

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยปรากฏการณ์ฮอลล์บนโครงสร้างมอสเฟต  
Magnetic Sensing Device by Hall Effect on MOSFET Structure



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 61414  
วัน,เดือน,ปี 17 ก.ค. 2549

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

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยปรากฏการณ์ฮอลล์บนโครงสร้างมอสเฟต

Magnetic Sensing Device by Hall Effect on MOSFET Structure

โดย

นายสันติภาพ	ช่วยเกลี้ยง	45015217
นายสิทธิชัย	อินทร์สุด	45015218
นายโสภณ	หนินวน	45015304

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยปรากฏการณ์ฮอลล์บนโครงสร้างมอสเฟต

Magnetic Sensing Device by Hall Effect on MOSFET Structure

ผู้จัดทำ

- |                |             |          |
|----------------|-------------|----------|
| 1. นายสันติภาพ | ช่วยเกลี้ยง | 45015217 |
| 2. นายสิทธิชัย | อินทร์สุด   | 45015218 |
| 3. นายโสภณ     | หนึ่นวน     | 45015304 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยปรากฏการณ์ฮอลล์บนโครงสร้างมอสเฟต  
Magnetic Sensing Device by Hall Effect on MOSFET Structure

นายสันติภาพ	ช่วยเกลี้ยง	45015217
นายสิทธิชัย	อินทร์สุด	45015218
นายโสภณ	หนีนวน	45015304

โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยปรากฏการณ์ฮอลล์บนโครงสร้างมอสเฟต

นายสันติภาพ ช่วยเกลี้ยง

นายสิทธิชัย อินทร์สุด

นายโสภณ หินนวน

รศ.ดร.เดิมนพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

นายวีระ เฟื่องจันทร์ ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2547

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการสร้างมอสทรานซิสเตอร์เซ็นเซอร์โดยใช้หลักการของฮอลล์เพื่อทำให้มอสทรานซิสเตอร์นี้สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ แมกเนติกเซ็นเซอร์ โดยการคิดแปลงโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ให้มีการเซ็นเซอร์สนามแม่เหล็กที่ดีที่สุด ให้มีขั้วเพิ่มขึ้นมาอีก 4 ขั้ว นอกเหนือจาก ขั้วเดรน ขั้วเกท ขั้วซอส เป็นขั้วเซ็นเซอร์สำหรับวัดแรงดันฮอลล์ออกมา แรงดันไฟฟ้านี้สามารถหาค่าสนามแม่เหล็กได้โดยการสอบเทียบกับค่าจริง ซึ่งลักษณะโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์เป็นพีแชนแนล แบบเอ็นฮานซ์เมนต์โทมอด มีฐานรองเป็นแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น

**Magnetic Sensing Device by Hall Effect on MOSFET Structure**

Mr.Suntipup Chuaykleng

Mr.Sittichai Insut

Mr.Sopon Neenuan

Assoc.Prof.Dr.Toempong Phetchakul Advisor

Mr.Weera Pengchan Co-Advisor

Education Year 2004

**Abstract**

This paper presents the operation of MOSFET for magnetic field sensing by using principle Hall Effect and MOSFET structure. The standard MOSFET consists of three terminals which are Drain (D), Gate (G), and Source(S), but in this MOSFET structure consists of seven terminals that are Drain (D), Gate (G), Source(S), and four extra terminals for Voltage Hall ( $V_H$ ) measuring. This device was designed by p-channel enhancement mode.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.2.1 ออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับสนามไฟฟ้า	1
1.2.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามไฟฟ้า	3
1.2.3 การวัดผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 มอสพื้นฐาน	4
2.1.1 มอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล (N-Channel MOSFET)	5
2.1.2 มอสเฟทชนิดพีแชนแนล (P-Channel MOSFET)	5
2.2 มอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	7
2.2.1 การทำงานของมอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	8
2.3 ปฏิกิริยาฮอลล์	11
2.4 แพลตเตอร์ G	17
2.5 แนวคิดและการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	19
2.6 คุณสมบัติทั่วไปของของเครื่องวัด	21
บทที่ 3 การออกแบบโครงสร้างและโฟโตมาร์ค	23
3.1 การออกแบบ	23
3.2 โฟโตมาสก์	26
3.3 ทำการออกแบบเพื่อที่จะนำไปสร้างมาร์คจริง	29
บทที่ 4 กระบวนการสร้าง	36
4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน	36
4.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน(Thermal Oxidation)	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.3 กระบวนการโฟโตลิโกราฟีมาส์ค 1	37
4.4 Oxide Etching	38
4.5 การแพร่สารเจือชนิดโบรอน	39
4.6 กระบวนการโฟโตลิโกราฟีมาส์ค 2	41
4.7 Oxide Etching	42
4.8 การแพร่สารเจือชนิดโบรอนที่เข้มข้น	43
4.9 กระบวนการโฟโตลิโกราฟีมาส์ค 3	44
4.10 กระบวนการโฟโตลิโกราฟีมาส์ค 4	47
4.11 กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Metallization)	49
4.12 กระบวนการโฟโตลิโกราฟีมาส์ค 5	50
4.13 กระบวนการ Al Etching	52
4.14 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)	53
บทที่ 5 การทดลองและการวัด	54
5.1 การทดลอง	54
5.1.1 การหาเงื่อนไขของชั้น P-well	54
5.2 การวัดคุณสมบัติความเป็น MOS	59
5.2.1 วิธีการตรวจสอบความเป็นมอส	59
5.2.2 การวัดเพื่อทดสอบคุณสมบัติความเป็น MOS	59
5.3 การตรวจสอบความเป็นรอยต่อไอทมิมิค	66
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	69
กิตติกรรมประกาศ	70
ภาคผนวก	IX
บรรณานุกรม	XXII

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงภาพด้านบนและภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	2
รูปที่ 2.1 ชนิดของมอสเฟต	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของมอสเฟต และภาพ Top View	4
รูปที่ 2.3 (ก) มอสเฟตเกตโลหะชนิดเอ็นแชนแนล	5
(ข) มอสเฟตเกตซิลิคอนชนิดเอ็นแชนแนล	5
รูปที่ 2.4 (ก) มอสเฟตเกตโลหะชนิดพีแชนแนล	6
(ข) มอสเฟตเกตซิลิคอนชนิดพีแชนแนล	6
รูปที่ 2.5 (ก) สัญลักษณ์ของเอ็นมอสเฟตแบบต่างๆ	6
(ข) สัญลักษณ์ของพีมอสเฟตแบบต่างๆ	6
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมอสเฟตแชนแนลเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ที่โหมด	7
รูปที่ 2.7 การทำงานของมอสเฟตเอ็นแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ที่โหมด	9
รูปที่ 2.8 คุณสมบัติ $I_D$ - $V_{DS}$ ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ที่โหมด	10
รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์ในแท่งตัวนำไฟฟ้า	12
รูปที่ 2.10 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	12
รูปที่ 2.11 รูปร่างฮอลล์เพลทรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	17
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยโครงสร้างมอส	19
รูปที่ 2.13 แสดงหลักการการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยโครงสร้างมอส	20
รูปที่ 3.1 แสดงภาพด้านบนและภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	24
รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบที่โครงสร้างพารามิเตอร์ W, L, Y	25
รูปที่ 3.3 ก แสดงรูปร่าง Mask 1 (P-Mask)	27
รูปที่ 3.3 ข แสดงรูปร่าง Mask 2 ( $P^+$ - Mask)	27
รูปที่ 3.3 ค แสดงรูปร่าง Mask 3 (Gate-Mask)	27
รูปที่ 3.3 ง แสดงรูปร่าง Mask 4 (Contact Windows-Mask)	28
รูปที่ 3.3 จ แสดงรูปร่าง Mask 5 (Metal-Mask)	28
รูปที่ 3.4 ก แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 1(Corel Draw)	29
รูปที่ 3.4 ข แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 2(Corel Draw)	30
รูปที่ 3.4 ค แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 3(Corel Draw)	30
รูปที่ 3.4 ง แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 4(Corel Draw)	31

รูปที่ 3.4 จ แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 5(Corel Draw)	31
รูปที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 1(Lasi7)	32
รูปที่ 3.6 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 2(Lasi7)	32
รูปที่ 3.7 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 3(Lasi7)	33
รูปที่ 3.8 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 4(Lasi7)	33
รูปที่ 3.9 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 5(Lasi7)	34
รูปที่ 3.10แสดงภาพรวมของแต่ละมาร์ค (Lasi7)	34
รูปที่ 4.1 การเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน	36
รูปที่ 4.2 การสร้างชั้นออกไซด์	37
รูปที่ 4.3 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350	37
รูปที่ 4.4 ทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ 1	38
รูปที่ 4.5 ล้างน้ำยาไวแสง(Develop)	38
รูปที่ 4.6 เอตซิงค์แบบเปียก(Wet Etching)	38
รูปที่ 4.7 ล้างน้ำยาไวแสง(Develop)	39
รูปที่ 4.8 เคลือบสารเจือโบรอน	40
รูปที่ 4.9 การแพร่สารเจือชนิดโบรอน	40
รูปที่ 4.10 การสร้างชั้นออกไซด์	40
รูปที่ 4.11 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350	41
รูปที่ 4.12 ทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ 2	41
รูปที่ 4.13 ล้างน้ำยาไวแสง(Develop)	42
รูปที่ 4.14 เอตซิงค์แบบเปียก(Wet Etching)	42
รูปที่ 4.15 ล้างน้ำยาไวแสง(Develop)	43
รูปที่ 4.16 เคลือบสารเจือโบรอน	43
รูปที่ 4.17 การแพร่สารเจือโบรอนเข้มข้น	44
รูปที่ 4.18 การสร้างชั้นออกไซด์	44
รูปที่ 4.19 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350	45
รูปที่ 4.20 ทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ 3	45
รูปที่ 4.21 ล้างน้ำยาไวแสง(Development)	45
รูปที่ 4.22 เอตซิงค์แบบเปียก (Wet Etching)	46
รูปที่ 4.23 ล้างน้ำยาไวแสง(Develop)	46
รูปที่ 4.24 การสร้างชั้นออกไซด์เพื่อเป็นเกตออกไซด์	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.25 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350	47
รูปที่ 4.26 ทำการฉายรูปที่ 4.27 ล้างน้ำยาไวแสง(Development)	48
รูปที่ 4.27 ล้างน้ำยาไวแสง(Development)	48
รูปที่ 4.28 เอตซิ่งแบบเปียก (Wet Etching)	49
รูปที่ 4.29 ล้างน้ำยาไวแสง(Development)	49
รูปที่ 4.30 การเมตลไลเซชัน	50
รูปที่ 4.31 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350	50
รูปที่ 4.32 ทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ 5	51
รูปที่ 4.33 ล้างน้ำยาไวแสง (Development)	51
รูปที่ 4.34 อลูมิเนียมเอตซิ่ง	52
รูปที่ 4.35 ล้างน้ำยาไวแสง(Develop)	52
รูปที่ 4.36 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	53
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์	54
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงการหาเงื่อนไขการแพร่สารเจือ	55
รูปที่ 5.3 วัดผลด้วยการทำ SRP	56
รูปที่ 5.4 วัดผลด้วยการทำ SRP	57
รูปที่ 5.5 วัดผลด้วยการทำ SRP	57
รูปที่ 5.6 วัดผลด้วยการทำ SRP	58
รูปที่ 5.7 แสดง โครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่ต้องการวัดความเป็นมอส	59
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลที่วัดได้ระหว่าง Source กับ Drain	59
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงคุณสมบัติความเป็นไดโอด	60
รูปที่ 5.10 แสดงการวัดเพื่อทดสอบความ MOS	61
รูปที่ 5.11 แสดงผลที่ได้จากวัด	62
รูปที่ 5.12 รูปแสดง โครงสร้างของ PMOS Depletion Mode	63
รูปที่ 5.13 การวัดกระแสไหลผ่านเกต	64
รูปที่ 5.14 การวัดในขณะที่ยกขา Source และ Body	64
รูปที่ 5.15 ทดสอบวัดกระแสที่ไหลผ่านเกต	65
รูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นกระแสไหลจาก Drain ผ่าน Gate	65
รูปที่ 5.17 การ Align mask ในมาสก์ 5	66
รูปที่ 5.18 การตรวจความเป็นโอห์มมิก	66
รูปที่ 5.19 ผลที่ได้จากการทดสอบความเป็นโอห์มมิก	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 5.20 การทะลุของชั้น P <sup>+</sup>	67
รูปที่ 5.21 แสดงการทะลุผ่านของอลูมิเนียม	68
รูปที่ 6.1 แนวทางการแก้ไขที่ถูกต้อง	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

อุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์ (Magnetic Sensor Device) จะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า อุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จะใช้ประโยชน์จากการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์กัลวานอแมกเนติก (Galvanomagnetic Effects) อันเกิดจากกระแสไหลผ่านวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก หรือเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดแรงที่กระทำกับประจุพาหะเรียกว่า แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electric Field) ที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กและทิศทางของกระแส

ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทำให้เกิดการแข่งขันทางการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากมาย โดยขึ้นอยู่กับราคา การประยุกต์ใช้งานและขนาดของอุปกรณ์ เกิดเป็นอุปกรณ์ตัวใหม่ๆ ขึ้นมา เพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้งาน

อุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall Sensor Device) ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยใช้โครงสร้างของมอสเฟต (MOSFET) มีชื่อเรียกว่า ฮอลล์แมกเนติกเซ็นเซอร์ฟิลิออปเพคทรานซิสเตอร์ (Hall MAGFET) หรืออาจเรียกว่า มอสฮอลล์เพลท (MOS Hall Plate) ภายในประกอบด้วย 7 ขั้ว โดยมีขั้ว 4 ขั้ว เรียกว่า เซ็นเซอร์คอนแทค (Sensor Contact: SC) โดยอีก 3 ขั้วจะประกอบด้วยขั้วซอร์ส (Source: S) ขั้วเดรน (Drain: D) และขั้วเกต (Gate: G)

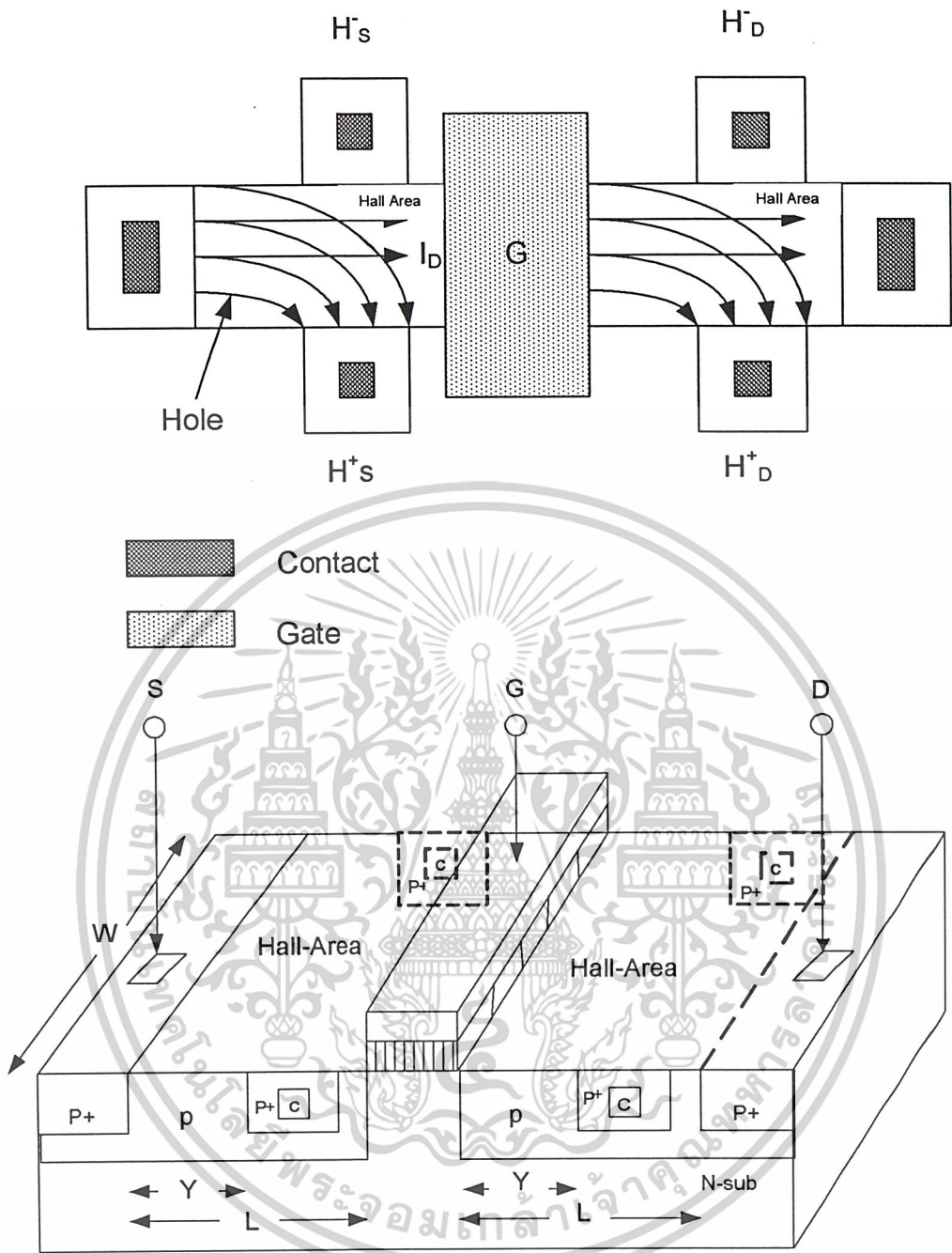
#### 1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อประยุกต์ใช้งาน มอสเฟต ทำเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์สนามแม่เหล็กและศึกษาผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอสเฟตในแต่ละแบบที่มีผลต่อแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage)

#### 1.2 ขอบเขตของโครงการ

##### 1.2.1 ออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ทำการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยมีรูปร่างดังแสดงในรูป 1.1 โดยมีค่าความกว้าง (w) มีค่าเท่ากันหมด แต่ความยาว (L) และความยาวของคอนแทค (Y) ของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าแตกต่างกัน เพื่อที่จะทำการทดสอบว่าโครงสร้างของอุปกรณ์มีผลต่อแรงฮอลล์ที่วัดได้อย่างไร



รูปที่ 1.1 แสดงภาพด้านบนและภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ในการสร้างอุปกรณ์อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยใช้โครงสร้างมอสั้นั้น จะใช้กระบวนการสร้างโดยใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวม (Integrate Circuit) คือ วิธี Oxidation, Photolithography, Diffusion, CVD, เป็นต้น

### 1.2.3 การวัดผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์

โดยทำการป้อนกระแส และสนามแม่เหล็กให้กับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ที่ค่าพารามิเตอร์ ต่างกันแล้วจึงทำการวัดแรงดันฮอลล์

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. เข้าใจการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์
2. เข้าใจถึงกระบวนการสร้าง
3. สามารถอธิบายผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อแรงดันฮอลล์
4. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งาน



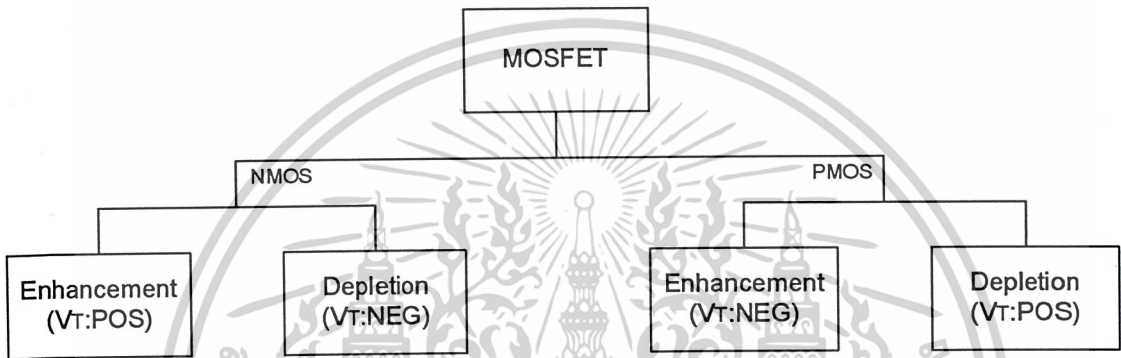
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

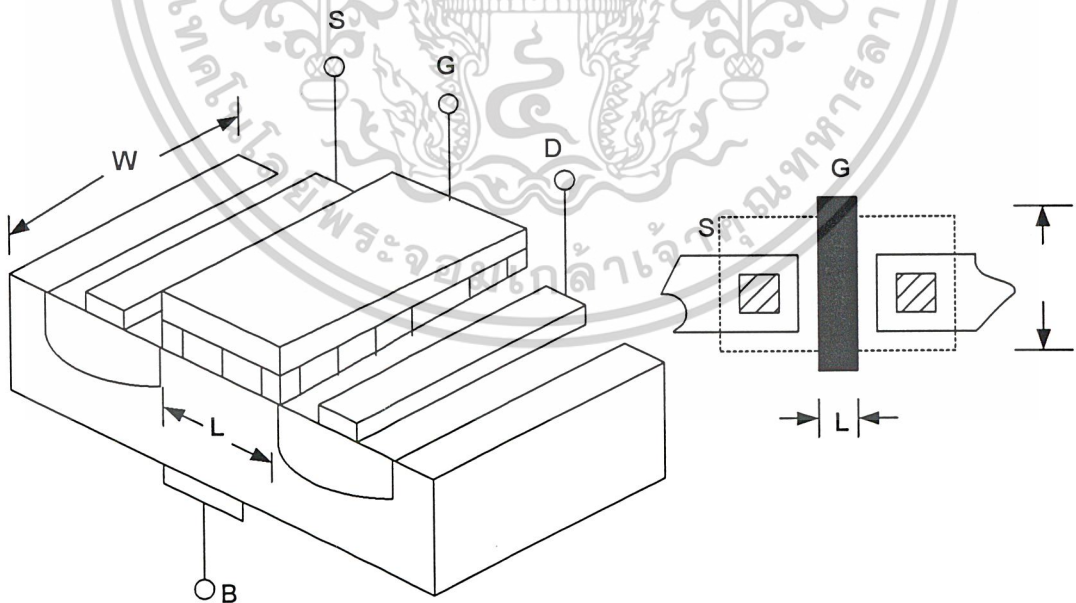
### ทฤษฎี

#### 2.1 มอสเฟตพื้นฐาน

มอสเฟตสามารถจัดแบ่งตามชนิดของกระแสที่ไหลภายใน ได้เป็น 2 ชนิด คือ เอ็นแชนแนล (N-Channel) และพีแชนแนล (P-Channel) ซึ่งทั้งเอ็นแชนแนล และพีแชนแนล ยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด (Enhancement Mode Transistor) และแบบดีพลีชันโหมด (Depletion mode Transistor) ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 ชนิดของมอสเฟต



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของมอสเฟต และภาพ Top View

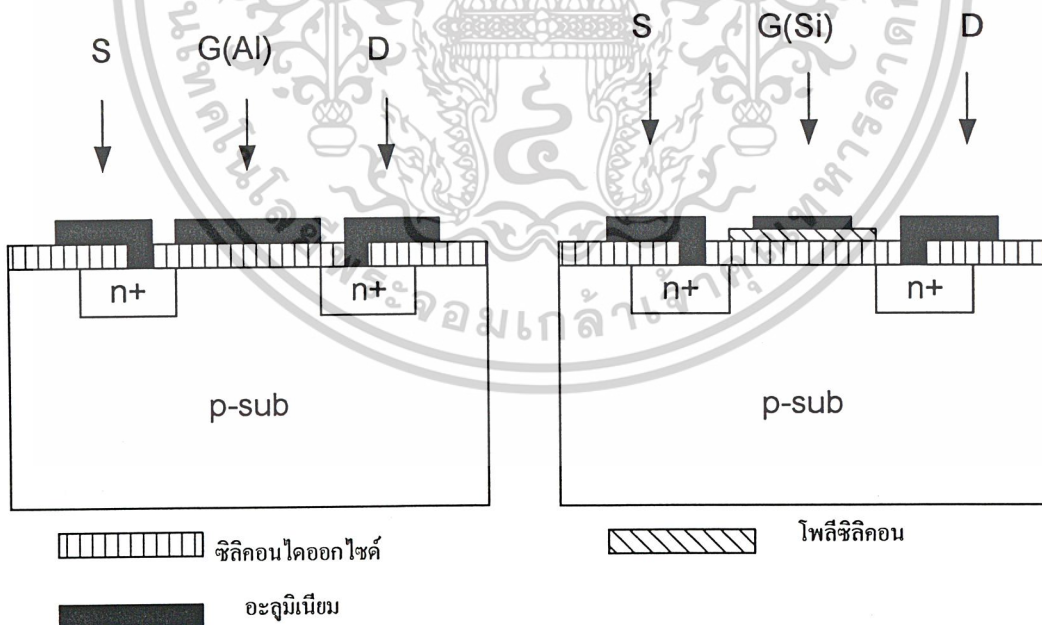
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 มอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล (N-Channel MOSFET)

มักนิยมเขียนย่อๆว่า NMOS และนิยมเรียกสั้นๆว่า เอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 โดยที่ส่วนซอส (Source) และเดรน (Drain) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ซึ่งถูกสร้างขึ้นบนฐานรอง (Substrate) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) ระหว่างส่วนซอสและเดรนจะเป็นโครงสร้างมอส (MOS) ซึ่งย่อมาจาก (Metal Oxide Semiconductor) กั้นอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปชั้นโลหะอาจเป็นอะลูมิเนียม (Aluminum) ซึ่งอยู่บนชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) จะทำหน้าที่เป็นส่วนเกต (Gate) หรือบางครั้งส่วนเกตอาจเป็นชั้นผลึกหลายรูป (Poly Crystal) ของซิลิคอน (Silicon) ก็ได้ โดยเฉพาะโครงสร้างของวงจรรวมขนาดใหญ่ (VLSI) มักจะเป็นแบบที่มีเกตเป็นชั้นโพลีซิลิคอน (Poly Silicon) กระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์ (Transistor) แบบนี้เป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ (e) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ

### 2.1.2 มอสเฟตชนิดพีแชนแนล (P-Channel MOSFET)

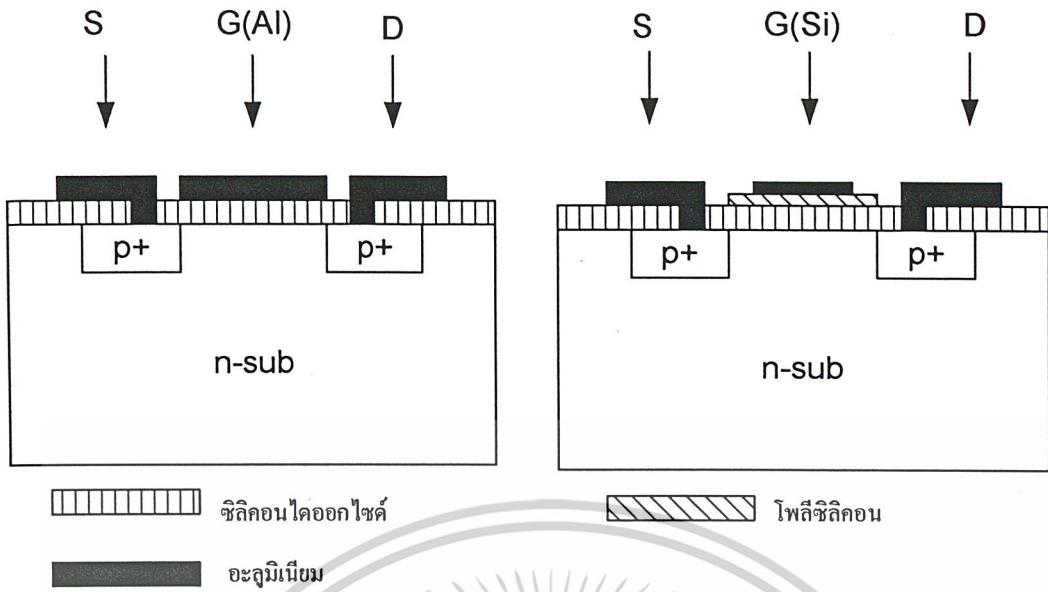
มักนิยมเขียนย่อๆว่า PMOS และนิยมเรียกสั้นๆว่า พีมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 โดยที่ส่วนซอส (Source) และเดรน (Drain) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งถูกสร้างขึ้นบนฐานรอง (Substrate) ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) และมีโครงสร้างมอส เป็นส่วนเกตอยู่ระหว่างส่วนซอสและเดรน กระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์แบบนี้เป็นแบบกระแสที่เกิดจากโฮล (h) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก



