

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การออกแบบและจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ SIGFET
DESIGN AND SIMULATION ON CHARACTERISTIC OF SIGFET**



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **34039**
วัน, เดือน, ปี **1 ต.ค. 2542**

เอกสารนี้เป็นเอกสารของห้องสมุดฯ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2541

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ SIGFET

(DESIGN AND SIMULATION ON CHARACTERISTIC OF SIGFET)

ผู้จัดทำ

นายเกียรติโรจน์ ต้นติมาลา

รหัส 39013189



(รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ SIGFET

นายเกียรติโรจน์ ต้นติมาลา

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทมากที่สุดในงานไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ได้แก่วงจรรวม(Integrated Circuits) โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรรวมชนิดมอส(MOS ICs) ซึ่งภายในประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด MOSFET ต่อร่วมกันเป็นวงจรรวมที่มีความซับซ้อนและประกอบด้วยทรานซิสเตอร์จำนวนมาก เช่นมากกว่าหนึ่งล้านตัว สามารถสร้างอยู่ในวงจรรวมได้ เช่นวงจรมหาศาล(Very Large Scale Integration: VLSI) โดยอาศัยโครงสร้างของ MOSFET ที่มี ส่วนที่เป็น โพลีซิลิคอน(Poly silicon) แทน โครงสร้างแบบเก่าที่ใช้ โลหะอะลูมิเนียมเป็นส่วน

ในรายงานฉบับนี้ จะได้กล่าวถึงการศึกษาการออกแบบ และการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MOSFET แบบที่มีส่วนที่เป็น โพลีซิลิคอน โดยเริ่มจากการทดลองสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส (MOS Capacitor) จากการวัดคุณสมบัติ C-V สามารถหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นประจุที่ผิว (Q_{ss} : Surface Charge Density) ได้ และจากการนำค่าความหนาแน่นประจุที่ผิวไปใช้ในการจำลอง จะทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่ม(V_T : Threshold Voltage) กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในแผ่นผลึกฐานรอง(N_{sub}) กราฟดังกล่าว จะช่วยให้เราสามารถเลือกแผ่นผลึกฐานรองที่เหมาะสมเพื่อสร้าง MOSFET ให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ นอกจากนี้ ยังได้ทำการจำลองคุณสมบัติอื่นๆของ MOSFET ที่ถูกกำหนดด้วยขนาดทางเรขาคณิต เช่น ค่ากระแสอิ่มตัว(I_{DSAT}) ที่แรงดันเกตค่าต่างๆ, ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์(G_m) นอกจากนี้ยังได้ทดลองและเปรียบเทียบกับกรณีของโครงสร้างที่มี อะลูมิเนียมเป็นเกตอีกด้วย และจากการนำแบบจำลองกรณีอะลูมิเนียมไปประยุกต์ใช้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ได้เป็นอย่างดี

ผลของการออกแบบ และผลของการจำลองคุณสมบัติของ MOSFET นี้ สามารถนำไปใช้ในการกำหนดเงื่อนไขของการออกแบบขนาดและกระบวนการ สร้างของ MOSFET ที่จะให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าตามต้องการได้

DESIGN AND SIMULATION ON CHARACTERISTIC OF SIGFET

Mr. Kiatrote Tantimala

Assoc. Prof. Dr. Somkiat Supadech (Advisor)

2nd Semester, Educational Year 1998

Abstract

At present, the semiconductor devices which influential in electronics and computer are Integrated Circuits (ICs). Especially, MOS ICs which sometime, use more than 1 million MOS transistors connect together to be a Very Large Scale IC (VLSI). These ICs use poly silicon gate MOSFET instead of the old one, aluminium gate.

In this report, design and simulation on electrical characteristics of polysilicon gate are described. MOS capacitors are fabricated, and theirs C-V characteristic are measured for using to calculate the surface charge density (Q_{ss}). This value are used for simulation to gain the relative graph between the threshold voltage (V_{th}) and impurity atomic concentration on substrate (N_{sub}). This graph is used for choosing proper substrates for fabrication to obtain a proper MOS Transistor. In addition, other importance parameters of MOS Transistor which is specified by geometry dimension, such as, drain-source saturate current (I_{ds}), and Transconductance (G_m) are simulated and compared to aluminium gate MOS Transistor.

The result of design and simulation can be use to specify the condition of dimension design and fabricate process to gain a proper electrical characteristic MOSFET.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 แรงดันขีดเริ่ม	5
2.2 หลักการทำงาน	9
2.3 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน	11
2.4 ตัวเก็บประจุแบบมอส	16
บทที่ 3 กระบวนการสร้าง	16
3.1 การเตรียมแผ่นผลึก	17
3.2 กระบวนการออกซิเดชัน	18
3.3 กระบวนการโฟโตมาสก์กึ่ง	22
3.4 กระบวนการดีฟิวชัน	27
3.5 กระบวนการเมทัลไลเซชัน	34
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง	37
4.1 การสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส เพื่อทดสอบหาค่า Q_{ss}	37
4.2 การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์	48
4.2.1 แรงดันขีดเริ่ม	48
4.2.2 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน	50
บทที่ 5 การทดสอบผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า	57
5.1 การสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเกทเป็นอลูมิเนียม	57
5.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์	70
5.2.1 แรงดันขีดเริ่ม	70
5.2.2 ความต้านทานในช่วงเชิงเส้น	70
5.2.3 ความต้านทานในช่วงอิมิตัว	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเกทเป็น โพลีซิลิกอน	74
5.3.1 ขั้นตอนการสร้าง	74
5.3.2 การสร้างฟิล์มบางของโพลีซิลิกอน ด้วยการสปัตเตอริง	76
5.3.3 การควบคุมความหนาของฟิล์มบางโพลีซิลิกอน โดยการเปลี่ยนแปลงเวลา	78
5.3.4 การทดลองสร้างลวดลายของฟิล์มบางโพลีซิลิกอน ด้วยวิธี Lift-off	81
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์	83
ภาคผนวก	84
บรรณานุกรม	85
กิตติกรรมประกาศ	86



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ภาพภาคตัดขวางของ โครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์	2
รูปที่ 1.2 โครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เม้นท์และดีพลีทันทัน	3
รูปที่ 1.3 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์	4
รูปที่ 2.1 ระดับพลังงานของ โครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์	7
รูปที่ 2.2 การทำงานในช่วงต่างๆ ของมอสทรานซิสเตอร์	10
รูปที่ 2.3 ตำแหน่ง x เพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติกระแส-แรงดัน	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุแบบมอส	14
รูปที่ 2.5 วงจรเสมือนของตัวเก็บประจุแบบมอส	15
รูปที่ 3.1 ลักษณะการเกิดซิลิกอน ไดออกไซด์	18
รูปที่ 3.2 กราฟที่ใช้ในการหาการกระจายของอะตอมสารเจือในกรณีการแพร่แบบ erfc และ แบบ Gaussian	31
รูปที่ 3.3 ค่า Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่างๆ ในซิลิกอน	31
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ในการแพร่ และอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ ของสารเจือชนิดต่างๆ	32
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส	37
รูปที่ 4.2 วงจรเสมือนตัวเก็บประจุแบบมอส	38
รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลย์ในการวัดค่าความจุไฟฟ้า	38
รูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอส ที่ได้จากการทดลอง	39
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขั้วเริ่ม และความหนาแน่นอะตอมสารเจือ	49
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขั้วเริ่ม และค่าพิกัดความต้านทาน	49
รูปที่ 4.7 ผลการคำนวณคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Al gate nMOS	51
รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Al gate pMOS	52
รูปที่ 4.9 ผลการคำนวณคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Si gate nMOS	53
รูปที่ 4.10 ผลการคำนวณคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Si gate pMOS	54
รูปที่ 4.11 ความต้านทานในช่วงเชิงเส้น ที่อัตราส่วน W/L ค่าต่างๆ	55
รูปที่ 4.12 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ที่อัตราส่วน W/L ค่าต่างๆ	56
รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Al gate pMOS	57
รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Al gate nMOS	58
รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.4 ความต้านทานในช่วงเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง	71
รูปที่ 5.5 ความต้านทานในช่วงอิมิตัวของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง	72
รูปที่ 5.6 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ในช่วงอิมิตัวของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง	73
รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด Si gate nMOS	74
รูปที่ 5.8 ระบบการสปีดเทอริงแบบ RF Diode	78
รูปที่ 5.9 ชั้นฟิล์มบางโพลีซิลิกอน ที่ได้จากการทดลอง	79
รูปที่ 5.10 ภาพภาคตัดขวางของชั้นฟิล์มบาง โพลีซิลิกอน	80
รูปที่ 5.11 ขั้นตอนการทดลองสร้างลวดลายของฟิล์มบาง โพลีซิลิกอน ด้วยวิธี Lift-off	81
รูปที่ 5.12 ลวดลายของฟิล์มบาง โพลีซิลิกอนที่ได้จากการทดลอง	82



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สีของซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ความหนาต่างๆ	20
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	50
ตารางที่ 4.2 แรงดันซีดีเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการคำนวณ	50
ตารางที่ 5.1 แรงดันซีดีเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง	70
ตารางที่ 5.2 ค่าความต้านทานในช่วงเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง	71
ตารางที่ 5.3 ค่าความต้านทานในอิมิตัวของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง	72
ตารางที่ 5.4 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ในช่วงอิมิตัวของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง	73



บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 เทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

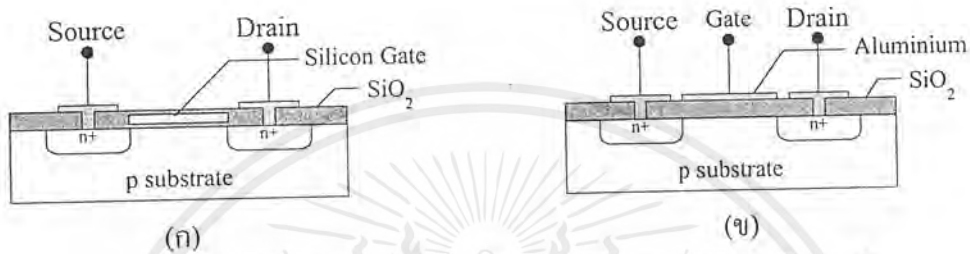
เทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้มีการพัฒนาการอย่างรวดเร็ว นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1947 ที่นักวิจัยของศูนย์วิจัย Bell Telephone สามารถประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ตัวแรกได้ ความก้าวหน้าทางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำก็ได้พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว และทรานซิสเตอร์ก็เข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศ เนื่องจากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่า ใช้พลังงานน้อยกว่า น้ำหนักเบากว่า อย่างไรก็ดี ทรานซิสเตอร์ก็ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดมา และราวปี ค.ศ. 1960 ก็มีการค้นพบเทคโนโลยีใหม่ ได้แก่ เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuit Technology) กล่าวคือ สามารถสร้างทรานซิสเตอร์จำนวนหลายๆตัว รวมทั้งอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (passive device) เช่นตัวต้านทานและตัวเก็บประจุไฟฟ้า ต่อร่วมกันภายใน เป็นวงจรรวมไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดถูกสร้างลงบนชิ้นของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำชิ้นเล็กๆ เรียกสั้นๆว่า ไอซี (IC: Integrated Circuit)

และเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมนี้ ก็ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อให้ได้เทคโนโลยีที่ดีที่สุดโดยมีเป้าหมายคือความเร็วในการทำงาน การใช้พลังงาน และความหนาแน่นของจำนวนอุปกรณ์ที่จะมีได้ จนกระทั่งได้มีสารซิลิกอนมาเป็นฐานรอง (Substrate) ในการผลิตวงจรรวม การพัฒนาของสารกึ่งตัวนำ จึงมุ่งเป้าไปที่เทคโนโลยีหลัก 2 เทคโนโลยี คือเทคโนโลยีแบบไบโพลาร์และเทคโนโลยีแบบมอส (MOS: Metal Oxide Semiconductor) เทคโนโลยีไบโพลาร์มีข้อดีในเรื่องความเร็วในการทำงาน แต่เทคโนโลยีแบบมอสมีข้อดีที่สามารถสร้างวงจรรวมที่มีความหนาแน่นได้สูง เทคโนโลยีแบบมอสจึงได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการออกแบบวงจรรวม ASIC (ASIC Design) และการออกแบบวงจรรวมขนาดใหญ่มาก (VLSI Design) ทั้งนี้เพราะความสามารถในการสร้างวงจรมีความหนาแน่นสูง และสร้างเป็นวงจรมีเลข (Digital circuit) ได้ง่ายกว่า

1.2 ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์

ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์หรือ ซิกเฟต (SIGFET: Silicon Gate Field Effect Transistor) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบหนึ่ง ซึ่งมีการทำงานที่ต้องอาศัยผลของสนามไฟฟ้า เช่นเดียวกับมอสทรานซิสเตอร์ (MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน โดยเฉพาะในการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit) เนื่องจากสามารถสร้างให้มีขนาดเล็กกว่ามอสทรานซิสเตอร์ได้ ทำให้สร้างวงจรรวมที่มีความ

โครงสร้างซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์มีลักษณะคล้ายกับมอสทรานซิสเตอร์ คือสร้างขึ้นโดยอาศัยชั้นสารที่สำคัญ 3 ชั้นคือชั้น ของแผ่นผลึกฐานรอง (Substrate), ชั้นออกไซด์ (Oxide layer) และชั้นเกต (Gate layer) แต่แตกต่างกันที่ ส่วนเกตของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ เป็นผลึกหลายรูปของซิลิกอน (Polycrystalline silicon) มิใช่โลหะอลูมิเนียม (Aluminium) ดังเช่นในมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 1.1 ภาพตัดขวางของโครงสร้าง (ก) ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์
(ข) มอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel

บริเวณส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมที่ปรากฏใน โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ชนิด นี้จะเป็นขั้วโลหะ ซึ่งมีทั้งหมด 3 ขั้วจะมีชื่อเรียกดังนี้ Source , Gate และ Drain จากซ้ายไปขวา โดยที่แต่ละขั้วจะถูกต่อกับบริเวณต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำ โดยที่แต่ละส่วนมีหน้าที่การทำงาน และคุณสมบัติแตกต่างกันดังนี้

ซอส (Source) เป็นบริเวณของสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิด (Different type) กับฐานรอง (Substrate) ทำหน้าที่เป็นแหล่งประจุพาหะที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า

เดรน (Drain) เป็นอีกบริเวณหนึ่งของสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิดกับฐานรอง แต่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน (Same type) กับส่วนซอส ทำหน้าที่เป็นทางออกของประจุพาหะที่มาจากส่วนซอส

เกต (Gate) เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างเดรนกับซอส มีโครงสร้างทุกๆ ไปประกอบด้วย ชั้นบนสุดเป็นผลึกหลายรูปของซิลิกอน (Polycrystalline silicon) ในกรณี ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์และเป็นโลหะในกรณีของมอสทรานซิสเตอร์ ชั้นรองลงมาจะเป็นพวกฉนวน ได้แก่ออกไซด์ (SiO_2) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ และชั้นล่างสุดเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconduction) ซึ่งใช้เป็นฐานรองของส่วนเกตนี้ จะทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมปริมาณประจุพาหะ ที่เคลื่อนที่ไปจากส่วนซอสไปยังส่วนเดรนที่ต้องการ

เนื่องจากทั้งซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ และมอสทรานซิสเตอร์ แตกต่างกันที่โครงสร้างของส่วนเกตเท่านั้น ส่วนอื่นๆ นั้นเหมือนกัน การแบ่งชนิดของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ ก็เหมือนกันกับมอสทรานซิสเตอร์ด้วย ดังนั้นจึงอาจแบ่งมอสทรานซิสเตอร์ ตามชนิดของประจุพาหะที่นำให้เกิดกระแส โดยพิจารณาที่ชนิดของประจุพาหะ ที่บริเวณช่องทางเดินกระแสในขณะที่เกิดกระแสไฟฟ้าได้เป็น 2 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็นแชนแนล ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ (n-channel Silicon Gate FET)

หมายถึงซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ ที่มีประจุลบหรืออิเล็กตรอน เป็นประจุพาหะส่วนมากที่จะทำให้เกิดกระแสรีฟท์ ดังนั้นมอสทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ ส่วนเดรนและส่วนซอส จึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor)

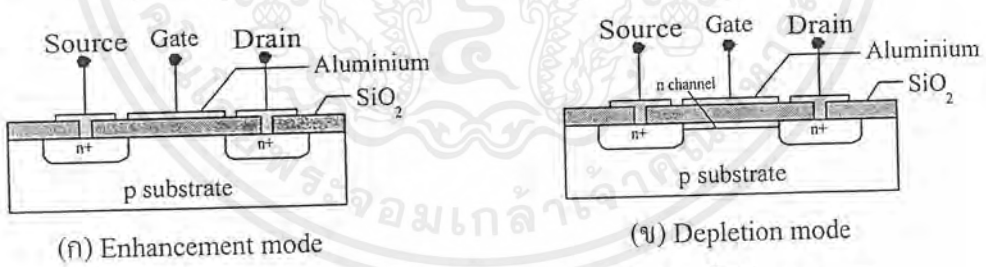
พีแชนแนล ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ (p-channel Silicon Gate FET)

หมายถึงซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ ที่มีประจุบวกหรือโฮลเป็นประจุส่วนมาก ที่ทำให้เกิดกระแสรีฟท์ ดังนั้นมอสทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ส่วนเดรนและส่วนซอส จึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type Semiconductor)

อย่างไรก็ตามในสภาวะปกติก่อนให้ไบอัสของทรานซิสเตอร์ต่างๆไป สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแส กับสารกึ่งตัวนำส่วนเดรนและซอส อาจเป็นชนิดเดียวกัน หรือต่างกันได้ซึ่งแต่ละแบบจะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าในขณะใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีนิยามคำศัพท์ เพื่อบอกประเภท ของสารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสไว้ดังนี้

ดีพลีทชัน (Depletion) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแสที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับ สารกึ่งตัวนำที่ส่วนซอสและเดรน

เอ็นฮานซ์เมนต์ (Enhancement) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริเวณช่องทางเดินกระแส ที่มีคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกับสารกึ่งตัวนำที่ส่วนซอสและเดรน

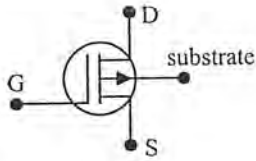


รูปที่ 1.2 ภาพตัดขวางของโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel

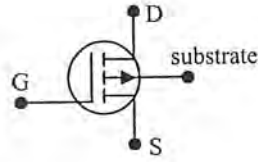
1.3 สัญลักษณ์ของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์

สัญลักษณ์ของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ สามารถบอกให้ทราบได้ว่า เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนแนลหรือพีแชนแนล โดยดูที่หัวลูกศรที่ขาซอส ถ้าหัวลูกศรเข้าหาเกตแสดงว่าเป็นเอ็นแชนแนล ถ้าหัวลูกศรหันออกแสดงว่าเป็น พีแชนแนล หรือดูที่ทิศทางของหัวลูกศรที่ขาฐานรอง (Substrate) ถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาเกตแสดงว่าเป็น เอ็นแชนแนล ถ้าหัวลูกศรหันออกแสดงว่าเป็น พีแชนแนล สัญลักษณ์ของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์สามารถบอกได้อีกว่า ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ที่มีสัญลักษณ์แบบนี้เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นฮานซ์เมนต์ หรือ ดีพลีทชัน ได้อีกด้วยดังรูปที่ 1.3

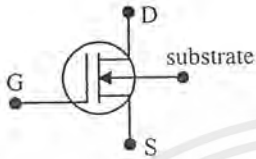
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



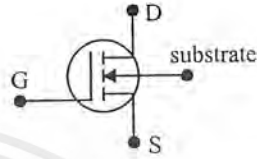
(ก) p channel Depletion mode



(ข) p channel Enhancement mode



(ค) n channel Depletion mode



(ง) n channel Enhancement mode

รูปที่ 1.3 สัญลักษณ์ของมอสทรานซิสเตอร์

1.4 ข้อดีของ Silicon Gate FET

โครงสร้างของ ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ มีการใช้ผลึกหลายรูปของซิลิกอน (Polycrystalline silicon) ซึ่งถูกแพร่สารเจือปริมาณมากๆ เป็นเกต แทนโลหะ (ในมอสทรานซิสเตอร์) โครงสร้างดังกล่าวนี้จะทำให้การควบคุมขนาดของช่องทางเดินกระแสทำได้ง่ายและแน่นอน และช่วยลดค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ต้องการอีกด้วย อัตราการทำงานแบบสวิทซ์จึงเร็วกว่า มอสทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้ในกรณีเป็น ชนิดพีเชนเนล อีอนบวกในซิลิกอนจะเสมือนกับแรงดันที่เกต ทำให้แรงดันขีดเริ่ม (V_{th}) มีค่าน้อยลงกว่าปกติประมาณ 1 โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับมอสทรานซิสเตอร์โดยทั่วไป

บทที่ 2

ทฤษฎีการทำงาน

ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ เป็นทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างเช่นเดียวกับมอสทรานซิสเตอร์ แตกต่างกันเพียงชนิดของสารที่ใช้ทำเกตเท่านั้น ซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์นั้นใช้ผลึกหลายรูปของซิลิกอนทำเกต แต่มอสทรานซิสเตอร์นั้นใช้โลหะ(อลูมิเนียม)ทำเกต ดังนั้นหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ทั้งสองจึงเหมือนกัน จะแตกต่างกันก็เพียงคุณสมบัติทางไฟฟ้าบางอย่างเท่านั้น การศึกษาหลักการทำงานของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ จึงสามารถศึกษาได้จากหลักการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ด้วยเช่นเดียวกัน

2.1 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage : V_{th})

แรงดันขีดเริ่ม คือค่าแรงดันที่น้อยที่สุดที่ต้องการทำให้ผิวของสารกึ่งตัวนำฐานรอง บริเวณใต้ส่วนเกตของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ เกิดเป็นชั้นกลับจากสารกึ่งตัวนำชนิดเดิม ทำให้เกิดส่วนของรอยต่อพี-เอ็นใน ลักษณะแบบขั้นบันได (Step Junction) ซึ่งบริเวณส่วนปลอดพาหะ x_{ml} เราสามารถหาได้จากสมการรอยต่อแบบขั้นบันไดข้างเดียว (One Side Step Junction)

$$x_{ml} = \sqrt{\frac{2k_{si}\epsilon_0(2|\phi_f|)}{qN_{sub}}} \quad (2.1)$$

k_{si} คือ relative permittivity of silicon = 11.7

ϵ_0 คือ free space permittivity of silicon = 8.85×10^{-14} F/m

ϕ_f คือ ค่าศักดาไฟฟ้าสถิตย์ในสภาวะสมดุลย์ (Fermi potential) ของสารกึ่งตัวนำ

$$\phi_f = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{sub}}{n_i} \quad (2.2)$$

k คือ Boltzmann's constant = 1.38×10^{-23} J/°K

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (°K)

N_{sub} คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ (cm⁻³)

n_i คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือใน intrinsic semiconductor

$$= 1.38 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ at } 300 \text{ °K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความหนาแน่นของประจุในส่วนดีพลีทชัน (Bulk Depletion Charge) ต่อหน่วยพื้นที่ คือ

$$Q_b = qN_{sub}x_{ml} = \sqrt{2k_{si}\epsilon_0qN_{sub}(2|\phi_f|)} \quad [C/cm^2] \quad (2.3)$$

เมื่อค่าศักดาไฟฟ้าสถิตย์ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_f) มีค่าเท่ากับค่าศักดาไฟฟ้าสถิตย์ในสภาวะสมดุลของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) แต่มีทิศทางตรงกันข้าม ($\phi_s = -\phi_f$)

แรงดันขั้วเริ่มในอุดมคติ จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{io(ideal)} = V_{ox} + 2|\phi_f|$$

จะได้

$$\begin{aligned} V_{io(n-channel)} &= +\frac{Q_b}{C_{ox}} + 2|\phi_f| \\ V_{io(p-channel)} &= -\frac{Q_b}{C_{ox}} - 2|\phi_f| \end{aligned} \quad (2.4)$$

C_{ox} คือ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ระหว่าง ซิลิกอนเอกท(Polycrystalline silicon) กับสารกึ่งตัวนำ(Silicon) ซึ่งมีออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ(SiO_2) เป็น ไดอิเล็กทริก

$$C_{ox} = \frac{k_{ox}\epsilon_0}{t_{ox}} \quad (2.5)$$

k_{ox} คือ relative permittivity of silicon dioxide = 3.9

t_{ox} คือ ความหนาของ silicon dioxide

ในสมการที่ 2.4 แรงดันขั้วเริ่มประกอบด้วย ค่าเทอมแรกคือ ค่าแรงดันตกคร่อมออกไซด์ที่เกิดจากประจุในเนื้อสาร เทอมที่สองคือค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสภาวะชันกลับและค่าประจุที่ผิว ซึ่งค่าของแรงดันขั้วเริ่มในสมการนี้เป็นค่าทางอุดมคติ แต่ในความเป็นจริงแล้วจะมีเทอมที่เพิ่มเข้าไปอีก และเมื่อรวมเทอมนี้เข้าไปจะได้

$$V_{th} = V_{io} + V_{fb} \quad (2.6)$$

โดย V_{fb} คือว่า flatband voltage ได้มาจากการวิเคราะห์ แผนภาพแถบพลังงานในมอส
ทรานซิสเตอร์ และค่าประจุแปลกปลอมที่บริเวณผิวออกไซด์ ไม่นับญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

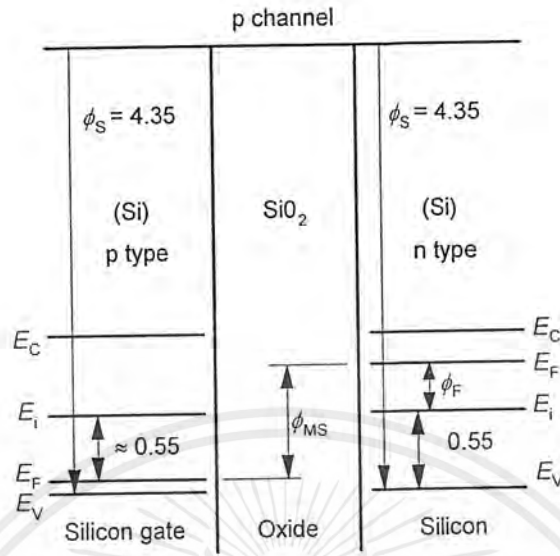
$$V_{fb} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2.7)$$

โดยที่ ϕ_{MS} คือความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิของ อลูมิเนียมกับซิลิกอน

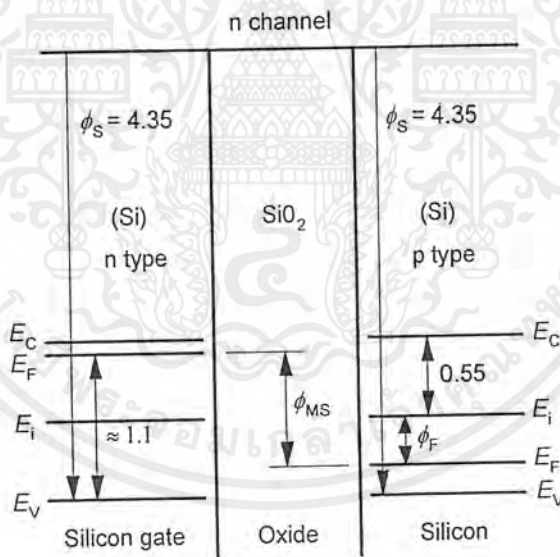


รูปที่ 2.1 ระดับพลังงานของมอสทรานซิสเตอร์ และซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ระดับพลังงานของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ p channel



ง) ระดับพลังงานของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ n channel

รูปที่ 2.1 ระดับพลังงานของมอสทรานซิสเตอร์ และซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

จากรูป 2.1 จะได้ว่าในกรณีมอสทรานซิสเตอร์

$$\begin{aligned}\phi_{MS} (p \text{ channel}) &= 3.2 - (4.35 - 0.55 - \phi_f) \\ &= -0.6 + \phi_f\end{aligned}$$

(2.8-1)

$$\phi_{MS} (p \text{ channel}) = 3.2 - (4.35 - 0.55 + \phi_f)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.8-2) คำ
= -0.6 - \phi_f
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์

$$\begin{aligned}\phi_{MS} (p \text{ channel}) &= 4.35 - (4.35 - 0.55 - \phi_f) \\ &= +0.55 + \phi_f\end{aligned}\quad (2.8-3)$$

$$\begin{aligned}\phi_{MS} (p \text{ channel}) &= (4.35 - 1.1) - (4.35 - 0.55 + \phi_f) \\ &= -0.55 - \phi_f\end{aligned}\quad (2.8-4)$$

จะเห็นว่าในกรณีของ p channel ϕ_{MS} ของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ จะมีค่ามากกว่า ϕ_{MS} ของมอสทรานซิสเตอร์ $+0.55 + \phi_f - (-0.6 - \phi_f) = 1.15$ โวลต์ ดังนั้นแรงดันขีดเริ่ม (V_{th}) ของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์จึงมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์อยู่ 1.15 โวลต์ แต่เนื่องจาก แรงดันขีดเริ่มของชนิด p channel เป็นค่าลบ ดังนั้นแรงดันขีดเริ่มของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์จึงมีค่า (เป็นลบ) น้อยกว่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ 1.15 โวลต์

ในกรณีของ n channel ϕ_{MS} ของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ จะมีค่ามากกว่า ϕ_{MS} ของมอสทรานซิสเตอร์ $-0.55 - \phi_f - (-0.6 - \phi_f) = 0.05$ โวลต์ ดังนั้นแรงดันขีดเริ่ม (V_{th}) ของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์จึงมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์อยู่ 0.05 โวลต์ ด้วยเช่นเดียวกัน

เมื่อแทนค่า ϕ_{MS} ลงในสมการแรงดันขีดเริ่ม (สมการที่ 2.6) จะได้
ในกรณีมอสทรานซิสเตอร์

$$V_{th(p\text{-channel})} = -0.6 - \phi_f - \frac{Q_b + Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2.9-1)$$

$$V_{th(n\text{-channel})} = -0.6 + \phi_f + \frac{Q_b - Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2.9-2)$$

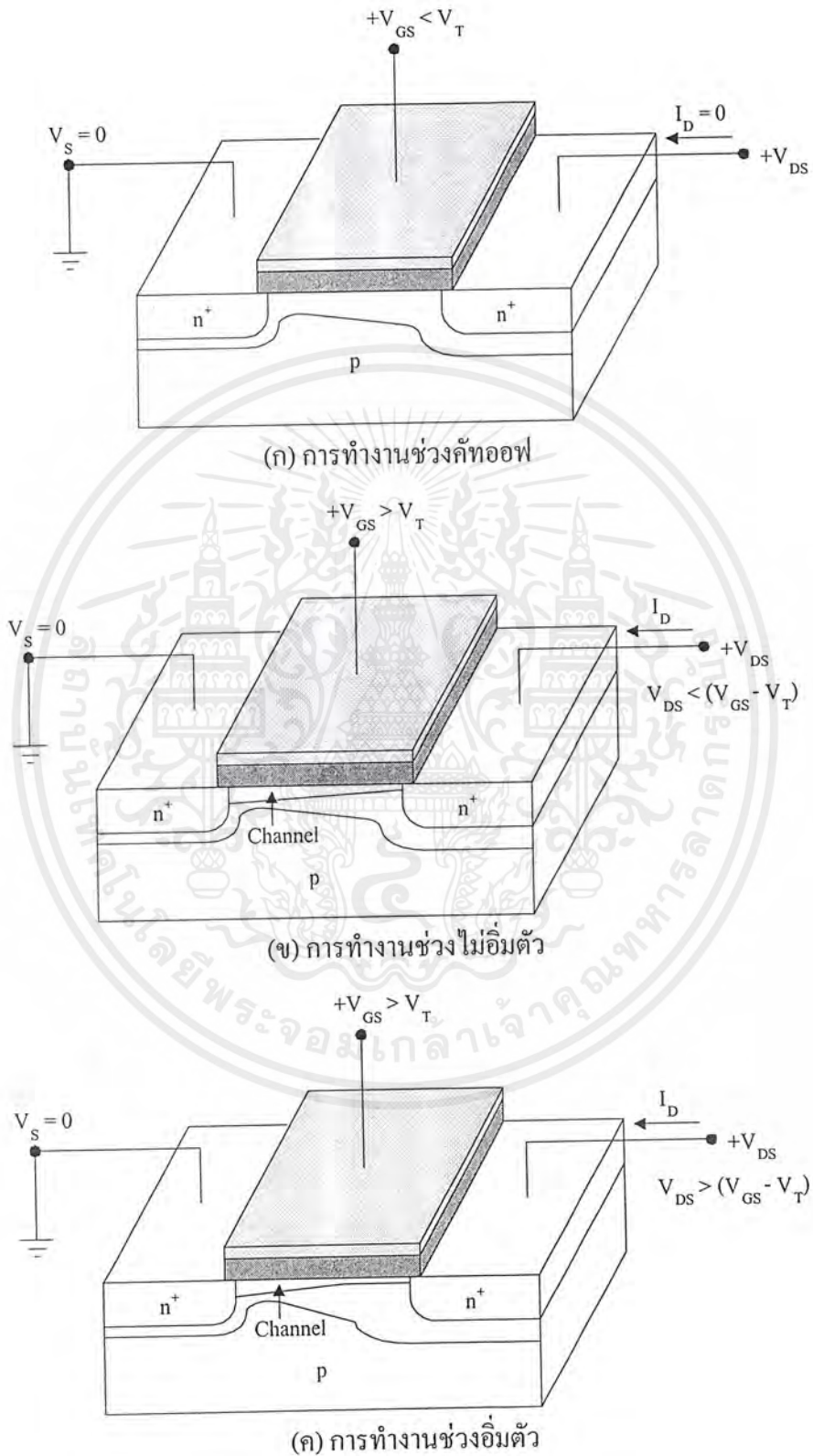
ในกรณีซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์

$$V_{th(p\text{-channel})} = +0.55 - \phi_f - \frac{Q_b + Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2.9-3)$$

$$V_{th(n\text{-channel})} = -0.55 + \phi_f + \frac{Q_b - Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2.9-4)$$

