

**ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยไดโอดแบบรอยต่อโลหะ**  
**(Metal Junction Magnetodiode)**



T119356

โดย

นางสาวเนียนวิภา พรหมน้อย

นายอนุพล อุปพงษ์

นายพงษ์คณัย นวดทอง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **119356**  
วัน,เดือน,ปี..... - 7 S.ค. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553๗

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยไดโอดแบบรอยต่อโลหะ  
(Metal Junction Magnetodiode)

โดย

นางสาวเนียนวิภา พรหมน้อย

นายอนุพล อุปพงษ์

นายพงษ์ดนัย นวลทอง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรภูด

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2553

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยไดโอดแบบรอยต่อโลหะ

ผู้จัดทำ

1. นางสาวเนียนวิภา พรหมน้อย

2. นายนฤพล อุปพงษ์

3. นายพงษ์คณัย นวลทอง

ลงชื่อ.....

(รศ.ดร.เดิมาพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา



## ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยไดโอดรอยต่อโลหะ

นางสาวเนียรวิภา	พรมน้อย	รหัส 50010843
นายณฤพล	อุปพงษ์	รหัส 50010874
นายพงษ์ดนัย	นวลทอง	รหัส 50011012
รศ.ดร. เต็มพงษ์	เพ็ชรกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2553

### บทคัดย่อ

โครงงานนี้ เป็นการศึกษาโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดรอยต่อแบบโลหะ ซึ่งประกอบด้วยสองไดโอดที่มีรอยต่อแบบโลหะ ใช้เป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า และทำการศึกษาออกแบบ โครงสร้างแมกนีโตไดโอดรอยต่อโลหะแบบสามขั้ว ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสขั้วแคโทดทั้งสองขั้ว โครงสร้างประกอบด้วยขั้วแอโนดหนึ่งขั้วแคโทดสองขั้ว ที่มีค่าความกว้างระหว่างแอโนดกับแคโทด (W) และความยาวระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด (L) มีการเปลี่ยนแปลง

