

มอสฮอลล์เพลท
MOS HALL PLATES



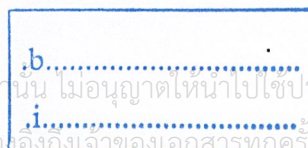
ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....

ปีการศึกษา 2545

เลขทะเบียน..... 50390

วัน,เดือน,ปี 13 พ.ค. 2547



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอศฮอลล์เพลท
MOS HALL PLATES



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสฮอลล์เพลท

MOS HALL PLATES

นายชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ รหัส 43015255

นายอัครเดช เข้มคลี รหัส 43015292

โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมที่จะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง มอสฮอลล์เพลท

MOS HALL PLATES

ผู้จัดทำ

1. นายชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ 43015255
2. นายอักรเดช แยมคลี 43015292



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสฮอลล์เพลท

นายชนะ ธิภัทรพงศ์พันธ์

นายอัครเดช เข้มคลี

ผศ.ดร.เดิมีพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้จะทำการสร้างมอสทรานซิสเตอร์โดยใช้หลักการของฮอลล์เพื่อทำให้มอสทรานซิสเตอร์นี้สามารถใช้งานเป็น แมกเนติกเซ็นเซอร์ โดยลักษณะของมอสทรานซิสเตอร์นี้จะมีขั้วเพิ่มขึ้นมาคือ นอกเหนือจากขั้วซอส ขั้วเดรน และขั้วเกต แล้วนั้น จะมีขั้วที่เป็นขั้วเซ็นเซอร์เพื่อใช้วัดแรงดันไฟฟ้าอีก 2 ขั้ว ซึ่งเมื่อเราทราบค่าแรงดันไฟฟ้านี้เราสามารถที่จะหาค่าสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งจากลักษณะโครงสร้างมอสที่เราจะสร้างจะเป็นแบบเซนแนลพี แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด โดยใช้ฐานรอง เป็นแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOS HALL PLATES

Mr.Chana Leepattarapongpan

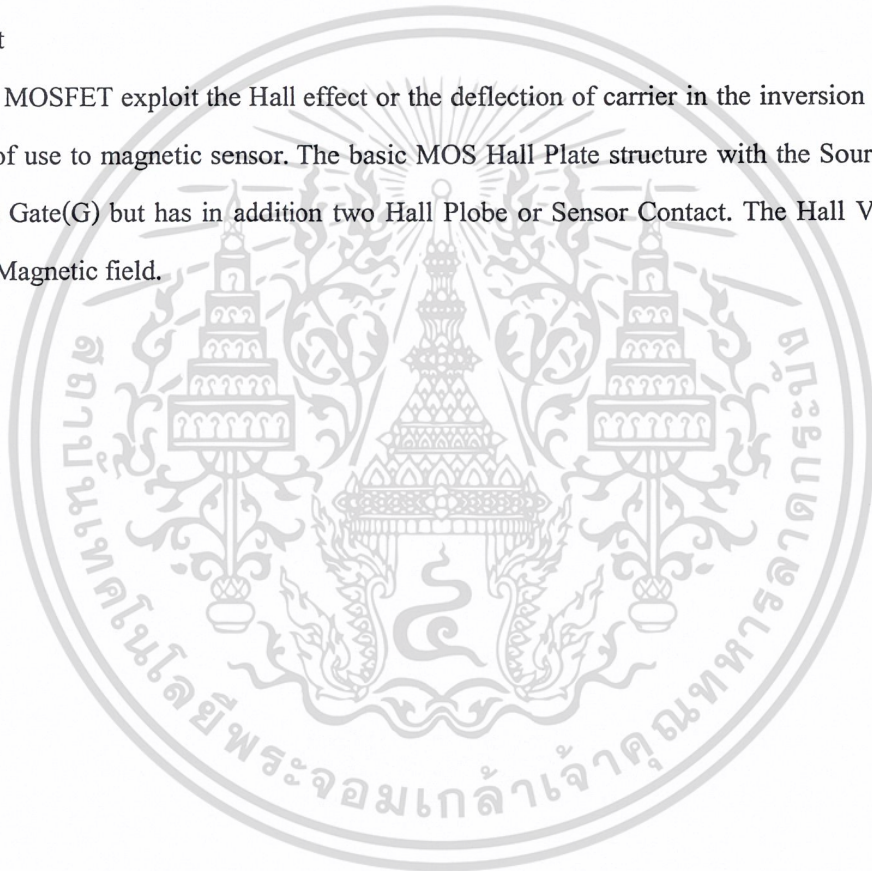
Mr.Akkradej Yamklee

Dr.Termpong Phetchakul Advisor

Education Year 2002

Abstract

MOSFET exploit the Hall effect or the deflection of carrier in the inversion layer. These device of use to magnetic sensor. The basic MOS Hall Plate structure with the Source(S), Drain (D) and Gate(G) but has in addition two Hall Plobe or Sensor Contact. The Hall Voltage to be related Magnetic field.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.2.1 ออกแบบอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท	1
1.2.2 ทำการสร้างอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท	2
1.2.3 การวัดผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 มอสเฟทพื้นฐาน	3
2.1.1 มอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล (n-ch MOSFET)	4
2.1.2 มอสเฟทชนิดพีแชนแนล (p-ch MOSFET)	4
2.2 มอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	6
2.2.1 การทำงานของมอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	7
2.3 มอสเฟทแบบดีพลีชันโหมด	11
2.3.1 การทำงานของมอสเฟทแบบดีพลีชันโหมด	11
2.4 หลักการพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์	13
2.5 แฟคเตอร์ G	18
2.6 มอสฮอลล์เฟลท	20
2.7 เทคโนโลยีการสร้าง	23
2.7.1 กระบวนการออกซิเดชัน	23
2.7.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)	23
2.7.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2	เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี	24
2.7.2.1	การเตรียมต้นแบบของภาพลวดลาย	24
2.7.2.2	การถ่ายภาพย่อส่วน	25
2.7.2.3	การสร้างภาพลวดลาย (Pattern Generation)	26
2.7.2.4	ชนิดของโฟโตมาสก์	27
2.7.2.5	การเคลือบน้ำยาไวแสงบนผลึก	28
2.7.2.5.1	การเตรียมผิวหน้าแผ่นผลึก	28
2.7.2.5.2	วิธีการเคลือบ	29
2.7.2.5.3	การอบขึ้น Prebake หรือ Softbake	30
2.7.2.5.4	เครื่องเคลือบน้ำยาไวแสงแบบ Spin Coater	
	ชนิดอัตโนมัติ	31
2.7.2.6	การปรับซ็อนมาสก์ และการฉายแสง (Mask Alignment and Exposure)	33
2.7.2.6.1	การปรับซ็อนมาสก์	33
2.7.2.6.2	การฉายแสง (Exposure)	34
2.7.2.7	การล้างน้ำยาไวแสง (Resist Development)	35
2.7.3	การเอตซิ่ง (Etching)	35
2.7.4	เทคนิคการแพร่สารเจือ	36
2.7.4.1	การแพร่สารเจือชนิดพี	36
2.7.4.2	การแพร่สารเจือชนิดเอ็น	38
2.7.5	กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process)	38
2.7.6	กระบวนการ CVD (Chemical Vapor Deposition)	39
2.7.6.1	ชั้นของ SiO ₂ ด้วยกระบวนการ CVD	40
2.7.7	กระบวนการเก็บบรรจุวงจรรวม (ICs Assembly Processing)	41
2.8	คุณสมบัติต่างๆ ไปของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์	42
บทที่ 3	การออกแบบ และกระบวนการสร้าง	45
3.1	การออกแบบ	45
3.2	การตัดมาสก์ และถ่ายมาสก์	50
3.3	กระบวนการสร้างมอสฟิทรานซิสเตอร์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การวัด และการทดลอง	64
4.1 การวัดรอยต่อพี-เอ็น ในมอสซอลล์เฟลท	64
4.2 การวัด I-V Characteristics	68
4.3 การวัดหาค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T)	70
4.4 การวัดแรงดันซอลล์ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก	71
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	76
5.1 ค่าออฟเซต (Off Set)	76
5.2 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)	77
5.3 ความไว (Sensitivity)	77
บทที่ 6 สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง	79
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	81
ภาคผนวก ข สัญลักษณ์	85
ภาคผนวก ค กระบวนการสร้างมอสซอลล์เฟลท	86
กิตติกรรมประกาศ	96
หนังสืออ้างอิง	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 1.1 รูปร่างอุปกรณ์มอสซอลด์เฟลท	2
รูป 2.1 ชนิดของมอสเฟท	3
รูป 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของมอสเฟท และภาพ top view	3
รูป 2.3 (ก) มอสเฟทเกตโลหะชนิดเอ็นแชนแนล (ข) มอสเฟทเกตซิลิคอนชนิดเอ็นแชนแนล	4
รูป 2.4 (ก) มอสเฟทเกตโลหะชนิดพีแชนแนล (ข) มอสเฟทเกตซิลิคอนชนิดพีแชนแนล	5
รูป 2.5 (ก) สัญลักษณ์ของเอ็นมอสเฟทแบบต่างๆ (ข) สัญลักษณ์ของพีมอสเฟทแบบต่างๆ	5
รูป 2.6 โครงสร้างของมอสเฟทแชนแนลเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	6
รูป 2.7 การทำงานของมอสเฟทแชนแนลเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	8
รูป 2.8 คุณลักษณะ I_D-V_{DS} ในอุดมคติของมอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	9
รูป 2.9 โครงสร้างของมอสเฟทแชนแนลเอ็นแบบดีฟลิชั่น โหมด	11
รูป 2.10 การทำงานของมอสเฟทแชนแนลเอ็นแบบดีฟลิชั่น โหมด	12
รูป 2.11 คุณลักษณะ I_D-V_{DS} ในอุดมคติของมอสเฟทแบบดีฟลิชั่น โหมด	12
รูป 2.12 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	13
รูป 2.13 รูปร่างซอลด์เฟลท รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	18
รูป 2.14 ลักษณะ โครงสร้างของมอสซอลด์เฟลท	20
รูป 2.15 ความหนา d สามารถปรับได้	22
รูป 2.16 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของ Ideal sensor	43
รูป 2.17 ซีสเตอร์รี่ซิส	44
รูป 3.1 ลวดลายต้นแบบที่ทำการออกแบบ	46
รูป 3.2 ลวดลายต้นแบบที่ทำการออกแบบที่ค่า W และค่า L ต่างๆ	49
รูป 3.3 รูปร่างของมาสก์แต่ละมาสก์หลังการตัด	52
รูป 3.4 กระงก Mask ที่ในการออกแบบมอสซอลด์เฟลท	53
รูป 3.5 การเตรียมแผ่นซิลิคอน	54
รูป 3.6 การสร้างชั้นออกไซด์	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 3.7 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงานขณะทำการฉายแสงผ่าน โฟโตมาสค์ 1	55
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงานหลังทำการฉายแสง และ Develop แล้ว	
รูป 3.8 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อชั้นงานผ่านการสกัด SiO ₂	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อชั้นงานผ่านการลอกชั้นฟิล์มแล้ว	56
รูป 3.9 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อชั้นงานผ่านกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อชั้นงานผ่านกระบวนการ Oxidation อีกครั้งหนึ่ง	57
รูป 3.10 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงาน ขณะทำการฉายแสงผ่าน โฟโตมาสค์ 2	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงาน หลังทำการ Develop แล้ว	57
รูป 3.11 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อชั้นงานผ่านการสกัด SiO ₂	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อชั้นงานผ่านการลอกฟิล์มแล้ว	58
รูป 3.12 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อชั้นงานผ่านกระบวนการแพร่สารเจือโบรอน	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อชั้นงานผ่านกระบวนการ Oxidation	59
รูป 3.13 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงานขณะทำการฉายแสงผ่าน โฟโตมาสค์ 3	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงานขณะทำการฉายแสง และ Develop แล้ว	59
รูป 3.14 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงานขณะผ่านกระบวนการ Oxidation Etching	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อทำการลอกฟิล์มแล้วทำการสร้าง SiO ₂ ที่บางมากเพื่อเป็นส่วนเกต	60
รูป 3.15 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงาน ขณะทำการฉายแสงผ่าน โฟโตมาสค์ 4	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อทำการ Develop แล้ว	61
รูป 3.16 ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อทำการ Oxide Etching และลอกฟิล์มออกแล้ว	61
รูป 3.17 ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อทำการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมแล้ว	61
รูป 3.18 (ก) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อทำการฉายแสงผ่าน โฟโตมาสค์ 5	
(ข) ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อทำการ Develop แล้ว	62
รูป 3.19 ภาพตัดขวางของชั้นงาน เมื่อทำการสกัดชั้นอะลูมิเนียม และทำการลอกฟิล์มแล้ว	62
รูป 3.20 ภาพด้านข้างของชั้นงาน ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	63
รูป 3.21 อุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท	63
รูป 4.1 กราฟแสดงรอยต่อระหว่างขาต่างๆ ในมอสฮอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 4$	65
รูป 4.2 กราฟแสดงรอยต่อระหว่างขาต่างๆ ในมอสฮอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 6$	67

เอกสารรูป 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ $I_D - V_{DS}$ ในมอสฮอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 4$ โดยขนาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ I_D - V_{DS} ในมอสซอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 6$	69
รูป 4.5	กราฟแสดงค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ในมอสซอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 4$	70
รูป 4.6	กราฟแสดงค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ในมอสซอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 6$	70
รูป 4.7	การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันซอลล์	71
รูป 4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันซอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -8$ V ที่ $\frac{L}{W} = 4$	72
รูป 4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันซอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -9$ V ที่ $\frac{L}{W} = 4$	72
รูป 4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันซอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -10$ V ที่ $\frac{L}{W} = 4$	73
รูป 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันซอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -7$ V ที่ $\frac{L}{W} = 6$	74
รูป 4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันซอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -8$ V ที่ $\frac{L}{W} = 6$	74
รูป 4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันซอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -9$ V ที่ $\frac{L}{W} = 6$	75
รูป ก1	กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันซอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -8$ V	81
รูป ก2	กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันซอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -9$ V	82
รูป ก3	กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันซอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -10$ V	82
รูป ก4	กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันซอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -7$ V	83
รูป ก5	กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันซอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -8$ V	84
รูป ก6	กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันซอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -9$ V	84
รูป ค1	ไมโครคัตเตอร์	92
รูป ค2	ถ่ายย่ส่วน (กระจกมาสก์)	92
รูป ค3	กล้องส่องจุพื้นผิว	92
รูป ค4	เครื่องวัดค่า Resistivity	93
รูป ค5	เตา Oxidation และเตา Sintering	93
รูป ค6	เครื่องวัดความหนาออกไซด์	93
รูป ค7	เครื่อง Aliner	94
รูป ค8	เครื่อง Evaporator	94
รูป ค9	เครื่องมือตัดแผ่นซิลิคอน	94
รูป ค10	เครื่องวัดหา I-V Characteristic	95
รูป ค11	เครื่องปล่อยสนามแม่เหล็ก	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 แสดงค่าของระดับความสะอาดของห้องสะอาด (Clean Room)	29
ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างของช่วงเวลาและลำดับขั้นตอน ในกระบวนการเคลือบสารไวแสง	32
ตาราง 5.1 ค่าออฟเซ็ทของมอสฮอลล์เฟลท แต่ละตัวที่ค่าแรงดัน V_{GS} , V_{DS} ค่าต่างๆ	76
ตาราง 5.2 ค่า Sensitivity ของมอสฮอลล์เฟลทแต่ละตัวที่ค่าสนามแม่เหล็ก 4,500 Gauss	78
ตาราง 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลทที่ออกแบบไว้	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

อุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์ (Magnetic Sensor Device) จะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า อุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์ ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จะใช้ประโยชน์จากการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์กัลวานอแมกเนติก” (Galvanomagnetic Effects) อันเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านวัสดุ เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก หรือเรียกว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์” (Hall Effect) สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุพาหะเรียกว่า “แรงลอเรนซ์” (Lorentz Force) ผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electric Field) ที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และทิศทางของกระแส

ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทำให้เกิดการแข่งขันทางด้านการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากมาย โดยขึ้นอยู่กับราคา การประยุกต์ใช้งาน และขนาดของอุปกรณ์ เกิดเป็นอุปกรณ์ตัวใหม่ๆ ขึ้นมา เพื่อความสะดวกแก่การประยุกต์ใช้งาน

อุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall Sensor Device) ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยใช้โครงสร้างของมอสเฟต (MOSFET) มีชื่อเรียกว่า “ฮอลล์แมกเนติกเซ็นเซอร์ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์” (Hall MAGFET) หรืออาจเรียกว่า “มอสฮอลล์เพลท” (MOS Hall Plate) ภายในจะประกอบด้วย 5 ขั้ว โดยมีขั้ว 2 ขั้ว เรียกว่า “เซ็นเซอร์คอนแทค” (Sensor Contact:SC) โดยอีก 3 ขั้ว จะประกอบด้วยขั้วซอส (Source:S), ขั้วเดรน (Drain:D) และขั้วเกต (Gate:G)

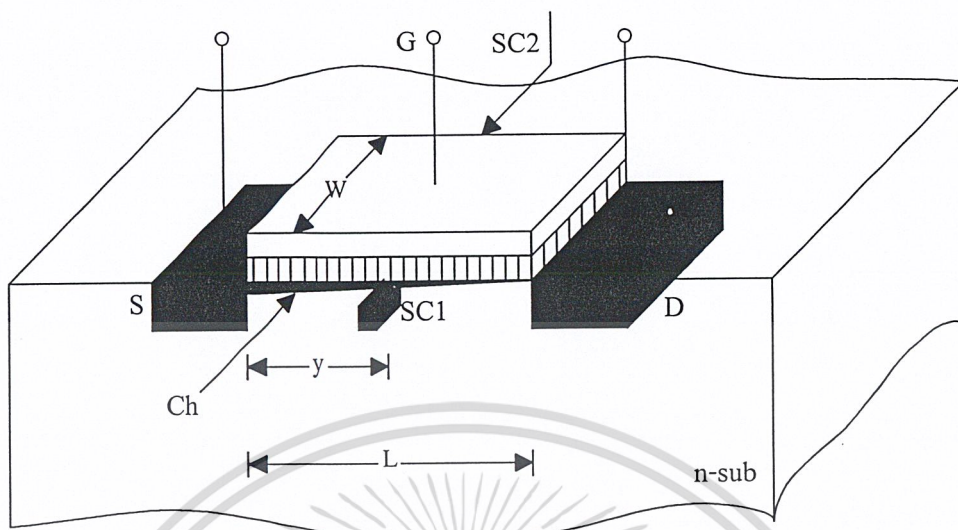
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาการประยุกต์ มอสเฟต นำมาทำเป็นอุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ และศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage)

1.2 ขอบเขตของโครงการ

1.2.1 ออกแบบอุปกรณ์มอสฮอลล์เพลท

ทำการออกแบบอุปกรณ์มอสฮอลล์เพลท ให้มีรูปร่างลักษณะรูปร่างดังแสดงในรูป 1.1 โดยเอกสารนี้ค่าความกว้าง (W) มีค่าเท่ากันหมด แต่ค่าความยาว (L) ของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน เพื่อทำการทดสอบว่าโครงสร้างของอุปกรณ์มีผลต่อแรงดันฮอลล์ที่วัดได้อย่างไร



รูป 1.1 รูปร่างอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท

1.2.2 ทำการสร้างอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท

ในการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ โดยใช้โครงสร้างมอสเฟท นั้นจะใช้กระบวนการสร้าง โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างของวงจรรวม (Integrate Circuit) คือ วิธี Oxidation, Photolithography, CVD ฯลฯ เพื่อทำการสร้างเป็นอุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ โดยอาศัยโครงสร้างมอสเฟท

1.2.3 การวัดผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์

โดยทำการป้อนกระแส และสนามแม่เหล็กให้กับอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท ที่ค่าต่างๆ กัน แล้วจากนั้นทำการวัดค่าแรงดันฮอลล์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. เข้าใจการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์
2. เข้าใจถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท
3. สามารถอธิบายผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์
4. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานได้

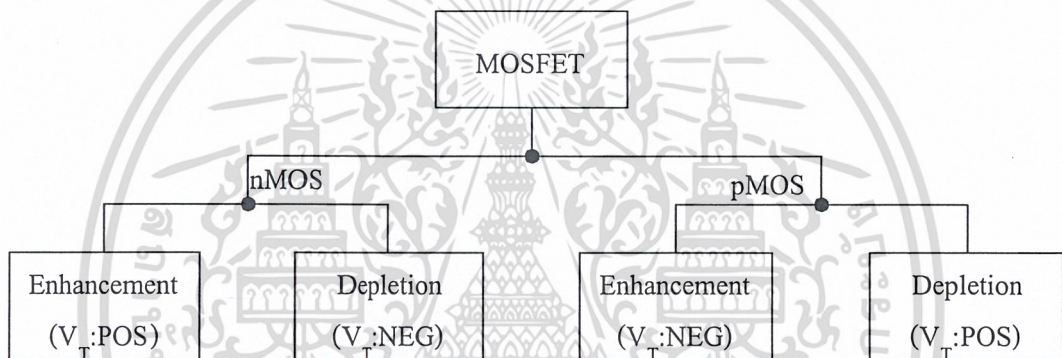
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

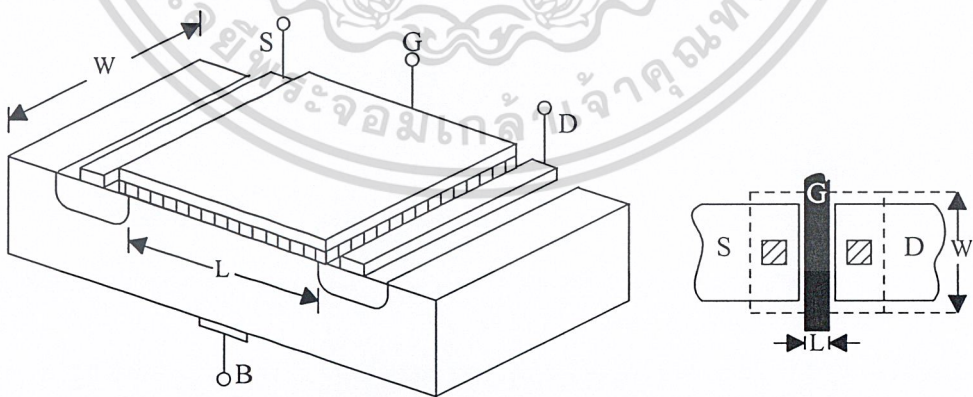
ทฤษฎี

2.1 มอสเฟตพื้นฐาน

มอสเฟตสามารถจัดแบ่งตามชนิดของกระแสที่ไหลภายใน ได้เป็น 2 ชนิด คือ เอ็นเซนแนล (n-channel) และพีเซนแนล (p-channel) ซึ่งทั้งเอ็นเซนแนล และพีเซนแนล ยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (Enhancement mode Transistor) และแบบดีพลิซันโหมด (Depletion mode Transistor) ดังรูป 2.1



รูป 2.1 ชนิดของมอสเฟต



รูป 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของมอสเฟต และภาพ top view

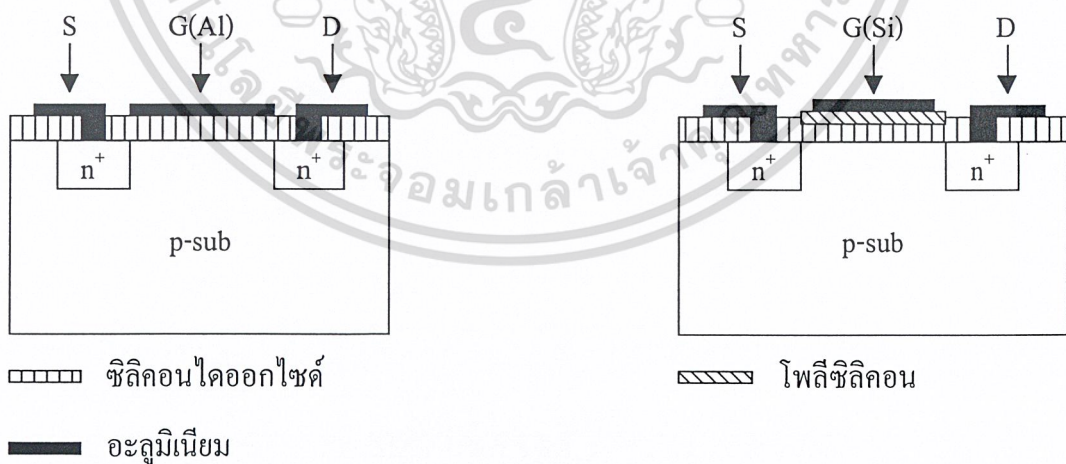
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 มอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล (n-ch MOSFET)

มักนิยมเขียนย่อๆ NMOS และนิยมเรียกสั้นๆ ว่า เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างดังรูป 2.3 โดยที่ส่วนซอส (Source) และเดรน (Drain) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ซึ่งถูกสร้างขึ้นบนฐานรอง (Substrate) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ระหว่างส่วนซอส และเดรน จะเป็นโครงสร้างมอส (MOS) ซึ่งย่อมาจาก (Metal Oxide Semiconductor) กั้นอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปชั้นโลหะอาจเป็นอะลูมิเนียม (Aluminum) ซึ่งอยู่บนชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) จะทำหน้าที่เป็นส่วนเกท (Gate) หรือบางครั้งส่วนเกทอาจเป็นชั้นผลึกหลายรูป (Poly Crystal) ของซิลิคอน (Silicon) ก็ได้ โดยเฉพาะโครงสร้างของวงจรรวมขนาดใหญ่ (VLSI) มักจะเป็นแบบที่มีเกทเป็นชั้นโพลีซิลิคอน (Poly Silicon) กระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์ (Transistor) แบบนี้เป็นกระแสที่เกิดจาก อิเล็กตรอนอิสระ (e) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ

2.1.2 มอสเฟทชนิดพีแชนแนล (p-ch MOSFET)

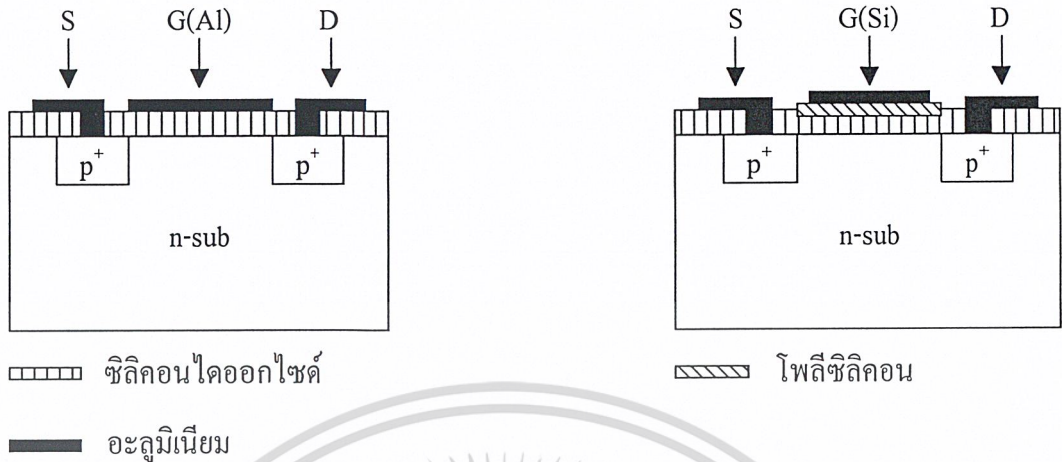
มักนิยมเขียนย่อๆ ว่า PMOS และนิยมเรียกสั้นๆ ว่า พีมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างดังรูป 2.4 โดยที่ส่วนซอส และเดรน เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งถูกสร้างขึ้นบนฐานรอง ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และมีโครงสร้างมอส เป็นส่วนเกทอยู่ระหว่างส่วนซอส และเดรน กระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์แบบนี้เป็นกระแสที่เกิดจาก โฮล (h) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก



รูป 2.3 (ก) มอสเฟทเกตโลหะชนิดเอ็นแชนแนล

(ข) มอสเฟทเกตซิลิคอนชนิดเอ็นแชนแนล

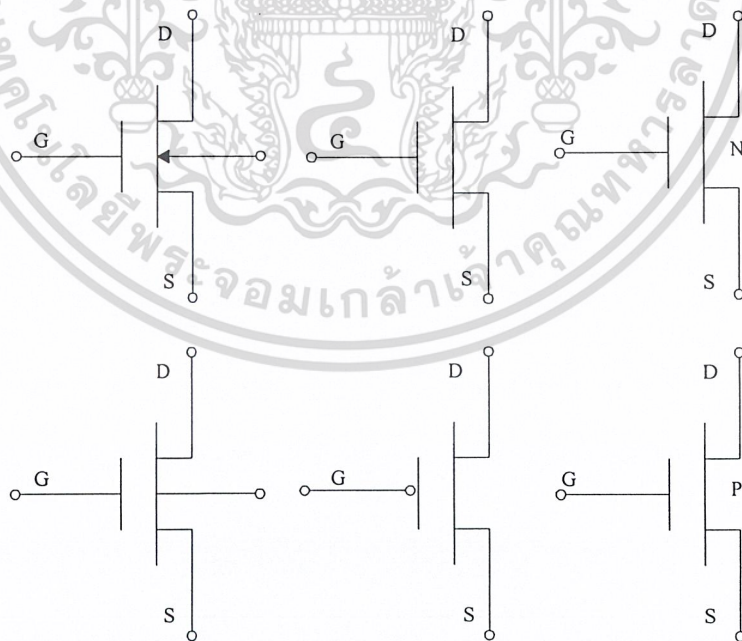
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.4 (ก) มอสเฟตเกทโโลหะชนิดพีแชนแนล

(ข) มอสเฟตเกทซิลิคอนชนิดพีแชนแนล

สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล และชนิดพีแชนแนล สามารถเขียนได้หลายลักษณะดังรูป 2.5