2.2 หลักการทำงาน

การทำงานของซิลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ สามารถศึกษาได้จากการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ เริ่มพิจารณาในกรณีที่ $V_{GS} < V_T$ และมีค่าแรงดัน V_{DS} ค่าหนึ่ง โดยแสดงการให้ศักดาไฟฟ้าดังรูปที่ 2.2 (ก) (ซึ่งเป็นกรณี n channel ถ้าเป็น p channel ทิศทางจะกลับกัน) ในกรณีนี้ค่าแรงดัน V_{GS} จะไม่พอเพียงที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส แม้ว่าจะมีค่า V_{DS} แต่จะไม่เกิดกระแสไหลในมอสทรานซิสเตอร์ เราเรียกการทำงานในช่วงนี้ว่า ช่วงคัทออฟ (Cut Off) ไม่ว่การณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การทำงานในช่วงต่างๆของมอสทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

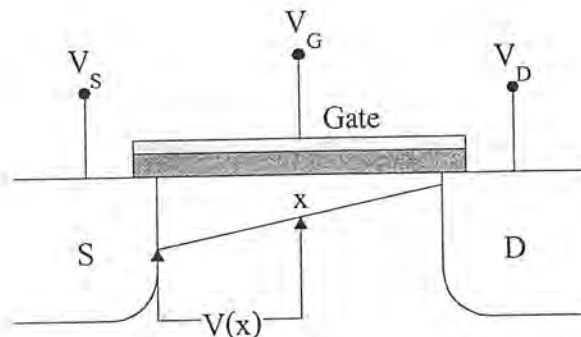
เมื่อแรงดันเกต-ซอส (V_{GS}) มีค่าเพิ่มมากขึ้นและมากกว่า V_T ($V_{GS} > V_T$) สนามไฟฟ้าในแนวดิ่งจะเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนมาสะสมอยู่ในบริเวณผิวจนมีปริมาณมากพอที่จะเกิดชั้นกลับได้ส่วนเกต เราเรียกชั้นกลับนี้ว่า “ช่องทางเดินกระแส”(Channel) ซึ่งจะทำให้ส่วนเดรนและซอสต่อถึงกัน เพราะช่องทางเดินกระแสจะเปรียบเสมือนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เชื่อมระหว่างเดรนและซอส ส่วนในแนวนอนก็จะมีสนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS}) จึงทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านมอสทรานซิสเตอร์ กระแสนี้ถูกเรียกว่ากระแสเดรน (I_D) และเรียกช่วงการทำงานนี้ว่า ช่วงแอคทีฟ (Active) ในช่วงการทำงานแอคทีฟจะมีกระแสเดรน ลักษณะแตกต่างกัน 2 แบบขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของค่า V_{DS} กับ ($V_{GS} - V_T$)

สำหรับค่า V_{DS} ต่ำน้อยกว่าที่ $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$ จะทำให้เกิดช่องทางเดินกระแสภายใต้ ส่วนเกต ดังในรูปที่ 2.2 (ข) ช่วงนี้จะเกิดกระแสไหลจากเดรนไปซอส โดยค่ากระแสจะเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดัน V_{DS} เราเรียกช่วงการทำงานนี้ว่า การทำงานโหมดไม่อิ่มตัว ของช่วงแอคทีฟ

เมื่อ $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$ ลักษณะของช่องทางเดินกระแสแสดงได้ดังรูป 2.2 (ค) จะเห็นว่าบริเวณช่องทางเดินกระแสทางด้านใกล้ส่วนเดรน จะเกิดปรากฏการณ์ซึ่งเรียกว่า พินช์ออฟ (pinch off) คือ ความหนาของช่องทางเดินกระแสบริเวณที่พินช์ออฟจะมีค่าบางมาก เมื่อเทียบกับส่วนอื่น หรือบางที่เรียกว่าช่องทางเดินกระแสขาด แต่ในกรณีนี้ก็จะยังคงมีกระแสเดรนไหลผ่านได้ เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าในส่วนของดีพลีชัน เราเรียกการทำงานในสภาวะนี้ว่า การทำงานโหมดอิ่มตัวของช่วงแอคทีฟ

2.3 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน

คุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของซีลิกอนเกตทรานซิสเตอร์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยหลักการเดียวกันกับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ โดยพิจารณาว่าที่ ตำแหน่ง x บนแนวของช่องทางเดินกระแส สมมติให้มีค่าแรงดันเป็น $V(x)$ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตำแหน่ง x เพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติกระแส-แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\sigma(x)$ คือค่าความนำที่ผิวต่อหนึ่งตารางเมตรของช่องทางเดินกระแส ดังนั้นค่าความนำของส่วนเล็กๆ ดังกล่าวคือ

$$\begin{aligned} G(x) &= q \cdot \Delta n(x) \cdot \mu_e \frac{w}{dx} \\ &= \frac{C_G}{l \cdot w} (V_G - V(x) - V_T) \mu_e \frac{w}{dx} \\ &= \frac{\mu_e C_G}{l \cdot dx} (V_G - V(x) - V_T) \end{aligned} \quad (2.16)$$

ซึ่ง μ_e คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในช่องทางเดินกระแส

กระแสเดรน I_D หาได้จากกฎของโอห์มโดย

$$I_D = G(x) \cdot dV$$

ซึ่ง dV คือแรงดันที่ตกคร่อมส่วนเล็กๆ ในช่องทางเดินกระแส ซึ่งยาว dx เมื่อแทนค่า $G(x)$ จะได้สมการกระแสเดรน

$$I_D = \frac{\mu_e C_G}{l} \frac{1}{dx} (V_G - V(x) - V_T) dV \quad (2.17)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตตลอดแนวช่องทางเดินกระแสซึ่งยาว l และมีแรงดันตกคร่อมรวมทั้งหมด V_D จะได้ว่า

$$\int I_D dx = \frac{\mu_e C_G}{l} \int_0^{V_D} (V_G - V(x) - V_T) dV \quad (2.18)$$

เพื่อให้ง่ายขึ้น เราจะสมมติว่า ค่าความต้านทานที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วของซอสและเดรน มีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นจะได้สมการกระแสเดรน

$$I_D = \frac{\mu_e C_G}{l^2} \left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D \quad \text{เมื่อ } V_D < (V_G - V_T) \quad (2.19)$$

$$I_{D(sat)} = \frac{\mu_e C_G}{l^2} \frac{(V_G - V_T)^2}{2} \quad \text{เมื่อ } V_D > (V_G - V_T) \quad (2.20)$$

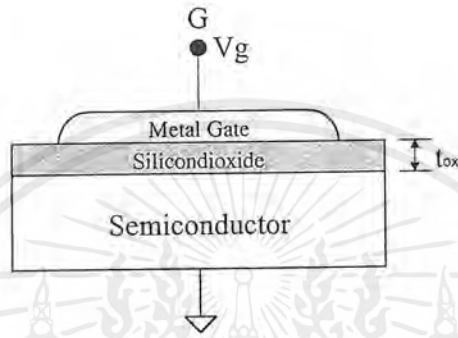
I_D คือกระแสเดรนในช่วงไม้อิมตัว

$I_{D(sat)}$ คือกระแสเดรนในช่วงอิมตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ตัวเก็บประจุแบบมอส

สิ่งประดิษฐ์ประเภทผลของสนามไฟฟ้าที่น่าสนใจและควรกล่าวถึงอีกก็คือตัวเก็บประจุแบบมอส (MOS Capacitor) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4 กล่าวคือประกอบด้วยชั้นของโลหะ, ซิลิกอนออกไซด์ และสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ขั้วของโลหะถูกเรียกว่าเกต เนื่องจากพิจารณาเปรียบเทียบกับมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุแบบมอส

ค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือ

$$C_T = \frac{dQ_{gate}}{dV_g} \quad (2.21)$$

โดยที่ V_g คือแรงดันที่เกต

dQ_{gate} คือประจุบนด้านของเกต ซึ่งมีค่าเท่ากับประจุที่ด้านสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ dQ_{gate} เป็นประจุบวก ประจุบนด้านสารกึ่งตัวนำ dQ_s จะเป็นประจุลบดังนั้น $dQ_{gate} = -dQ_s$

$$C_T = -\frac{dQ_s}{dV_g} \quad (2.22)$$

$$\text{แต่ } V_g = V_{ox} + \phi_s \quad (2.23)$$

โดยที่ V_{ox} คือแรงดันที่ตกคร่อมชั้นของออกไซด์ ซึ่งเท่ากับ $-\frac{Q_s}{C_{ox}}$ เมื่อ

$$C_{ox} = -\frac{\epsilon_{ox}\epsilon_o}{t_{ox}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ϕ_s คือ แรงดันที่ตกคร่อมผิวสัมผัสในบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น

$$V_g = -\frac{Q_s}{C_{ox}} + \phi_s \tag{2.24}$$

และ

$$dV_g = -\frac{dQ_s}{C_{ox}} + d\phi_s \tag{2.25}$$

แทนค่าสมการ (2.25) ในสมการ (2.23) ดังนั้น

$$C_T = \frac{-dQ_s}{-\frac{dQ_s}{C_{ox}} + d\phi_s} = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} - \frac{d\phi_s}{dQ_s}} \tag{2.26}$$

ถ้าพิจารณาว่า $-\frac{d\phi_s}{dQ_s}$ คือค่าของความจุไฟฟ้าของด้านสารกึ่งตัวนำซึ่งก็คือ $\frac{\epsilon_s \epsilon_o}{x_d} = C_s$

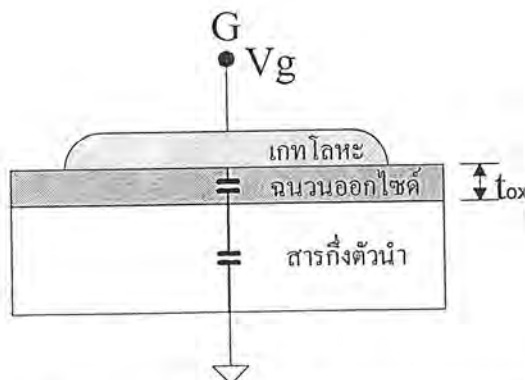
โดยที่ x_d คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ แล้ว ดังนั้นสมการที่ (2.26) เขียนใหม่ได้ว่า

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s}} \tag{2.27}$$

หรือ

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s} \tag{2.28}$$

จากสมการที่ (2.28) แสดงว่าค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุแบบมอสก็คือผลรวมของความจุไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุสองตัวซึ่งต่อกันแบบอนุกรมกัน กล่าวคือมีค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ (C_{ox}) และค่าความจุไฟฟ้าของผิวสัมผัสสารกึ่งตัวนำ ซึ่งรวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะด้วย ดังนั้นวงจรเสมือนของตัวเก็บประจุแบบมอส จึงอาจเขียนได้ง่ายๆ ดังในรูปที่ 2.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.5 แสดงวงจรเสมือนของตัวเก็บประจุแบบมอส อย่างง่าย เมื่อผู้จัดทำเอกสารได้ทราบนโยบายด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้าง

3.1 การเตรียมแผ่นผลึก

3.1.1 บทนำ

สารกึ่งตัวนำซิลิกอนมีบทบาทสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยปกติซิลิกอนเป็นธาตุที่มีมากในบริเวณผิวโลก โดยอยู่ในสภาพของสารประกอบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการสกัดเอาธาตุซิลิกอนแท้ๆ ออกมาเสียก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ ทราบซึ่งเป็นสารประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีธาตุแปลกปลอมชนิดอื่นๆ ปะปนอยู่ราว 1 เปอร์เซ็นต์ จะถูกนำมาสกัดให้เหลือเฉพาะธาตุซิลิกอนเพื่อนำไปใช้งานต่อไป ขั้นตอนของกระบวนการสกัดธาตุซิลิกอนกระทำได้นี้คือ

ขั้นที่ 1 โดยการนำเอาทราย (ซิลิกอนไดออกไซด์) ผสมเข้ากับคาร์บอนและทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อให้ได้ซิลิกอนบริสุทธิ์ (ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์) และจะมีคาร์บอน ไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งเป็นก๊าซและปล่อยให้ระบายออกไปได้ง่าย



ซิลิกอนที่ได้จากการเตรียมในขั้นนี้มีความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องดำเนินการขั้นต่อไปเพื่อแยกสิ่งแปลกปลอมและไม่ต้องการออกจากซิลิกอนต่อไป

ขั้นที่ 2 ซิลิกอนจะถูกนำมาให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับกรดเกลือ เพื่อให้ได้สารประกอบ “ไตรโคลโลซิเลน” (Trichlorosilane)



ขณะที่เกิดปฏิกิริยาและได้ไตรโคลโลซิเลนนี้ สารไม่บริสุทธิ์อื่นๆ จะถูกแยกออกจากซิลิกอน ถ้าหากต้องการให้ได้ซิลิกอนที่บริสุทธิ์มากๆ ก็ทำได้ โดยการนำไตรโคลโลซิเลนไปกลั่น

ขั้นที่ 3 ไตรโคลโลซิเลนจะถูกนำไปแยกธาตุ โดยใช้กระแสไฟฟ้าและโดยการควบคุมบรรยากาศ จะทำให้ได้แท่งผลึกหลายรูป (Polocrystalline) ของซิลิกอนซึ่งบริสุทธิ์



แท่งผลึกหลายรูปซิลิกอนชนิดนี้พร้อมที่นำไปทำการเตรียมผลึกรูปเดี่ยว (Single Crystal) ซึ่งสามารถนำไปสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การปลูกผลึกซิลิกอน

ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวซิลิกอน ในปัจจุบันนี้มีวิธีที่นิยมมากอยู่สองวิธี คือ วิธีของโซโคราลสกี (Czochralski) และวิธีฟลอตโซน (Float Zone) ตามลำดับ (เรามักเขียนย่อๆ ว่า CZ และ FZ วิธีของโซโคราลสกีกระทำได้โดยนำผลึกซิลิกอนหลายรูปของซิลิกอน ไปหลอมละลายในเบ้าหลอมซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า $1416\text{ }^{\circ}\text{C}$ เบ้าหลอมนี้ทำด้วยควอทซ์ (SiO_2) และถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ ความถี่สูง หรือจากไส้ความต้านทานก็ได้ ขณะสร้างผลึก เบ้าหลอมนี้จะถูกทำให้หมุนอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ทุกส่วนได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอเท่าๆกัน บรรยากาศรอบๆ เบ้าหลอมมักนิยมใช้ก๊าซอาร์กอน เมื่ออุณหภูมิของซิลิกอนคงที่อย่างสม่ำเสมอแล้ว จึงทำการเริ่มดึงผลึก โดยการปล่อยแกนที่ใช้สำหรับดึงผลึก ซึ่งตรงปลายของแกนนี้มีเมล็ดผลึกชิ้นเล็กๆ ติดอยู่ ให้ลงไปสัมผัสกับผิวของซิลิกอนซึ่งหลอมละลายอยู่อย่างช้าๆ เมล็ดผลึก (Seed Crystal) จะเป็นจุดที่เริ่มสำหรับการปลูกผลึก เมื่อปลายด้านหนึ่งของเมล็ดผลึกเริ่มหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับซิลิกอนในเบ้าหลอมแล้ว แกนนี้จะถูกดึงขึ้นอย่างช้าๆ จะทำให้ซิลิกอน ซึ่งละลายอยู่ในเบ้าหลอม ติดกับเมล็ดผลึกขึ้นมาและเย็นตัวลง มีลักษณะเป็นผลึกรูปเดี่ยวเหมือนกับเมล็ดผลึกที่นำมาใช้ ในที่สุดก็จะได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวซิลิกอน โดยการควบคุมอุณหภูมิของเบ้าหลอม อัตราการหมุนของเบ้าหลอม และขนาดของเมล็ดผลึกจะทำให้เราสามารถกำหนดขนาดของแท่งผลึกที่สร้างขึ้นมาได้ นอกจากนี้ขณะปลูกผลึกยังสามารถทำการเติมสารเจือ (บางที่เรียกว่า การโด๊ป (Doping)) ชนิดต่างๆ ตามต้องการลงไปในสารกึ่งตัวนำได้ โดยการทำให้สารเจือละลายลงไปเบ้าหลอมด้วย เมื่อปลูกผลึกแล้วจะทำให้ได้ผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือชนิดพี ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือที่เติมลงไป

สำหรับวิธีของ ฟลอตโซน เป็นการปลูกผลึกรูปเดี่ยว ซึ่งเริ่มจากการนำแท่งผลึกหลายรูปมาวางในแนวตั้งภายในอุปกรณ์ โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งซิลิกอนนี้จะสัมผัสกับเมล็ดผลึกรูปเดี่ยว จากนั้นจึงทำให้แท่งซิลิกอนร้อน ในเฉพาะบริเวณแคบๆ โดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง ภายในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ดังนั้นในบริเวณแคบๆ ของแท่งซิลิกอนซึ่งเริ่มจากบริเวณสัมผัสกับเมล็ดผลึกก็จะหลอมละลายจากนั้นโดยการเปลี่ยนตำแหน่งขดลวดเหนี่ยวนำอย่างช้าๆ ก็จะทำให้บริเวณหลอมละลายของแท่งซิลิกอน เปลี่ยนแปลงไปตลอดทั้งความยาวของแท่งอย่างช้าๆ ส่วนที่ละลายนี้เมื่อเย็นตัวลงเป็นของแข็งอีกครั้งก็จะมีสภาพเป็นผลึกรูปเดี่ยว เช่นเดียวกับเมล็ดที่ใช้ในที่สุดแท่งผลึกหลายรูปก็จะกลายเป็นแท่งผลึกรูปเดี่ยวตลอดทั้งแท่ง นอกจากนี้เมื่อต้องการจะปลูกผลึกรูปเดี่ยวชนิดหนึ่งชนิดใด ก็ทำได้โดยการเติมสารเจือลงไปบนแท่งผลึกหลายรูปก่อนที่จะนำมาปลูกผลึก

ในตอนนีแท่งผลึกรูปเดี่ยวซิลิกอนซึ่งปลูกได้จากวิธีทั้งสองนี้ก็จะพร้อมที่จะนำไปตัดเป็นแผ่นบางๆ ซึ่งเรียกว่า “แผ่นผลึก” (Crystal Wafer) เพื่อนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ต่อไป

3.2 กระบวนการ ออกซิเดชัน

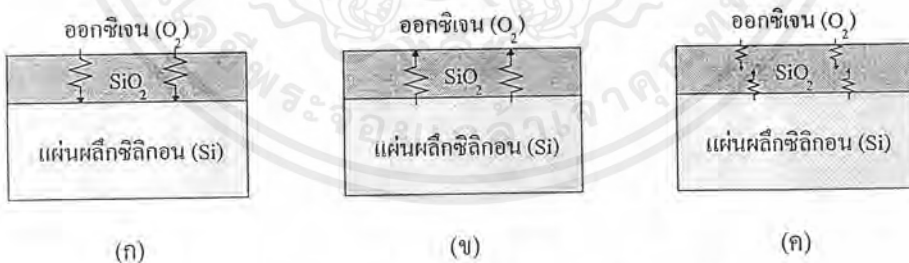
3.2.1 บทนำ

ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicondioxide) เป็นสารซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง และใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึงทำให้ซิลิกอนถูกนำมาใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมากที่สุด ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างด้วยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้ง หรือไอน้ำในบรรยากาศ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงราว 900 - 1300 °C สมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้



กลไกในการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้อาจเป็นไปได้ 3 ลักษณะ คือ

- 1) ออกซิเจนจะแพร่ผ่านชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้นเข้าไปจนถึงหน้าสัมผัสระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนออกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมี ดังแสดงในรูป 3.1 ก)
- 2) ซิลิกอนจะแพร่ผ่านชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ ไปยังผิวสัมผัสระหว่างชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์กับบรรยากาศภายนอกซึ่งมีออกซิเจน เพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.1 ข)
- 3) ทั้งออกซิเจนและซิลิกอนต่างก็เข้าทำปฏิกิริยากันภายในเนื้อของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ค)



รูปที่ 3.1 ลักษณะการเกิดซิลิกอนไดออกไซด์

3.2.2 กระบวนการออกซิเดชัน

ก่อนกระบวนการออกซิเดชันแผ่นผลึกซิลิกอนจะถูกนำไปทำความสะอาดผิวหน้า เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฝุ่นละอองหรือสิ่งแปลกปลอมติดค้างอยู่บนผิวซิลิกอน และโดยเฉพาะเมื่อทำความสะอาดแล้วไม่ควรให้สิ่งหนึ่งสิ่งใดสัมผัสผิวซิลิกอนอีก โดยเฉพาะร่างกายของคนเราเพราะจะทำให้โซเดียมซึ่งร่างกายขับถ่ายออกมาทางผิวหนังและจะมีผลทำให้สิ่งประดิษฐ์ที่เราสร้างขึ้นเสียหายและ

ใช้การไม่ได้ เพราะมีกระแสมากเกินไป เมื่อแผ่นผลึกถูกทำให้แห้งแล้วก็จะถูกนำไปวางบนแท่นเอกซเรย์เป็นอีกขั้นหนึ่งเพื่อตรวจสอบการแข็งตัวของฟิล์มซิลิกอน เมื่ออยู่ภายใต้แท่นเอกซเรย์จะขึ้นตามการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วางแผ่นผลึก (ทำด้วยควอทซ์) ซึ่งเรามักเรียกกันว่า “โบริต” (boat) เพื่อดำเนินการใส่เข้าไปในท่อควอทซ์สำหรับการออกซิเดชันต่อไป ก๊าซออกซิเจนแห้งซึ่งปล่อยให้ผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับซิลิกอน และยังคงแน่ใจว่าเป็นก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปน ในการออกซิเดชันแบบชื้น (wet oxidation) เราใช้ไอน้ำแทนออกซิเจนแห้งทั้งนี้โดยการปล่อยไอน้ำเข้าไปในท่อควอทซ์ได้ 3 วิธีดังนี้คือ

1. ปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าไปในขวดแก้ว ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนแต่มีค่าต่ำกว่าจุดเดือด (ราว $98\text{ }^{\circ}\text{C}$) ท่อก๊าซออกซิเจนจะถูกจุ่มลงไปใต้น้ำบริสุทธิ์ซึ่งร้อนทำให้เกิดเป็นฟองอากาศผุดขึ้น ฟองอากาศที่ผุดขึ้นมานี้ก็คือก๊าซออกซิเจนซึ่งอิ่มตัว (มีไอน้ำด้วย) และจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ของเขา ระยะห่างระหว่างทางออกของก๊าซในขวดแก้วและท่อควอทซ์ของเขาของออกซิเดชันไม่ควรอยู่ไกลนัก เพราะอาจเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำได้ ซึ่งควรหลีกเลี่ยงมิให้เกิดกรณีเช่นนี้ได้ ความดันของไอน้ำในขวดแก้วจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำในขวดแก้ว โดยปกติอุณหภูมิของน้ำในขวดแก้วจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งต่ำกว่าจุดเดือด

2. โดยการทำให้ก๊าซไฮโดรเจนสันดาปกับออกซิเจน วิธีนี้อาจเรียกว่าการเผาไฮโดรเจน (burnt hydrogen) หรือ “ระบบทอช” (torch system) โดยไอน้ำจะเกิดขึ้นเมื่อไฮโดรเจนได้รับความร้อนในบรรยากาศซึ่งมีออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกปล่อยผ่านท่อเข้าไปในท่อควอทซ์ของเขา ข้อควรระวังก็คือต้องควบคุมปริมาณของไฮโดรเจนให้ถูกต้องและเหมาะสม เพราะมิฉะนั้นจะเกิดการระเบิดขึ้นได้ถ้าหากปริมาณของไฮโดรเจนมากเกินไป

3. วิธีที่ 3 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันอย่างขึ้นนี้ก็คือ “ระบบแฟลช” (flash system) โดยหยดน้ำบริสุทธิ์จะถูกปล่อยลงมาในขวดแก้วซึ่งถูกทำให้ร้อน ทำให้น้ำกลายเป็นไอและถูกก๊าซออกซิเจน ซึ่งไหลผ่านขวดแก้วนี้พัดพาออกไปจากขวดแก้วไหลเข้าไปยังท่อควอทซ์ของเขาออกซิเดชัน

3.2.3 คุณสมบัติของชั้นออกไซด์

คุณสมบัติที่สำคัญของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่เราจะระบุ ก็คือความหนาและคุณภาพของชั้นออกไซด์ ความหนาแน่นของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ สามารถพิจารณาได้จากการสังเกตสีที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับผิวแผ่นผลึกในขณะที่ให้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์หรือแสงในเวลากลางวัน ค่าของความหนาของชั้นออกไซด์ และสีที่สังเกตได้แสดงดังในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าความหนานี้ได้โดยวิธีวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นโลหะสองแผ่นที่รู้ค่า และพื้นที่ของชั้นออกไซด์นี้ขึ้นอยู่กับ และโดยใช้อุปกรณ์จูลทรศน์แบบ interferometer และวิธีที่ได้ค่าความหนาซึ่งแน่นอนมากที่สุด

ก็คือ การใช้กล้องที่เรียกว่า ellipsometer

ความหนา (°A)	สี
500	Tan
700	Brawn
1000	Dark Violet to Red Violet
1200	Royal Blue
1500	Light Blue
1700	Metallic to very light Yellow - Green
2000	Light Gold or Yellow - slightly Metallic
2200	Gold with slight Yellow - Orange
2500	Orange to Melon
2700	Red - Violet
2800	Violet
3000	Blue to Violet - Blue
3100	Blue
3200	Blue to Blue - Green
3400	Light Green
3500	Green to Yellow - Green
3600	Yellow - Green
3700	Green - Yellow
3900	Yellow
4100	Light Orange
4200	Carnation Pink
4400	Violet - Red
4600	Red - Violet
4700	Violet
4800	Blue - Violet
4900	Blue
5000	Blue - Green
5200	Green

ตารางที่ 3.1 สีของ SiO₂ ที่ความหนาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนา (°A)	สี
5400	Yellow - Green
5600	Green - Yellow
5700	Yellow
5800	Light Orange or Yellow to Pink
6000	Carnation Pink
6300	Violet - Red
6800	Violet - Red to Blue - Green
7200	Blue - Green to Green
7700	Yellow
8000	Orange
8200	Saimon
8500	Light Red - Violet
8600	Violet
8700	Blue - Violet
8900	Blue
9200	Blue - Green
9500	Yellow - Green
9700	Yellow
9900	Orange
10000	Carnation Pink
10200	Violet - Red
10500	Red - Violet
10600	Violet
10700	Blue - Violet
11000	Green
11200	Yellow - Green
11800	Violet
11900	Red - Violet

ตารางที่ 3.1 สีของ SiO₂ ที่ความหนาต่างๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพของชั้นออกไซด์ เช่น ค่าไดอิเล็กตริกจะเป็นตัวกำหนดค่าของพารามิเตอร์สองค่าคือ

1. ความทนทานต่อการพังทลาย (breakdown strength)
2. จำนวนสิ่งเจือปนในชั้นออกไซด์ ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

ความทนทานต่อการพังทลายหาได้โดย การทดลองให้ชั้นของออกไซด์เป็นไดอิเล็กตริกของแผ่นโลหะสองแผ่นที่ประกบอยู่แล้ว จึงทำการเพิ่มแรงดันไบอัสแก่ แผ่นโลหะทั้งสองกระทั่งเกิดการพังทลายกระแสไหลทะลุผ่านชั้นออกไซด์ โดยทั่วไปในซิลิกอนออกไซด์ควรมีความทนทานต่อสนามไฟฟ้าราว $600 \text{ V}/\mu\text{m}$ และจำนวนของสิ่งแปลกปลอมในชั้นออกไซด์ (ส่วนใหญ่หมายถึงโซเดียมไอออน) สามารถวัดค่าได้ด้วยเทคนิคซึ่งเรียกว่า “Capacitance-Voltage”(C-V) เทคนิคดังกล่าวนี้ทำได้โดย การทำให้แถบโลหะสองแถบประกบอยู่ที่ด้านตรงกันข้ามทั้งสองด้านของชั้นออกไซด์ ทำให้มีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า แล้วจึงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างนี้ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสทั้งสองแบบ (สลับขั้ว) ค่าความจุที่วัดได้จะแตกต่างกัน ถ้าหากในชั้นออกไซด์มีสิ่งแปลกปลอม (โซเดียมไอออน) เจือปนอยู่

3.3 กระบวนการโฟโตมาสก์กิ้ง (Photomasking)

3.3.1 บทนำ

งานของกระบวนการโฟโตมาสก์กิ้ง (Photomasking) อาจถูกแบ่งออกได้เป็นสองขั้นตอนซึ่งจุดประสงค์ของกระบวนการนี้ ก็คือถ่ายภาพแบบแผนของสิ่งประดิษฐ์ลงบนผิวของแผ่นผลึกซิลิกอน ขั้นตอนทั้งสองของกระบวนการโฟโตมาสก์กิ้งก็คือ

1. การสร้างกระจกแบบแผน นิยมเรียกว่า “โฟโตมาสก์” (Photomask) ซึ่งจะถูกใช้เป็นต้นแบบสำหรับการถ่ายภาพแบบแผนลงบนผิวของแผ่นผลึก

2. การดำเนินการถ่าย ภายแบบแผนจากโฟโตมาสก์ลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยใช้สารไวแสงและกระบวนการถ่ายภาพซึ่งนิยมเรียกกันว่า “กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี” (Photolithography)

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงขั้นตอนทั้งสองนี้ โดยสรุปอย่างง่าย ๆ เป็นลำดับขั้นตอนของการโฟโตมาสก์กิ้ง

3.3.2 การสร้างโฟโตมาสก์

งานแรกสำหรับกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ก็คือ การสร้างโฟโตมาสก์ของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ เหล่านี้ในกระบวนการสร้างแต่ละขั้นตอน เช่นการ CVD ,การอิพิแทกเซิล, การ predeposition หรือการ drive-in กระทั่งการ matallization จำเป็นต้องใช้โฟโตมาสก์ซึ่งแตกต่างกัน ดังนั้นโดยปกติแล้วการสร้างสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งๆ ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์จึงจำเอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องใช้โฟโตมาส์คหลายๆ อัน ตามลำดับขั้นตอนของการสร้างในงานการสร้างโฟโตมาส์คของวงจรรวม ก็คือการพิจารณาเปลี่ยนแปลงวงจรถางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ของวงจรรวมนั้นๆ ออกมาเป็นภาพแผนผังเพื่อการสร้างวงจรรวมขึ้น ขั้นตอนในการออกแบบสร้าง โฟโตมาส์คสรุปได้ดังนี้คือ

1. เขียนภาพรูปทรงของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในวงจรมัน
2. จัดตำแหน่งที่อยู่ของสิ่งประดิษฐ์แต่ละตัวให้เหมาะสม โดยให้เหลือที่ว่างน้อยที่สุดและการเดินสายต่อภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์แต่ละตัวต้องทำได้ง่ายและต้องสะดวกต่อการต่อสายออกไปยังวงจรมานอกอีกด้วย
3. ทำการแยกส่วนของสิ่งประดิษฐ์ออกเป็น โฟโตมาส์คแต่ละขั้นตอนของการสร้าง ขึ้นตอนทั้งสามดังกล่าวนี้ อาจใช้คอมพิวเตอร์ช่วยได้