## Metal Junction Magnetodiode

Miss Nianwipa Promnoi ID. 50010843

Mr Narupon Upapong ID. 50010874

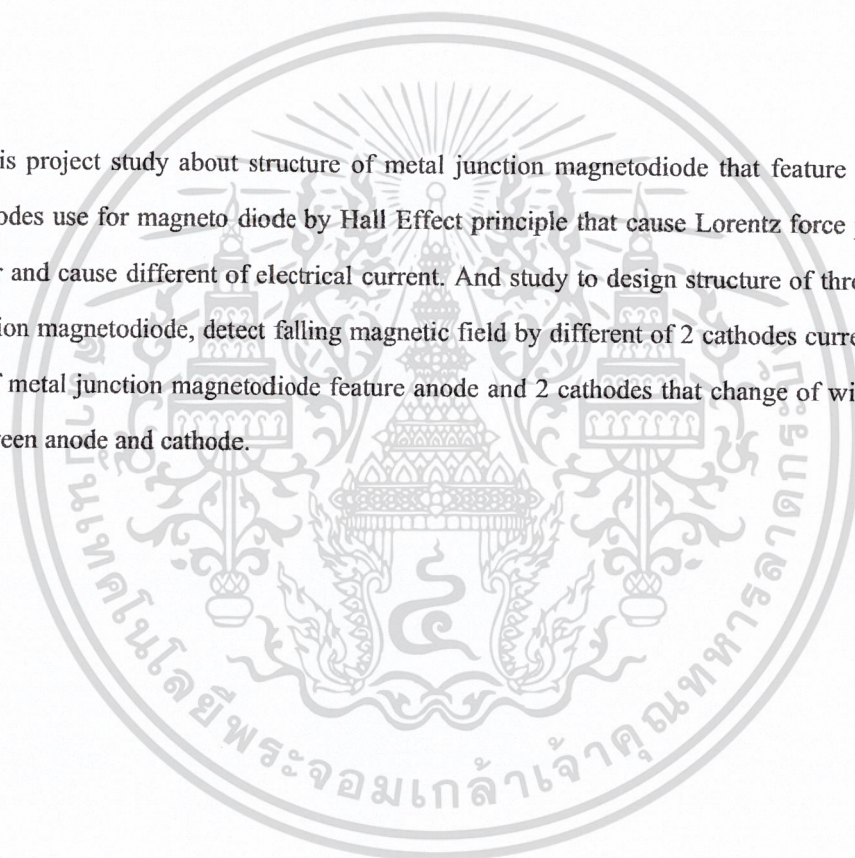
Mr Pongdanai Nualthong ID. 50011012

Assoc.Prof.Dr.Toempong Pechkoon Advisor

Education Year 2010

### Abstract

This project study about structure of metal junction magnetodiode that feature 2 metal junction diodes use for magneto diode by Hall Effect principle that cause Lorentz force perform with carrier and cause different of electrical current. And study to design structure of three poles metal junction magnetodiode, detect falling magnetic field by different of 2 cathodes current. The structure of metal junction magnetodiode feature anode and 2 cathodes that change of width and length between anode and cathode.

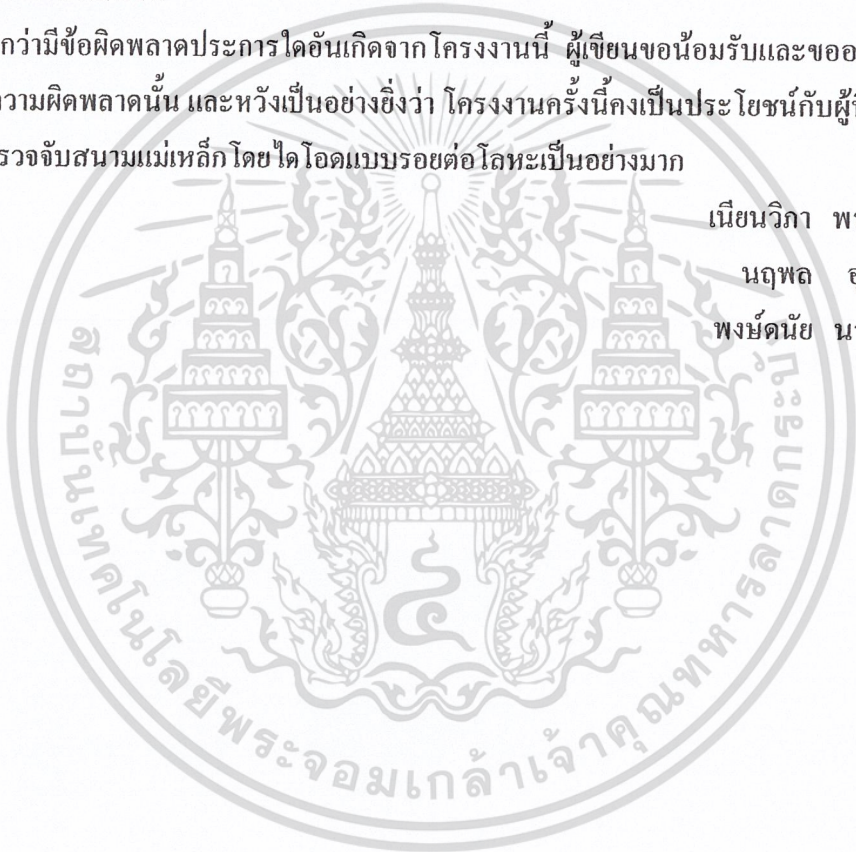


### กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จาก รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านกรุณาให้คำปรึกษา ดูแลตลอดจนตรวจสอบแก้ไขโครงการนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ และให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ ด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณ นายสุเมธ จันทร์แถมแก้ว นาย อัสสุชล แสงนวล นายปัญญากร โสคติพย์ และ นายชลินทร์ สุทธิเนตร ที่เป็นທີ່ปรึกษาและให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณ นายวีระ เฟื่องจันทร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ในการทำโครงการในครั้งนี้

หากว่ามีข้อผิดพลาดประการใดอันเกิดจากโครงการนี้ ผู้เขียนขอน้อมรับและขอภัยเป็นอย่างสูงในความผิดพลาดนั้น และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการครั้งนี้คงเป็นประโยชน์กับผู้สนใจในเรื่องตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยได้อัดแบบรอยต่อโลหะเป็นอย่างมาก