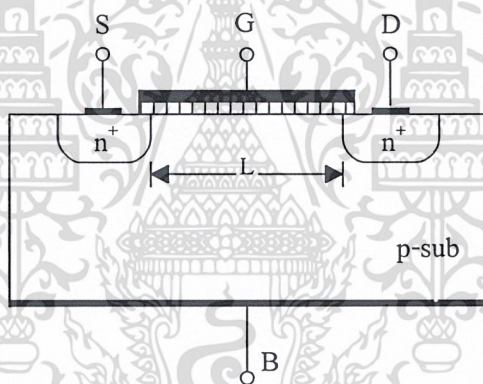
รูป 2.5 (ก) สัญลักษณ์ของเอ็นมอสเฟตแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (ข) สัญลักษณ์ของพีมอสเฟตแบบต่างๆ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรายังสามารถจัดแบ่งมอสเฟต ตามลักษณะการทำงานได้ 2 แบบ คือ แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ โหมด และแบบดีฟลิชั่น โหมด

2.2 มอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

มอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ซึ่งเป็นชนิดเอ็นแชนแนลจะมีลักษณะโครงสร้าง กล่าวคือ ส่วนซอส และเดรน จะถูกสร้างขึ้น โดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็น ซึ่งมีความหนาแน่นสูง เข้าไปในแผ่นผลึกฐานรองของสารกึ่งตัวนำชนิดพี รอบๆ ส่วนของซอส และเดรน จะมีลักษณะเป็นรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) ซึ่งในย่านดังกล่าวนี้เรียกว่า ย่านปลอดพาหะ (Depletion region) ส่วนเกตประกอบด้วยชั้นของพอลิซิลิคอน ซึ่งซ่อนอยู่เหนือชั้นออกไซด์ โดยมีโลหะอะลูมิเนียมเป็นขั้วต่อไฟฟ้าของส่วนเกตจากพอลิซิลิคอน และเป็นขั้วไฟฟ้าของทั้งซอส และเดรนด้วย



รูป 2.6 โครงสร้างของมอสเฟตแชนแนลเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

จากโครงสร้างดังกล่าวส่วนซอส และเดรนจะถูกแยกจากกันด้วยไดโอด (Diode) สองตัว และในขณะที่ไม่มีความดันไบอัสระหว่างเกต และซอส ช่องทางเดินกระแสจะไม่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ทรานซิสเตอร์จะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่าน ซึ่งเงื่อนไขนี้ก็คือ

$$V_D = V_S = V_{GS} = 0$$

V_D : แรงดันที่เดรน

V_S : แรงดันที่ซอส

V_{GS} : แรงดันระหว่างเกต และซอส

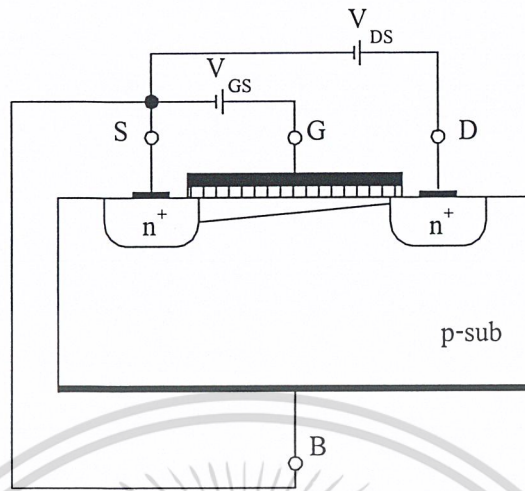
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าเกตถูกให้แรงดันไบอัสบวกที่เหมาะสม จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างเกตและฐานรอง และจะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุลบ ขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและฉนวนออกไซด์ ประจุลบดังกล่าวจะสะสมอยู่ในส่วนของสารกึ่งตัวนำ และกระจายจากซอสไปถึงเดรน ทำให้บริเวณดังกล่าวมีสภาพเปลี่ยนจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี ไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสระหว่างซอส และเดรน ซึ่งเรียกว่า “เอ็นแชนแนล” กระแสนี้เองเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ ทรานซิสเตอร์แบบนี้บางครั้งถูกเรียกว่า Induced channel MOSFET เนื่องจากแชนแนลเกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่เกต นอกจากนี้ถ้าแรงดันไบอัสระหว่างเกต และซอส V_{GS} มีค่ามากขึ้นก็จะมีกรเหนี่ยวนำประจุมากขึ้น มีผลทำให้ขนาดของแชนแนลกว้างขึ้น กระแสก็จะไหลได้มากขึ้น

2.2.1 การทำงานของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

เพื่อที่จะทำให้เข้าใจกลไกของการทำงานของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมดได้ดียิ่งขึ้น เราจะพิจารณาการทำงานในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน 3 เงื่อนไข อย่างไรก็ตามก็สิ่งสำคัญที่ต้องจำไว้เสมอก็คือ แชนแนลจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ต้องมีแรงดันไบอัสระหว่างเกตกับซอสที่เหมาะสมค่าหนึ่งเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนล แรงดันค่าต่ำสุดซึ่งจะทำให้เกิดแชนแนล ได้ถูกนิยามว่าเป็น “แรงดันขีดเริ่ม” (Threshold voltage) เขียนย่อๆ ว่า V_T การทำงานของทรานซิสเตอร์อาจแบ่งได้ดังนี้คือ เมื่อ V_{DS} มีค่าอยู่ในช่วง $0 = V_{GS} - V_T$ หรือ $(V_{GS} > V_T)$ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ขณะที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = 0V$ ซึ่งขณะนี้แชนแนลถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น แต่ไม่มีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์เนื่องจากแรงดันระหว่างซอส-เดรน (V_{DS}) มีค่าเป็นศูนย์โวลต์ และเมื่อให้แรงดันไบอัสระหว่างซอส-เดรน มีค่า ๆ หนึ่ง จะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านแชนแนลได้ ดังนั้นจึงเกิดแรงดันตกคร่อมแชนแนลมีค่า $= IR = V_{DS}$ ดังนั้นจะทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างเกต และแชนแนลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ ตลอดแชนแนล และจะพบว่าแรงดันระหว่างเกต และแชนแนลจะมีค่าสูงสุด $= V_{GS}$ ที่ตำแหน่งจุดปลายทางด้านซอส และเนื่องจากแรงดันเกตประสิทธิผล ซึ่งทำให้เกิดแชนแนลก็คือ $V_G = V_{GS} - V_T$ (เมื่อ $V_{GS} < V_T$ กระแสจะไม่ไหล และไม่มีแชนแนลเกิดขึ้น) และเพื่อที่จะทำให้แชนแนลเกิดขึ้นได้เป็นแนวยาว ไปจนถึงจุดปลายด้านเดรน แรงดันเกตประสิทธิผลจะต้องมีค่ามากกว่าแรงดันเดรน-ซอส นั่นคือ $V_G \geq V_{DS}$ (นั่นก็คือ แรงดันที่เกตเมื่อเทียบกับทุกจุดบนแนวแชนแนล จะต้องมีศักย์เป็นบวกจึงจะทำให้เกิดแชนแนล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

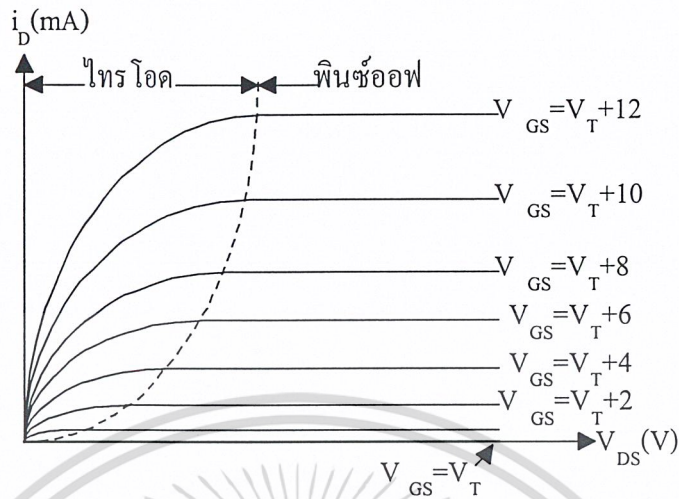


รูป 2.7 การทำงานของมอสเฟตเซนแนลเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

ซึ่งในขณะนี้ทรานซิสเตอร์ทำงานและอยู่ในภาวะไม่อิ่มตัว กระแสเดรน (I_D) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS}) การทำงานของทรานซิสเตอร์ในย่านนี้เรียกว่า ย่านไม่อิ่มตัว (Non-Saturated region) เมื่อแรงดันเดรน-ซอส มีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่า $V_{DS} = V_{GS} = V_T$ ทรานซิสเตอร์เริ่มเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว

และเมื่อค่าของแรงดันเดรน-ซอส เพิ่มขึ้นไปอีกกระทั่งมีค่า $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ ในกรณีนี้แรงดัน (IR) ที่ตกคร่อมเซนแนลที่ปลายด้านเดรนจะมีค่าสูงกว่า $V_{GS} - V_T$ ดังนั้นจะทำให้เกิดภาวะพินช์ออฟ (Pinch off) กล่าวคือ เซนแนลซึ่งเป็นช่องทางเดินกระแสจะขาดออก เริ่มจากบริเวณด้านเดรน ทั้งนี้เนื่องจากไม่สนามไฟฟ้าซึ่งจะมาเหนี่ยวนำให้มีการสะสมของประจุลบเพื่อทำหน้าที่เป็นเซนแนล ดังนั้นช่องทางเดินกระแสจึงขาดออกจากกัน ซึ่งเราเรียกว่า ภาวะพินช์ออฟ ในกรณีนี้จะมีกระแสแพร่ (Diffusion current) จากส่วนซอสไปยังเดรน ช่องทางเดินกระแสจะแสดงคุณสมบัติความต้านทานสูง และคล้ายกับเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) กระแสเดรนในภาวะนี้จึงมีค่าคงที่ แม้ว่า V_{DS} จะมีค่าเพิ่มขึ้น การทำงานของทรานซิสเตอร์ในย่านนี้เรียกว่าย่านอิ่มตัว (Saturated region) สำหรับกรณีที่ V_{GS} มีค่าน้อยกว่า V_T กระแสเดรนจะไม่ไหล เนื่องจากไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดเซนแนล โดยปกติมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ค่า V_T จะมีค่าราว $V_T = +1$ โวลต์ สำหรับค่า $V_{DD} = 5$ โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.8 คุณลักษณะ I_D - V_{DS} ในอุดมคติของมอดเฟตแบบเอ็นชานซ์เมนต์โหมด

จากรูป 2.8 จะเห็นว่าการทำงานแบ่งออกได้สองบริเวณ คือ บริเวณไทรโอด และพินช์ออฟ
การทำงานในบริเวณไทรโอด เมื่อ

$$V_{GS} \geq V_T \quad (1)$$

และ $V_{GD} > V_T$ หรือ $V_{DG} < -V_T$ (2)

หรือ $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ (3)

คุณลักษณะ I_D - V_{DS} ในบริเวณไทรโอด อธิบายได้ด้วยสมการ

$$I_D = K \cdot [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (4)$$

ค่าคงที่ K คือ

$$K = \frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{W}{L} \right) \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ μ_n คือ ความเคลื่อนที่ได้ (Mobility) ของอิเล็กตรอนในแซนแนลเหนี่ยวนำเอ็น
 C_{ox} คือ ความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของตัวเก็บประจุระหว่างเกต และแซนแนล
 L คือ ความยาวของแซนแนล
 W คือ ความกว้างของแซนแนล

การทำงานบริเวณอิมิตัว เนื่องจากกระแสเดรนไหลคงที่ที่ค่า V_{GS} ใดๆ ต่อเมื่อ

$$V_{GS} \geq V_T \quad (6)$$

และ $V_{GS} \leq V_T$ หรือ $V_{DG} \geq V_T$ (7)

หรือ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ (8)

จากเงื่อนไขในสมการ (8) หาขอบเขตระหว่างบริเวณไทรโอด และบริเวณพินชออฟได้จาก

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T \quad (9)$$

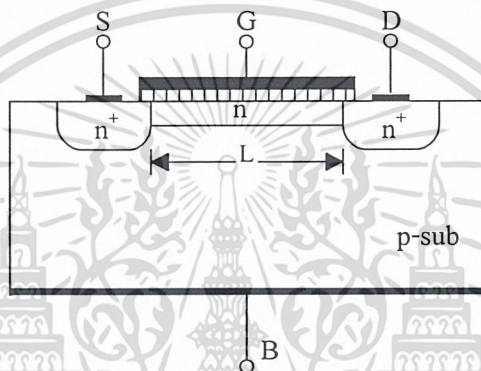
แทน V_{DS} จากสมการ (9) ไปยังสมการ (4) จะได้คุณลักษณะ I_D - V_{DS} ในบริเวณพินชออฟ

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มอสเฟตแบบดีฟลิชันโหนด

มอสเฟตแบบดีฟลิชันโหนดชนิดเอ็นแชนแนลมีลักษณะโครงสร้าง โดยที่ส่วนของซอสและเดรนจะถูกสร้างขึ้นโดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็น ซึ่งมีความหนาแน่นสูงเข้าไปในแผ่นผลึกฐานรองของซิลิคอนชนิดพี หลังจากนั้นส่วนของแชนแนลจะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการอิมพลานเตชัน (Implantation) ซึ่งเป็นวิธีการยิงอะตอมสารเจือเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ลักษณะ และ โครงสร้างอื่นๆ ของทรานซิสเตอร์แบบนี้จะเหมือนกับแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหนดทุกประการ

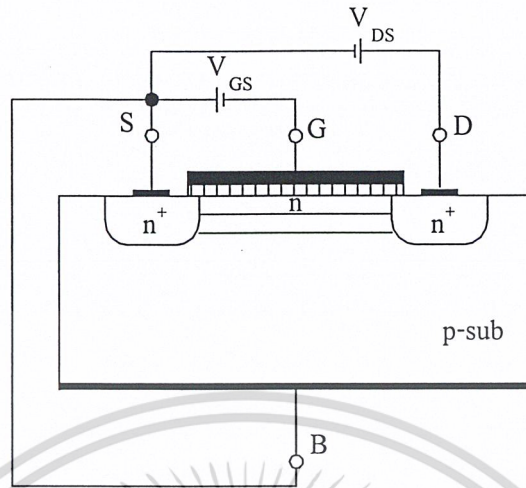


รูป 2.9 โครงสร้างของมอสเฟตแชนแนลเอ็นแบบดีฟลิชัน โหนด

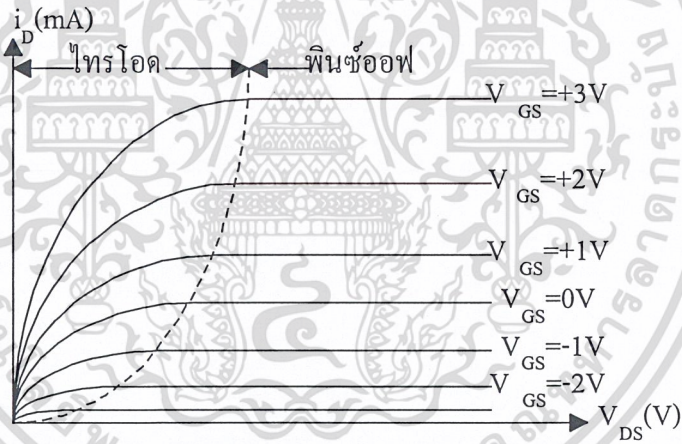
2.3.1 การทำงานของมอสเฟตแบบดีฟลิชันโหนด

จากลักษณะโครงสร้างจะเห็นว่าขณะที่แรงดันเกต $V_G = 0$ โวลต์ และเมื่อแรงดันเดรน-ซอส V_{DS} มีค่าๆ หนึ่งกระแสเดรนก็จะเริ่มไหล นั่นก็คือ แม้ว่าไม่มีแรงดันที่เกต กระแสก็สามารถไหลผ่านแชนแนลได้ เนื่องจากแชนแนลถูกสร้างขึ้นมาแล้ว และในขณะที่แรงดันเกตถูกให้มีศักย์เป็นลบมากขึ้น จะมีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าบวกเข้ามายังบริเวณแชนแนล ทำให้แชนแนลมีขนาดลดลง หรือก็คือ ทางเดินของกระแสจะแคบลง ดังนั้นขนาดของกระแสในตัวในกรณีนี้จะมีค่าลดลง และในทางตรงกันข้ามถ้าเกตได้รับแรงดันไบอัสเป็นบวกมากขึ้น สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณโครงสร้างของมอส จะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุลบเข้ามาสะสมบริเวณแชนแนลมากยิ่งขึ้น ดังนั้นขนาดของแชนแนลจึงขยายกว้างขึ้นกว่าเดิม และมีผลทำให้ขนาดของกระแสในตัวในกรณีนี้มีค่าเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.10 การทำงานของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลแบบดีฟลิชัน โหมด



รูป 2.11 คุณลักษณะ I_D - V_{DS} ในอุดมคติของมอสเฟตแบบดีฟลิชัน โหมด

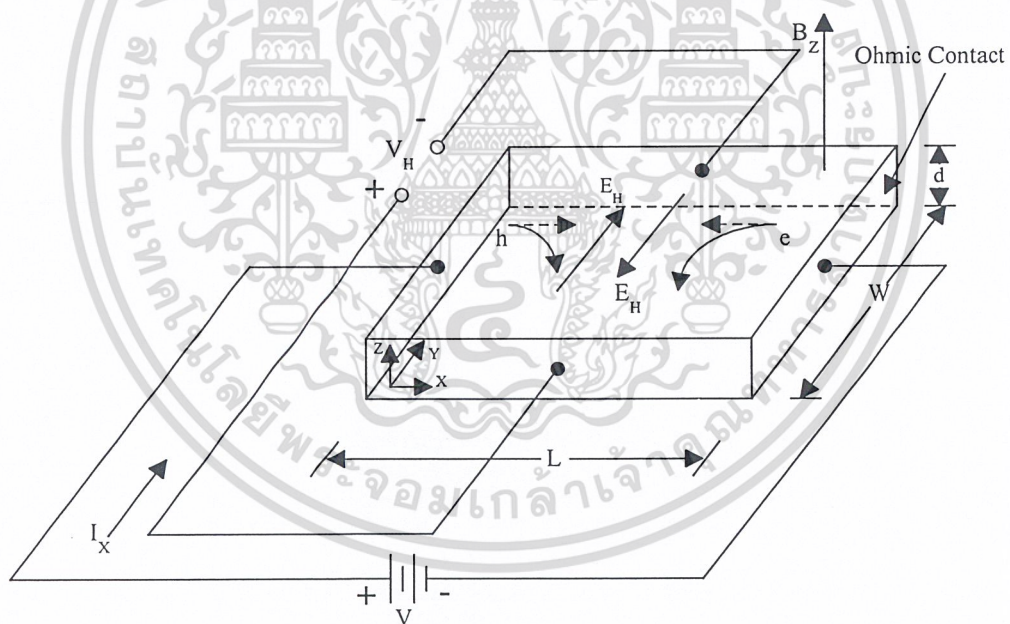
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หลักการพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์

ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (Charge Carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และโฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัด และคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์อื่นๆ ได้อีกด้วย

พิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูป 2.12 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความต่างศักย์ V โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (Current Density) J_x ไหลในทิศ $+x$ และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux Density) B_z ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ $+z$



รูป 2.12 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า E_x จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift (Drift Velocity) v_{dx} ในทิศ

ทาง $+x$ และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแส จะเกิดมีแรงลอเรนซ์ กระทำต่อโฮลด้วย ตามสมการ

$$\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (11)$$

โดยที่ \vec{F}_L คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\vec{F}_L| = F_L = e.v_{DX}.B_Z \quad (12)$$

และมีทิศทางในแกน $-y$ ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาแกน $-y$ และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน ϵ_y ในทิศ $+y$ สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ $+x$ ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ (F_L) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน ($e\epsilon_y$) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$e\epsilon_y = F_L = e.v_{DX}.B_Z \quad (13)$$

จาก

$$\epsilon_y = v_{DX}.B_Z \quad (14)$$

$$J_x = p.e.v_{DX}$$

หรือ

$$v_{DX} = \frac{J_x}{p.e}$$

แทนค่า v_{DX} ลงในสมการ (14) จะได้

$$\epsilon_y = \frac{J_x.B_Z}{p.e}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\epsilon_y}{J_x.B_Z} = \frac{1}{p.e} = R_H \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

จากรูป 2.12 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ w จะได้

$$V_H = \varepsilon_y \cdot W \quad (16)$$

โดย

V_H คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่า $J_x = \frac{I}{W \cdot d}$ และ $\varepsilon_y = \frac{V_H}{W}$ ลงในสมการ (15) จะได้

$$R_H = \frac{V_H}{W \cdot I \cdot B_z} \cdot W \cdot d$$

หรือ

$$R_H = \frac{d \cdot V_H}{I \cdot B_z} = \frac{1}{p \cdot e}$$

(17)

$$\therefore V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d}$$

(18)

ความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = \frac{1}{e R_H} = \frac{I \cdot B_z}{e \cdot d \cdot V_H} \quad (19)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \cdot \frac{W \cdot d}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{W \cdot d}{L} \quad (20)$$

จากเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้

$$\mu_p = \frac{1}{e \cdot \rho \cdot p} = \frac{1}{\rho} \cdot R_H \quad (21)$$

จากสมการ (19), (20) และ (21) จะเห็นว่า การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ มีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ R_H เป็น

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (22)$$

ดังนั้น โดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้

ผลตอบสนองของความไว (Sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแส และสนามแม่เหล็กจะเป็น

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H \cdot G}{d} = \frac{G \cdot r_n}{q \cdot n \cdot d} \quad (23)$$

จะเห็นว่า ค่าความไว ที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำ และฮอลล์เฟลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ

ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ \mathcal{E}_y และ \mathcal{E}_x ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม θ_H กับแกน +x ดังรูปซึ่งมุม θ_H ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta_H = \frac{\mathcal{E}_y}{\mathcal{E}_x}$$

เอกสารนี้เป็นการทบทวนความรู้เกี่ยวกับ Hall effect ที่นำมาใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tan \theta_H = \frac{J_x B_z}{p.e} \cdot \frac{\sigma}{J_x} = \frac{\sigma B_z}{p.e}$$

หรือ

$$\tan \theta_H = \frac{\sigma B_z}{p.e} = p.e \cdot \mu_p \cdot \frac{B_z}{p.e} = \mu_p \cdot B_z$$

$$\frac{\sigma}{p.e} = \mu_p$$

$$\mu_p = \sigma R_H$$

ซึ่งเท่ากับสมการ (21) นั่นเอง

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะหรือพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ (Lattice Scattering) จะได้ว่า

$$R_{H\text{ชนกัน}} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (24)$$

และ

$$\tan \theta_H = \frac{3\pi}{8} \mu_p B_z = \mu_H B_z$$

หรือ

$$\mu_H = \frac{\tan \theta_H}{B_z} = \frac{3\pi}{8} \mu_p$$

$$\mu_{H\text{ชนกัน}} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (25)$$

โดย μ_H คือ Hall mobility

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized Impurity Scattering) จะได้ว่า

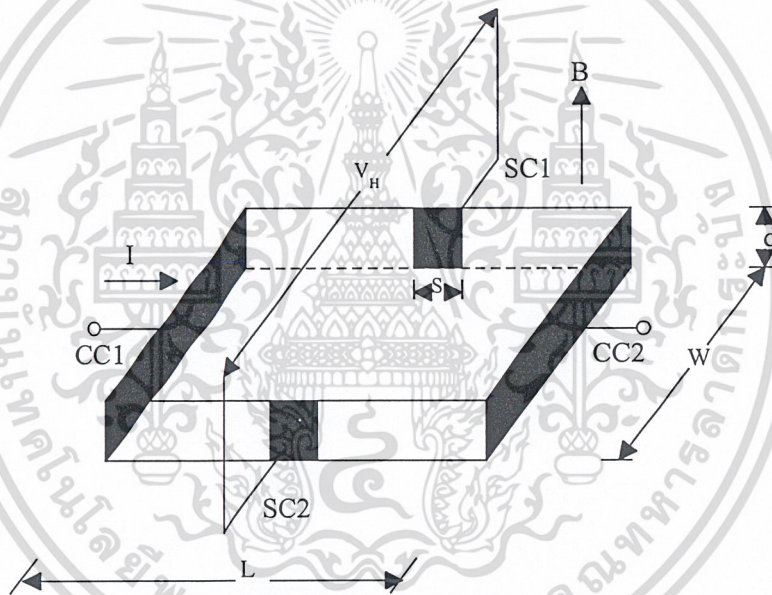
$$R_{H\text{ชนกัน}} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93 R_H \quad (26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในใดๆ ทั้งสิ้น $\mu_{H\text{ชนกัน}} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ไม่ให้นำไปใช้

2.5 แฟกเตอร์ G (Geometry Factor)

ฮอลล์เพลท (Hall plate) ของ ฮอลล์ดีไวซ์ โดยปกติแล้วจะถูกสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความหนาเรื่อยๆ วัสดุที่นำมาสร้างต้องมีความหนาแน่นต่ำ มี 4 ขั้ว และรอยต่อระหว่างขั้วเป็นแบบโอห์มมิก ซึ่งแสดงในรูป 2.13 แรงดันฮอลล์จะวัดได้จากขั้ว SC1 และ SC2 จากสมการ (17) จะสามารถหาแรงดันฮอลล์ได้ แต่ในฮอลล์เพลทที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะขึ้นอยู่กับค่า แฟกเตอร์ G อยู่ด้วย ซึ่งแรงดันฮอลล์จะหาได้จาก

$$V_H = \frac{R_H \cdot G \cdot I \cdot B}{d} = -\frac{G \cdot I \cdot B \cdot r_n}{q \cdot n \cdot d} \quad (28)$$



รูป 2.13 รูปร่างฮอลล์เพลท รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

แฟกเตอร์ G เป็นค่าทางเรขาคณิตซึ่งเป็นผลมาจากรูปร่างของฮอลล์เพลท โดยขึ้นอยู่กับความยาว L ความกว้าง W ขนาดของขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค (SC1, SC2) และมุมฮอลล์ θ_H

ค่าแฟกเตอร์ G มีค่าประมาณเข้าใกล้ L ถ้าช่วงความยาวฮอลล์เพลท L มีค่ามากๆ โดยอธิบายได้ว่ากระแสที่ไหลระหว่างขั้วทั้งสองจะประมาณเป็นแนวเส้นตรง ทำให้ไม่มีผล หรืออาจมีแต่น้อยมากต่อแรงดันฮอลล์ ซึ่งสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเบื้องต้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$G \approx \left[1 - \exp\left(\frac{-\pi L}{2W}\right) \right] \cdot \tan\theta_H \left(1 - \frac{2S\theta_H}{\pi W \tan\theta_H} \right) \quad (29)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ใช้ฟรีๆ สำหรับงานวิจัยของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่ามุมซอลล์ ที่มีค่าน้อยๆ เทอมแรกในวงเล็บ [] จะแสดงผลของระยะห่างระหว่างขั้วเคอร์เรนท์คอนแทค หรือความยาว L ขณะที่เทอม 2 จะจำกัดขนาดของขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค หรือขนาด S และค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงมากกว่า 4% ค่า G จะประมาณเข้าใกล้ 1 ถ้า $\frac{L}{W} > 3$ และ $\frac{S}{W} < \frac{1}{20}$ (4) และในทางตรงกันข้ามถ้า $L < W$ และ SC1, SC2 อยู่ที่ตำแหน่ง $Y = \frac{L}{2}$ ค่า G จะประมาณได้

$$G \approx 0.74 \frac{L}{W} \quad (30)$$

จากสมการ (29) เราสามารถแทนค่ากระแส I ที่ป้อนให้กับขั้วเคอร์เรนท์คอนแทคให้เป็นแรงดัน V แทน และจะสามารถหา V_H ได้จาก

$$V_H = \mu_n \left(\frac{G \cdot W}{L} \right) B \quad (31)$$

ในฮอลล์เพลท ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เราสามารถประมาณค่าแฟกเตอร์ G ได้ดังนี้

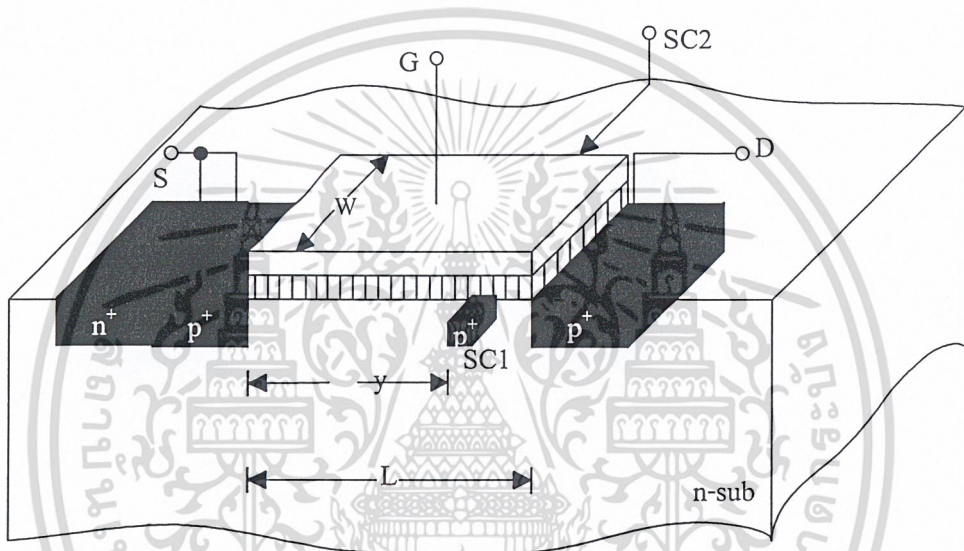
กรณี	$\frac{L}{W} > 3$	ค่า	$G \approx 1$
	$\frac{L}{W} < 1$	ค่า	$G < 0.7$
	$\frac{L}{W} \approx 1.35$	ค่า	$G \approx 0.7$

จะเห็นได้ว่าเมื่อต้องการค่าแรงดันฮอลล์สูงๆ จากสมการ (31) จะต้องให้ $\frac{L}{W}$ มีค่าต่ำแต่เมื่อค่า $\frac{L}{W}$ ต่ำๆ ทำให้ค่า G มีค่าน้อยดังนั้น G จึงมีผลให้แรงดันฮอลล์ลดลง ฉะนั้นค่า $\frac{L}{W}$ จึงต้องเลือกให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 มอสซอลล์เฟลท