รูปที่ 2.3 (ก) มอสเฟตเกตโลหะชนิดเอ็นแชนแนล

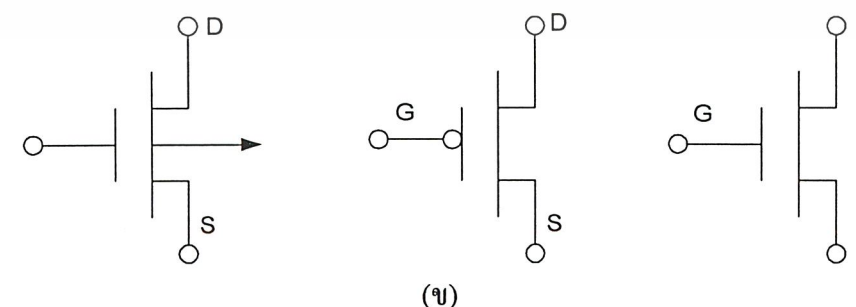
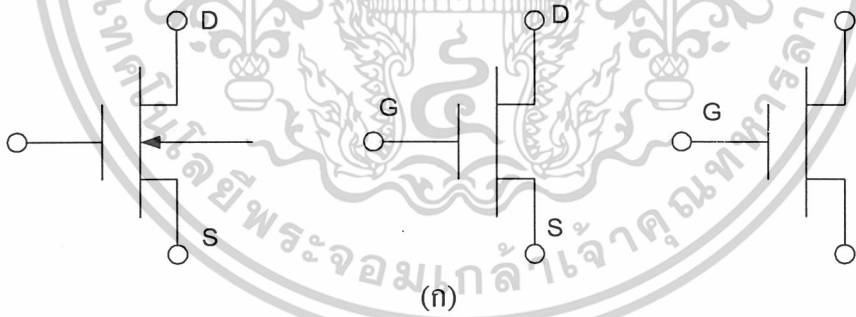
(ข) มอสเฟตเกตซิลิคอนชนิดเอ็นแชนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 (ก) มอสเฟตเกตโลหะชนิดพีแชนแนล  
(ข) มอสเฟตเกตซิลิคอนชนิดพีแชนแนล

สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล และชนิดพีแชนแนล สามารถเขียนได้หลายลักษณะดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 (ก) สัญลักษณ์ของเอ็นมอสเฟตแบบต่างๆ

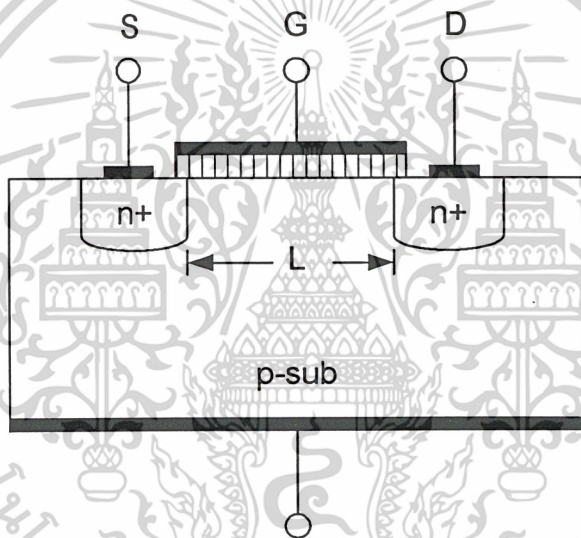
(ข) สัญลักษณ์ของพีมอสเฟตแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถจัดแบ่งมอสเฟต ตามลักษณะการทำงานได้ 2 แบบ คือ แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ โหมด และแบบดีฟิชั่นโหมด

## 2.2 มอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

มอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ซึ่งเป็นชนิดเอ็นแชนแนลจะมีลักษณะโครงสร้าง กล่าวคือ ส่วนซอส และเดรน จะถูกสร้างขึ้นโดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็น ซึ่งมีความหนาแน่นสูงเข้าไปในแผ่นผลึกฐานรองของสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอบๆ ส่วนของซอส และเดรน จะมีลักษณะเป็นรอยต่อพี-เอ็น (p-n Junction) ซึ่งในย่านดังกล่าวนี้เรียกว่า ย่านปลดคพาหะ (Depletion region) ส่วนเกตประกอบด้วยชั้นของโพลีซิลิคอน ซึ่งซ่อนอยู่เหนือชั้นออกไซด์ โดยมีโลหะอะลูมิเนียมเป็นขั้วต่อไฟฟ้าของส่วนเกตจากโพลีซิลิคอน และเป็นขั้วไฟฟ้าของทั้งซอส และเดรน ด้วย



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมอสเฟตแชนแนลเอ็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

จากโครงสร้างดังกล่าวส่วนซอส และเดรนจะถูกแยกจากกันด้วยไดโอด (Diode) สองตัว และในขณะที่ไม่มีแรงดันไบอัสระหว่างเกต และซอส ช่องทางเดินกระแสจะไม่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ทรานซิสเตอร์จะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่าน ซึ่งเงื่อนไขนี้ก็คือ

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

$V_D$ : แรงดันที่เดรน

$V_S$ : แรงดันที่ซอส

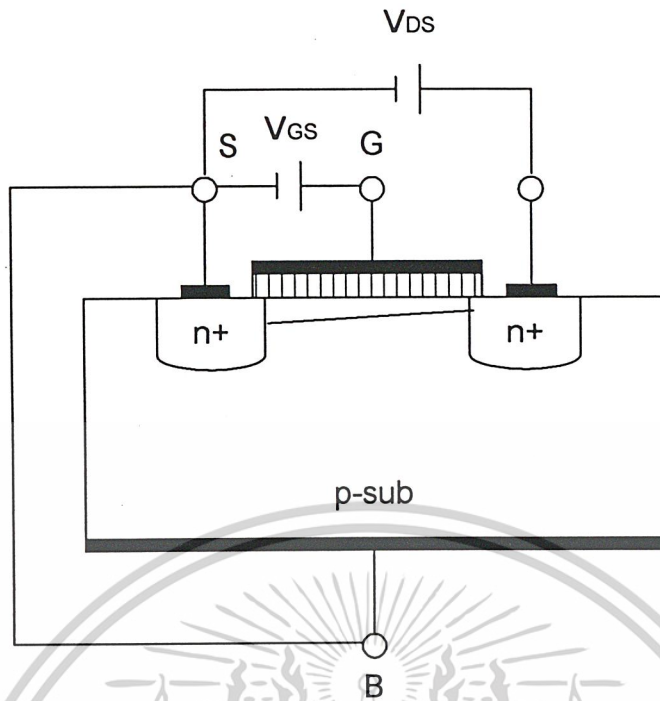
$V_{GS}$ : แรงดันระหว่างเกต และซอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าเกตถูกให้แรงดันไบอัสบวกที่เหมาะสม จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างเกต และฐานรอง และจะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุบวขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ และฉนวนออกไซด์ ประจุบวดังกล่าวจะสะสมอยู่ในส่วนของสารกึ่งตัวนำ และกระจายจากขอสไป ถึงเดรน ทำให้บริเวณดังกล่าวมีสภาพเปลี่ยนจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี ไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสระหว่างซอส และเดรน ซึ่งเรียกว่า “อินแชนแนล” กระแสนี้เองเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ ทรานซิสเตอร์แบบนี้บางครั้งถูกเรียกว่า Induced channel MOSFET เนื่องจากแชนแนลเกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่เกต นอกจากนี้ถ้าแรงดันไบอัสระหว่างเกต และซอส  $V_{GS}$  มีค่ามากขึ้นก็จะมีกรเหนี่ยวนำประจุมากขึ้น มีผลทำให้ขนาดของแชนแนลกว้างขึ้น กระแสก็จะไหลได้มากขึ้น

### 2.2.1 การทำงานของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

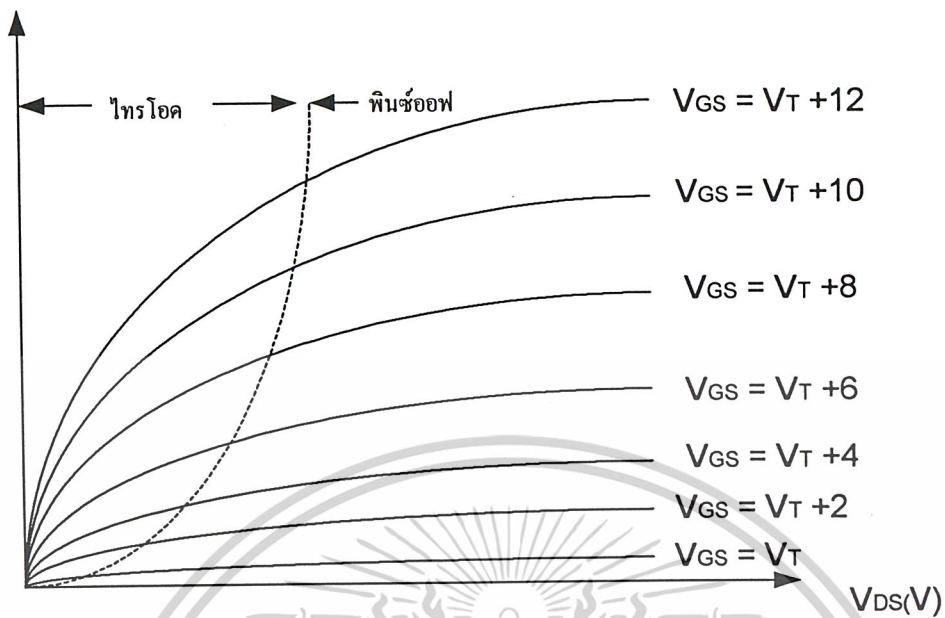
เพื่อที่จะทำให้เข้าใจกลไกการทำงานของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ได้ดียิ่งขึ้น เราจะพิจารณาการทำงานในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน 3 เงื่อนไข อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญที่ต้องจำไว้เสมอก็คือ แชนแนลจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ต้องมีแรงดันไบอัสระหว่างเกตกับซอสที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนล แรงดันค่าต่ำสุดซึ่งจะทำให้เกิดแชนแนลได้ถูกนิยามว่าเป็น “แรงดันขีดเริ่ม” (Threshold voltage) เขียนย่อๆว่า  $V_T$  การทำงานของทรานซิสเตอร์อาจแบ่งได้ดังนี้คือ เมื่อ  $V_{DS}$  มีค่าอยู่ในช่วง  $0 = V_{GS} - V_T$  หรือ  $(V_{GS} > V_T)$  ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ขณะที่  $V_{GS} > V_T$  และ  $V_{DS} > 0$  ซึ่งขณะนี้แชนแนลถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น แต่ไม่มีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์เนื่องจากแรงดันระหว่างซอส-เดรน ( $V_{DS}$ ) มีค่าเป็นศูนย์โวลต์ และเมื่อให้แรงดันไบอัสระหว่างซอส-เดรน มีค่าๆ หนึ่ง จะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านแชนแนลได้ ดังนั้นจึงเกิดแรงดันตกคร่อมแชนแนลมีค่าเท่ากับ  $I_R = V_{DS}$  ดังนั้นจึงทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างเกต และแชนแนลมีค่าเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่างๆ ตลอดแชนแนล และจะพบว่าแรงดันระหว่างเกต และแชนแนลจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $V_{GS}$  ที่ตำแหน่งจุดปลายทางด้านซอส และเนื่องจากแรงดันเกตประสิทธิผล ซึ่งจะทำให้เกิดแชนแนลก็คือ  $V_G = V_{GS} - V_T$  (เมื่อ  $V_{GS} < V_T$  กระแสจะไม่ไหล และไม่มีแชนแนลเกิดขึ้น) และเพื่อที่จะทำให้แชนแนลเกิดขึ้นได้เป็นแนวยาวจนถึงปลายด้านเดรน แรงดันเกตประสิทธิผลจะต้องมีค่ามากกว่าแรงดันเดรน-ซอส นั่นคือ  $V_G \geq V_{DS}$  (นั่นก็คือ แรงดันที่เกตเมื่อเทียบกับทุกจุดบนแนวแชนแนลจะต้องมีศักย์เป็นบวกจึงจะทำให้เกิดแชนแนล)



รูปที่ 2.7 การทำงานของมอสเฟตเอ็นแชนแนลแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

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

และเมื่อค่าของแรงดันเดรน-ซอส เพิ่มขึ้น ไปอีกกระทั่งมีค่า  $V_{DS} > V_{GS} - V_T$  ในกรณีนี้แรงดัน ( $I_D$ ) ที่ตกคร่อมแซนแนลที่ปลายด้านเดรนจะมีค่าสูงกว่า  $V_{GS} - V_T$  ดังนั้นจะทำให้เกิดภาวะพินซ์ออฟ (Pinch off) กล่าวคือ แซนแนลที่เป็นช่องทางเดินกระแสจะขาดออก เริ่มจากบริเวณด้านเดรนทั้งนี้เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าซึ่งจะมาเหนี่ยวนำให้มีการสะสมของประจุลบเพื่อทำหน้าที่เป็นแซนแนล ดังนั้นช่องทางเดินกระแสจึงขาดออกจากกัน ซึ่งเราเรียกว่า ภาวะพินซ์ออฟ ในกรณีนี้จะมีกระแสแพร่ (Diffusion current) จากส่วนซอสไปยังเดรน ช่องทางเดินกระแสจะแสดงคุณสมบัติความต้านทางสูง และคล้ายกับเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) กระแสเดรนในภาวะนี้จึงมีค่าคงที่ แม้ว่า  $V_{DS}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น การทำงานของทรานซิสเตอร์ในย่านนี้เรียกว่า ย่านอิ่มตัว (Saturation region) สำหรับกรณีที่  $V_{GS}$  มีค่าน้อยกว่า  $V_T$  กระแสเดรนจะไม่ไหล เนื่องจากไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดแซนแนล โดยปกติมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด ค่า  $V_T$  จะมีค่าราว  $V_T = +1$  โวลต์ สำหรับค่า  $V_{DD} = 5$  โวลต์



รูปที่ 2.8 คุณสมบัติ  $I_D$ - $V_{DS}$  ของมอสเฟตแบบเอ็นแชนซ์เมนต์โหมด

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าการทำงานแบ่งออกได้สองบริเวณ คือ บริเวณไตรโอด และพินช์ออฟการทำงานในบริเวณ ไตรโอด เมื่อ

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

และ

$$V_{GD} > V_T \text{ หรือ } V_{DG} < -V_T \quad (2)$$

หรือ

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T \quad (3)$$

คุณลักษณะ  $I_D$ - $V_{DS}$  ในบริเวณ ไตร โอด อธิบายได้ด้วยสมการ

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

ค่าคงที่  $K$  คือ

$$K = (\frac{1}{2}) [\mu_p C_{ox} (W/L)] \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $\mu_p$  คือ ความเคลื่อนที่ได้ (Mobility) ของอิเล็กตรอนในแชนแนลเหนี่ยวนำพี  
 Cox คือ ความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของตัวเก็บประจุระหว่างเกต และแชนแนล  
 L คือ ความยาวของแชนแนล  
 W คือ ความกว้างของแชนแนล

การทำงานบริเวณอัมตั่ว เนื่องจากกระแสเดรนไหลคงที่ที่ค่า  $V_{GS}$  ใดๆ ต่อเมื่อ

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

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

หรือ 
$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T \quad (8)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (8) หาขอบเขตระหว่างบริเวณไทร โอค และบริเวณพินชออฟได้จาก

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

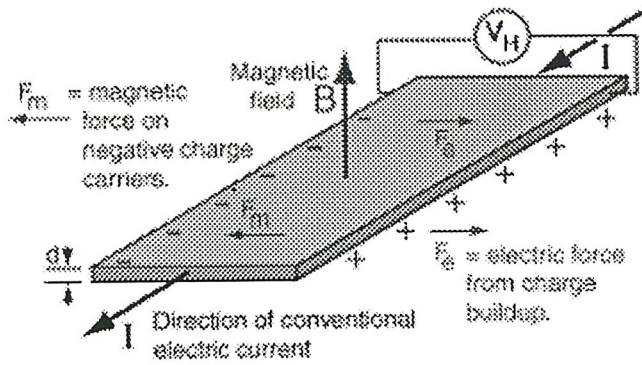
แทนค่า  $V_{DS}$  จากสมการ (9) ไปยังสมการ (4) จะ ได้คุณลักษณะ  $I_D - V_{DS}$  ในบริเวณพินชออฟ

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

### 2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส ผลของสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงในทิศทางขวาง (Transverse Force) หรือเรียกว่า แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ผลักประจุพาหะนำกระแสไปด้านข้างของแท่งตัวนำและจะเห็นผลได้ชัดเจนในแผ่นตัวนำบางเป็นส่วนใหญ่ดังรูปที่ 2.9 การเพิ่มขึ้นของประจุที่ด้านข้างจะทำให้สนามไฟฟ้าภายในแท่งตัวนำ แรงจากสนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของประจุพาหะที่ถูกกระทำโดยแรงลอเรนซ์ ในสภาวะสมดุลสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างด้านข้างทั้งสองของแท่งตัวนำได้ ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) หลังจากที E.H. Hall เป็นผู้ค้นพบปรากฏการณ์นี้ ในปี ค.ศ.1879

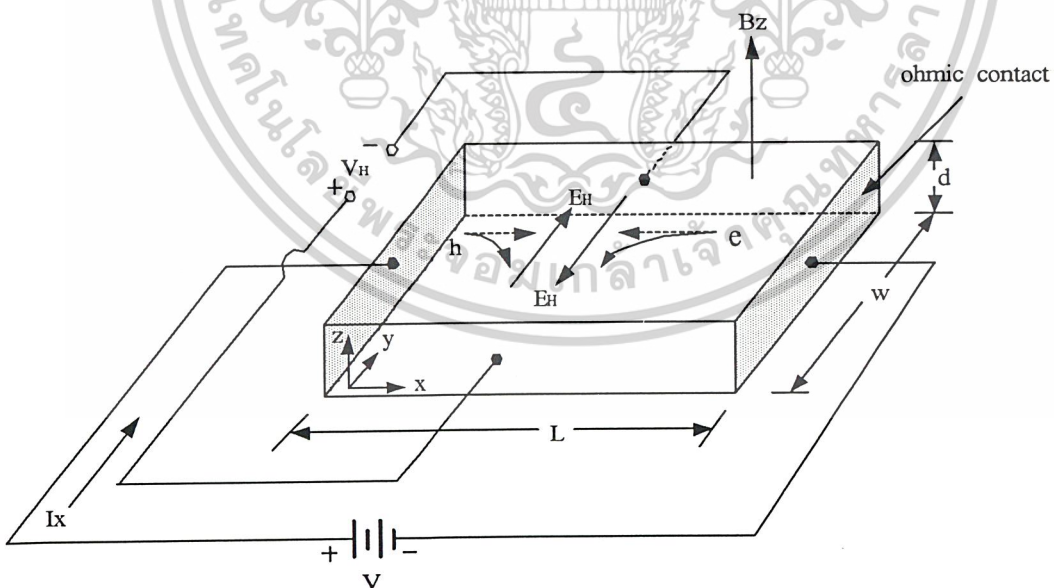
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์ในแท่งตัวนำไฟฟ้า

การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (Charge carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัดและคำนวณค่า parameter ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหา parameter อื่น ๆ ได้อีกด้วย

พิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูปที่ 2.10 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่ค่าความต่างศักย์  $V$  โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density)  $J_x$  ไหลในทิศ  $+x$  และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์ (flux density)  $B_z$  ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ  $+z$



รูปที่ 2.10 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า  $\varepsilon_x$  จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟท์ (drift velocity)  $V_{DX}$  ในทิศทาง  $+x$  และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแส จะเกิดมีแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) กระทำต่อโฮลด้วย ตามสมการ

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

โดยที่  $\vec{F}_L$  คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\vec{F}_L| = F_L = e V_{DX} B_z \quad (12)$$

และมีทิศในแกน  $-y$  ดังนั้น จะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาแกน  $-y$  และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมาก ๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $\varepsilon_y$  ในทิศ  $+y$  สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ ในภาวะสมดุล และ steady state ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ  $+x$  ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ ( $F_L$ ) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน ( $e\varepsilon_y$ ) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$e\varepsilon_y = F_L = e \cdot V_{DX} \cdot B_z \quad (13)$$

จาก

$$\varepsilon_y = V_{DX} \cdot B_z \quad (14)$$

$$J_x = p \cdot e \cdot V_{DX}$$

หรือ

$$V_{DX} = \frac{J_x}{pe}$$

แทน  $V_{DX}$  ลงในสมการ (4) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_y = \frac{J_x B_z}{pe}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\varepsilon_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pe} = R_H \quad (15)$$

โดย

$R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

จากรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $w$  จะได้

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

โดย

$V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage)

โดยการแทนค่า  $J_x = \frac{I}{wd}$  และ  $\varepsilon_y = \frac{V_H}{w}$  ลงในสมการ (5) จะได้

$$R_H = \frac{V_H}{w \cdot I \cdot B_z} \cdot wd$$

หรือ

$$R_H = \frac{dV_H}{IB_z} = \frac{1}{pe} \quad (17)$$

$$\therefore V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d} \quad (18)$$

ความหนาแน่นของโฮล คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

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

โดย R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ

จาก 
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ep\mu_p}$$

ดังนั้นจะได้

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

จากสมการที่ (9), (10) และ (11) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้เราสามารถหาค่า parameter ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

ในการทำงานเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือมีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $R_H$  เป็น

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

ดังนั้นโดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้

ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ  $\varepsilon_y$  และ  $\varepsilon_x$  ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม  $\theta$  กับแกน +x ดังรูปซึ่งมุม  $\theta$  ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการแทนค่า  $\varepsilon_y = \frac{J_x B_z}{pe}$  และ  $J_x = \sigma \varepsilon_x$  จะได้

$$\tan \theta = \frac{J_x B_z}{pe} \cdot \frac{\sigma}{J_x} = \frac{\sigma B_z}{pe}$$

หรือ

$$\tan \theta = \frac{\sigma B_z}{pe} = pe \mu_p \frac{B_z}{pe} = \mu_p B_z$$

$$\frac{\sigma}{pe} = \mu_p$$

$$\mu_p = \sigma \cdot R_H$$

ซึ่งเท่ากับสมการ (11) นั่นเอง

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะหรือพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ(Lattice Scattering) จะได้ว่า

$$R_{H \text{ ชนกัน}} = \frac{3\pi}{8} \cdot R_H = 1.18 R_H \quad (23)$$

และ

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

หรือ

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

$$\mu_H \text{ ชนกัน} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (24)$$

โดย  $\mu_H$  คือ Hall mobility

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized Impurity Scattering) จะได้

$$R_{H \text{ ชนกัน}} = \frac{315\pi}{512} \cdot R_H = 1.93R_H \quad (25)$$

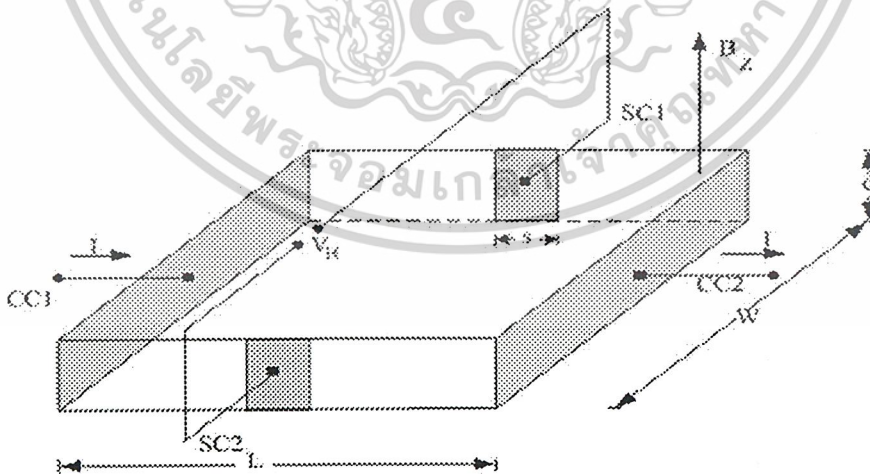
และ

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

#### 2.4 แฟกเตอร์ G (Geometry Factor)

ฮอลล์เพลท (Hall plate) ของฮอลล์ดีไวซ์ โดยปกติแล้วจะถูกสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความหนาน้อยๆ วัสดุที่นำมาสร้างต้องมีความหนาแน่นค่ามี 4 ขั้ว และรอยต่อระหว่างขั้ว เป็นแบบโอห์มมิก ซึ่งแสดงในรูป 2.11 แรงดันฮอลล์จะวัดได้จากขั้ว SC1 และ SC2 จากสมการที่ 27 จะสามารถหาแรงดันฮอลล์ได้ แต่ในฮอลล์เพลทที่รูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะขึ้นอยู่กับค่าแฟกเตอร์ G อยู่ด้วย ซึ่งแรงดันฮอลล์จะหาได้จาก

$$V_H = \frac{R_H \cdot G \cdot B_z}{d} \quad (27)$$



รูปที่ 2.11 รูปร่างฮอลล์เพลทรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แฟคเตอร์  $G$  เป็นค่าแรงดันทางเรขาคณิตซึ่งเป็นผลมาจากรูปร่างของฮอลล์เพลท โดยขึ้นอยู่กับความยาว  $L$  ความกว้าง  $W$  ขนาดของขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค (SC1, SC2) และมุมฮอลล์  $\theta_H$  ค่าแฟคเตอร์  $G$  มีค่าประมาณเข้าใกล้ 1 ถ้าช่วงความยาวฮอลล์เพลท  $L$  มีค่ามากๆ โดยอธิบายได้ว่า กระแสที่ไหลระหว่างขั้วทั้งสองจะประมาณเป็นแนวเส้นตรง ทำให้ไม่มีผล หรืออาจมีแต่น้อยมากต่อแรงดันฮอลล์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 28

$$G = \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\pi L}{2W}\right) \right] \left[ 1 - \frac{2S\theta_H}{\pi W \tan \theta_H} \right] \quad (28)$$

สำหรับค่ามุมฮอลล์ ที่มีค่าน้อยๆ เทอมแรกในวงเล็บ จะแสดงผลของระยะห่างระหว่างขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค หรือความยาว  $L$  ขณะที่เทอมที่ 2 จะจำกัดขนาดของขั้วเซ็นเซอร์คอนแทคหรือขนาด  $S$  และค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงมากกว่า 4% ค่า  $G$  จะประมาณเข้าใกล้ 1 ถ้า  $\frac{L}{W} > 3$  และ  $\frac{S}{W} < \frac{1}{20}$  และในทางตรงกันข้ามถ้า  $L < W$  และ SC1, SC2 อยู่ที่ตำแหน่ง  $Y = \frac{L}{2}$  ค่า  $G$  จะประมาณได้

$$G = 0.74 \frac{L}{W} \quad (29)$$

ในฮอลล์เพลทที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เราสามารถประมาณค่าแฟคเตอร์  $G$  ได้ดังนี้

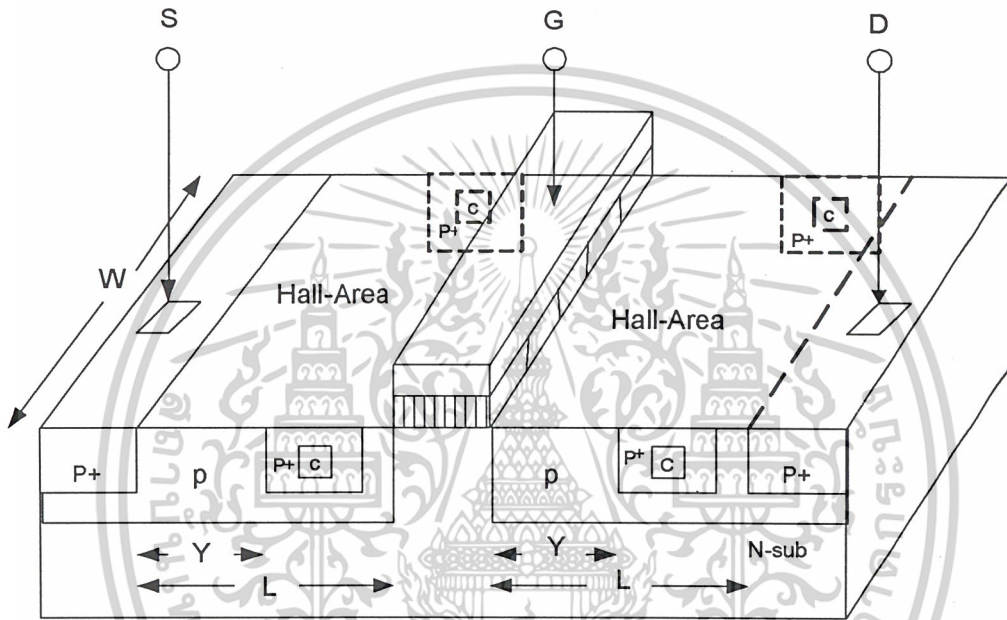
กรณี

$$\begin{aligned} \frac{L}{W} > 3 & \quad \text{ค่า} \quad G \approx 1 \\ \frac{L}{W} < 3 & \quad \text{ค่า} \quad G < 0.7 \\ \frac{L}{W} \approx 3 & \quad \text{ค่า} \quad G > 0.7 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าเมื่อต้องการค่าแรงดันฮอลล์สูงๆ จะต้องให้  $\frac{L}{W}$  มีค่าต่ำแต่เมื่อค่า  $\frac{L}{W}$  ต่ำๆ ทำให้ค่า  $G$  มีค่าน้อยดังนั้น  $G$  จึงมีผลให้แรงดันฮอลล์ลดลง ฉะนั้นค่า  $\frac{L}{W}$  จึงต้องเลือกให้เหมาะสม