เนียนวิภา พรหมน้อย  
 นฤพล อุปพงษ์  
 พงษ์ดนัย นวลทอง



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ	3
2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของอะตอม	3
2.1.2 วงโคจรของอิเล็กตรอน	4
2.1.3 ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)	5
2.1.4 สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semi – Conductor)	5
2.1.5 ฉนวนไฟฟ้า (Insulator)	6
2.2 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	6
2.2.1 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์	7
2.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิด N ( N – Type Semiconductor )	7
2.2.3 สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type)	8
2.3 ทฤษฎีรอยต่อ p-n	9
2.4 ทฤษฎีรอยต่อระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำ	11
2.4.1 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ	12
2.4.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำกรณีที่มีฟังก์ชันงาน $\phi_M$ มีค่ามากกว่า $\phi_S$ ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	15
2.4.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำกรณีที่มีฟังก์ชันงาน $\phi_M$ มีค่าน้อยกว่า $\phi_S$ ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	20
2.4.4 รอยสัมผัสระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำในทางปฏิบัติ	23
2.5 ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	25
2.5.1 ทฤษฎีสนามไฟฟ้า	25
2.5.2 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก	31
2.5.3 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field)	32
2.6 แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)	36
2.7 ปรากฏการณ์ ฮอลล์ (Hall Effect)	36

บทที่ 3 ทฤษฎีอุปกรณ์	40
3.1 เซนเซอร์ (Sensors)	40
3.1.1 เซนเซอร์	40
3.1.2 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์	40
3.1.3 คุณสมบัติของเซนเซอร์	41
1. ความแม่นยำ (accuracy)	42
2. ความแน่นอน (precision)	42
3. ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (repeatability หรือ reproducibility)	42
4. ความคลาดเคลื่อน (error)	42
5. ความคลาดเคลื่อนสถิต (static error)	42
6. การปรับเทียบ (calibration)	42
7. บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone dead หรือ band)	43
8. ขนาด (dimension)	43
9. ครีป (drift)	43
10. ฮิสเทอรีซิส (hysteresis)	43
11. การหน่วงสัญญาณ (lag)	44
12. ความเป็นเชิงเส้น (linearity)	44
13. อายุการใช้งาน (operating life หรือ reliability)	45
14. อัตราการทำงาน (rating)	45
15. ย่านปฏิบัติงาน (range)	45
16. ผลตอบสนอง (response)	45
17. ความเร็วในการตอบสนอง (speed of response)	45
18. ความละเอียด (resolution)	46
19. ความไว (sensitivity)	46
20. เสถียรภาพ (stability)	46
21. ค่าเบี่ยงเบน (tolerance)	46
3.2 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Equipment)	46
3.2.1 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	46
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้หลักการ ปรากฏการณ์ฮอลล์	50
3.2.2.1 แมกนีโตรซิสเตอร์ (Magnetoresistor)	50
3.2.2.2 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)	52
3.2.2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransister)	53

- แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor)	53
- แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransister)	55
3.3 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)	57
3.3.1 โครงสร้าง	57
3.3.2 หลักการทำงาน	57
3.3.2.1 กระบวนการสร้าง	57
3.3.2.2 การตรวจจับสนามแม่เหล็ก	58
<b>บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อโลหะ</b>	62
4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน	63
4.2 กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process)	63
4.2.1. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น	64
4.2.2. การกำจัดฝุ่น	64
4.2.3. การกำจัดไขมัน	64
4.2.4. การกำจัดเศษโลหะ	65
4.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)	65
4.3.1 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)	66
4.3.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)	66
4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)	69
4.4.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Cleaning)	70
4.4.2 การเคลือบสารไวแสง (Photo resist coating)	70
4.4.3 การอบขึ้น Solfbake	72
4.4.4 การปรับซ็อนมาสก์ (Mask Alignment)	72
4.4.5 การฉายแสง (Exposure)	73
4.4.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)	73
4.4.7 การอบขึ้น Hardbake	73
4.4.8 การกัด (Etching)	74
4.4.9 การลอกน้ำยาไวแสง	75
4.4.10 กระบวนการแพร่สารเจือ (Deposition)	75
4.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process)	78
4.7 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)	80