และเมื่อออกแบบเรียบร้อยแล้ว งานของการสร้างโฟโตมาส์คจริงๆ จึงเริ่มขึ้น โดยการถ่ายย่อภาพของแบบแผนแต่ละโฟโตมาส์คให้มีขนาดเล็กลงเป็น 10 เท่า ของขนาดที่ต้องการ จากนั้นจึงใช้เครื่องมือที่เรียกว่า step-and-repeat camera ทำการถ่ายย่ออีก 10 เท่า สร้างแบบแผนขึ้นซ้ำ ๆ กัน บนแผ่นกระจก ซึ่งในที่สุดต้นแบบของโฟโตมาส์คก็ถูกสร้างขึ้นมาได้และนิยมเรียกว่า “มาสเตอร์” (master) จากมาสเตอร์นี้ก็จะถูกนำไปเป็นต้นแบบของโฟโตมาส์ค เพื่อสร้างโฟโตมาส์คที่เหมือนกันขึ้นอีกจำนวนมากๆ เพื่อนำไปใช้เป็นโฟโตมาส์คสำหรับถ่ายภาพแบบแผนของสิ่งประดิษฐ์ลงบนผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์

โดยทั่วไปโฟโตมาส์คที่ใช้งานมักเป็นแผ่นกระจกใสซึ่งมีสารไวแสงเคลือบอยู่ในลักษณะเป็นแบบแผนของสิ่งประดิษฐ์ บริเวณซึ่งมีสารไวแสงติดอยู่ก็จะมีคุณสมบัติที่บดบังแสงบริเวณใดที่ไม่มีสารไวแสงติดอยู่ก็จะสามารถปล่อยให้แสงผ่านได้ดังนั้นลักษณะของโฟโตมาส์คก็คือมีส่วนโปร่งแสงและทึบแสง นอกจากนี้แล้วบางครั้งสำหรับงานการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำบางประเภท เช่น การสร้างวงจรรวมชนิด LSI ส่วนที่ทึบแสงของโฟโตมาส์คอาจสร้างมาจากโครเมียมออกไซด์หรือเหล็กออกไซด์ก็ได้ซึ่งโฟโตมาส์คประเภทนี้จะมีคุณสมบัติที่แบบที่ใช้สารไวแสง แต่จะมีราคาแพงกว่า นอกจากนี้สารประกอบเหล็กออกไซด์ ยังมีคุณสมบัติให้แสงสีเหลืองทะลุผ่านไปได้แต่จะไม่ยอมให้แสงอุลตราไวโอเลตผ่าน ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษและมีประโยชน์อย่างยิ่ง

3.3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นกระบวนการ ที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพแบบแผนจากโฟโตมาส์คลงบนผิวของแผ่นผลึก โดยการใช้หน้ายาไวแสง (photoresist) หน้ายาไวแสงดังกล่าวเป็นสารประกอบ ซึ่งประกอบด้วยสารไวแสงและส่วนผสมอื่นอยู่ในลักษณะเป็นสารละลาย โดยหน้ายาไวแสงนี้จะไวต่อแสงสีน้ำเงิน ม่วง ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟอาร์ครปรอท (mercury arc lamp) แต่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีปฏิกิริยาต่อแสงสีแดง หรือสีเหลืองทั่วๆ ไปซึ่งใช้ในห้องมืดปกติ น้ำยาไวแสงดังกล่าวนี้อาจแบ่งได้เป็นสองชนิด คือ

1. ชนิดถูกแสงแล้วแข็งตัว (light hardened resist) เป็นน้ำยาไวแสงซึ่งเมื่อถูกฉายแสงแล้วจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลง มีลักษณะแข็งตัวไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง (developer) น้ำยาไวแสงชนิดนี้นิยมเรียกกันว่า “น้ำยาไวแสงชนิดลบ” (negative photoresist)

2. ชนิดถูกแสงแล้วอ่อนตัว (light softened resist) เป็นน้ำยาไวแสงเป็นน้ำยาไวแสงซึ่งเมื่อถูกฉายแสงแล้วจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลง โดยมีการอ่อนตัวและสามารถละลายได้ในน้ำยาล้างน้ำยาไวแสงชนิดนี้นิยมเรียกกันว่า “น้ำยาไวแสงชนิดบวก” (positive photoresist)

คุณสมบัติ หรือประสิทธิภาพของน้ำยาไวแสง ถูกกำหนดได้ด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว คือ

1. Adhesion เป็นคุณสมบัติของความเหนียวหรือการยึดเหนียว ของโมเลกุลของน้ำยาไวแสงสามารถวัดได้โดยการพิจารณา ความคมของภาพแบบแผนที่เกิดขึ้นภายหลังการล้างน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยาล้าง ถ้าหากได้ภาพแบบแผนที่มีขอบไม่คมหรือชัด แสดงว่าแรง Adhesion มีค่าน้อยซึ่งปกติต้องการค่าที่สูง เพื่อความคมชัดของภาพที่เกิดขึ้น

2. Etch resistance เป็นคุณสมบัติที่ทนทานต่อน้ำยากัด (etching solution) สามารถวัดได้โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนผิว ของแผ่นสลิคเหนือชั้นออกไซด์แล้วจึงนำไปจุ่มลงในน้ำยาสะกัดเป็นเวลานานๆ เพื่อเฝ้าดูว่าน้ำยาไวแสงนี้จะทนน้ำยาสะกัดได้แค่ไหนเพียงไร โดยเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ น้ำยาสะกัดจะทะลุผ่านชั้นของน้ำยาไวแสง เข้าไปทำลายชั้นของออกไซด์ได้ปกติต้องการค่าที่สูง เพื่อให้ชั้นของออกไซด์ถูกกัดออกอย่างถูกต้องและแน่นอน

3. Resolution เป็นคุณสมบัติความละเอียดของน้ำยาไวแสง ซึ่งสามารถที่จะถ่ายความละเอียดของภาพได้มากหรือน้อย สามารถวัดได้โดยการพิจารณาแถบเส้นที่ขนาดความกว้างน้อยที่สุดที่สามารถถ่ายลงบนชั้นของน้ำยาไวแสงได้ ปกติการต้องมีค่าสูงเพื่อให้สามารถถ่ายภาพแบบแผนที่มีขนาดเล็กๆ และความละเอียดมากๆ ได้

4. Photosensitivity เป็นคุณสมบัติเกี่ยวกับความไวต่อแสงนี้ สามารถวัดได้โดยพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของสารนี้กับแสงที่มีความเข้มขึ้นต่างๆ กัน ปกติต้องค่าสูงๆ เพื่อให้ไวต่อแสงที่สีความเข้มแสงค่าน้อยๆ ได้

คุณสมบัติทั้ง 4 ข้อ ของน้ำยาไวแสงนี้เป็นสิ่งที่ควรนำมาพิจารณา เพื่อนำไปใช้กับงานที่เหมาะสมอันจะมีประโยชน์และประหยัดได้เป็นอย่างดีสำหรับตัวทำลาย (solvent) ที่ผสมอยู่ในน้ำยาไวแสงนี้จะเป็นตัวกำหนดความหนืด (viscosity) ของน้ำยาไวแสง ยิ่งมีความหนืดมากจะมีลักษณะข้นและเหนียว ค่าความหนืดของน้ำยาไวแสงนี้วัดได้ในหน่วยของ “เซนติพอยส์” (centipoise) ใช้ตัวย่อว่า C.P. และหน่วยของ “เซนติสโตค” (centistoke) โดยทั่วไปน้ำยาไวแสงที่ใช้มีค่าความหนืดราว

28 - 60 เซนติพอยส์ ซึ่งจะมีลักษณะคล้าย ๆ กับ ความข้นของน้ำเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ คือ

ขั้นตอนสำหรับกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟีอาจกล่าว โดยสรุปเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมแผ่นผลึกฐานรอง ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน หรือกระบวนการ CVD เป็นต้น
2. การเตรียมผิว โดยการทำความสะอาดผิว ไล่ความชื้น เป็นต้น
3. เคลือบน้ำยาไวแสงโดยการใส่แทนหมุน spinner หรือฉีดพ่นหรือจุ่ม เป็นต้น
4. การอบชั้นต้น โดยการอบในเตาอบอุณหภูมิต่ำพอเหมาะเพื่อให้ น้ำยาไวแสงแห้งสนิท
5. การฉายแสง โดยการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ ลงไปบนแผ่นผลึกที่ถูกเคลือบน้ำยาไวแสง
6. การล้างน้ำยาไวแสง โดยการใช้ น้ำยาล้าง ละลายสารไวแสงที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยา
7. การตรวจสอบผล โดยการสังเกตภาพแบบแผนที่เกิดขึ้นภายหลังการล้างน้ำยา เพื่อให้แน่ใจว่าได้ภาพที่คมชัดแน่นอนและสมบูรณ์
8. การอบชั้นสุดท้าย โดยการอบในเตาอุณหภูมิสูงพอเหมาะ เพื่อให้ น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้งสนิท ติดแน่นกับผิวแผ่นผลึกเป็นอย่างดี
9. การแกะกัด โดยการใช้ น้ำยาแกะกัดละลายส่วนของออกไซด์หรือโลหะ (ที่เคลือบบนผิวแผ่นผลึก) ซึ่งไม่มีน้ำยาไวแสงปิดอยู่ที่ผิวบน
10. การละลายน้ำยาไวแสง โดยการต้มในกรดบางชนิด เพื่อละลายสารไวแสงที่ค้างอยู่ที่ผิว หรืออาจทำด้วยวิธีอื่นก็ได้
11. การตรวจสอบผล โดยการสังเกตความสมบูรณ์แน่นอน ของภาพแบบแผนที่เกิดขึ้นของออกไซด์หรือโลหะ (ที่เคลือบบนผิวแผ่นผลึก)

ในการเตรียมผิวอาจไม่จำเป็นต้องทำก็ได้ ถ้าหากแผ่นผลึกนั้น เพิ่งจะถูกนำออกมาจากเตาแพร่สารหรือเตาออกซิเดชัน หรือจากเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ เป็นต้น ยกเว้นที่ผิวของแผ่นผลึกเป็นชั้นของซิลิกอนไนไตรด์ หรือเป็นผลึกซิลิกอนชนิดหลายรูป (Polycrystalline) ซึ่งจำเป็นต้องมีการเตรียมผิวเป็นกรณีพิเศษ โดยการจุ่มแผ่นผลึกลงในสารละลายชนิดหนึ่งๆ ที่เรียกว่า “priming solution” สารละลายนี้จะช่วยทำให้ น้ำยาไวแสงสามารถติดแน่นกับผิวของแผ่นผลึกได้เป็นอย่างดี และสมบูรณ์ นอกจากนี้อาจจะใช้วิธีพ่น หรือ ผ่านไอของสารละลายนี้ลงบนผิวแผ่นที่ได้ ซึ่งในกรณีที่มีการใช้สารละลายนี้ จะต้องมี การอบแผ่นผลึกให้แห้งสนิทก่อนที่จะไปเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง

การเคลือบผิวหน้าแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสงอาจทำได้หลายวิธีเช่น โดยการจุ่มการฉีดหรือพ่น โดยใช้แปรงทา หรือใช้ลูกกลิ้ง แต่ที่นิยมมากที่สุดในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำก็คือวิธีการใช้แทนหมุน (spinner) ซึ่งจะมีแผ่นผลึกวางอยู่ข้างบน โดยมีแกนหมุนต่อเข้ากับมอเตอร์และปลายสุดของแกนหมุน จะมีแท่นสำหรับวางแผ่นผลึก แผ่นผลึกจะถูกยึดติดแน่นกับแท่นวางแผ่นผลึกด้วยวิธีสุญญากาศ ขณะที่แท่นหมุนรอบตัวเอง เมื่อหยคน้ำยาไวแสงก็จะถูกแรงเหวี่ยง กระจายออก

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ ซึ่งใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่แจ้งชื่อผู้จัดทำ หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ ไม่ว่าการแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปรอบๆ เคลือบผิวของแผ่นผลึกอย่างสม่ำเสมอ ความเร็วรอบต่อนาทีของการหมุนและค่าความหนืดของน้ำยาไวแสงจะเป็นสิ่งกำหนดความหนาของชั้นน้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบ ที่ความเร็วต่ำๆ ความหนาของชั้นน้ำยาไวแสงจะไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีความหนามากที่บริเวณขอบของผลึก แต่ถ้าหากความเร็วสูงเกินไป ความหนาของชั้นน้ำยาไวแสงก็จะไม่สม่ำเสมออีกเช่นกัน กล่าวคือบางบริเวณอาจไม่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่เลยก็ได้

การอบขั้นต้น ในภายหลังกการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนผิวแผ่นผลึกแล้ว อาจกระทำได้หลายวิธี เช่น

1. โดยการเป่าด้วยลมร้อน จะช่วยทำให้น้ำยาไวแสงแห้งสนิท
2. โดยการฉายอินฟราเรด (infrared) ความร้อนจากแสงอินฟราเรดจะทำให้น้ำยาไวแสงแห้งสนิท ติดแน่นกับผิวของแผ่นผลึก

สำหรับอุณหภูมิและช่วงเวลาของการอบ จำเป็นต้องเหมาะสมกับน้ำยาไวแสงแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามถ้าให้อุณหภูมิต่ำ ช่วงเวลาของการอบอาจจะต้องยาวนานขึ้น หรือถ้าหากให้อุณหภูมิสูงเกินไปไปอาจทำให้ที่ผิวหน้าของน้ำยาไวแสงแห้งก่อน น้ำยาไวแสงด้านล่างซึ่งติดกับผิวแผ่นผลึกซึ่งกรณีนี้จะทำให้ชั้นของน้ำยาไวแสงเป็นรอยขุ่นขรุขระไม่เรียบร้อย

เมื่อแผ่นผลึกเสร็จจากการถูกรอบ และเย็นลงสนิทดีแล้ว ก็จะถูกนำไปฉายแสงโดยผ่านโฟโตมาสก์ โฟโตมาสก์จะถูกจัดให้วางซ้อนทับบนแผ่นผลึกที่ตำแหน่งที่เหมาะสม จากการสังเกตเครื่องหมายผ่านกล้องจุลทรรศน์ โดยใช้ภาพแบบแผนซ้อนทับกับภาพแบบแผนเดิมที่มีอยู่บนแผ่นผลึกนั้นอย่างถูกต้อง ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า “mask aligner” เมื่อโฟโตมาสก์ถูกปรับให้ทับซ้อนอยู่บนแผ่นผลึกที่ตำแหน่งที่ต้องการและสนิทกันดีแล้ว อุลตราไวโอเล็ตจากหลอดไฟอาร์คปรอท ก็จะถูกฉายผ่านโฟโตมาสก์ลงไปยังแผ่นผลึก น้ำยาไวแสงบางส่วนที่มีได้ถูกบังด้วยส่วนที่บดบังแสงของโฟโตมาสก์ก็จะทำปฏิกิริยากับแสง แต่บริเวณใดที่มีส่วนที่บดบังแสงอยู่ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยาดังนั้น เมื่อเสร็จสิ้นการฉายแสง ชั้นของน้ำยาไวแสงที่ถูกแสงและไม่ถูกแสงก็จะมีคุณสมบัติต่างกัน และเมื่อฉายแล้วและผลึกจะถูกนำไปใส่ในน้ำยาล้างสารไวแสง

ชั้นของน้ำยาไวแสงที่ไม่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป คงเหลือเฉพาะชั้นของน้ำยาไวแสงที่ถูกแสงเท่านั้น ที่ติดอยู่บนผิวแผ่นผลึกและมีลักษณะเป็นภาพแบบแผนเหมือนกับโฟโตมาสก์ การล้างน้ำยาไวแสงนี้อาจทำได้โดย การจุ่มแผ่นผลึกลงในน้ำยาล้าง หรือโดยการฉีดพ่นด้วยน้ำยาล้างเมื่อล้างด้วยน้ำยาล้างแล้ว ต้องทำการจุ่มลงในสารละลายชนิดหนึ่ง เพื่อขจัดสิ่งต่างๆ ที่ติดค้างอยู่บนผิวแผ่นผลึก ทำให้อุณหภูมิของผิวแผ่นผลึกสะอาดและบริสุทธิ์ ขณะนี้เราสามารถตรวจสอบดูว่าภาพบนแผ่นที่เกิดขึ้นเรียบร้อยสมบูรณ์หรือไม่ และซ้อนทับกับแผนเดิมที่ตำแหน่งซึ่งกำหนดไว้หรือไม่ การตรวจสอบนี้ทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจสอบทั่วทั้งแผ่นผลึก เมื่อผ่านการตรวจสอบภายในขั้นนี้แล้ว หากได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แผ่นผลึกก็จะถูกนำไปทำการอบในขั้นสุดท้าย ก่อนที่จะนำไปสะกัดชั้นออกไซด์

หรือโลหะ การอบในชั้นนี้จะช่วยทำให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท และยึดติดกับผิวของแผ่นผลึกวิธี การอบก็ทำได้ในลักษณะเดียวกับการอบในชั้นต้น แต่อุณหภูมิสูงกว่าเล็กน้อยโดยใช้เวลาใกล้เคียงกัน

ในการสกัดชั้นของออกไซด์ (หรือชั้นของโลหะ) ที่เคลือบอยู่บนผิวแผ่นผลึกนับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด วิธีการสกัดแบบง่าย ๆ ก็คือ การจุ่มแผ่นผลึกลงในสารละลายสำหรับสกัด (etching solution) โดยสารละลายนี้จะมีคุณสมบัติละลายชั้นของออกไซด์(หรือโลหะ)ได้ การกำหนดเวลาที่ทำ ได้โดยพิจารณาอัตราสกัดของสารละลาย เมื่อชั้นของออกไซด์บริเวณที่ไม่มีน้ำไวแสงปิดอยู่ ถูกสกัด ออกเรียบร้อยแล้ว แผ่นผลึกก็จะถูกนำไปล้างทำความสะอาด เพื่อกำจัดมิให้สารละลายเหลือค้างอยู่

3.4 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion Process)

3.4.1 บทนำ

การเติมสารเจือลงในแผ่นผลึกซิลิกอน สามารถกระทำได้โดยการแพร่ (diffusion) ปกติการแพร่หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ไปสู่ที่ๆ มีความเข้มข้นต่ำกว่า กระบวนการแพร่อย่างง่ายซึ่งเราสามารถสังเกตเห็นได้ก็คือ การแพร่ของหยดน้ำหมึกในแก้วน้ำ ยิ่งเวลานานๆ หยดน้ำหมึกก็จะแพร่กระจายรวมกับน้ำในถ้วยแก้วอย่างสม่ำเสมอ

ที่กล่าวมาแล้วนี้เป็นการแพร่ภายในของเหลว ส่วนการแพร่ในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำนั้น เป็นการแพร่ภายในของแข็ง (Solid state diffusion) ซึ่งปรากฏการณ์ของการแพร่แบบนี้จะเกิดขึ้นได้ก็เฉพาะในภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงๆ (เช่นราวๆ 1000 °C) กล่าวคือในขณะ อุณหภูมิสูงๆ อะตอมสารใดๆ ก็สามารถแพร่เข้าไปในวัสดุของแข็งอื่นๆ ได้ สำหรับความยากง่ายของ สารแต่ละชนิดที่จะแพร่เข้าสู่สารของแข็งนั้น อาจถูกกำหนดได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusivity;D) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความคล่องตัว (Mobility; μ) ตามกฎของไอน์สไตน์ ดังนี้

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad \text{cm}^2/\text{sec} \quad (3.4)$$

โดยที่ q คือขนาดประจุของอิเล็กตรอน

k คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

μ ค่าความคล่องตัวของอนุภาค ($\text{cm}^2/\text{V-sec}$)

3.4.2 สมการการแพร่ (Diffusion equation)

ในตอนนี้เราจะได้กล่าวถึงองค์ประกอบอื่นๆ นอกเหนือจากชนิดของการแพร่และอุณหภูมิที่

กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะมีผลต่อการกำหนดอัตราการแพร่ของสารคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก. คุณสมบัติโดยเฉพาะทางฟิสิกส์ของสารเจือ เช่น ขนาดของอะตอม เป็นต้น
- ข. คุณสมบัติของสภาพต่างๆ ไปของแลททิซ
- ค. การเปลี่ยนแปลงการกระจายของสารเจือ
- ง. คุณสมบัติโดยทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ

ปกติการแพร่จะเกิดขึ้นในทุกทิศทุกทาง แต่ทว่าในกรณีของการแพร่สารเจือในสารกึ่งตัวนำ เราจะเริ่มพิจารณาเพียงหนึ่งมิติ ซึ่งก็จะเป็นการเพียงพอ ในกรณีเช่นนี้คล้ายกับการแพร่ของอนุภาค ซึ่งแสดงด้วยกฎของฟิค (Fick's law) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์ (flux) ของอนุภาค (F อะตอมต่อตารางเมตรต่อวินาที) กับการเปลี่ยนแปลงการกระจายของอนุภาค สารเจือ $\frac{\partial N}{\partial x}$ เมตร⁻⁴ ดังนี้

$$F = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (3.5)$$

โดยที่ N คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่

ซึ่งสมการ (3.5) นี้ถือว่าการแพร่ของอนุภาคที่ไม่มีประจุและไม่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า จากสมการนี้อธิบายได้ว่า อัตราการไหลของอนุภาคต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดการเปลี่ยนแปลงการกระจายของอนุภาค (Concentration gradient) เครื่องหมายลบแสดงให้รู้ว่า การแพร่จะเกิดขึ้นจากบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคมากไปสู่ที่ๆ มีความหนาแน่นน้อยกว่า

ถ้าหากเราพิจารณาส่วเล็กๆ ส่วนหนึ่งของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีความหนาแน่นตามแกน x เท่ากับ dx และมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A ถ้า $F(x)$ เป็นจำนวนอะตอมของสารเจือที่แพร่ผ่านพื้นที่หนึ่งตารางหน่วยภายในหนึ่งหน่วยเวลา และ $F(x+dx)$ เป็นจำนวนอะตอมของสารเจือที่แพร่ตัวออกจากปริมาตรนี้ ผ่านพื้นที่หนึ่งตารางหน่วย

จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอะตอมที่อยู่ในปริมาตรนี้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาก็คือ ผลต่างของจำนวนของอนุภาคที่เข้าไปกับที่ออกมา หรือแสดงโดยสมการดังนี้

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial t} \cdot \frac{dx A}{A} = F(x) - F(x + dx) \quad (3.6)$$

โดย \bar{N} คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของอนุภาค ดังนั้น

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial t} = \frac{F(x) - F(x + dx)}{dx} \quad (3.7)$$

เมื่อ dx มีค่าน้อยมาก \bar{N} ก็จะกลายเป็น $N(x)$ ซึ่งจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} \quad (3.8)$$

สมการ (3.8) นี้เราเรียกว่า สมการขนส่งแบบหนึ่งมิติ (One dimensional transport equation) และเมื่อแทนค่าสมการ (3.5) ลงในสมการ (3.8) จะทำให้เราได้

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (3.9)$$

ซึ่งเราเรียกว่า สมการการแพร่ หรือบางครั้งนิยมเรียกกันว่า กฎที่สองของฟิค (Fick's second law) และสมการ (3.5) ถูกเรียกว่ากฎที่หนึ่งของฟิค (Fick's first law) สมการ (3.9) จะให้คำตอบซึ่งบ่งความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ (N) ที่ตำแหน่งระยะทาง x ใดๆ ลี้กลงไปจากผิวของสารถึงตัวนำที่เวลา t ใดๆ นอกจากนี้แล้วในกรณีที่อุณหภูมิที่อนุภาคนั้นมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก แพร่ในสนามไฟฟ้า จากกฎที่หนึ่งของฟิค จะได้ว่า

$$F = -D \frac{\partial N}{\partial x} + \mu \varepsilon N \quad (3.10)$$

โดยที่ μ คือ ความคล่องตัว

ε คือ สนามไฟฟ้า

และทำนองเดียวกัน เมื่อแทนสมการ (3.9) ลงในสมการ (3.10) จะได้ว่า

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - \mu \varepsilon \frac{\partial N}{\partial x} \quad (3.11)$$

ซึ่งเป็นสมการการแพร่ที่สมบูรณ์ กล่าวคือ เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าด้วย

3.4.3 การกระจายแบบ The Complementary Error Function Distribution

ถ้าหากว่าผิวของผลึกซิลิกอนถูกเปิดให้อยู่ในบรรยากาศของก๊าซ ซึ่งมีอะตอมสารเจือกระจายสม่ำเสมอ มีความหนาแน่น N_0 และถือว่าเป็น Constant source อะตอมสารเจือเหล่านี้จะแพร่เข้าไปในเนื้อซิลิกอน ที่ผิวซิลิกอนความหนาแน่นของอะตอมสารเจือจะมากที่สุด ซึ่งเท่ากับ N_0 และลี้กลงไปลงไปในผลึกความหนาแน่นของสารเจือจะลดลงตามระยะทาง x แต่ถ้าหากว่าการแพรียังคงปล่อยให้ดำเนินต่อไปด้วยเวลานานๆ แล้วในที่สุดผลึกซิลิกอนจะมีอะตอมสารเจือกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งแท่งผลึก และนั่นก็คือความหนาแน่นของสารเจือในซิลิกอนจะเท่ากับความหนาแน่นของสารเจือในอากาศ หรือที่ผิว (N_0) โดยที่ N_0 มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาของการแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรณีที่เรากล่าวมานี้เขียนเป็นเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ได้ว่า

$$N(0,t) = N_0$$

$$N(\infty,t) = 0$$

$$N(x,0) = 0$$

เมื่อใช้เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวนี้กับสมการที่ 3.9 แล้วจะได้ผลลัพธ์ว่า

$$N(x,t) = N_0[1 - \operatorname{erf}\{x/2\sqrt{Dt}\}] \quad (3.12)$$

หรือ

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}\{x/2\sqrt{Dt}\} \quad (3.13)$$

โดยที่

$$1 - \operatorname{erf}\{x/2\sqrt{Dt}\} = \operatorname{erfc}\{x/2\sqrt{Dt}\}$$

และ $\operatorname{erfc}\{y\}$ หมายความว่า เป็น error function complementary ของ y ค่าของ $\operatorname{erfc}\{y\}$ เท่ากับ

$1 - \operatorname{erf}\{y\}$

จำนวนอะตอมของสารเจือต่อพื้นที่หนึ่งตารางหน่วย ของสารกึ่งตัวนำจะเท่ากับ $Q(t)$ ซึ่ง

แสดงได้โดย

$$Q(t) = \int_0^{\infty} N(x,t) dx \quad (3.14)$$

ซึ่งในที่สุดจะได้ว่า

$$Q(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt} N_0 \quad (3.15)$$

และเพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งาน สมการ (3.13) อาจเขียนใหม่ได้เป็น

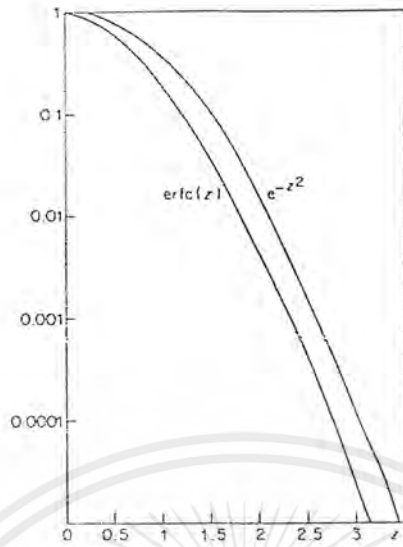
$$\frac{N(x,t)}{N_0} = \operatorname{erfc}U \quad (3.16)$$

โดยที่

$$U = x/2\sqrt{Dt} \quad (3.17)$$

สมการ (3.6) สามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทำให้สามารถแก้สมการ (3.13) ได้ด้วยกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

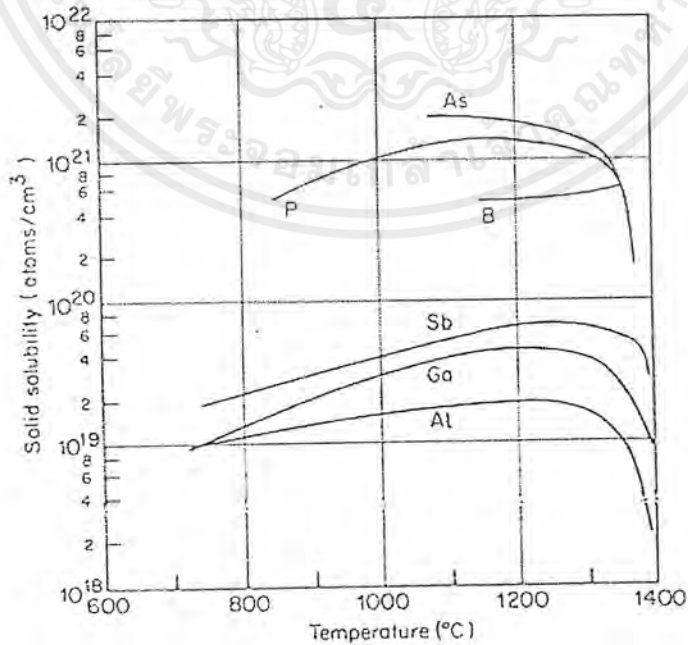


N_0 = ความหนาแน่นสารเจือที่ผิว

$N(x,t)$ = ความหนาแน่นสารเจือที่ตำแหน่ง x ใดๆ และเวลาที่ใช้แพร่ t ใดๆ

รูปที่ 3.2 แสดงกราฟที่ใช้ในการหาการกระจายของสารเจือในกรณีการแพร่แบบ erfc และ Gaussian

ค่าของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในอากาศ (หรือที่ผิวของผลึกซิลิกอน N_0) จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือและอุณหภูมิ ค่านี้อาจกำหนดได้ด้วยค่าความหนาแน่นสูงสุดของสารเจือชนิดใดๆ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ และเราเรียกค่านี้ว่า Solid Solubility ซึ่งหาได้จากรูปที่ 3.3



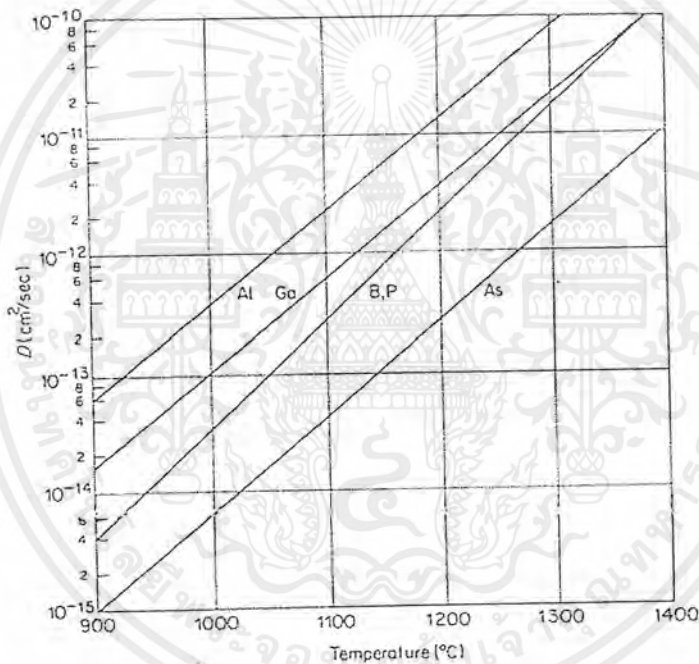
รูปที่ 3.3 แสดงค่า Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่างๆ ในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้วค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ D ในสมการที่ (3.13) ซึ่งเคยแสดงด้วยสมการ (3.4) นั้น โดยทั่วไปแล้ว D จะมีค่าสูงขึ้น ถ้าหากอุณหภูมิของบรรยากาศแวดล้อมเพิ่มขึ้น มีผลทำให้อัตราการแพร่ตัวสูงขึ้น ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

$$D = D_0 \exp(-E_a/kT)$$

โดยที่ E_a คือ พลังงานเริ่มแสดงปรากฏการณ์ (Activation energy) สำหรับการแพร่ของสารเจือปน พลังงานความร้อน kT จะต้องมีค่ามากกว่า E_a การแพร่ตัวจึงจะเกิดขึ้น และ D_0 เป็นค่าคงตัว ความสัมพันธ์ระหว่างค่า D และ $1/T$ แสดงได้ดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของการแพร่และอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ของสารเจือชนิดต่างๆ

3.4.4 การกระจายแบบ The Gaussian Function Distribution

ในกรณีที่ปริมาณอะตอมของสารเจือต่อหนึ่งตารางหน่วยมีค่าจำกัด เช่น มี Q อะตอม/ตารางเมตร เมื่อเกิดการแพร่ขึ้น ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่บริเวณผิวซิลิกอนจะลดลง และลดลงต่อไป จนกระทั่งความหนาแน่นของอะตอมสารเจือตลอดแท่งซิลิกอนมีค่าเท่ากับกระบวนการแพร่

จึงจะหยุด เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรณีดังกล่าวมานี้เขียนเป็นเงื่อนไขขอบเขตได้ว่า

$$\begin{aligned} N(\infty, t) &= 0 \\ N(0, t) &= \text{ค่าคงที่} \\ \text{หรือ } \left. \frac{\partial N}{\partial x} \right|_{(0,t)} &= 0 \end{aligned}$$

จากการใช้เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวนี้ เราสามารถแก้สมการ (3.9) ได้เป็น