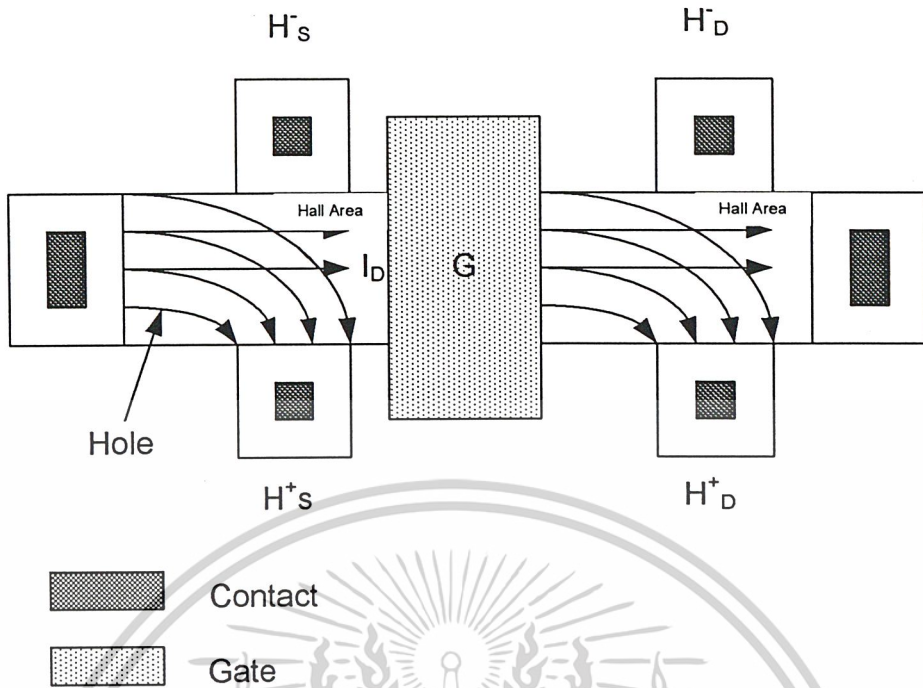
## 2.5 แนวคิดและการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

มอสเฟตที่มีพฤติกรรมเป็นแมกเนติกเซนเซอร์ โดยมี Hall-Area เพิ่มมาในชั้นของ เกรน และ ซอส ดังรูป 2.12 โดยเมื่อตัวอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบทำงานโดยอาศัยทฤษฎีมอส ตามที่ได้กล่าวมา ประจุพาหะในชั้น Hall-Area จะเกิดการเบี่ยงเบน และมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน จะทำให้เกิดแรงดันฮอลล์โวลต์เตจ ( $V_H$ ) ตามทฤษฎี Hall Effect



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยโครงสร้างมอส

อุปกรณ์ที่ทำการออกแบบนี้จะประกอบด้วย ส่วนซอส(Source) และเกรน(Drain) ซึ่งจะเป็นส่วนของแซนแนล ด้านบนจะเป็นส่วนของเกต(Gate) และส่วนบนขั้วซอสและเกรนจะเพิ่มขั้วอีก 4 ขั้ว เรียกว่า เซ็นเซอร์คอนแทค(Sensor Contact) หรือฮอลล์โพรบ (Hall Probe) ตรงส่วนที่เป็นชั้น Hall Area โดยจะกำหนดความกว้างและความยาวเป็น W และ L ตามลำดับ และที่ตำแหน่งของฮอลล์โพรบสามารถแทนด้วย Y โดยระยะ Y เป็นระยะที่อยู่ระหว่าง Source และ Hall Probe และระหว่าง Gate และ Hall Probe นั้นเอง



รูปที่ 2.13 แสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยโครงสร้างมอส

จากการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีมอส โดยเฉพาะ PMOS ตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาเมื่อค่า  $V_{GS}$  มีค่าน้อยกว่า  $V_T$  จะทำให้มอสสามารถทำงานได้โดยมีกระแสครน ( $I_D$ ) ไหลจากซอสไปเดรนตามรูปที่ 2.13 โดยมีสมการกระแสครนเป็น

$$I_D = K \left[ (V_G - V_T) V_{DS} - \frac{V_{GS}^2}{2} \right] \quad (30)$$

$$\text{โดยที่ } K = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L}$$

และเนื่องมาจากกระแส  $I_D$  ไหลผ่าน Hall Area แล้วให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของกระแส ตามทฤษฎีของ Hall Effect และจะเกิดมี แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำต่อโฮล โดยขนาดของแรงลอเรนซ์

$$|F| = q v_x B_z \quad (31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางของแรงลอเรนซ์ จะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ซึ่งตรงกับขั้วของ Hall Probe พอดีซึ่งถ้าโฮลมีการเบี่ยงเบนมาก ตามทฤษฎีก็จะทำให้แรงดัน  $V_H$  ที่ Hall Probe มีค่ามากด้วยทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับกระแส  $I_D$  และแรงดันที่จ่ายให้กับตัวอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบด้วย และเมื่อกระแสไหล  $I_D$  ไหลผ่านไปยังเดรน ผ่าน Hall Area จึงน่าจะทำให้เกิดแรงดัน  $V_H$  อีกชุดหนึ่งตามทฤษฎีที่กล่าวมา และหลังจากนั้นนำแรงดันตรงขั้ว Hall Probe มาต่ออนุกรมกัน เพื่อที่จะทำให้ได้แรงดัน  $V_H$  ที่มากขึ้นในการนำไปใช้งาน

## 2.6 คุณสมบัติทั่วไปของของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

### 1. ย่านวัด (Range)

เป็นการจำกัดค่าอินพุตและเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ในการวัด เช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้ความดันอยู่ในช่วง 0-7 บาร์ โดยให้กระแสด้านเอาต์พุตอยู่ในช่วง 4-20 มิลลิแอมป์

### 2. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้นเป็นค่าแสดงของสัญญาณเอาต์พุต เนื่องจากการเปลี่ยนค่าสัญญาณทางอินพุตโดยเมื่อสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงไปเท่าใดก็ตาม สัญญาณทางเอาต์พุตก็เปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้น

### 3. ความไว (Sensitivity)

เป็นผลตอบสนองของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุต ค่าความไวเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่บ่งบอกถึง ความสามารถของเซ็นเซอร์ ที่สามารถรับรู้สนามแม่เหล็กที่ค่านั้น จะต้องมีการตอบสนองค่าสัญญาณเอาต์พุตค่ามากกว่าที่สนามแม่เหล็กค่าๆ ค่าความไวที่มีการไบอัสด้วยกระแสจะสามารถหาได้จาก

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B_z} = \frac{R_H \cdot G}{t} = \frac{G \cdot r_n}{qnt} \quad (32)$$

### 4. ออฟเซ็ท (Offset)

เกณฑ์ที่สำคัญของแมกเนติกเซ็นเซอร์คือการตรวจจับสัญญาณสนามแม่เหล็กค่าๆ แล้วได้ผลของสัญญาณเอาต์พุตสูงๆ สาเหตุหนึ่งของการกำจัดผลดังกล่าวคือ ออฟเซ็ท เป็นค่าของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อไม่จ่ายสนามแม่เหล็ก ( $B=0$ )

สาเหตุที่สำคัญของออฟเซ็ทอาจเกิดจาก ความไม่สมบูรณ์แบบ (Imperfection) ของเทคโนโลยีกระบวนการผลิต (Process Technology) การปรับซ็อนมาร์ค (Alignment) การคั้งในกระบวนการบรรจุ ลงถึง (packing) และอายุการใช้งานของเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. ความผิดพลาด (Error)

เนื่องจากขั้นตอนการดำเนินงาน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติ ดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า ค่าความผิดพลาด ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงไม่มีความแน่นอน (Uncertainty) รวมอยู่ด้วยเสมอ

### 6. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision)

ในการวัดค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรง ถือเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง มีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึง สามารถวัดได้อย่างละเอียด (Sharp Definition) อุปกรณ์ที่วัดมีความละเอียดสูง หมายถึง มีการแบ่งสเกลอย่างละเอียดอย่างมาก ทำให้สามารถอ่านค่าได้อย่างละเอียด ในความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงคือ ค่าที่วัดได้ในแต่ละครั้งที่ค่าเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกันหรือความคงเส้นคงวา (Consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (Repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีค่านี้สูงจะมีประสิทธิภาพสูง

### 7. เสถียรภาพ (Stability)

ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัดคือ ความสามารถในการให้เอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตค่าคงที่ค่าเดิมแม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป

### 8. ฮิสเตอรีซิส (Hysteresis)

การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเตอรีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นถือเป็นค่าความผิดพลาด

## บทที่ 3

## การออกแบบโครงสร้างและโฟโตมาร์ค

## 3.1 การออกแบบ

หลักการสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท ก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ชนิดอื่นๆ คือ ต้องการอุปกรณ์ ที่มีค่าความไวสูงๆ นั่นก็ คือ ต้องออกแบบอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท ให้มีค่าแรงดันฮอลล์สูงๆ จากสมการ

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

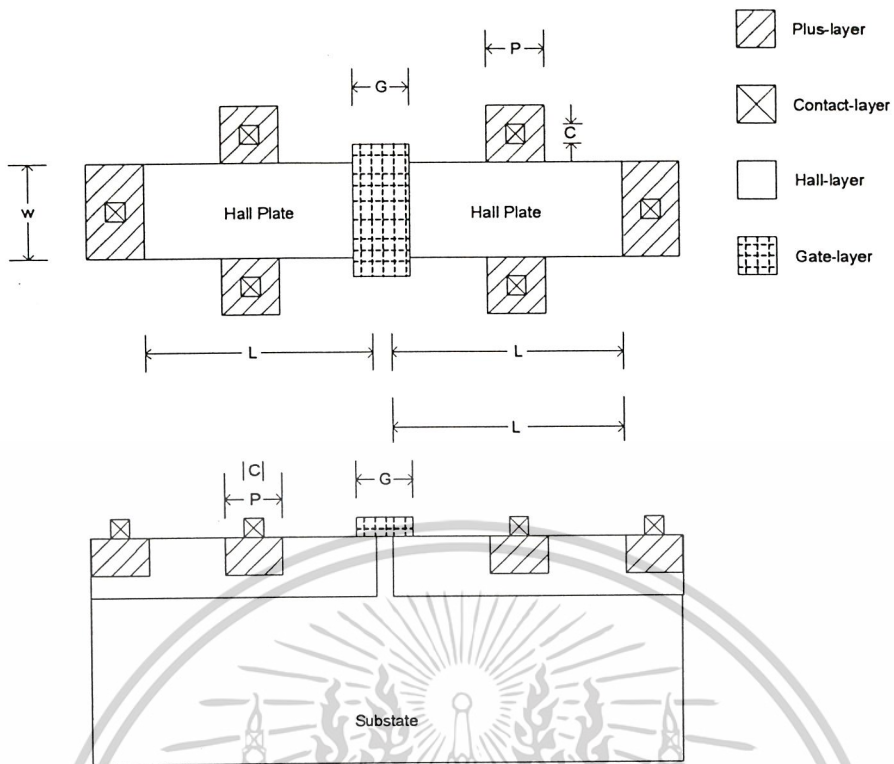
หรือ

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

ทำให้เราทราบว่า การออกแบบอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท ที่มีแรงดันฮอลล์สูงๆ ทำได้ดังนี้

1. ทำให้ค่า  $p$  ต่ำๆ โดยที่  $p$  คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะ
2. ทำให้ค่า  $d$  มีค่าน้อยๆ โดยที่  $d$  คือ ความหนาของอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท

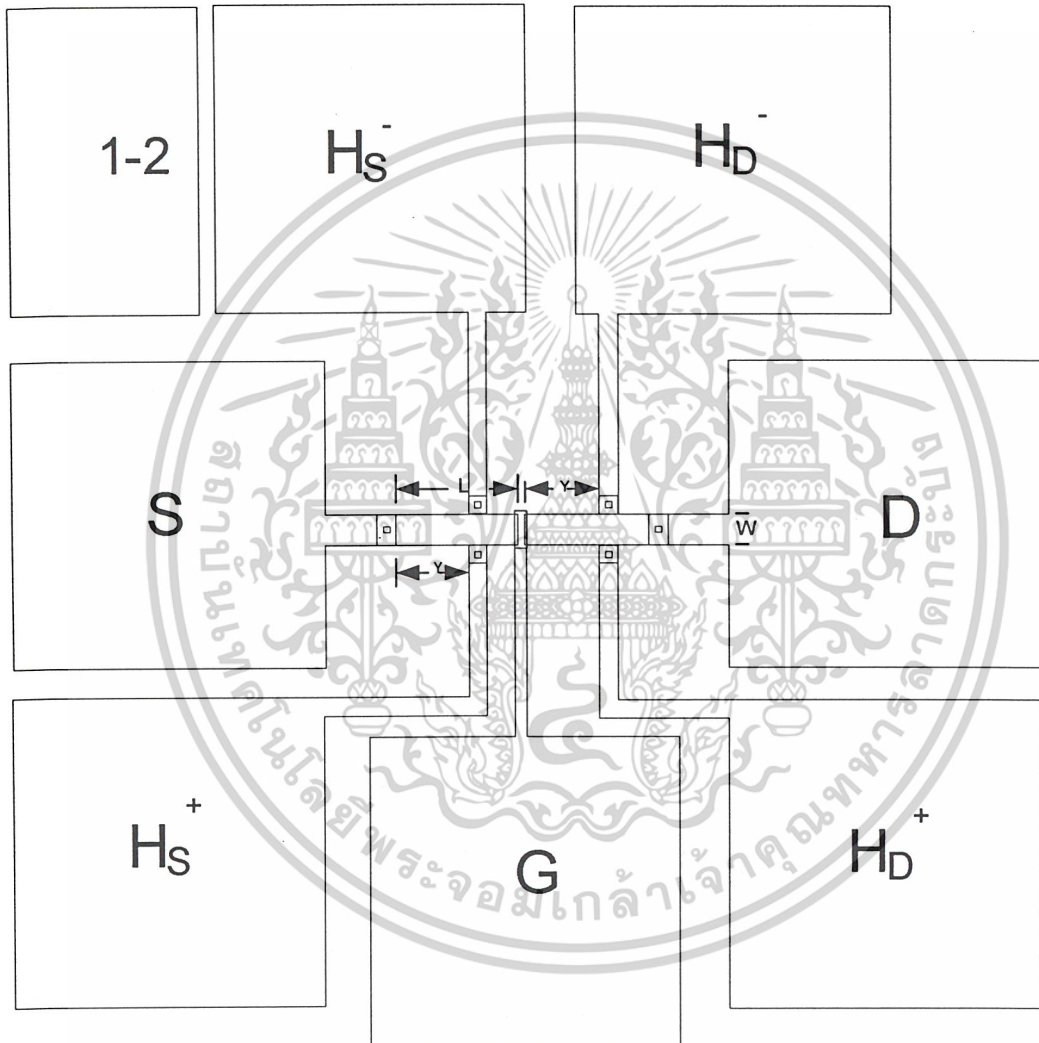
แต่ในการทำมอสฮอลล์เฟลทในครั้งนี้ได้กำหนดให้มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังรูปข้างล่างนี้ เนื่องจากไม่ได้กำหนดค่าแหล่งจ่าย (Supply) เป็นกระแสหรือแรงดันและเพื่อพิสูจน์ และวิเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท เป็นแมกเนติกเซนเซอร์จึงมีการออกแบบพารามิเตอร์ ของความยาว  $L$  อีก 3 ค่าคือ  $400 \mu\text{m}$ ,  $200 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  และระยะของขั้วคอนแทค ( $Y$ ) ให้มีขนาดต่างตามรูป โดยขั้วคอนแทคมีขนาด  $20 \times 20 \mu\text{m}$



รูปที่ 3.1 แสดงภาพด้านบนและภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยขนาดของ P (Plus-layer) มีขนาด  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$   
 G (Gate-layer) มีขนาด  $40 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$   
 C (Contact-layer) มีขนาด  $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$   
 โดยที่ทุกพารามิเตอร์ขนาดของ P, G, C จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาแนวคิดการทำงานของอุปกรณ์นั้น จึงได้นำมาทำการออกแบบ มาส์ค โดยมี การออกแบบ ให้มีพารามิเตอร์ต่างๆ ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบที่โครงสร้างพารามิเตอร์  $W, L, Y$  โดยที่ตัวเลข 1-2 หมายถึงอุปกรณ์ตัวที่ 2 พารามิเตอร์ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยได้ทำการออกแบบให้มีพารามิเตอร์ต่างๆ 4 แบบดังนี้

1. ที่ความยาว  $L = 400 \text{ um}$   $W = 100 \text{ um}$   $Y = \frac{1}{2} L$
2. ที่ความยาว  $L = 400 \text{ um}$   $W = 100 \text{ um}$   $Y = \frac{3}{4} L$
3. ที่ความยาว  $L = 200 \text{ um}$   $W = 100 \text{ um}$   $Y = \frac{1}{2} L$
4. ที่ความยาว  $L = 100 \text{ um}$   $W = 100 \text{ um}$   $Y = \frac{1}{2} L$

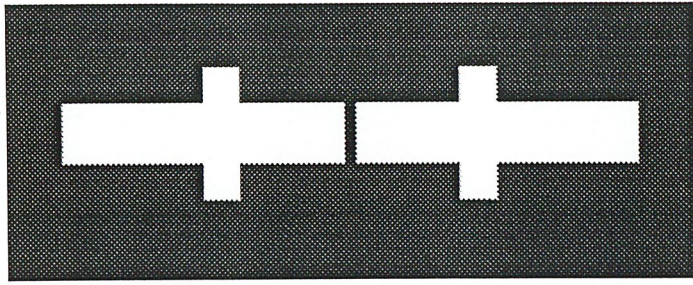
จากพารามิเตอร์แบบที่ 1-3 ได้ทำการออกแบบ ให้  $L$  มีความยาวมากกว่า  $W$  นั้น ก็เพื่อที่จะทำการทดสอบโดยการให้ไบอัสระหว่าง เกรนและซอสเป็นกระแส และพารามิเตอร์ที่ 4 นั้นออกแบบให้  $L=W$  เพื่อที่จะทำการทดสอบโดยการให้ไบอัส เป็น แรงดัน จากแนวคิดที่ กระแส  $I_D$  ขึ้นอยู่กับ  $\frac{W}{L}$  และค่า  $C_{ox}$  แต่ค่า  $C_{ox}$  นั้นจะเกิดขึ้นตอนกระบวนการสร้างไม่อยู่ที่การออกแบบ ส่วนข้อ  $H_D$ ,  $H_S$ ,  $G$  และ  $S$  เป็นข้อจะดูนิยาม ที่ใช้ต่อกับชั้น Contact Window เพื่อนำไปต่อใช้งาน

### 3.2 โฟโตนามส์ค

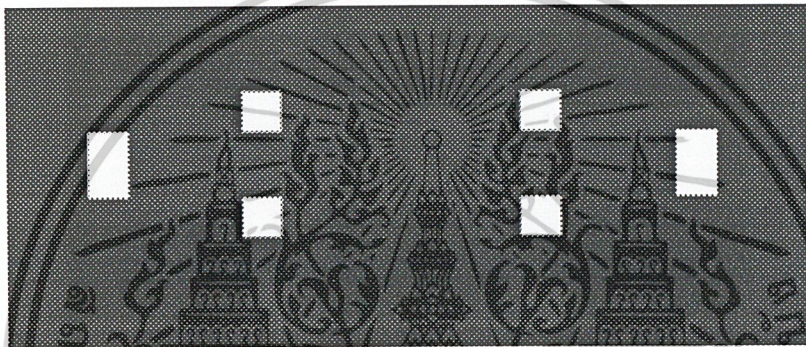
จากที่ได้ทำการออกแบบพารามิเตอร์ต่างแล้วจึงได้นำรูปร่าง และพารามิเตอร์ต่างๆ ไปสร้างมาส์ค โดยมีจำนวนทั้งหมด 5 มาส์ค ด้วยกัน ได้แก่

1. P- Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับ เปิดชั้นออกไซด์ โดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน (p) ดังรูป 3.3 ก
2. P<sup>+</sup>-Mask (Plus- Mask) โดยการเปิดช่องออกไซด์ และแพร่อะตอมสารเจือโบรอน (p<sup>+</sup>) เพื่อที่จะทำเป็นรอยต่อสัมผัสแบบโอห์มมิก ดังรูป 3.3 ข
3. Gate-Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับเปิดช่องออกไซด์ เพื่อสร้างส่วนเกตโดยเกตที่ได้จะมีความหนาเรื่อยๆ ประมาณ 250-1,000 Å และมีความบริสุทธิ์สูง ดังรูป 3.3 ค
4. Contact Windows-Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียม กับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม ดังรูป 3.3 ง
5. Metal- Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization) เพื่อสะกัดชั้นอะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า ดังรูป 3.3 จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ก แสดงรูปร่าง Mask (P-Mask)

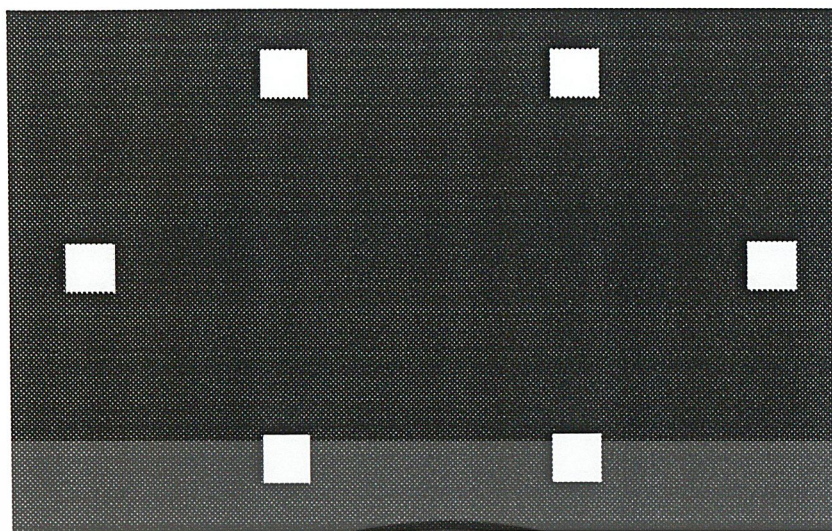


รูปที่ 3.3 ข แสดงรูปร่าง Mask 2 (P<sup>+</sup> - Mask)



รูปที่ 3.3 ค แสดงรูปร่าง Mask 3 (Gate-Mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ง แสดงรูปร่าง Mask 4 (Contact Windows-Mask)



รูปที่ 3.3 จ แสดงรูปร่าง Mask 5 (Metal-Mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

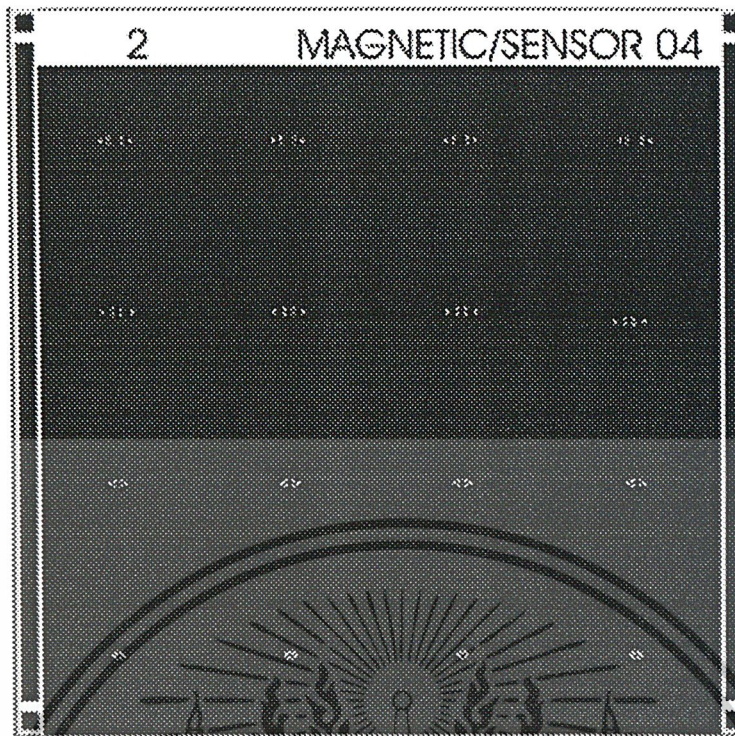
### 3.3 ทำการออกแบบเพื่อที่จะนำไปสร้างมาร์คจริง

จากพารามิเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบนั้น พารามิเตอร์ที่มีขนาดเล็กที่สุด เป็นชั้น Contact Window-Mask มีขนาด  $20 \times 20 \mu\text{m}$  จึงสามารถทำการออกแบบโปรแกรมกราฟฟิกทั่วไปได้ โดยในที่นี้นักศึกษาได้ทำการออกแบบ โดยใช้โปรแกรม Corel Draw โดยได้แสดงรูปที่ได้ทำการออกแบบ เพื่อที่จะนำไปสร้าง Metal Mask ได้ดังรูปที่ 3.4 ก-จ

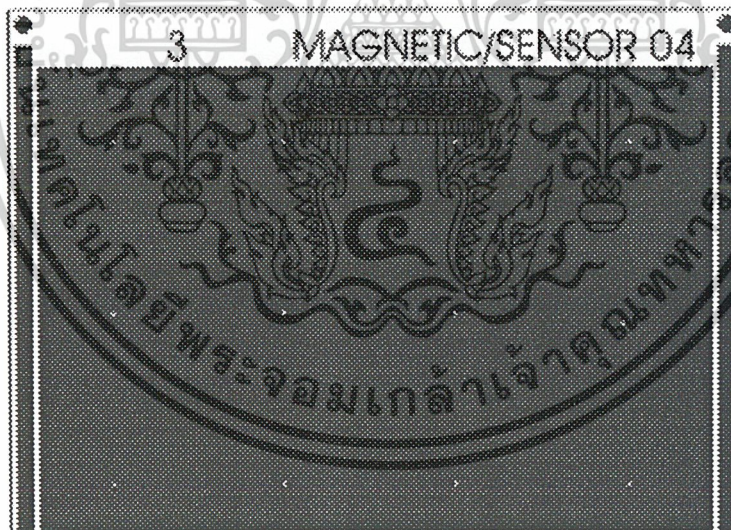


รูปที่ 3.4 ก แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 1(Corel Draw)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



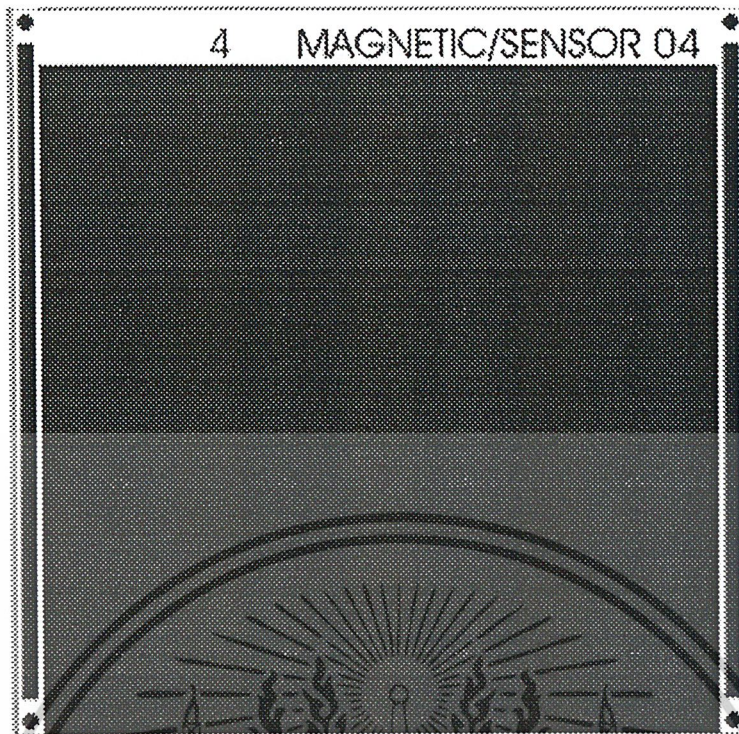
รูปที่ 3.4 ข แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 2(Corel Draw)