4.8 สรุปกระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อโลหะ	81
<b>บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง</b>	88
5.1 ผลการวัดคุณสมบัติเบื้องต้นของเมกนีโตไดโอด	88
5.1.1 วัดคุณสมบัติความเป็นไดโอด (N+ กับ AI)	88
5.1.2 วัดคุณสมบัติรอยสัมผัสเรกติไฟร์ (Rectifier Contact or Schottky Contact) (AI กับ N-sub)	89
5.2 การวัดการตรวจจับสนามแม่เหล็กของเมกนีโตไดโอด	90
5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	91
<b>บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง</b>	92
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก	
- คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์	
- Datasheet	



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลอง โครงสร้างอะตอม	3
รูปที่ 2.2 แสดงวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส	4
รูปที่ 2.3 แสดงการจัดอิเล็กตรอนของอะตอม โซเดียมและคลอรีน	5
รูปที่ 2.4 แสดงการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกันครบ 8 ตัว ของอะตอมซิลิคอนและเยอรมันเนียม	6
รูปที่ 2.5 แสดงการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกันครบ 8 ตัว ของอะตอมซิลิคอนและเยอรมันเนียม	7
รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างการจับตัวกัน ของอิเล็กตรอนวงนอกสุดระหว่าง Si กับ P ในสารกึ่งตัวนำ	8
รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างการจับตัวกัน ของอิเล็กตรอนวงนอกสุดระหว่าง Si กับ Br ในสารกึ่งตัวนำชนิด P – Typ	8
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดช่วงดีพลีชันเมื่อนำสารพีและเอ็นมาต่อกัน	9
รูปที่ 2.9 แสดงการไหลของกระแสอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ	10
รูปที่ 2.10 แสดง P-N Junction	11
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ	12
รูปที่ 2.12 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานต่างๆ ที่สำคัญในวัสดุ	13
รูปที่ 2.13 แสดงการหลุดจากเนื้อสารของอิเล็กตรอน	13
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยสัมผัส ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในอุดมคติโดย $\phi_M > \phi_s$	16
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยสัมผัส ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในอุดมคติโดย $\phi_M < \phi_s$	21
รูปที่ 2.16 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) หรือ Non rectifying	22
รูปที่ 2.17 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสเมื่อทำการเติมสารเจือที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน	25
รูปที่ 2.18 สนามไฟฟ้ามีทิศเดียวกับทิศของแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุบวก	26
รูปที่ 2.19 สนามไฟฟ้าและเส้นแรงไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุอิสระ	26
รูปที่ 2.20 แรงกระทำกับประจุและการเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้า	27
รูปที่ 2.21 การหาค่าศักย์ไฟฟ้า	29

รูปที่ 2.22 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำ	33
รูปที่ 2.23 ขดลวดตัวนำหมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็ก	34
รูปที่ 2.24 ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้กฎของเลนซ์	35
รูปที่ 2.25 แสดงการเคลื่อนที่ของประจุ $q$ ภายใต้สนามแม่เหล็ก	36
รูปที่ 2.26 ก-ค แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์	37
รูป 2.27 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ $V_H$	38
รูปที่ 2.28 แสดงทิศของกระแสที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และแรงลอเรนซ์ (F)	39
รูปที่ 3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์แบบต่างๆ	40
รูปที่ 3.2 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone)	43
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิส	44
รูปที่ 3.4 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น	45
รูปที่ 3.5 ความเร็วในการตอบสนอง	46
รูปที่ 3.6 ด้านตัดขวาง โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	47
รูปที่ 3.7 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง	48
รูปที่ 3.8 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง	48
รูปที่ 3.9 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง	49
รูปที่ 3.10 เอาท์พุทของเจ็มทิสแม่เหล็ก	50
รูปที่ 3.11 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม	52
รูปที่ 3.12 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด	52
รูปที่ 3.13 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS	53
รูปที่ 3.14 ด้านตัดขวางโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง	54
รูปที่ 3.15 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน	55
รูปที่ 3.16 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$	56
รูปที่ 3.17 โครงสร้างแมกนีโตไดโอด	57
รูปที่ 3.18 ชุดมาร์คที่ใช้สำหรับกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อโลหะ (Metal)	58
รูปที่ 3.19 การวัดทดลองของแมกนีโตไดโอด	58
รูปที่ 3.20 การเบี่ยงเบนพาหะ Hall โดย Lorentz force	59
รูปที่ 3.21 พื้นที่ของการเบี่ยงเบนพาหะ (Hole)	60
รูปที่ 4.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	62
รูปที่ 4.2 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไดโนอิมิตัว	66
รูปที่ 4.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	67
รูปที่ 4.4 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน	67