MOS หรือ Metal Oxide Semiconductor จะมีลักษณะโครงสร้าง และการทำงานดังที่กล่าวมาแล้ว เช่นเดียวกับปรากฏการณ์ฮอลล์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง มอสเฟทที่มีพฤติกรรมเป็น แมกเนติกเซนเซอร์ โดยที่ชั้นกักเก็บ หรือเซนแนล สามารถใช้เป็นซอลล์เฟลทได้ โดยที่ประจุพาหะในชั้นกักเก็บ จะเกิดการเบี่ยงเบน เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ตามทฤษฎีของซอลล์ ลักษณะโครงสร้างของมอสซอลล์เฟลท นั้นจะมีลักษณะโครงสร้างดังรูป 2.14



รูป 2.14 ลักษณะโครงสร้างของมอสซอลล์เฟลท

มอสซอลล์เฟลท จะประกอบไปด้วยส่วนซอส และเดรน ซึ่งจะเป็นส่วนของเซนแนล ด้านบนจะเป็นส่วนเกท โดยที่ด้านบนนี้เราจะเพิ่มขั้วไปอีก 2 ขั้ว เรียกว่า เซนเซอร์คอนแทค หรือซอลล์โพรบ (Hall Probe) ตรงส่วนที่จะเกิดเซนแนลนั้น สามารถแทนความกว้าง และความยาวโดยใช้ L และ W และตำแหน่งของซอลล์โพรบนั้น สามารถแทนด้วยระยะ y โดยระยะ y ก็จะเป็นความยาวระหว่างซอส และซอลล์โพรบนั่นเอง

พิจารณาการทำงานของ เอ็นเซนแนลมอสซอลล์เฟลท เมื่อ มอสซอลล์เฟลท ทำงานในย่าน Linear นั่นก็คือ

$$V_D < V_G - V_T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

V_G = แรงดันที่ขาคาท

V_T = แรงดันขีดเริ่ม

V_D = แรงดันเดรน-ซอส

จะได้

$$Q_{ch} = C_{OX} \cdot (V_G - V_T) \quad (32)$$

โดยที่ Q_{ch} = Channel Charge Density

C_{OX} = Oxide Capacitance

เราสามารถควบคุม Charge Density ได้ โดยอาศัย ผลตอบสนองของรอยต่อ ซึ่งเราจะได้สมการความไว ในย่าน Linear ของมอดฮอลล์เฟลท คือ

$$S = \frac{r_n \cdot G}{Q_{ch}} = \frac{r_n \cdot G}{C_{OX} \cdot (V_G - V_T)} \quad (33)$$

โดยที่ G = Geometrical Factor

เพราะฉะนั้นถ้าเราต้องการให้ความไวสูงๆ เราก็ควรจะทำให้ Q_{ch} น้อยๆ ซึ่งการที่จะทำให้ Q_{ch} น้อยๆ ก็จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ คือ C_{OX} , V_G และ V_T อย่างไม่ก็ตามเมื่อเราพิจารณาถึงแรงดันและกระแสที่ขาคาท ถ้าแรงดันและกระแสที่ขาคาท มีค่าน้อยๆ จะเป็นผลทำให้แรงดันฮอลล์มีค่าน้อยลงเช่นกัน ซึ่งถ้าเราต้องการจะให้อุปกรณ์นี้มีการเซนเซอร์ที่ดีแล้ว ควรจะให้แรงดันฮอลล์มีค่าสูงๆ ในขณะที่ $V_D < V_{sat}$ โดยที่ $V_{sat} = V_G - V_T$ แชนแนลจะมีขนาดที่แคบ และสภาพความต้านทานค่อนข้างสูง

เราสามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ คือ

$$V_H = \frac{G \cdot w \cdot \mu_n \cdot B \cdot I_D}{\beta \cdot L} \left[(V_G - V_T)^2 - \frac{2y \cdot I_D}{\beta \cdot L} \right]^{1/2} \quad (34)$$

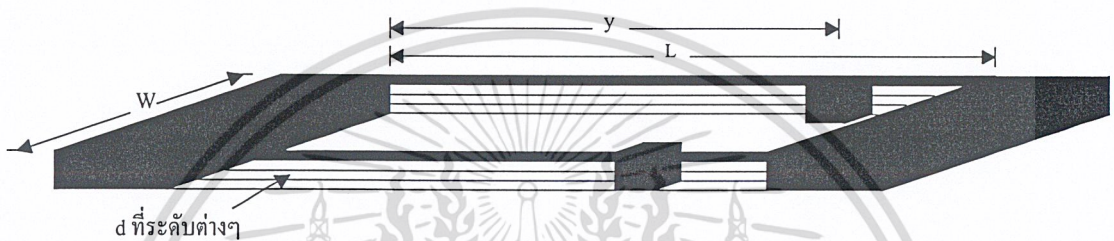
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\beta = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L}$

และสมการกระแสเดรน

$$I_D = \beta \cdot \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right] \quad (35)$$



รูป 2.15 ความหนา d สามารถปรับได้

ค่าของความกว้าง W และความยาว L จะมีค่าคงที่ ในขณะที่ค่าความหนา d สามารถปรับโดยแรงดันที่เกต นั่นเอง ในการใช้งานคาดว่าค่า d ยิ่งน้อยจะยิ่งดี

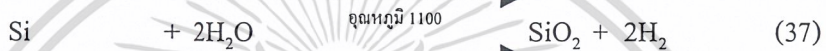
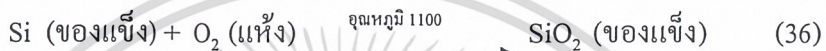
ขั้วเซนเซอร์คอนแทค นั้น ตำแหน่งของขั้วจะไม่อยู่ในตำแหน่ง $\frac{L}{2}$ ซึ่ง มอสซอลล์เพลท ที่ จะมีความไวสูงๆ ตำแหน่งของค่า y ควรจะอยู่ในตำแหน่ง $\frac{L}{2} < y < L$ ซึ่งในตำแหน่งนี้ มอสซอลล์เพลท จะมีความไวดีกว่าตำแหน่งอื่น (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เทคโนโลยีการสร้าง

2.7.1 กระบวนการออกซิเดชัน

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) นี้จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสงใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี และยังใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้ง หรือไอน้ำ ในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้



สำหรับกลไกการเกิดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวนั้น เกิดจากก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ เข้าไปจนถึงผิวหน้าสัมผัสระหว่างซิลิคอน และซิลิคอน ไดออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาเคมี การสร้างซิลิคอน ไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้ ทำได้ 2 ลักษณะคือ

2.7.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปน ที่อุณหภูมิสูง $900^\circ\text{C} \sim$ ประมาณ 1100°C จะทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์ ดังสมการ (36) เตาที่ใช้ในการ Oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน (ผิดพลาด $\pm 0.5^\circ\text{C}$) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน

2.7.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอน กับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นแสดงดังในสมการ (37) สำหรับการออกซิเดชันแบบชื้นนี้สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมเพื่อการสกัด หรือเอตซิงค์ (Etching) ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วน ที่เคลือบอยู่บนผิวผลึกซิลิคอนออก เพื่อการแพร่อะตอมของสารเจือ (Impurity Atom) เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ทำให้เกิดส่วนต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกหลายชั้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตมาสก์ (Photo Mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ (Design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์ จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้างอยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสง ชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลือปกคลุมอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ ถูกสกัด หรือเอตซิงค์ ด้วย “สารตัวสกัด” หรือเอตซันท์ (Etchant) เช่น กรดกัดแก้ว (HF) เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนของการเอตซิงค์ แผ่นผลึกจะถูกนำไปทำปฏิริยาเคมีกับสารเคมีที่เป็นสารตัวสกัด หรือเอตซันท์ ซึ่งปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถสกัด หรือละลายชั้นของออกไซด์ออกไปได้ ในที่สุดหลังจากนั้น เมื่อชั้นของน้ำยาไวแสงถูกลอกออก ก็จะปรากฏภาพ หรือลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเป็นลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโตมาสก์ การเกิดภาพลวดลายได้ ก็เพราะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกสกัดออกไปนั่นเอง คล้ายกับการสกัดหิน

2.7.2.1 การเตรียมต้นแบบของภาพลวดลาย

งานแรกของการสร้างวงจรรวมก็คือ การออกแบบลวดลายของวงจรรวม ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องอาศัยความรู้ ความชำนาญ รวมทั้งความสามารถด้านศิลปะ เพื่อการออกแบบ และจัดวางตำแหน่งของลวดลายต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมกลมกลืนกับขนาดพื้นที่ๆ จำกัด การเขียนแบบ หรือภาพลวดลายนี้ ในยุคแรกๆ ของการสร้างวงจรรวม อาจทำได้โดยการวาด หรือเขียนด้วยมือ และอุปกรณ์เขียนแบบ ซึ่งปกติจะเขียนแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าของจริงหลายสิบเท่า เพื่อให้สามารถเขียนเป็นภาพลวดลายได้โดยสะดวก การเขียนมักจะทำบนกระดาษตาราง หรือกระดาษกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อกำหนดระยะ และขนาดของลวดลายได้อย่างถูกต้อง ภาพลวดลายต้นแบบซึ่งมีขนาดใหญ่นี้ จะถูกเขียน และถ่ายทอดไปบนแผ่น “ไมลาร์ลามิเนต” (Mylarlaminate Sheet) ซึ่งเป็นแผ่นพลาสติกใส และมีฟิล์มบางสีแดงประกบอยู่ การเขียนภาพ หรือสร้างภาพบนแผ่นไมลาร์ลามิเนต ทำได้ด้วยการใช้ใบมีด หรือคัทเตอร์ (Cutter) ตัดหรือกรีด ลงบนแผ่นไมลาร์ลามิเนตด้านพลาสติกสีแดง ตามลวดลายที่ออกแบบไว้ โดยให้ใบมีด ตัดเฉพาะฟิล์มพลาสติกสีแดง จากนั้นจึงลอกชั้นของพลาสติกสีแดงตามรอยที่ตัดไว้ จะทำให้เกิดเป็นภาพลวดลายขึ้น บนแผ่นไมลาร์ตามที่ต้องการ แผ่นไมลาร์ที่มีลวดลายนี้ก็คือ ต้นแบบที่จะนำไปใช้ในการสร้างโฟโตมาสก์ โดยทำการถ่ายภาพย่อส่วนจากแผ่นไมลาร์ลงบนฟิล์มกระจก จะทำให้ได้ กระจกฟิล์มลวดลายต้นแบบ หรือโฟโตมาสก์ ขนาดของลวดลายโฟโตมาสก์ อาจจะมีขนาดเท่าจริง หรือใหญ่กว่าก็ได้ แต่โดยแล้วแต่เทคนิคที่ใช้ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในที่สุดขนาดของลวดลายที่ถูกถ่ายทอดลงบนชั้นออกไซด์บนแผ่นผลึก จะต้องมีความเท่าจริงเสมอ

ในทางปฏิบัติลวดลายของวงจรรวมที่ง่าย ๆ ไม่สลับบีบซ้อน อาจถูกเขียนด้วยมือบนกระดาษกราฟก่อนที่จะถ่ายทอดลงบนแผ่นไมลาร์ลามิเนต โดยการ ใช้ใบมีดตัดแผ่นไมลาร์ด้วยมือ ซึ่งอาจจะทำบน โต๊ะตัดภาพมาตรฐานที่เรียกว่า “ไมโครคัทเตอร์” (Microcutter) ซึ่งเครื่องดังกล่าวนี้มีลักษณะคล้ายโต๊ะทั่วไป แต่มีพื้นกระจก และมีแสงไฟส่องขึ้นมาจากด้านล่างของโต๊ะ พื้นด้านบนของโต๊ะทำด้วยกระจกฝ้า และมีแกนบรรทัดเหล็ก 2 แกน คือ แกนแนวตั้งกับแกนแนวนอน แกนตั้งจะถูกยึดแน่นติดกับโต๊ะ ส่วนแกนแนวนอนจะวางตั้งฉากกับแกนแนวตั้ง และสามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดแนวแกนตั้ง แกนเลื่อนในแนวนอนนี้จะติดชุดใบมีด หรือคัทเตอร์ ซึ่งชุดใบมีดนี้สามารถเลื่อนได้ตลอดบนแนวแกนนอน ทั้งแกนตั้ง และชุดใบมีดที่ติดอยู่ในแนวแกนนอนจะสามารถปรับเลื่อนระยะได้อย่างละเอียด โดยมีไมโครมิเตอร์แสดงไว้

2.7.2.2 การถ่ายภาพย่อส่วน

โดยปกติภาพของลวดลายต้นแบบที่ปรากฏบนแผ่นไมลาร์ลามิเนต จะมีขนาดใหญ่กว่าจริงหลายสิบเท่า ดังนั้นในการถ่ายภาพลวดลายลงบนฟิล์มกระจกเพื่อเป็นโฟโตมาสก์จึงต้องทำการย่อส่วนด้วยอุปกรณ์ซึ่งเรียกว่า “กล้องย่อส่วน” (Reduction Camera) การย่อส่วนก็เพื่อให้ได้ภาพลวดลายขนาดจริง ปรากฏบนฟิล์มกระจกเพื่อเป็นโฟโตมาสก์ (Photo Mask) ในบางกรณีอาจมีการถ่ายย่อหลายๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ขนาดจริง ฟิล์มกระจกที่ใช้คล้ายกับฟิล์มกระจกขาวดำ แต่จะมีความละเอียดสูง ทั้งจะต้องมีความคมเข้ม (Contrast) สูงด้วย จึงเป็นฟิล์มกระจกชนิดพิเศษที่ใช้สำหรับงานการสร้างวงจรรวมโดยเฉพาะ ในขั้นตอนของการถ่ายย่อส่วนนี้ นิยมทำการถ่ายซ้ำๆ กัน (Step and Repeat) บนฟิล์มกระจกเพื่อให้ได้ภาพลวดลายของวงจรรวมจำนวนมากๆ จนเต็มพื้นที่ของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มกระจก ขั้นตอนนี้ถูกเรียกว่า การพิมพ์ซ้ำ (Step and Repeat) คล้ายกับการพิมพ์สเตมปี หรือ ธนบัตรจำนวนมากๆ ลงบนแผ่นกระดาษใหญ่ ในที่สุดจะได้กระจกหลายต้นแบบ ซึ่งปรากฏภาพของหลายของวงจรรวมซ้ำๆ กันเป็นจำนวนมาก เรียงเป็นแถวอย่างเป็นระเบียบซึ่งเราเรียกกระจกนี้ว่า “โฟโตมาส์ก” และพร้อมที่จะนำไปใช้งานเพื่อเป็นหน้ากากบังแสง ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีต่อไป

2.7.2.3 การสร้างภาพลวดลาย (Pattern Generation)

ในบางกรณี เช่น วงจรรวมขนาดใหญ่ระดับ VLSI ข้อมูลที่เป็นลวดลายของวงจรรวมที่ออกแบบไว้ด้วยระบบ CAD ซึ่งอยู่ในรูปของข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ จะถูกนำไปใช้เพื่อการสร้างกระจกโฟโตมาส์กโดยตรง โดยไม่ต้องใช้ภาพลวดลายของแผ่นไมลาร์ลามิเนต ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากในปัจจุบัน เช่น นำข้อมูลของลวดลายวงจรรวมไปควบคุมการปล่อยลำแสงที่กวาด (Scan) ลงไปบนแผ่นฟิล์มกระจก ทำให้เกิดภาพลวดลายปรากฏบนฟิล์มกระจกนั้น หรืออาจใช้ลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ซึ่งถูกบีบให้มีขนาดเล็กมากๆ แทนลำแสง ก็จะสามารสร้างภาพลวดลายที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ วิธีการสร้างภาพลวดลายบนกระจกโฟโตมาส์กนี้ เรียกว่า “การสร้างลวดลาย” หรือ “Pattern Generation” วิธีการนี้จึงมีลักษณะคล้ายการเขียนภาพ (Writing) โดยสามารถกำหนดขนาดของภาพลวดลายบนกระจกโฟโตมาส์กได้จากการควบคุมลำแสง หรือลำอิเล็กตรอน ปกตินิยมใช้โฟโตมาส์กที่ได้ครั้งแรกนี้มีขนาดใหญ่กว่าของจริง โดยให้มีขนาดเต็มพื้นที่ของฟิล์มกระจก จากนั้นนำฟิล์มกระจกที่ได้ซึ่งเรียกว่า “Reticle” ซึ่งเป็นลวดลายของวงจรรวม 1 ชิ้น (Single Chip) ไปผ่านอุปกรณ์เครื่องถ่ายภาพซ้ำ หรือบางทีเรียกว่า สเต็ปเปอร์ (Stepper) ทำการถ่ายภาพจาก Reticle โดยย่อให้มีขนาดเท่าจริง และทำการถ่ายซ้ำๆ เรียงเป็นแถวจนเต็มพื้นที่ของฟิล์มกระจก จะได้ภาพลวดลายของวงจรมาย ซึ่งฟิล์มกระจกดังกล่าวนี้เป็นโฟโตมาส์กที่นำไปใช้งานจริง ในการพิมพ์ภาพลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยวิธี Contact Printing นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่นิยมมากในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมระดับ VLSI คือการใช้โฟโตมาส์ก ที่เรียกว่า Reticle ที่สร้างจากวิธีการเขียนภาพเป็นลวดลายต้นแบบ หรือเป็นโฟโตมาส์กที่ใช้งาน โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “สเต็ปเปอร์” (Stepper) ทำการถ่ายภาพจากลวดลายจาก Reticle ย่อลงไปบนแผ่นผลึกซิลิคอนโดยตรงพร้อมกับการถ่ายซ้ำจนเต็มพื้นที่ของแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งวิธีการโดยใช้อุปกรณ์สเต็ปเปอร์ (Stepper) ถ่ายภาพลงบนแผ่นซิลิคอนโดยตรงเรียกว่าวิธี “Direct Step-on-wafer” จะเห็นว่าวิธีนี้ โฟโตมาส์ก จะไม่มีการสัมผัสกับแผ่นผลึกซิลิคอนเลย ดังนั้น ทั้งบนแผ่นผลึกและโฟโตมาส์ก จะไม่เกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย อายุการใช้งานของโฟโตมาส์กจึงสูง กว่าวิธี Contact Printing ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นกระจกโฟโตมาส์ก จะต้องสัมผัสกับแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียหาย หรือชำรุดของโฟโตมาส์กได้

ยิ่งไปกว่านั้นการสร้างภาพลวดลาย หรือพิมพ์ภาพลวดลายวงจรรวมอาจทำได้โดยการใช้อินโฟลิโธกราฟีแบบเว็ททำ การควบคุมการกวาด (Scan) ลำโพงเลเซอร์บนแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งเคลือบไว้ด้วยสารไวแสง วิธีการสร้างภาพโดยตรง โดยไม่ต้องใช้กระจกโฟโตมาส์กนี้ถูกเรียกว่า “การเขียนลวดลายโดยตรง” (Direct Writing) แต่อย่างไรก็ดี วิธีการยิงลำแสง หรือลำโพงเลเซอร์ เพื่อให้เกิดภาพลวดลายนี้ จะต้องใช้เวลามาก เพราะภาพจะเกิดทีละจุดเล็ก ๆ อย่างต่อเนื่องจึงใช้เวลานาน ต่างกับวิธีการถ่ายภาพด้วยแสงจากกระจกโฟโตมาส์ก ซึ่งภาพจะเกิดขึ้นทันทีและพร้อมกันทุกจุด ทำให้ใช้เวลาน้อยมาก ดังนั้นปกติวิธีการยิงลำแสง หรือยิงลำโพงเลเซอร์ จึงมักจะใช้สำหรับการสร้างกระจก Reticle ซึ่งเป็นลวดลายของวงจรรวมเพียง 1 ชุด ส่วนการเพิ่มจำนวนของภาพลวดลายวงจรรวม จะใช้วิธีการถ่ายภาพย่อ และพิมพ์ซ้ำบนโฟโตมาส์ก แล้วจึงนำโฟโตมาส์กนี้ไปใช้ในการพิมพ์ หรือถ่ายภาพลวดลายลงบนแผ่นฟิล์มผลึกซิลิคอน

2.7.2.4 ชนิดของโฟโตมาส์ก

จากเทคนิคของโฟโตลิโธกราฟี จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ดีของกระจกโฟโตมาส์กก็คือจะสร้างจากวัสดุโปร่งแสง หรือวัสดุที่ยอมให้แสงหรือรังสีผ่านได้ดี และจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำๆ นอกจากนี้จะต้องเป็นวัสดุที่แข็ง เรียบและทนทานไม่เกิดความผิขุ่น ของภาพลวดลายของวงจรรวม ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ และถูกนำไปใช้งาน ได้แก่ แก้วควอทซ์ (Quartz) หรือแก้วโบโรซิลิเกตชนิดพิเศษ (Borosilicate) สำหรับวัสดุที่เป็นภาพลวดลาย หรือส่วนคำทึบแสง บนแก้วควอทซ์ หรือแผ่นกระจกควอทซ์ จะต้องมีคุณสมบัติป้องกันมิให้แสงผ่านไปได้ ซึ่งอาจจะเป็นวัสดุที่สามารถสะท้อนแสงได้ดี หรืออาจจะเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนแสง หรือรังสีได้ดี วัสดุที่นำมาใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ น้ำยาไวแสง (Photo Resist) ซึ่งมีลักษณะสีดำ ทึบแสง และโลหะโครเมียม หรือเหล็กออกไซด์ ก็ถูกนำมาใช้เช่นกัน เพราะสามารถสะท้อนแสงได้ดี และมีความทนทานสูง โดยเฉพาะในงานวงจรรวมที่มีภาพลวดลายละเอียด หรือเล็กมากๆ เช่น VLSI

จากการพิจารณาความแตกต่างของวัสดุที่นำมาใช้ป้องกันแสง เราอาจจัดแบ่งชนิดของโฟโตมาส์กได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. อิมัลชันมาส์ก (Emulsion mask) บางครั้งเรียกว่า ซอฟมาส์ก (Softmask) หรือมาส์กอ่อน

2. เมทัลมาส์ก (Metal mask) บางครั้งเรียกว่า ฮาร์ดมาส์ก (Hard mask) หรือมาส์กแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีมูลชันมาสก์ เป็นโฟโตมาสก์ซึ่งบริเวณส่วนที่บแสงจะใช้น้ำยาไวแสง หรือฟิล์มไวแสงทำหน้าที่ยึดกั้น และบังแสงไม่ให้ผ่าน ปกตินิยมใช้ในงานการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ ไปรวมทั้งวงจรรวม และงานประเภทวิจัยเพราะมีราคาถูก และสามารถสร้างได้ง่าย แต่ข้อเสียก็คือเสียหาย หรือมีรอยขีดข่วนง่าย มีความทนทานน้อยกว่าแบบเมทัลมาสก์

สำหรับเมทัลมาสก์ เป็นมาสก์ที่บริเวณที่บแสง จะใช้โลหะซึ่งสามารถสะท้อนแสงได้ดีแสงจึงผ่านไปไม่ได้ วัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ โครเมียม (Cr) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งสารแต่ละชนิด จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และมีการใช้งานต่างกัน มาสก์ชนิดนี้จะมีความแข็งแรงทนทาน จึงเหมาะสำหรับใช้งานที่ต้องการความละเอียดสูงๆ เช่นวงจรรวมระดับ VLSI และในงานอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการมาสก์ที่มีอายุการใช้งานสูง

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนา โฟโตมาสก์ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยนำเอาสารสองชนิดมาทำเป็นฟิล์มซ้อนกันหลายชั้น เช่น โครเมียม กับ โครเมียมออกไซด์ ซึ่งจะมีคุณสมบัติดีกว่า เมทัลมาสก์ธรรมดา เราเรียกว่า โฟโตมาสก์ชนิดนี้ว่า “คอมปาวด์มาสก์” (Compound Mask)

2.7.2.5 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนผลึก

2.7.2.5.1 การเตรียมผิวหน้าแผ่นผลึก

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึก ก่อนที่จะเคลือบน้ำยาไวแสง บนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน อย่างไรก็ดี ผิววัสดุที่ใช้มากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้น ซิลิคอนออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้น หรือ โมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์ เพราะโดยปกติ ผิวของชั้นออกไซด์นี้ จะดูดซึมน้ำ หรือความชื้นจากอากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิ ราว $200-250^{\circ}\text{C}$ นาน 30 นาที ภายหลังการอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้เวลานานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซึมน้ำความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้น เมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการ เคลือบน้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ ก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexa Methyl Disilazane (HMDS) ฟิลิพ่น หรืออบไอรระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำ ออกจากชั้นผิวของออกไซด์โดยทั่วไปในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่น หรือหมุนให้แห้ง จากนั้นจึงจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.5.2 วิธีการเคลือบ

การเคลือบนำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสม หรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้ คือ

1. แบบสปินเนอร์ (Spinner)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบนำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกวงกลมการเคลือบนำยาไวแสงวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือสปินเนอร์ โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูกวางลงบนแท่นหมุน และถูกยึดติดด้วยระบบสูญญากาศ จากนั้นนำยาไวแสงจะถูกหยดลง บริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่เหมาะสม เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (Spin) ด้วยความเร็วรอบราว 3000-6000 rpm/min ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที นำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ความหนาของฟิล์มสารไวแสงที่ได้ มีค่าทั่วไปประมาณ $1000 \text{ \AA} - 2000 \text{ \AA}$ ถ้าหากความเร็วรอบต่ำเกินไป ชั้นของสารไวแสงจะหนามาก แต่ถ้าความเร็วรอบสูงๆ ความหนาของชั้นสารไวแสงจะไม่เท่ากัน โดยบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะหนามาก ในขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังฝุ่นละอองเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงทำภายในห้องสะอาด หรือ Clean Room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้ จะถูกควบคุม ให้มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้ระบบกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter) ระดับของความสะอาดจะขึ้นอยู่กับ ขนาด และจำนวนฝุ่นละอองในอากาศ โดยปกตินิยมใช้ค่าความหนาแน่น ของฝุ่นละอองขนาด 0.5 ไมโครเมตรในปริมาตร 1 ลูกบาศก์ฟุตเป็นมาตรฐาน ค่าของระดับความสะอาดของห้องสะอาดแสดงได้ดังในตาราง 2.1 ตาราง 2.1 แสดงค่าของระดับความสะอาดของห้องสะอาด (Clean Room)

Class	Number of 0.5 μm particles/ft ³ (m ³)	Number of 5 μm particles/ft ³ (m ³)
10,000	10,000 (350,000)	65 (23,000)
1,000	1,000 (35,000)	6.5 (2,300)
100	100 (3,500)	0.65 (230)
10	10 (350)	0.065 (23)
1	1 (35)	0.0065 (2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบสเปรย์ (Spray Coating)

วิธีการนี้น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึกและยึดต่อกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ได้ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ ด้านล่างของแผ่นผลึก

3. แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้ง จะนิยมทำในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนเป็น หรือชิพ (chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันเศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่นที่จะเกิดขึ้นขณะทำการตัดแยกชิพ ด้วยเลื่อย (Sawing) หรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก

2.7.2.5.3 การอบชั้น Prebake หรือSoftbake

ภายหลังการเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบ เพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นนี้ เรียกว่า Prebake หรือSoftbake ซึ่งใช้อุณหภูมิราว 90-100 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำลงเล็กน้อยคือ 80-90 °C การอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดมีปฏิกิริยาเคมี – ความร้อน หรืออาจไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีซึ่งสามารถกระทำได้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (Convection Oven) ซึ่งในตู้อบจะมีพัดลมช่วยพัดไอร้อนจากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (Heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นผลึกทำให้แผ่นผลึกร้อน การอบสามารถทำได้จำนวนหลายแผ่นพร้อมๆ กัน โดยแผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่องคาสเซ็ทพิเศษ และวิธีการให้ความร้อนแบบนี้แผ่นผลึกจะได้รับความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน จึงอาจเกิดการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งเป็นข้อเสีย และไม่เหมาะที่จะใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง

สำหรับในสายการผลิตวงจรรวม ในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกทีละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการเช่นนี้ ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถ

ไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อน เช่นนี้ เรียกว่า “Bottom up heating” นอก
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (Hot plate) โดยนำแผ่นซิลิกอนไปวางบนแผ่นร้อน หรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

2.7.2.5.4 เครื่องเคลือบนำยาไวแสงแบบ Spin Coater ชนิดอัตโนมัติ

ในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบสารไวแสง บนแผ่นผลึกซิลิกอนจะต้องมีประสิทธิภาพสูง โดยสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว และต่อเนื่อง โดยไม่ผิดพลาด ดังนั้น ในสายการผลิตจึงนิยมใช้อุปกรณ์เครื่องเคลือบสารไวแสงบนแผ่นผลึกซิลิกอนแบบระบบอัตโนมัติ ทั้งนี้เพื่อประสิทธิภาพในการผลิต และคุณภาพของผลผลิตที่ได้ อุปกรณ์ดังกล่าวอาจเรียกว่า “อัตโนมัติเมตเตด สปิน โค้ทเตอร์” (An Automated Spin-Coater) ซึ่งมีระบบการทำงาน กล่าวคือ เริ่มจากแผ่นผลึกซิลิกอนจำนวนหลายสิบแผ่น ซึ่งถูกเก็บบรรจุในกล่องคาสเซต (Cassette) ที่เรียกว่า “กล่องส่ง” (Sender Cassette) จะถูกนำไปวาง (loaded) ที่ปล่อยด้านหนึ่งของเครื่อง จากนั้นแผ่นผลึกจะถูกส่งออกมาทีละแผ่นอย่างต่อเนื่องโดยอัตโนมัติ และถูกนำไปยังส่วนให้ความร้อน หรือ Pre-Spin bake oven เพื่อการอบแผ่นผลึกให้ร้อน โดยการใช้รังสีอินฟราเรด หรืออาจใช้แบบ “แผ่นร้อน” (Hot Plate) หรือระบบคลื่นไมโครเวฟก็ได้ แต่ส่วนใหญ่นิยมแบบรังสีอินฟราเรดการอบในขั้นตอนนี้เรียกว่า Prebake ทำเพื่อไล่ความชื้นออกจากแผ่นผลึก จากนั้นแผ่นผลึกจะถูกส่งไปยังส่วนทำให้เย็น (Cool Module) เพื่อทำให้ผิวแผ่นผลึกเย็นลงเป็นปกติก่อนที่จะนำไปเคลือบนำยาไวแสง เมื่อแผ่นผลึกเย็นลงแล้ว จะถูกส่งไปยังส่วนเคลือบนำยาไวแสงด้วยตัวหมุน (Spin Module) โดยแผ่นผลึกจะถูกดูดด้วยสูญญากาศ ติดกับแท่นหมุนของสปินเนอร์ จากนั้นขั้นตอนต่างๆ ของการเคลือบนำยาไวแสงก็จะเริ่มขึ้น ดังตัวอย่างที่แสดงในตาราง 2.2 นั่นคือแผ่นผลึกจะถูกพ่น ด้วยละอองของสารเตรียมผิว ที่เรียกว่า Hexa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างของช่วงเวลา และลำดับขั้นตอน ในกระบวนการเคลือบสารไวแสง