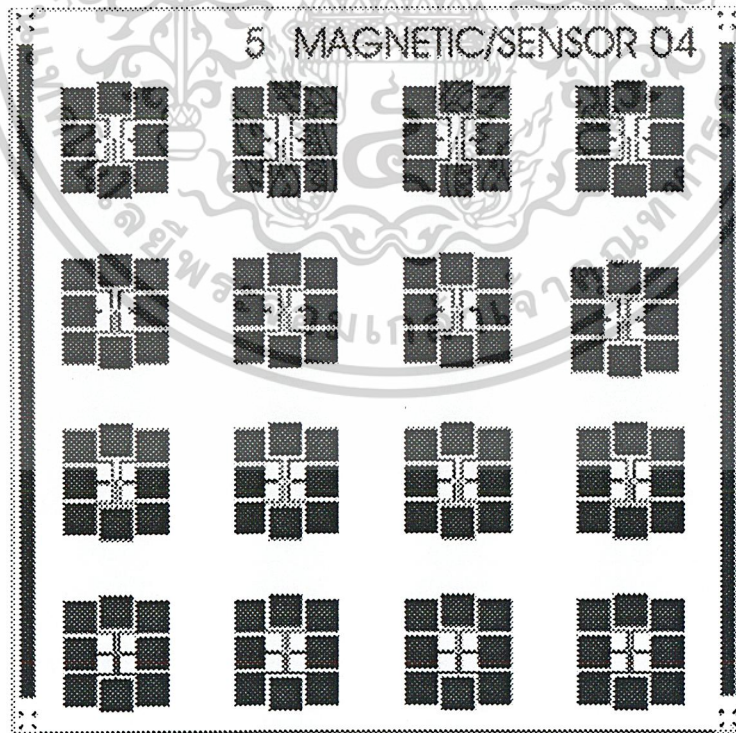
3.4

Mask 3(Corel Draw)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



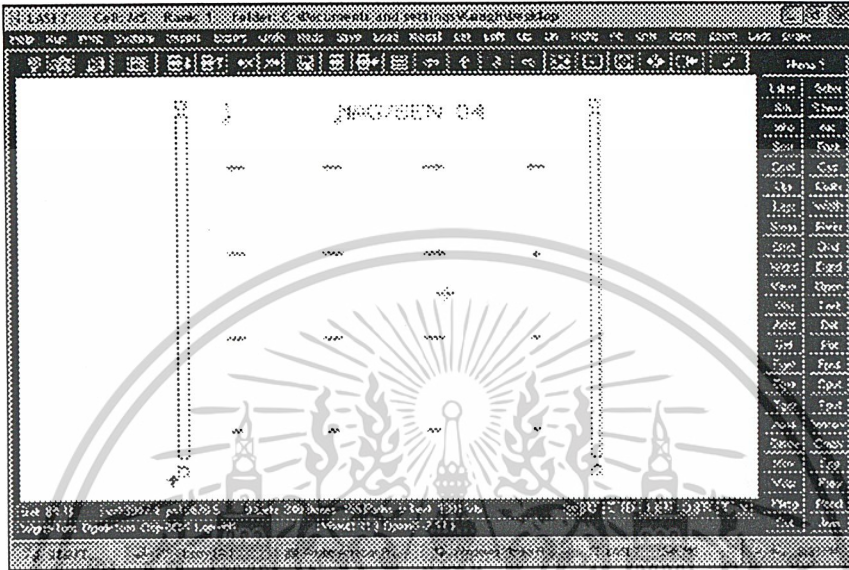
รูปที่ 3.4 ง แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 4(Corel Draw)



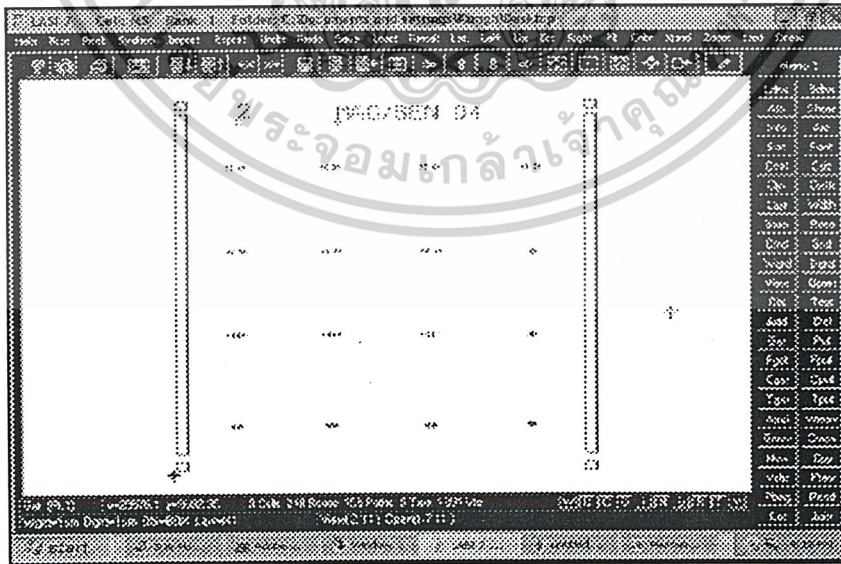
รูปที่ 3.4 จ แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 5(Corel Draw)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นอกจากนักศึกษาจะทำการออกแบบโครงสร้าง ของตัว photo mask ด้วยโปรแกรม CorelDraw แล้ว นักศึกษายังได้ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ออกแบบ คือโปรแกรม Lasi7 โดยออกแบบให้มีขนาดขั้วคอนแทกขนาด 40x40 um ได้แสดง mask 1-mask 5 ที่ออกแบบด้วย โปรแกรม Lasi7. ดังรูปที่1-5

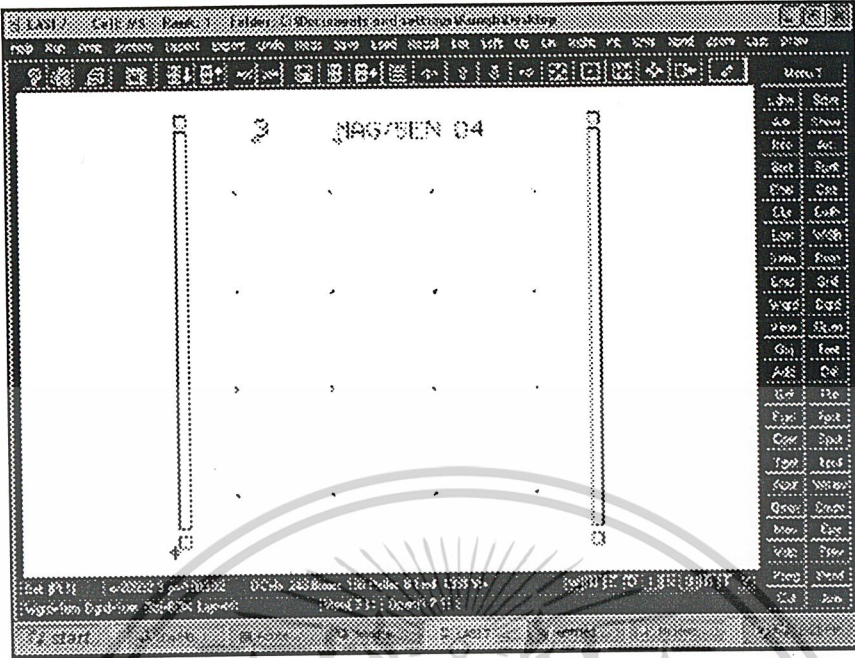


รูปที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 1(Lasi7)

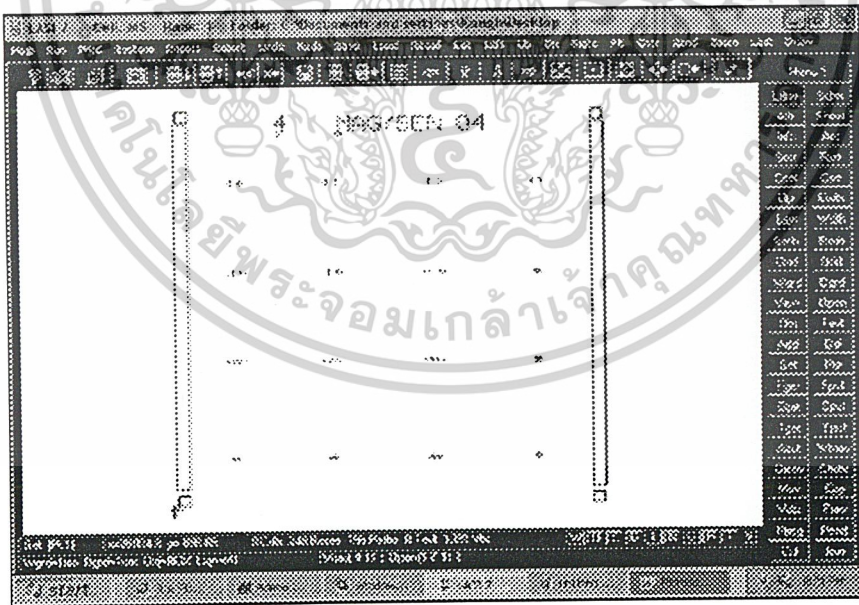


รูปที่ 3.6 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 2(Lasi7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

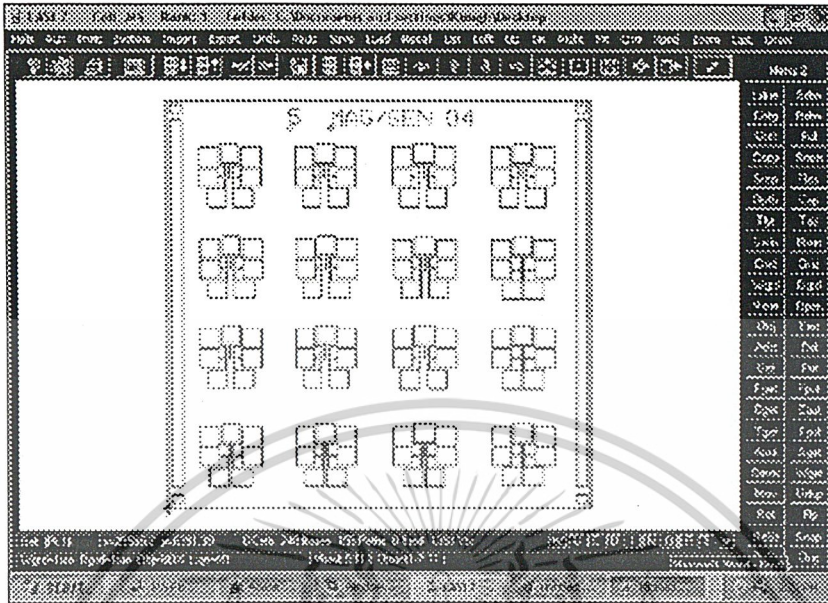


รูปที่ 3.7 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 3(Lasi7)

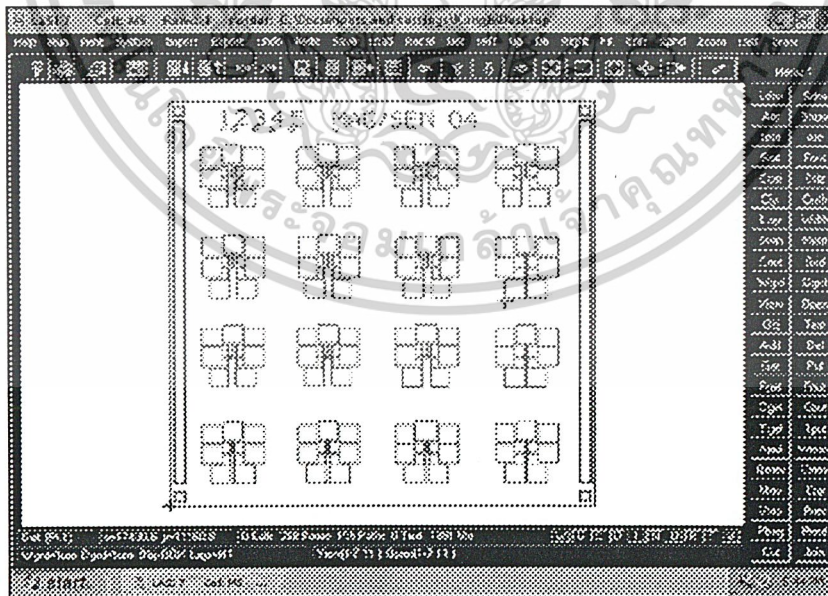


รูปที่ 3.8แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 4(Lasi7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงพารามิเตอร์แต่ละแบบของ Mask 5(Lasi7)



รูปที่ 3.10 แสดงภาพรวมของแต่ละมาร์ค (Lasi7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในรูปที่ 3.10 ได้แสดงส่วนของ mask 1-5 จะทำให้เห็นโครงร่างชิ้นงานจริงเป็นดังรูป และข้อแตกต่างจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CorelDraw คือตรงส่วน Mask Alignซึ่งจะมีการออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิมในมาตรา 1-4 จะเป็นแบบ Negative ส่วนในมาตราที่ 5 นั้นจะเป็นแบบPositive ทำตัว Mask Align จะมีขนาด Mask Align ของมาตรา 3

รายละเอียดเกี่ยวกับการใช้งาน โปรแกรม Lasi7. ที่ใช้ออกแบบmask นั้นได้เขียนเทคนิคการใช้งานโปรแกรม Lasi7. และปุ่มฟังก์ชันการทำงานที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบ mask อย่างคร่าวๆนั้น นักศึกษาได้ใส่ไว้ในภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

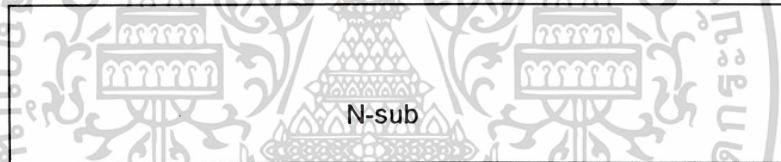
## บทที่ 4

## กระบวนการสร้าง

## 4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน

ในการสร้างใช้แผ่นผลึกชนิดเอ็นระนาบ(100) ความต้านทานของแผ่นเท่ากับ 50  $\Omega/\square$  แล้วทำความสะอาดผิวของซิลิคอน

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์(Deionized Water) 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรด  $\text{HNO}_3$  10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$



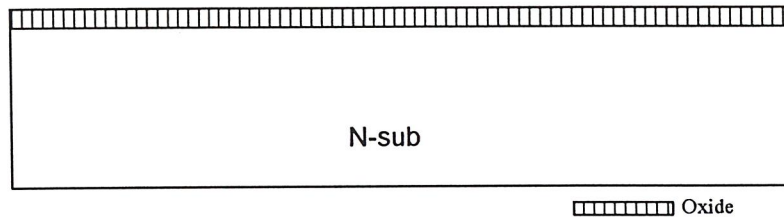
รูปที่ 4.1 การเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน

## 4.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน(Thermal Oxidation)

- กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกรด HF นาน 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์แล้วเป่าแห้ง
- ปรับอุณหภูมิ 1100 °C ที่เตาแพร่ให้คงที่
- นำแผ่นผลึกวางบน Boat แล้วนำไปวางไว้ที่ปากท่อควอทซ์ 5 นาที
- ค่อยๆ ดัน Boat ให้เข้าไปในกลางท่อควอทซ์อย่างช้าๆ 5 นาที
- ทำการออกซิเดชัน ถ้าเป็นแบบแห้ง(Dry)ที่อุณหภูมิ 1100 °C ในเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้ชอกซิเจนแห้งในอัตรา 1000 ซีซี/นาที ถ้าเป็นแบบชื้น(Wet)ที่อุณหภูมิ 85 °C ในเวลา 40 นาที ปล่อยให้ชอกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำในอัตรา 600 ซีซี/นาที และใช้แบบแห้ง(Dry)เป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 1100 °C ในเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ความหนาของชั้นออกไซด์ประมาณ 5000Å ทั้งแผ่นผลึกไว้ในท่อควอทซ์ตามเวลาที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

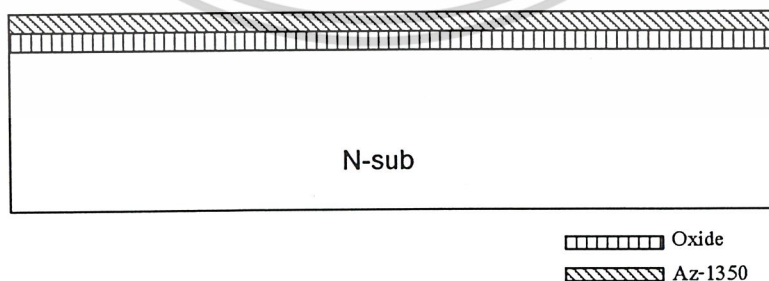
- ค่อยๆดึง Boat ให้ออกมาที่ปากท่อควอทซ์อย่างช้าๆ 5 นาที
- ทิ้งแผ่นผลึกไว้ที่ปากท่อราว 5 นาที แล้วเก็บขึ้น



รูปที่ 4.2 การสร้างชั้นออกไซด์

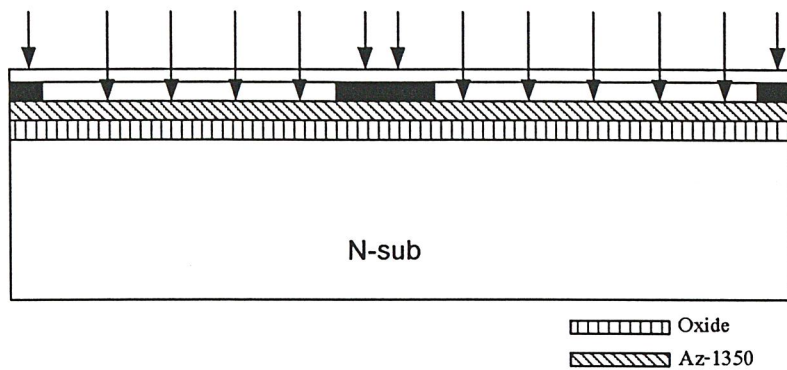
#### 4.3 กระบวนการโฟโวลติโซกราฟีมาส์ค 1

- อบแผ่นผลึกในเตาอบอุณหภูมิ 80 °C ประมาณ 10 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่องสปินเนอร์(Spinner)หมุนแผ่นผลึกโดยใช้ 2 step คือ step 1 ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ใช้เวลา 5 วินาที step 2 ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที (น้ำยาไวแสงที่ใช้เป็นชนิดบวก Az-1350)
- Pre bake หรือ Soft bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที
- ฉายแสง U.V. ผ่านมาส์ค 1 ใช้เวลาประมาณ 20 วินาที
- ล้างน้ำยาไวแสง(Development) ด้วยน้ำยาล้าง (Developer) น้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350 ให้จุ่มในสารละลายสำหรับล้าง Az (Az-Developer) ใช้เวลาประมาณ 40 วินาที และล้างน้ำบริสุทธิ์ 1 นาที
- Post bake หรือ Hard bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที

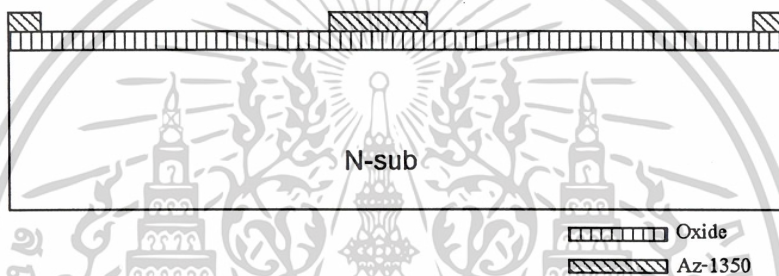


รูปที่ 4.3 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



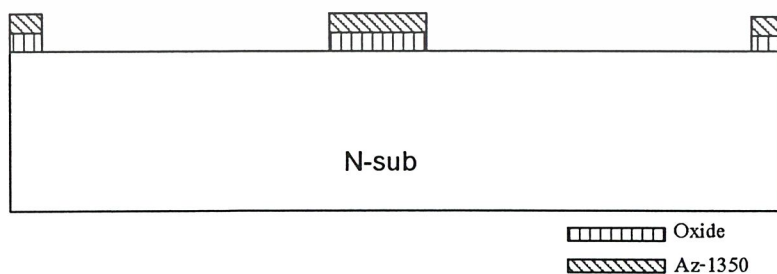
รูปที่ 4.4 ทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสค์ 1



รูปที่ 4.5 ถังน้ำยาไวแสง(Dvelop)

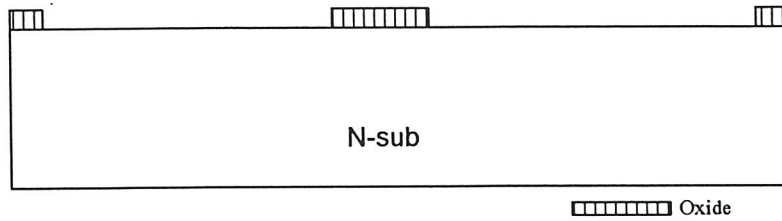
#### 4.4 Oxide Etching

- เอตซิงค์แบบเปียก(Wet Etching) การกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer for Oxidation) และมีอัตราการกัด  $1000 \text{ \AA} / \text{นาที}$  ใช้เวลากัดประมาณ 5 นาที
- ตอกน้ำยาไวแสงชนิดบวกรวมในอะซิโตน(Acetone) 2 นาที
- ล้างน้ำบริสุทธิ์แล้วเป่าให้แห้ง



รูปที่ 4.6 เอตซิงค์แบบเปียก(Wet Etching)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ล้างน้ำยาไวแสง(Develop)

#### 4.5 การแพร่สารเจือชนิดโบรอน

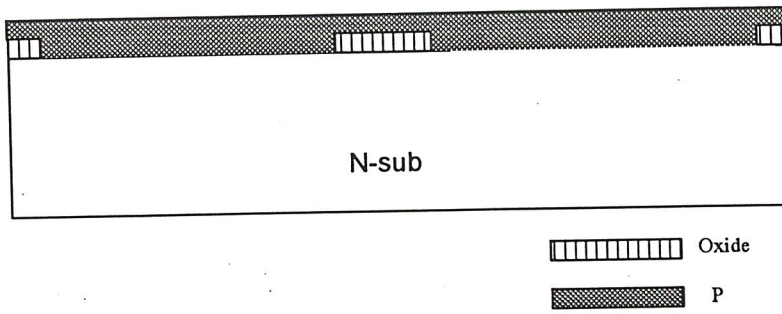
เนื่องจากระดับพลังงานผู้รับของโบรอนอยู่ที่ 0.01 eV โบรอนที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่สูงพอประมาณ  $10^{-18} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 1150 °C ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้สะดวกโดยการแพร่ใช้สารประกอบโบรอนไนไตรด์(BN)เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอน ก่อนทำการแพร่ BN จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะใช้งานได้คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ที่บริเวณผิวของแผ่น BN กลายเป็นโบรอนไดออกไซด์( $\text{B}_2\text{O}_3$ )เสียก่อนเรียกว่า การ Activate จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนมาวางใกล้กับแผ่น BN นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1000 °C (บรรยากาศของไนโตรเจน)

-เคลือบสารเจือโบรอนลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่องสปินเนอร์(Spinner) หมุนแผ่นผลึกโดยใช้ความเร็วรอบ 5000 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที

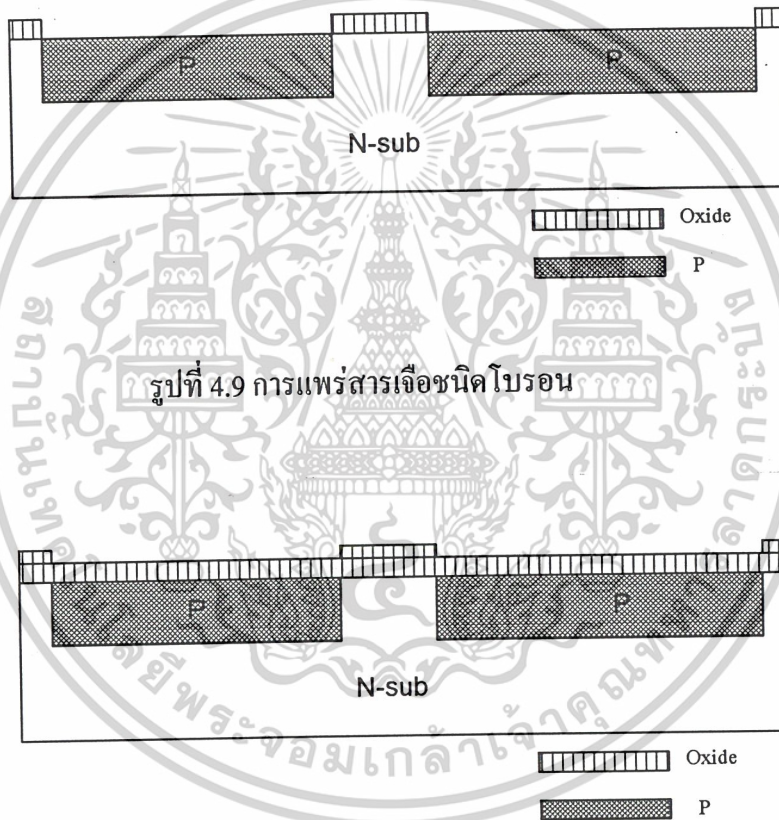
-นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C ใช้เวลา 10 นาที

-การแพร่โบรอนกระทำสองขั้นตอน คือ โดยทำการชั้น Deposit ที่อุณหภูมิ 820 °C ใช้เวลา 9 นาที ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ไนโตรเจน 99 % และออกซิเจน 1 % แล้วนำไปล้างด้วย Buffer for Boron เพื่อที่ล้างเอาสารแพร่โบรอนที่ไม่ต้องการออก

-ต่อจากนั้นจึงทำการแพร่ชั้นที่สองต่อไปคือ Drive in โดย (Wet Drive in) คือต้มน้ำที่อุณหภูมิ 90 °C แล้วให้น้ำผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์แล้วในท่อควอทซ์เป็นบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1000 °C ในเวลา 30 นาทีเพื่อที่จะได้ความลึกของชั้นพีประมาณ 0.7 ไมครอน แล้วได้ชั้นของออกไซด์ประมาณ 1000 Å



รูปที่ 4.8 เคลือบสารเจือโบรอน



รูปที่ 4.9 การแพร่สารเจือชนิดโบรอน

รูปที่ 4.10 การสร้างชั้นออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์ค 2

-อบแผ่นผลึกในเตาอบอุณหภูมิ 80 °C ประมาณ 10 นาที

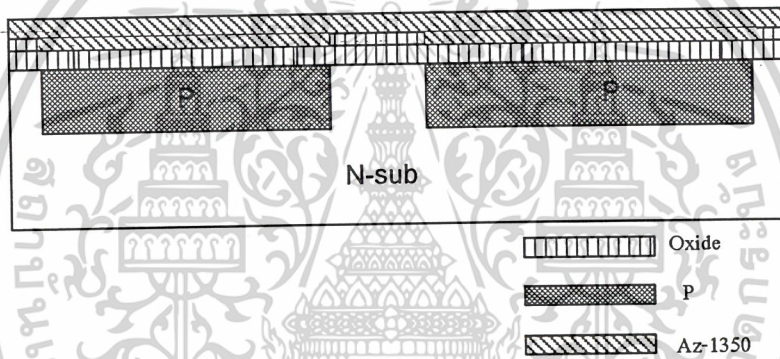
-เคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่องสปินเนอร์(Spinner)หมุนแผ่นผลึก โดยใช้ 2 step คือ step 1 ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาทีใช้เวลา 5 วินาที step 2 ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที (น้ำยาไวแสงที่ใช้เป็นชนิดบวก Az -1350)

-Pre bake หรือ Soft bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที

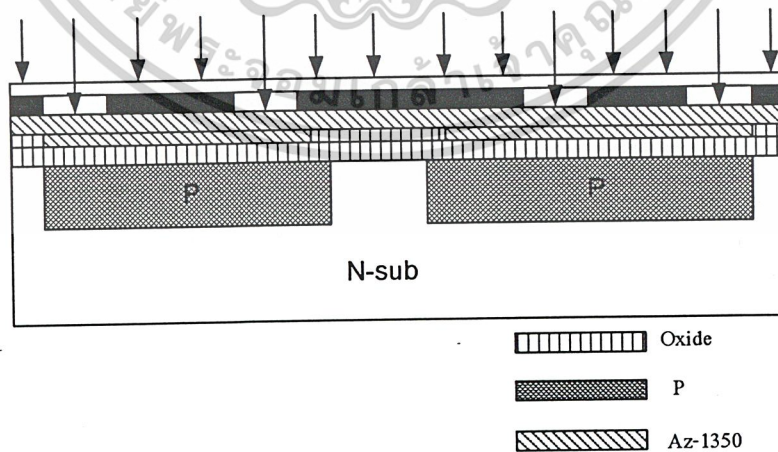
-ฉายแสง U.V. ผ่านมาส์ค 2 ใช้เวลาประมาณ 20 วินาที