รูปที่ 4.5 แผ่นเวเฟอร์	67
รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process	70
รูปที่ 4.7 เครื่องสปินเนอร์	71
รูปที่ 4.8 เครื่องฉายมาร์ค (Mask Alignment)	73
รูปที่ 4.9 เตอบ	74
รูปที่ 4.10 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆ ในซิลิกอน	76
รูปที่ 4.11 (ก.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอม (ข.) ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการ การแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส	77
รูปที่ 4.12 เตาสําหรับแพร่สารเจือ	78
รูปที่ 4.13 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator	79
รูปที่ 4.14 แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น	81
รูปที่ 4.15 สร้าง SiO <sub>2</sub>	81
รูปที่ 4.16 เคลือบน้ำยาไวแสง AZ 1350	81
รูปที่ 4.17 Mark 1	82
รูปที่ 4.18 ฉายมาร์ค 1	82
รูปที่ 4.19 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Develop	82
รูปที่ 4.20 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Etching	83
รูปที่ 4.21 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Photo resists Removal	83
รูปที่ 4.22 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการแพร่สารเจือชนิด N	83
รูปที่ 4.23 แผ่นซิลิกอนหลังจากการ Flow O <sub>2</sub> ปิดปากหลุม แบบ Dry Wet Dry	83
รูปที่ 4.24 เคลือบน้ำยาไวแสง AZ 1350	84
รูปที่ 4.25 Mark 2	84
รูปที่ 4.26 ฉายมาร์ค 2	84
รูปที่ 4.27 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Develop	85
รูปที่ 4.28 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Etching	85
รูปที่ 4.29 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Photo resists Removal	85
รูปที่ 4.30 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการ Evaporation เพื่อทำขั้วของแมกนีโตไดโอด	85
รูปที่ 4.31 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการเคลือบน้ำยาไวแสง	86
รูปที่ 4.32 Mark 3	86
รูปที่ 4.33 ฉายมาร์ค 3	86
รูปที่ 4.34 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Develop	87

รูปที่ 4.35 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Al Etching	87
รูปที่ 4.36 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Photo resists Removal ได้แมกนีโตไดโอดอย่างสมบูรณ์	87
รูปที่ 5.1 ผลการวัด N+ กับ Al	
(ก.) Forward Bias 1 volt/div, 0.5 mA/div, $V_o = 0.3$ volt	
(ข.) Breakdown voltage 5 volt/div, 0.5 mA/div, $V_{BD} = 18$ volt	88
รูปที่ 5.2 กราฟคุณสมบัติของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง (Al กับ N-substrate)	
(ก.) Forward Bias 1 volt/div, 0.5 mA/div, $V_o = 0.3$ volt	
(ข.) Breakdown voltage 5 volt/div, 0.5 mA/div, $V_{BD} = 18$ volt	89
รูปที่ 5.3 กราฟคุณสมบัติการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง ด้านหน้า	90
รูปที่ 5.4 กราฟคุณสมบัติการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งในทิศทางบวกและลบ	90