Star time (Sec)	Duration (Sec)	rpm	Dispense	Comments
0	0	0	-	Load wafer
0	2	1000	N2	Blow off wafer
2	10	500	HMDS Spray	Apply primer
12	10	3000	-	Spin dry primer
22	1	0	-	Allow wafer to stop spinning
23	3	0	Resist	Dispense resist & let spread
26	5	500	-	Spread resist
31	20	3000	-	Spin resist
51	0	0	-	Unload wafer

Methyl DiSilazane หรือ HMDS เพื่อช่วยให้ชั้นสาร ไวแสง ติดกับผิวของแผ่นผลึกได้ดียิ่งขึ้น จากนั้น น้ำยาไวแสงจะถูกหยดลงบริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก และแผ่นผลึกจะถูกหมุนด้วยความเร็วสูง น้ำยาไวแสง จะกระจายออกไปโดยรอบ และเป็นฟิล์มบาง เคลือบผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึก ต่อจากนั้น แผ่นผลึกจะถูกส่งไปยังส่วนให้ความร้อน หรือ Second bake module เพื่อทำการอบแผ่นผลึก ทำให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า Post baking หรือ Soft baking เมื่ออบเสร็จแล้ว แผ่นผลึกจะถูกส่งเข้าไปเก็บไว้ในกล่องเก็บ (Cassette) ด้านทางออกที่เรียกว่า “กล่องรับ” (Receiver Cassette) การทำงานทุกขั้นตอนที่กล่าวมาจะเป็นไปโดยอัตโนมัติ และต่อเนื่อง ด้วยอัตราเร็วสูง ทำให้ได้แผ่นผลึกที่ถูกเคลือบน้ำยาไวแสง ประมาณนาที่ละ 1 แผ่นผลึก การกำหนด หรือควบคุมอุณหภูมิ และเวลาของขั้นตอนต่างๆ สามารถทำได้โดยระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีความคล่องตัวสูงมาก อุปกรณ์บางเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูง อาจประกอบด้วยชุดทำงานดังกล่าวถึง 3 ชุด หรือที่เรียกว่า “3 Tracks Spin Coater”

ซึ่งปลายด้านซ้ายมือบนเครื่อง จะสังเกตเห็น Sender wafer cassette บริเวณตอนกลางจะเป็นส่วน Spinner และด้านขวามือสุด เป็นที่วาง Receive wafer cassette อุปกรณ์ดังกล่าวควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่สมบูรณ์แบบ ซึ่งระบบการทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า “ระบบ Cassette to Cassette Coater”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.6 การปรับชั้นมาสก์ และการฉายแสง (Mask Alignment and Exposure)

2.7.2.6.1 การปรับชั้นมาสก์

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาสก์ ซึ่งโดยปกติจะถูกวางทับ (Contact) ลงไปบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่กระจกโฟโตมาสก์ชิ้นแรก หรือมาสก์ที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับชั้นมาสก์ (Mask Alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นผลึกเลย แต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่ง หรือบริเวณที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาสก์ตั้งแต่มาสก์ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับชั้นมาสก์ เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาสก์ ซ้อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้องในที่สุดของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จะทำให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ ที่ตำแหน่งที่ถูกต้อง โครงสร้างของวงจรรวมจึงเป็นไปตามที่ออกแบบ และถูกต้องอย่างไรก็ดี เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับชั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับชั้นมาสก์” ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือแผ่นผลึกจะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (x-y-z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว x, y, z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาสก์จะถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นผลึก และบนโฟโตมาสก์ พร้อมกับทำการปรับเลื่อนแผ่นผลึกทั้งแกน x, y และมุม θ จนกระทั่ง ภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาสก์ซ้อนกันลงตรงตำแหน่ง ที่ถูกต้อง จากนั้นจึงปรับให้แผ่นผลึกเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน z จนแนบสนิท กับกระจกโฟโตมาสก์ ในกรณีที่ภาพลวดลาย มีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับชั้นภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไป ภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก

นอกจากนี้ยังมีจำนวนมากอีกด้วยจึงเป็นการยาก ที่จะทำการปรับชั้นโดยสังเกตจากภาพลวดลายของวงจรรวม ในทางปฏิบัติ เพื่อให้การปรับชั้นทำได้ง่าย จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับชั้นมาสก์โดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับชั้น” ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (Square in box), กากะบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากะบาท เช่น ภาพลวดลายบนแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับชั้น” เป็นรูปจัตุรัส และภาพลวดลายบนกระจกมาสก์ เป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับซ็อนทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพ จตุรัสเข้าไป ซ็อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยม ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมบนแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโตมาส์ก จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกต้องทุกประการ ถ้าหากการปรับซ็อนตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้อง และเกิดการเสียหายได้ขั้นตอนของการปรับซ็อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก

การพิมพ์ภาพด้วยการใช้กระจกโฟโตมาส์กมาวางทับลงไปบนแผ่นผลึกๆ ให้แนบสนิท แล้วฉายแสงซึ่งเรียกว่า วิธี Contact Printing ดังกล่าวนี จะเห็นได้ว่าการสัมผัสกันระหว่างแผ่นผลึก และกระจกโฟโตมาส์ก ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยขีดข่วน เกิดสิ่งสกปรก หรือความเสียหายต่าง ๆ ได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการใช้วิธีพิมพ์แบบอื่น ๆ เช่น วิธี Proximity Printing หรือ วิธี Projection Printing ซึ่งกระจกโฟโตมาส์กจะไม่สัมผัสกับผิวหน้าของแผ่นผลึกเลย จึงช่วยลดความเสียหายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้

สำหรับวิธีการ Projection Printing อาจทำได้ 2 แบบคือ แบบ Whole-substrate Projection Printing ซึ่งเป็นการพิมพ์ ภาพวงจรรวมลงบนแผ่นผลึก ทั้งหมดครั้งเดียวและแบบ Step and Repeat Projection ซึ่งเป็นการพิมพ์ภาพวงจรรวมทีละภาพๆ ลงบนแผ่นผลึกซึ่งการพิมพ์วิธี Projection Printing นี้ได้รับความนิยมมากในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมแต่อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูงมากราคาของเครื่องค่อนข้างสูง

2.7.2.6.2 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ็อนภาพระหว่างกระจกโฟโตมาส์ก และแผ่นผลึกเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโตมาส์ก เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสง ปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น λ ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วง และสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถ้ายรูปจะต้องใช้แสงในท้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (Mercury Vapor lamp) ซึ่งหลอดนี้จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความยาวคลื่นราว 310, 365, 405 และ 440 นาโนเมตร ตามลำดับ และจากการศึกษาพบว่า น้ำยาไวแสงชนิดลบ จะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 405 นาโนเมตร และน้ำยาไวแสงชนิดบวก จะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 365 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสเปกตรัมของแสง ความยาวคลื่นประมาณ 400 nm ถูกเรียกว่า Near Ultraviolet Wave Lengths หรือ Near UV. ซึ่งเป็นแสง สำหรับเทคนิคโฟโวลติโกราฟีโดยทั่ว ๆ ไป สำหรับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่านี้ เราเรียกว่า Far Ultraviolet Wave Lengths หรือ Far UV. จากการศึกษพบว่า การพิมพ์ภาพที่มีขนาดเล็กๆ จำเป็นต้องใช้แสง ที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ เช่นขนาดราว 2 ไมโครเมตร ต้องใช้คลื่น Far UV. ดังนั้นในวงจรรวมระดับ VLSI ที่มีขนาดอุปกรณ์เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จึงต้องใช้แสงประเภท Far UV. ซึ่งมีความยาวคลื่นราว 100-200 nm

ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถใช้คลื่นรังสีเอ็กซ์ และลำอิเล็กตรอนมาใช้แทนแสงได้ด้วย ทำให้สามารถพิมพ์ภาพลวดลายวงจรที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ซึ่งเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า “เอ็กซ์เรย์ลิโกราฟี” (X-Ray Photolithography) และ Electron-beam Lithography ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ใ้ไรก็ดีน้ำยาไวแสงที่จะใช้จะต้องแตกต่างจากธรรมดา เพราะรังสีเอ็กซ์ และลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่าแสง Near UV. ที่ใช้กับน้ำยาไวแสงปกติ

2.7.2.7 การล้างน้ำยาไวแสง (Resist Development)

ขั้นตอนนี้เป็นการใช้ล้างฟิล์ม (Developer) ละลาย หรือล้างน้ำยาไวแสง ที่ผ่านการฉายแสงมาแล้ว ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกละลายออก แต่ถ้ากรณีน้ำยาไวแสงชนิดบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป

การล้างน้ำยาไวแสงนี้ถ้าเป็นกรณีน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะใช้วิธีการพื้นฐานคือ นำแผ่นผลึกลงไปหมุนบนสปินเนอร์ (Spinner) คล้ายกับการเคลือบน้ำยาไวแสง โดยขณะที่แผ่นผลึกกำลังหมุน น้ำยาล้างจะถูกฉีดพ่นลงไปบนแผ่นผลึก น้ำยาไวแสงที่ถูกละลายก็จะถูกแรงเหวี่ยงกระจายออกไปรอบๆ จากนั้นล้างแผ่นผลึกให้สะอาดด้วยสารละลายอื่นๆ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ในกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดบวก อาจทำได้ครั้งละหลายๆ แผ่นพร้อมกัน โดยจุ่มลงในน้ำยาล้าง หรืออาจใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำยาล้าง คล้ายกับวิธีการล้างน้ำยาไวแสงชนิดลบ

2.7.3 การเอตซิงค์ (Etching)

ขั้นตอนนี้เป็น การสกัด หรือละลาย ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ หรือวัสดุอื่นๆ ด้วยสารเคมี ที่เป็น สารตัวสกัด หรือเอตเชนซ์ โดยที่แผ่นผลึก ที่ผ่านการล้างน้ำยาไวแสง (Development) แล้ว น้ำยาไวแสงจะเหลือตกค้าง และปกคลุมอยู่บนผิว ของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และบางส่วนก็ถูกละลายออกไป ทำให้ชั้นออกไซด์ บริเวณที่ไม่มีสารไวแสงเหลืออยู่ ถูกทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตัว

สกัด เช่น กรดกัดแก้ว (HF) ก่อนการเอตซิงค์ หรือก็คือ ภายหลังจากการสร้างน้ำยาไวแสง แผ่นผลึกจะถูกนำไปอบ (Post bake หรือ Hard bake) เพื่อใช้ชั้นน้ำยาไวแสง แห้งสนิท และยึดติดแน่นกับผิว

ของออกไซด์ วิธีการการกัดชั้นสาร หรือชั้นออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารตัวกัด ที่เป็นสารละลายเคมีนี้ ถูกเรียกว่า “Wet chemical etching” หรือ “Wet etching” หรือ การเอตซิงค์เปียก

นอกจากนี้การกัด หรือเอตซิงค์ สามารถทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาของพลาสมา (Plasma) วิธีการนี้ถูกเรียกว่า “พลาสมาเอตซิงค์” หรือ “Plasma etching” ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า Dry etching หรือ “การเอตซิงค์แห้ง” การเอตซิงค์แบบเปียก จะทำให้เกิดมีการละลายของชั้นสารออกไปในทุกๆ ด้านรวมทั้ง ทางด้านข้างด้วย ทำให้บริเวณขอบของชั้นสาร ถูกกัดออกไป การเอตซิงค์ในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า “ไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ “Isotropic-type” ส่วนการเอตซิงค์แบบแห้ง หรือ Plasma etching จะได้ผลการเอตซิงค์แบบ “แอนไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ Anisotropic-type ซึ่งจะทำให้ได้ลักษณะของลวดลายที่คมชัดกว่า การเอตซิงค์แบบเปียก และภาพลวดลายไม่ผิดเพี้ยนจากต้นแบบ ซึ่งวิธีการนี้ ถูกนำมาใช้กับลวดลายที่มีขนาดเป็นซับไมโครเมตร โดยที่การเอตซิงค์แบบเปียกไม่สามารถนำมาใช้ได้

อัตราการเอตซิงค์แบบเปียก จะขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารตัวกัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการเอตซิงค์ สารละลายซึ่งเป็นสารตัวกัด ชั้นของออกไซด์ได้แก่กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งจะมีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ผสมอยู่เพื่อควบคุมปฏิกิริยาเคมีให้สม่ำเสมอ อัตราการกัด (Etching rate) ประมาณ $1000 \text{ \AA}/\text{min}$ ที่อุณหภูมิห้องหลังจากทำการเอตซิงค์แล้ว ชั้นของน้ำยาไวแสงจะถูกลอกออก ด้วยการนำไปจุ่มในสารละลายที่ใช้สำหรับการลอกฟิล์ม หรือต้มในกรดบางชนิด เช่น กรดน้ำยาไวแสงชนิดลบใช้ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น และชนิดบวกใช้จุ่มล้างในสารอะซีโตน (Acetone) สำหรับกรณีของซับไมครอน นิยมใช้วิธีการของพลาสมาเอตซิงค์ ซึ่งจะทำให้ได้ผิวหน้าที่สะอาด และเรียบร้อย ไม่มีชั้นของน้ำยาไวแสงหลงเหลือ หรือติดค้างอยู่เลย

2.7.4 เทคนิคการแพร่สารเจือ

เทคนิคของการเติมสารเจือ ในงานของการสร้างวงจรรวม หรือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในปัจจุบันนี้ กระทำได้หลายวิธี ซึ่งทั้งนี้ย่อมแล้วแต่ความเหมาะสม ในตอนนี้จะได้กล่าวถึงเทคนิคการแพร่สารเจือซึ่งเป็นที่นิยมกันมาก และนับว่าง่ายต่อการควบคุม การกระจายของสารเจือ และสะดวกในการปฏิบัติอีกด้วย

2.7.4.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิด p ในงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอน ได้แก่ แกลเลียม (Gallium) อะลูมิเนียม (Aluminium) โบรอน (Boron) และอินเดียม (Indium) แต่ในทางปฏิบัติจริงๆ และมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกธาตุสารเจืออย่างพิถีพิถัน หาใช่ว่าจะใช้ได้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทุกกรณี ตัวอย่างเช่น จะไม่ให้ธาตุแกเลียมเป็นสารเจือชนิด p เนื่องจากแกเลียมสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี หรือก็คือ แกเลียมมีค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ในออกไซด์ได้สูงนั่นเอง ทำให้การใช้ชั้นของออกไซด์ป้องกันผิวซิลิคอนไม่ได้ผล นอกจากนี้แล้วการเลือกธาตุใดเป็นสารเจือยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ อีกเช่น อะตอมของโบรอนทำให้เกิดโฮลได้ดีกว่าอะตอมของอินเดียม เนื่องจากระดับพลังงานผู้รับของโบรอนอยู่ที่ 0.01eV ส่วนของอินเดียมอยู่ที่ระดับ 0.16 eV และอะลูมิเนียมก็มีข้อเสียคือ สามารถทำปฏิกิริยาเข้าร่วมกับออกซิเจนได้ไวมาก กลายเป็นฉนวนไฟฟ้าด้วยเหตุผลต่างๆ ดังกล่าวมานี้ จึงทำให้โบรอนเป็นธาตุที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเจือชนิด P กันมาก และโบรอนก็มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่สูงพอประมาณ $10^{-16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ที่ 1150°C ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้โดยสะดวก

เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนอาจจะกระทำได้ 3 แบบคือ อะตอมของโบรอนสามารถนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิดในสถานะของแข็งคือ โบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) หรือในสถานะของเหลวคือ โบรอนไตรโบไรด์ (BBr_3) ในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ (BCl_3) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์ และซิลิคอนทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมของโบรอนออกมาจาก B_2O_3 ที่ผิวของซิลิคอน โดยเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้คือ



จากนั้นโบรอนจึงจะแพร่เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน แต่ในงานอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบ BN เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่แผ่น BN จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่น BN กลายเป็นโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่น BN นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1100°C (ในบรรยากาศของไนโตรเจน)

การแพร่โบรอนที่นิยมมากที่สุดคือ กระทำสองขั้นตอนดังที่เคยกกล่าวมาแล้วโดยจะทำการชั้น deposit ที่อุณหภูมิ 1000°C ใช้เวลา 30 นาทีในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยอาจเป็นอาร์กอน 99% หรือไนโตรเจน 99 % และก๊าซออกซิเจน 1 % ต่อจากนั้นจึงทำการแพร่ชั้นที่สองต่อไปคือ drive in ในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100°C ในช่วงเวลาหนึ่ง โบรอนจะแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้ลึกตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ใช้ BBr_3 เราจะใช้ในโตรเจนผ่านเข้าไปในสารละลาย BBr_3 จากนั้น ไอของ BBr_3 จึงจะผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ หรือในกรณีที่ใช้ก๊าซ BCl_3 ก็สามารถผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ได้โดยตรง

2.7.4.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิด n ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus), พลวง (Antimony) และสารหนู (Arsenic) การจะเลือกธาตุที่จะนำไปเป็นสารเจือทำได้โดยไม่จำกัด ซึ่งต่างจากกรณี สารเจือชนิด p กล่าวคือ ธาตุเหล่านี้ใช้งานได้ดี ในแต่ละลำดับชั้น ตัวอย่างเช่น พลวงและสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างชั้นฝัง (buried layer) n+ซึ่งเป็นการแพร่ครั้งแรกในงานสร้างวงจรรวม ส่วนการแพร่อื่นๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิด n ทั้งนี้เพราะค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตัวของฟอสฟอรัสสูงกว่าพลวงและสารหนู ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อความประหยัด คือสามารถแพร่ได้เร็วในช่วงเวลาอันสั้น การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถกระทำให้ 3 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ฟอสฟอรัส อาจนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิด เช่นในสถานะของแข็งได้แก่ ฟอสฟอรัสเพนตอไซด์ (P_2O_5) หรือในสถานะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ ($POCl_3$) หรือในสถานะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) ซึ่งเป็นก๊าซพิษ และอาจจะเปิดได้ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนตอไซด์ (P_2O_5) และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก P_2O_5 ที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



จากนั้น ฟอสฟอรัสจึงจะแพร่เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ในปัจจุบันนิยมใช้ $POCl_3$ เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัสโดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว $1200^\circ C$ ในช่วงเวลาตามต้องการในบรรยากาศของไนโตรเจน

2.7.5 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process)

กระบวนการเมทัลไลเซชัน คือ กระบวนการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้า หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อกภายใน

1. Metal contacts (ขั้วสัมผัส โลหะ) ของส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ใน ICS.
2. Metal wire interconnection (แถบโลหะเชื่อมต่อกภายใน) ระหว่างตัวอุปกรณ์ใน ICS.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของโลหะที่ได้ และเหมาะสมกับงาน ICs

1. มีค่า Contact Resistance (R_c) ต่ำ หรือเป็น Good Electrical Contact และมีสภาพเป็น Ohmic Contact Rectitive Contact
2. Reliability (ความน่าเชื่อถือ) เช่น Chemical Stability โดยไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติจึงไม่เปลี่ยนแปลง มีอายุการใช้งานนาน
3. ต้องสามารถทำ Photo Etching ได้ และได้ลวดลายที่คมชัด และละเอียด
4. ต้องยึดติดกับผิวของชั้น SiO_2 ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งต่อเชื่อมกับลวดโลหะจากภายนอกได้ดี
5. มีราคาถูก และสามารถสร้างได้โดยง่าย

โลหะที่ถูกนำมาใช้ในงาน ICs

1. Aluminium (Al) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งเป็น Metal Contact และ Metal Wire Interconnection อย่างไรก็ตามในกรณีของอุปกรณ์ประเภทรอยต่อตื้น ๆ (Shallowed Junction) เช่น MOSFET หรือ MOS ICs จะมีปัญหาของ AL Spike เกิดขึ้นที่บริเวณ Metal contact ทำให้รอยต่อ พี-เอ็นเสียหายจึงต้องมีการแก้ปัญหาติดตามมา
2. Gold (Au) ทองคำ มีการนำมาใช้ในบางกรณีแต่มีราคาแพง และเนื่องจากอะตอม ทองคำเป็น Deep Level Impurity จึงทำให้มีปัญหาการ Trapping ทองจึงไม่เป็นที่นิยมโดยทั่วไป
3. Poly Silicon ที่ถูกเติมอะตอมสารเจือทำให้มีความนำไฟฟ้าสูงคล้ายโลหะ และสามารถนำมาใช้เป็น Metal wire interconnection ได้เช่นในงาน VLSI
4. Diffused layer เป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้นทำให้มีความต้านทานต่ำ สามารถใช้แทนโลหะได้ นิยมใช้ทำส่วน Cross Over

2.7.6 กระบวนการ CVD (Chemical Vapor Deposition)

เป็นกระบวนการที่ใช้สร้างชั้นบางๆ ของวัสดุตัวนำ, ฉนวน และสารกึ่งตัวนำโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี จากไอ หรือก๊าซซึ่งเป็นสารประกอบของธาตุที่ต้องการกับธาตุไฮโดรเจน หรือคลอรีน เมื่อก๊าซสารประกอบได้รับความร้อนจะเกิดการแยกตัวออกเป็นธาตุอิสระ หรือบางตัวอาจใช้ธาตุไฮโดรเจนเป็นตัวดึงคลอรีนออกจากก๊าซสารประกอบ สำหรับกรณีของชั้นสารที่มีธาตุซิลิคอนอยู่ด้วย ได้แก่ SiO_2 , Si_3N_4 และชั้น Poly Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.6.1 ชั้นของ SiO₂ ด้วยกระบวนการ CVD

โดยปกติชั้นของ SiO₂ นิยมสร้างจากวิธี Thermal Oxidation ซึ่งเป็นวิธีการสะดวกที่สุดโดยเฉพาะการสร้างชั้น SiO₂ บนฐานรองซิลิคอน แต่ในกรณีที่ชั้นฐานรองไม่ใช่ซิลิคอน เช่น เป็นชั้นของโลหะหรือวัสดุอื่นๆ ไม่สามารถสร้างชั้น SiO₂ จากวิธี Thermal Oxidation วิธีการ CVD จึงถูกนำมาใช้ ชั้นของออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการ CVD ถูกเรียกว่า Vapox หรือ Pyrox หรือ Silox ก๊าซสารประกอบที่ใช้ได้แก่ SiU₄ หรือ SiBr₄, SiH₂U₂ หรือ Tetrachoxysilane [TEOS : Si(OC₂Hs)₄] หรือ SiH₄ สำหรับวัสดุ Oxidant อาจใช้ O₂, NO, N₂O หรือ CO₂ หรือ H₂ ปฏิบัติที่นิยมมากที่สุดได้แก่

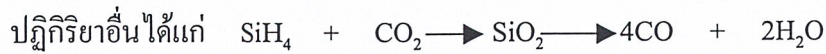


ชั้นของออกไซด์ที่ได้มักจะถูกเติมด้วยสารเจือโดยการเติมก๊าซสารเจือเข้าไปในปฏิกิริยาด้วย เช่น ก๊าซ B₂H₆ (dibosane) ซึ่งเป็นก๊าซสารเจือชนิดที่ จะทำให้ได้ชั้นของออกไซด์ที่มีอะตอมโบรอนอยู่ด้วยจะทำให้ได้ Silicon-Boron Dxygam Conpoveal ซึ่งเรียกว่า Borosilicate glass หรือ B.S.G. หรืออาจใช้ก๊าซฟอสฟีน PH₃ (Phosphine) จะทำให้ได้ชั้นออกไซด์ที่มีอะตอมฟอสฟอรัสประปนอยู่ด้วยเรียกว่า Phosphosilicate glass หรือ P.S.G. หรือ Pyroglass ซึ่งชั้นออกไซด์ดังกล่าวนี้อาจนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือในกระบวนการแพร่สารเจือได้ อย่างไรก็ตามชั้นของ P.S.G. นิยมนำไปใช้เป็นชั้นฉนวนไฟฟ้า กันระหว่างชั้นของตัวนำ หรือใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าของ ICs ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว โดยอะตอมฟอสฟอรัสที่อยู่ใน PSG จะช่วยทำหน้าที่จับ หรือป้องกันไอออนของธาตุ Alkali metal ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างได้มีการทำงานที่ไม่เสถียรชั้นของ PSG ที่ถูกทำให้ร้อนราว 1,000 °C – 1,100 °C จะเกิดการอ่อนตัว และไหลได้ดังนั้น บริเวณขอบของชั้น PSG จะมีลักษณะ gently slope ซึ่งเป็น good step coverage อย่างไรก็ตามหากปริมาณของฟอสฟอรัสมีมากเกินไปเช่น >8% (โดยน้ำหนัก) จะทำให้มีปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นกรด HPO₃ (Phosplaoric acid) ซึ่งกรดนี้จะกัดกร่อนชั้นฟิล์มของโลหะได้ แต่หากมีฟอสฟอรัสน้อยเกินไปเช่น <6% แม้ทำให้ร้อน 1,000 °C ไม่อ่อนตัว ลักษณะของ gently slope จึงไม่เกิดขึ้น ระบบ CVD ที่ใช้อาจเป็น <PCVD หรือ Plasma-CVD ก็ได้ ชั้นของออกไซด์ที่ได้จาก CVD อาจมี porous มาก จึงนิยมนำไปทำให้ร้อนที่ราว 1,000 °C จะทำให้ porous ลดลง และชั้นออกไซด์มีคุณภาพดีขึ้น วิธีนี้ถูกเรียกว่า “Densification” ชั้นของออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการ CVD และเกิดบนฐานรองที่มีผิวเรียบจะมีความหนาสม่ำเสมอ แต่หากผิวไม่เรียบ ความหนาของชั้น SiO₂ บนส่วนที่มีผิวสูง จะมีความหนามากกว่า เพื่อแก้ปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงนิยมใช้ปฏิกิริยาจากสารประกอบ TEOD [$:\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$] ซึ่งชั้นของฟิล์มที่ได้จะมีความหนาสม่ำเสมอแม้ผิวฐานรองจะไม่เรียบ



2.7.7 กระบวนการเก็บบรรจุวงจรรวม (ICs Assembly Processing)

ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. การตัดแยกไดซ์ (Die Separation)

ทำได้ 2 วิธี คือ 1. Scribing โดยใช้ diamond pen

2. Sawing โดยใช้เลื่อย

2. การติดตั้งไดซ์ (Die bonding)

ทำได้โดย 1. Alloyin ระหว่าง Si-Au ที่อุณหภูมิราว 200-300 °C

2. Epoxy หรือที่เรียกว่า Ag-paste

3. การต่อสาย (Wire bonding)

ทำได้หลายวิธี 1. Thermo Compression Bonding อาศัยความร้อน และแรงกดใช้กับลวด

ทองคำ

2. Ultrasonic Bonding อาศัยคลื่นเสียงความถี่สูงทำให้ลวด Al ติดกับ bonding pad

นอกจากนี้ยังมีการเก็บบรรจุแบบอื่น ๆ อีกเช่น

- Tape Automate Bonding

- Flip-chip Technique

Packaging : เป็นการบรรจุวงจรรวมในตัวถังซึ่งมีหลายแบบ

1. Can case (Metal can) TO-type

2. Plastic case

3. Ceramic case หรือ Dual Inline Package (DIP.) □ 80 pins

4. Pin Grid Array (PGA) ในกรณี >80pins

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 คุณสมบัติต่างๆ ไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์

การนำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไปใช้งานโดยทั่วๆ ไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติ (Ambient Condition Allowed) เช่น ใช้อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดันเท่าไร เพื่อให้เราสามารถนำเซ็นเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซ็นเซอร์ทั่วๆ ไป ค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

1. ย่านวัด (Range) เป็นการจำกัดค่าอินพุต และเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ในการใช้งาน เช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้กับความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสต้านเอาต์พุตอยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

2. ความผิดพลาด (Error) เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) รวมอยู่ด้วยเสมอ

3. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ในการวัดค่า ความแม่นยำ และความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง จะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึง สามารถวัดได้ละเอียด (Sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง มันมีสเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้เราสามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือ ค่าที่วัดได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึง ความคงเส้นคงวา (Consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (Repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงต่ำ

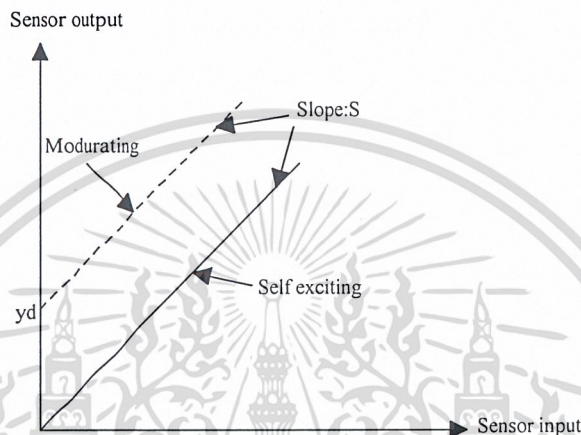
4. ความไว หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต หรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น $0.5 \Omega/^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น

ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ ค่าความไวที่มีการไบอัสด้วยกระแสสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$S = \frac{V_H}{I_B} = \frac{R_H \cdot G}{d} = \frac{G \cdot r_n}{q \cdot n \cdot d}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