-ล้างน้ำยาไวแสง(Development) ด้วยน้ำยาล้าง (Developer) น้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350 ให้จุ่มในสารละลายสำหรับล้าง Az (Az-Developer) ใช้เวลาประมาณ 40 วินาที และล้างน้ำบริสุทธิ์ 1 นาที

-Post bake หรือ Hard bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที

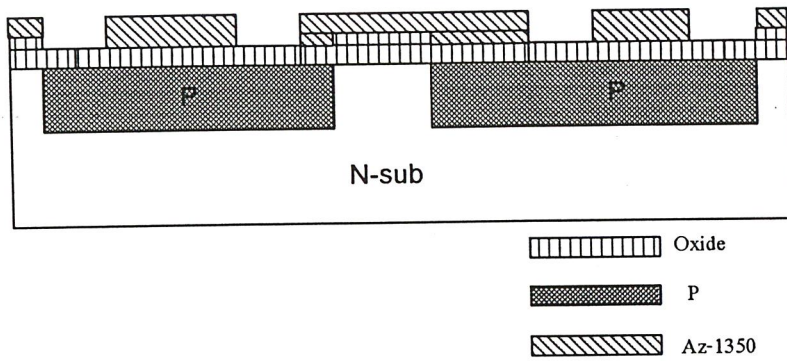


รูปที่ 4.11 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350



รูปที่ 4.12 ทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาส์ค 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



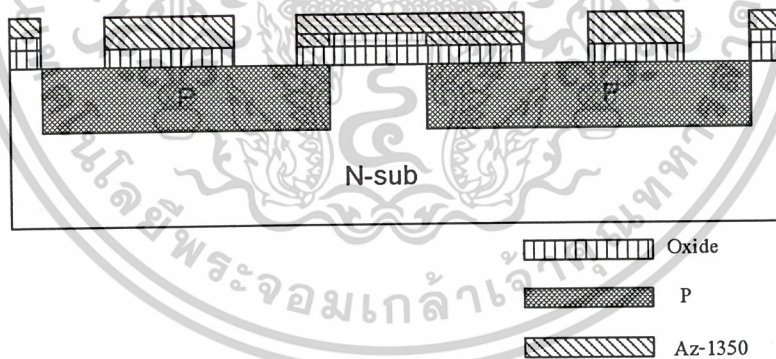
รูปที่ 4.13 ล้างน้ำยาไวแสง(Dvelop)

#### 4.7 Oxide Etching

-ทำการสกัดชั้น  $\text{SiO}_2$  โดยจุ่มในสารละลาย Buffer for Oxidation ใช้เวลาประมาณ 1 นาที แล้วเป่าให้แห้ง

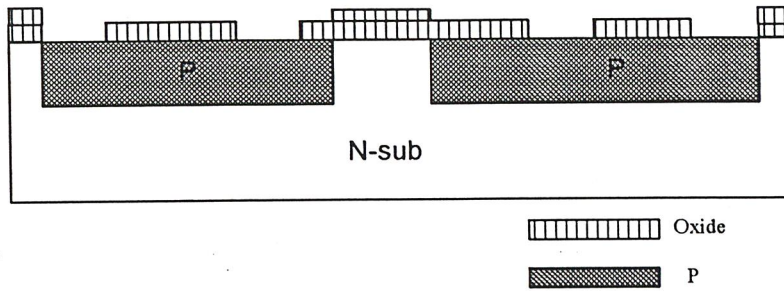
-นำไปล้างน้ำยาไวแสง ด้วยอะซิโตน 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที แล้วจุ่มน้ำ DI แล้วเป่าแห้งแล้ว

-ทำความสะอาดแผ่นด้วยการต้มในแก้วของไนโตรโคโร 5 นาที แล้วทำการอุดคร่าโซนิกในแก้วของอะซิโตน 2 นาที แล้วเป่าแห้ง



รูปที่ 4.14 เตซิงค์แบบเปียก(Wet Etching)

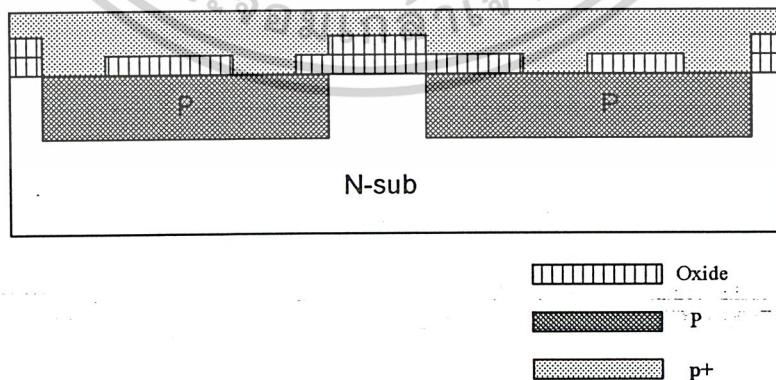
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ล้างน้ำยาไวแสง(Dvelop)

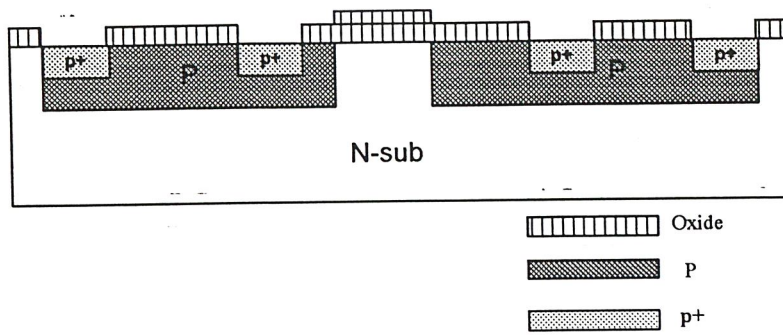
#### 4.8 การแพร่สารเจือชนิดโบรอนที่เข้มข้น

- ทำการแพร่สารเจือ โบรอน เพื่อสร้างส่วนขอส ครน และเซนเซอร์คอนแทค
- เคลือบสารเจือ โบรอนลงบนแผ่นผลึก โดยใช้เครื่องสปินเนอร์(Spinner) หมุนแผ่นผลึก โดยใช้ ความเร็วรอบ 5000 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที
- นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C ใช้เวลา 10 นาที
- การแพร่โบรอนกระทำสองขั้นตอน คือ โดยทำการชั้น Deposit ที่อุณหภูมิ 950 °C ใช้เวลา 16 นาที ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ไนโตรเจน 99 % และออกซิเจน 1 % แล้วนำไปล้างด้วย Buffer for Boron เพื่อที่ล้างเอาสารแพร่โบรอนที่ไม่ต้องการออก
- ต่อจากนั้นจึงทำการแพร่ชั้นที่สองต่อไปคือ Drive in โดย (Wet Drive in) คือต้มน้ำที่อุณหภูมิ 90°C แล้วให้น้ำผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์แล้วในท่อควอทซ์เป็นบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 950 °C ในเวลา 30 นาทีเพื่อที่จะได้ความลึกของชั้นที่ประมาณ 0.3 ไมครอน แล้วได้ชั้นของออกไซด์ประมาณ 1000Å

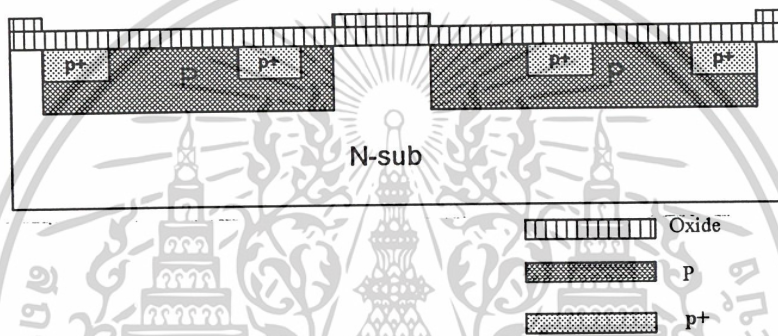


รูปที่ 4.16 เคลือบสารเจือโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การแพร่สารเจือ โบรอนเข้มข้น



รูปที่ 4.18 การสร้างชั้นออกไซด์

#### 4.9 กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟีมาส์ค 3

-อบแผ่นผลึกในเตาอบอุณหภูมิ 80 °C ประมาณ 10 นาที

-เคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่องสปินเนอร์ (Spinner) หมุนแผ่นผลึกโดยใช้ 2 step คือ step.1 ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาทีใช้เวลา 5 วินาที step 2 ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที (น้ำยาไวแสงที่ใช้เป็นชนิดบวก Az -1350)

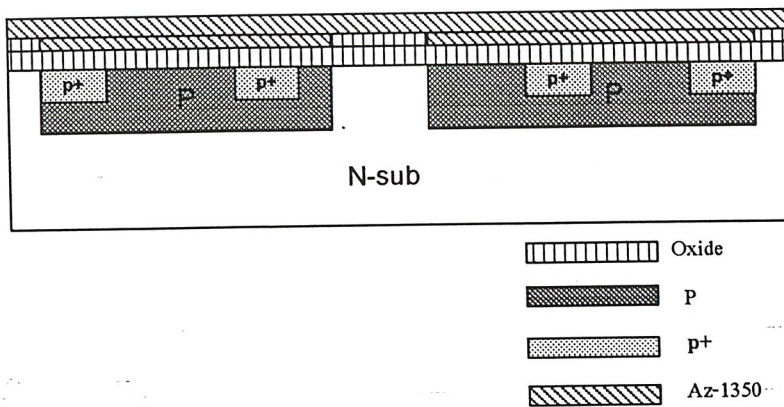
-Pre bake หรือ Soft bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที

-ฉายแสง U.V. ผ่านมาส์ค 3 ใช้เวลาประมาณ 20 วินาที

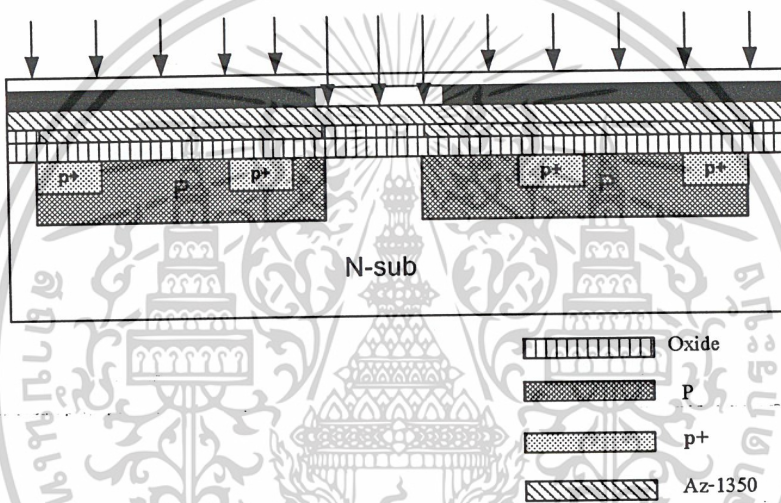
-ล้างน้ำยาไวแสง (Development) ด้วยน้ำยาล้าง (Developer) น้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350 ให้จุ่มในสารละลายสำหรับล้าง Az (Az-Developer) ใช้เวลาประมาณ 40 วินาที และล้างน้ำบริสุทธิ์ 1 นาที

-Post bake หรือ Hard bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที

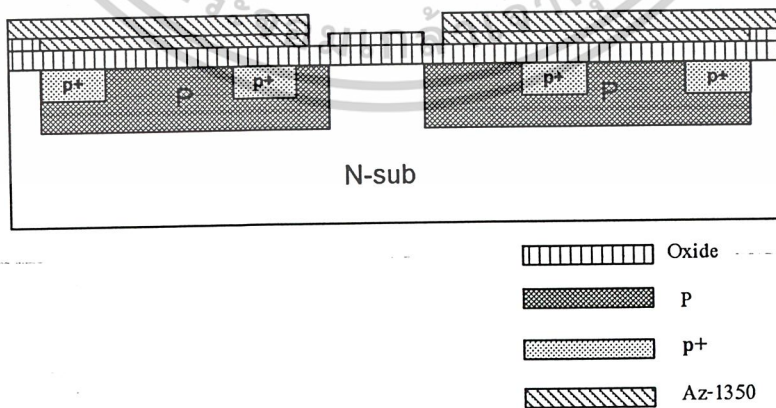
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350



รูปที่ 4.20 ทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ 3



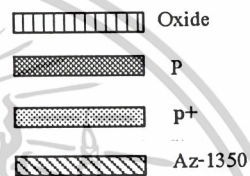
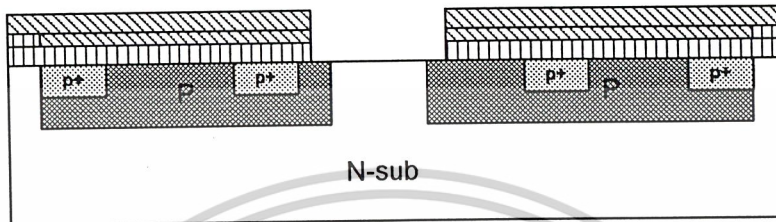
รูปที่ 4.21 ถ้างน้ำยาไวแสง(Development)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

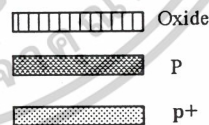
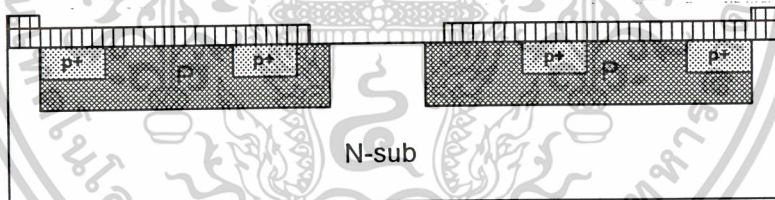
-ทำการสกัดชั้น  $\text{SiO}_2$  โดยจุ่มลงในสารละลาย Buffer for Oxidation ใช้เวลา 1 นาที แล้วล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้ง

-ล้างน้ำยาไวแสง ด้วยอะซิโตน 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที เป่าแห้ง

-ทำการสร้างชั้น  $\text{SiO}_2$  โดยใช้วิธี Dry Oxidation ใช้เวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ  $1000^\circ\text{C}$  จะได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกไซด์หนา ประมาณ  $700\text{-}800 \text{ \AA}$

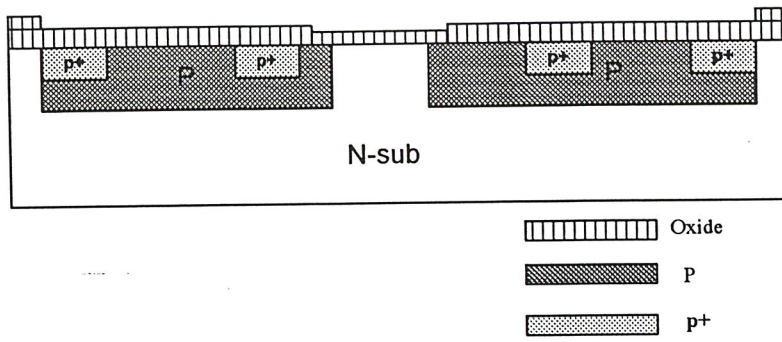


รูปที่ 4.22 เอตซิงค์แบบเปียก (Wet Etching)



รูปที่ 4.23 ล้างน้ำยาไวแสง(Dvelop)

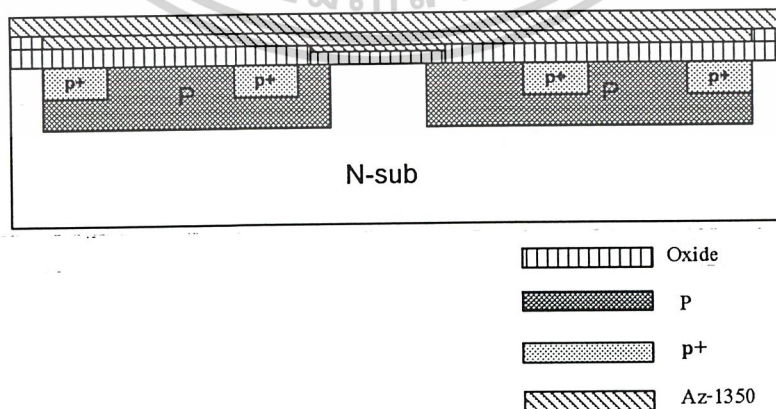
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 การสร้างชั้นออกไซด์เพื่อเป็นเกตออกไซด์

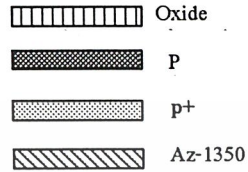
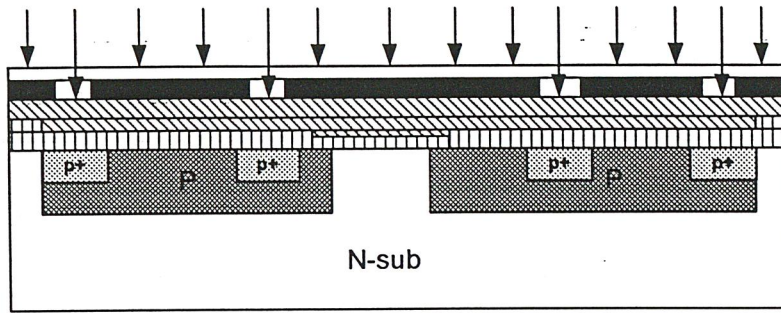
4.10 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ 4

- อบแผ่นผลึกในเตาอบอุณหภูมิ 80 °C ประมาณ 10 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่องสปินเนอร์(Spinner)หมุนแผ่นผลึกโดยใช้ 2 step คือ step 1 ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาทีใช้เวลา 5 วินาที step 2 ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที (น้ำยาไวแสงที่ใช้เป็นชนิดบวก Az-1350)
- Pre bake หรือ Soft bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที
- ฉายแสง U.V. ผ่านมาสก์ 4 ใช้เวลาประมาณ 20 วินาที
- ล้างน้ำยาไวแสง(Development) ด้วยน้ำยาล้าง (Developer) น้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350 ให้จุ่มในสารละลายสำหรับล้าง Az (Az-Developer) ใช้เวลาประมาณ 40 วินาที และล้างน้ำบริสุทธิ์ 1 นาที
- Post bake หรือ Hard bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที

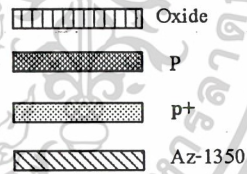
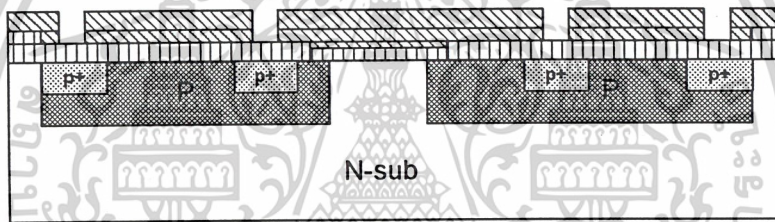


รูปที่ 4.25 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ทำการฉายแสงผ่านโฟโต้มาสก์ 4



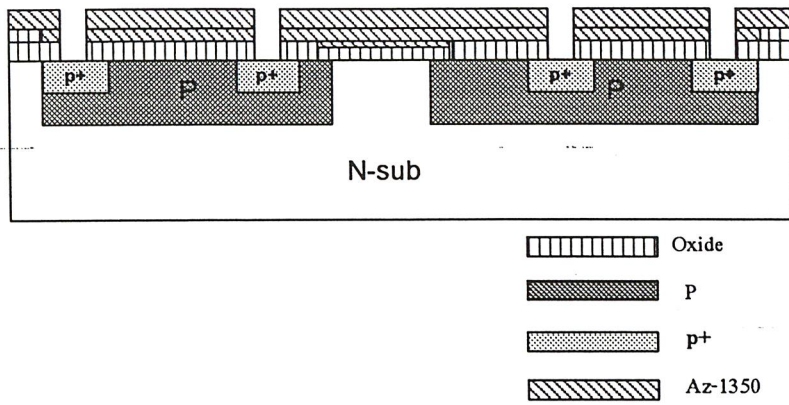
รูปที่ 4.27 ล้างน้ำยาไวแสง(Development)

-ทำการสกัดชั้น  $\text{SiO}_2$  โดยจุ่มในสารละลาย Buffer for Oxidation ใช้เวลาประมาณ 1 นาที แล้วเป่าให้แห้ง

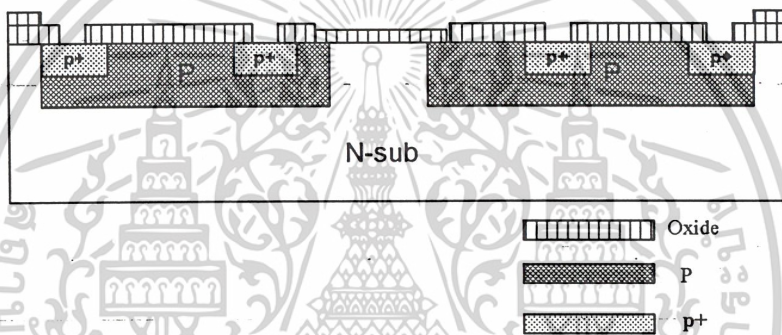
-นำไปล้างน้ำยาไวแสง ด้วยอะซิโตน 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที แล้วจุ่มน้ำ DI แล้วเป่าแห้งแล้ว

-ทำความสะอาดแผ่นด้วยการต้มในแก้วของไนโตรโคโร 5 นาที แล้ว ทำการอุดคร่าโซนิคในแก้วของอะซิโตน 2 นาที แล้วเป่าแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 เอตซิงค์แบบเปียก (Wet Etching)

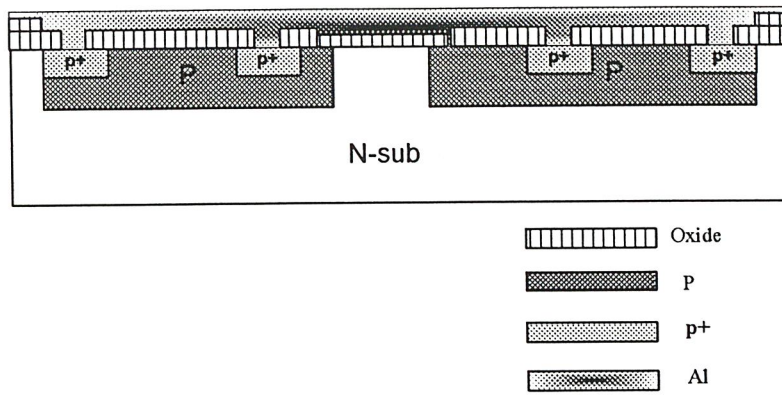


รูปที่ 4.29 ถ้างน้ำยาไวแสง (Development)

#### 4.11 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization)

กระบวนการเคลือบชั้นอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดันประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  TORR ในเวลาประมาณ 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 การเมทัลไลเซชัน

#### 4.12 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์ค 5

อบแผ่นผลึกในเตาอบอุณหภูมิ 80 °C ประมาณ 10 นาที

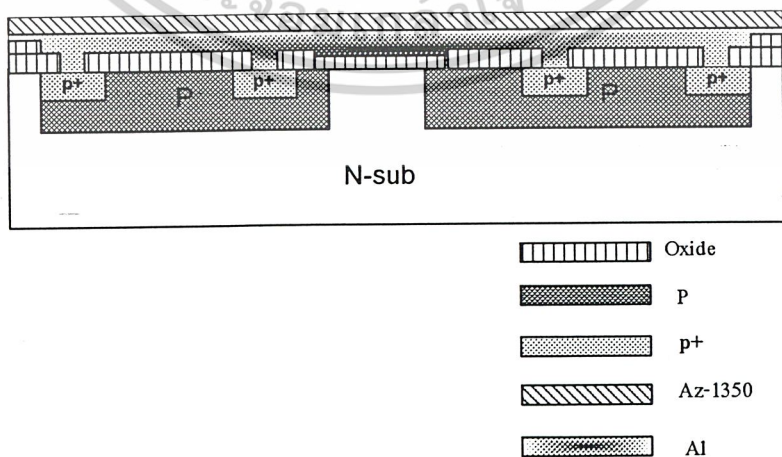
-เคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่องสปินเนอร์ (Spinner) หมุนแผ่นผลึกโดยใช้ 2 step คือ step 1 ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ใช้เวลา 5 วินาที step 2 ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที (น้ำยาไวแสงที่ใช้เป็นชนิดบวก Az -1350)

-Pre bake หรือ Soft bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที

-ฉายแสง U.V. ผ่านมาส์ค 5 ใช้เวลาประมาณ 20 วินาที

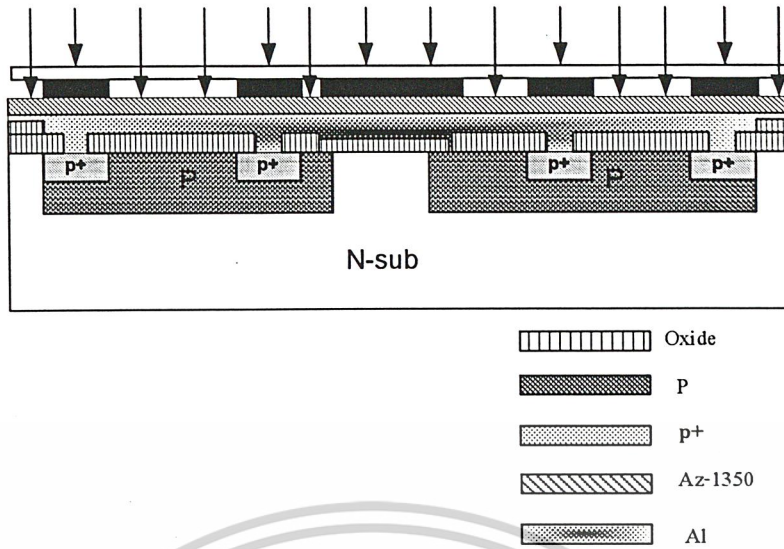
-ล้างน้ำยาไวแสง (Development) ด้วยน้ำยาล้าง (Developer) น้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350 ให้จุ่มในสารละลายสำหรับล้าง Az (Az-Developer) ใช้เวลาประมาณ 40 วินาที และล้างน้ำบริสุทธิ์ 1 นาที

-Post bake หรือ Hard bake ที่อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลา 10 นาที

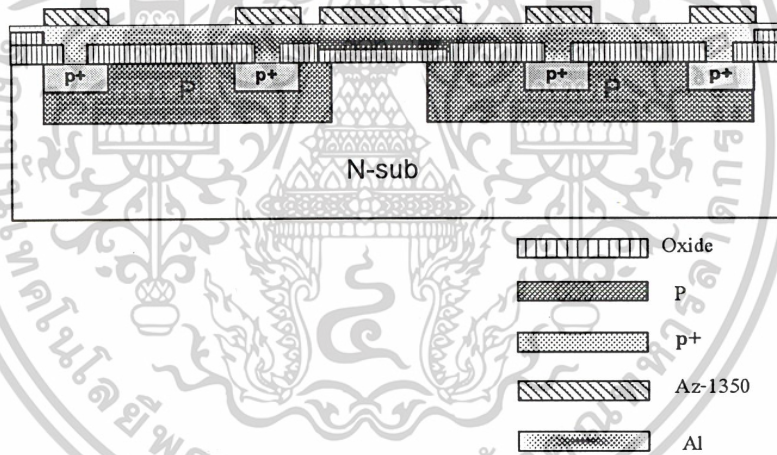


รูปที่ 4.31 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az-1350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ทำการฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ 5



รูปที่ 4.33 ถังนำยาไวแสง (Development)

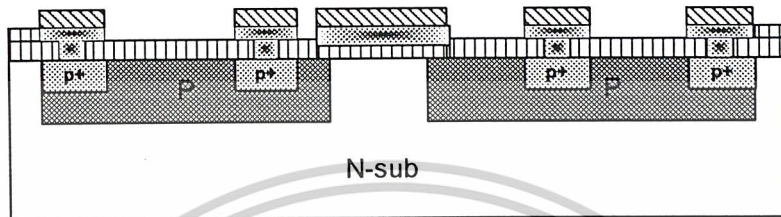
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.13 กระบวนการ Al Etching

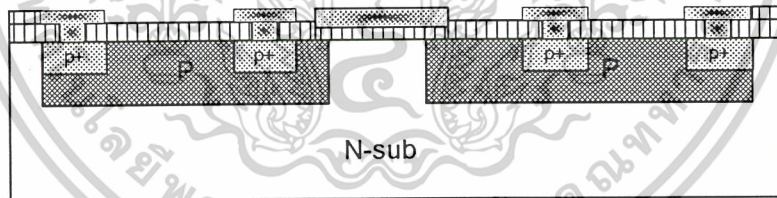
-เมื่อทำการสกัดชั้นออกไซด์โดยการจุ่มสารละลาย Al Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C