## บทที่ 1

### บทนำ

ในยุคที่เทคโนโลยีก้าวไกลดังปัจจุบัน นอกจากการสร้างสรรค์สิ่งใหม่ๆแล้วสิ่งที่คู่กันคือ การตรวจสอบ หรือการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ว่าชิ้นงานที่สร้างขึ้นมานี้สามารถใช้งานได้ตรงตามที่ ออกแบบไว้แค่ไหน ซึ่งในขั้นตอนการตรวจสอบนี้อุปกรณ์ตรวจวัดค่านับว่ามีบทบาทสำคัญ เพราะ ในการวัดค่าบางอย่างเพียงสังเกตทางกายภาพหรือมองด้วยตาเปล่าไม่สามารถทำได้ เช่นการวัด ความเร็วของรอบมอเตอร์ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดขึ้นมา ในอุปกรณ์ ตรวจวัดนี้อาจทำออกมาให้รูปของเซ็นเซอร์ตรวจจับ โดยทำหน้าที่ตรวจจับปริมาณหรือพลังงาน ต่างๆ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการสร้างเซ็นเซอร์ขึ้นมาหลายแบบแตกต่างกันไปทั้งเพื่อความปลอดภัย ในชีวิตประจำวันและอำนวยความสะดวก เช่น เซ็นเซอร์ตรวจกลิ่น เซ็นเซอร์ตรวจแสง เซ็นเซอร์ ตรวจรูปทรง ฯลฯ

การสร้างเซนเซอร์เป็นการนำเอาอุปกรณ์และเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์มาประดิษฐ์เป็นชิ้นงาน ซึ่งอาศัยหลักการทางกายภาพและปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ในการทำงาน และปัจจุบันได้มีการนำ สารกึ่งตัวนำมาประดิษฐ์เป็นเซ็นเซอร์ และด้วยเทคโนโลยีที่สูงขึ้นทำให้ทฤษฎีต่างๆ สามารถนำมา พิสูจน์และสร้างขึ้น ได้จริง

ในบทความนี้ได้นำเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ มาประดิษฐ์เป็นแมกนีโตไดโอด ซึ่งเป็น เซนเซอร์ตรวจจับแม่เหล็กชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างแบบรอยต่อโลหะและรอยต่อ พี-เอ็น โดย ประกอบด้วย 1 ขั้วอาโนด และ 2 ขั้วแคโทด ซึ่งสร้างขึ้นโดยการนำแผ่นซิลิคอนที่เป็น N-type มา สร้างลวดลายตามทีออกแบบไว้ และทำการแพร่สารเจือลงไปให้เกิดเป็นโครงสร้างไดโอด

แมกนีโตไดโอดนี้ทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์และแรงลอเรนซ์ โดยจะเกิดการ เบี่ยงเบนของกระแสพาหะไปจากเดิม เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ ของพาหะ

จากโครงสร้างพบว่าเซ็นเซอร์จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดี ที่ระยะห่าง ระหว่างขั้ว อาโนดกับแคโทด(L) และ ขั้วแคโทดกับแคโทด (W) มีความยาว 50 ไมครอน

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษากระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอด คุณสมบัติพื้นฐานและโครงสร้างของแมกนีโตไดโอด
2. ศึกษาหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ที่มีผลต่อแมกนีโตไดโอด และความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของโฮลเมื่อมีสนามแม่เหล็กกระทำ
3. ศึกษาการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด

## ขอบเขตโครงการ

โครงการนี้เป็นการสร้างไดโอดแบบรอยต่อโลหะ เพื่อนำไดโอดที่ได้มาวัดคุณสมบัติพื้นฐานของไดโอด ทำการทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดที่สร้างขึ้นและทำการสรุปผลการทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตไดโอด



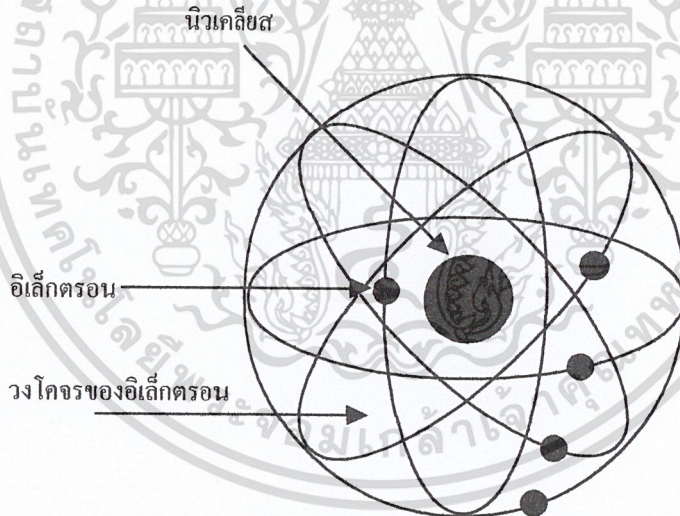
## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีสสารกึ่งตัวนำ

