit Description \*\***

\* dc supplies

Vdd 1 0 DC 8v

\* input digital signal

Vi 2 0 dc 0v

\* MOSFET circuit

M1 4 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M2 3 2 4 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M3 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=100um

M4 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=100um

\* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.7 Kp=5.3e-5

.Model pmos\_enhancement\_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5

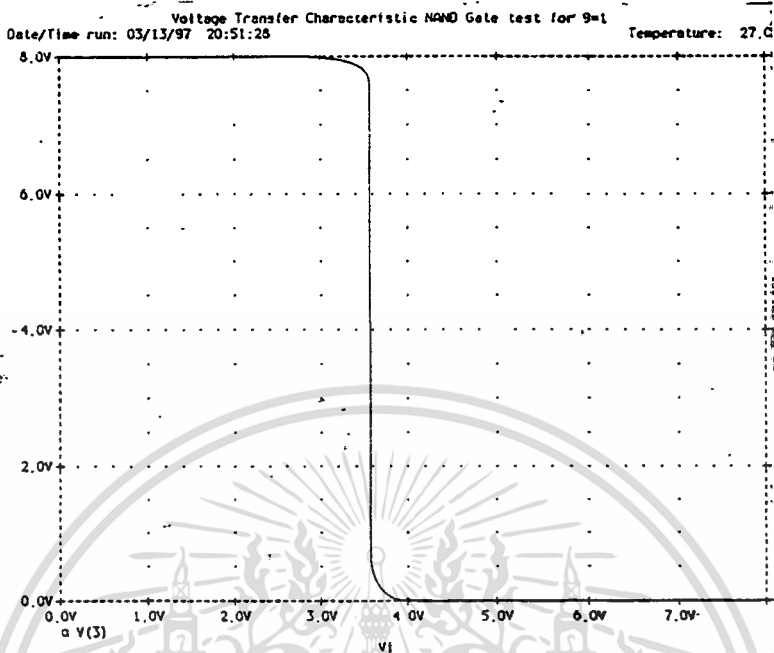
**\*\* Analysis Request \*\***

.DC Vi 0 8 0.005

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมแล้วจะได้ผลดังรูปที่ 7.15



รูปที่ 7.15 ผลการจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟตรงของแวนเกท กรณี  $\beta = 1$

**กรณี  $\beta > 1$**

ในกรณีนี้ จากสมการ (7-14) และ เงื่อนไขเดียวกับกรณี  $\beta = 1$  จะได้ค่า  $(W)_p$  ต้องมีค่ามากกว่า 100 ไมครอน ในที่นี้เพื่อให้เห็นความชัดเจนจึงกำหนดให้  $(W)_p = 800$  ไมครอน โดยป้อนโปรแกรมดังนี้

### Voltage Transfer Characteristic NAND Gate test for $B > 1$

**\*\* Circuit Description \*\***

\* dc supplies

Vdd 1 0 DC 8v

\* input digital signal

Vi 2 0 dc 0v

\* MOSFET circuit

M1 4 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M2 3 2 4 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M3 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=800um

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M4 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=800um

\* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.7 Kp=5.3e-5

.Model pmos\_enhancement\_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5

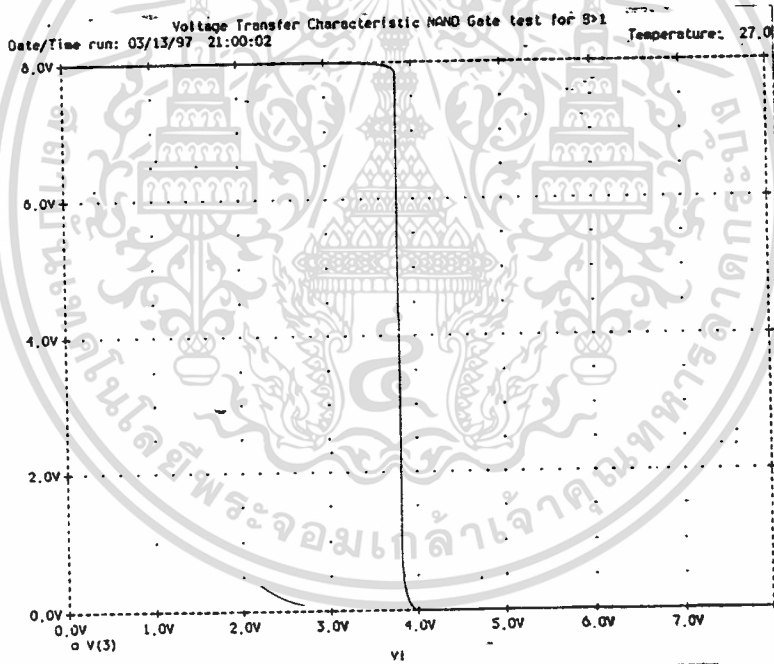
\*\* Analysis Request \*\*

.DC Vi 0 8 0.005

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมจะได้ผลดังรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 ผลการจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟตรงของแนนเกต กรณี  $\beta > 1$

**กรณี  $\beta < 1$**

เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไข  $(W)_p$  ต้องมีค่าน้อยกว่า 100 ไมครอน และเพื่อให้เห็นความชัดเจนจึงกำหนดให้  $(W)_p$  เท่ากับ 10 ไมครอน

โดยป้อนโปรแกรมดังนี้

**Voltage Transfer Characteristic NAND Gate test for B<1**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**\*\* Circuit Description \*\***

\* dc supplies

Vdd 1 0 DC 8v

\* input digital signal

Vi 2 0 dc 0v

\* MOSFET circuit

M1 4 2 0 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M2 3 2 4 0 nmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=40um