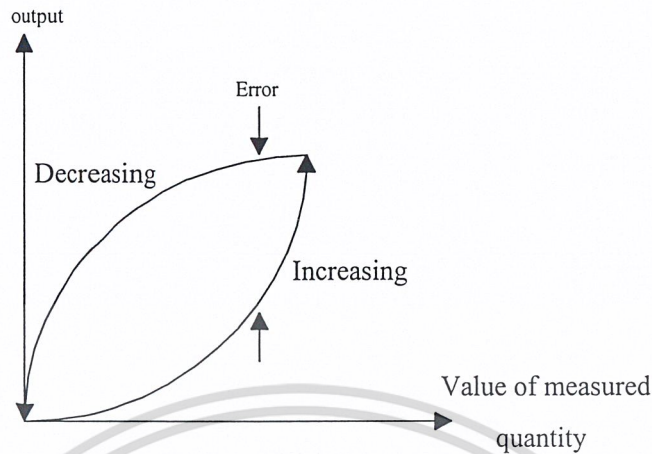
5. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) บ่อยครั้งที่เราถือว่า ความแม่นยำ ก็คือความเป็นเชิงเส้น ความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่าการวางตัวอย่างโรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมากแต่มีความเอียง (Bias) มีความชัน (Slope) หรือออฟเซ็ท (Offset) จากค่าที่ถูกกำหนด



รูป 2.16 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของ Ideal sensor

6. ความมีเสถียรภาพ (Stability) ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แต่เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การลื่นไหล (Drift) มักจะถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การลื่นไหลอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การลื่นไหลเป็นศูนย์ (Zero drift) จะถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุต เมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์

7. ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด



รูป 2.17 ฮิสเตอร์รีซิส

8. การแยกชัด (Resolution or Discrimination) บอกลถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ถูกวัด

9. ออฟเซต (Offset) เป็นค่าเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่สัญญาณอินพุตเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ ค่าออฟเซต จะหมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

โดยเงื่อนไขในการใช้งาน หรือคุณลักษณะของเซ็นเซอร์ที่ต้องการนั้นมีรายละเอียดดังนี้

คุณลักษณะ	ค่าในทางอุดมคติ
Response, Δy	มีความเป็นเชิงเส้น แน่นอน และไม่มีสัญญาณรบกวน
Baseline, y_0	เท่ากับศูนย์
Response time, T	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Frequency band-width	เท่ากับอนันต์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Time to reach 90% of final value, t_{90}	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Working range, $(y_{\max} - y_{\min})$	เท่ากับอนันต์
Sensitivity, S	มีค่าสูง และคงที่ตลอดย่านการทำงาน
Resolution	เท่ากับอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ และกระบวนการสร้าง

3.1 การออกแบบ

หลักการสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท ก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ชนิดอื่นๆ คือ ต้องการอุปกรณ์ ที่มีค่าความไวสูงๆ นั่นก็คือ ต้องออกแบบอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท ให้มีค่าแรงดันฮอลล์สูงๆ จากสมการ (18)

$$V_H = \frac{I_x \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d}$$

หรือ

$$V_H = \frac{R_H \cdot G \cdot I_x \cdot B_z}{d}$$

ทำให้เราทราบว่า การออกแบบอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท ที่มีค่าแรงดันฮอลล์สูงๆ ทำได้ดังนี้

1. ทำให้ค่า p ต่ำๆ โดยที่ p คือความหนาแน่นของประจุพาหะ
2. ทำให้ค่า d มีค่าน้อยๆ โดยที่ d คือ ความหนาของอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท

สำหรับ พารามิเตอร์ที่เราควรพิจารณาในการออกแบบอีกอย่างหนึ่งคือ ค่าความไว โดย

จากสมการ

$$S = \frac{V_H}{I_x \cdot B_z} = \frac{R_H \cdot G}{d} = \frac{G \cdot r_n}{q \cdot n \cdot d}$$

ทำให้เราทราบว่า การออกแบบที่มีค่าความไวสูงๆ ทำได้ดังนี้

1. ทำให้ค่า $G \approx 1$ ซึ่งเป็นค่าทางเรขาคณิต เป็นผลมาจากรูปร่างของฮอลล์เฟลท โดยทางทฤษฎีแล้วควรสร้างให้มีค่าความกว้าง (W) และค่าความยาว (L) และขนาดของขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค (S)

ให้มีค่า $\frac{L}{W} > 3$ และ $\frac{S}{W} < \frac{1}{20}$ จะทำให้ค่าแฟคเตอร์ $G \approx 1$

2. ทำให้ค่า n ต่ำ ๆ n คือ ความหนาแน่นประจุพาหะ

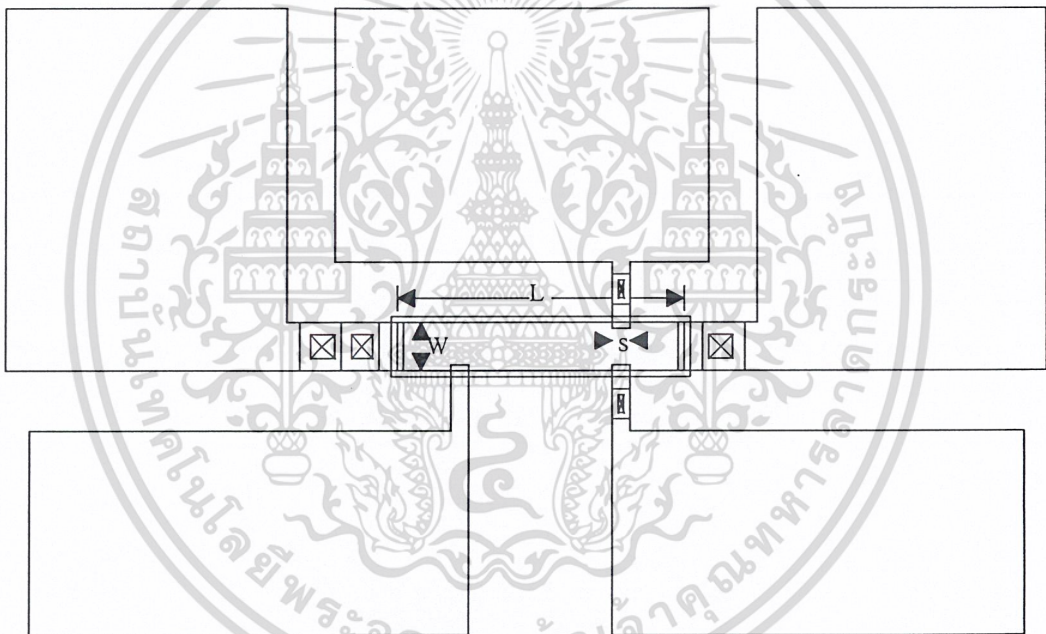
3. ทำให้ค่าความหนา d มีค่าน้อยๆ ซึ่ง d ก็คือ ความหนาของอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลทนั่นเอง

เราสามารถออกแบบค่า G ได้โดยตรง โดยการกำหนดค่า $\frac{L}{W} > 3$ และ $\frac{S}{W} < \frac{1}{20}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราพิจารณาค่า $\frac{L}{W} > 3$ อย่างน้อยที่สุดเราจะต้องออกแบบ $L > 3w$ เราจะกำหนดให้ $W = 200\mu\text{m}$ เนื่องจากง่ายต่อการเขียนมาตัก เพราะฉะนั้นอย่างน้อยที่สุดเราจะได้ $L = 600\mu\text{m}$ และเมื่อเราพิจารณาค่า $\frac{S}{W} < \frac{1}{20}$ จะได้ค่า $S = 10\mu\text{m}$ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถสร้าง S ที่มีค่า $10\mu\text{m}$ ได้ เนื่องจากเราสามารถทำได้เล็กที่สุดประมาณ $60\mu\text{m}$

เพื่อพิสูจน์ และวิเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท เป็นแมกเนติกเซนเซอร์ที่มีความไวที่ดีที่สุดจึงทำการเพิ่มพารามิเตอร์ ของความยาว L อีก 3 ค่าคือ $800\mu\text{m}$, $1000\mu\text{m}$, $1200\mu\text{m}$ เพราะฉะนั้นอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท จะมี 4 แบบ โดยมีค่า $s = 60\mu\text{m}$, $w = 200\mu\text{m}$ และค่า $L = 600\mu\text{m}$, $800\mu\text{m}$, $1000\mu\text{m}$, $1200\mu\text{m}$



รูป 3.1 ลวดลายต้นแบบที่ทำการออกแบบ

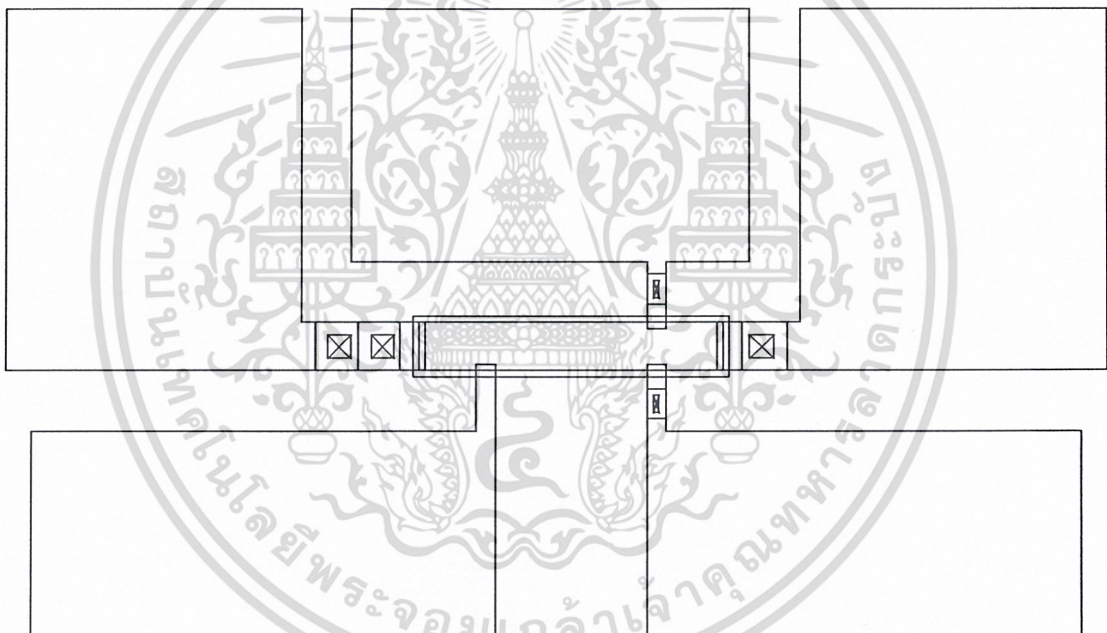
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำรูปร่าง และพารามิเตอร์ต่างๆ ไปสร้างมาส์ค โดยมีจำนวนทั้งหมด 5 มาส์ค ด้วยกัน ได้แก่

1. Mask Body
2. Mask Source, Drain, Sensor Contact
3. Mask Gate
4. Mask Contact Windows
5. Mask Aluminum

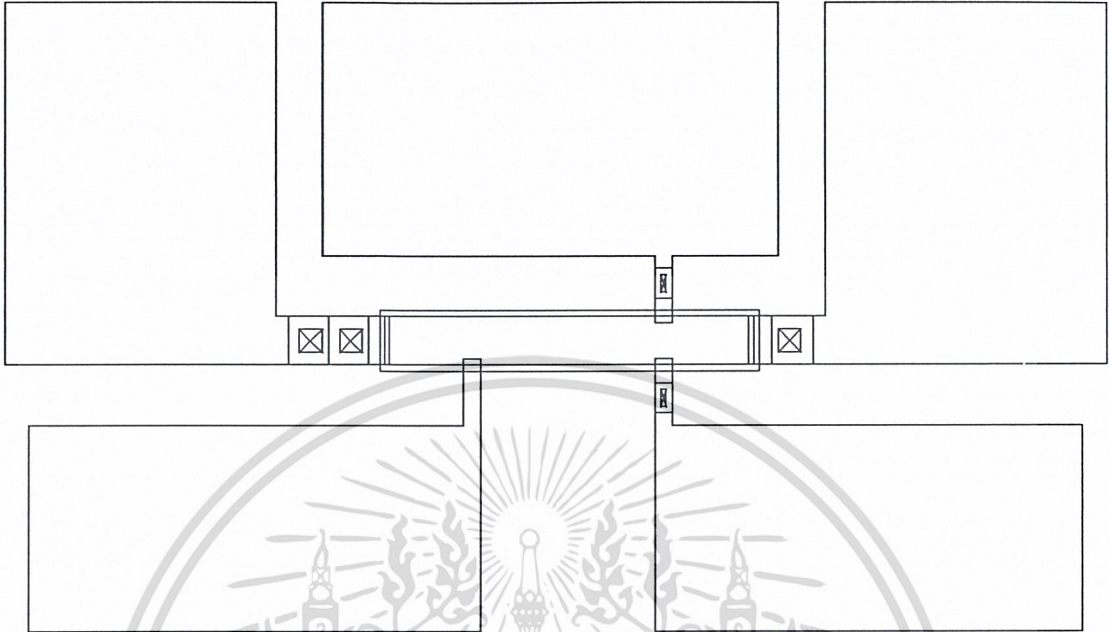
W = 200 μ m

L = 600 μ m

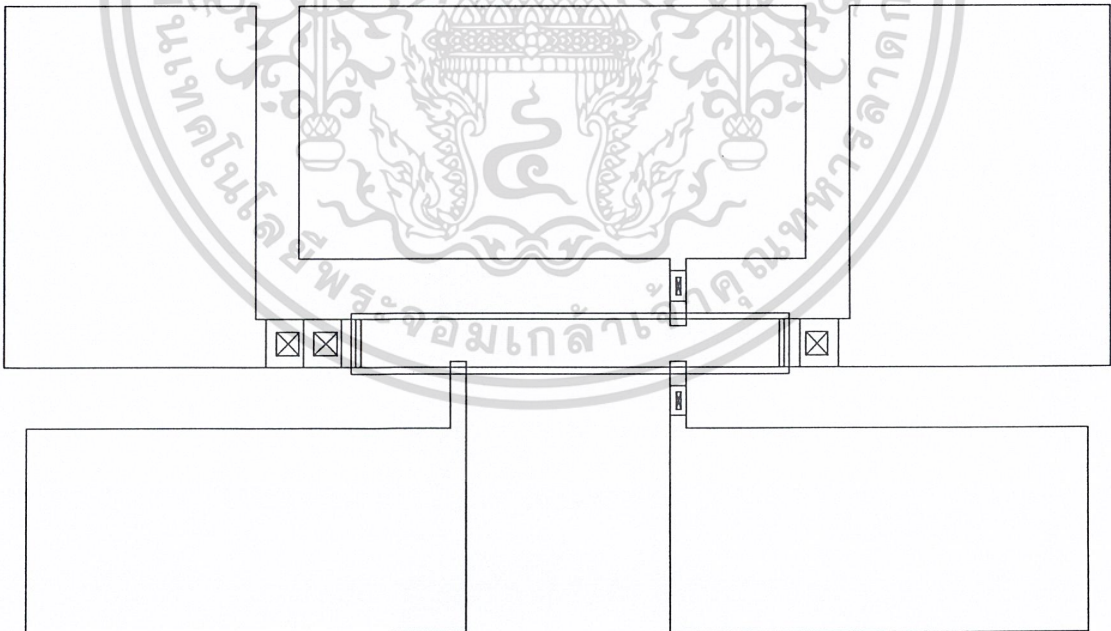


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$L = 800\mu\text{m}$

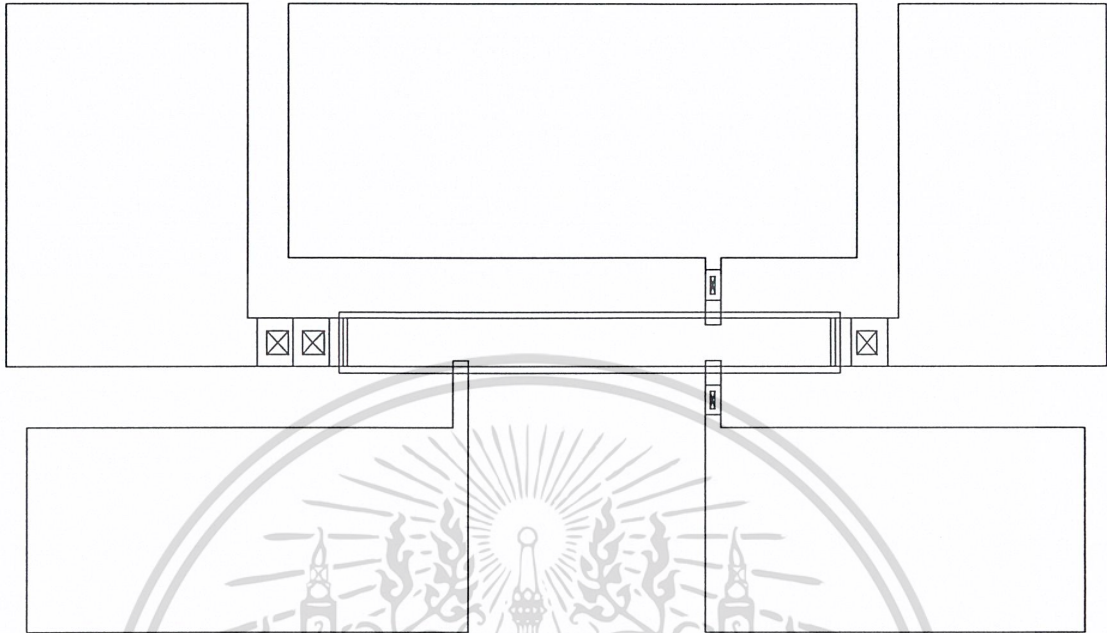


$L = 1000\mu\text{m}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$L = 1200\mu\text{m}$



รูป 3.2 ลวดลายต้นแบบที่ทำการออกแบบที่ค่า W และค่า L ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การตัดมาส์ค และถ่ายมาส์ค

หลังจากการออกแบบอุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์ แบบมอสซอลด์เฟลท แล้วซึ่งเราจะมีพารามิเตอร์ ความยาว L และความกว้าง W ทั้ง 4 ค่า เราจะทำการออกแบบมาส์ค ซึ่งหลังจากการออกแบบมาส์คแล้ว เราจะมีมาส์คทั้งหมด 5 มาส์ค ขั้นตอนต่อไปเราจะทำการตัดมาส์ค ลงบนแผ่นไมลาร์มินิท โดยทำการตัดโดยไมโครคัตเตอร์

ในการออกแบบต้องทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 5 มาส์ค ซึ่งประกอบด้วย

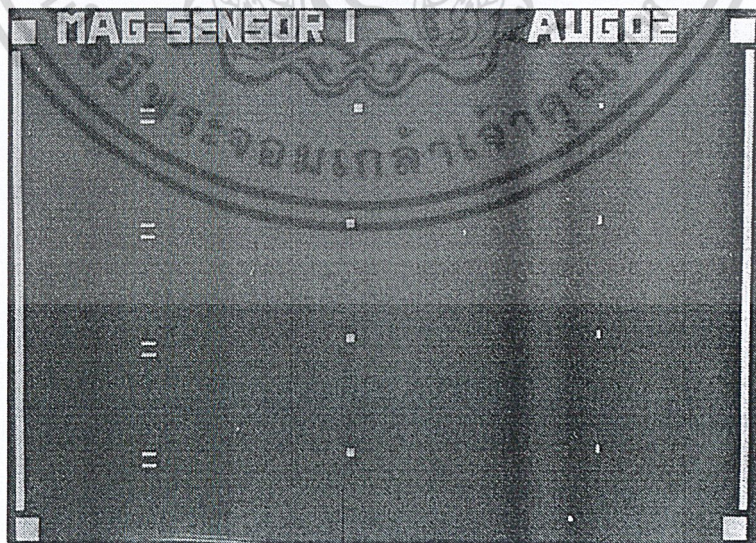
มาส์คที่ 1: Body Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับ เป็นชั้นออกไซด์ เพื่อสลับส่วนที่เป็น Body โดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน (p^+) โดยส่วนนี้จะเชื่อมต่อกับส่วนซอส

มาส์คที่ 2: Drain, Source, Sensor Contact Mask โดยการเปิดช่องออกไซด์ และแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (n^+)

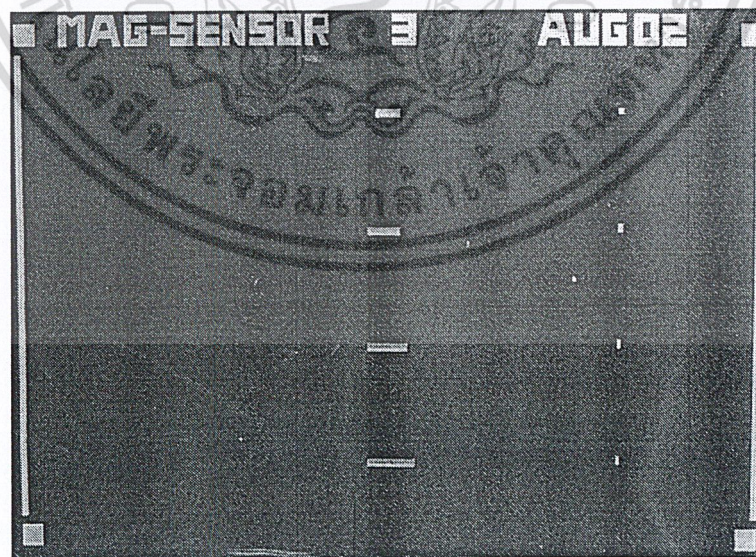
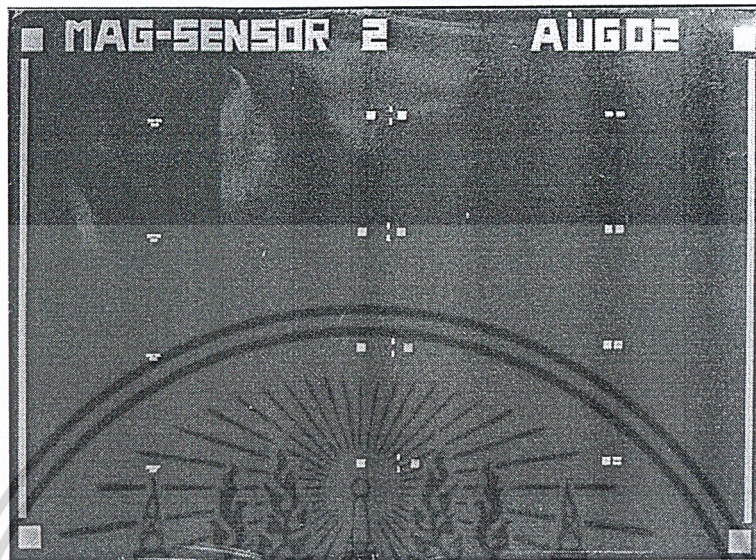
มาส์คที่ 3: Gate Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับเปิดช่องออกไซด์ เพื่อสร้างส่วนเกต โดยเกตที่ได้จะมีความหนาเรื่อยๆ ประมาณ $250 - 1,000 \text{ \AA}$ และมีความบริสุทธิ์สูง

มาส์คที่ 4: Contact Windows Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม กับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม

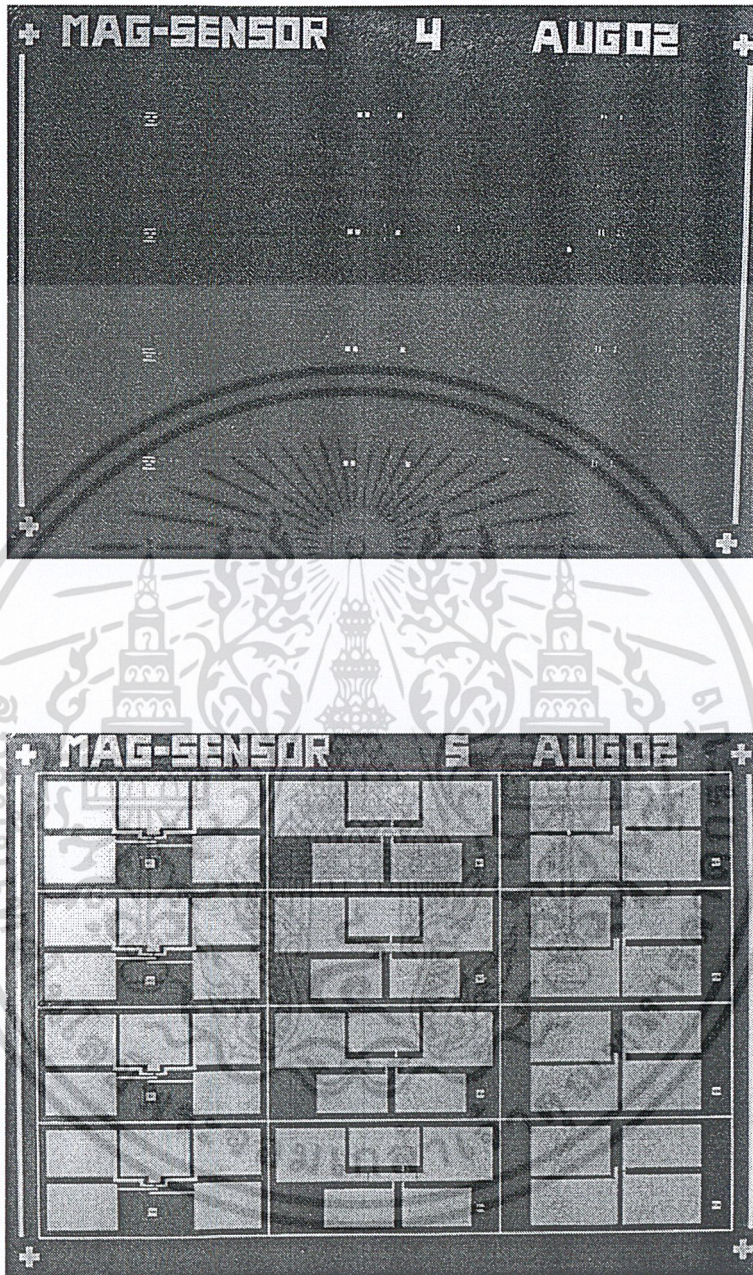
มาส์คที่ 5: Aluminum Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization) เพื่อสะกัดชั้นอะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



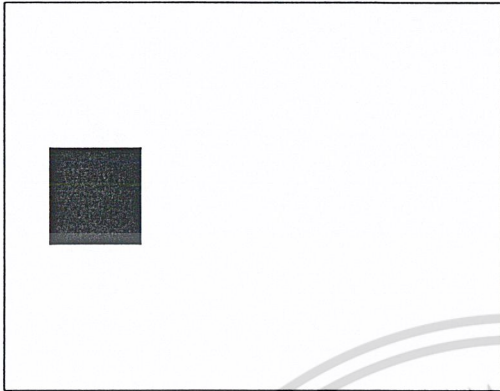
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



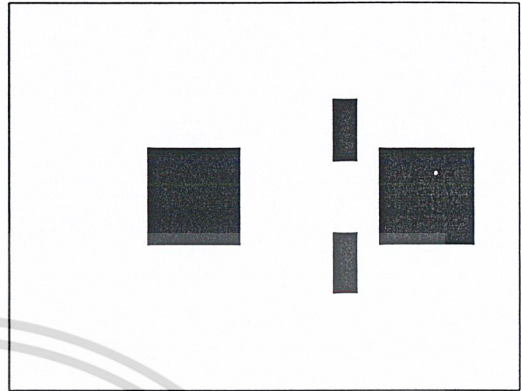
รูป 3.3 รูปร่างของมาส์คแต่ละมาส์คหลังการตัด

เมื่อเราได้มาส์คแล้ว เราจะทำการถ่ายมาส์คลงบนกระจกเพื่อใช้เป็นหน้ากากบังแสงใน
 กระบวนการสร้างอีกทีหนึ่ง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mask1 Body Mask



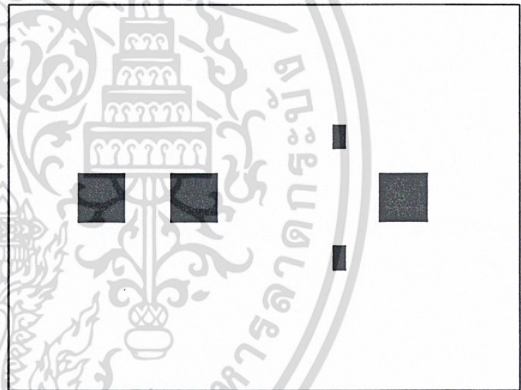
Mask2 Source, Drain, Sensor Contact Mask



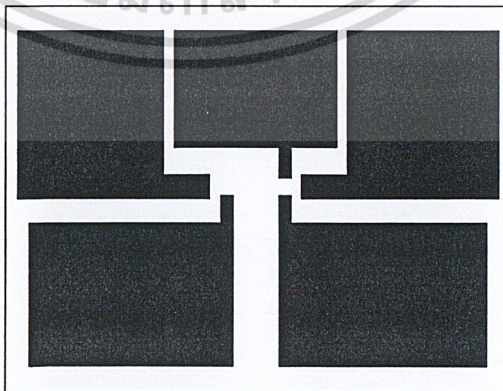
Mask3 Gate Mask



Mask4 Contact Windows Mask



Mask5 Aluminum Mask



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูป 3.4 กระดาษ Mask ที่ใช้ในการออกแบบมอดูลเซลล์เฟลท
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการสร้างมอสฮอลล์เฟลท

* การเตรียมแผ่นซิลิคอน

ในการสร้างมอสฮอลล์เฟลท จะใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (111) ซึ่งจากการวัดค่า Resistivity ได้ $8.28 \Omega\text{-cm}$ ที่ $40 \text{ mV } 100 \mu\text{A}$ สำหรับความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นนี้จะมี ความหนาประมาณ $400 \mu\text{m}$

การทำความสะอาดผิวของซิลิคอนในครั้งแรก

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) 2 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรด HNO_3 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2

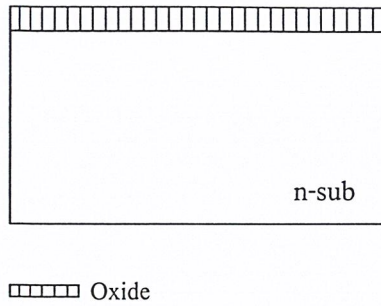


รูป 3.5 การเตรียมแผ่นซิลิคอน

* กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์

นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปทำการสร้างชั้น SiO_2 โดยวิธี Dry Oxidation ที่อุณหภูมิ $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ในเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นใช้วิธี Wet Oxidation ที่อุณหภูมิ $85 \text{ }^\circ\text{C}$ ในเวลา 40 นาทีและใช้ Dry Oxidation เป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ใช้เวลา 2 ชั่วโมง ก็ได้ Oxide เคลือบอยู่บนแผ่นซิลิคอน จะได้ความหนาซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 5000 \AA