##### 2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของอะตอม

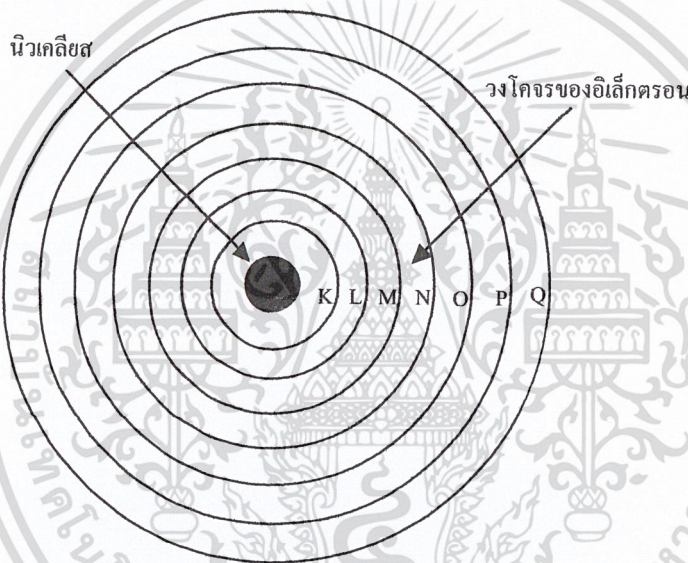
สสารต่างๆ ที่เราพบอยู่ทั่วไปนั้น ถ้าพิจารณาลงไปถึงส่วนประกอบขนาดเล็กที่ประกอบกันเป็นสสารนั้นแล้ว จะพบว่าประกอบด้วยโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลเป็นส่วนประกอบที่เล็กที่สุดของสสารและยังแสดงสมบัติของธาตุนั้นอยู่ได้ ในแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยส่วนที่เล็กลงไปอีกเรียกว่าอะตอม จากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ทำให้ทราบว่าอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสที่อยู่เป็นแกนกลางของอะตอม และมีอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียสนั้น ภายในนิวเคลียสยังประกอบไปด้วยอนุภาคของโปรตรอนและนิวตรอนอยู่ร่วมกัน อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสนั้นเป็นลบบ ส่วนโปรตรอนมีประจุเป็นบวก นิวตรอนที่อยู่ในนิวเคลียสมีประจุเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติแล้วอะตอมของธาตุต่างๆ จะเป็นกลางทางไฟฟ้า ในธาตุเดียวกันอะตอมของธาตุนั้นจะมีจำนวนโปรตรอนและอิเล็กตรอนเท่ากัน