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp(-x^2/4Dt) \quad (3.18)$$

ซึ่งสมการ (3.18) นี้เรียกกันว่า Gaussian Distribution Equation โดยที่ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือบริเวณผิวซิลิกอนจะเท่ากับ

$$N_0(t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (3.19)$$

ซึ่งจะเห็นได้โดยชัดเจนว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของอะตอมสารเจือบริเวณผิวจะลดลง

สำหรับเทคนิคการแพร่สารเจือกระทำสองขั้นตอน ทั้งนี้ก็เพื่อย่อยต่อการควบคุม และแก้ไขให้การกระจายของสารเจือเป็นไปตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพโดยที่

ขั้นที่ 1 เรียกว่า กระบวนการ predeposition กระทำโดยการแพร่ในเงื่อนไขที่ว่าปริมาณจำนวนอะตอมของสารเจือที่ผิวมีค่าคงที่ตลอดไปไม่จำกัด การแพร่ขั้นนี้ทำในช่วงเวลาสั้นๆ และอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 1000 °C)

ขั้นที่ 2 เรียกว่ากระบวนการ drive in ในขั้นนี้จำนวนอะตอมสารเจือที่ผิวจะถูกควบคุมให้มีค่าจำกัด (คือปริมาณที่แพร่เข้าไปในซิลิกอนเนื่องจากการแพร่ในขั้นที่ 1) การแพร่ขั้นนี้ทำที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรก คือ 1200 C และสามารถควบคุมการกระจาย และความลึกในการแพร่ของสารโดยควบคุมเวลาในการแพร่ นอกจากนี้ขณะที่ทำการแพร่ก็จะทำการออกซิเดชันไปพร้อมๆ กัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดชั้นของออกไซด์เคลือบที่ผิวนอกสุดของแผ่นผลึก ซึ่งเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมสารเจือแพร่ออกมาจากแผ่นผลึก (out diffusion)

การคำนวณโดยอาศัยสมการการแพร่ จำเป็นต้องพิจารณาและเลือกใช้ให้ถูกกรณี ในกรณีการแพร่ขั้นที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตต่างๆ เป็นไปตาม The Complementary Error Function distribution การคำนวณหาการกระจายของอะตอมสารเจือสามารถหาได้โดยใช้สมการ (12) และในกรณีการแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นที่ 2 เส้นโค้งขอบเขตเป็นไปตามลักษณะของ Gaussian Distribution ดังนั้น การคำนวณหาการกระจายของอะตอมสารจึงต้องใช้สมการ (3.19)

3.5 กระบวนการเมทัลไลเซชัน

3.5.1 บทนำ

ภายหลังจากที่สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ ในแผ่นผลึกซิลิกอน ถูกสร้างขึ้นเรียบร้อยแล้ว ในกรณีที่เป็นวงจรรวมสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ จะต้องถูกทำให้ต่อยกัน เป็นวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ และสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ กระบวนการซึ่งใช้ในการต่อชิ้นส่วนต่างๆ เข้าเป็นวงจรรวมนี้เรียกว่า “กระบวนการเมทัลไลเซชัน” (Metallization) ซึ่งอาศัยเทคนิคของการเคลือบสารในสุญญากาศ (vacuum deposition) และเทคนิคอื่นๆ อีก ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงระบบของกระบวนการเมทัลไลเซชัน วิธีการเคลือบโลหะและสารอื่นๆ ในกระบวนการนี้

3.5.2 เส้นโค้งของกระบวนการเมทัลไลเซชัน

ในกระบวนการเมทัลไลเซชันบนแผ่นผลึกซิลิกอน โลหะที่ถูกนำมาเคลือบผิวบนแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโฮล์มิก หรือเป็นแถบความนำต่อเชื่อมภายในระหว่าง สิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ในวงจรมันจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. รอยสัมผัสกับซิลิกอนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ
2. มีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิกอนไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่นๆ ได้ดี
4. ภาพแบบแผนจะต้องทำให้คมชัดได้ดี
5. สามารถต่อเข้ากับสายลวดตัวนำภายนอกได้ดี
6. ค่าใช้จ่ายต่ำและได้รับประโยชน์อย่างเต็มที่

อย่างไรก็ดี ไม่มีสารโลหะใดที่มีคุณสมบัติครบถ้วนทุกประการ แต่อะลูมิเนียมนับว่าเป็นสารที่เหมาะสมที่สุด ถึงแม้จะมีข้อเสียอยู่บ้างก็ตาม อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่นิยมนำมาใช้ในการเดินสายต่อภายใน ระหว่างสิ่งประดิษฐ์ในวงจรรวม และเมื่อไม่นานมานี้มีการค้นพบว่าอะลูมิเนียมจะมีคุณสมบัติดีขึ้น ถ้าหากมีการเติมธาตุลงไป กล่าวคืออะลูมิเนียมจะไม่มีปฏิกิริยาใดๆ ต่อ ผลึกซิลิกอนเลย ถ้าหากมีการเติมซิลิกอนเล็กน้อยลงไป ในอะลูมิเนียมขณะทำการเคลือบอะลูมิเนียม

3.5.3 การเคลื่อนสารในสุญญากาศ

งานของกระบวนการเมทัลโลเซชันขั้นแรกก็คือ การเคลื่อนโลหะในสุญญากาศ ซึ่งกระทำได้หลายวิธี ซึ่งขั้นของโลหะที่ได้จะมีคุณสมบัติเหมือนกัน สิ่งที่ทำจำเป็นสำหรับการเคลื่อนโลหะก็คือ

1. Chamber ซึ่งสามารถทำให้ภายในมีสภาพเป็นสุญญากาศได้
2. Vacuum pump (ปั๊มอากาศ) เพื่อทำให้ภายในของ chamber มีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยค่าที่ต้องการ

3. อุปกรณ์แสดงหรือวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งความดันภายใน chamber

4. วิธีการเคลื่อนชั้นของสารที่ต้องการ

วิธีการเคลื่อนโลหะในสุญญากาศแบบที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งมีลักษณะเป็นกรอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ หรืออาจทำจากเหล็กสแตนเลสสามารถปิดให้มิดชิด แล้วดูดอากาศภายในออกได้โดยผ่านวาล์วที่ปิดเปิด ปั๊มที่ใช้ดูดอากาศมีหลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบสามารถทำให้ภายในกรอบแก้วเป็นสุญญากาศได้มากน้อยไม่เท่ากัน เช่น

1. จากความดันของบรรยากาศปกติ ถึงค่าสุญญากาศระดับกลาง (ราว $10-100 \mu$) ปั๊มที่ใช้ได้แก่
 - ก. Rotary oil-sealed pump
 - ข. Sorption pump
2. จากสุญญากาศระดับปานกลาง ถึงค่าสุญญากาศระดับต่ำ (ราว $25 \mu - 10^{-6}$ mm) ปั๊มที่ใช้ได้แก่
 - ก. Diffusion pump
 - ข. Turbomolecular pump
3. จากสุญญากาศระดับต่ำ ถึงค่าสุญญากาศระดับต่ำพิเศษ (ราว 10^{-6} T- 10^{-10} T) ปั๊มที่ใช้ได้แก่
 - ก. Ion pump

อุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ในระบบการเคลื่อนโลหะในสุญญากาศจะช่วย ทำหน้าที่ดังต่อไปนี้คือ

- 1) บอกค่าระดับของสุญญากาศ chamber
- 2) บอกสถานะของวาล์วต่างๆ
- 3) บอกค่าความหนาของชั้นสารที่เกิดขึ้น

ปกติระดับสุญญากาศภายใน chamber ในระดับปกติถึง 10^{-3} mm วัดได้โดยการใช้ geissler's tube และสุญญากาศตั้งแต่ 10^{-3} mm ~ 10^{-7} mm วัดได้โดยการใช้ ionization vacuum gage

3.5.4 เทคนิคของการเคลือบสาร

เทคนิคของการเคลือบสารในโครงการนี้ใช้เทคนิค Filament evaporation การเคลือบสารทำได้โดย ทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจาก “ไส้” (Filamen) หรือ “โบริด” (boat) ที่สารนั้นวางอยู่ที่ไส้หรือโบริดได้รับความร้อนจากการที่มีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน ขณะทำการเคลือบสารจะต้องควบคุมให้กระแสที่ไหลผ่านไส้เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ กระทั่งสารที่วางอยู่ที่ไส้ได้รับความร้อน จนละลายติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอออกมาฟุ้งกระจายเคลือบแผ่นผลึกที่วางไว้ใน chamber เทคนิคนี้บางครั้งก็ใช้สำหรับการเคลือบของลงบนด้านหลังของแผ่นผลึก แต่สำหรับวัสดุที่มีธาตุต่างๆ รวมกันอยู่จะใช้วิธีนี้ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มี จุดหลอมเหลวต่ำกว่าจะระเหยเป็นไอก่อนและเหลือธาตุที่มีจุดหลอมละลายสูงกว่าทิ้งไว้

3.5.5 ลำดับขั้นตอนของการเคลือบสารในสุญญากาศ

ขั้นตอนในการเคลือบสารในสุญญากาศสามารถสรุปได้ดังนี้

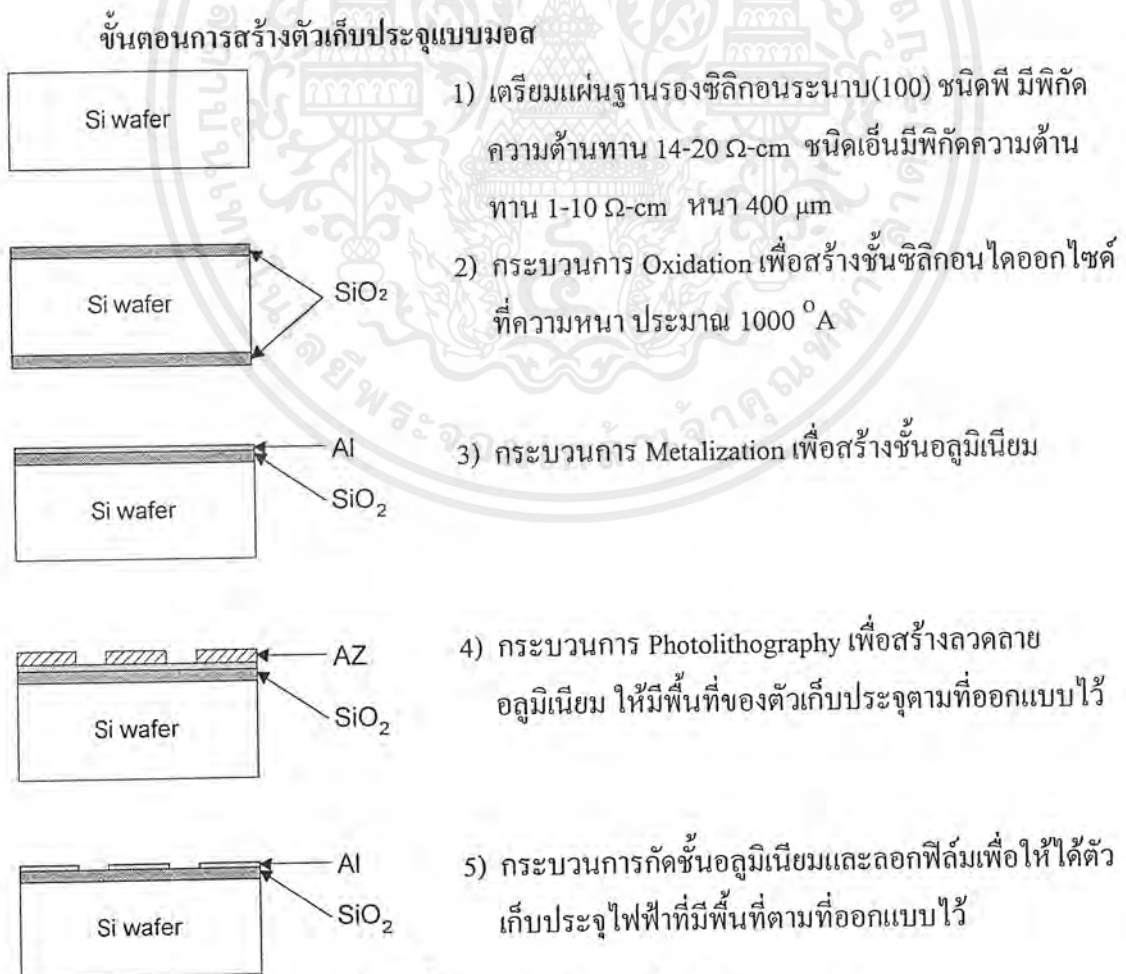
- 1) ทำความสะอาดและเตรียมผิวของแผ่นผลึกให้แห้ง
- 2) วางแผ่นผลึกลงใน chamber ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นสารที่มีเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ
- 3) ปิดวาล์วของ chamber ทำการดูดอากาศออกให้ความดันภายในต่ำลงมาเหลือราว 25μ โดยใช้ปั๊มธรรมดา
- 4) ปิดวาล์วของปั๊มธรรมดา เปิดวาล์วของปั๊มชนิดพิเศษ เพื่อทำให้ความดันใน chamber ลดลงเหลือราว $10^{-6} \text{ mm} \sim 10^{-7} \text{ mm}$
- 5) เริ่มทำสารที่เคลือบให้เป็นไอ โดยมีที่กำบังเพื่อมิให้สารไปเคลือบแผ่นผลึก
- 6) ทำการเคลือบสารลงบนแผ่นผลึกให้หนาตามต้องการ (ขณะทำการเคลือบสารแผ่นผลึกอาจถูกให้ความร้อนด้วย เพื่อให้ชั้นของสารที่เคลือบติดแน่นกับแผ่นผลึก)
- 7) หยุดทำการเคลือบสาร ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง
- 8) ปล่อยให้อากาศเข้าไปใน chamber อย่างช้าๆ จนเต็ม แล้วจึงยก chamber ขึ้น

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส เพื่อหาค่า Q_{ss}

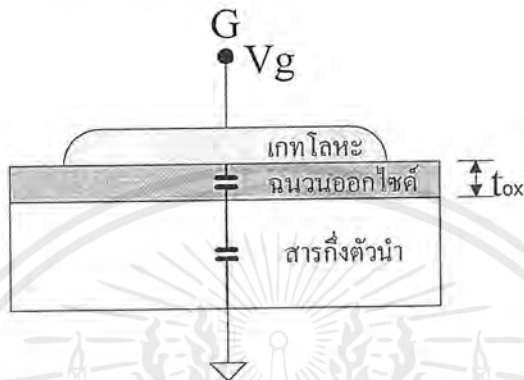
ในการทดลองนี้เป็นการสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส ซึ่งมีพื้นที่ของเกตต่างกันดังนี้ 4×10^{-4} , 1.6×10^{-3} , 3.6×10^{-3} , 6.4×10^{-2} , 1×10^{-2} , 1.44×10^{-2} , 1.96×10^{-2} , 2.56×10^{-2} และ 3.24×10^{-2} ตารางเซนติเมตร เพื่อหาค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สถานะผิว (Surface State Charge : Q_{ss}) ซึ่งจะเกิดขึ้นในซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณรอยต่อระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์กับผิวของซิลิกอน และเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ของโครงสร้างมอส (Metal Oxide Semiconductor) ซึ่งค่า Q_{ss} นี้ไม่สามารถคำนวณหาได้ แต่สามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้ก็จะมีค่าแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมในการทดลองด้วย



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุแบบมอส ก็คือผลรวมของความจุไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุสองตัวซึ่งต่ออนุกรมกัน กล่าวคือมีค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ (C_{ox}) และค่าความจุไฟฟ้าของผิวสัมผัสสารกึ่งตัวนำ ซึ่งรวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะด้วย ดังนั้นวงจรเสมือนของตัวเก็บประจุแบบมอส จึงอาจเขียนได้ดังในรูปที่ 4.2

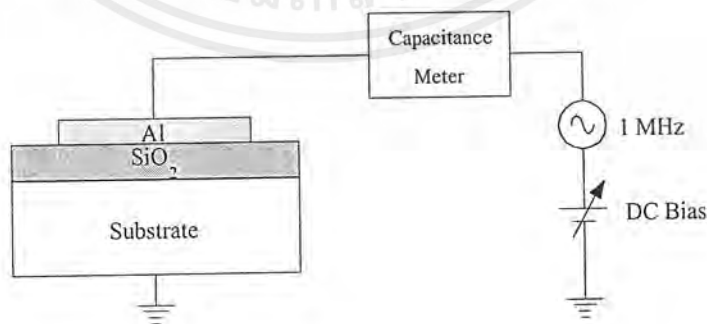


รูปที่ 4.2 แสดงวงจรเสมือนของตัวเก็บประจุแบบมอส

ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ (C_{ox}) นั้นมีค่าคงที่ ส่วนค่าความจุไฟฟ้าของผิวสัมผัสของสารกึ่งตัวนำนั้นขึ้นอยู่กับการไบอัส ถ้าแรงดันไบอัสมีค่ามาก จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าในส่วนนี้มีค่าน้อย ซึ่งก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าน้อยลงไปด้วย

จากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบมอส จะสามารถนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทั้งทางกายภาพ และทางไฟฟ้าของโครงสร้างมอสนี้ได้

ในการทดลองได้ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบมอส ด้วยชุดเครื่องมือวัด HP4061A Semiconductor/Component Test System ซึ่งมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลย์ในการวัดค่าความจุไฟฟ้า

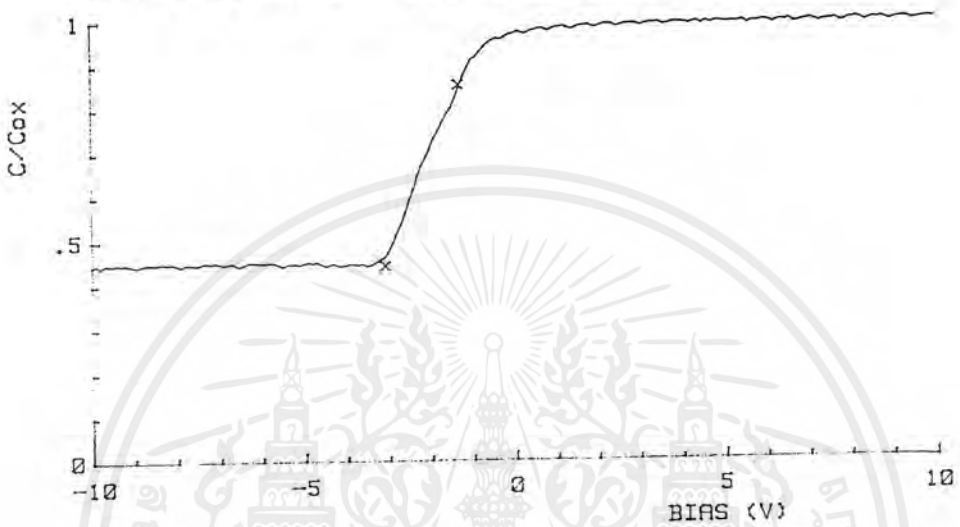
ผลการวัดคุณสมบัติของตัวเก็บประจุแบบมอสที่ได้ทำการสร้าง ได้กราฟคุณสมบัติ C-V และคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางไฟฟ้าดังรูปที่ 4.4 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= N1-B21

FREQ= 1MHz	T= 294K
AREA= 1.60E-03cm ²	Dox= 988.4Å
Cox= 54.75pF	Vth= -3.066V
Cfb= 46.72pF	Vfb= -1.3V
Nsub= 6.0E+15/cm ³	Qss/q= 2.2E+11/cm ²



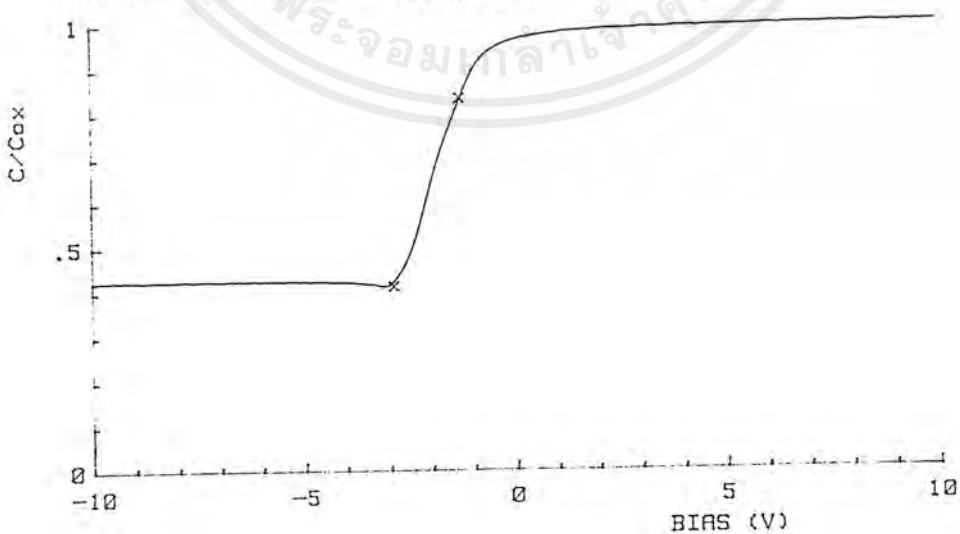
ก) ชนิด nMOS พื้นที่เกต = $1.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= N1-C21

FREQ= 1MHz	T= 294K
AREA= 3.60E-03cm ²	Dox= 1043Å
Cox= 116.73pF	Vth= -2.893V
Cfb= 97.47pF	Vfb= -1.3V
Nsub= 4.1E+15/cm ³	Qss/q= 2.1E+11/cm ²



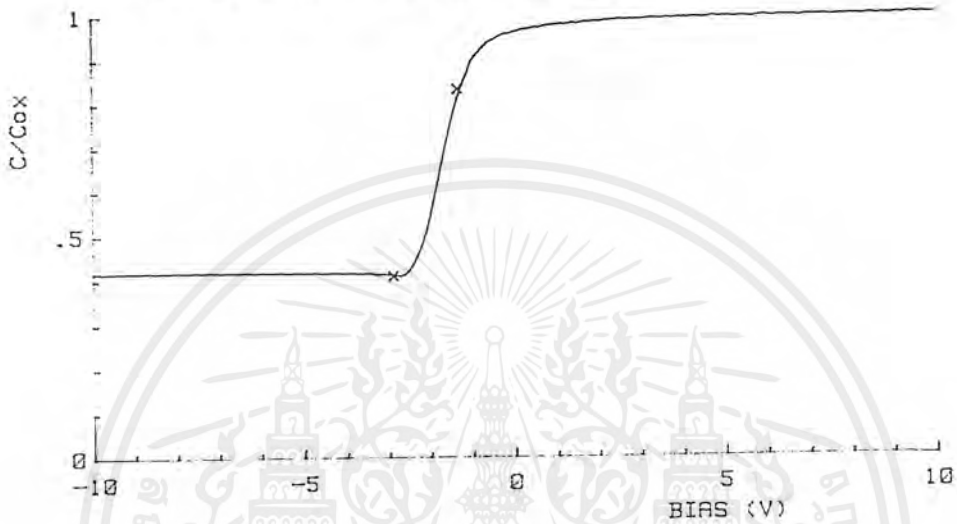
ข) ชนิด nMOS พื้นที่เกต = $3.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอส ที่ได้จากการทดลอง โยชนด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= N1-D12

FREQ= 1MHz	T= 294K
AREA= 6.40E-03cm ²	Dox= 1065A
Cox= 203.30pF	Vth= -2.871V
Cfb= 169.30pF	Vfb= -1.3V
Nsub= 3.8E+15/cm ³	Qss/q= 2.0E+11/cm ²

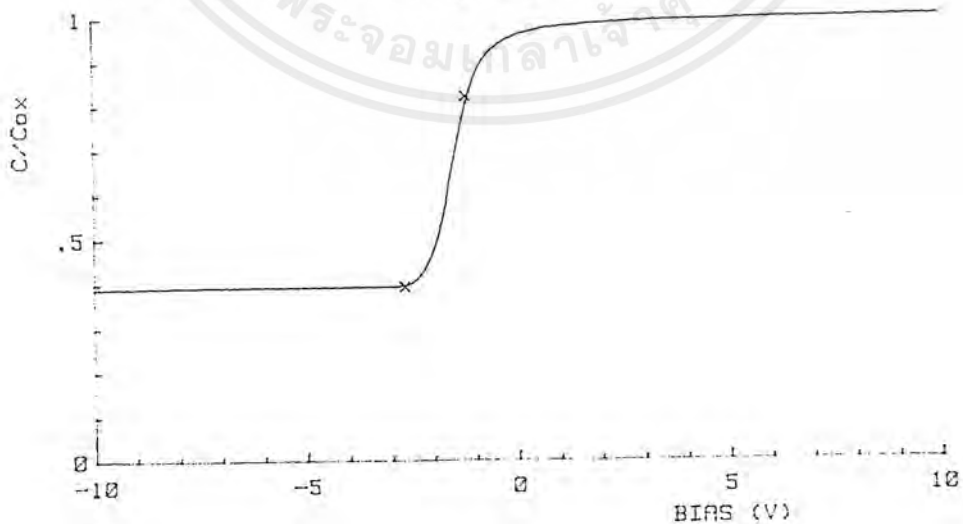


ก) ชนิด nMOS พื้นที่เกต = $6.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= N1-E2

FREQ= 1MHz	T= 294.5K
AREA= 1.00E-02cm ²	Dox= 1093A
Cox= 309.40pF	Vth= -2.677V
Cfb= 253.85pF	Vfb= -1.2V
Nsub= 3.1E+15/cm ³	Qss/q= 1.8E+11/cm ²



ง) ชนิด nMOS พื้นที่เกต = $1.0 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอด ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ) ซึ่งขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= N1-F2

FREQ= 1MHz T= 295K
 AREA= 1.44E-02cm² Dox= 1061Å
 Cox= 458.90pF Vth= -2.864V
 Cfb= 375.38pF Vfb= -1.4V
 Nsub= 3.1E+15/cm³ Qss/q= 2.2E+11/cm²



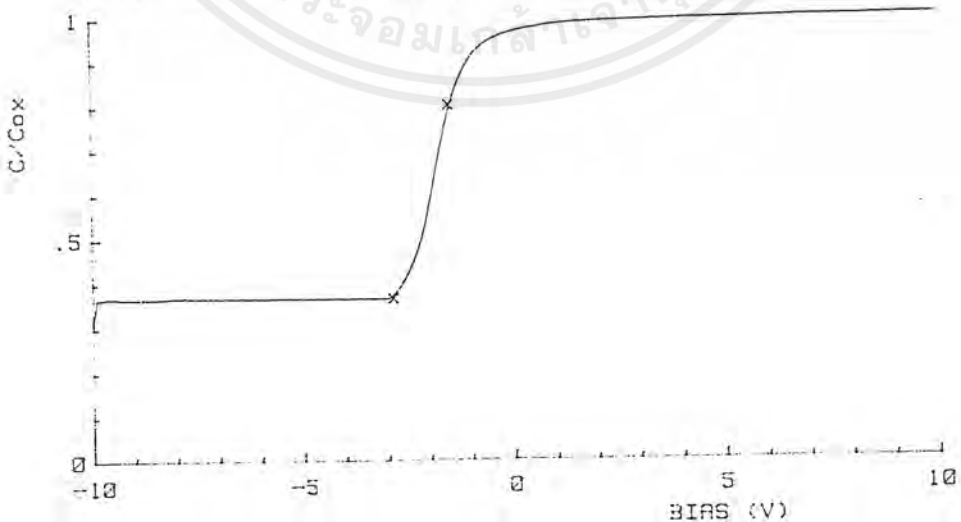
จ) ชนิด nMOS พื้นที่เกต = $1.44 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= N1-G1

FREQ= 1MHz T= 295K
 AREA= 1.96E-02cm² Dox= 1068Å
 Cox= 620.90pF Vth= -2.862V
 Cfb= 497.44pF Vfb= -1.5V
 Nsub= 2.5E+15/cm³ Qss/q= 2.4E+11/cm²



ฉ) ชนิด nMOS พื้นที่เกต = $1.96 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

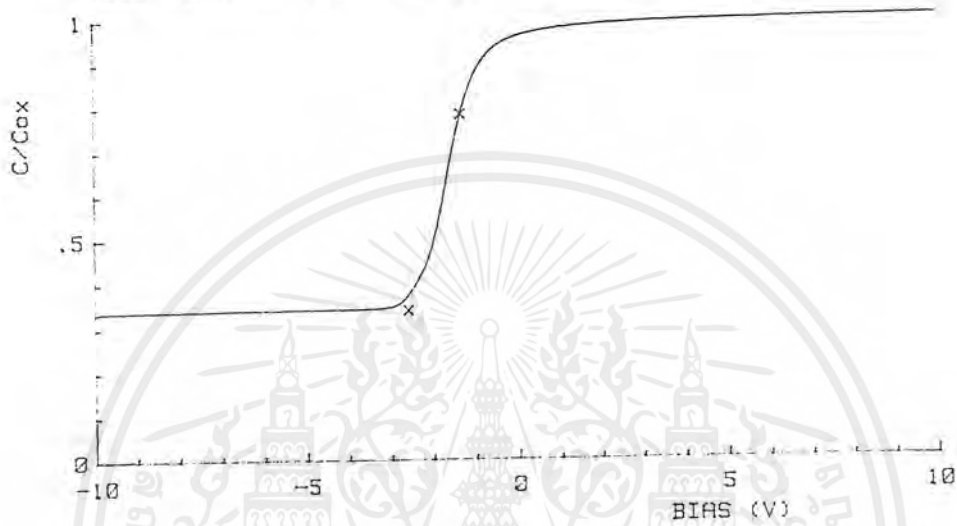
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หน่วยงานวิจัยหรือผู้ใช้หน่วยงานที่เอกสารคือหน่วยงานนี้ได้ไปยื่นขอขึ้นด้านการค้า
 รูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอส ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= N1-H2

FREQ= 1MHz T= 295K
 AREA= 2.56E-02cm² Dox= 1055Å
 Cox= 820.70pF Vth= -2.566V
 Cfb= 641.77pF Vfb= -1.3V
 Nsub= 2.0E+15/cm³ Qss/q= 2.0E+11/cm²



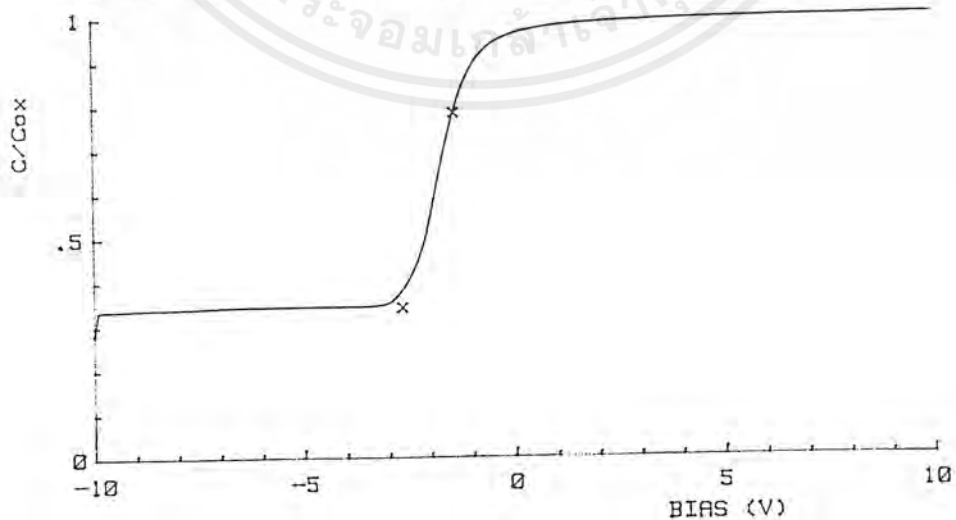
ข) ชนิด nMOS พื้นที่เกต = $2.56 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= N1-I2

FREQ= 1MHz T= 295K
 AREA= 3.24E-02cm² Dox= 1046Å
 Cox= 1047.70pF Vth= -2.671V
 Cfb= 820.11pF Vfb= -1.4V
 Nsub= 2.1E+15/cm³ Qss/q= 2.2E+11/cm²



ข) ชนิด nMOS พื้นที่เกต = $3.24 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