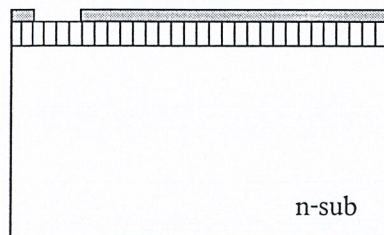
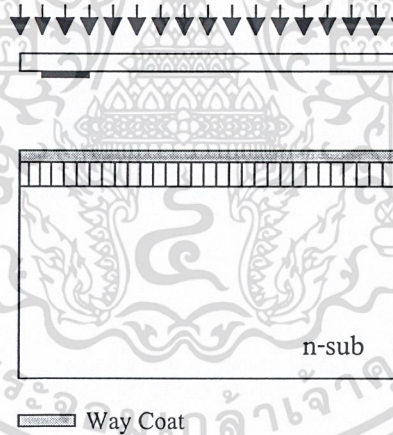
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.6 การสร้างชั้นออกไซด์

* กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์

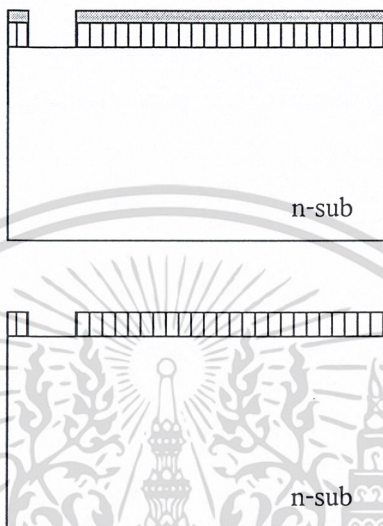
โดยนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการสร้างชั้น SiO_2 แล้วไปทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way Coat) จากนั้นนำไปฉายแสง UV โดยผ่านโฟโตมาสก์ซึ่งเป็นกระจกแผ่นที่ 1 (Body Mask) และทำการ Develop จะได้ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยสงวนสิทธิ์ในเชิงพาณิชย์
รูป 3.7 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงานขณะทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังไม่มีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งไปยังศูนย์บริการลูกค้า

* Oxide Etching

ทำการสกัดชั้น SiO_2 โดยจุ่มในสารละลาย Buffer ซึ่งมีอัตราการกัด $1000 \text{ \AA}/\text{min}$ แล้วจุ่มในน้ำบริสุทธิ์จึงเป่าให้แห้งจากนั้นนำไปลอกฟิล์มออก

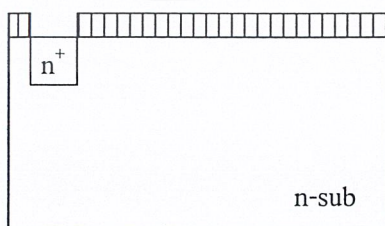


รูป 3.8 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการสกัด SiO_2

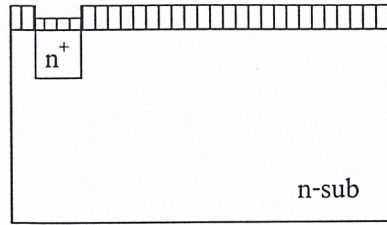
(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการลอกชั้นฟิล์มแล้ว

* กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส

เมื่อทำการสกัดชั้น SiO_2 แล้วจะทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสส่วนที่มี SiO_2 ก็ขึ้นอยู่กับฟอสฟอรัสจะไม่สามารถแพร่เข้าไปได้ เมื่อทำการแพร่ฟอสฟอรัสเสร็จแล้วก็จะทำการสร้าง SiO_2 โดยวิธีการ Oxidation อีกครั้งหนึ่ง



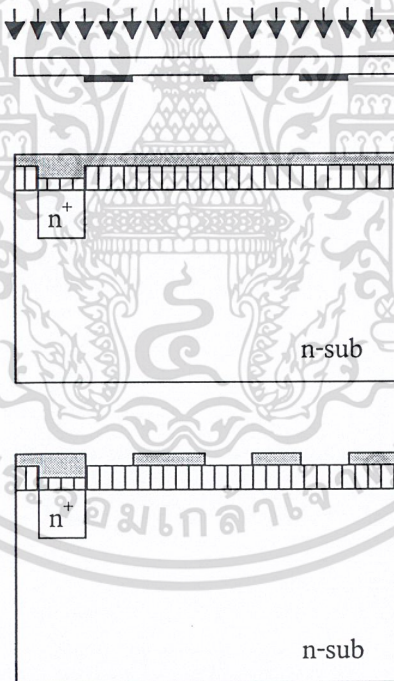
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.9 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส
 (ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการ Oxidation อีกครั้งหนึ่ง

* กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีมาสก์ 2

นำชิ้นงานไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ จากนั้นนำชิ้นงานไปฉายแสง UV โดยผ่านโฟโต้มาสก์ซึ่งเป็นกระจกแผ่นที่ 2 (Source ,Drain ,Sensor Contact Mask) แล้วทำการ Develop

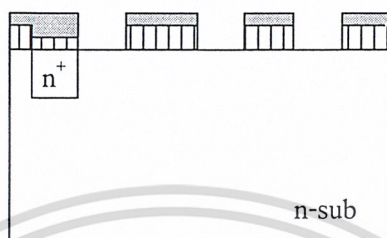


รูป 3.10 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน ขณะทำการฉายแสงผ่านโฟโต้มาสก์ 2
 (ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน หลังทำการ Develop แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* กระบวนการ Oxide Etching

ทำการสกัดชั้น SiO_2 โดยจุ่มในสารละลาย Buffer แล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นนำไปลอกฟิล์มออก



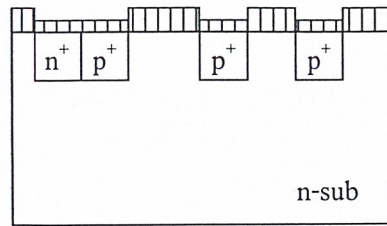
รูป 3.11 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการสกัด SiO_2
(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านการลอกฟิล์มแล้ว

* กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน

หลังจากลอกชั้น SiO_2 แล้ว จะทำการแพร่สารเจือโบรอน เพื่อสร้างส่วนซอส, เดรน และ เซนเซอร์คอนแทค จากนั้นทำการ Drive-in ประมาณ 40 นาที แล้วจึงทำการสร้าง SiO_2 ด้วยวิธีการ Oxidation อีกครั้งหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

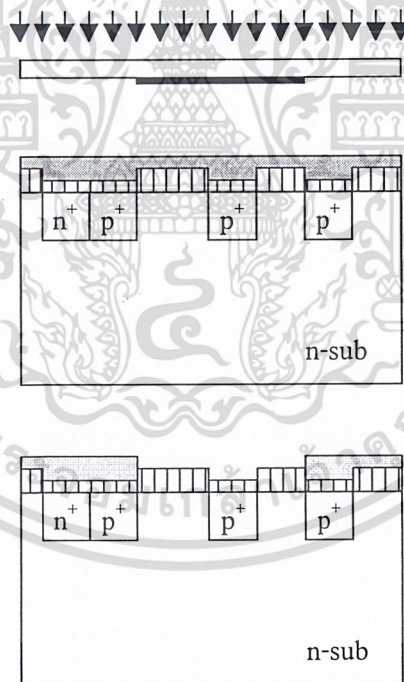


รูป 3.12 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการแพร่สารเจือโบรอน

(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการ Oxidation

* กระบวนการโฟโวลติโคราฟี่มาส์ค3

เมื่อทำการสร้าง SiO_2 เคลือบทับแล้ว ไปทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ จากนั้นนำชิ้นงานไปฉายแสง UV โดยผ่านโฟโวลต์มาส์ค 3 (Gate Mask)



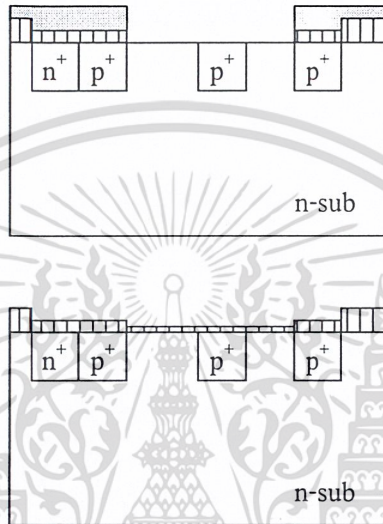
รูป 3.13 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงานขณะทำการฉายแสงผ่านโฟโวลต์มาส์ค 3

(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงานขณะทำการฉายแสง และ Develop แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* กระบวนการ Oxide Etching

ทำการสกัดชั้น SiO_2 โดยจุ่มลงในสารละลาย Buffer แล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นนำไปลอกฟิล์มออก แล้วทำการสร้างชั้น SiO_2 โดยวิธี Dry Oxidation ใช้เวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 1000°C จะให้ความหนาเขตประมาณ 1100 Å

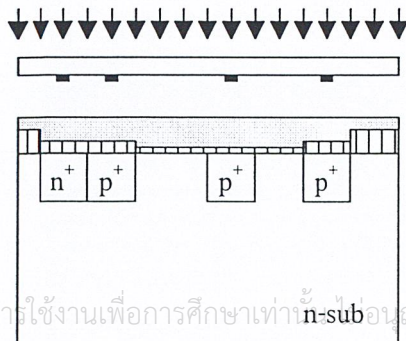


รูป 3.14 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงานขณะผ่านกระบวนการ Oxidation Etching

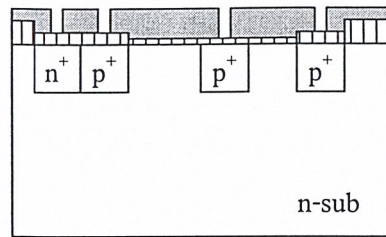
(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อทำการลอกฟิล์มแล้วทำการสร้าง SiO_2 ที่บางมากเพื่อเป็นส่วนเกต

* กระบวนการโฟโวลติโกราฟีมาสค์ 4

ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ จากนั้นนำไปฉายแสง UV โดยผ่านโฟโวลติโกราฟีมาสค์ 4 (Contact Mask)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น n-sub อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

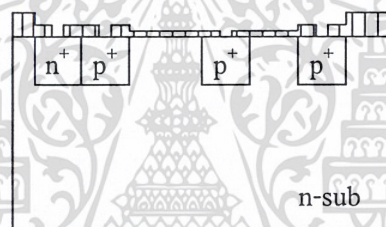


รูป 3.15 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน ขณะทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ 4

(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อทำการ Develop แล้ว

* กระบวนการ Oxide Etching

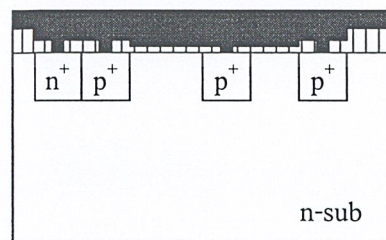
ทำการสกัด SiO_2 เพื่อเป็นส่วน Contact



รูป 3.16 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อทำการ Oxide Etching และลอกฟิล์มออกแล้ว

* กระบวนการ Metalization

จะเป็นกระบวนการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2.5×10^{-6} TORR ในเวลา 5 ชั่วโมง

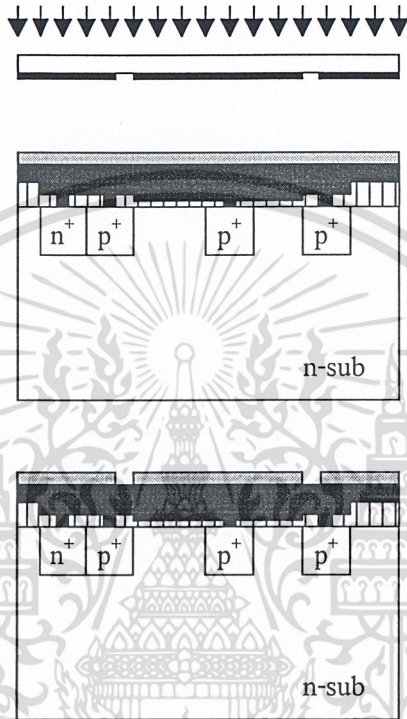


รูป 3.17 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อทำการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* กระบวนการ โฟโวลิตโรกราฟิมาส์ค 5

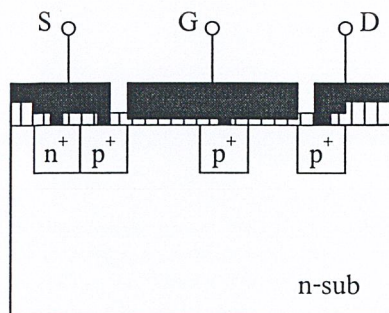
เมื่อทำการเคลือบอะลูมิเนียมเรียบร้อยแล้ว จะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) แล้วนำไปฉายแสง UV แล้วนำไปทำการ Develop



รูป 3.18 (ก) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อทำการฉายแสงผ่านโฟโวลิตมาส์ค 5
(ข) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อทำการ Develop แล้ว

* กระบวนการ Al-Etching

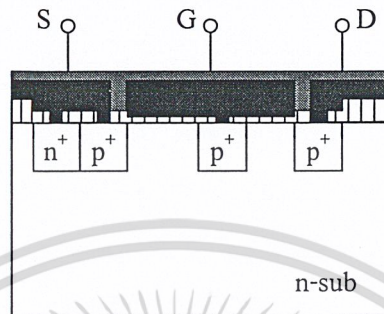
เมื่อทำการสกัดชั้นอะลูมิเนียม โดยการจุ่มสารละลายที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C



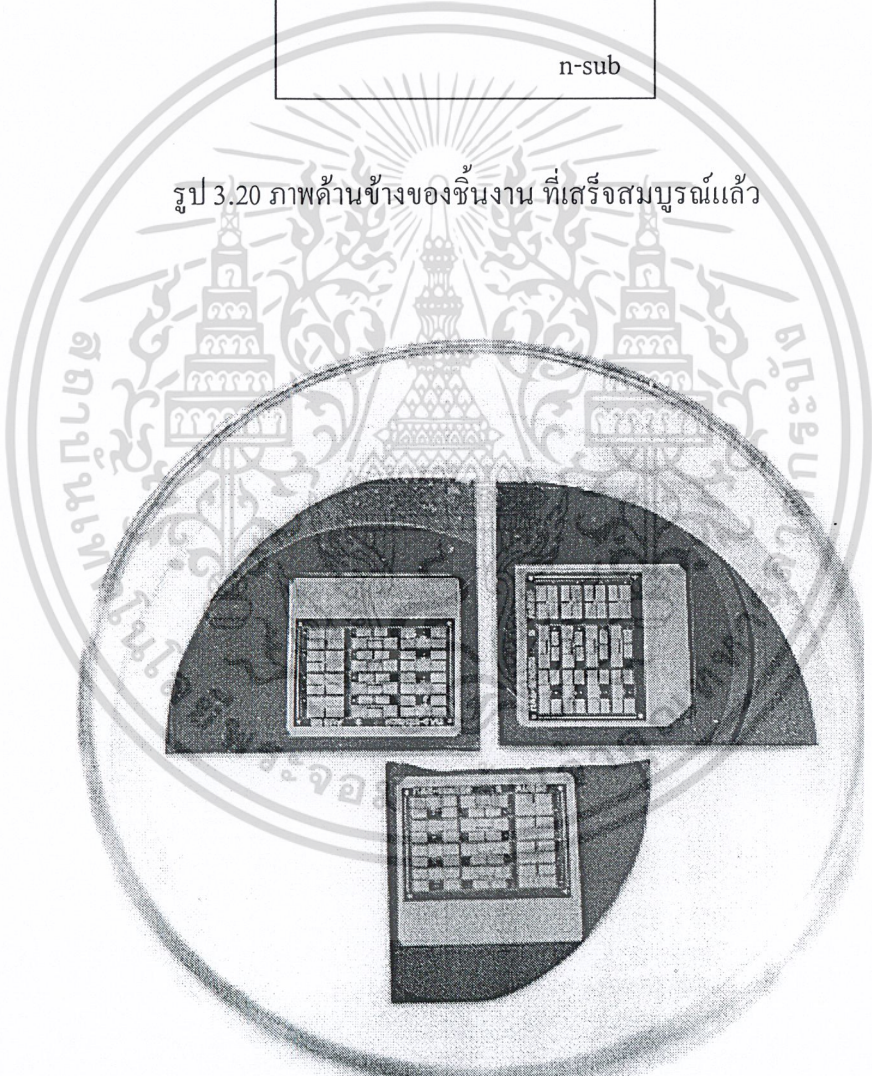
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูป 3.19 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน เมื่อทำการสกัดชั้นอะลูมิเนียม และทำการลอกฟิล์มแล้ว

* กระบวนการ Sintering

เป็นการเคลือบผิวของชิ้นงาน โดยวิธี Dry N₂ ที่ 1000 °C/min ใช้เวลา 12 นาที



รูป 3.20 ภาพด้านข้างของชิ้นงาน ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว



รูป 3.21 อุปกรณ์มอสซออลดีเพลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

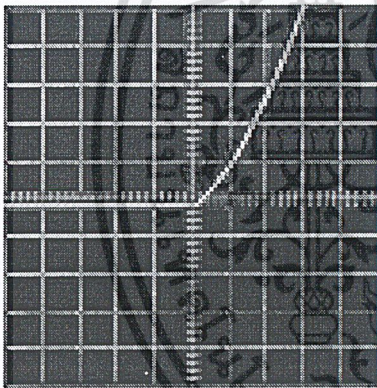
บทที่ 4

การวัด และการทดลอง

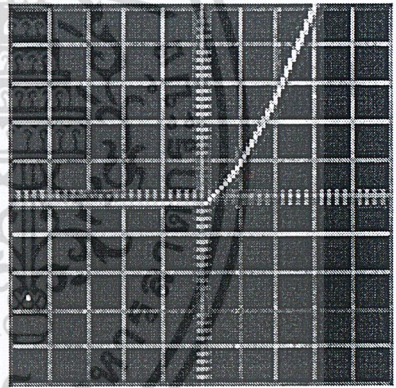
ในการใช้งานอุปกรณ์เซ็นเซอร์โดยทั่วๆ ไป สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสัญญาณทางด้านเอาต์พุตมีค่าน้อยมาก ทำให้เกิดการรบกวนจากสัญญาณต่างๆ ได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันสัญญาณรบกวนทั้งที่เกิดจากตัวอุปกรณ์เอง และอาจเกิดจากเครื่องมือวัด เพื่อให้ได้ค่าถูกต้องมากที่สุด

จากการออกแบบและสร้างมอดูลสอลต์เพลทให้มีขนาดกว้าง (W), ยาว (L) ตามค่าในการทดลองนั้นทำให้เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

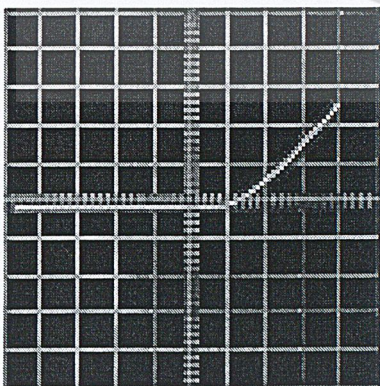
4.1 การวัดรอยต่อพี-เอ็น ในมอดูลสอลต์เพลท



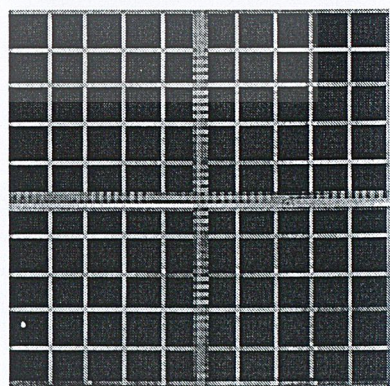
ขาซอส-ขาเซ็นเซอร์คอนแทก1



ขาซอส-ขาเซ็นเซอร์คอนแทก2

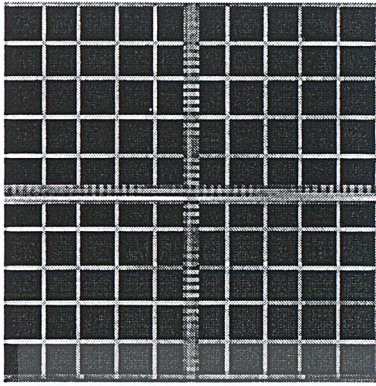


ขาซอส-ขาแคโรน

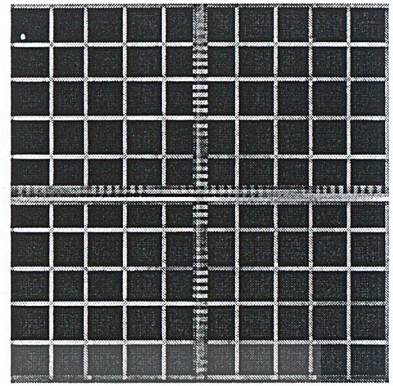


ขาซอส-ขาเกท

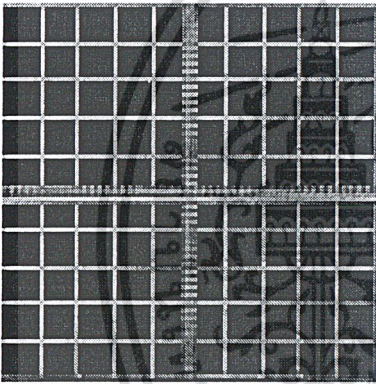
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการแจ้งให้ทราบ กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสาร



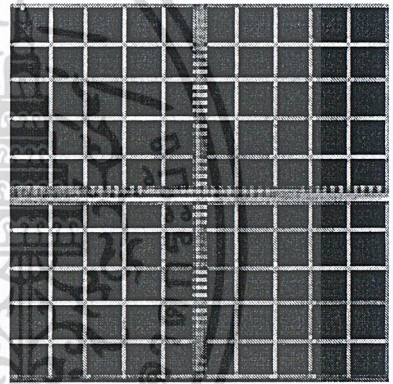
ขาเกท-ขาเดรน



ขาเกท-ขาเซ็นเซอร์คอนแทค1



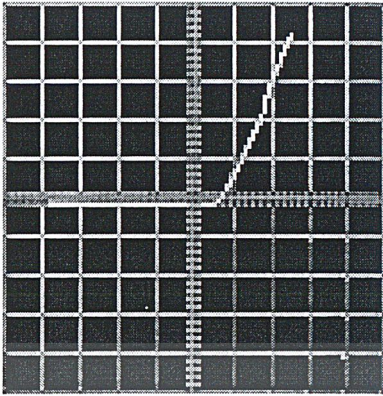
ขาเกท-ขาเซ็นเซอร์คอนแทค2



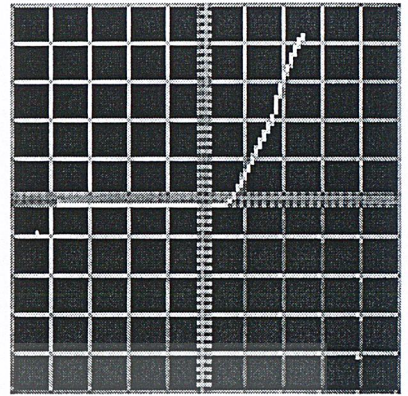
ขาเซ็นเซอร์คอนแทค1-ขาเซ็นเซอร์คอนแทค2

รูป 4.1 กราฟแสดงรอยต่อระหว่างขาต่างๆ ในมอสซอสต์เพลทที่ $\frac{L}{W} = 4$

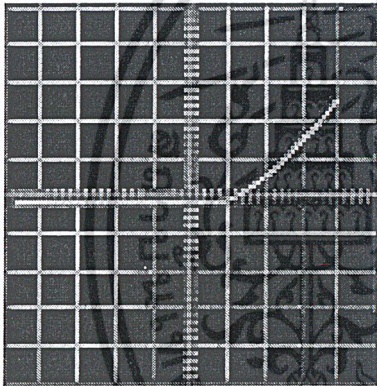
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



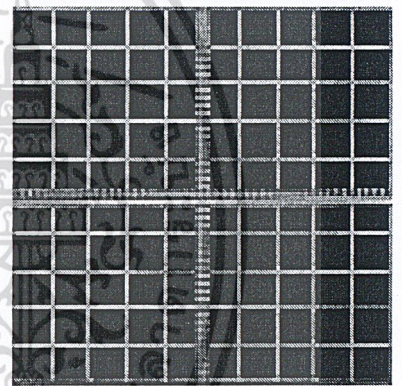
ขาชอส-ขาเซ็นเซอร์คอนแทค1



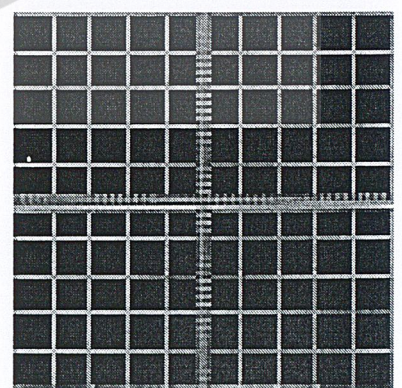
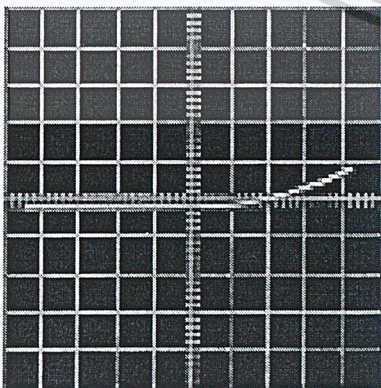
ขาชอส-ขาเซ็นเซอร์คอนแทค2



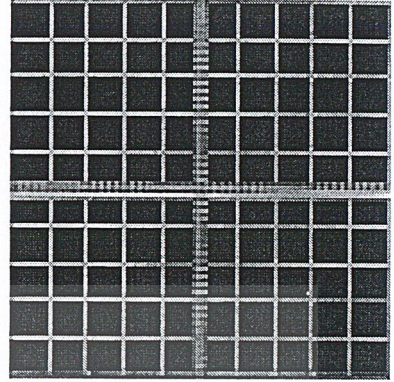
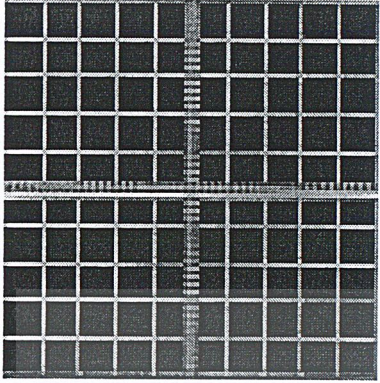
ขาชอส-ขาเดรน



ขาชอส-ขาเกท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ขาเกท-ขาเดรน ขาเกท-ขาเซ็นเซอร์คอนแทค1
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ขาเกท-ขาเซ็นเซอร์คอนแทค2

ขาเซ็นเซอร์คอนแทค1-ขาเซ็นเซอร์คอนแทค2

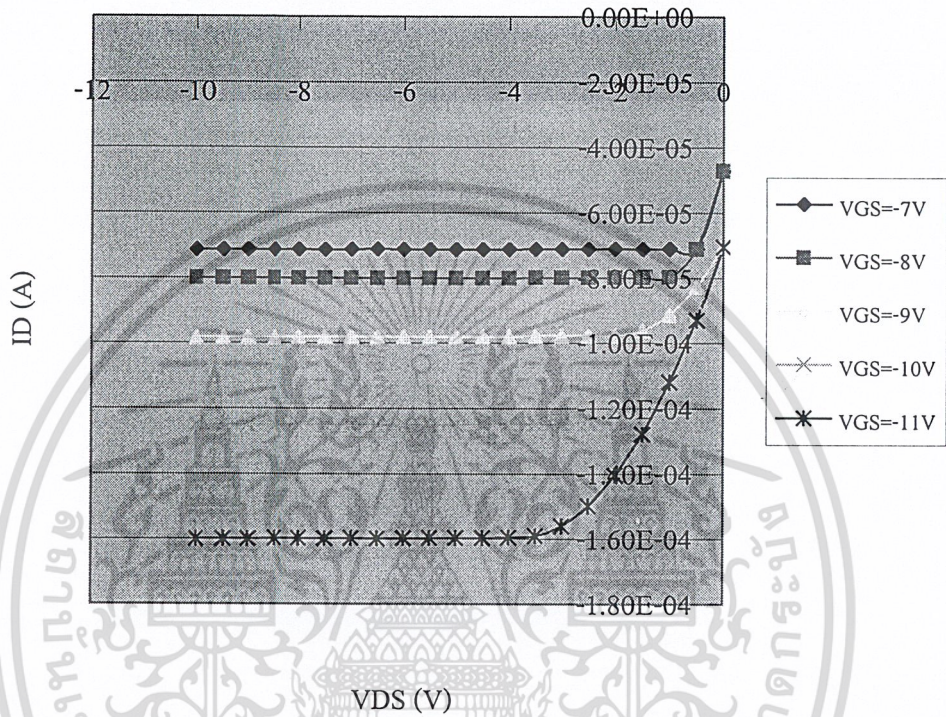
รูป 4.2 กราฟแสดงรอยต่อระหว่างขาต่างๆ ในมอสฮอตเพลทที่ $\frac{L}{W} = 6$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

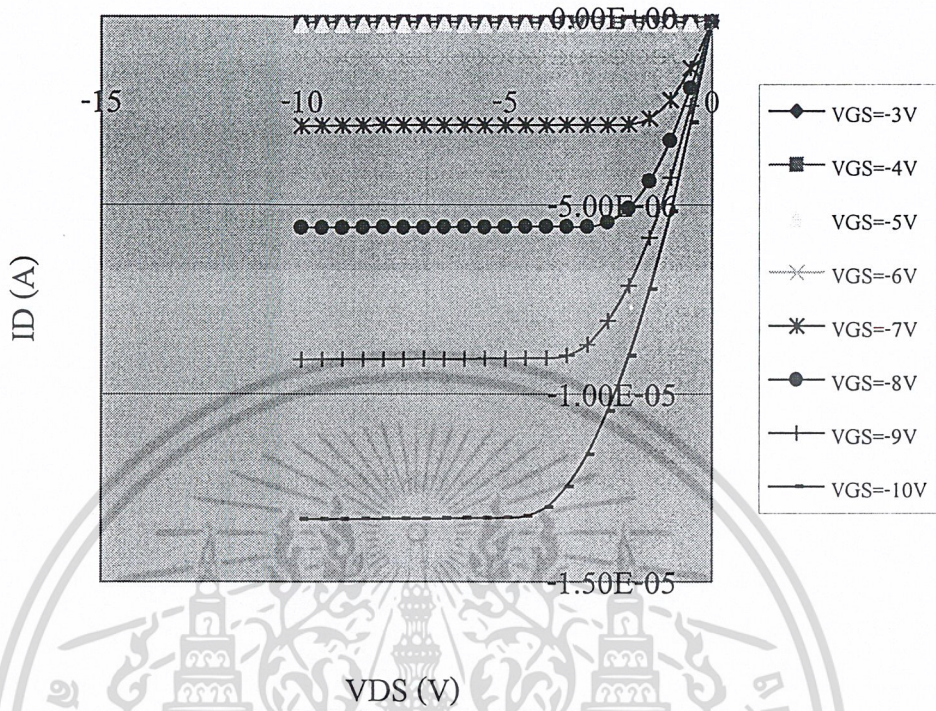
4.2 การวัด I-V Characteristics

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าทั้ง 3 ชั้นของมอสซอลล์เฟลทคือ ขาเกท, ขาซอส, ขาเดรน มีลักษณะการทำงานเป็นมอสเฟท โดยทำการป้อนแรงดันที่ขาเกท และขาเดรน จะได้กราฟ I-V ดังนี้