M3 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=10um

M4 3 2 1 1 pmos\_enhancement\_mosfet L=10um W=10um

\* mosfet model statements (by default level 1)

.Model nmos\_enhancement\_mosfet nmos Vto=2.5v Gamma=2.7 Kp=5.3e-5

.Model pmos\_enhancement\_mosfet pmos Vto=-4v Gamma=0.54 Kp=2.03e-5

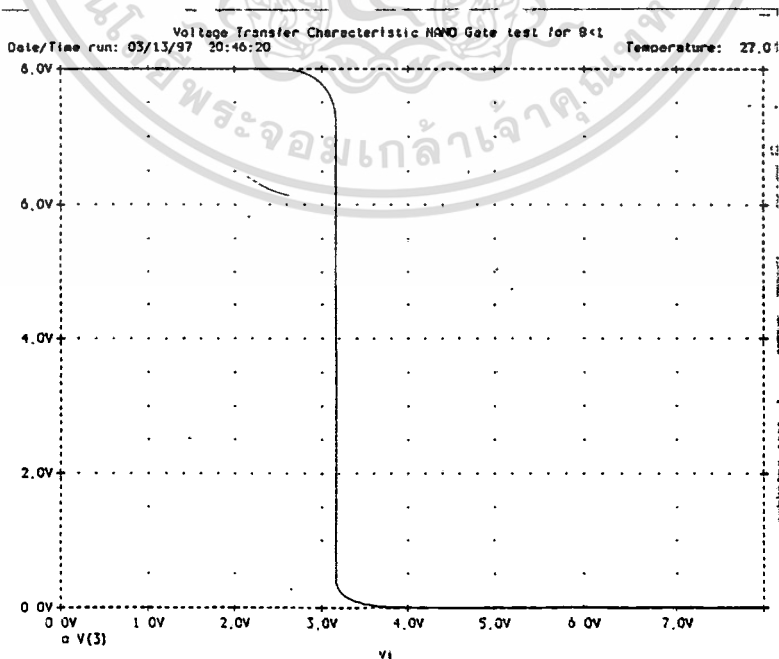
**\*\* Analysis Request \*\***

.DC Vi 0 8 0.005

.Probe

.End

หลังจากรันโปรแกรมจะได้ผลดังรูปที่ 7.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 7.17 ผลการจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟตรงของเนนเกท กรณี  $\beta < 1$   
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองแบบทั้ง 3 กรณีสามารถสรุปให้เห็นได้ดังตารางที่ 7.1

	$V_{th}$ (NAND Gate)
$\beta < 1$	3.16 v
$\beta = 1$	3.57 v.
$\beta > 1$	3.80 v.

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าความแตกต่างของแรงดันขั้วเริ่มของแนนเกตที่  $\beta$  ค่าต่าง ๆ

สำหรับกรณีของนอเกตก็พิจารณาคล้าย ๆ กันกับของแนนเกตซึ่งสามารถสรุปให้เห็นได้ดังตารางที่ 7.2

	$V_{th}$ (NOR Gate)
$\beta < 1$	2.70 v
$\beta = 1$	2.97 v.
$\beta > 1$	3.35 v.

ตารางที่ 7.2 แสดงค่าความแตกต่างของแรงดันขั้วเริ่มของนอเกตที่  $\beta$  ค่าต่าง ๆ

## เอกสารอ้างอิง

1. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, “การศึกษาและสร้างวงจรรวมคิจิตอลพื้นฐานแบบซีมอส”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 150 หน้า, 2535
2. จักรกริษฐ์ กนกกันทพงษ์, “รวมศัพท์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี”, ซีเอ็ดบุ๊คเซ็น, 355 หน้า, 2536
3. อธิคม อุทมนุตร, “คู่มือการใช้ SPICE เบื้องต้น พร้อมตัวอย่างใช้งาน” ,โครงการตำราวิชาการ วิทยาลัยมหานคร, 180 หน้า, 2535
4. Anner.G E , “Plana Processing Primer”, Van Nostrand Reinhold, 1990.
- 5: Allison.J, “Electronic Engineering Semiconductors and Devices”, 2nd ed.London, McGraw-Hill, 376 p., 1990.
6. Bellaouar.A and Mohamed I. Elmasry, “Low-Power Digital VLSI Design Circuit and Systems”, Kluwer Academic Publishers, 1995.
7. El-Kareh.B, “Fundamental of Semiconductor Processing Technology”, Kluwer Academic Publishers, 598 p., 1995.
8. Gordon W. Roberts and Adel S. Sedra, “SPICE for Microelectronic Circuits” ,Saunders College Publishing, 1992.
9. P.Uyemura.J, “Fundamental of MOS Digital Integrated Circuits” ,Adison-Wesley Publishing, 1988.
10. P.Uyemura.J, “Physical Design of CMOS Integrated Circuits Using L-EDIT”, PWS Publishing Bostan, 1995.
11. Pengchan.W, “Modeling with PSPICE” Electronics Research Center The Faculty of Engineering King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็ด้วยความร่วมมือและช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก อาจารย์และเจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ .ดร.สมเกียรติ สุภเดช ผศ.สมศักดิ์ เชียรศิริกุล อ.จิรวัดณ์ ปานกลาง และ อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปฏิบัติงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดีตลอดมา ทำให้ตลอดอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างมาก และต้องขอขอบคุณและขออภัย ทุกๆท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลืออย่างมากซึ่งไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด ทางคณะผู้จัดทำหวัง ว่าคงจะได้รับความอนุเคราะห์จากทุกท่านอีกในโอกาสต่อไป

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และ คุณแม่ ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษา ด้วยดีตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้