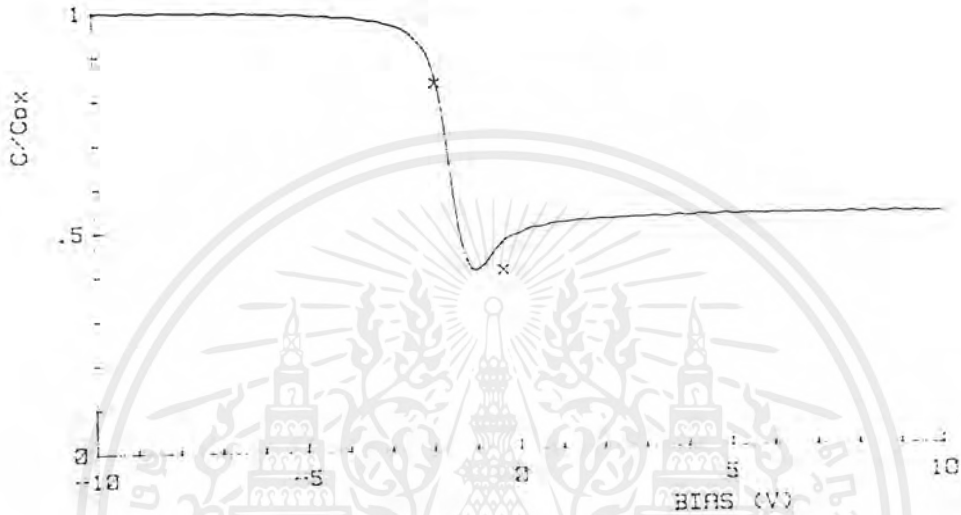
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หน่วยงานผู้วิจัยควรใช้เฉพาะผู้ที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตด้านการค้า
 รูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอด ที่ได้จากกราฟทดลอง (ต่อ) ขยับด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= P1-B31

FREQ= 1MHz T= 293.5K
 AREA= 1.60E-03cm² Dox= 1083Å
 Cox= 49.97pF Vth= -.3459V
 Cfb= 41.51pF Vfb= -1.9V
 Nsub= 3.6E+15/cm³ Qss/q= 1.9E+11/cm²



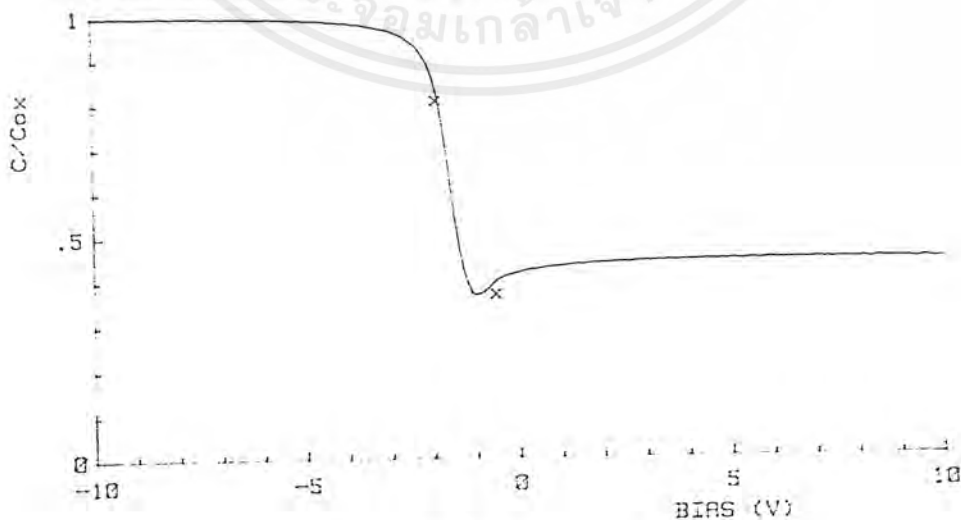
ณ) ชนิด pMOS พื้นที่เกต = $1.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= P1-C31

FREQ= 1MHz T= 293.5K
 AREA= 3.60E-03cm² Dox= 1123Å
 Cox= 108.40pF Vth= -.5271V
 Cfb= 87.16pF Vfb= -1.9V
 Nsub= 2.3E+15/cm³ Qss/q= 1.8E+11/cm²



ณ) ชนิด pMOS พื้นที่เกต = $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

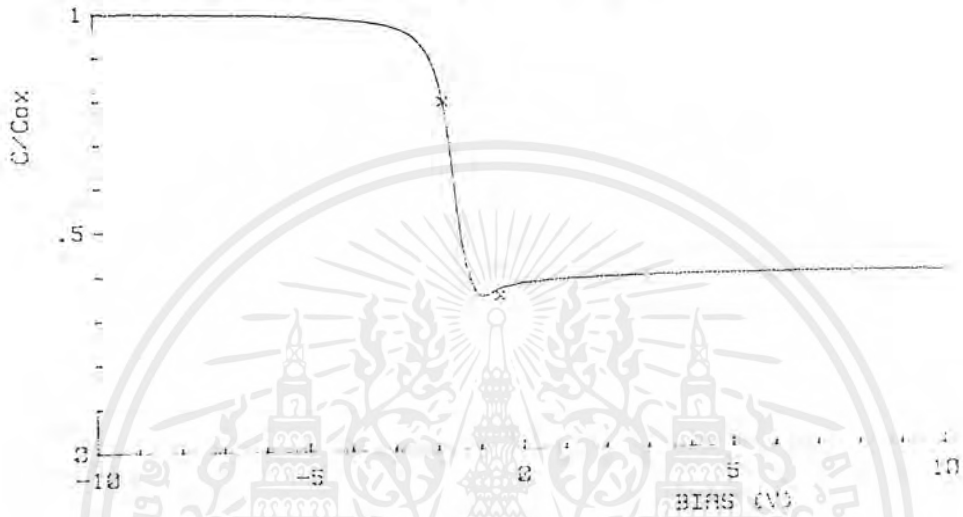
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่ควรออกให้วงในได้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอส ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= P1-D21

FREQ= 1MHz T= 293.5K
 AREA= 6.40E-03cm² Dox= 1120A
 Cox= 193.20pF Vth= -.5047V
 Cfb= 152.51pF Vfb= -1.8V
 Nsub= 2.0E+15/cm³ Qss/q= 1.7E+11/cm²



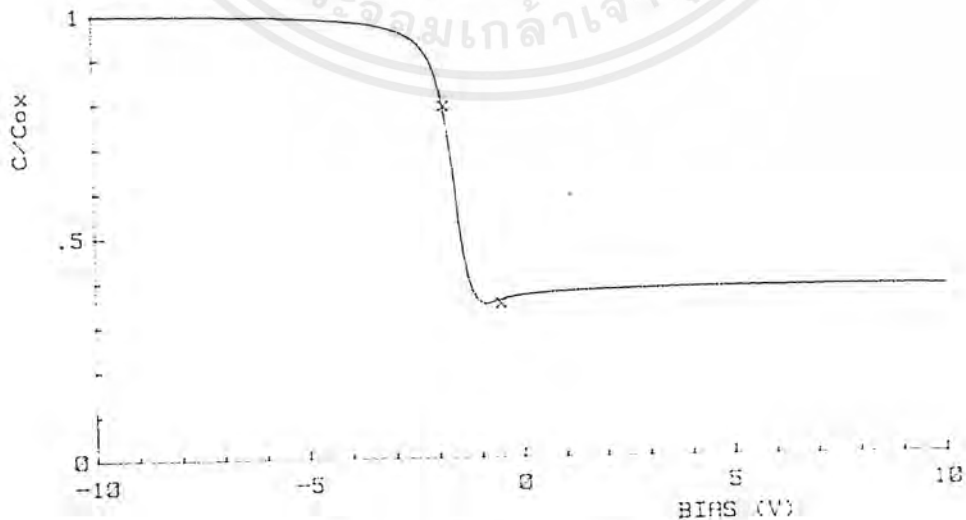
ฎ) ชนิด pMOS พื้นที่เกต = $6.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= P1-E2

FREQ= 1MHz T= 293.5K
 AREA= 1.00E-02cm² Dox= 1121A
 Cox= 301.70pF Vth= -.5126V
 Cfb= 237.67pF Vfb= -1.8V
 Nsub= 1.9E+15/cm³ Qss/q= 1.7E+11/cm²



ฎ) ชนิด pMOS พื้นที่เกต = $1.0 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$

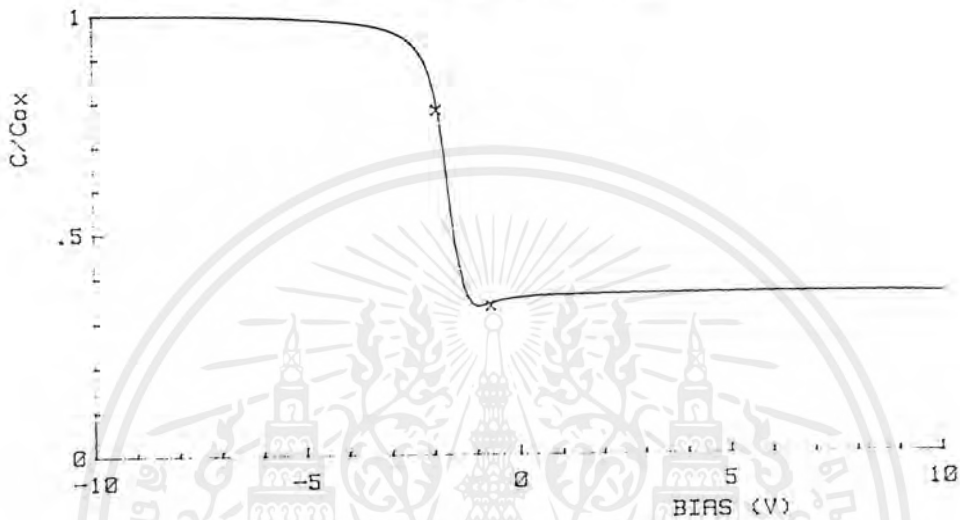
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยหรือการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาต
 รูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอส ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= P1-F2

FREQ= 1MHz	T= 293K
AREA= 1.44E-02cm ²	Dox= 1118Å
Cox= 435.80pF	Vth= -.6544V
Cfb= 339.28pF	Vfb= -1.9V
Nsub= 1.7E+15/cm ³	Qss/q= 1.9E+11/cm ²



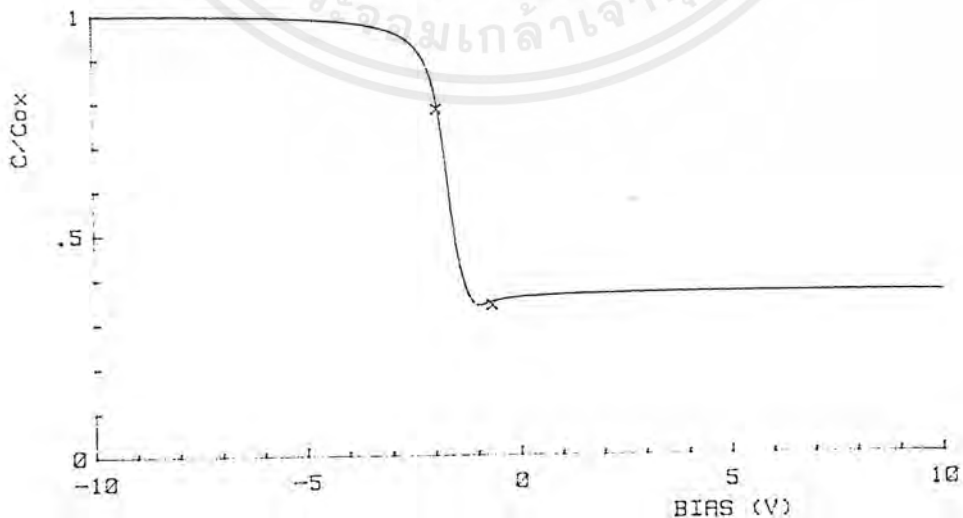
ฐ) ชนิด pMOS พื้นที่เกต = $1.44 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= P1-G2

FREQ= 1MHz	T= 293K
AREA= 1.96E-02cm ²	Dox= 1174Å
Cox= 564.60pF	Vth= -.65V
Cfb= 441.04pF	Vfb= -1.9V
Nsub= 1.6E+15/cm ³	Qss/q= 1.8E+11/cm ²



ฑ) ชนิด pMOS พื้นที่เกต = $1.96 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

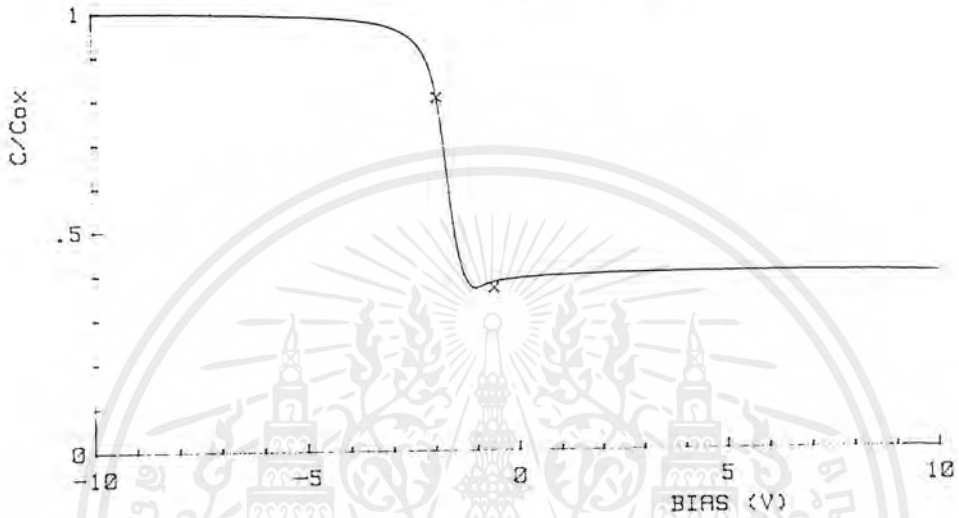
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอส ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ) ยืนยันด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= P1-H2

FREQ= 1MHz T= 294K
 AREA= 2.56E-02cm2 Dox= 1264A
 Cox= 685.10pF Vth= -.5603V
 Cfb= 549.24pF Vfb= -1.9V
 Nsub= 1.8E+15/cm3 Qss/q= 1.7E+11/cm2



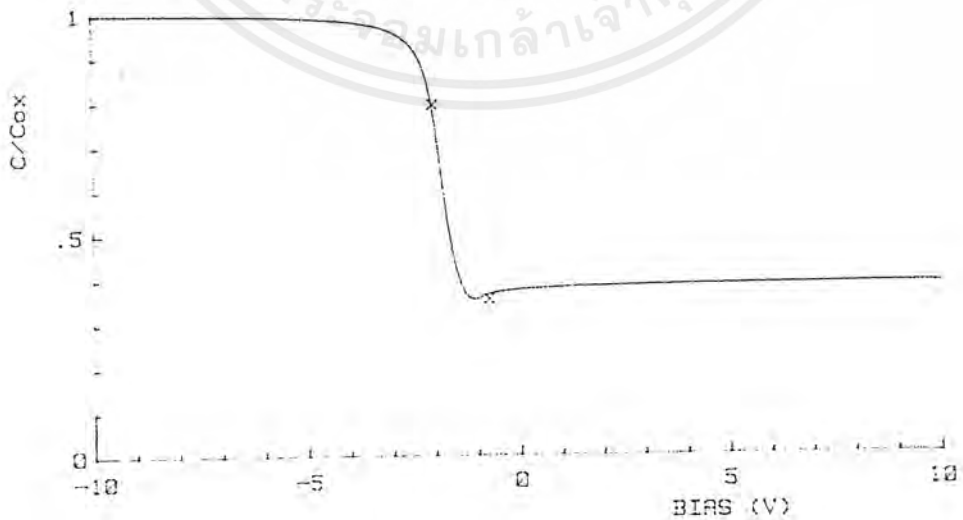
ณ) ชนิด pMOS พื้นที่เกต = $2.56 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

HP 4061A

C-V CHARACTERISTICS

SAMPLE= P1-I4

FREQ= 1MHz T= 294K
 AREA= 3.24E-02cm2 Dox= 1265A
 Cox= 866.20pF Vth= -.7143V
 Cfb= 685.57pF Vfb= -2V
 Nsub= 1.6E+15/cm3 Qss/q= 1.8E+11/cm2



ณ) ชนิด pMOS พื้นที่เกต = $3.24 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 รูปที่ 4.4 คุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุแบบมอส ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ) ขณต้นด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเก็บประจุแบบมอส

ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้าและทางกายภาพของตัวเก็บประจุแบบมอส ได้ใช้การคำนวณจากค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดเครื่องมือวัด HP4061A โดยต้องมีการป้อนข้อมูลดังนี้

1. พื้นที่ของเกต (Gate Area :A [cm²])

2. อุณหภูมิ (Temperature :T_c [°C])

ชุดเครื่องมือวัดจะคำนวณหาคุณสมบัติต่างๆ จาก พื้นที่ของเกต ,อุณหภูมิ ที่ป้อนเข้าไป และจากค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$1. N_{sub} = \frac{4\phi_f}{q\epsilon_0 K_{si}} \left(\frac{C_{smin}}{A} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \phi_f = \pm \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{sub}}{n_i} \right) \quad (4.2)$$

$$n_i = 3.9 * 10^{16} * T^{3/2} * EXP \left(-\frac{1.21q}{2kT} \right) \quad (4.3)$$

N_{sub} คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของแผ่นผลึกฐานรอง

ϕ_f คือ fermi potential ของสารกึ่งตัวนำ

n_i คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

q คือ electron charge (1.602*10⁻¹⁹ coulombs)

ϵ_0 คือ permittivity of free space (8.854*10⁻¹⁴ F/cm)

K_{si} คือ dielectric constant of silicon (11.7)

A คือ พื้นที่เกต (cm²)

k คือ Boltzmann's constant (1.38*10⁻²³ J/°K)

T คือ อุณหภูมิ (°K)

$$2. C_{fb} = \frac{C_{ox} * C_{sfb}}{C_{ox} + C_{sfb}} \quad (4.4)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad C_{sfb} = \frac{\sqrt{2} A \epsilon_0 K_{si}}{\lambda} \quad (4.5)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{2kT\epsilon_0 K_{si}}{q^2 N_{sub}}} \quad (4.6)$$

$$3. Q_{ss} / q = \frac{C_{ox}}{Aq} (\phi_w - \phi_F - V_{fb}) \quad (4.7)$$

Q_{ss}/q คือ ความหนาแน่นของ surface state charge ต่อหน่วยพื้นที่

ϕ_w คือ metal work function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$4. V_{th} = V_{fb} + 2\phi_f - \frac{AQ_b}{C_{ox}} \quad (4.8)$$

$$\text{ซึ่ง } Q_b = \pm \frac{N_{sub} q \epsilon_0 K_{si}}{C_{smin}} \quad (4.9)$$

V_{th} คือ แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage)

Q_b คือ ประจุไฟฟ้าในโครงสร้างมอส ต่อหน่วยพื้นที่

$$5. D_{ox} = \frac{A\epsilon_0 K_{ox}}{C_{ox}} \quad (4.10)$$

D_{ox} คือ ความหนาชั้นออกไซด์ที่ส่วนเกต ($^{\circ}\text{A}$)

K_{ox} คือ dielectric constant ของ $\text{SiO}_2 = 3.9$

ผลการทดลอง

จากการทดลองจะได้ว่า ค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สถานะผิว มีค่าไม่แน่นอนและไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ของส่วนเกต หรือชนิดของแผ่นฐานรอง ซึ่งในการทดลองนี้ ค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สถานะผิว มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.7×10^{11} ถึง 4.5×10^{11} ประจูดต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยได้ประมาณ 2.0×10^{11} ประจูดต่อตารางเซนติเมตร จึงจะใช้ค่านี้ในการคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2 การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์

4.2.1 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage: V_T)

จากค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สถานะผิว (Q_{ss}) ที่ได้จากการทดลองสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส, ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของแผ่นฐาน สามารถคำนวณหาแรงดันขีดเริ่ม จากสมการที่ 2.9

ในกรณีลูมิเนียมเกต

$$V_{th(p-channel)} = -0.6 - \phi_f - \frac{Q_b + Q_{ss}}{C_{ox}}$$

$$V_{th(n-channel)} = -0.6 + \phi_f + \frac{Q_b - Q_{ss}}{C_{ox}}$$

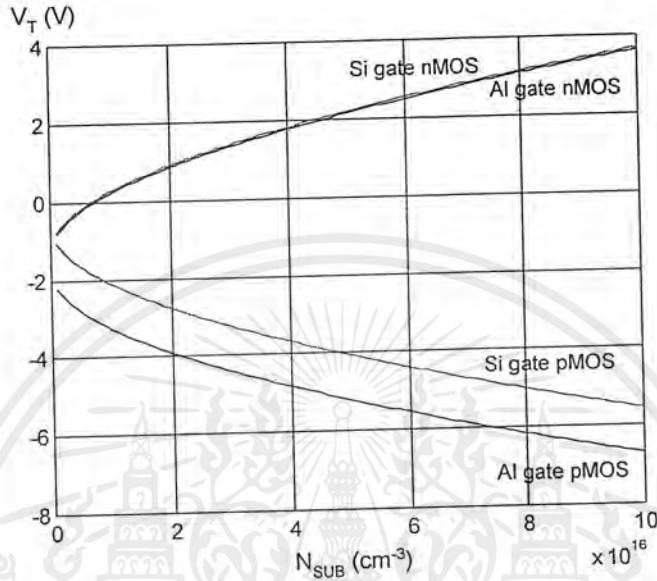
ในกรณีซิลิกอนเกต

$$V_{th(p-channel)} = +0.55 - \phi_f - \frac{Q_b + Q_{ss}}{C_{ox}}$$

$$V_{th(n-channel)} = -0.55 + \phi_f + \frac{Q_b - Q_{ss}}{C_{ox}}$$

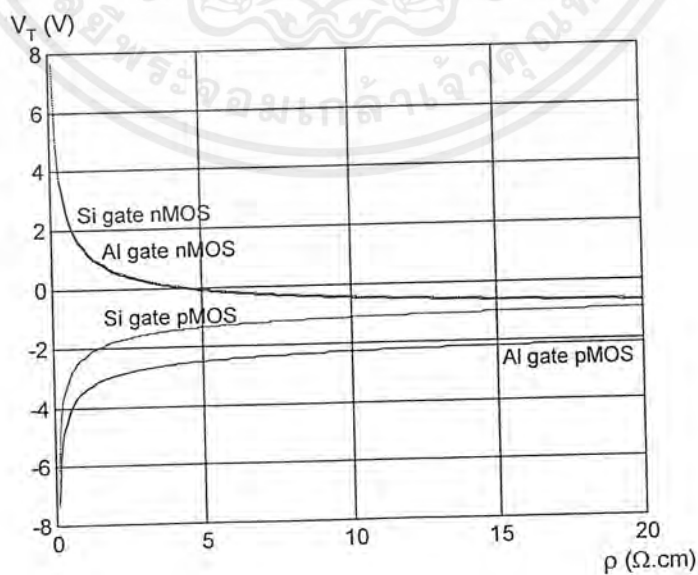
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม กับความหนาแน่นอะตอมสารเจือของแผ่นฐานรองได้ดังรูปที่ 4.5 โดยกำหนดค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สถานะผิวเท่ากับ $2 \cdot 10^{11}$ ประจุต่อตารางเซนติเมตร และความหนาชั้นออกไซด์ที่ส่วนเกินมีค่า 1000 \AA



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือของแผ่นฐานรอง เมื่อกำหนด $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_{SS} = 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $t_{ox} = 1000 \text{ \AA}$

เมื่อบอกความหนาแน่นอะตอมสารเจือของแผ่นฐานรองในรูปของค่าพิคัดความต้านทาน (Resistivity) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม กับค่าพิคัดความต้านของแผ่นฐานรองดังรูป



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและค่าพิคัดความต้านทาน

เมื่อกำหนด $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_{SS} = 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $t_{ox} = 1000 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองนี้จะคำนวณหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์ เพื่อความสะดวกในการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ขึ้นมาทดสอบผลการคำนวณ จึงได้กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของมอสทรานซิสเตอร์ดังนี้

Parameter	PMOS Transistor	nMOS Transistor
Substrate - p-well (for nMOS)	n type (100) 3.55 $\Omega \cdot \text{cm}$	n type (100) 3.84 $\Omega \cdot \text{cm}$ $\rho_{\text{sheet}} = 1000 \Omega/\text{sq.}$ $x_j = 6.87 \mu\text{m}$
Gate SiO ₂ thickness : t_{ox}	1000 \AA	1000 \AA
Surface State Charge : Q_{ss}	$2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	$2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
Channel Width : W	40, 60, 80, 100, 120 μm	40, 60, 80, 100, 120 μm
Channel Length : L	20 μm	20 μm

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ใช้ทดลอง

จากตัวแปรที่กำหนดไว้นี้ สามารถหาแรงดันขั้วเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ตามสมการที่ 2.9 ได้ดังนี้

ชนิดของเกท	แรงดันขั้วเริ่ม : V_T (V)	
	PMOS Transistor	nMOS Transistor
อลูมิเนียม	-2.3	2.0
โพลีซิลิกอน	-1.15	2.05

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันขั้วเริ่มที่ได้จากการคำนวณ

4.2.2 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic)

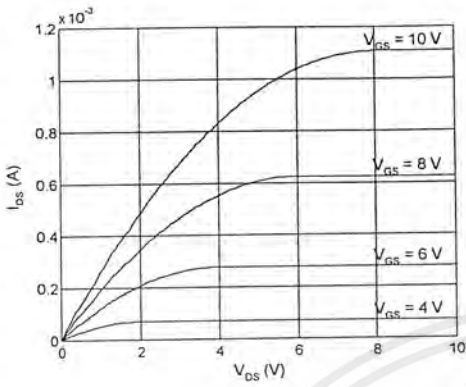
คุณสมบัติกระแส-แรงดัน เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของมอสทรานซิสเตอร์ และจากคุณสมบัติกระแส-แรงดันนี้ จะสามารถคำนวณหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ ได้อีกด้วย จากสมการที่ 2.19 และสมการที่ 2.20

$$I_{DS} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_T) - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \quad \text{เมื่อ } V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$$

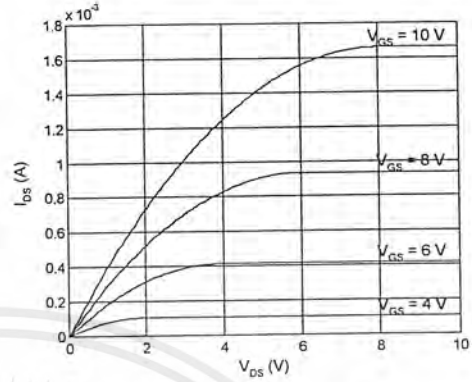
$$I_{DS(sat)} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2} \quad \text{เมื่อ } V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

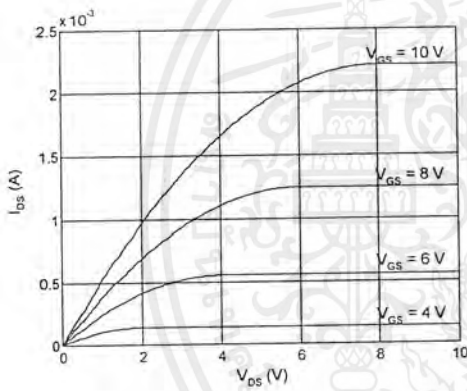
สามารถคำนวณหาคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ได้ดังนี้



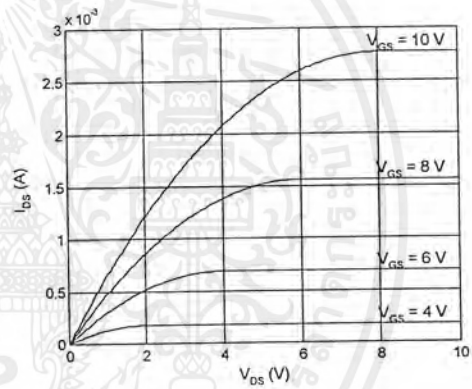
ก) $W/L = 40/20$



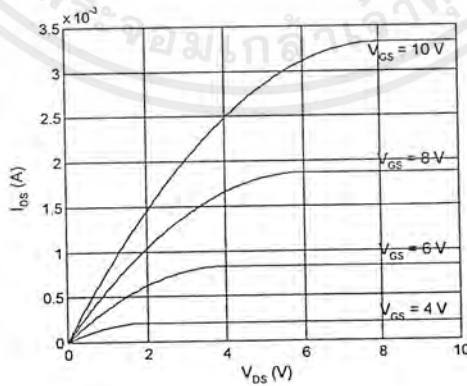
ข) $W/L = 60/20$



ค) $W/L = 80/20$



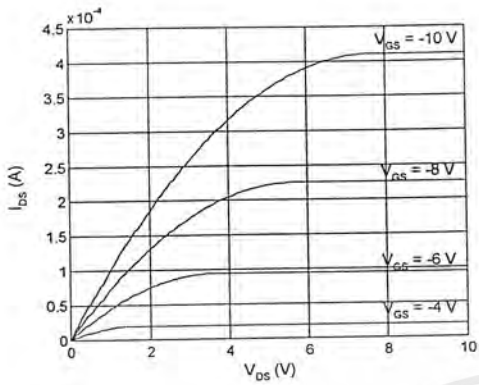
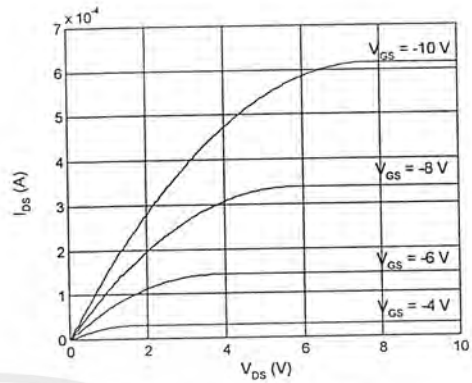
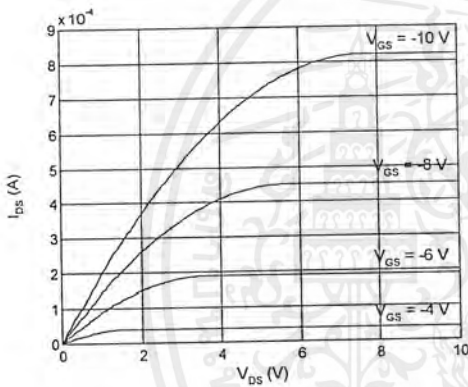
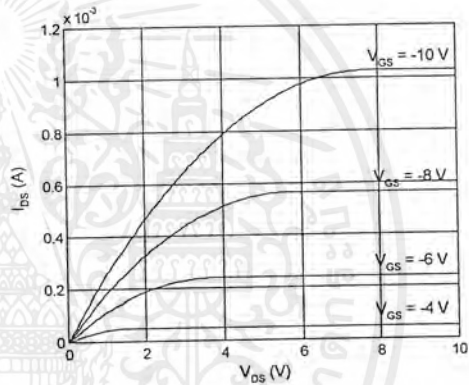
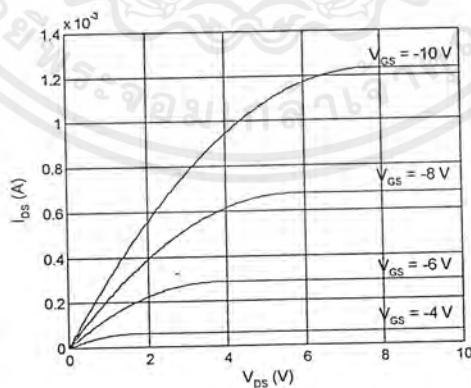
ง) $W/L = 100/20$



จ) $W/L = 120/20$

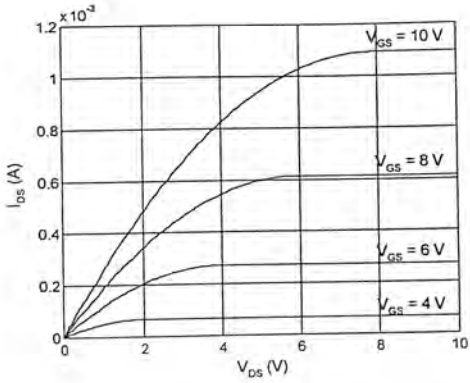
รูปที่ 4.7 ผลการคำนวณคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Al gate nMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

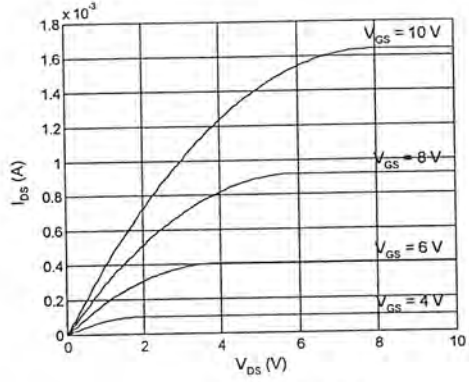
ก) $W/L = 40/20$ ข) $W/L = 60/20$ ค) $W/L = 40/20$ ง) $W/L = 60/20$ จ) $W/L = 120/20$

รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Al gate pMOS

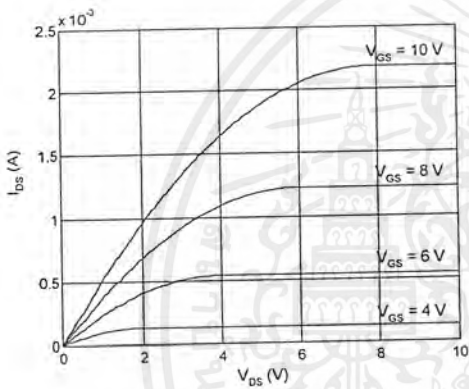
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