-นำไปล้างน้ำยาไวแสง ด้วยอะซิโตน 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที แล้วจุ่มน้ำ DI แล้วเป่าแห้งแล้ว

-ทำความสะอาดแผ่นด้วยการต้มในแก้วของไนโตรโคโร 5 นาที แล้วทำการอุดคร่าโซนิกในแก้วของอะซิโตน 2 นาที แล้วเป่าแห้ง



รูปที่ 4.34 ออกไซด์เอตซิงค์

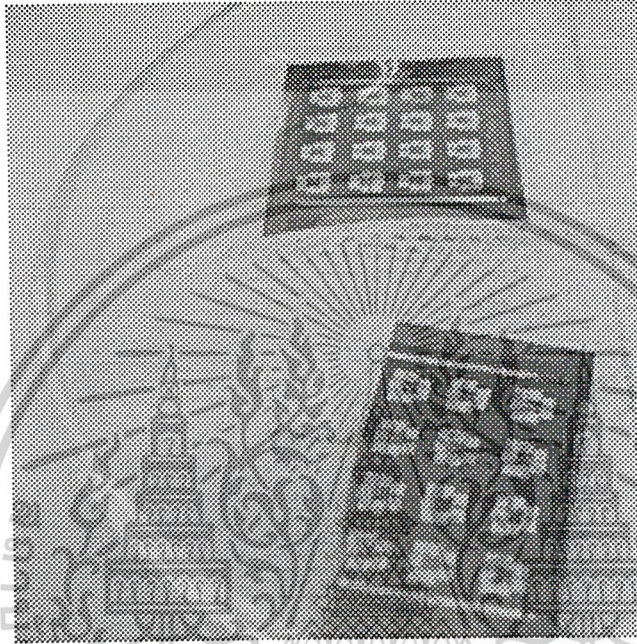


รูปที่ 4.35 ล้างน้ำยาไวแสง(Dvelop)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.14 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

กระบวนการนี้ทำเพื่อสร้างรอยต่อระหว่างรอยต่อโลหะกับซิลิกอนให้เป็นรอยต่อสัมผัส โอห์มมิกคอนแทค โดยการใส่แผ่นสลิคไวน์ในเตาบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร/นาที่ โดยทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 18 นาที



รูปที่ 4.36 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

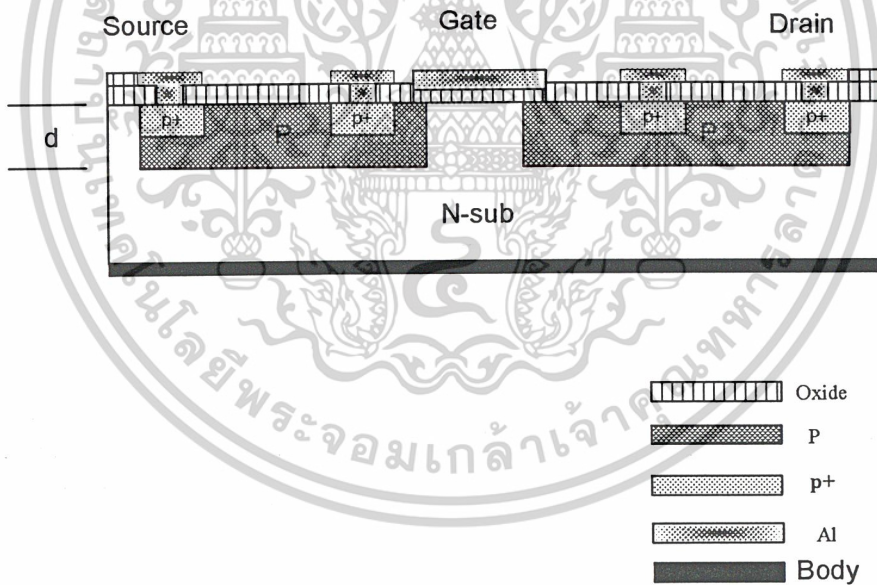
### การทดลองและการวัด

#### 5.1 การทดลอง

เนื่องจากการสร้างอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ใช้หลักทฤษฎีของ Hall Effect นั้น แรงดันฮอลล์

$$V_H = \frac{I_x \cdot B_z}{ped}$$

ถ้าให้ค่า  $I_x$ ,  $B_z$  และ  $e$  เป็นค่าคงที่แรงดันฮอลล์ จะมีค่าแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำ (P) และความลึกของสารกึ่งตัวนำ (d) ดังรูปที่ 5.1 ดังนั้นจึงต้องมีการหาเงื่อนไขในการ Deposition และ Drive-in เพื่อได้ค่าความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำ และความลึกของสารกึ่งตัวนำที่ต้องการ

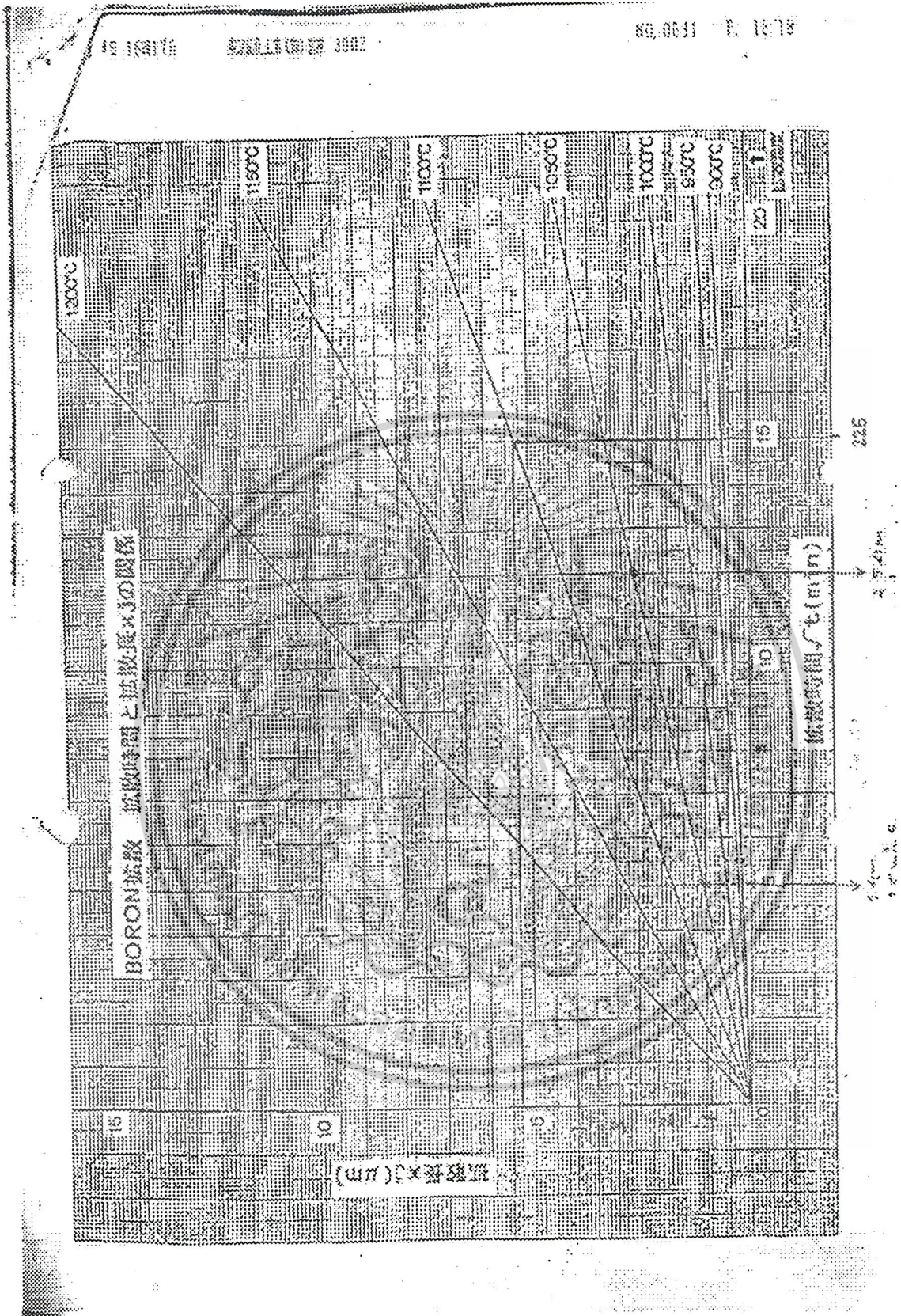


รูปที่ 5.1 โครงสร้างของตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์

##### 5.1.1 การหาเงื่อนไขของชั้น P-well

ใช้กราฟรูปที่ 5.2 เป็นกราฟที่สำหรับใช้เงื่อนไขของอุณหภูมิ และเวลาในการแพร่สารเจือโบรอน เพื่อได้ความหนาแน่นของสารเจือชนิดพีและความลึกที่ต้องการ

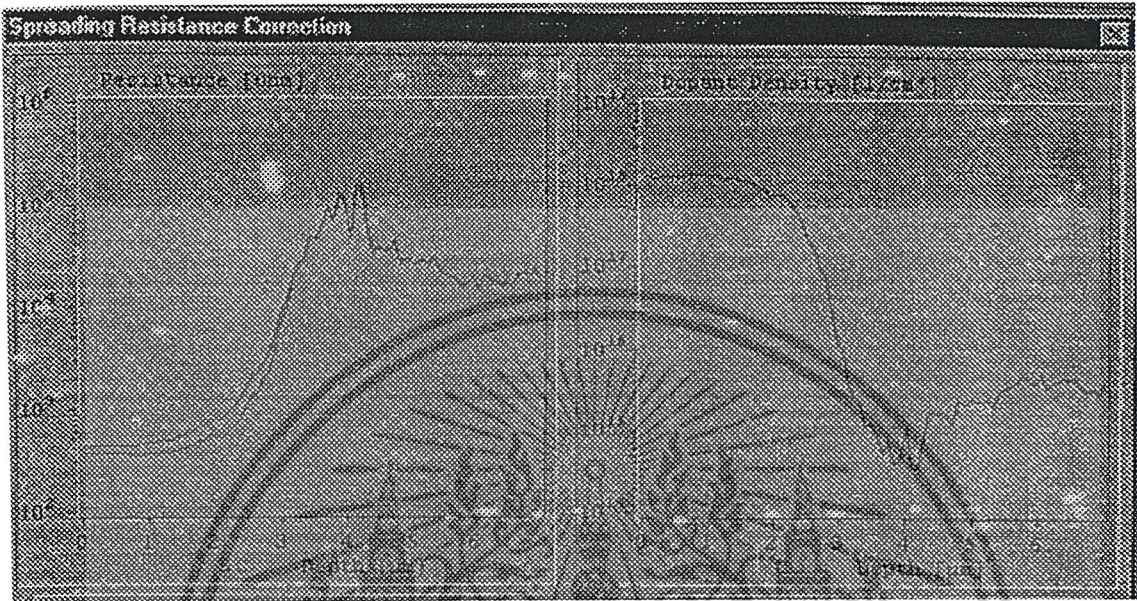
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงการหาเงื่อนไขการแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

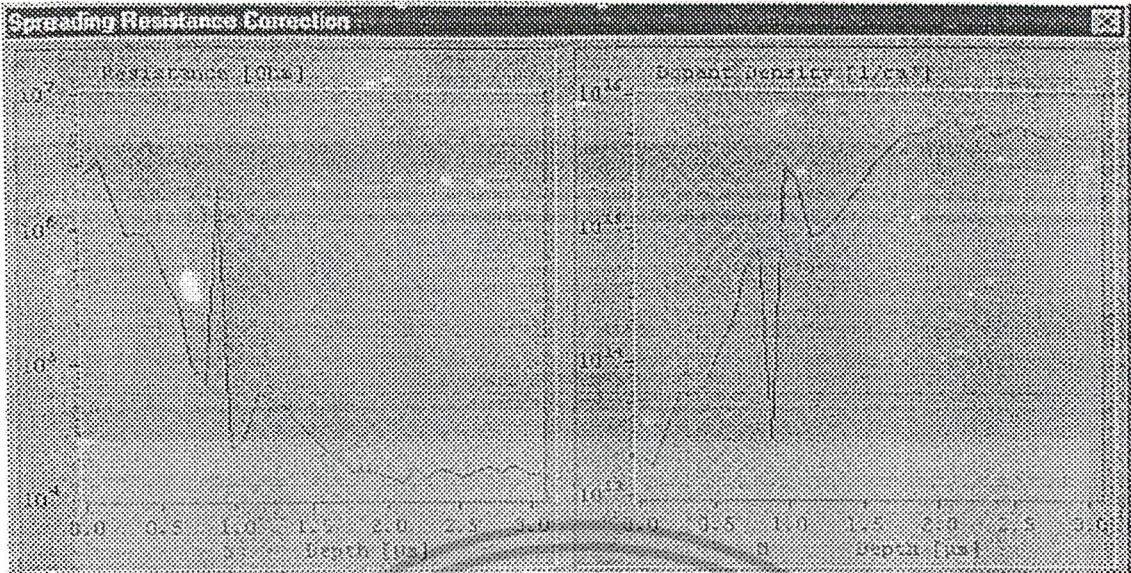
- Deposition ที่อุณหภูมิ 950° C เวลา 9 นาที  
Drive-in ที่อุณหภูมิ 1050° C เวลา 144 นาที  
วัดผลด้วยการทำ SRP ได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 วัดผลด้วยการทำ SRP

จากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าสารเจือชนิดพี ได้แพร่เข้าไปในสารเจือชนิดเอ็นโดยมีความหนาแน่นประมาณ  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  และได้ความลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดพี  $2.5 \mu\text{m}$  และอจัสเกตได้ด้วยกราฟความต้านทาน ที่ความหนาแน่นของสารเจือมากจะมีความต้านทานน้อยประมาณ  $3 \times 10^2 \Omega$  แต่ค่าที่ได้ยังมีความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำและความลึกมีค่ามากจึงหาเงื่อนไขเป็น

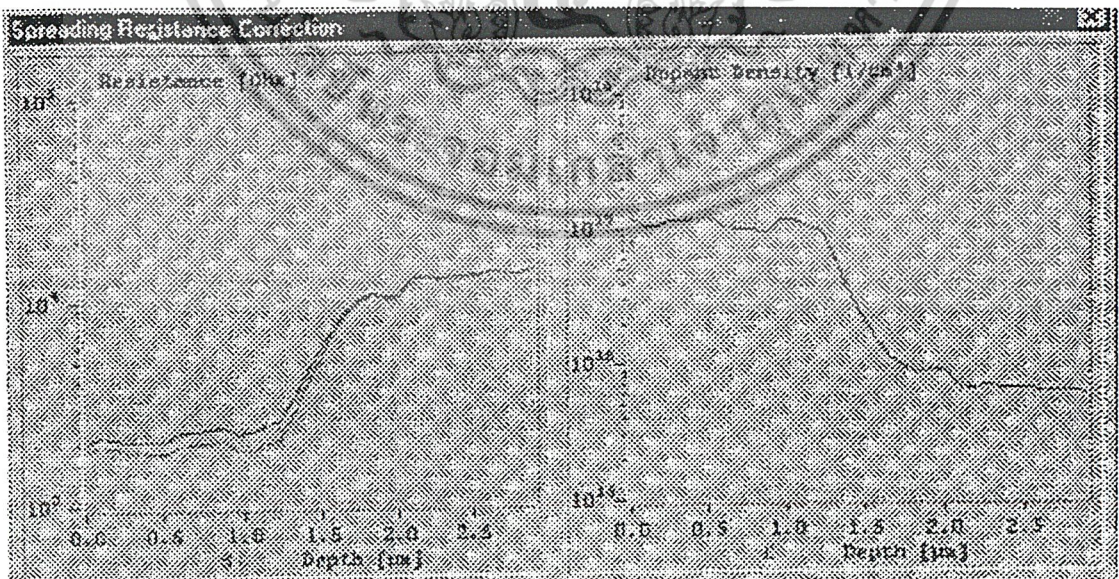
- ดูจากกราฟรูปที่ 5.2 เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีความลึก  $1 \mu\text{m}$   
Deposition ที่อุณหภูมิ 820° C เวลา 4 นาที  
Drive-in ที่อุณหภูมิ 1050° C เวลา 25 นาที  
วัดผลด้วยการทำ SRP ได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 วัดผลด้วยการทำ SRP

ปรากฏว่าผลที่ได้จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าสารเจือชนิดพีไม่สามารถแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำอินแต่กลับทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำอินอ่อนๆทำให้มีความต้านทานมากและจากผลที่ได้นี้อาจจะมาจากการกำหนดเวลา Deposition น้อยเกินไปจึงได้กำหนดเงื่อนไขเป็น

- Deposition ที่อุณหภูมิ 820° C เวลา 16 นาที
  - Drive-in ที่อุณหภูมิ 1050° C เวลา 25 นาที
- วัดผลด้วยการทำ SRP ได้ดังรูปที่ 5.5

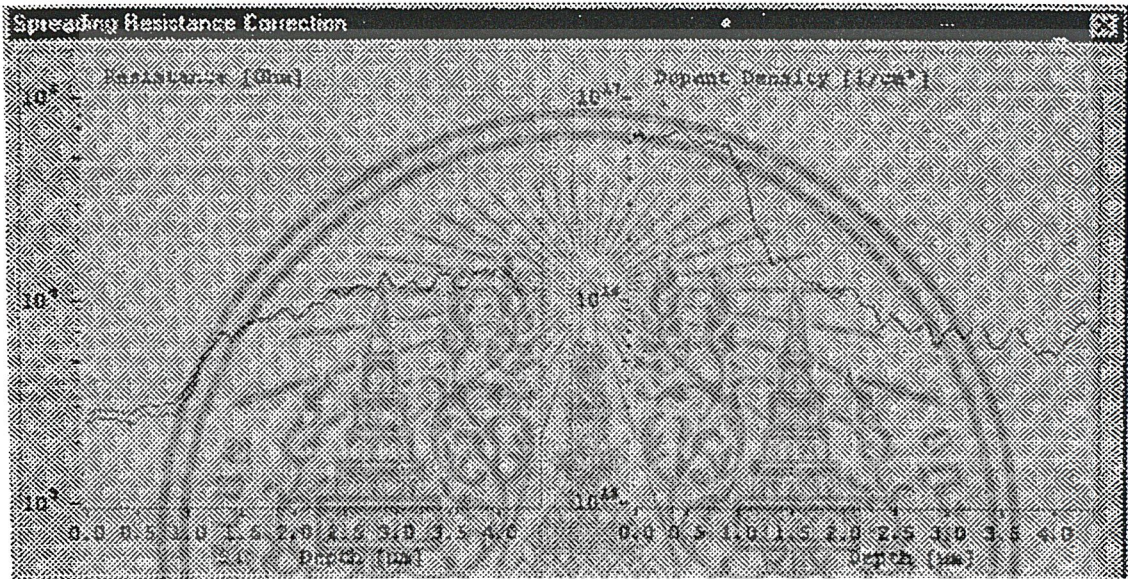


รูปที่ 5.5 วัดผลด้วยการทำ SRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.5 ได้ค่าความต้านทานประมาณ  $2 \times 10^3$  Ohm มีความหนาแน่นของสารกึ่งนำชนิดพี ประมาณ  $10^{17}$  cm<sup>-3</sup> โดยได้ความลึก ประมาณ 1.5  $\mu$ m เป็นเงื่อนไขที่สามารถนำไปสร้างได้แต่ลองอีกเงื่อนไข

- Deposition ที่อุณหภูมิ 820°C เวลา 9 นาที  
Drive-in ที่อุณหภูมิ 1020°C เวลา 25 นาที  
วัดผลด้วยการทำ SRP ได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 วัดผลด้วยการทำ SRP

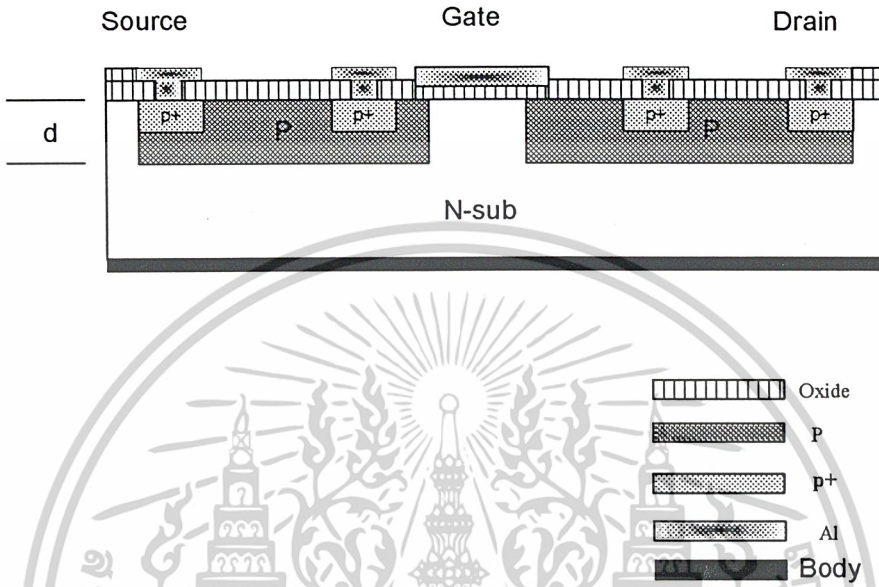
ในรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าเป็นเงื่อนไขที่ดีของการหาเงื่อนไขทั้งหมด โดยมีความต้านทานประมาณ  $3 \times 10^3$  ohm มีความหนาแน่นของสารกึ่งนำชนิดพี ประมาณ  $6 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup> โดยได้ความลึกประมาณ 1  $\mu$ m

ดังนั้นผลเหมาะสมที่จะนำไปสร้างตัวอุปกรณ์คือ ในขั้นตอน Deposition เวลา 9 นาที ที่อุณหภูมิ 820°C และ Drive in เวลา 25 นาที ที่อุณหภูมิ 1020°C

ส่วนขั้นตอนในการสร้างของส่วนต่อไปก็ได้กล่าวไปในกระบวนการสร้างแล้ว

5.2 การวัดคุณสมบัติความเป็น MOS

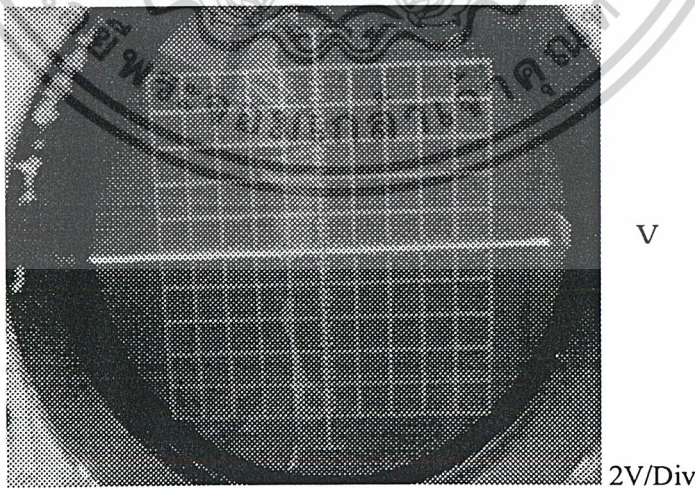
เนื่องจากตัวอุปกรณ์ที่ทำการสร้างนั้นมีโครงสร้างของขั้ว Source และ Drain มีลักษณะที่ผิดไปจากโครงสร้างของ MOS ธรรมดา ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่ต้องการวัดความเป็นมอส

5.2.1 วิธีการตรวจสอบความเป็นมอส

- Source กับ Drain เพื่อต้องการเช็คว่าเป็นบ่อ P แยกกันหรือไม่ โดยกราฟที่ได้นั้นเป็นดังรูปที่ 5.8

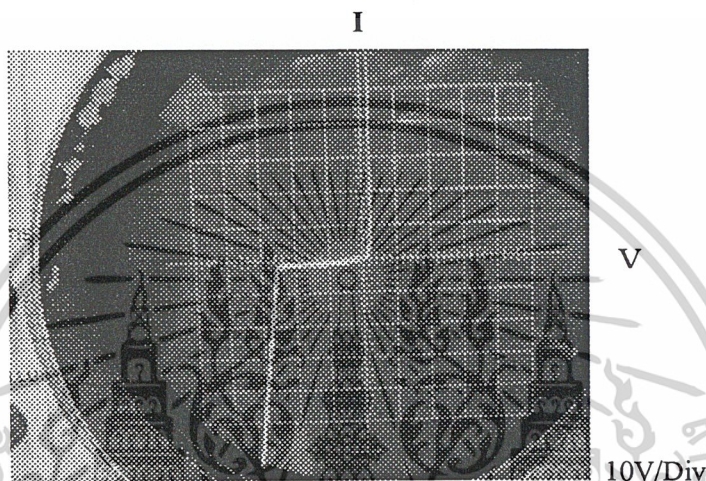


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลที่วัดได้ระหว่าง Source กับ Drain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะของกราฟ I-V เป็นเส้นตรงหมายความว่าขั้ว Drain และ Source แยกออกจากกัน

- Gate กับ Body จะได้กราฟ I-V เป็นดังรูปที่ 5.8 ที่กราฟเป็นเส้นตรงเพราะมี Oxide ในส่วนของเกตกั้นอยู่
- Source กับ Body และ Drain กับ Body จากรูปโครงสร้างของตัวอุปกรณ์จะเห็นว่าเป็นรอยต่อ P-N จึงได้กราฟที่มีคุณสมบัติเป็นไดโอดดังรูปที่ 5.9

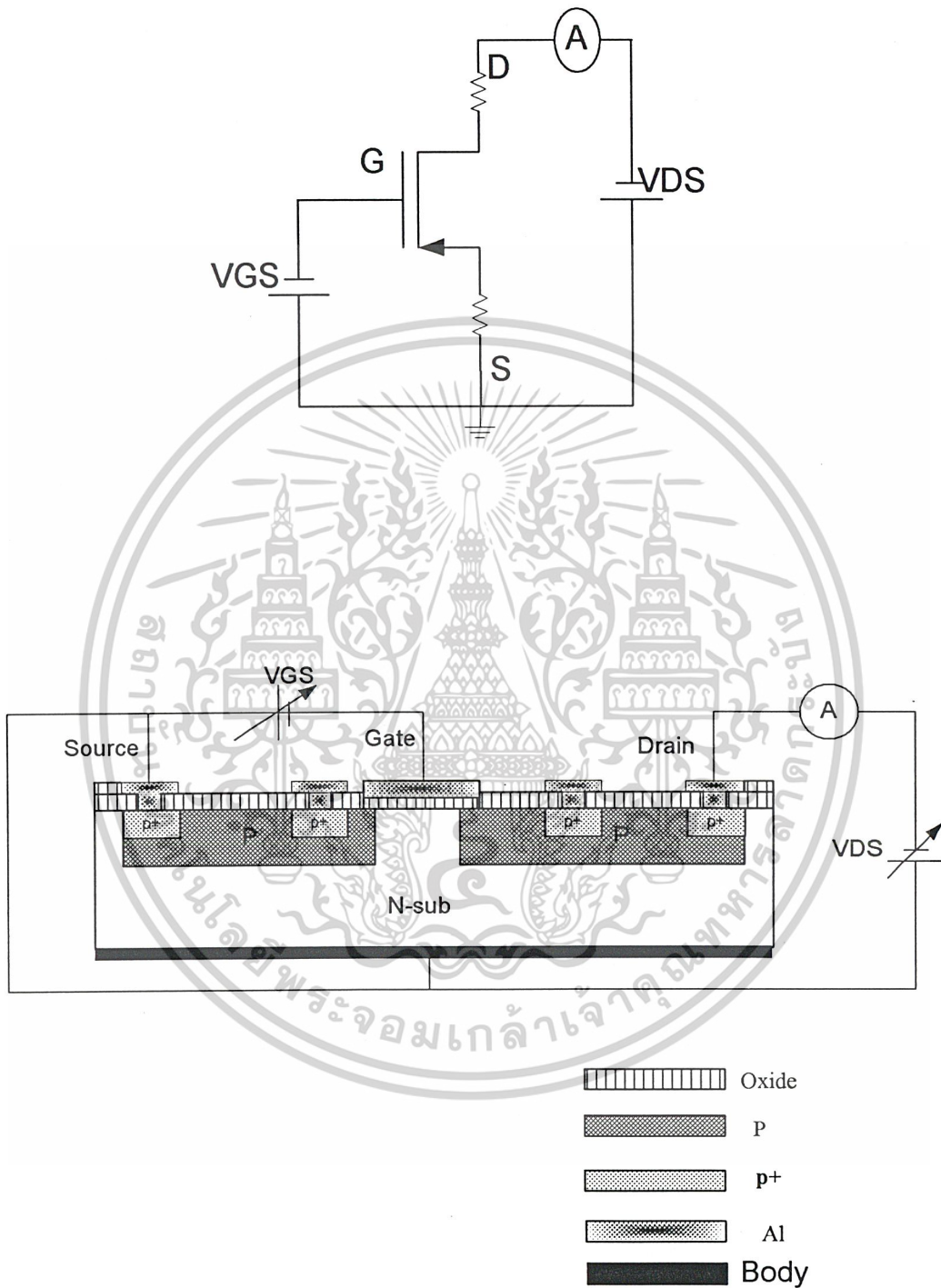


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงคุณสมบัติความเป็นไดโอด

และหากเป็นไปตามหลักการทางทฤษฎี ผลที่ออกมา นั่นกราฟที่ออกมาเป็นเส้นตรงซึ่งหมายความว่า บ่อพี (p-well) ทั้งสองแยกออกจากกันและ เกต (Gate) และบอดี้ (Body) แยกออกจากกัน ส่วน Source กับ Body และ Drain กับ Body คุณสมบัติเป็นไดโอดเสมือนเกิดรอยต่อ P-N