รูป 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ I_D - V_{DS} ในมอสซอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 4$

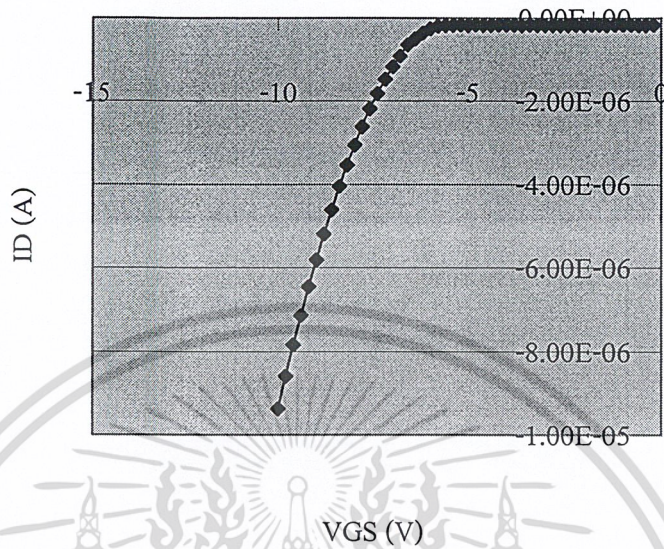
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



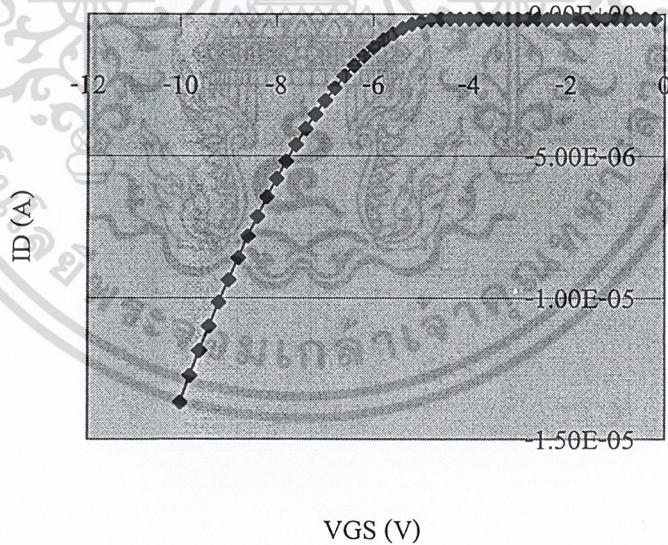
รูป 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ I_D - V_{DS} ในมอสซอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวัดหาค่าแรงดันขั้วเริ่ม (V_T)



รูป 4.5 กราฟแสดงค่าแรงดันขั้วเริ่ม (V_T) ในมอสฮอลส์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 4$

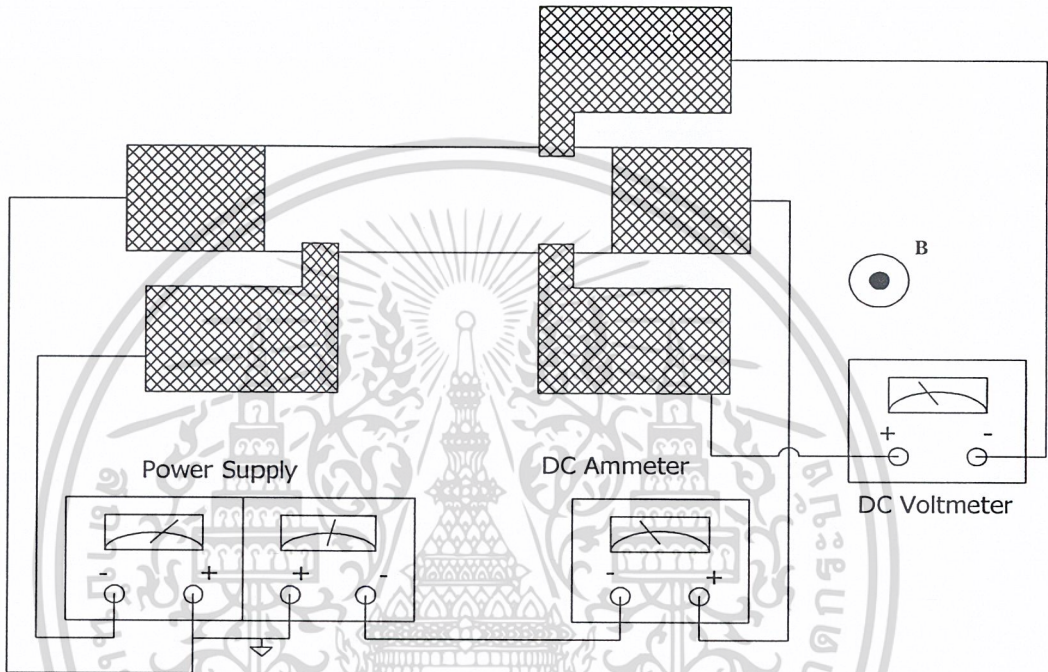


รูป 4.6 กราฟแสดงค่าแรงดันขั้วเริ่ม (V_T) ในมอสฮอลส์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

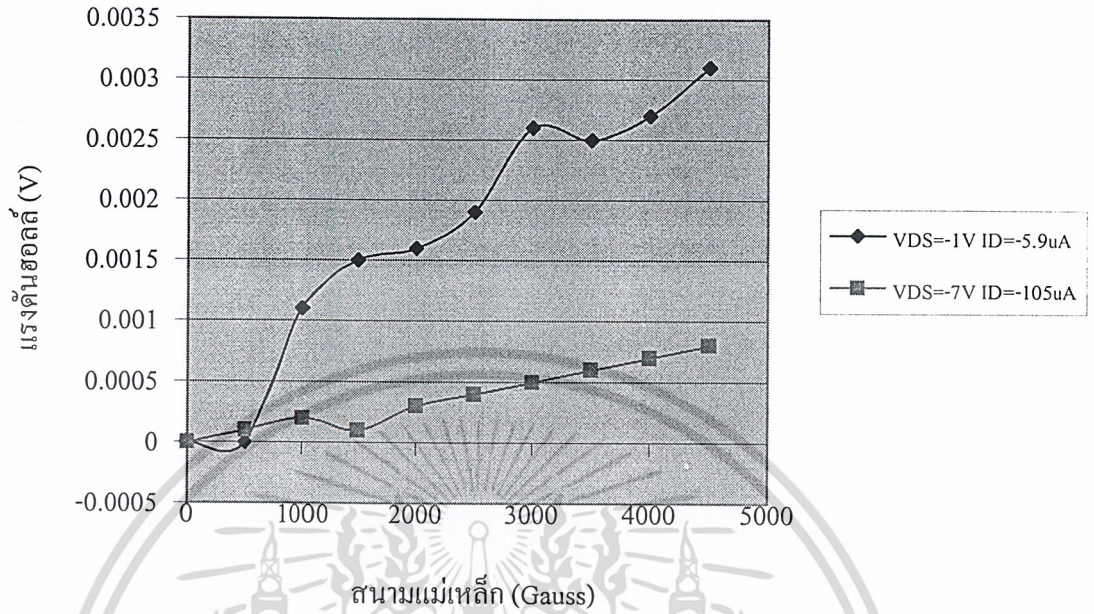
4.4 การวัดแรงดันฮอลล์ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก

หลังจากเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดดังในรูป 4.7 ก็ดำเนินการวัดโดยการป้อนแรงดันเคอร์เรนซ์ในช่วง 0-10 V ที่แรงดันเกต-ซอสค่าต่างๆ โดยการจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับกระแสเดรน ในช่วง 0-5000 Gauss ได้ผลของแรงดันฮอลล์ ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

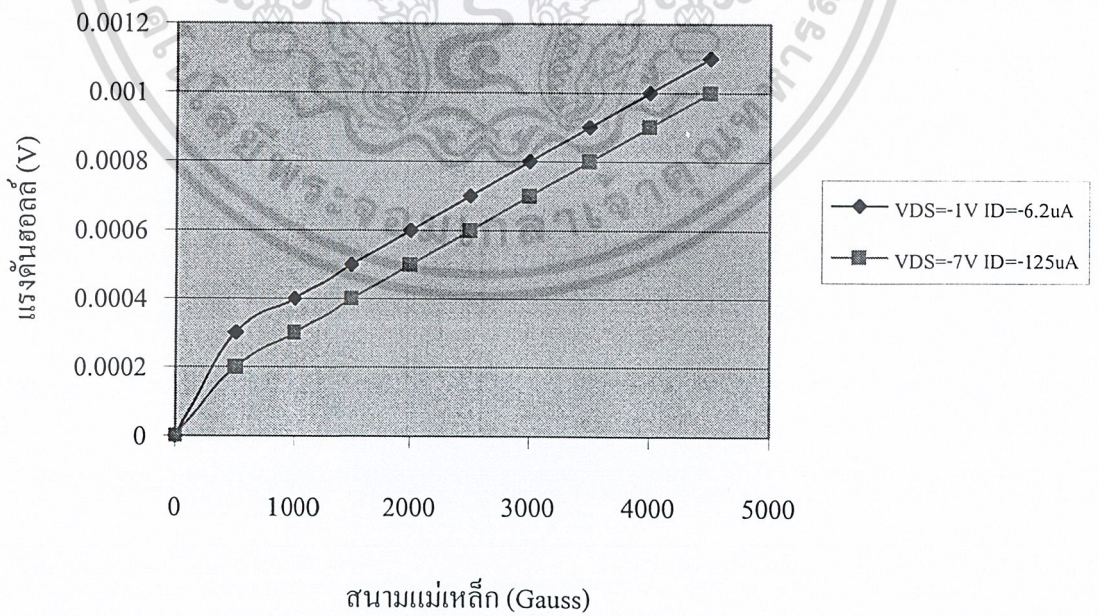


รูป 4.7 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันฮอลล์

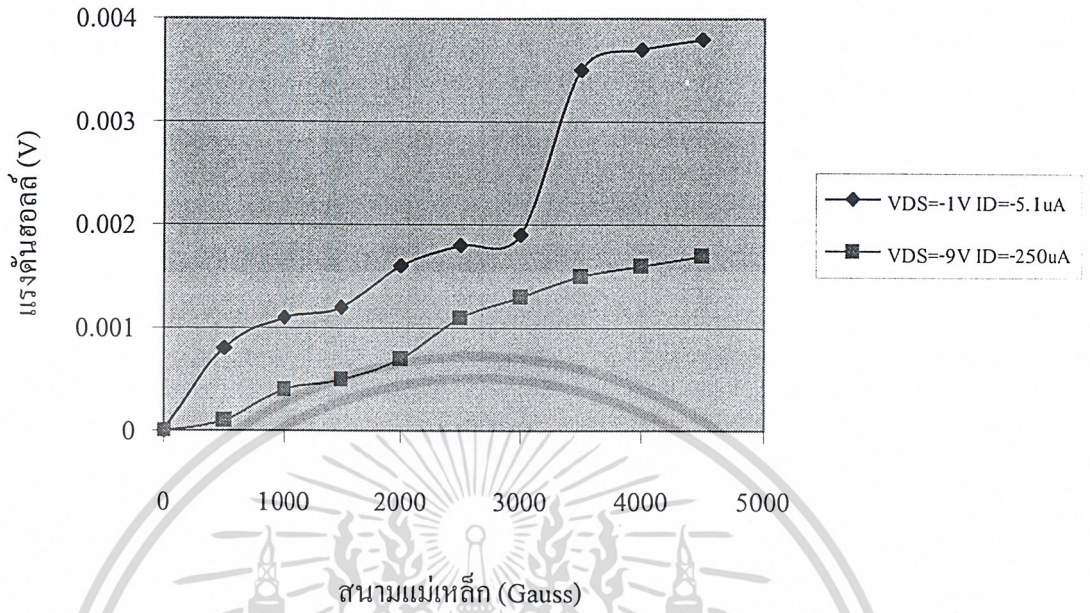
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -8$ V ที่ $\frac{L}{W} = 4$

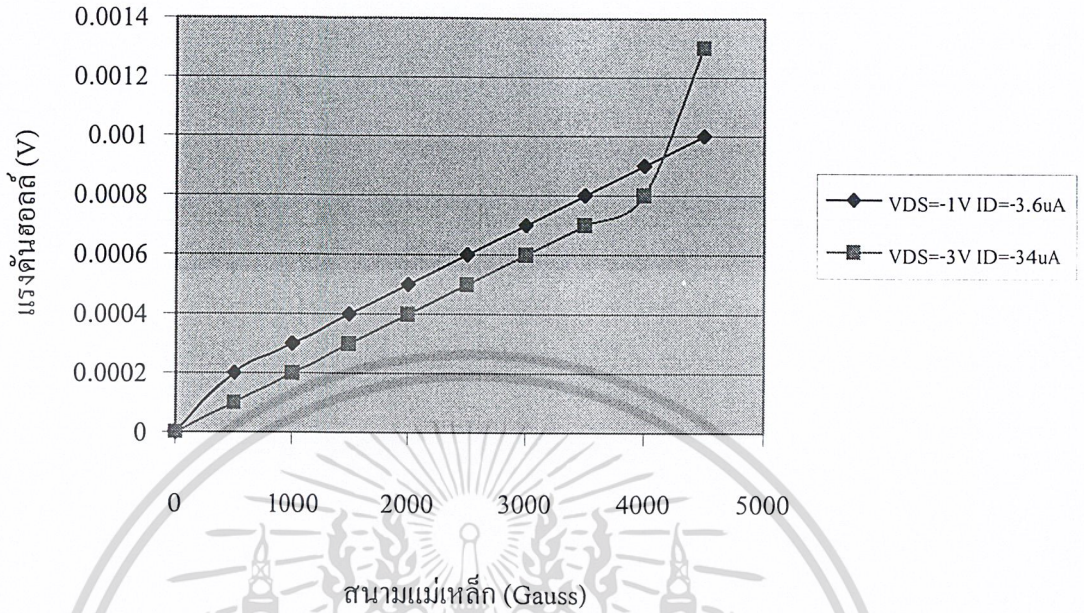


เอกสารนี้เป็นรูป 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -9$ V ที่ $\frac{L}{W} = 4$ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

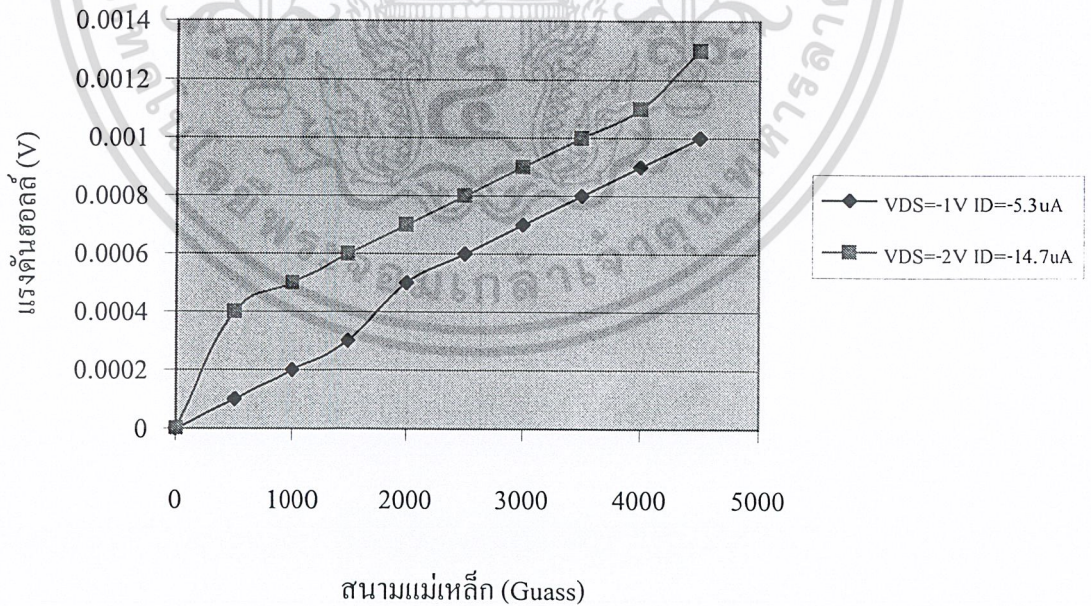


รูป 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขอลดกับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -10\text{ V}$ ที่ $\frac{L}{W} = 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

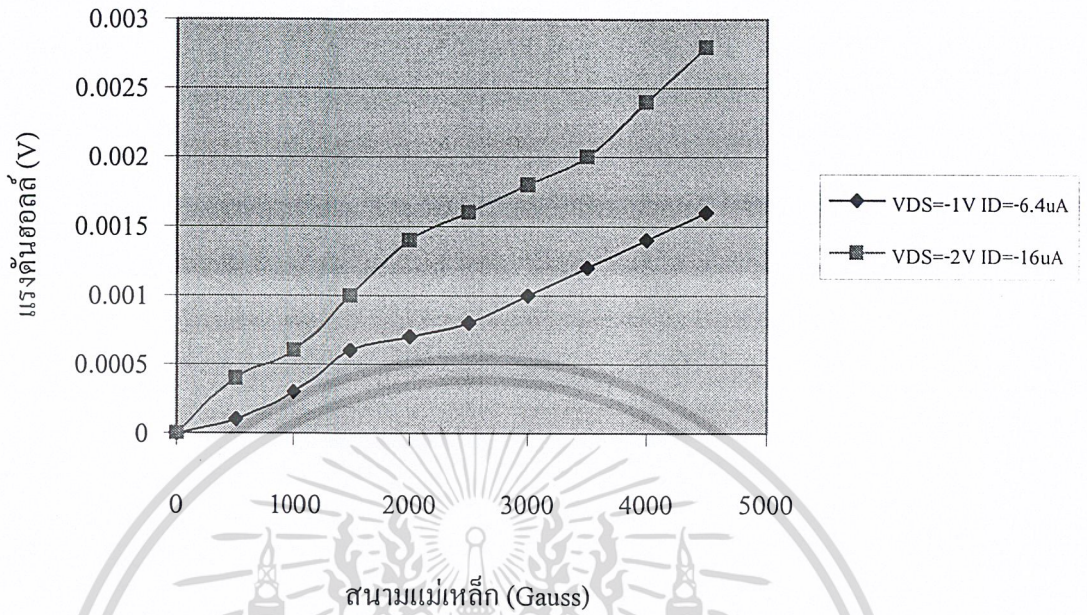


รูป 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -7 \text{ V}$ ที่ $\frac{L}{W} = 6$



รูป 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์กับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -8 \text{ V}$ ที่ $\frac{L}{W} = 6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขอลดกับสนามแม่เหล็กที่ $V_{GS} = -9 V$ ที่ $\frac{L}{W} = 6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ค่าออฟเซ็ท (Off Set)

จากการทดลองมอสซอลล์เฟลท มีค่าออฟเซตอยู่ค่าหนึ่ง และเมื่อป้อนแรงดันเกต-ซอสกับแรงดันเดรน-ซอส มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าออฟเซ็ทก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตาราง 5.1 ค่าออฟเซ็ทของมอสซอลล์เฟลท แต่ละตัวที่ค่าแรงดัน V_{GS} , V_{DS} ค่าต่างๆ

V_{GS}	V_{DS}	แรงดันค่าออฟเซ็ทที่ $\frac{L}{W}$ ค่าต่างๆ	
		$\frac{L}{W} = 4$	$\frac{L}{W} = 6$
-8	0	-0.0003	0.0055
	-1	-0.00569	0.129
	-2	0.2049	0.3004
	-3	-0.03546	0.709
	-4	0.3787	1.34
	-5	0.3787	2.056
	-6	0.3787	2.72
	-7	0.3788	2.8
	-8	0.3787	2.8081
	-9	0.3787	2.88
	-10	0.3790	2.8871
-9	0	-0.0014	0.004
	-1	0.0507	0.1162
	-2	0.0707	0.2563
	-3	0.3251	0.4634
	-4	0.4990	0.8056
	-5	0.4660	1.32
	-6	0.4661	1.3612
	-7	0.4661	1.3633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่มีให้ตัดแบบลงเนื้อหา และต้องยังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{GS}	V_{DS}	แรงดันค่าออฟเซ็ทที่ $\frac{L}{W}$ ค่าต่างๆ	
		$\frac{L}{W} = 4$	$\frac{L}{W} = 6$
	-8	0.4660	1.37
	-9	0.4661	1.3814
	-10	0.4661	1.3865

ซึ่งสาเหตุของออฟเซ็ทอาจเกิดจากความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ทำการสร้างขึ้นมานั้นมีความหนาไม่เท่ากัน หรืออาจเกิดจากความไม่สมมาตรของรูปร่างมอสซอลล์เพลท ซึ่งค่าออฟเซ็ท นั้นสามารถลดให้น้อยลงได้โดยการใช้วงจร Divider

5.2 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) คือ ผลการตอบสนองแรงดันฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็กที่เป็นลักษณะเชิงเส้นจากการทดลองพบว่า มอสซอลล์เพลทที่มีค่า $L = 800$, $W = 200$ มีความเป็น Linearity ช่วงที่มอสซอลล์มีลักษณะการทำงานในย่าน Non-Saturation เช่นเดียวกับมอสซอลล์เพลทที่มีค่า $L = 1,200$, $W = 200$ มีความเป็น Linearity ในช่วงที่มอสซอลล์เพลท ทำงานในย่าน Non-Saturation

5.3 ความไว (Sensitivity)

ค่า Sensitivity คือ อัตราส่วนของแรงดันฮอลล์กับกระแสเดรน คูณด้วยสนามแม่เหล็ก ซึ่งจากการทดลองพบว่ามอสซอลล์เพลทจะมีค่า Sensitivity ดังตาราง 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.2 ค่า Sensitivity ของมอดชอลต์เฟลทแต่ละตัว

V_{GS}	V_{DS}	ค่า Sensitivity ที่ $\frac{L}{W}$ ค่าต่างๆ	
		$\frac{L}{W} = 4$	$\frac{L}{W} = 6$
-8	0	0	0
	-1	2.26	5.49
	-2	1.9	4.56
	-3	1.8	43.7
	-4	1.4	5.15
	-5	1.08	5.5
	-6	0.94	5.49
	-7	0.8	4.58
	-8	0.69	3.67
	-9	0.522	3.34
	-10	0.47	2.918
-9	0	0	0
	-1	1.8	4.09
	-2	1.79	3.62
	-3	1.7	3.04
	-4	1.59	3.21
	-5	1.3	3.62
	-6	1.09	2.66
	-7	0.83	2.17
	-8	0.79	1.9
	-9	0.57	1.53
	-10	0.519	1.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

หลังจากการออกแบบ และทำการสร้างมอสซอลล์เฟลทบนฐานรองแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น โดยการออกแบบลักษณะของมอสซอลล์เฟลทจะมีพารามิเตอร์ที่พิจารณาอยู่ 2 ค่า คือ ความยาว, ความกว้าง ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันซอลล์ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ ได้ออกแบบอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลท ให้มีขนาด W และ L ดังตาราง 6.1

ตาราง 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวอุปกรณ์มอสซอลล์เฟลทที่ออกแบบไว้

Parameter ตัวที่	S (μm)	W (μm)	L (μm)	$\frac{L}{W}$
1	60	200	600	3
2	60	200	800	4
3	60	200	1,000	5
4	60	200	1,200	6

สำหรับการทดลองครั้งนี้ในตอนแรกสุดได้ทำการวัดคุณสมบัติความเป็นมอสเฟท ซึ่งจะได้ว่า $\frac{L}{W} = 4$ และ $\frac{L}{W} = 6$ มีคุณสมบัติความเป็นมอสเฟทมากที่สุด ส่วน $\frac{L}{W} = 3$ และ $\frac{L}{W} = 5$ นั้นไม่แสดงออกถึงคุณสมบัติความเป็นมอสเฟท เพราะฉะนั้นจึงพิจารณาเฉพาะ $\frac{L}{W} = 4$ และ $\frac{L}{W} = 6$ เท่านั้น จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันเกต-ซอสค่าต่างๆ ตั้งแต่ 7, 8, 9 และ 10 V และป้อนแรงดันเดรน-ซอสตั้งแต่ 0-10 V และทำการป้อนสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-5000 Gauss จากนั้นทำการวัดขนาดของแรงดันซอลล์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของแรงดันเกต-ซอส, แรงดันเดรนซอส และสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองพบว่า

ที่อัตราส่วน $\frac{L}{W} = 6$ มี Sensitivity ดีที่สุด ประมาณ 43.7 mV/mA.T ที่แรงดันเกตซอสเท่ากับ -8 V และที่แรงดันเดรนซอสเท่ากับ -3 V โดยใช้งานในสนามแม่เหล็ก 4500 Gauss ส่วน $\frac{L}{W} = 4$ มี Sensitivity ดีที่สุดประมาณ 2.26 mV/mA.T ที่แรงดันเกตซอสเท่ากับ -8 V และที่แรงดันเดรนซอสเท่ากับ -1 V โดยใช้งานในสนามแม่เหล็ก 4500 Gauss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการทดลองทั้งหมดถือว่ามอสซอลล์เพลทที่มีอัตราส่วน $\frac{L}{W} = 6$ ถือว่าดีที่สุด เพราะมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงสนามแม่เหล็ก 0-4500 Gauss และมีค่า Sensitivity ที่มีสูง แต่ก็มีค่าออฟเซ็ทสูงเช่นกัน ฉะนั้นก่อนนำไปใช้งานจำเป็นต้องลดค่าออฟเซ็ทดังกล่าวเสียก่อน

นอกจากนั้นแล้วจากการทดลองการวัดแรงดันฮอลล์ความยุ่งยากอยู่ที่การป้องกันการสัญญาณรบกวน (Noise) ทั้งที่เกิดจากตัวอุปกรณ์เอง และอุปกรณ์ในการวัด สำหรับการทดลองในครั้งนี้ป้องกันการสัญญาณรบกวนโดยทำการ Shield ด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ที่สายสัญญาณต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

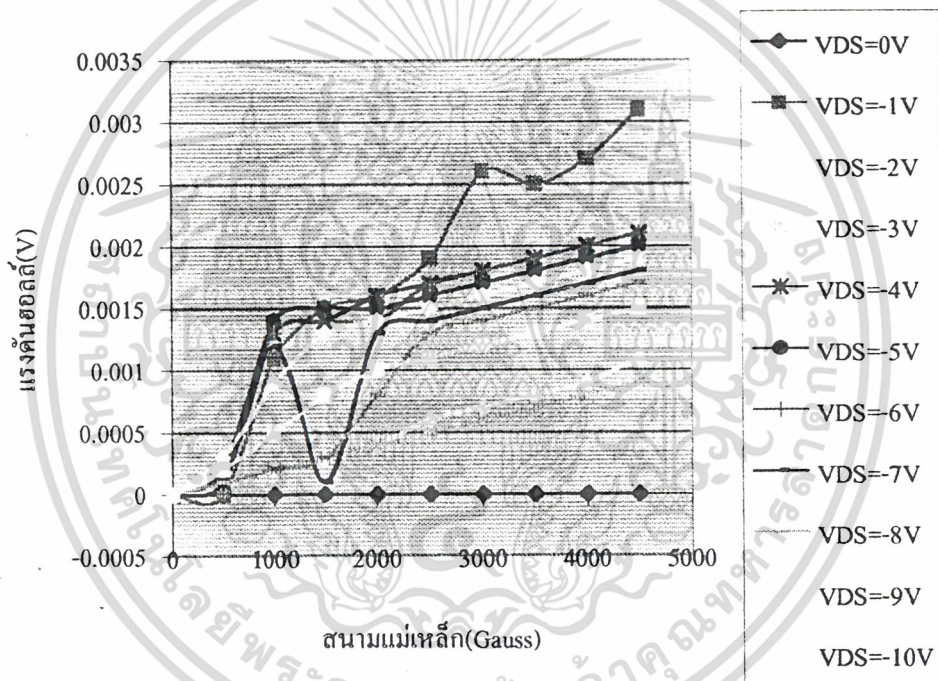
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง

ค่าแรงดันขอลต์ของมอสซอลต์เพลทที่ $\frac{L}{W} = 4$ โดยการป้อนแรงดันเดรนซอส และแรงดันเกตซอสค่าต่างๆ แล้วดูผลต่อการเปลี่ยนสนามแม่เหล็ก