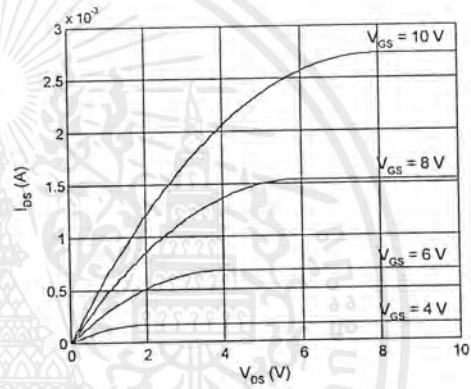
ก) $W/L = 40/20$



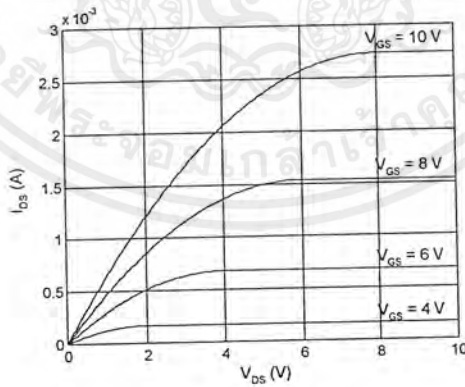
ข) $W/L = 60/20$



ค) $W/L = 80/20$



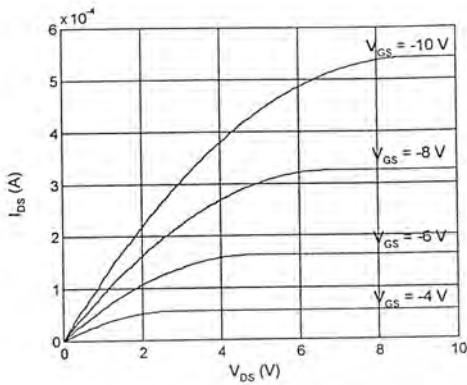
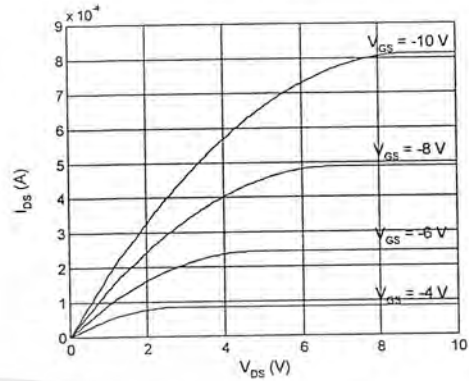
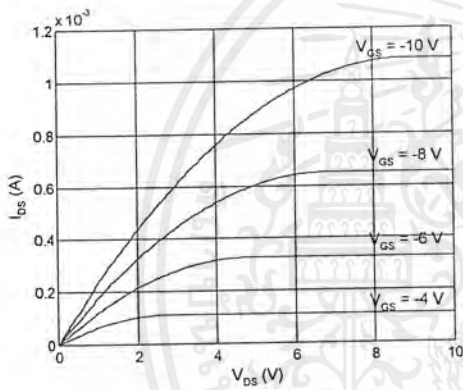
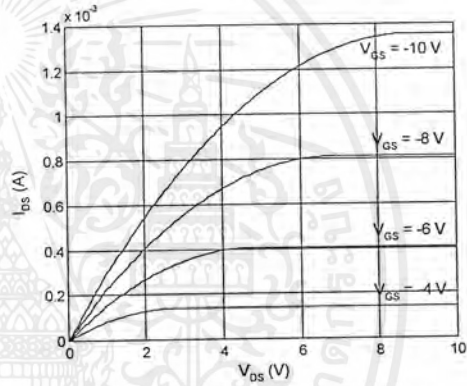
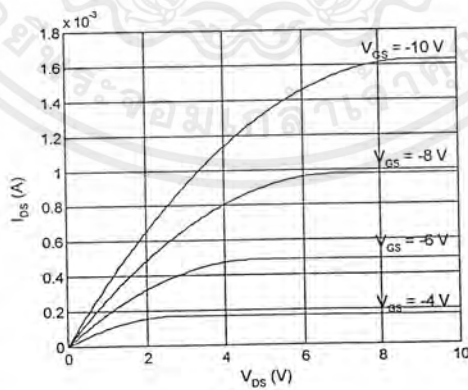
ง) $W/L = 100/20$



จ) $W/L = 120/20$

รูปที่ 4.9 ผลการคำนวณคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Si gate nMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) $W/L = 40/20$ ข) $W/L = 60/20$ ค) $W/L = 80/20$ ง) $W/L = 100/20$ จ) $W/L = 120/20$

รูปที่ 4.10 ผลการคำนวณคุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด Si gate pMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ค่าความต้านทานในช่วงเชิงเส้น (R_{ON})

จากสมการกระแสเดรนในช่วงไม่อิ่มตัว

$$I_{DS} = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

เมื่อพิจารณาที่ V_{DS} มีค่าต่ำๆ หรือ $(V_{GS} - V_T) > V_{DS}$ ดังนั้น

$$(V_{GS} - V_T) V_{DS} \gg \frac{V_{DS}^2}{2}$$

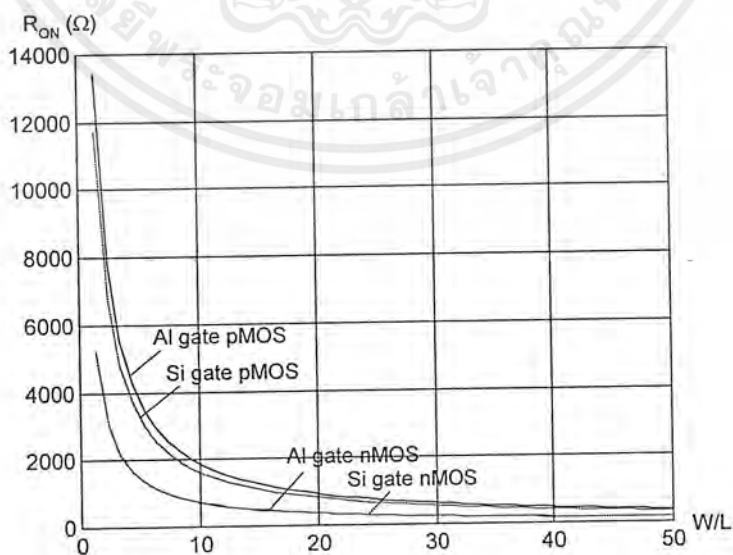
เพราะฉะนั้นสมการ I_{DS} ในตอนแรกจึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_{DS} = \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) V_{DS}$$

ค่าความต้านทานในช่วงเชิงเส้น สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} R_{ON} &= \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_{DS}} && \text{เมื่อ } V_{GS} \text{ คงที่} \\ &= \frac{dV_{DS}}{\mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) dV_{DS}} && \text{เมื่อ } V_{GS} \text{ คงที่} \\ &= \frac{1}{\mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)} && \text{เมื่อ } V_{GS} \text{ คงที่} \end{aligned}$$

จากสมการ R_{ON} สามารถหาความสัมพันธ์ของความต้านทานในช่วงเชิงเส้นกับอัตราส่วน W/L ได้ดังรูปที่ 4.11 โดยกำหนดให้ V_{GS} มีค่าคงที่เท่ากับ 10 V



รูปที่ 4.11 ความต้านทานในช่วงเชิงเส้นที่ อัตราส่วน W/L ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (G_m)

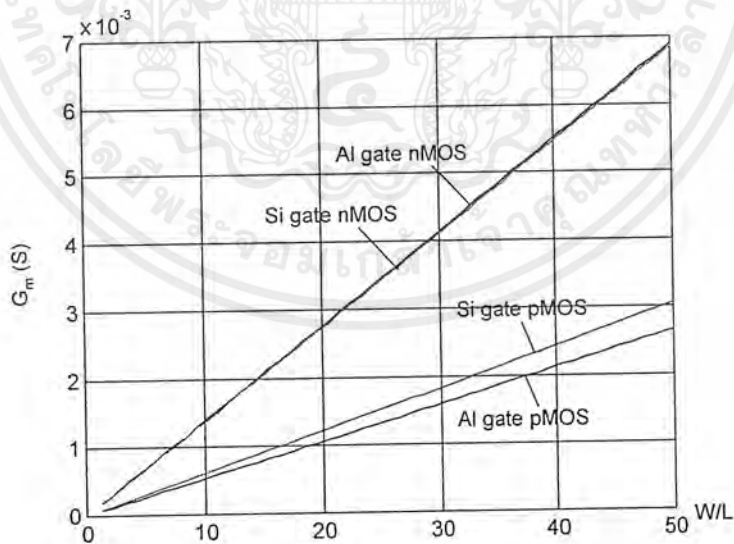
จากสมการกระแสเดรนในช่วงไม่อิ่มตัว

$$I_{DS(sat)} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2} \quad \text{เมื่อ } V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$$

ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (G_m) สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} G_m &= \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} \quad \text{เมื่อ } V_{DS} \text{ คงที่} \\ &= \frac{\mu C_{ox} \frac{W}{L} \frac{1}{2} d(V_{GS} - V_T)^2}{dV_{GS}} \quad \text{เมื่อ } V_{DS} \text{ คงที่} \\ &= \frac{\mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) d(V_{GS} - V_T)}{dV_{GS}} \quad \text{เมื่อ } V_{DS} \text{ คงที่} \\ &= \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) \quad \text{เมื่อ } V_{DS} \text{ คงที่} \end{aligned}$$

จากสมการ เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (G_m) และอัตราส่วน W/L ได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ที่อัตราส่วน W/L ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

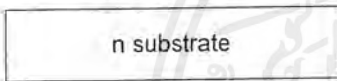
การทดสอบผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า

5.1 การสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิดเกทเป็นอลูมิเนียม

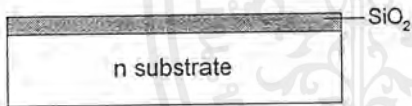
ในการทดลองนี้เป็นการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิดเกทเป็นอลูมิเนียม และวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ ทั้งชนิด n channel และ p channel โดยให้มีอัตราส่วน W/L ต่างกันดังนี้ 40/20, 60/20, 80/20, 100/20 และ 120/20 เพื่อศึกษาถึงผลของอัตราส่วน W/L ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของมอสทรานซิสเตอร์

ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์

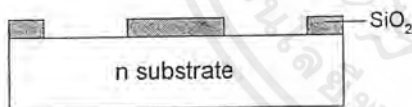
1. ชนิด p channel



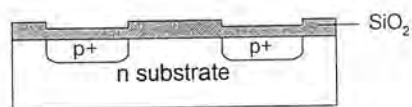
- 1) เตรียมแผ่นซิลิกอนฐานรอง ระบาย (100) n type พิกัด ความต้าน $3.55 \Omega \cdot \text{cm}$ หน้า $400 \mu\text{m}$



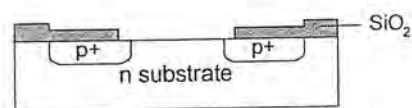
- 2) กระบวนการ Oxidation เพื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ให้มีความหนาประมาณ 5000 \AA



- 3) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์ออกสำหรับแพร่สารเจือ ในส่วน ซอส และเดรน



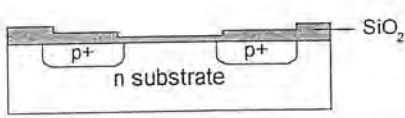
- 4) กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน เพื่อสร้างส่วนซอส และ เดรน ในขั้นตอน Drive-in จะเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ขึ้นมาปกคลุมช่องที่เปิดเอาไว้



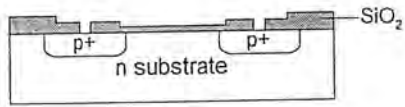
- 5) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์ สำหรับสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ส่วนเกท

รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel และเกทเป็นอลูมิเนียม

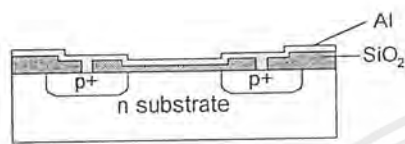
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



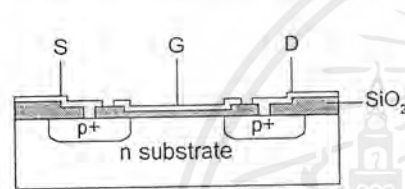
6) กระบวนการ Oxidation แบบ Dry เพื่อสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีคุณภาพดี สำหรับทำเกตออกไซด์



7) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับทำช่อง contact Al-Si



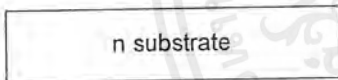
8) กระบวนการ Metalization เพื่อสร้างชั้นอลูมิเนียม สำหรับทำขั้วไฟฟ้าของส่วนซอส เดรน และ เกท



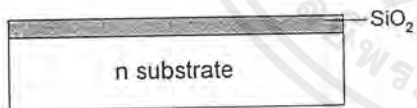
9) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อสกัดชั้นอลูมิเนียมให้ขั้วไฟฟ้าของ เกท ซอส และเดรน แยกออกจากกัน

รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เกทเป็นอลูมิเนียม (ต่อ)

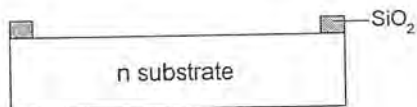
2. ชนิด n channel



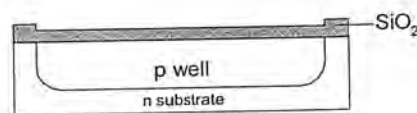
1) เตรียมแผ่นซิลิกอนฐานรอง ระบาย (100) n type พิกัดความต้าน 3.84 Ω.cm หนา 400 μm



2) กระบวนการ Oxidation เพื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ให้มีความหนาประมาณ 5000 Å



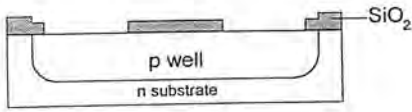
3) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ออกสำหรับแพร่สารเจือ ในส่วนของ p well



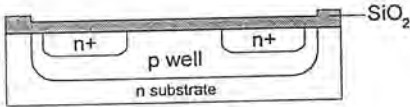
4) กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน เพื่อสร้างส่วน p well ในขั้นตอน Drive-in จะเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ขึ้นมาปกคลุมช่องที่เปิดเอาไว้

รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เกทเป็นอลูมิเนียม

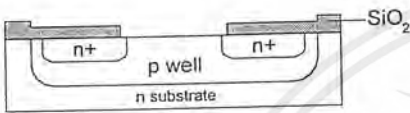
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



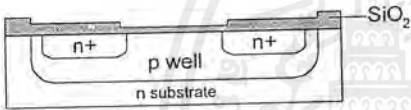
5) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์ สำหรับแพร่สารเจือ เพื่อสร้างส่วน ซอส และเดรน



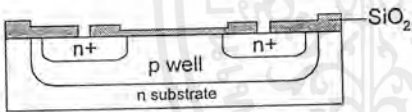
6) กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส เพื่อสร้างส่วน ซอส และเดรน ในขั้นตอน Drive-in จะเกิดขึ้น ซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นมาปกคลุมช่องที่เปิดเอาไว้



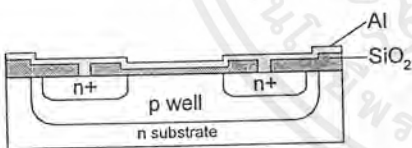
7) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์ สำหรับสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ส่วนเกท



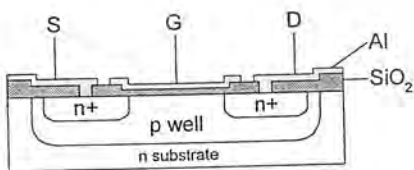
8) กระบวนการ Oxidation แบบ Dry เพื่อสร้างซิลิกอน ไดออกไซด์ที่มีคุณภาพดี สำหรับทำเกทออกไซด์



9) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับทำช่อง contact Al-Si



10) กระบวนการ Metalization เพื่อสร้างชั้นอลูมิเนียม สำหรับทำขั้วไฟฟ้าของส่วนซอส เดรน และ เกท

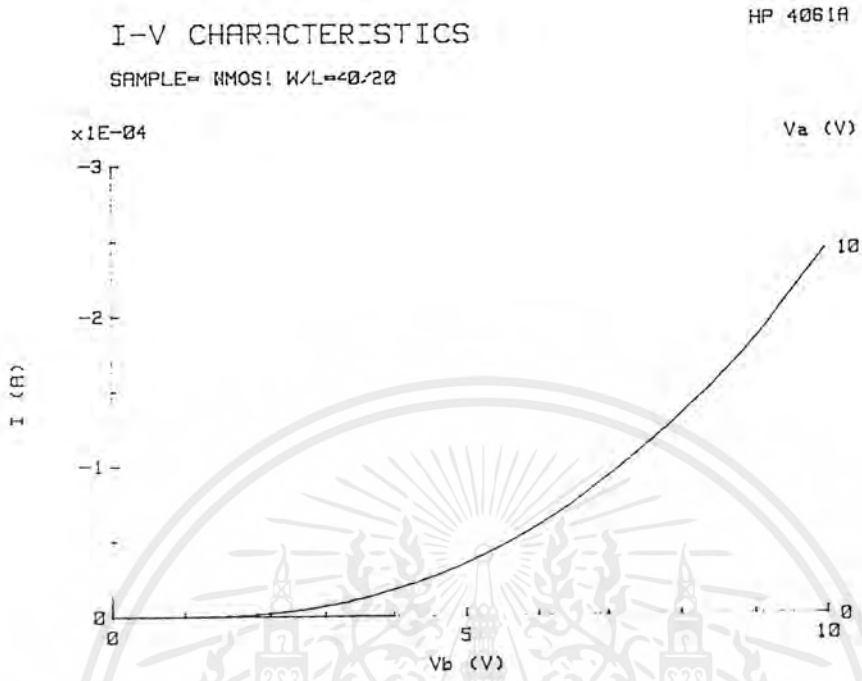


11) กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อสกัดชั้น อลูมิเนียม ให้ขั้วไฟฟ้าของ เกท ซอส และเดรน แยกออกจากกัน

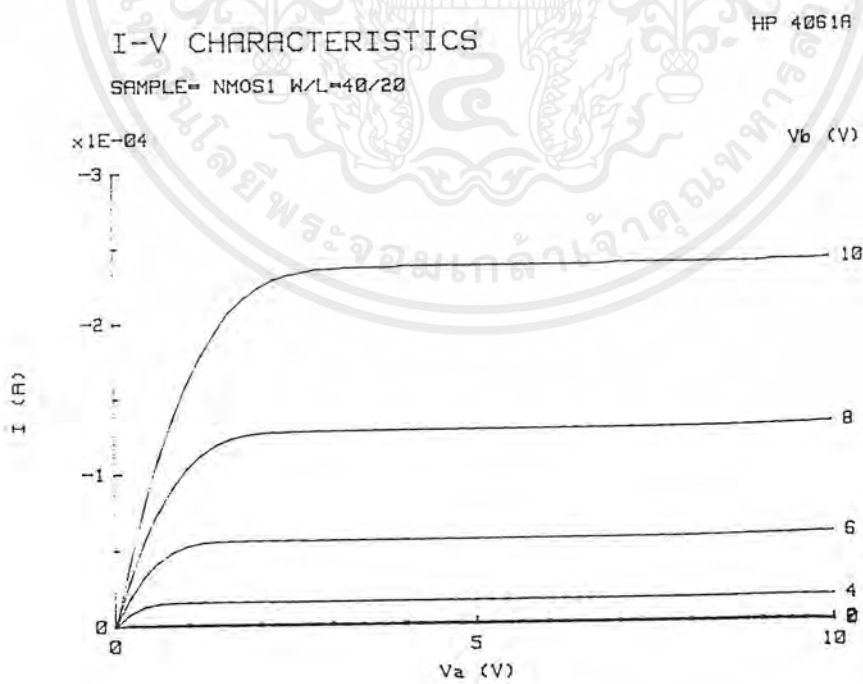
รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เกทเป็นอลูมิเนียม (ต่อ)

จากการทดลองสร้างมอสทรานซิสเตอร์ เมื่อทำการวัดแรงดันขีดเริ่ม และคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ได้ผลการวัดดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

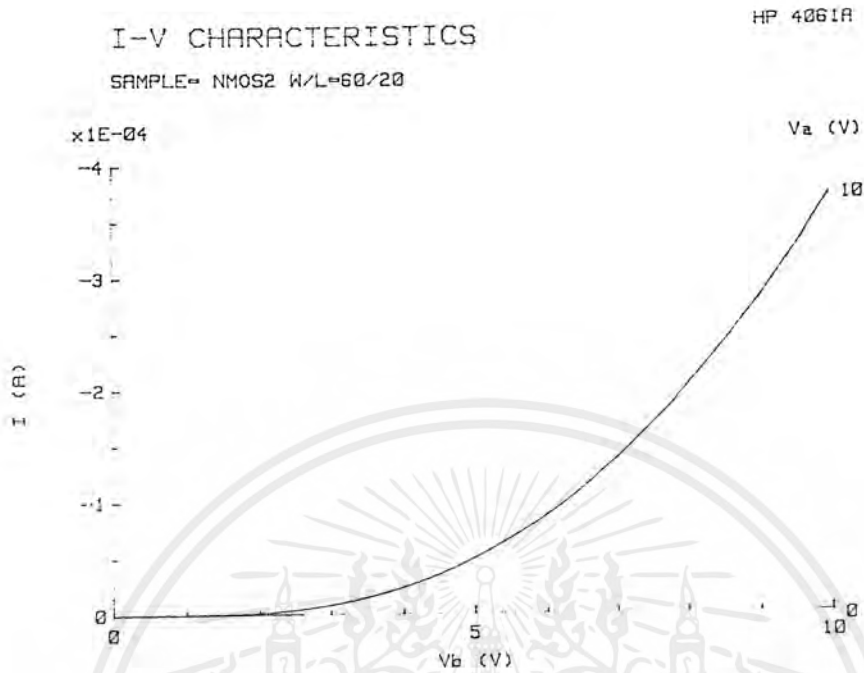


ก) แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ W/L = 40/20 μm

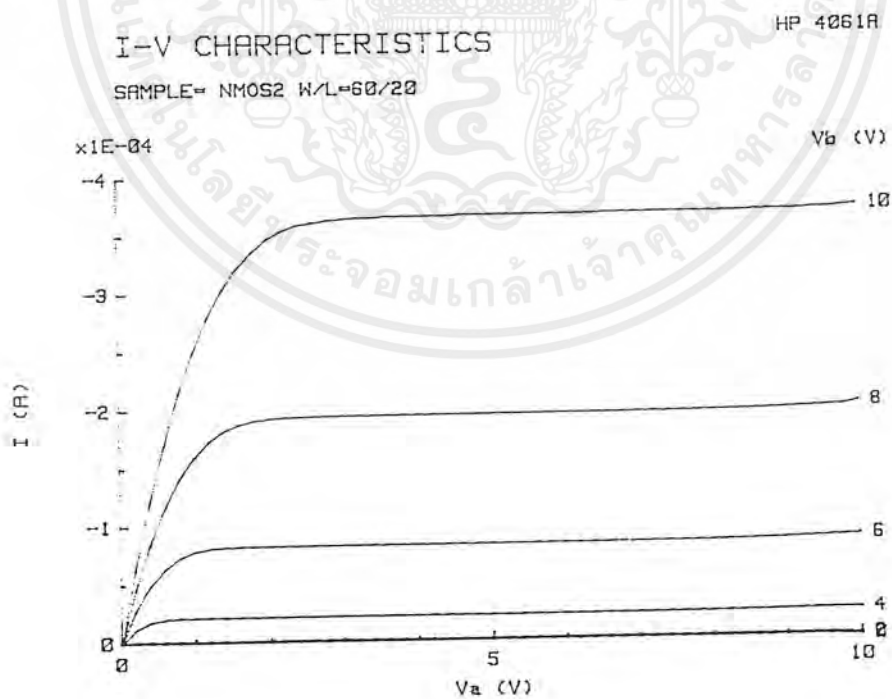


ข) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ W/L = 40/20 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

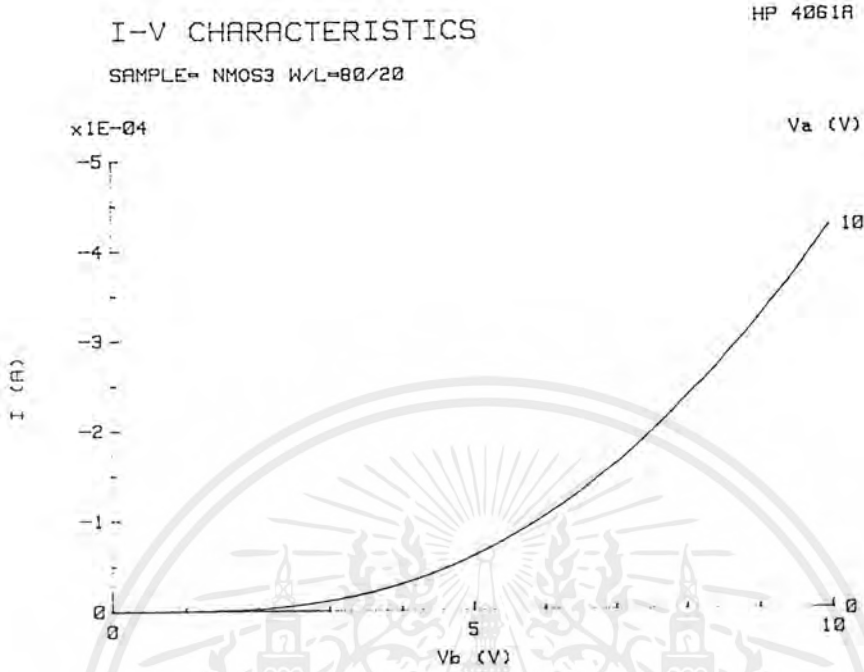


ค) แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ $W/L = 60/20 \mu\text{m}$

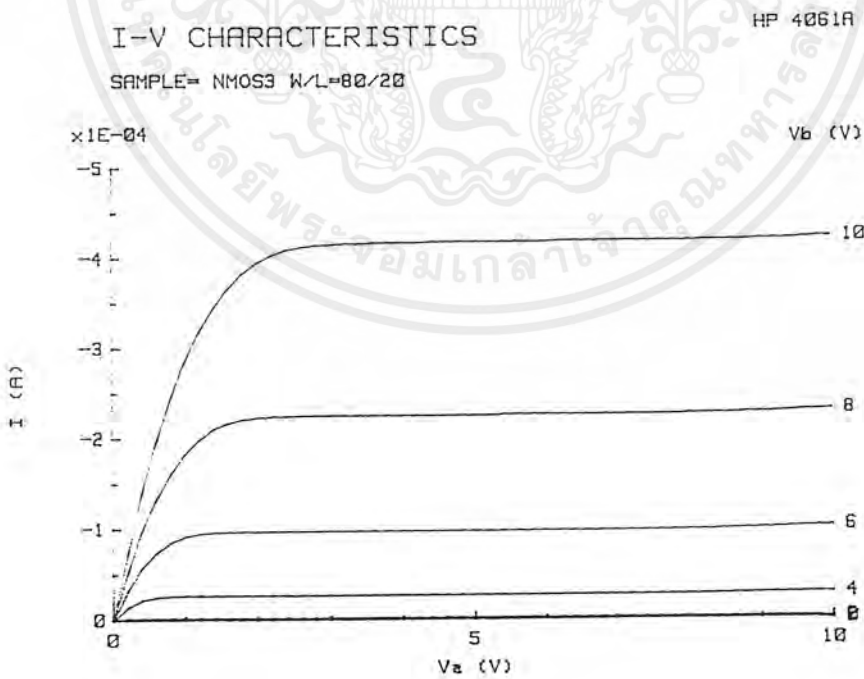


ง) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ $W/L = 60/20 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



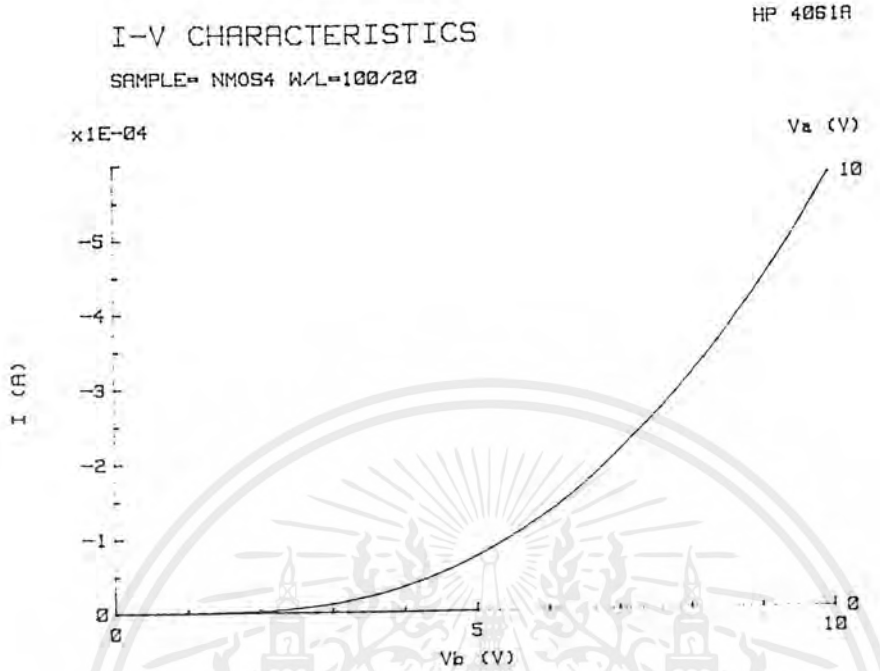
จ) แรงดันขั้วเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ $W/L = 80/20 \mu\text{m}$



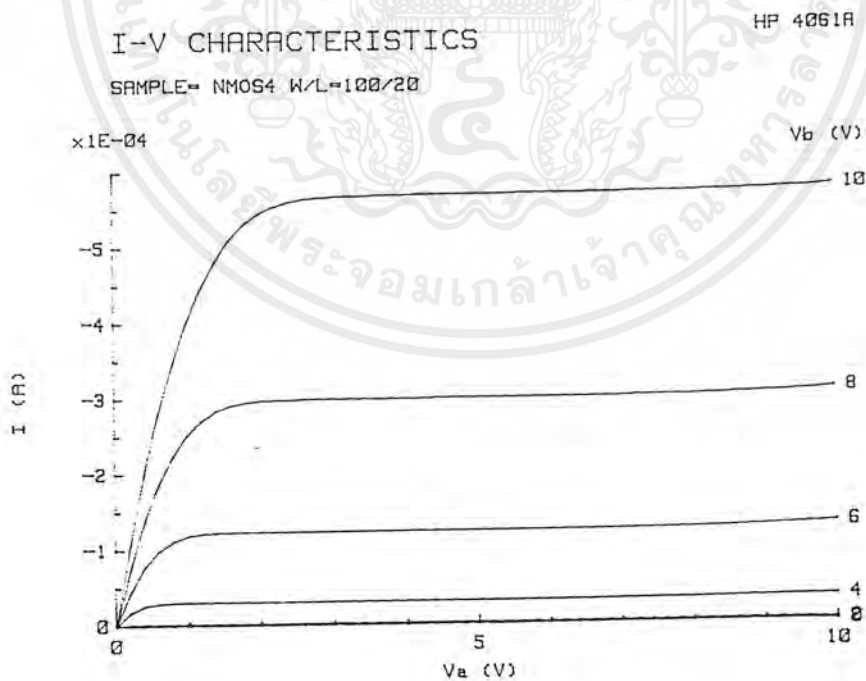
ค) คุณสมบัตินกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ $W/L = 80/20 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาด์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



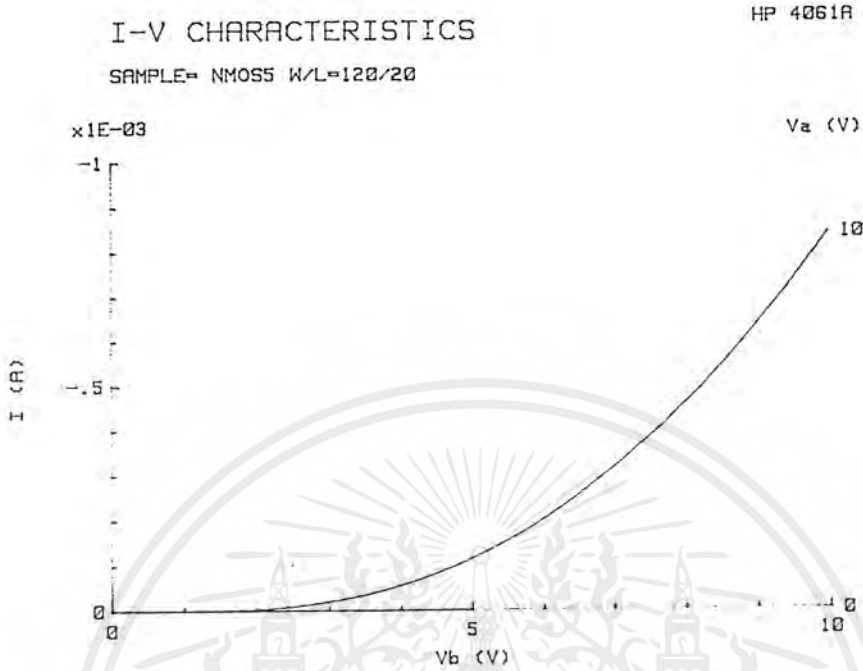
ข) แรงดันขั้วเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ $W/L = 100/20 \mu\text{m}$