### 5.2.2 การวัดเพื่อทดสอบคุณสมบัติความเป็น MOS

เนื่องจากโครงสร้างของตัวอุปกรณ์มีขั้ว Source และ Drain ขาวกว่าปกติจึงเสมือนมีความต้านทานอยู่ภายในมีค่ามากจึงไม่สามารถวัดความเป็น MOS ด้วย เครื่อง Curve Traser ได้จึงได้นำตัวอุปกรณ์มาทดสอบดังรูปที่ 5.10

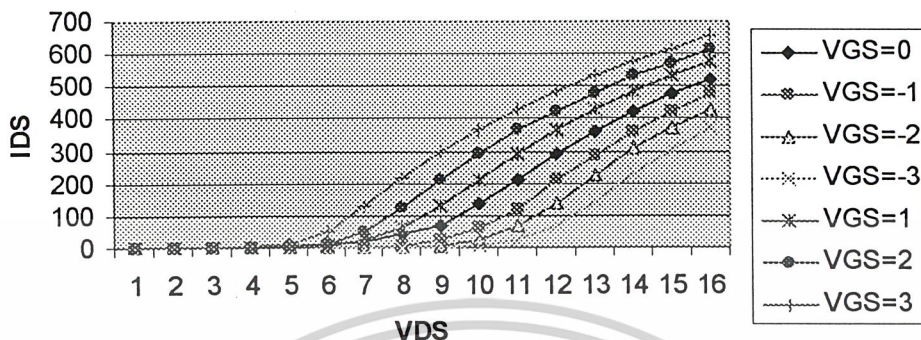


รูปที่ 5.10 แสดงการวัดเพื่อทดสอบความ MOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมื่อทำการวัดผลที่ได้นั้นดังแสดงในผลรูปที่ 5.11

กราฟ I-V

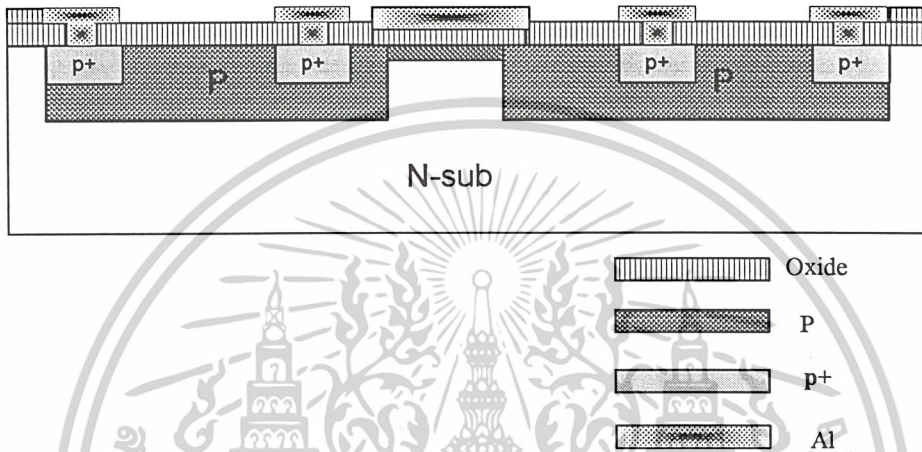


-VDS	VGS=0	VGS=-1	VGS=-2	VGS=-3	VGS=1	VGS=2	VGS=3
0	$I_{DS} = 0$	$I_{DS} = 0$	$I_{DS} = 0$	$I_{DS} = 0$	$I_{DS} = 0$	$I_{DS} = 0$	$I_{DS} = 0$
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0.2	0.6
3	0.5	0	0	0	0.2	0.8	3.2
4	4	0	0	0	1.4	3.9	13.5
5	13	0.3	0	0	7.5	14	48
6	18	1.4	0	0	24	50	133
7	43	7.5	1.2	0	60	125	216
8	71	25	6.5	1.5	130	210	297
9	134	60	25	7	210	293	365
10	210	120	67	25	290	365	425
11	290	210	137	70	368	422	483
12	361	285	225	144	425	478	533
13	420	360	310	228	483	530	577
14	478	420	370	305	530	573	616
15	523	475	430	372	576	616	655

รูปที่ 5.11 แสดงผลที่ได้จากวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

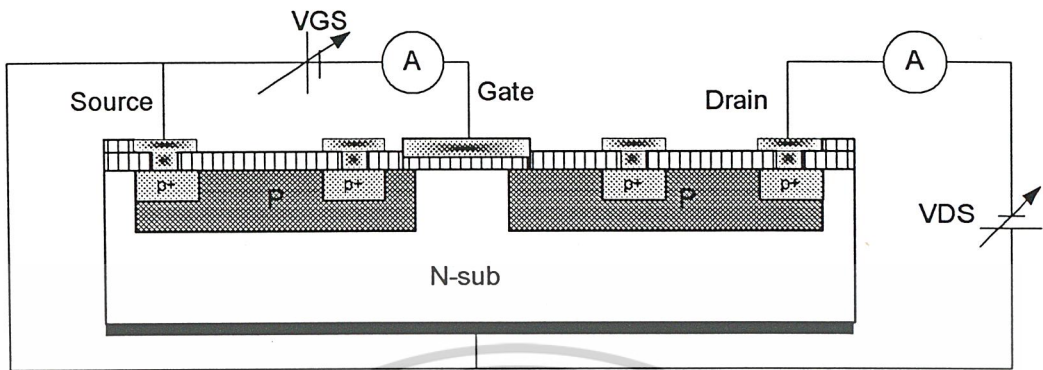
แต่เมื่อสังเกตผลที่ได้ที่แรงดัน  $V_{GS} = 0$  แล้วทำการปรับ  $V_{DS}$  ปรากฏว่ามีกระแสไหลผ่าน และเมื่อทำการปรับค่าแรงดัน  $V_{GS}$  ให้มีค่าลบมากขึ้น ค่ากระแสจะมีค่าลดลง ซึ่งในตรงกันข้ามเมื่อ  $V_{GS}$  เป็นบวก ค่ากระแสจะมีค่ามากขึ้น ในขั้นตอนแรกจึงคาดว่ามอสที่ทำกรสร้างขึ้นเป็น PMOS แบบ Depletion Mode มีโครงสร้างดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 รูปแสดงโครงสร้างของ PMOS Depletion Mode

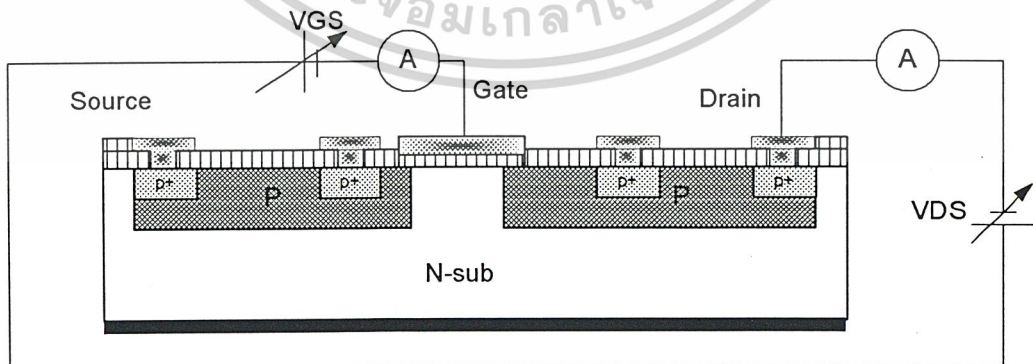
แต่เมื่อกลับไปเปรียบเทียบระยะห่างของ Source และ Drain นั้นน่าจะไม่สามารถทำให้เกิด Channel p ขึ้นได้และประกอบกับทฤษฎีปรากฏว่าผลที่ได้มานั้นขัดแย้งกันอย่างสิ้นเชิง ในความเป็นจริงแล้ว PMOS แบบ Depletion Mode นั้นเมื่อจ่าย  $V_{GS}$  ที่มีค่าลบจะทำให้ช่องทางเดิน (Channel) จะมีความกว้างมากขึ้น และกระแสไหลได้มากขึ้น

จากนั้นจึงได้ทำการตรวจสอบโดยการต่อวงจรดังรูปที่ 5.13 เพื่อวัดกระแสไหลผ่านเกต



รูปที่ 5.13 การวัดกระแสไหลผ่านเกต

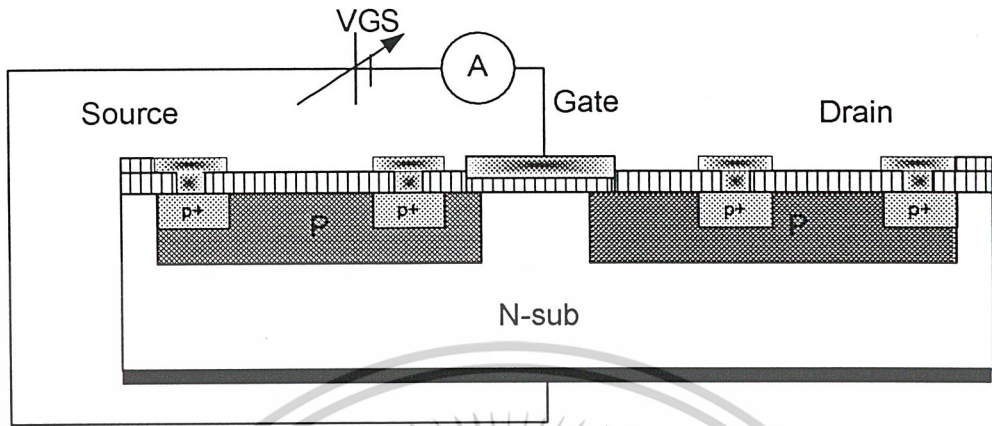
ผลที่ได้มาปรากฏว่ากระแส  $I_{DS}$  และ  $I_{GS}$  มีค่าเท่ากัน และหลังจากนั้นยกโพรบขา Source และ Body ออก ดังรูปที่ 5.14 ปรากฏว่าไม่มีผลต่อกระแสเลย กระแสยังคงมีค่าเท่าเดิม



รูปที่ 5.14 การวัดในขณะที่ยกขา Source และ Body

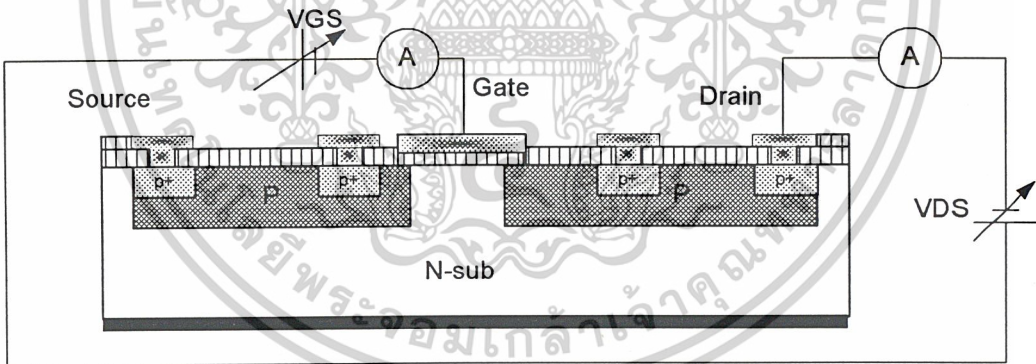
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำการเช็ดที่ Gate กับ Body ดังรูปที่ 5.15 โดยผลที่ได้ไม่มีกระแสไหลถ้าเป็น  
 อย่างนี้สรุปได้ว่า เกิดไม่ทะลุ



รูปที่ 5.15 ทดสอบวัดกระแสที่ไหลผ่านเกต

ดังนั้นจากผลที่ได้จากการวัดนี้บอกได้ว่ากระแสที่ไหลได้นั้นจะไหลผ่านจาก Drain ผ่านไป  
 ยัง Gate ได้โดยตรงดังรูปที่ 5.16

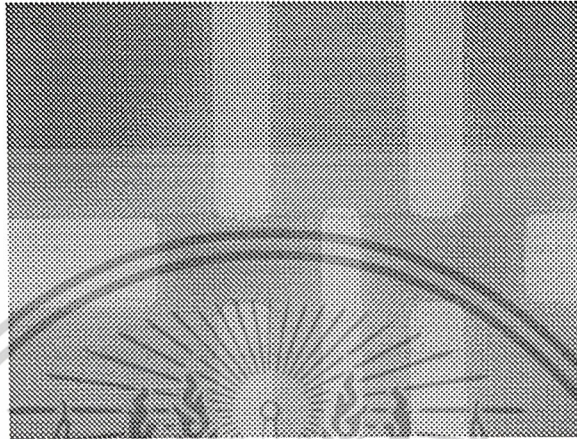


รูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นกระแสไหลจาก Drain ผ่าน Gate

โดยเมื่อป้อน  $V_{DS}$  เมื่อที่  $V_{GS}=0$  ก็จะเกิดกระแสไหลเปรียบเหมือนกับการจ่ายแรงดันไหล  
 ผ่านตัวต้านทาน และเมื่อ  $V_{GS}$  เป็นค่าลบกระแสไหลน้อยลงเป็นผลมาจากการหักล้างกันของแรงดัน  
 และเมื่อ  $V_{GS}$  เป็นค่าบวกกระแสไหลมากขึ้นลงเป็นผลมาจากการเสริมกันของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นถ้าเป็นอย่างนี้น่าจะอธิบายได้ว่าชั้นออกไซด์ของ Gate ในส่วนของ Source และ Drain เหนี่ยวนำกระแสจากชั้น P ถึงอุมิเนียมจึงจะทำให้กระแสไหลผ่านได้ โดยสาเหตุที่เป็นอย่างนี้อาจเนื่องมาจากเกตออกไซด์มีความบาง และ มาสค์อะลูมิเนียมนั้นไม่ได้วางทับอยู่บนเกตโดยตรง ซึ่งอาจเกิดในระหว่างการ Align mask ดังรูปที่ 5.17

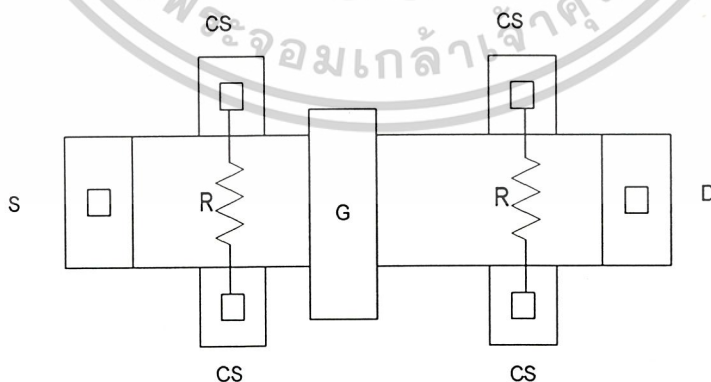


รูปที่ 5.17 การ Align mask ในมาสค์ 5

เมื่อไม่ได้โครงสร้างความเป็นมอสแล้วแต่ยังมีกระแสไหลได้จึงยังสามารถวัดเป็น Hall effect เพื่อที่จะทดสอบขั้วเซ็นเซอร์ได้ ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบขั้วคอนแทกเซ็นเซอร์

### 5.3 การตรวจสอบความเป็นรอยต่อโอห์มมิก

โดยการตรวจสอบความเป็นโอห์มมิกจะเช็คระหว่างขั้วคอนแทกของขั้วที่จะวัดแรงดัน Hall Effect ของ Source และ Drain ดังรูปที่ 5.18

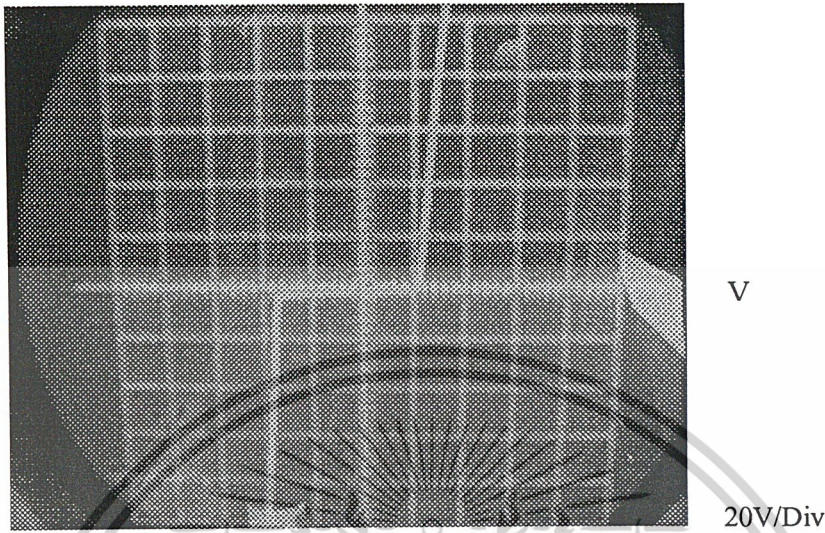


รูปที่ 5.18 การตรวจสอบความเป็นโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

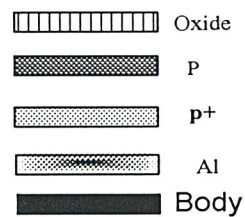
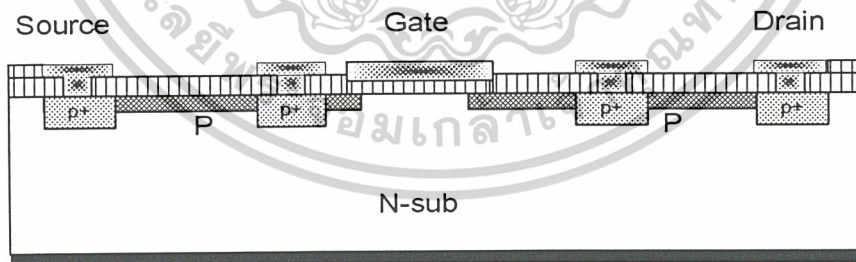
เมื่อตรวจสอบขั้วคอนแทกทั้งสองด้วย Curve Traser แล้วกราฟที่ได้ น่าจะออกเป็นความต้านทานเนื่องจากเป็นชิ้นสารเดียวกันแต่เมื่อได้ทำการวัดแล้วปรากฏว่ากราฟเป็นดังรูปที่ 5.19

I



รูปที่ 5.19 ผลที่ได้จากการทดสอบความเป็นโอห์มมิก

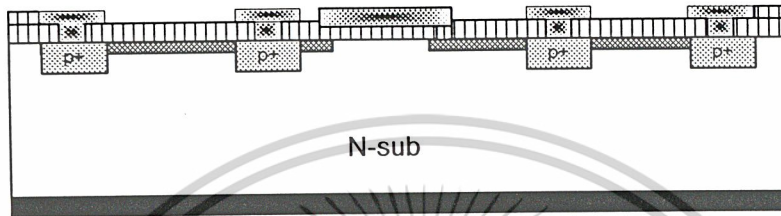
จากกราฟที่ได้ นั้น ไม่ได้เป็นกราฟของตัวต้านทานและก็ไม่ใช่ว่าเป็นกราฟของไดโอดแต่น่าจะเป็นกราฟที่เกิดจากรอยต่อ  $P^+-N-P^+$  ซึ่งเกิดการ Break down ที่แรงดันสูงดังนั้นในที่นี้พอที่สรุปได้ว่าเป็นเพราะชั้น  $P^+$  ของขั้วคอนแทกเช่นเซอร์รวมทั้ง Drain และ Source ทะลุชั้น  $P$  ไปถึงชั้น  $N$  ด้วย ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 การทะลุของชั้น  $P^+$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากผลที่ได้วัดทั้งหมดนั้นพอที่จะสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างชั้น P นั้น โดยใช้เวลา Deposition และ Drive in นั้นใช้เวลาน้อยซึ่งผิดไปจากเงื่อนไขการสร้างชั้น P<sup>+</sup> ธรรมดา ดังนั้นชั้น P ได้อาจจะเข้าแต่มีความบางมากหรืออาจจะเป็นการเข้าที่ผิว จึงทำให้ชั้น P<sup>+</sup> ที่ใช้เงื่อนไขปกติจึงสามารถทะลุผ่าน P-well ได้ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 แสดงการทะลุผ่านของชั้น P<sup>+</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

## สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

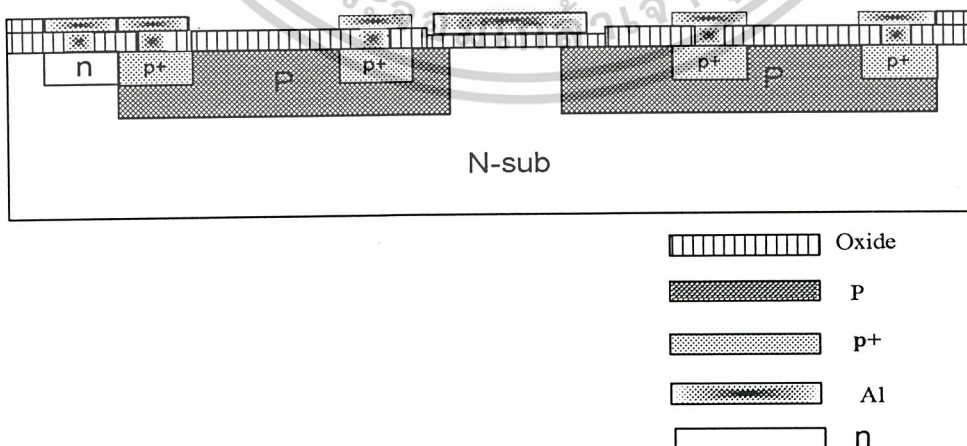
เนื่องจากการตรวจสอบตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์แล้วปรากฏไม่เป็นไปตามโครงสร้างที่ต้องการ และผลที่ได้จากการทดสอบและการวัดนั้นไม่ได้คุณสมบัติความเป็นมอส จึงไม่นำไปทดสอบ คุณสมบัติความเป็นฮอลล์

## วิจารณ์ปัญหา

ปัญหาในการสร้างตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในครั้งนี้อันเนื่องมาจากโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ ส่วนที่เป็นขาซอสและเดรนแตกต่างจากมอสปกติ และในการหาเงื่อนไขของการแพร่ชั้นพีที่มีการ Deposition และการ Drive-in ที่เวลาน้อยจึงทำให้การแพร่เข้าไปได้น้อย หรืออาจจะไม่เข้าจึงทำให้ เมื่อทำการแพร่สารเจือชั้น  $p^+$  สามารถทะลุผ่านชั้นพีลงไปได้ และในส่วนของเกตนั้นที่กระแสไหล ผ่านอะลูมิเนียมผ่านชั้นพีได้นั้นอาจเกิดจากเกตในบริเวณ Sourcec และ Drain มีการเหนี่ยวนำ และ อาจจะเป็นสาเหตุเนื่องจากการ Align Mask มีความผิดพลาด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

## แนวทางแก้ไข

- กำหนดค่าเงื่อนไขในการสร้างชั้นพี โดยการ Drive-in ที่เวลานานๆ เพื่อให้ได้ความหนาแน่นของสารเจือที่มีค่าน้อย
- ออกแบบ Mask Gate ให้มีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างซอสกับเดรน แล้วใช้ Mask ของอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่า Mask Gate ดังรูปที่ 6.1
- ออกแบบให้มี Mask Body ให้มีขนาดคืบขาซอสดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แนวทางการแก้ไขที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากความร่วมมือของสมาชิกในกลุ่มทุกท่าน ขอขอบคุณ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา คุณวีระ เพ็งจันทร์ และนาย อภินัย ฤกษ์รัตน์ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอย่างสูงที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่อง การสอนการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งให้คำแนะนำ แนวความคิด ความรู้ และแนวทางการแก้ไขปัญหาในการทำโครงงาน ขอขอบคุณภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักหอสมุดกลาง ที่อำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อสถานที่ ในการค้นข้อมูลขอขอบคุณ ดร.นิมิตร ชมนาวัง อาจารย์ประจำ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ สุดท้ายนี้ที่ควรระลึกถึงเป็นอย่างยิ่ง บิดาและมารดาที่เป็นผู้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและเป็นผู้ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมาจนถึง ปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์

- B สนามแม่เหล็ก ( $T$ =เทสลา)
- F แรงลอเรนซ์ ( $N$ =นิวตัน)
- G ค่าความแม่นยำของแรงดันฮอลล์ที่คำนวณได้
- I กระแส (mA)
- J ความหนาแน่นกระแส (mA/ cm<sup>3</sup>)
- L ความยาวระหว่างขั้วเคอร์เรนคอนแทค ( $\mu\text{m}$ )
- p ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ
- $r_n$  สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- $r_p$  สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี
- $R_H$  สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (cm<sup>3</sup>/°c)
- S ขนาดของขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค ( $\mu\text{m}$ )
- d ความหนาของฮอลล์เพลท ( $\mu\text{m}$ )
- $V_H$  แรงดันฮอลล์ (mV)
- W ความกว้างระหว่างขั้วเซ็นเซอร์คอนแทค ( $\mu\text{m}$ )
- $\sigma$  ความนำไฟฟ้า ( $\Omega/\text{cm}$ )
- $\mu_n$  ความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน (cm<sup>2</sup>/v-sec)
- $\mu_p$  ความคล่องตัวของประจุพาหะโฮล (cm<sup>2</sup>/v-sec)
- v ความเร็วเฉลี่ยของประจุพาหะ (m/sec)
- $\theta_H$  มุมฮอลล์ (องศา)
- $\rho$  พิกัดความต้านทาน ( $-\Omega\text{cm}$ )
- $\epsilon$  สนามไฟฟ้า (V/m)

## ภาคผนวก ข. ค่าคงที่

$$r_n = 1.15$$

$$r_p = 0.7$$

$$\mu_n = 1400$$

$$\mu_p = 480$$

$$1 \text{ T} = 10^{-4} \text{ Gauss หรือ } 1 \text{ wb/m}^2$$

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ mil} = 2.54 \text{ }\mu\text{m}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{ประจุไฟฟ้า } q = 6.119 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{ค่าคงที่โบสแมน } k = 38.123 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$\text{ค่าคงที่พลังค์ } h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J-S}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก. วัสดุและเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

### Boron (B): โบรอน

เป็นธาตุกลุ่มที่ 5 ของตารางพีริออดิกของธาตุ ใช้เป็นอะตอมสารเจือในการแพร่เพื่อสร้างส่วนเดรนและส่วนซอสในเอ็นฮานซ์เทนท์มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีเชนแนล

### Isopropyl alcohol: ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

เป็นสารละลายชนิดหนึ่งซึ่งใช้สำหรับล้างทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้ายก่อนทำให้แห้ง

### Methylalcohol: เมทิลแอลกอฮอล์

เป็นสารละลาย ซึ่งใช้สำหรับล้างแผ่นผลึกในครั้งสุดท้าย เพื่อขจัดสารอื่นๆก่อนทำให้แห้ง

### Nitric acid (HNO<sub>3</sub>): กรดดินประสิว

เป็นกรดแก่ ซึ่งใช้สำหรับทำสะอาดผิวหน้าของผลึก เพื่อกำจัดเศษโลหะต่างๆที่อาจมีได้

### Nitrogen (N<sub>2</sub>): ไนโตรเจน

เป็นก๊าซเฉื่อยที่ใช้สำหรับทำหน้าที ในการแพร่ สารเจือลงไปในแผ่นซิลิกอน หรือใช้สำหรับเป่าแผ่นผลึกให้แห้งภายหลังการล้าง

### Oxygen (O<sub>2</sub>): ออกซิเจน

เป็นก๊าซที่ใช้สำหรับกระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ชั้น

### Phosphorus (P): ฟอสฟอรัส

เป็นธาตุในกลุ่มที่ 5 ใช้เป็นอะตอมสารเจือชนิดเอ็นในการแพร่เพื่อสร้างส่วนเดรนและส่วนซอสในพีมอสทรานซิสเตอร์ต่างๆไป

### Silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>): ซิลิกอนไดออกไซด์

ใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่สารเจือและเป็นชั้นป้องกันผิวหน้าของแผ่นผลึกที่สมบูรณ์แล้วเตรียมได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน

### Sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>): กรดกำมะถัน

เป็นกรดแก่ ใช้ในการทำทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนและสารละลายสารไวแสงในแผ่นผลึกภายหลังกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

### Trichloroethylene: ไตรคลอโรเอทีลีน

เป็นสารละลายซึ่งใช้ สำหรับล้างไขมันและสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวแผ่นซิลิกอนหรือภาชนะอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

Xylean: ไซลีน

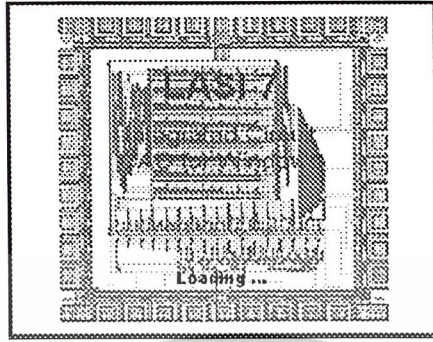
เป็นสารละลายที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อละลายน้ำยาไวแสงที่ไม่ถูกฉายแสงออกจากแผ่นสลัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

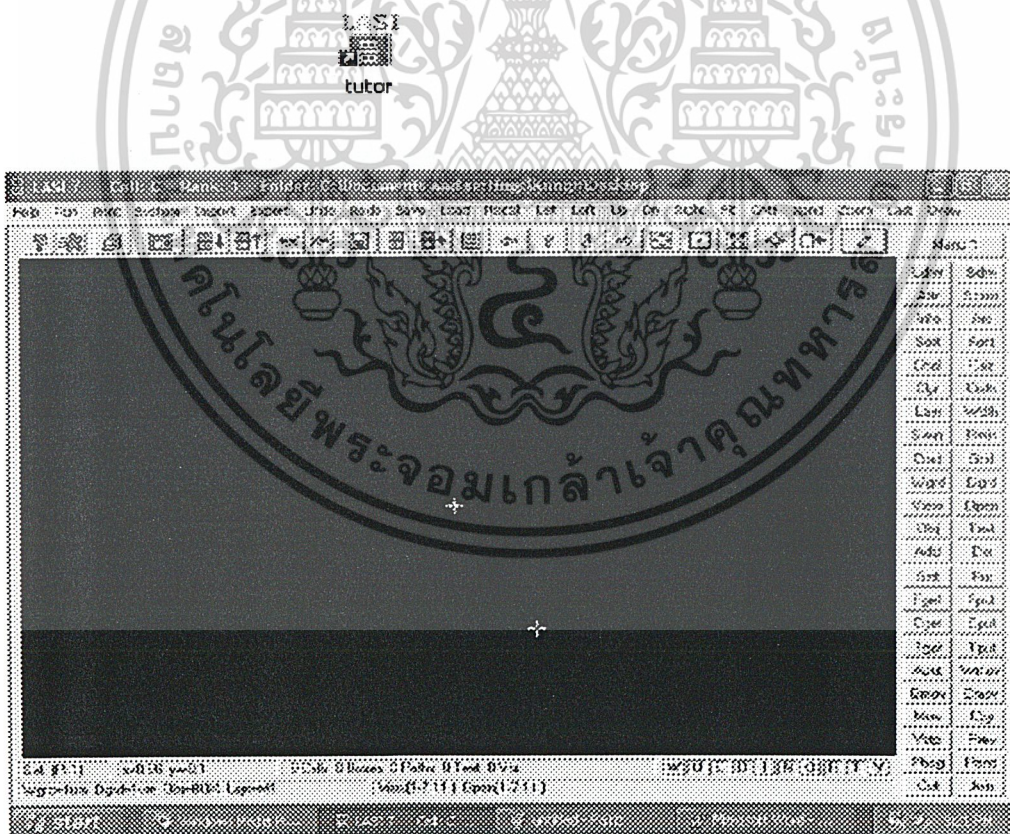
## การใช้โปรแกรม Lasi7



สามารถเข้าไปดาวน์โหลดโปรแกรมและคู่มือการใช้งาน Lasi7. ได้ฟรีที่ [www.google.com](http://www.google.com) แล้วพิมพ์ Lasi7.