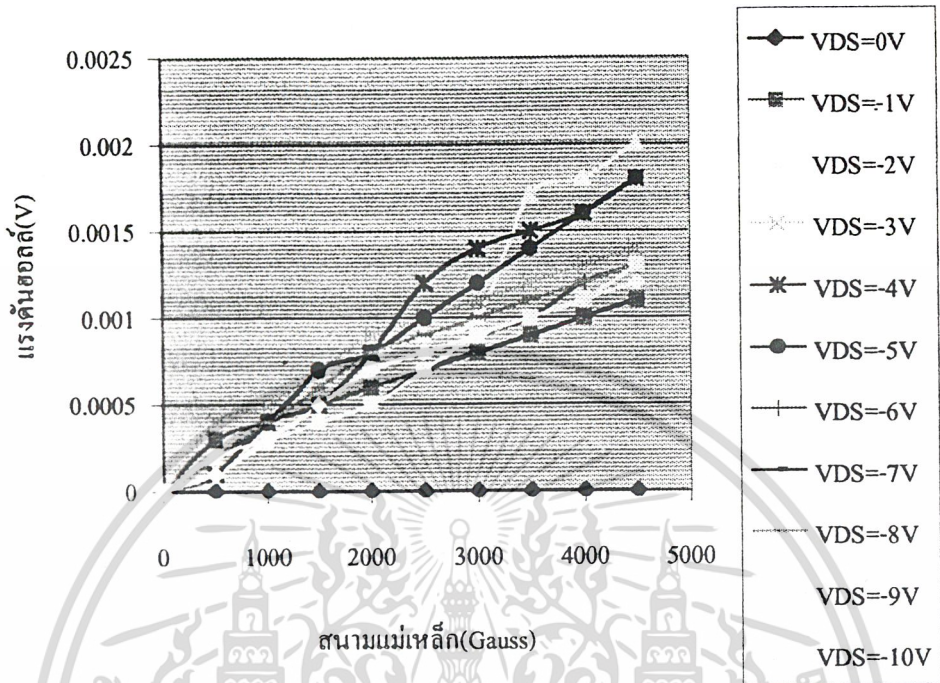
$L = 800 \mu\text{m}$, $W = 200 \mu\text{m}$

$V_{GS} = -8 \text{ V}$

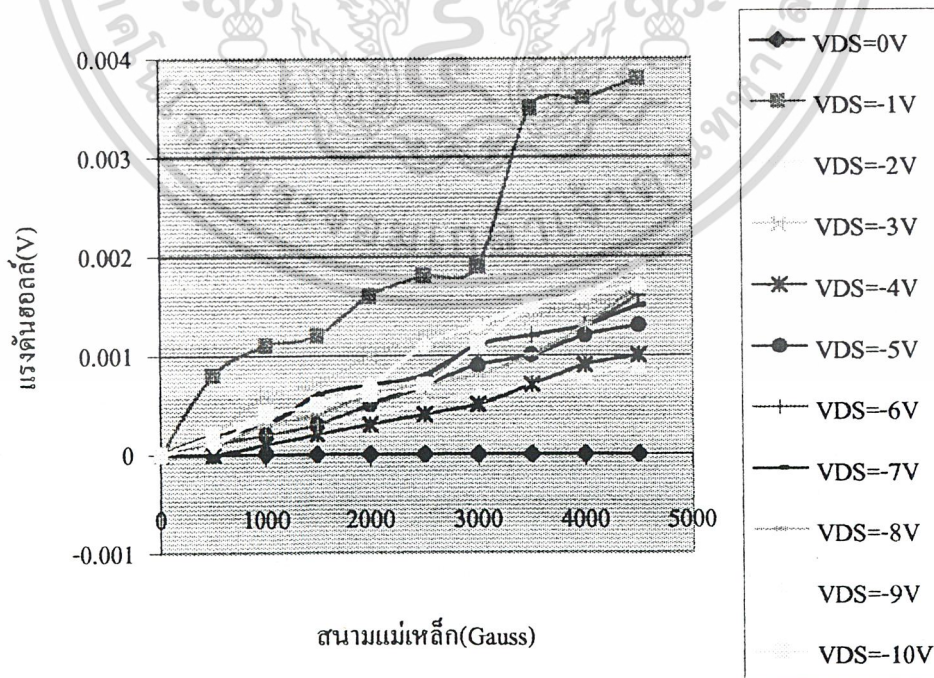


รูป ก1 กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันขอลต์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -8 \text{ V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{GS} = -9 \text{ V}$


รูป ก2 กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันขอลดที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -9 \text{ V}$

 $V_{GS} = -10 \text{ V}$


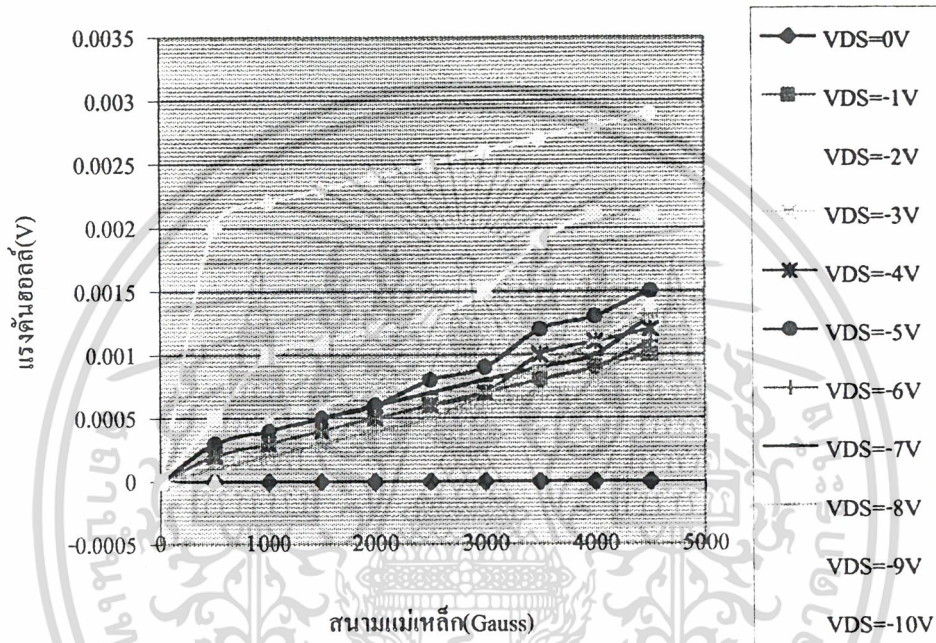
รูป ก3 กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันขอลดที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -10 \text{ V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันขอลล์ของมอสซอลล์เฟลทที่ $\frac{L}{W} = 6$ โดยการป้อนแรงดันเดรนซอส และแรงดันเกตซอสค่าต่างๆ แล้วดูผลต่อการเปลี่ยนสนามแม่เหล็ก

$L = 1,200 \mu\text{m}$, $W = 200 \mu\text{m}$

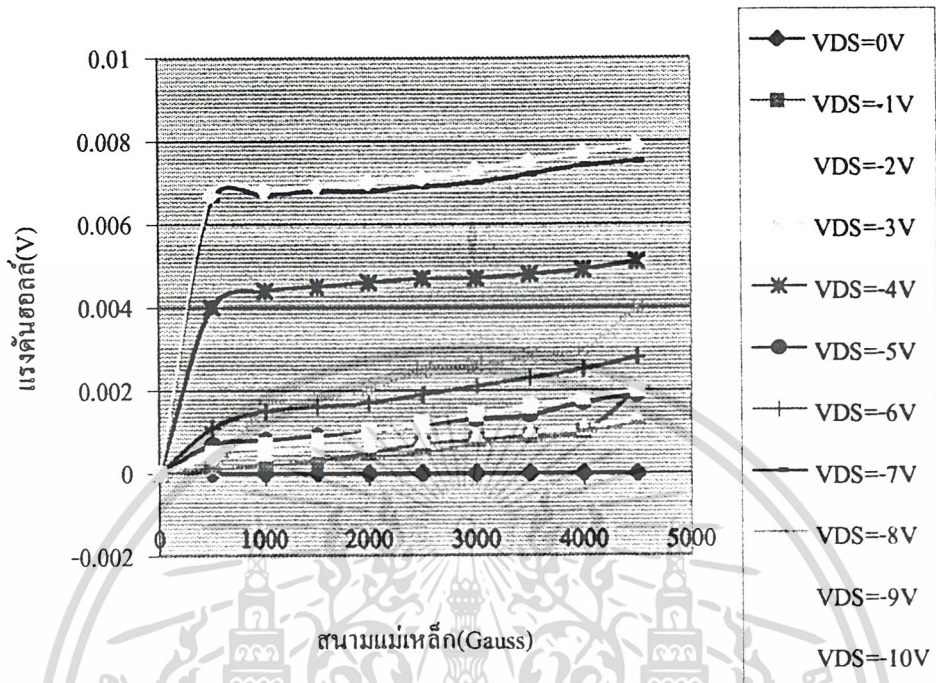
$V_{GS} = -7 \text{ V}$



รูป ก4 กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันขอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -7 \text{ V}$

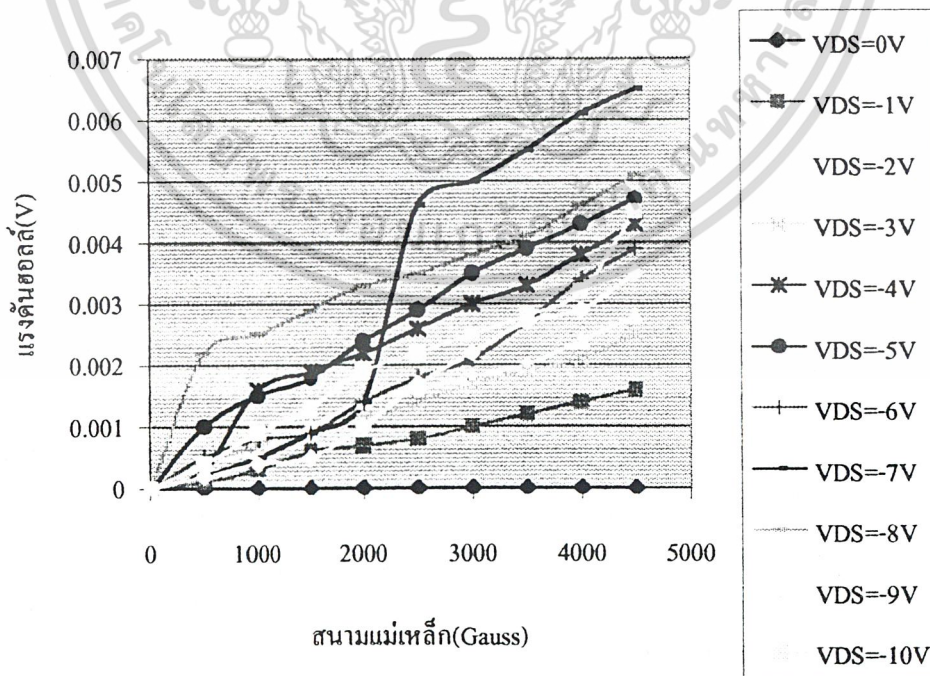
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{GS} = -8 \text{ V}$$



รูป ก5 กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -8 \text{ V}$

$$V_{GS} = -9 \text{ V}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูป ก6 กราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์ที่ V_{DS} ค่าต่างๆ $V_{GS} = -9 \text{ V}$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. สัญลักษณ์	
B	สนามแม่เหล็ก (T = เทสลา)
F	แรงลอเรนซ์ (N = นิวตัน)
I	กระแส (mA)
J_n	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm ²)
L	ความยาวของขั้วเคอร์เรนคอนแทค (mm)
P	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดพี (cm ⁻³)
N_A	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ (cm ⁻³)
N_D	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (cm ⁻³)
R_H	สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (C ⁻¹ m ³)
d	ความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์ (μm)
V_H	แรงดันฮอลล์ (mV)
W	ความกว้างของขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค (μm)
σ_n	ความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (Ω ⁻¹ cm ⁻¹)
μ_n	ความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน (cm ² /V-sec)
μ_p	ความคล่องตัวของประจุพาหะโฮล (cm ² /V-sec)
θ_H	มุมฮอลล์ (องศา)
ρ	พิกัดความต้านทาน (Ω-cm)
\mathcal{E}	สนามไฟฟ้า (V/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. กระบวนการสร้างมอดลล์เฟลท

1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน และการเช็คคุณสมบัติ
 - 1.1 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) และระบาย (111)
 - 1.2 พิกัดความต้านทาน 8.28 Ω -cm
 - 1.3 ความหนาของแผ่น 400 μ m
2. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก
 - 2.1 Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) 2 นาที
 - 2.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
 - 2.3 คัดในกรดไนตริก (HNO₃) 10 นาที
 - 2.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
 - 2.5 คัดในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - 2.6 คัดในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - 2.7 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
 - 2.8 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน
3. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน
 - 3.1 คัดใน Tricloroethylene 5 นาที
 - 3.2 Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
 - 3.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - 3.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - 3.5 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N₂)
4. การ Slice etching
 - 4.1 จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
 - 4.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - 4.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - 4.4 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N₂)
5. กระบวนการ Oxidation
 - 5.1 Dry Oxidation ด้วย Oxygen 1,200 cc/min 32 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1,100 °C
 - 5.2 Wet Oxidation ด้วย Oxygen 1,000 cc/min 40 นาที ที่อุณหภูมิ 85 °C
 - 5.3 Dry Oxidation ด้วย Oxygen 1,200 cc/min 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1,100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กระบวนการ Photolithography มาส์ค 1
 - 6.1 อบแผ่นไล่ความชื้น 120°C 1 ชั่วโมง
 - 6.2 เคลือบนำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat) spin 5,000 rpm
 - 6.3 อบฟิล์มที่ 90°C 30 นาที
 - 6.4 Alignment
 - 6.5 Develop ฟิล์ม โดย
 - 6.5.1 จุ่มใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
 - 6.5.2 จุ่มใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
 - 6.5.3 จุ่มใน Isotropy แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - 6.5.4 จุ่มใน Isotropy แก้วที่สอง 30 วินาที
 - 6.5.5 จุ่มใน Isotropy แก้วที่สาม 30 วินาที
 - 6.5.6 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - 6.5.7 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - 6.5.8 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)
 - 6.6 อบฟิล์มอีก 10 นาที
7. การให้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching)
 - 7.1 จุ่มในสารละลาย Buffer for Oxide
 - 7.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - 7.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - 7.4 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)
8. กระบวนการลอกฟิล์ม
 - 8.1 ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
 - 8.2 ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แก้วที่สอง 5 นาที
 - 8.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
 - 8.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
 - 8.5 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
 - 8.6 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)
9. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส
 - 9.1 เคลือบฟอสฟอรัสเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 9.2 Spin 5,000 rpm
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.3 Drive in ที่ $1,100^{\circ}\text{C}$

10. กระบวนการ Photolithography มาส์ค 2

10.1 อบแผ่นไลต์ความชื้น 120°C 1 ชั่วโมง

10.2 เคลือบนำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat) spin 5,000 rpm

10.3 อบฟิล์มที่ 90°C 30 นาที

10.4 Alignment

10.5 Develop ฟิล์ม โดย

10.5.1 จุ่มใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 นาที

10.5.2 จุ่มใน Xylene แก้วที่สอง 90 นาที

10.5.3 จุ่มใน Isotropy แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที

10.5.4 จุ่มใน Isotropy แก้วที่สอง 30 วินาที

10.5.5 จุ่มใน Isotropy แก้วที่สาม 30 วินาที

10.5.6 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

10.5.7 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

10.5.8 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)

10.6 อบฟิล์มอีก 10 นาที

11. การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching)

11.1 จุ่มในสารละลาย Buffer for Oxide

11.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

11.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

11.4 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)

12. กระบวนการลอกฟิล์ม

12.1 ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที

12.2 ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แก้วที่สอง 5 นาที

12.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที

12.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที

12.5 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์

12.6 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)

13. กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. การทำความสะอาดผิวหน้า

- 14.1 คั้มใน Tricoethylene 5 นาที
- 14.2 Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- 14.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- 14.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- 14.5 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N_2)

15. Mo Slice Etching

- 15.1 จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- 15.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- 15.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- 15.4 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N_2)

16. กระบวนการ (Photolithography) มาส์ค 3

- 16.1 อบแผ่นไล่ความชื้น $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1 ชั่วโมง
- 16.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way Coat) spin 5,000 rpm
- 16.3 อบฟิล์มที่ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 นาที
- 16.4 Alignment
- 16.5 Develop ฟิล์มโดย
 - 16.5.1 จุ่มใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
 - 16.5.2 จุ่มใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
 - 16.5.3 จุ่มใน Isotropy แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - 16.5.4 จุ่มใน Isotropy แก้วที่สอง 30 วินาที
 - 16.5.5 จุ่มใน Isotropy แก้วที่สาม 30 วินาที
 - 16.5.6 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - 16.5.7 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

16.6 อบฟิล์มอีก 10 นาที

17. การใช้สารละลายกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching)

- 17.1 จุ่มในสารละลาย Buffer for Oxide
- 17.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- 17.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- 17.4 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N_2)

18. กระบวนการลอกฟิล์ม

- 18.1 ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- 18.2 ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แก้วที่สอง 5 นาที
- 18.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- 18.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- 18.5 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- 18.6 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N_2)

19. กระบวนการ Oxidation

- 19.1 Dry Oxidation ด้วย Oxygen 1,200 cc/min 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ $1,000^\circ C$

20. กระบวนการ Photolithography มาส์ค 4

- 20.1 อบแผ่นไลค์ความชื้น $120^\circ C$ 1 ชั่วโมง
- 20.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way Coat) spin 5,000 rpm
- 20.3 อบฟิล์มที่ $90^\circ C$ 30 นาที
- 20.4 Alignment
- 20.5 Develop ฟิล์มโดย
 - 20.5.1 จุ่มใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 นาที
 - 20.5.2 จุ่มใน Xylene แก้วที่สอง 90 นาที
 - 20.5.3 จุ่มใน Isotropy แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - 20.5.4 จุ่มใน Isotropy แก้วที่สอง 30 วินาที
 - 20.5.5 จุ่มใน Isotropy แก้วที่สาม 30 วินาที
 - 20.5.6 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - 20.5.7 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

- 20.6 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N_2)

21. การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching)

- 21.1 จุ่มในสารละลาย Buffer for Oxide
- 21.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- 21.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- 21.4 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22. กระบวนการลอกฟิล์ม

- 22.1 ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- 22.2 ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แก้วที่สอง 5 นาที
- 22.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- 22.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- 22.5 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- 22.6 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)

23. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator ที่ความดัน $2.5-10^{-6}$ Torr

24. กระบวนการ Photolithography มาส์ค 5 (ลวดลายอะลูมิเนียม)

- 24.1 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az) spin 5,000 rpm
- 24.2 อบฟิล์มที่ $85^{\circ}C$ 20 นาที (Prabake)
- 24.3 Alignment
- 24.4 Develop ฟิล์ม โดย
 - 24.4.1 Developer แก้วที่หนึ่ง 10 วินาที
 - 24.4.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - 24.4.3 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)
- 24.5 อบฟิล์ม ที่ $85^{\circ}C$ 20 นาที (Postbake)

25. การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-Etching)

- 25.1 จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่ $40^{\circ}C$
- 25.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- 25.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- 25.4 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)

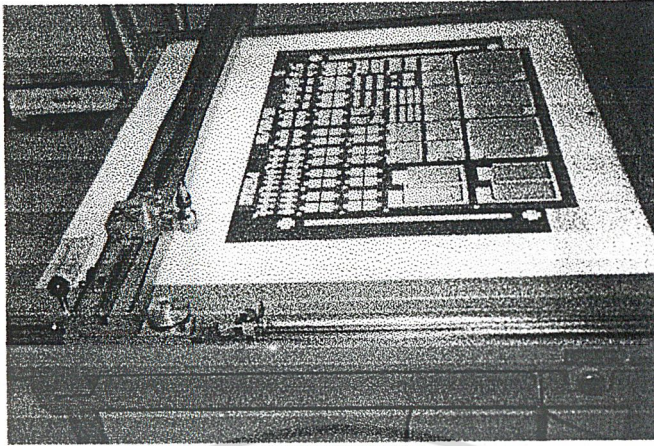
26. กระบวนการลอกฟิล์ม

- 26.1 จุ่มลงใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- 26.2 จุ่มลงใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- 26.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- 26.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- 26.5 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (N^2)

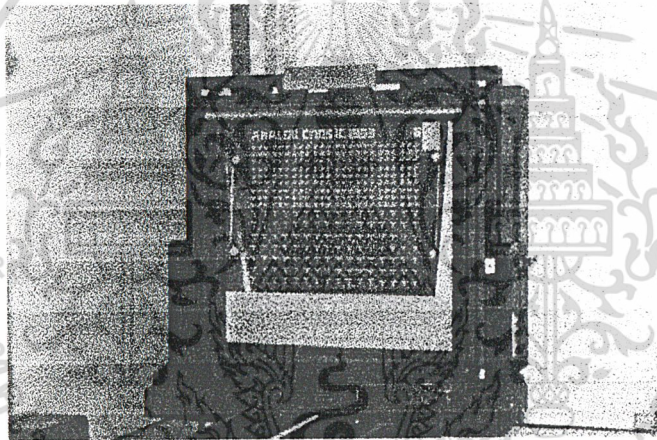
27. กระบวนการ Sintering Temp $500^{\circ}C$

- 27.1 Dry Nitrogen 1,000 cc/min 12 นาที

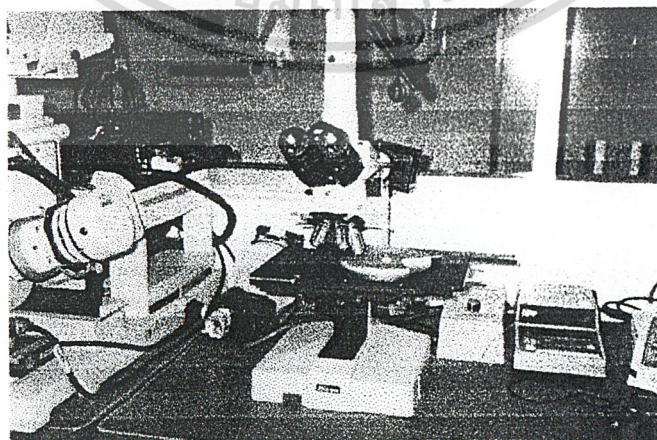
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ค1 ไมโครคัตเตอร์

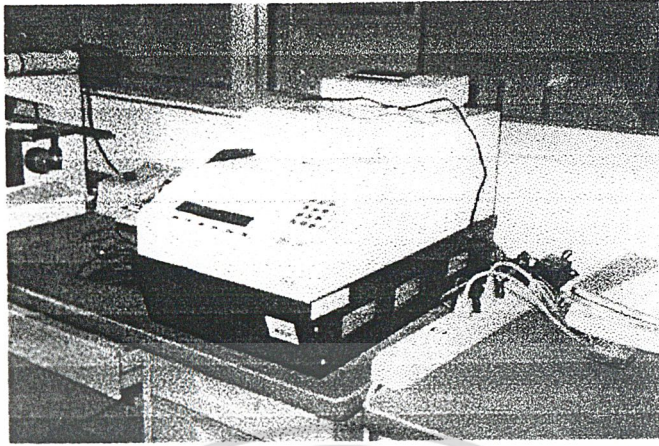


รูป ค2 ถ่ายย่อส่วน (กระจกมาสก์)

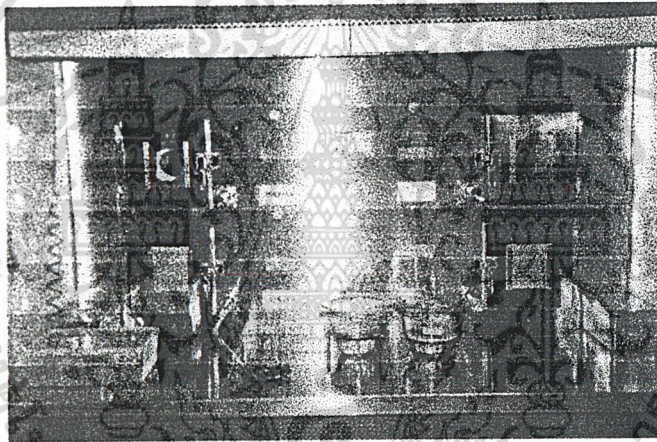


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและเผยแพร่ข้อมูลไปยังผู้ใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

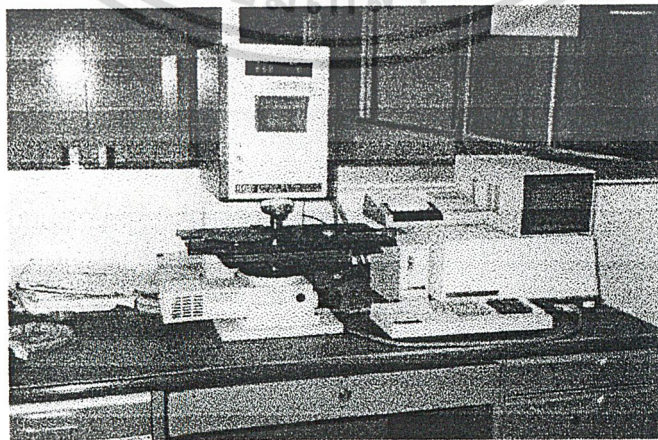
รูป ค3 กล้องส่องดูพื้นผิว



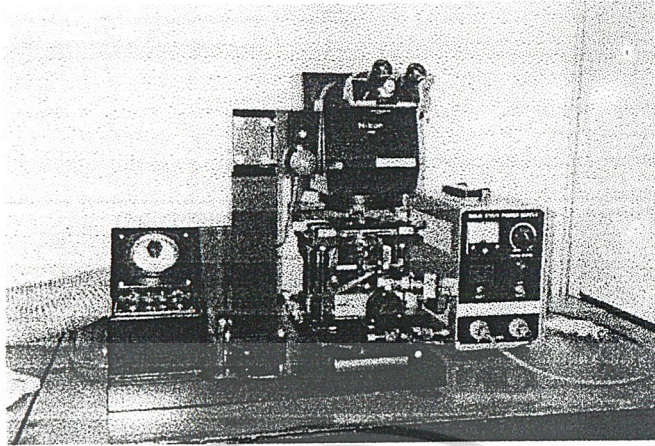
รูป ค4 เครื่องวัดค่า Resistivity



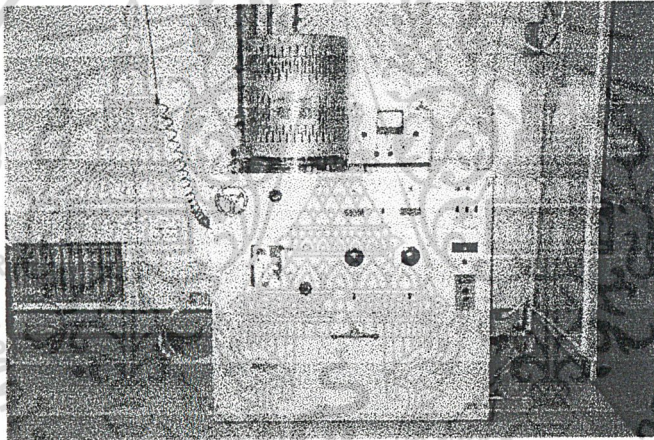
รูป ค5 เตา Oxidation และเตา Sintering



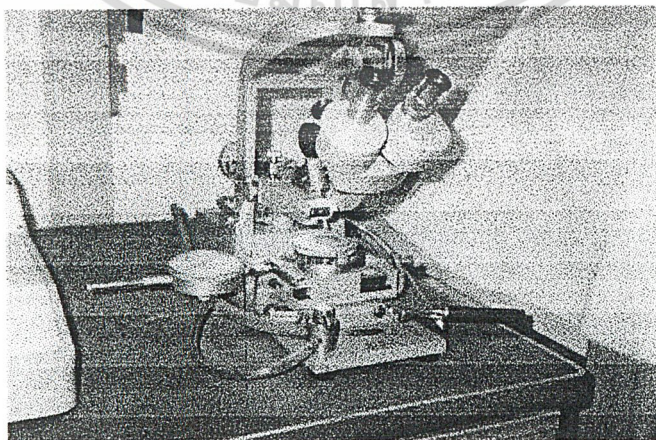
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ **รูป ค6 เครื่องวัดความหนาออกไซด์** ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



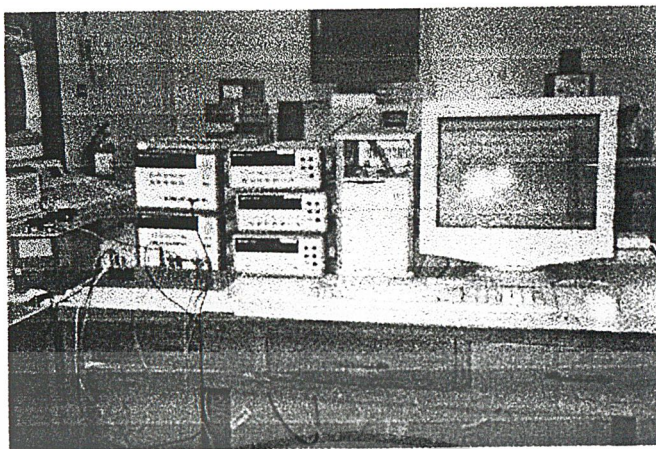
รูป ค7 เครื่อง Aliner



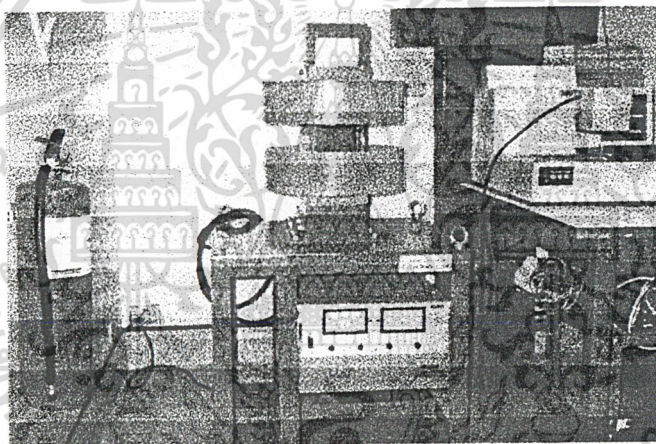
รูป ค8 เครื่อง Evaporator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดรูป ค9 เครื่องมือตัดแผ่นซีดีคอน



รูป ค10 เครื่องวัดหา I-V Characteristic



รูป ค11 เครื่องปล่อยสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์ มาจากอาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่อนุญาตให้ทำการทดลอง ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบคุณท่านอาจารย์เดิมนพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คอยดูแล รวมทั้งให้คำปรึกษาแนะนำ ในสิ่งต่างๆ มากมายทุกๆ เรื่อง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการสร้าง การวัด ตลอดจนหาเครื่องมือเครื่องใช้ในการประกอบการทดลองนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ตุลาคม 2542
2. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีวงจรรวม”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
3. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, มิถุนายน 2543
4. ผศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พฤษภาคม 2544
5. Julinan W.Gardner, “Microsensors”, McGraw-Hill Book Company, INC, 1994
6. Henry P.Bates and Radivoje S.Popovic, “Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensors, Vol 74, No 8”, August 1986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้