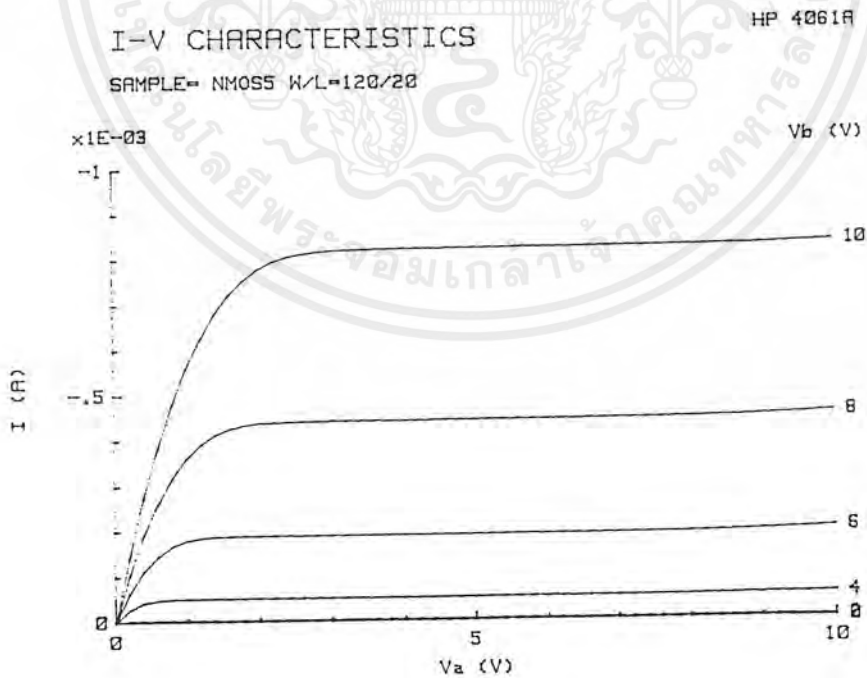
ข) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ $W/L = 100/20 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



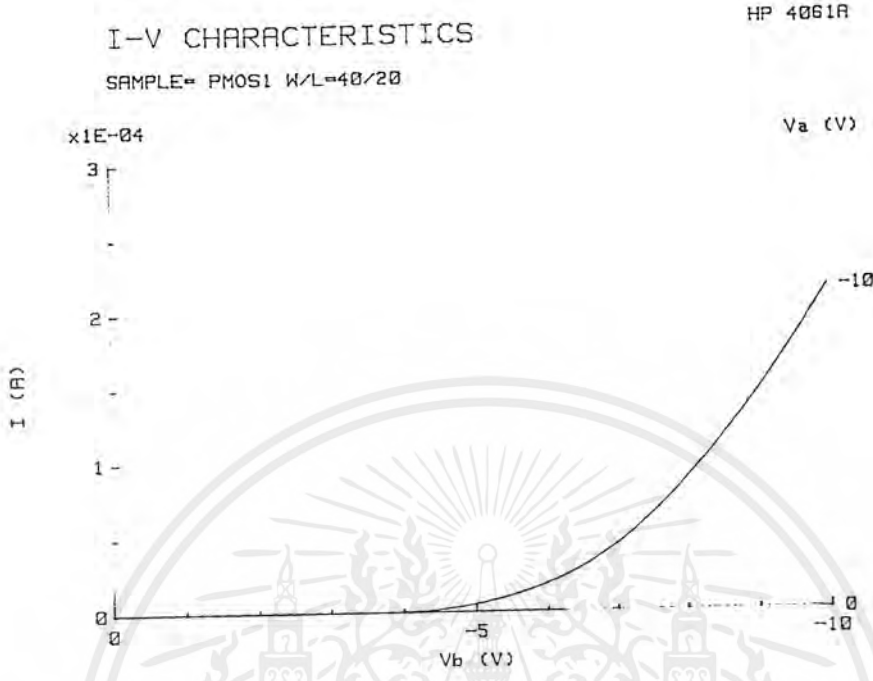
ณ) แรงดันขั้วเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ $W/L = 120/20 \mu\text{m}$



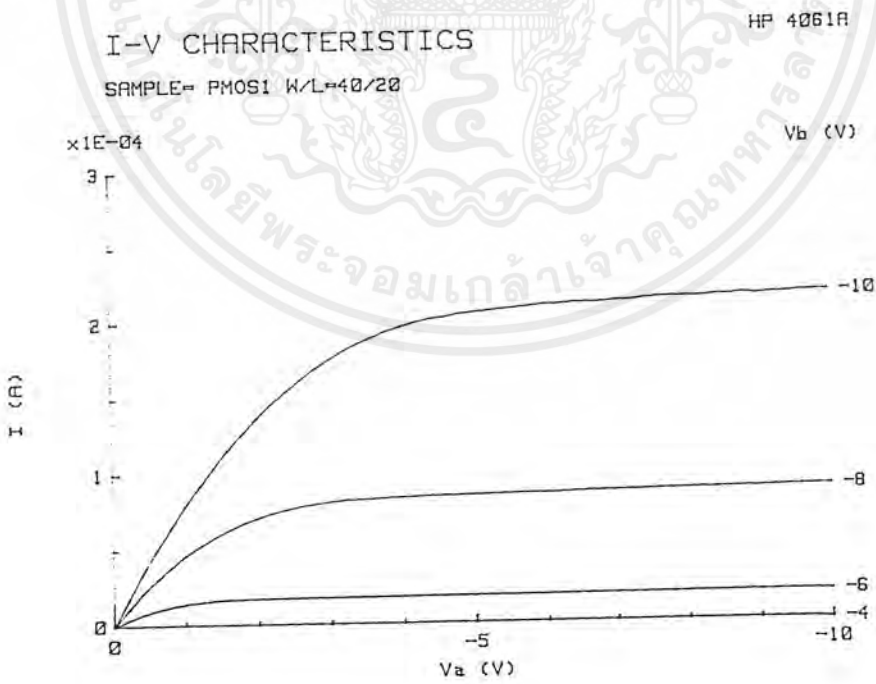
ญ) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เมื่อ $W/L = 120/20 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตไ้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



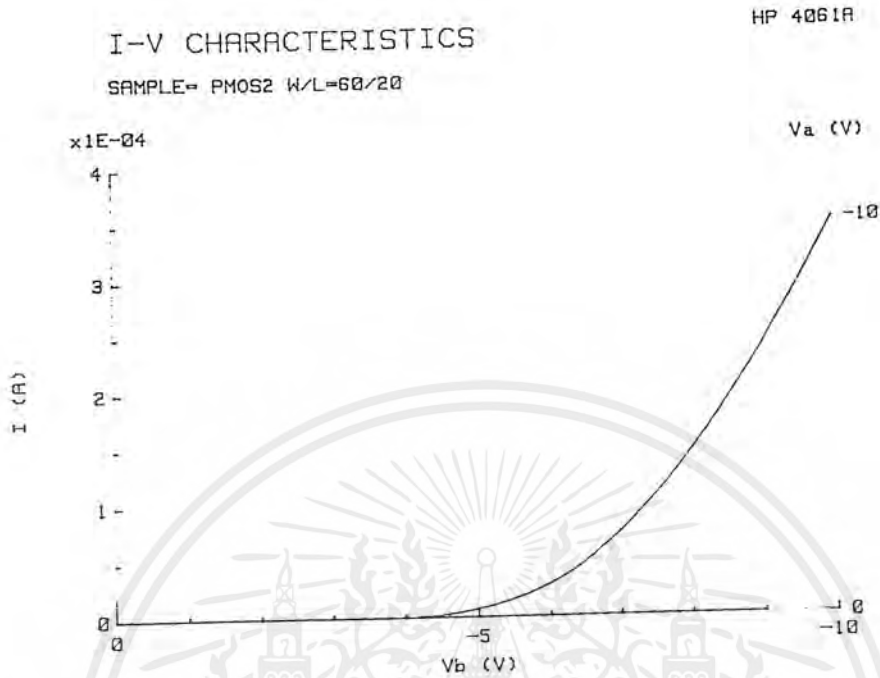
ฎ) แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ W/L = 40/20 μm



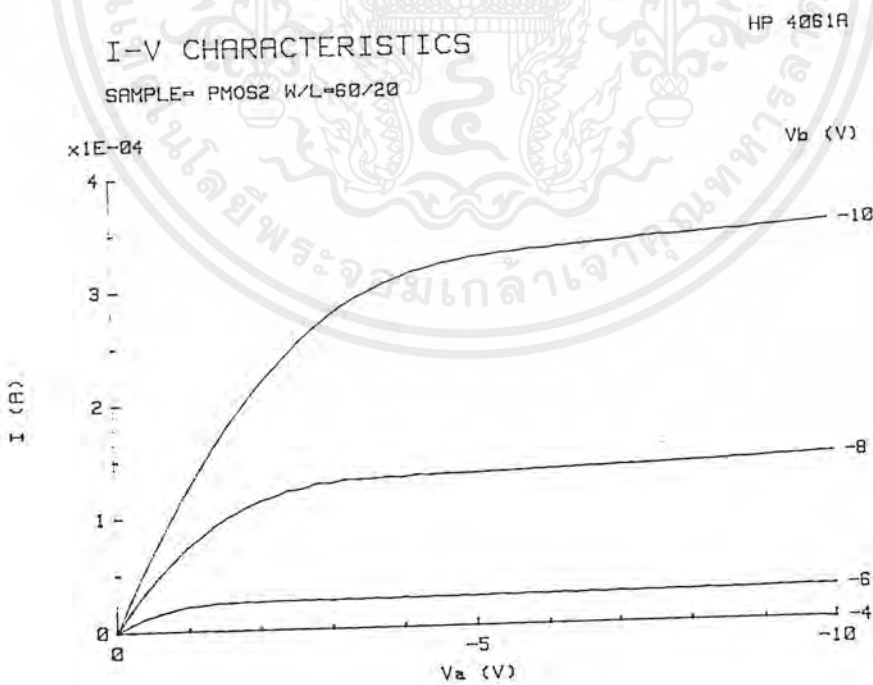
ฎ) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ W/L = 40/20 μm

รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



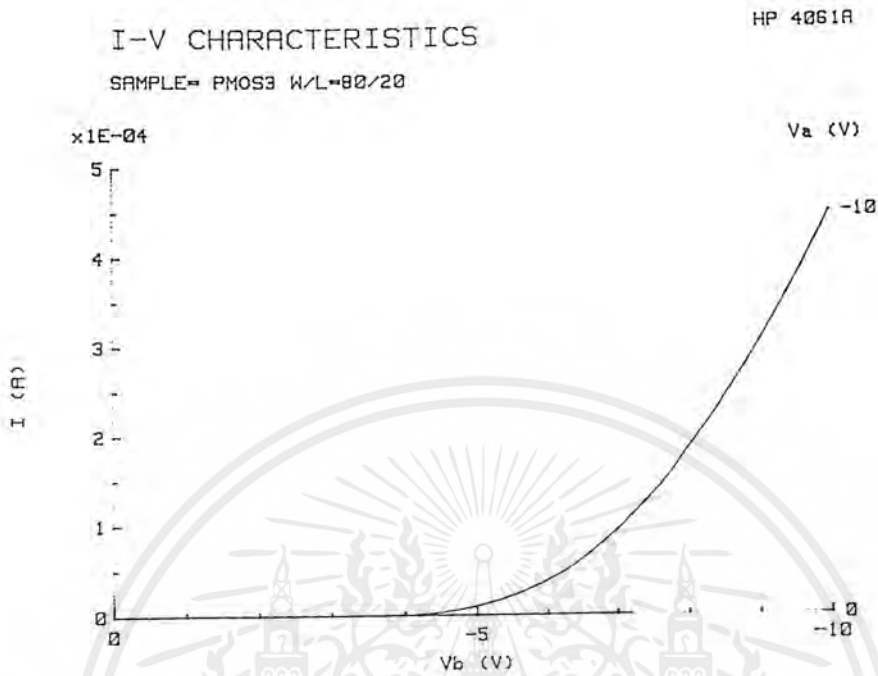
ฐ) แรงดันขั้วเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ $W/L = 60/20 \mu\text{m}$



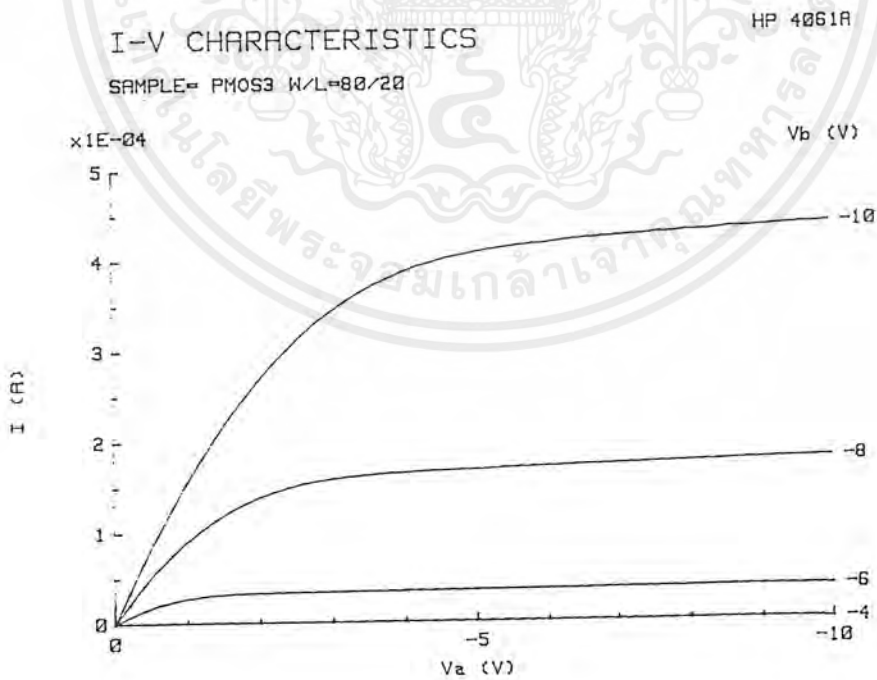
ฑ) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ $W/L = 60/20 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



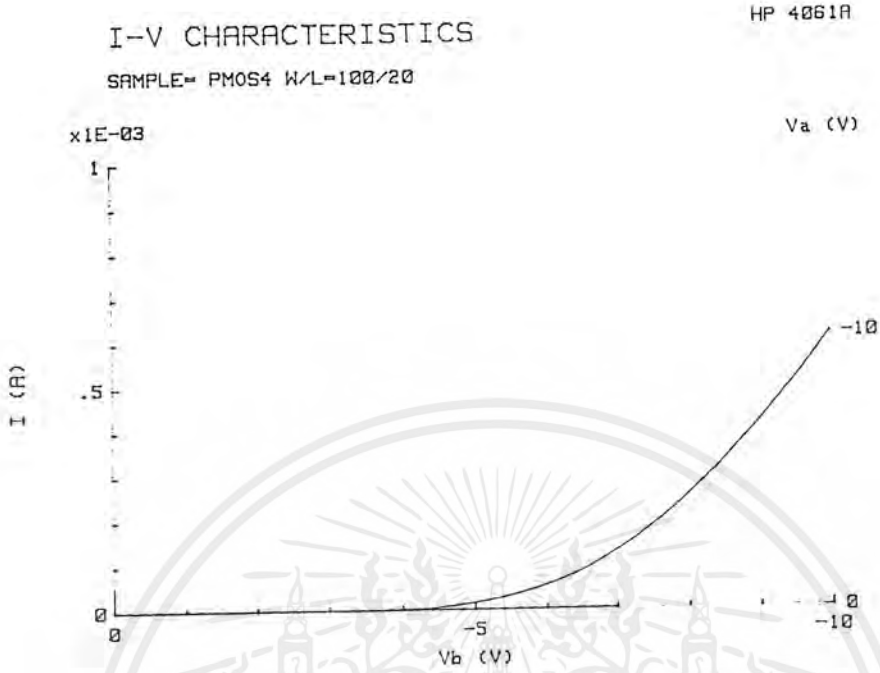
ด) แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ $W/L = 80/20 \mu\text{m}$



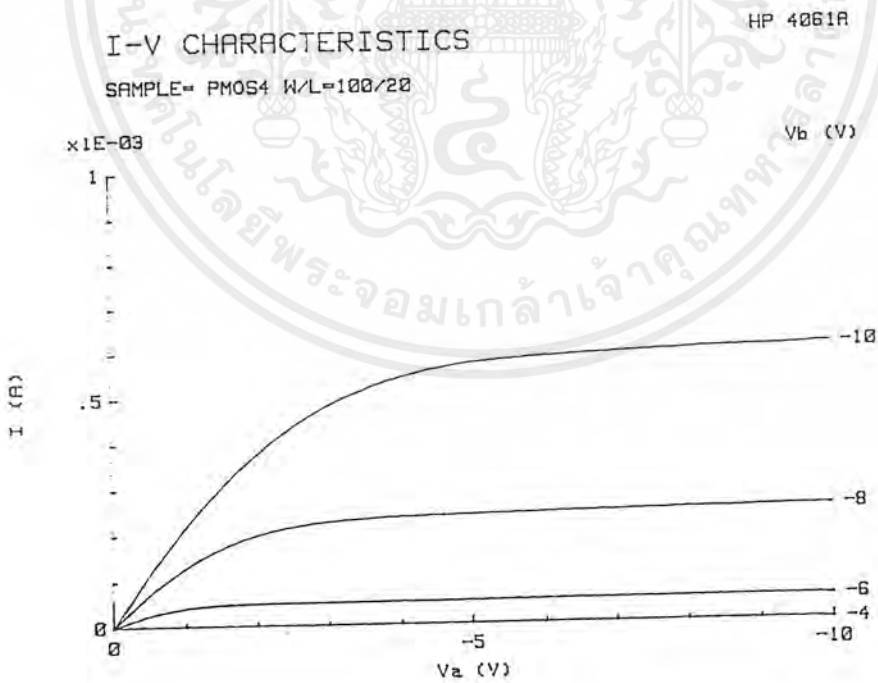
ณ) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ $W/L = 80/20 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ $W/L = 100/20 \mu\text{m}$



ค) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ $W/L = 100/20 \mu\text{m}$

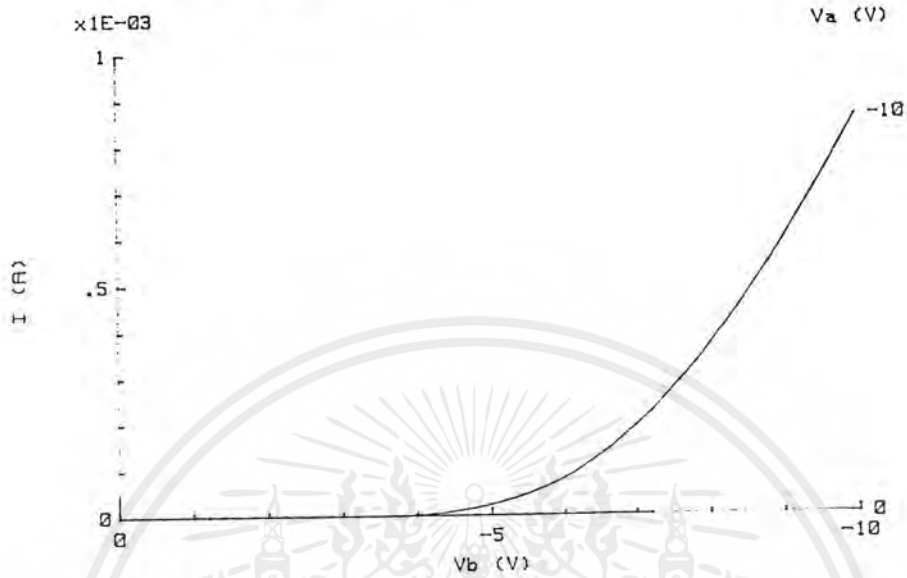
รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= PMOS5 W/L=120/20

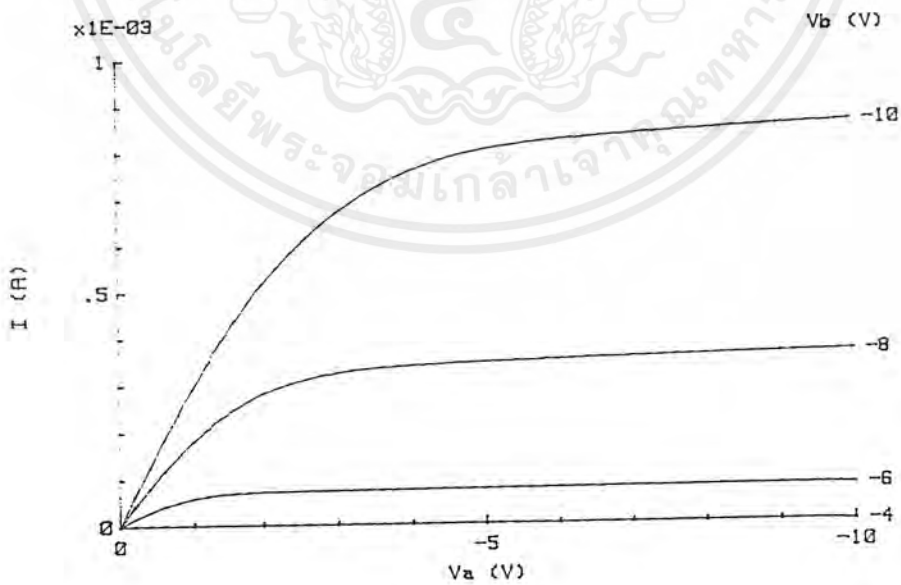


ด) แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ $W/L = 120/20 \mu\text{m}$

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= PMOS5 W/L=120/20



ท) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด p channel เมื่อ $W/L = 120/20 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติของมอสทรานซิสเตอร์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์

5.2.1 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage: V_T)

จากค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สถานะผิว (Q_{ss}) ที่ได้จากการทดลองสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส, ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของแผ่นฐานรอง ในกรณีของ pMOS หรือค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วน p-well ในกรณี nMOS สามารถคำนวณหาแรงดันขีดเริ่ม จากสมการที่ 2.9 และเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากมอสทรานซิสเตอร์ที่ทดลองสร้างขึ้น ได้ผลดังนี้

อัตราส่วน W/L	แรงดันขีดเริ่ม (V_T)			
	pMOS Transistor		nMOS Transistor	
	คำนวณ (V)	วัด (V)	คำนวณ (V)	วัด (V)
40/20	-2.3	-4.2	2.0	1.9
60/20	-2.3	-4.2	2.0	2.2
80/20	-2.3	-4.3	2.0	2.2
100/20	-2.3	-4.3	2.0	2.1
120/20	-2.3	-4.1	2.0	2.4

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์

5.2.2 ความต้านทานในช่วงเชิงเส้น (R_{ON})

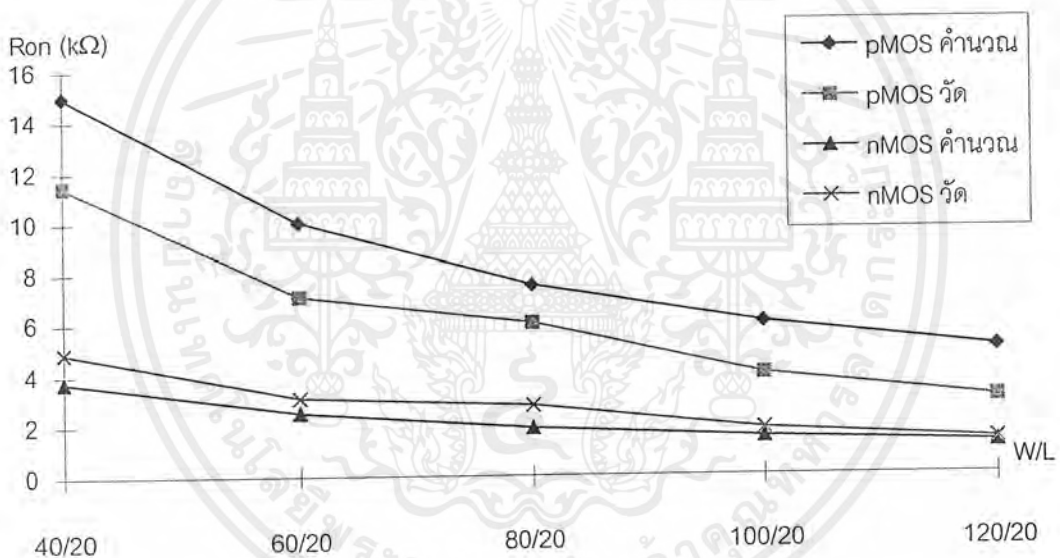
การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ ในช่วงที่แรงดันเกตมากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} > V_T$) และแรงดันเดรน-ซอส น้อยกว่า ผลต่างระหว่าง แรงดันเกตและแรงดันขีดเริ่ม ($V_{DS} < V_{GS} - V_T$) มากๆ กระแสเดรน (I_{DS}) จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันเดรน (V_{DS}) อย่างเป็นเชิงเส้น (Linear) เมื่อแรงดันเกต คงที่ จึงเรียกว่าเป็นการทำงานในช่วงเชิงเส้น ซึ่งเราสามารถหาค่าความต้านทานของมอส ทรานซิสเตอร์ (ความต้านทานของช่องทางเดินกระแส) ที่ทำงานอยู่ในช่วงเชิงเส้นนี้ได้จาก

$$R_{ON} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_{DS}} \quad \text{เมื่อ } V_{GS} \text{ คงที่} \quad (5.1)$$

ในการทดลองหาค่าความต้านทานในช่วงเชิงเส้นนี้ ได้กำหนด ΔV_{DS} เท่ากับ 0.2 V (0-0.2 V) และกำหนดให้ V_{GS} คงที่ 10V ได้ผลการทดลองดังนี้

อัตราส่วน W/L	$R_{ON} (k\Omega)$ ที่ $V_{GS} = 10 V$			
	pMOS Transistor		nMOS Transistor	
	ค่านวม ($k\Omega$)	วัด ($k\Omega$)	ค่านวม ($k\Omega$)	วัด ($k\Omega$)
40/20	15	11.43	3.74	4.85
60/20	10	7.06	2.48	3.08
80/20	7.5	6	1.86	2.74
100/20	6	4	1.49	1.82
120/20	5	3	1.24	1.37

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองค่าความต้านทานในช่วงเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าความต้านทานในช่วงเชิงเส้นของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง

5.2.3 ค่าความต้านทานในช่วงอิ่มตัว (R_{OUT})

การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ ในช่วงที่แรงดันเกตมากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} > V_T$) และแรงดันเดรน-ซอร์มากกว่าผลต่างระหว่างแรงดันเกตและแรงดันขีดเริ่ม ($V_{DS} > V_{GS} - V_T$) กระแสเดรน (I_{DS}) จะคงที่ (ในทางปฏิบัติเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย) ไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันเดรน (V_{DS}) เมื่อแรงดันเกตคงที่ แม้แรงดันเดรนจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม เรียกว่าเป็นการทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation) ซึ่งค่าความต้านทานของมอสทรานซิสเตอร์ (ความต้านทานของช่องทางเดินกระแส) ที่ทำงานอยู่ในช่วง

อิ่มตัว ในทางทฤษฎีจะมีค่า ∞ เนื่องจาก $\Delta I_{DS} = 0$ (ในการคำนวณอย่างง่าย เมื่อไม่คำนึงถึงผลกระทบ

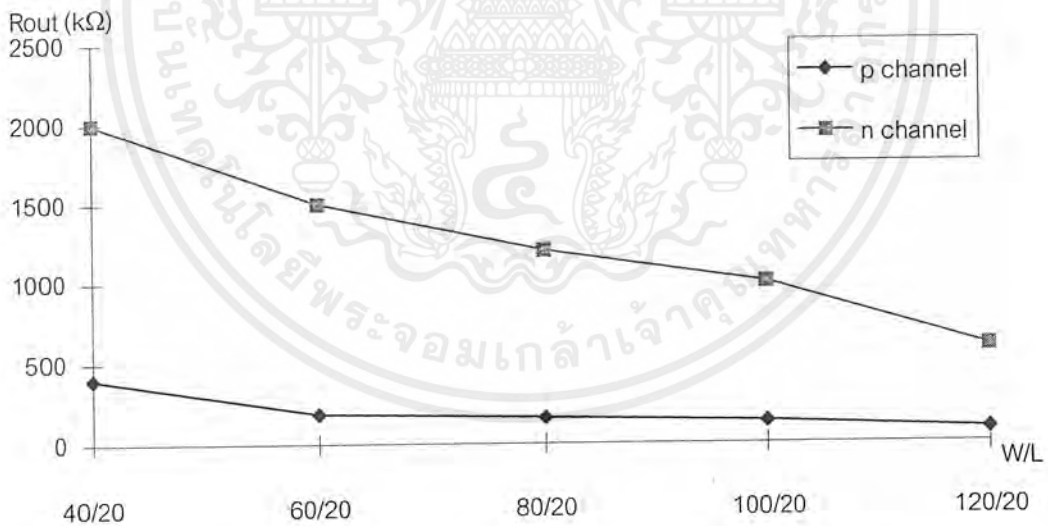
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก channel width modulation) แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ΔI_{DS} สามารถหาค่าได้ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความต้านทานในช่วงอิมิต์วนี้ได้

ในการทดลองได้กำหนด ΔV_{DS} เท่ากับ 5 V (5-10 V) และ V_G มีค่าคงที่เท่ากับ 10V

อัตราส่วน W/L	$R_{OUT}(V_{GS} = 10 \text{ V})$			
	pMOS Transistor		nMOS Transistor	
	ค่าความ (k Ω)	วัตต์ (k Ω)	ค่าความ (k Ω)	วัตต์ (k Ω)
40/20	∞	400	∞	2000
60/20	∞	187.6	∞	1500
80/20	∞	160	∞	1200
100/20	∞	133.3	∞	1000
120/20	∞	85.7	∞	600

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองค่าความต้านทานในช่วงอิมิต์วของมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความต้านทานในช่วงอิมิต์วของมอสทรานซิสเตอร์ ที่ได้จากการทดลอง

5.2.4 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (G_m) ในช่วงอิมิต์ว

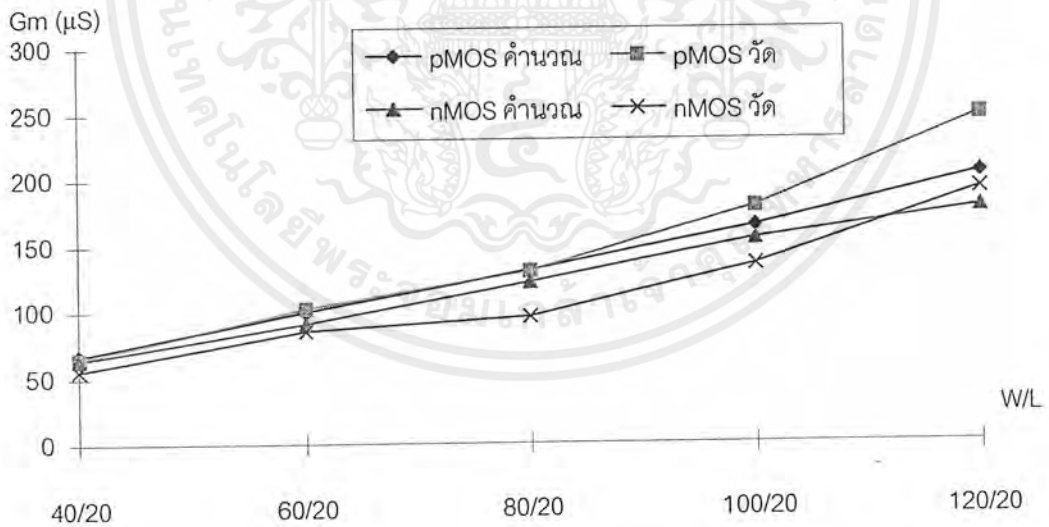
ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะเป็นตัวบอกว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต (ΔV_{GS}) จะทำให้สัญญาณเอาต์พุต (ΔI_{DS}) เปลี่ยนแปลงไปเป็นปริมาณเท่าไร (มีลักษณะเช่นเดียวกับ β ในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์) ซึ่งสามารถหาได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{m(sat)} = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} \quad \text{เมื่อ } V_{DS} \text{ คงที่} \quad (5.2)$$

ในการทดลองได้กำหนด $\Delta V_{GS} = 2 \text{ V}$ (8-10 V) และ V_{DS} มีค่าคงที่เท่ากับ 10 V