การใช้งาน โปรแกรม Lasi7.

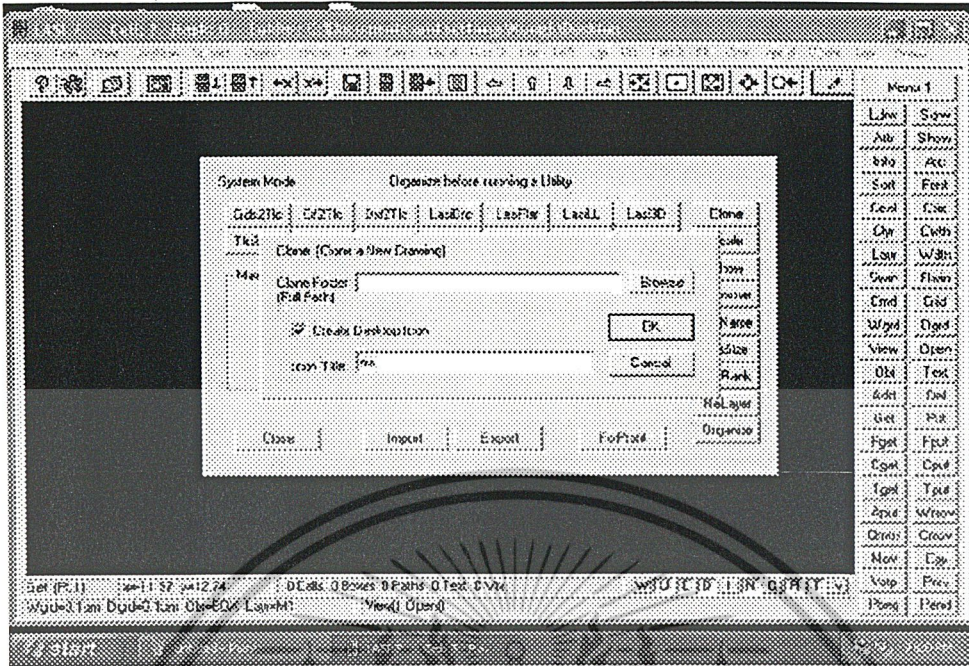
1. Double click ที่



รูปที่ 1

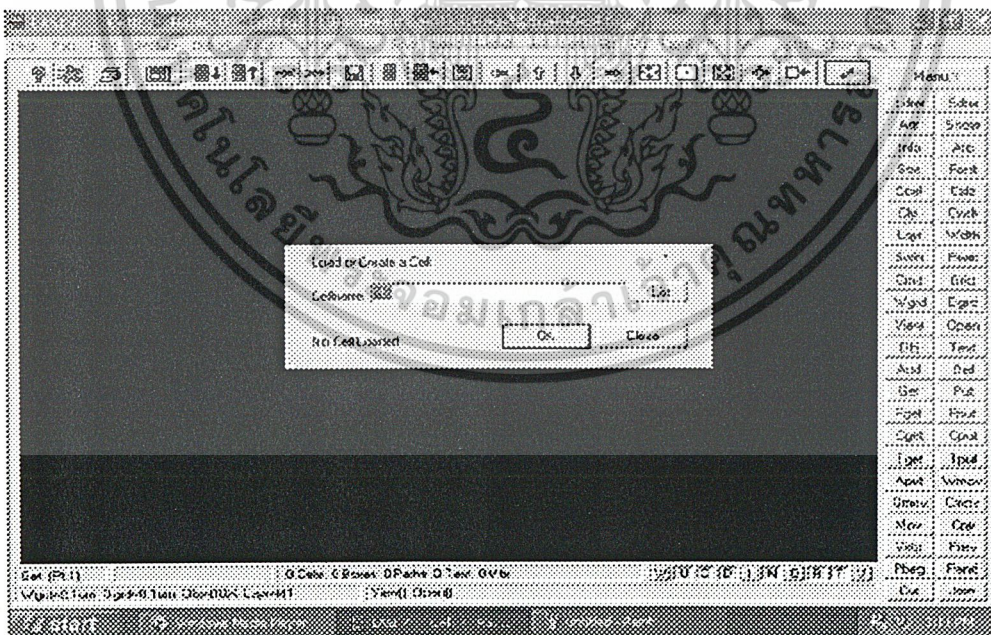
2. click system>clone>Create Desktop Icon ตั้งชื่อ click ok>close ดังรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2

3. จะมี Icon ที่ Desktop ให้ Double click จะมีหน้าต่างของโปรแกรมขึ้นมาดังรูปที่ 3

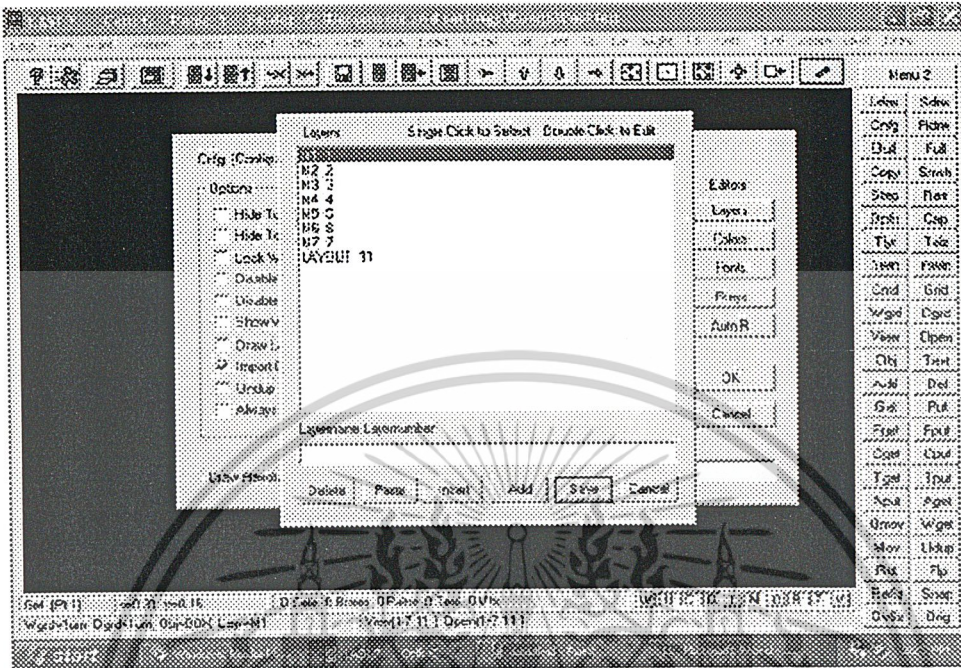


รูปที่ 3

4. ให้ตั้งชื่อในช่อง Cell name > click ok > click ok

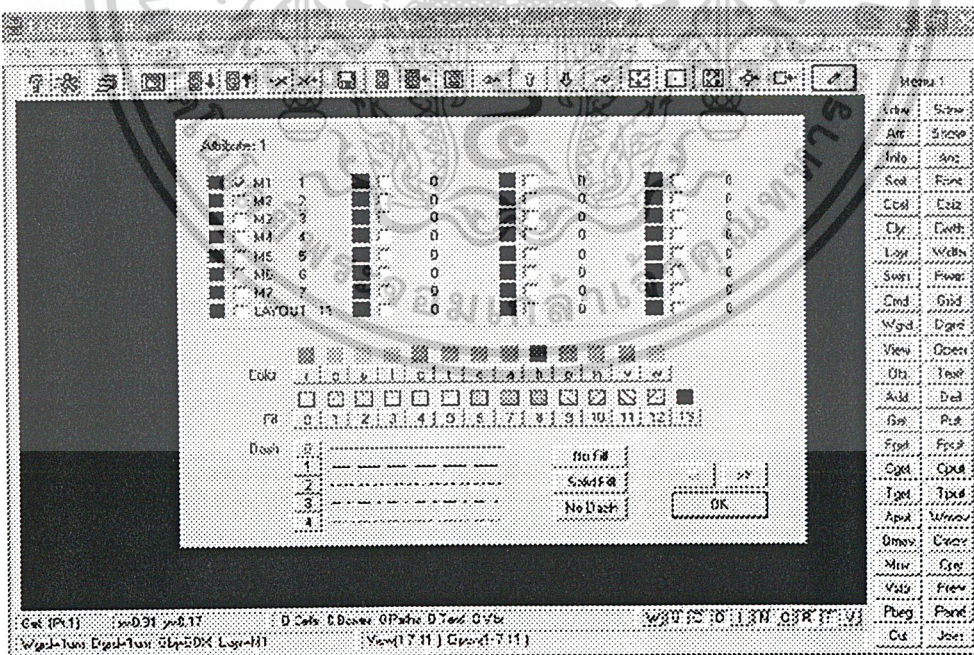
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตั้งชื่อชั้น layer เป็นชื่อชั้นมาตักต่างๆ โดย click Cnfg ที่ menu 2> click Layers พิมพ์ชื่อมาตักแล้ว click Add> click Save>click ok ดังรูปที่ 4



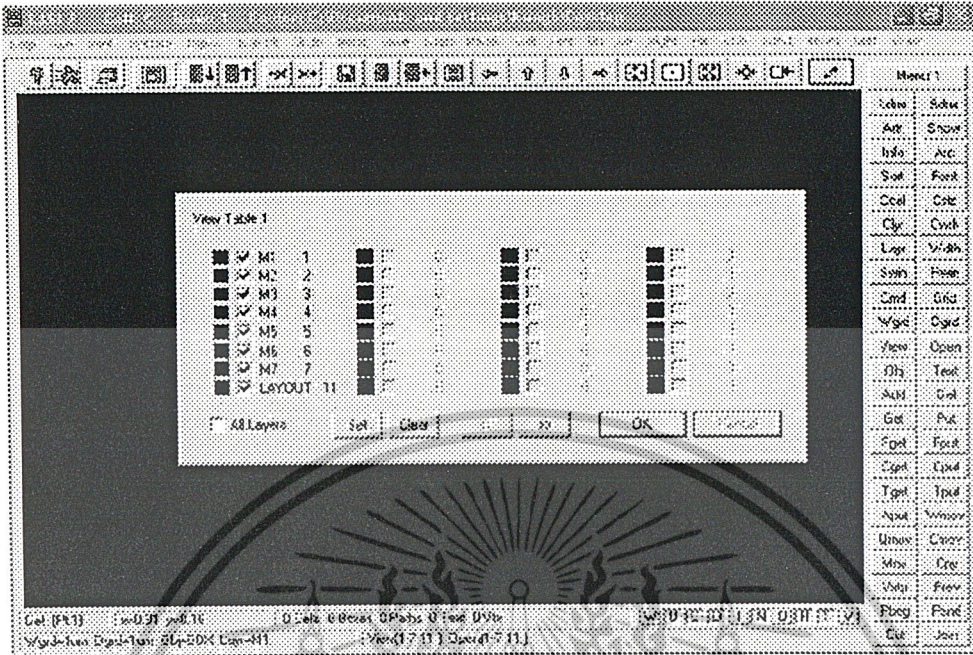
รูปที่ 4

6. click Attr Menu 1 เพื่อตั้งค่าสีของมาตักแต่ละชั้นดังรูปที่ 5

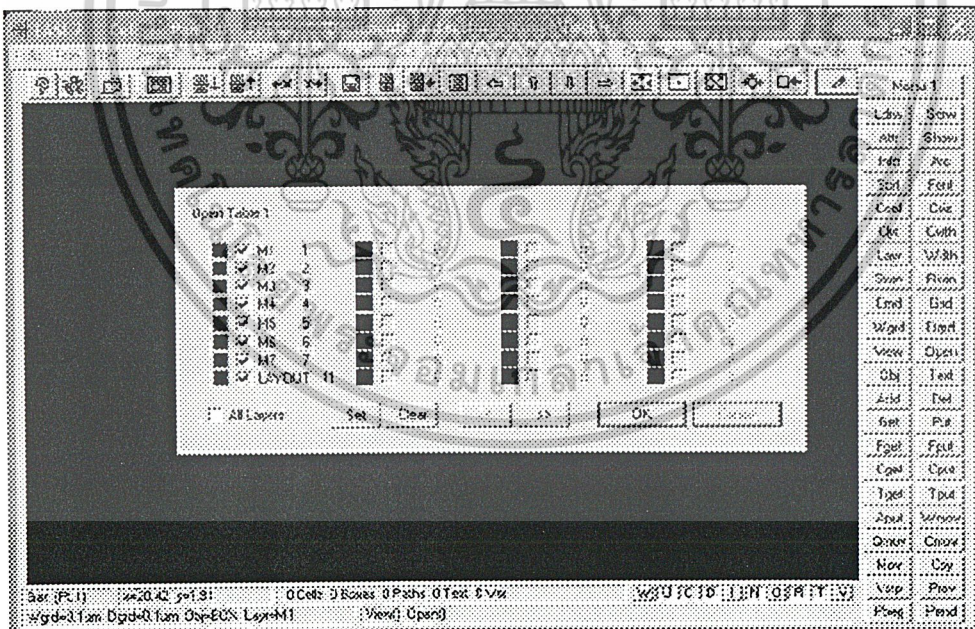


รูปที่ 5

7. click view> click ok และ click open>click ok เพื่อที่จะให้ตัวโปรแกรมเก็บข้อมูลว่ามีมาตักใดบ้างที่จะทำการออกแบบดังรูปที่ 6 และ รูปที่ 7 ตามลำดับ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6



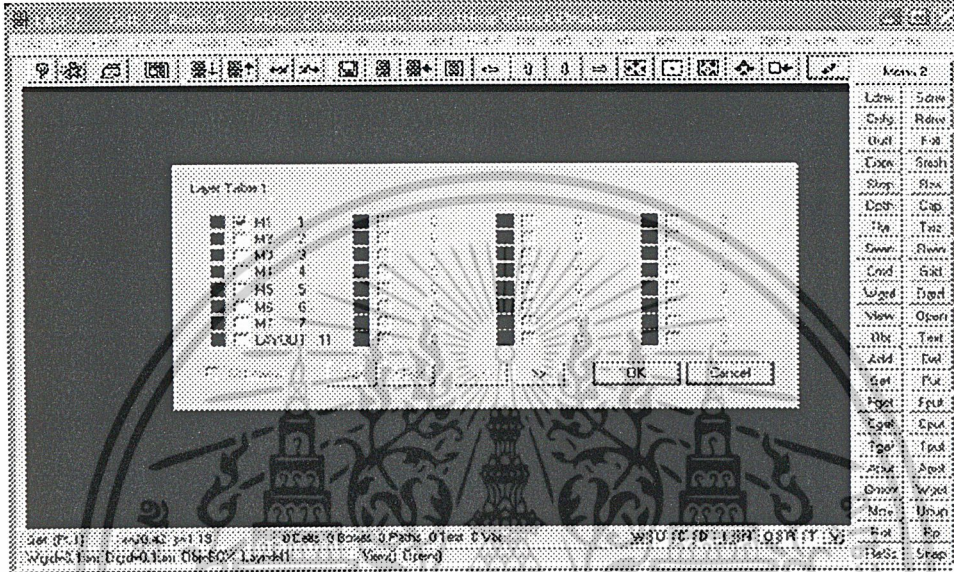
รูปที่ 7

8. click Wgrd Menu 1 เพื่อที่จะกำหนด ระยะของงานที่ทำกรออกแบบ และและ click Dgrd เพื่อที่จะกำหนด ระยะของของจุด โดยจะสังเกต ได้ที่มุมที่ด้านล่างซ้ายของตัวโปรแกรม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. click obj>Box หรือ Poly/Path เพื่อที่จะวาดสี่เหลี่ยมหรือเส้นโดยการ Double click โดยที่สถานะนั้นจะสังเกตได้ที่มุมที่ด้านล่างซ้ายของตัวโปรแกรมเช่นกัน

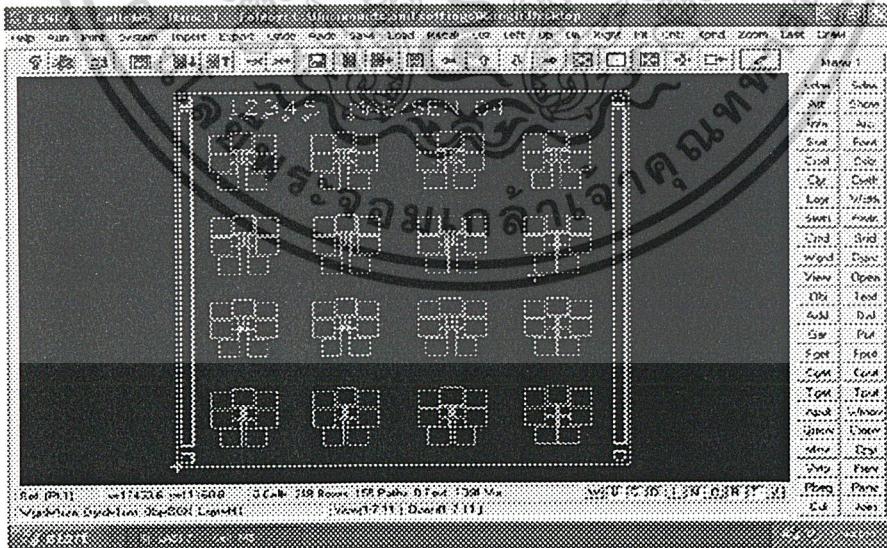
10. Click Text สำหรับเขียนตัวอักษร

11. Click Layer และ click Tlyr > click ok เพื่อต้องการระบุชั้นที่ต้องการวาดหรือเขียนอักษรดังรูปที่ 8 สถานะนั้นจะสังเกตได้ที่มุมที่ด้านล่างซ้ายของตัวโปรแกรมเช่นกัน



รูปที่ 8

12. click Add ทำการวาดรูปที่ต้องการการวาดจะต้องวาดให้เหมือนโครงสร้างจริงโดยจะแยกสีแต่ละมาส์คเพื่อให้ง่ายต่อการวาดดังรูปที่ 9

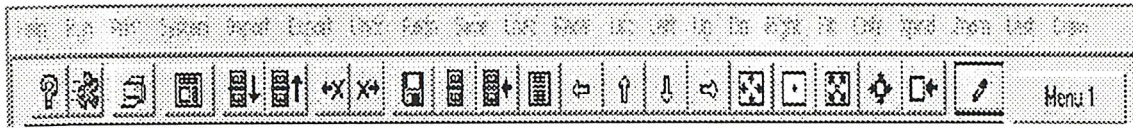


รูปที่ 9

โดยปุ่มฟังก์ชันการทำงานอื่นนั้นก็มีความสำคัญการออกแบบมาส์ค โดยจะแบ่ง 3 ฟังก์ชันการทำงานด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. Menu bar



- System ใช้สำหรับ Create New Icon และแปลงไฟล์
- Import ใช้สำหรับดึงไฟล์ที่มีนามสกุลเดียวกันเข้ามาใช้ในงานที่สร้างได้
- Undo การย้อนกลับภาพ
- Redo นำภาพที่ย้อนกลับคืนมา
- Save เซฟงานที่ทำอยู่
- Load ชื่องานสำหรับงานใหม่
- List แสดงชื่อ ไฟล์งานทั้งหมด
- Left เลื่อนภาพไปทางด้านซ้าย
- Up เลื่อนภาพไปทางด้านบน
- Dn เลื่อนภาพไปทางด้านล่าง
- Right เลื่อนภาพไปทางด้านขวา
- Fit ภาพขนาดเต็มหน้าจอ
- Xpnd ลดขนาดภาพ
- Zoom ขยายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.Menu Function

Menu 1		Menu 2	
Ldrw	Sdrw	Ldrw	Sdrw
Attr	Show	Cnlg	Rdrw
Info	Arc	Outl	Full
Sort	Font	Copy	Smsh
Coel	Esiz	Step	Res
Clyr	Cwth	Dpth	Cap
Layr	Wdth	Tlyr	Tsiz
Swin	Rwin	Swin	Rwin
Cmd	Grid	Cmd	Grid
Wgrd	Dgrid	Wgrd	Dgrid
View	Open	View	Open
Obj	Text	Obj	Text
Add	Del	Add	Del
Get	Put	Get	Put
Fget	Fput	Fget	Fput
Cget	Cput	Cget	Cput
Tget	Tput	Tget	Tput
Aput	Wmov	Aput	Agel
Qmov	Cmov	Qmov	Wget
Mov	Cpy	Mov	Udup
Vslp	Prev	Rot	Flp
Fbeg	Pend	ReSz	Snap
		OvSz	Orig

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Menu 1

- Attr สำหรับกำหนดสีแต่ละมาสก์
- Layr กำหนดชั้นมาสก์ที่ต้องการวาด
- Wdth กำหนดความกว้างของ Poly/Path
- Grid กำหนดให้มีกริดหรือไม่มีกริด
- Wgrd กำหนดความกว้างของกริดที่ทำงาน
- Dgrd กำหนดระยะห่างของจุด
- View สำหรับโชว์มาสก์แต่ละชั้น
- Open เป็นการเปิดมาสก์ที่กำหนดขึ้น
- Obj สำหรับเลือกที่จะวาด Box หรือ Poly/Path
- Text สำหรับเขียนตัวอักษร
- Add สำหรับวาดหลังจากเลือก Obj
- Del ลบ
- Get สำหรับเลือกที่รูปวาดเพื่อที่ต้องการลบหรือเคลื่อนย้าย
- Mov เคลื่อนย้าย
- Cpy ก๊อปปี้

## Menu 2

- Cnfg กำหนดชั้นมาสก์
- Tlyr กำหนดชั้นมาสก์ที่ต้องการเขียน Text
- Tsiz กำหนดขนาดของ Text
- Aput สำหรับหยุดการทำงานในขณะนั้น

### 3.Menu บอกลสถานะ

Get (Pt:1)	x=11.97 y=12.74	0 Cells 0 Boxes 0 Paths 0 Text 0 Vtx
Wgrid=0.1um Dgrid=0.1um Obj=BOX Layer=M1	View() Open()	

- สำหรับบอกลสถานะการทำงานขณะนั้น

ในการอธิบายการทำงานของแต่ละปุ่มต่างนี่เป็นการอธิบายอย่างคร่าวๆถ้าต้องการทราบรายละเอียดมากกว่านี้ให้ไปศึกษาได้ที่ Lasi7. help

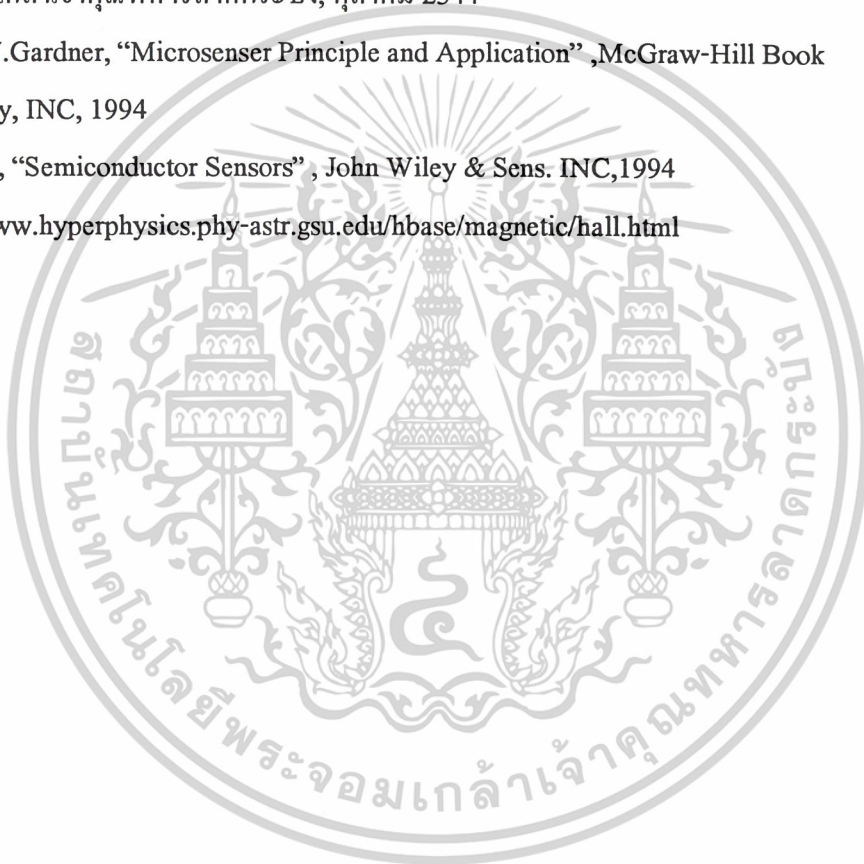
เมื่อทำการออกแบบแล้วนำไฟล์งาน .USF ไปทำการแปลงไฟล์เป็น Giberber เพื่อที่จะนำไปสร้างมาส์ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

1. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ตุลาคม 2542
2. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีวงจรรวม”, คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ตุลาคม 2544
3. รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ตุลาคม 2544
4. Julian W.Gardner, “Microsenser Principle and Application” ,McGraw-Hill Book Company, INC, 1994
5. S.M.Sze, “Semiconductor Sensors” , John Wiley & Sens. INC,1994
6. <http://www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/hall.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้