อัตราส่วน W/L	$G_m (V_{GS} = 10 \text{ V})$			
	pMOS Transistor		nMOS Transistor	
	จำนวน (μS)	วัด (μS)	จำนวน (μS)	วัด (μS)
40/20	66.82	64.38	63.18	55
60/20	100.2	102.5	91.26	85
80/20	131.3	130.2	121.7	95.83
100/20	164.2	179.2	154.1	135
120/20	203.9	247.9	177.8	191.7

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ในช่วงอิมิตัวของมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ในช่วงอิมิตัวของมอสทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง

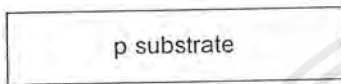
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิดเกทเป็นโพลีซิลิกอน

5.3.1 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิดเกทเป็นโพลีซิลิกอน

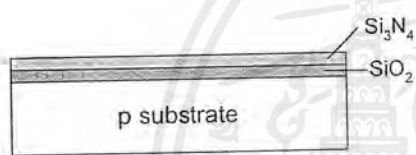
มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเกทเป็นโพลีซิลิกอน โดยทั่วไปจะถูกสร้างขึ้นพร้อมกันหลายๆตัวภายในวงจรรวม และส่วนมากหรือเกือบทั้งหมดจะเป็นชนิด n channel เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของความเร็วในการทำงาน ซึ่งขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel เกทเป็นโพลีซิลิกอนสามารถสรุปได้ดังนี้

1) Initial wafer



เตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนฐานรอง ชนิด p type

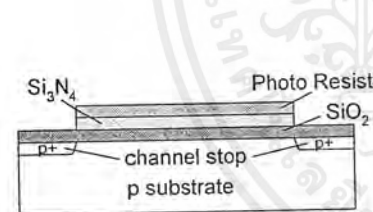
2) Isolation



เพื่อแยกมอสทรานซิสเตอร์แต่ละตัวออกจากกัน

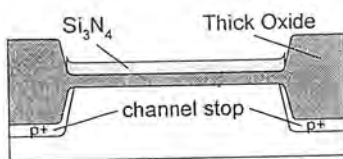
ก) สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยวิธี Thermal Oxidation

ข) สร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ด้วยวิธี CVD



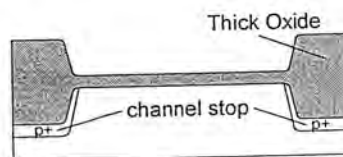
ค) ใช้กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไนไตรด์รอบๆ บริเวณที่จะสร้างมอสทรานซิสเตอร์

ง) ฝังไอออนอะตอมสารเจือชนิดพี (p+) เพื่อสร้าง channel stop ด้วยกระบวนการ Ion Implantation



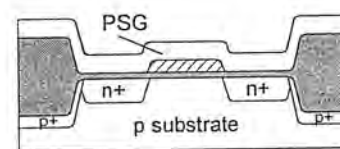
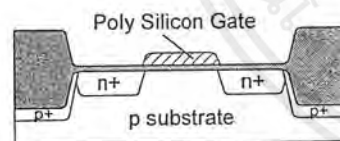
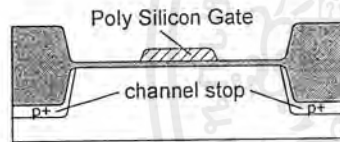
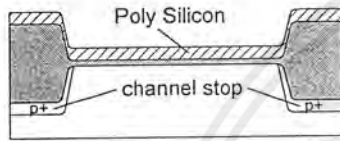
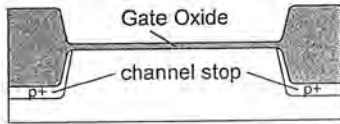
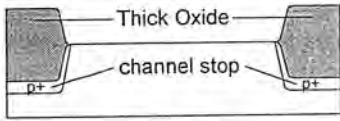
จ) ลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกให้หมด

ฉ) ใช้กระบวนการ Oxidation เพื่อสร้างชั้นออกไซด์หนา (field Oxide)



ช) ทำการลอกชั้นซิลิกอนไนไตรด์ออก โดยใช้วิธีการ wet etching ด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในชื่อของโรงเรียนคุณธรรมการศึกษานานาชาติ
รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel และเกทเป็น โพลีซิลิกอน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3) Gate Fabrication

ทำการสร้างส่วนเกต โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

ก) สกัดชั้นออกไซด์ที่มีอยู่เดิม ที่บริเวณส่วนเกต ออกให้หมด

ข) สร้างชั้นออกไซด์บริเวณเกตชั้นใหม่ ด้วยวิธี Dry Oxidation

ค) สร้างชั้นของโพลีซิลิกอน (Poly Silicon) เพื่อทำหน้าที่เป็นส่วนเกต โดยกระบวนการ CVD

ง) แพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็น (n^+) ของอะตอมฟอสฟอรัสเข้าไปในชั้นของโพลีซิลิกอน เพื่อเพิ่มความนำไฟฟ้าให้สูงขึ้น

จ) ใช้กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อสกัดชั้นของโพลีซิลิกอน ให้เหลืออยู่เฉพาะส่วนที่เป็นบริเวณเกตเท่านั้น

4) Source & Drain Fabrication

ทำการสร้างส่วนซอสและเดรน โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

ก) ทำการฝังไอออนชนิดเอ็น (n^+) ของอะตอมฟอสฟอรัส โดยกระบวนการ Ion Implantation

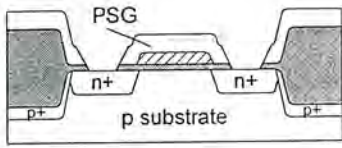
ข) ทำการ Anneal ส่วนซอสและเดรน โดยทิ้งไว้ในอุณหภูมิสูงๆ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

5) Glass & Contact

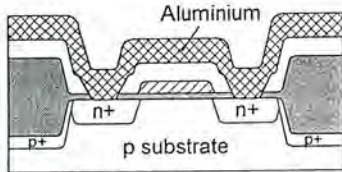
เป็นการสร้างชั้น PhosphoSilicate Glass (PSG) และบริเวณช่องสัมผัส (Contact Window) โดยมีขั้นตอนดังนี้

ก) สร้างชั้น PSG โดยกระบวนการ CVD

เอกสารนี้รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel และเกตเป็น โพลีซิลิกอน (คือ) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



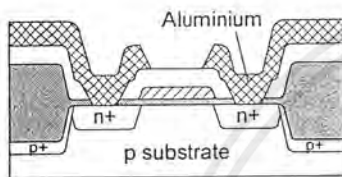
- ข) ใช้กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดชั้นของ PSG บริเวณที่จะเป็นช่องสัมผัสออก



6) Metallization

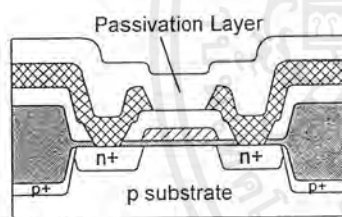
เป็นขั้นตอนของการทำขั้วโลหะ ซึ่งทำได้ดังนี้

- ก) สร้างชั้นของอลูมิเนียม โดยกระบวนการ Sputtering



- ข) ใช้กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อสกัดชั้นของอลูมิเนียมบริเวณที่ไม่ต้องการออก

- ค) ทำการ Alloy โดยทิ้งไว้ในอุณหภูมิสูงๆ ราว 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เพื่อให้เกิด Si-Al Alloy



7) Passivation

เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นป้องกันผิวหน้าของแผ่นผลึกทำได้โดย

- ก) สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ SiO_2 โดยกระบวนการ CVD เพื่อเป็นชั้นป้องกันผิวหน้า

- ข) ใช้กระบวนการ Photolithography & Etching เพื่อเปิดชั้นป้องกันผิวหน้าบริเวณที่เป็นส่วน Bonding Pad ออก

รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ชนิด n channel และเกตเป็นโพลีซิลิกอน (ต่อ)

5.3.2 การสร้างฟิล์มบางของโพลีซิลิกอน ด้วยการ สเป็คเตอริง

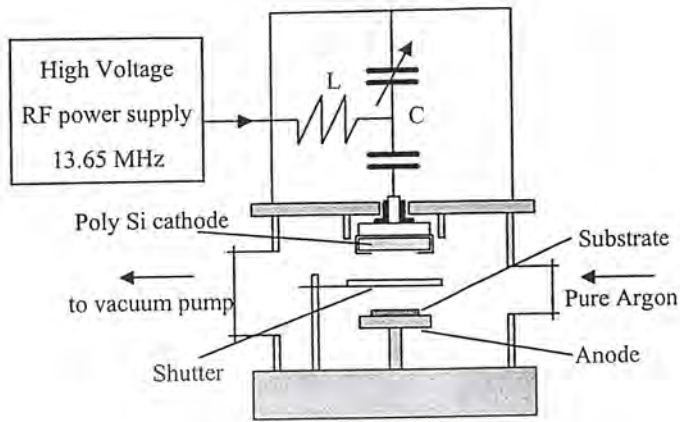
โพลีซิลิกอน (Poly Crystalline Silicon) เป็นสารชนิดกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ถูกใช้มากที่สุด ในการทำส่วนเกตของมอสทรานซิสเตอร์ภายในวงจรรวม ซึ่งฟิล์มบางของโพลีซิลิกอนนี้ ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะสร้างขึ้นจากกระบวนการ CVD (Chemical Vapor Deposition) แต่เนื่องจากระบบ CVD ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ฯ ยังติดตั้งไม่แล้วเสร็จ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงจะทำการศึกษาการสร้างฟิล์มบางของโพลีซิลิกอนด้วยการสเป็คเตอริง (Sputtering Deposition) ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถสร้างฟิล์มบางของโพลีซิลิกอน ได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สปัตเตอริง (Sputtering) เป็นคำศัพท์ที่กล่าวถึง “กลไกที่ทำให้อะตอม (Atom) หลุดออกจากผิวอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งเป็นวัสดุใดๆ อันด้วยการถูกชนด้วยอนุภาคประจุที่มีพลังงานสูง อะตอมที่หลุดออกไปนั้นจะเกิดการก่อตัว (Deposited) ขึ้นบนแผ่นผลึกฐานรองในลักษณะของฟิล์ม การสปัตเตอริงนั้น สามารถทำได้กับวัสดุหลายอย่าง กระจกตัวนำ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะผสม โพลีซิลิกอน ก็เป็นสารชนิดหนึ่งที่สามารถใช้กับเทคนิคสปัตเตอริงได้เช่นกัน

การสปัตเตอริงมีอยู่หลายแบบ เช่น แบบดีซีไดโอด (DC Diode Sputtering), แบบดีซีไตรโอด (DC Triode Sputtering), แบบอาร์เอฟไดโอด (RF Diode Sputtering) และแบบอาร์เอฟแมกเนตรอน (RF Magnetron Sputtering) ในการทดลองนี้ใช้การสปัตเตอริงแบบอาร์เอฟไดโอด (RF Diode Sputtering) ซึ่งประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูงซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz), แหล่งจ่ายแก๊ส, ห้องสปัตเตอริง (Sputtering Chamber) และปั๊มสุญญากาศ (Rotary Pump+Diffusion Pump) ภายในห้องสปัตเตอริงประกอบด้วย แผ่นโพลีซิลิกอน คาโรด, อาโนด, ฮีตเตอร์ และชัตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 การสปัตเตอริงเกิดจากการป้อนกำลัง (ที่ความถี่วิทยุ) ผ่านวงจรมะทิง ซึ่งเข้าสู่ห้องสปัตเตอริงซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ (Pure Argon) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนเกิดเป็นพลาสมาขึ้น ในบริเวณระหว่างคาโรดและอาโนด เนื่องจากอาโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปัตเตอริงทำให้พื้นที่ของอาโนดมากกว่าคาโรด จึงเกิดการเหนี่ยวนำคาโรดให้มีศักย์เป็นลบ และดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชนแผ่นโพลีซิลิกอนที่ต่ออยู่กับคาโรด ทำให้อะตอมของโพลีซิลิกอนหลุดกระเด็นออกมา และไปสะสมบนผิวแผ่นซิลิกอนฐานรองซึ่งวางอยู่ที่อาโนด เกิดเป็นฟิล์มบางของโพลีซิลิกอนขึ้นบนแผ่นซิลิกอนฐานรอง

ขั้นตอนการสปัตเตอริง เริ่มด้วยนำแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) วางลงบนอาโนด แล้วดูดอากาศออกจากห้องสปัตเตอริง จนกระทั่งเหลือความดันต่ำกว่า 1×10^{-7} mbar จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์เข้าไปในห้องสปัตเตอริง จนกระทั่ง 2×10^{-1} mbar การควบคุมความดันในห้องสปัตเตอริงทำได้โดยการปรับวาล์วปล่อยแก๊สเข้าและวาล์วดูดแก๊สออกจนได้ความดันที่ต้องการ ปิดชัตเตอร์ให้คั่นกลางระหว่างคาโรดและอาโนด แล้วจ่ายกำลัง RF แก่คาโรด โดยค่อยๆ เพิ่มกำลัง RF ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดพลาสมาขึ้นในห้องสปัตเตอริง จากนั้นปรับความดันให้ได้ 6×10^{-2} mbar ปรับกำลัง RF และอุณหภูมิของอาโนดจนกระทั่งได้ค่าที่จะทำการสปัตเตอริง ทำการพรีสปัตเตอริง (Pre Sputtering) โดยปล่อยให้ระบบอยู่ในเงื่อนไขที่จะทำการสปัตเตอริงเป็นเวลา 20 นาที จึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปัตเตอริง



รูปที่ 5.8 ระบบการสปัตเตอร์แบบ อาร์เอฟ ไดโอด

5.3.3 การควบคุมความหนาของฟิล์มบางโพลีซิลิกอน โดยการเปลี่ยนแปลงเวลา

การควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มบางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เปลี่ยนแปลงเวลา, เปลี่ยนแปลงกำลัง RF ที่จ่ายให้กับระบบ ฯลฯ โดยให้เงื่อนไขอื่นๆคงที่ ในการทดลองนี้จะใช้การเปลี่ยนแปลงเวลาเป็นตัวแปรเพื่อควบคุมความหนาของฟิล์มบางโพลีซิลิกอน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) เตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนฐานรองที่จะใช้ทดลอง

- แผ่น p-type หนา 100
- ความต้านทานแผ่น 0.168 Ω/sq .
- พิกัดความต้านทาน 20.6 $\Omega\text{-cm}$.
- ความหนา 440 μm

2) สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการ Dry Oxidation

- แก๊สออกซิเจน flow 1200 cc/min
- อุณหภูมิ 1160 $^{\circ}\text{C}$
- เวลา 1 ชั่วโมง

ได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีสีม่วง มีความหนาประมาณ 1000 Å

3) สร้างชั้นฟิล์มบางโพลีซิลิกอน ด้วยการสปัตเตอร์

- คาโรต : แผ่น Metal Poly Silicon
- บรรยากาศ : อาร์กอนบริสุทธิ์ flow 10 cc/min
- ความดัน : 6×10^{-2} mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำลัง RF : 80 W (Reflected 10 W)
 - Heat substrate : no heat, heat 200 °C
 - เวลา : 60, 90, 120 minute
- ได้ชั้นโพลีซิลิกอนมีสีเงิน และเป็นมันวาว

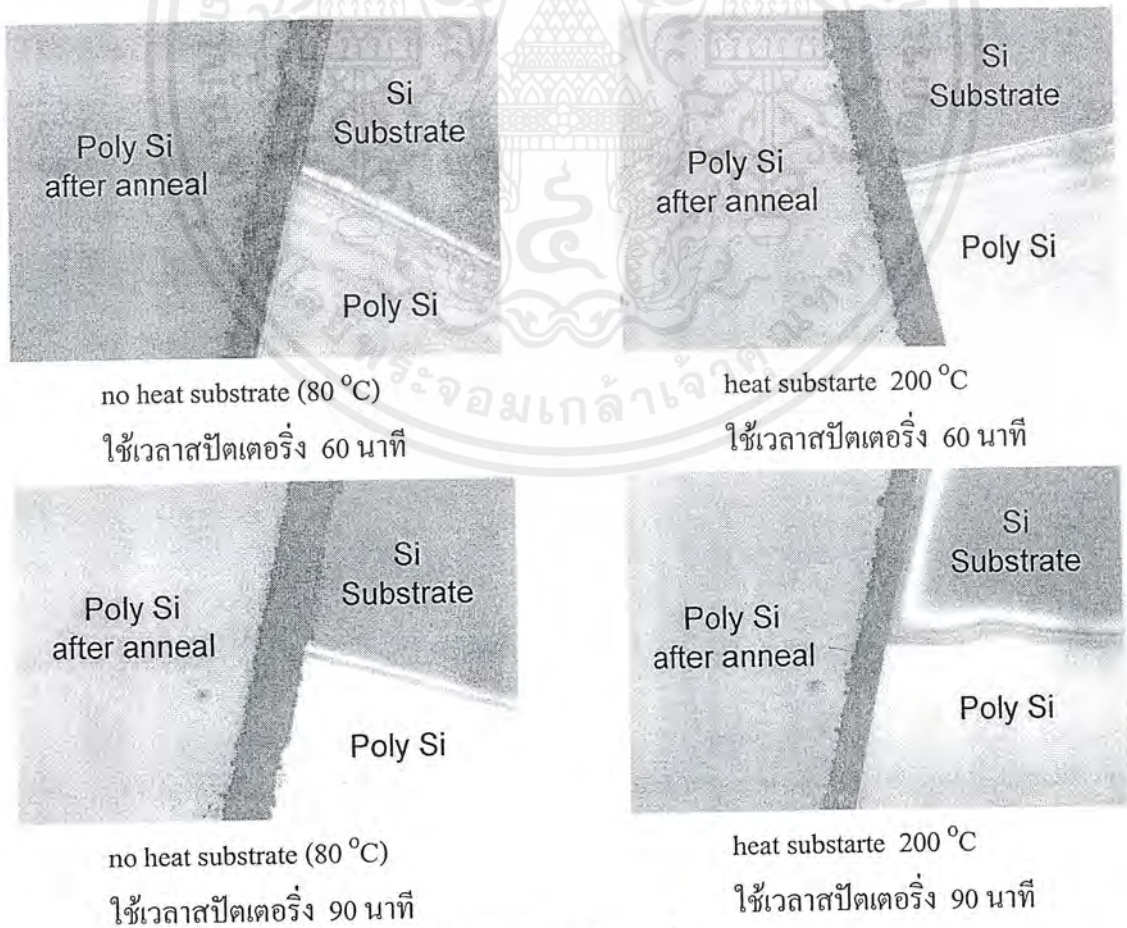
4) กระบวนการ Anneal (เพื่อให้ชั้นฟิล์มบางที่เกิดขึ้นเป็นผลึกที่สมบูรณ์)

- แก๊สไนโตรเจน flow 700 cc/min
- อุณหภูมิ 1000 °C
- เวลา 1 ชั่วโมง

ชั้นโพลีซิลิกอนมีการเปลี่ยนสีเป็นสีบรอนซ์ และยังเป็นมันวาว เช่นเดิม

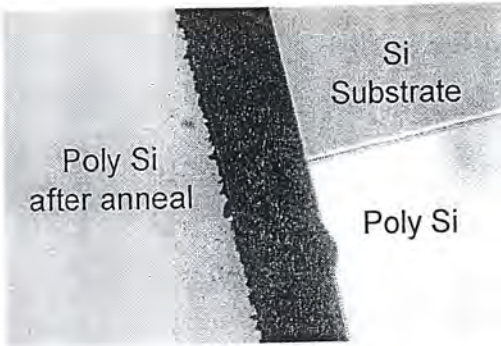
ผลการทดลอง

ชั้นของฟิล์มบางโพลีซิลิกอนที่ได้จากการทดลอง ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.9



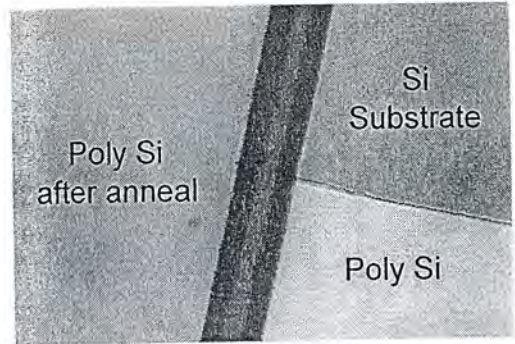
รูปที่ 5.9 ชั้นฟิล์มบางโพลีซิลิกอนที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



no heat substrate (80 °C)

ใช้เวลาสปีดเตอริง 120 นาที



heat substrate 200 °C

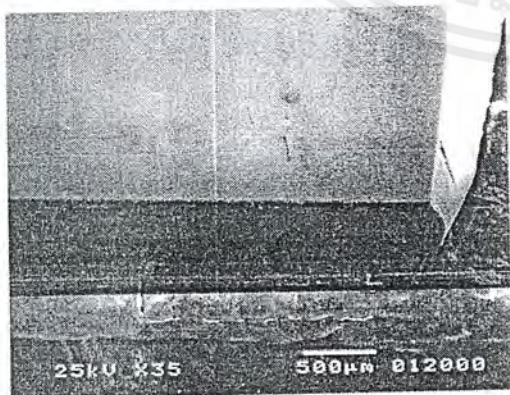
ใช้เวลาสปีดเตอริง 120 นาที

รูปที่ 5.9 ชั้นฟิล์มบางโพลีซิลิกอนที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

ฟิล์มบางโพลีซิลิกอนที่ได้จากการสปีดเตอริง มีลักษณะเป็นสีเงิน และเป็นมันวาว ความสม่ำเสมอของเนื้อฟิล์ม สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า จากแสงสะท้อนของหลอดฟลูออเรสเซนต์ พบว่าเนื้อฟิล์มที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ

การหาความหนาของฟิล์มบาง สามารถคำนวณได้จากภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์ม ซึ่งถ่ายจากกล้อง สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope : SEM) ซึ่งภาพถ่ายจากกล้อง SEM นี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.10

แต่ในการทดลองนี้ ผู้ทดลองยังไม่สามารถปรับอัตราขยายของกล้อง SEM ให้มีค่าสูงพอที่จะขยายภาพจนมองเห็นความหนาของฟิล์มได้ จึงไม่สามารถระบุความหนาของฟิล์ม และหาอัตราการเกิดฟิล์ม (Grow rate) ได้ แต่จากการสังเกตภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้อย่างคร่าวๆว่า เมื่อใช้เวลาในการสปีดเตอริงมากขึ้น ฟิล์มที่ได้ก็จะมีความหนาเพิ่มขึ้นด้วย



ก)

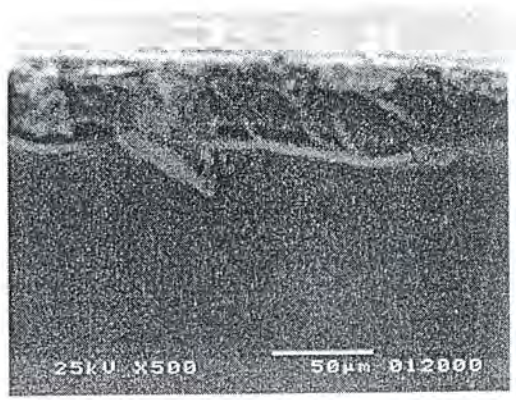


ข)

รูปที่ 5.10 ภาพภาคตัดขวางของฟิล์มบางโพลีซิลิกอน ที่ถ่ายจากกล้อง SEM

ที่อัตราขยาย ก) 35 เท่า ข) 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค)

รูปที่ 5.10 ภาพภาคตัดขวางของฟิล์มบางโพลีซิลิกอน ที่ถ่ายจากกล้อง SEM (ต่อ)
ที่อัตราขยาย ค) 500 เท่า

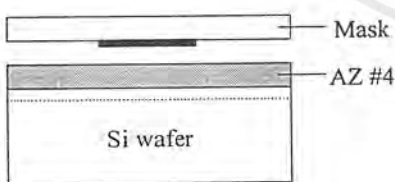
5.3.4 การทดลองสร้างลวดลายของชั้นฟิล์มบางโพลีซิลิกอน ด้วยวิธี Lift-off

วิธีการ Lift-off เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างลวดลายของชั้นสารใดๆ โดยไม่ต้องใช้การสกัด(Etching) ชั้นสารนั้นๆออก แต่มีข้อจำกัดคือ ชั้นสารนั้นๆจะต้องบางพอสมควรจึงจะใช้วิธีนี้ได้ ในการทดลองนี้จะทดลองใช้เทคนิค Lift-off เพื่อสร้างลวดลายของชั้นฟิล์มบางโพลีซิลิกอน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

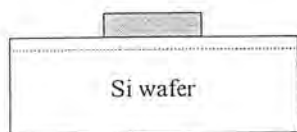
ขั้นตอนการทดลอง



1) เตรียมแผ่นซิลิกอน โดยสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนา 1000 Å

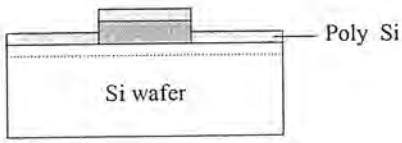


2) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดย
- น้ำยาไวแสง AZ #4
- Spin 4000 rpm
- เวลา 20 วินาที

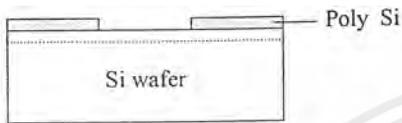


3) เมื่อผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จะได้แผ่นซิลิกอนที่มีฟิล์มไวแสงเคลือบอยู่โดยมีลวดลายเช่นเดียวกับมาสก์ที่ใช้

รูปที่ 5.11 ขั้นตอนการทดลองสร้างลวดลายชั้นฟิล์มบางของโพลีซิลิกอน ด้วยวิธี Lift-off
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- 4) ทำการสปีดเตอริงโดยมีเงื่อนไขดังนี้
- แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ flow 10 cc/min
 - ความดัน 6×10^{-2} mbar
 - กำลัง RF 80 W (Reflected 10 W)
 - เวลา 30 นาที

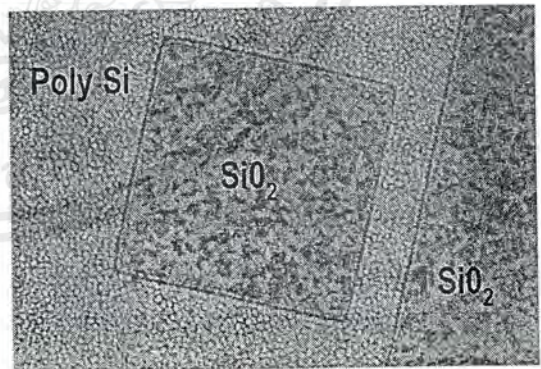
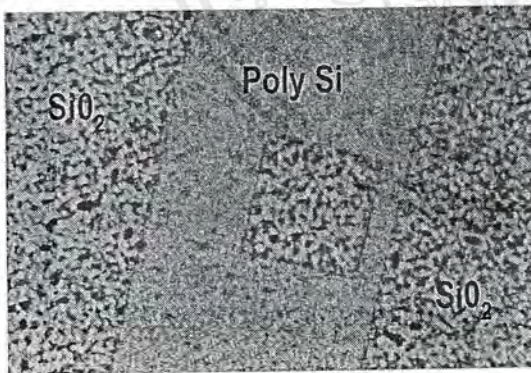


- 5) นำแผ่นซิลิกอนที่ได้จุ่มลงในสารละลายระหว่าง AZ #200 กับ น้ำ ในอัตราส่วน 1:1 ชั้นฟิล์มไวแสงที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนจะถูกละลายออก เหลือเพียงชั้นของฟิล์มบางโพลีซิลิกอนที่ได้จากการสปีดเตอริง ซึ่งจะมีลวดลายกลับกันกับลวดลายของมาสก์ที่ใช้

รูปที่ 5.11 ขั้นตอนการทดลองสร้างลวดลายชั้นฟิล์มบางของโพลีซิลิกอน ด้วยวิธี Lift-off (ต่อ)

ผลการทดลอง

ลวดลายของฟิล์มบางโพลีซิลิกอนที่ได้จากวิธีการ Lift-off นี้ มีความคมชัดพอสมควร ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ลวดลายของฟิล์มบางโพลีซิลิกอนที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

จากผลการทดลองสร้างตัวเก็บประจุแบบมอส และวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สถานะผิว ได้ค่าอยู่ระหว่าง 1.7×10^{11} ถึง 4.5×10^{11} ประจุต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่เกต หรือชนิดของแผ่นผลึกฐานรอง และหาค่าเฉลี่ยของค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สถานะผิวได้ประมาณ 2×10^{11} ประจุต่อตารางเซนติเมตร และได้นำไปใช้ในการคำนวณหาแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ จากนั้นได้นำค่าแรงดันขีดเริ่มที่ได้ ไปคำนวณหาความต้านทานในช่วงเชิงเส้น และค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัว เมื่อทำการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเกตเป็นอคูมินีเยม และวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าขึ้นมาเปรียบเทียบ ปรากฏดังนี้

ในส่วนของแรงดันขีดเริ่ม ของ nMOS มีความผิดพลาดประมาณ 0.2 V. หรือคิดเป็น 10% แต่ใน pMOS ผิดพลาดประมาณ 1.9 V. หรือประมาณ 82% ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น สภาพภายในห้องทดลองมีการเปลี่ยนแปลง, ความต้านทานของน้ำที่ใช้ในการทดลองเปลี่ยนแปลง และตัวผู้ทดลองยังขาดความชำนาญในการทดลอง

ในส่วนของค่าความต้านทานในช่วงเชิงเส้น ของ nMOS ผิดพลาดประมาณ 1k Ω ใน pMOS ผิดพลาดประมาณ 3 k Ω เท่าๆ กันที่ทุกค่าของอัตราส่วน W/L

ในส่วนของค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัว ของ nMOS ผิดพลาดประมาณ 20 mS ใน pMOS ผิดพลาดประมาณ 15 mS ทั้ง nMOS และ pMOS เมื่อ W/L มีค่ามากขึ้น ความผิดพลาดก็มากขึ้นด้วย

ในกรณีของมอสทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิกอนเกต เนื่องเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มบางของโพลีซิลิกอนคือ LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ยังติดตั้งไม่แล้วเสร็จ จึงทำการทดลองสร้างฟิล์มบางโพลีซิลิกอนด้วยวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering) เพื่อทดสอบลักษณะของฟิล์มบาง จากผลการทดลองพบว่าลักษณะของฟิล์มไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งแปลกปลอมเกิดขึ้นบนชั้นฟิล์ม ทั้งนี้เนื่องจากในระบบสปัตเตอริงที่ใช้ในห้องทดลอง ถูกใช้เพื่อสร้างชั้นฟิล์มบางของสารหลายชนิด จึงมีอะตอมของสารอื่นๆ ค้างอยู่ภายในระบบ ซึ่งถ้าทำการทดลองต่อไป ผลการทดลองที่ได้อาจไม่ถูกต้อง และจะทำให้สรุปผลการทดลองผิดพลาดได้ จึงสิ้นสุดการทดลองเพียงเท่านี้

ภาคผนวก

FUNDAMENTAL CONSTANT

Quantity	Symbol	Value
Avogadro constant	N_{AV}	6.0221×10^{23} /mol
Bohr radius	a_B	0.52917 Å
Boltzmann constant	k	1.3807×10^{-23} J/K 8.6174×10^{-5} eV/K
Electron rest mass	m_o	9.1094×10^{-31} kg
Elementary charge	q	1.6022×10^{-19} C
Gas constant	R_o	8.3145 J/K-mol
Magnetic flux quantum ($h/2q$)	ϕ_o	2.0678×10^{-15} Wb
Permeability of vacuum	μ_o	1.2566×10^{-8} H/cm
Permittivity of vacuum	ϵ_o	8.8542×10^{-14} F/cm
Planck constant	h	6.6261×10^{-34} J-s 4.1357×10^{-15} eV-s
Proton rest mass	m_p	1.6726×10^{-27} kg
Reduced Planck constant ($h/2\pi$)		1.0546×10^{-34} J-s 6.5821×10^{-16} eV-s
Speed of light in vacuum	c	2.9979×10^{10} cm/s
Thermal potential (kT/q) at 300 K	ϕ_T	0.025852 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ผศ. สมเกียรติ สุภเดช, “ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ”, สำนักพิมพ์วารสารอิเล็กทรอนิกส์ เวิลด์, พ.ศ. 2525
2. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”, พิมพ์ครั้งที่ 6 พ.ศ. 2536
3. Dewitt G. Ong, “Modern MOS Technology”, McGraw Hill, Inc., 1976
4. Oliver J. McCarthy, “MOS Device and Circuit Design”, John Wiley & Sons, 1983
5. S.M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, John Wiley & Sons, 1969



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์และเจ้าหน้าที่ใน ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และคุณวีระ เพ็งจันทร์ ที่คอยให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ จนการปฏิบัติงานลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขออภัยทุกๆท่านที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในทุกสิ่งทุกอย่าง ซึ่งไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด ขอขอบคุณทุกๆท่าน เป็นอย่างสูง ไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกๆ กิจกรรมของ ข้าพเจ้า ด้วยดีตลอดมา



เกียรติโรจน์ ต้นติมาลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้