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอะตอม

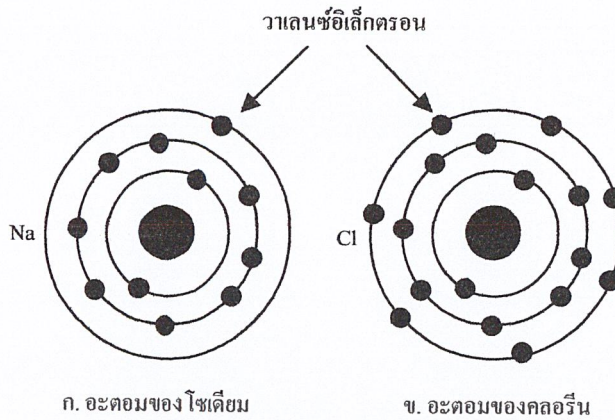
### 2.1.2 วงโคจรของอิเล็กตรอน

จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งรอบนิวเคลียสจะวิ่งเป็นวงๆ โดยแต่ละวงโคจรจะมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ไม่เท่ากัน เรียงลำดับจากน้อยไปหามาก แต่ละวงจะสามารถบรรจุอิเล็กตรอนได้จำนวนเท่าใดนั้นคำนวณได้จากสูตร  $2N^2$  โดย  $N$  คือลำดับวงโคจรที่ห่างจากนิวเคลียส วงโคจรอิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากนิวเคลียสจะบอกกำกับไว้เป็นตัวอักษร ซึ่งในวงในสุดที่ติดกับนิวเคลียสจะนับเป็นวงแรกคือวง  $K$  และวงที่อยู่ออกไปเรื่อยๆ ก็จะเป็น  $L, M, N, O, P, Q$  ตามลำดับ แต่ละวงจะมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดตามสูตร  $2N^2$  ดังนั้นวง  $K$  ซึ่งเป็นวงที่ 1 จะมีอิเล็กตรอนสูงสุดเท่ากับ  $2N^2 = 2(1)^2 = 2$  ตัว, วงที่ 2  $L = 8$  ตัว, วงที่ 3  $M = 18$  ตัว, วงที่ 4  $N = 32$  ตัว, วงที่ 5  $O = 50$  ตัว โดยตั้งแต่วง  $O$  เป็นต้นไป จำนวนอิเล็กตรอนที่บรรจุลงไปจะไม่เต็มจำนวนตามสูตรที่คำนวณได้



รูปที่ 2.2 แสดงวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส

อะตอมของธาตุแต่ละชนิดมีจำนวนอิเล็กตรอนมากน้อยแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้การบรรจุอิเล็กตรอนลงในแต่ละวงโคจรไม่เต็มจำนวนและมีข้อจำกัดในการบรรจุอิเล็กตรอนลงวงโคจรอย่างหนึ่งคือ อิเล็กตรอนที่โคจรอยู่วงนอกสุดจะมีอิเล็กตรอนได้มากที่สุดไม่เกิน 8 ตัว อิเล็กตรอนวงนอกสุดจะอยู่ที่วงใดก็ได้ไม่จำเป็นจะอยู่วง  $Q$  เท่านั้น วงที่ถูกบรรจุอิเล็กตรอนเป็นวงสุดท้ายของธาตุเรียกอิเล็กตรอนวงนอกสุดนี้ว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron) วาเลนซ์อิเล็กตรอนในธาตุแต่ละชนิดจะมีจำนวนไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.3 แสดงการจัดอิเล็กตรอนของอะตอม โซเดียมและคลอรีน

จากรูปที่ 2.3 เป็นการจัดเรียงอิเล็กตรอนของโซเดียม (Na) ซึ่งมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 11 ตัว อิเล็กตรอนจะถูกบรรจุอยู่ชั้นที่ 1 จำนวน 2 ตัว ชั้นที่ 2 จำนวน 8 ตัว ชั้นที่ 3 จำนวน 1 ตัว ส่วนคลอรีนมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 17 ตัว การเรียงตัวของอิเล็กตรอนเป็น 2, 8, 7 ตามลำดับวาเลนซ์อิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนวงนอกสุดจะเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารหรือธาตุต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ตัวนำไฟฟ้า, สารกึ่งตัวนำ และฉนวนไฟฟ้า โดยจะกำหนดจากสารหรือธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนดังนี้

ตัวนำไฟฟ้า จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 1 - 3 ตัว

สารกึ่งตัวนำ จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 4 ตัว

ฉนวนไฟฟ้าจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 5 - 8 ตัว

### 2.1.3 ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)

ตัวนำไฟฟ้าคือธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 1 - 3 ตัว ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากอะตอมได้โดยง่ายเมื่อมีพลังงานหรือแรงกระทำเพียงเล็กน้อย นำกระแสไฟฟ้าได้ดี ธาตุเหล่านี้ เช่น ทองคำ, เงิน, ทองแดง, อลูมิเนียม, เหล็ก, สังกะสี เป็นต้น

### 2.1.4 สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semi - Conductor)

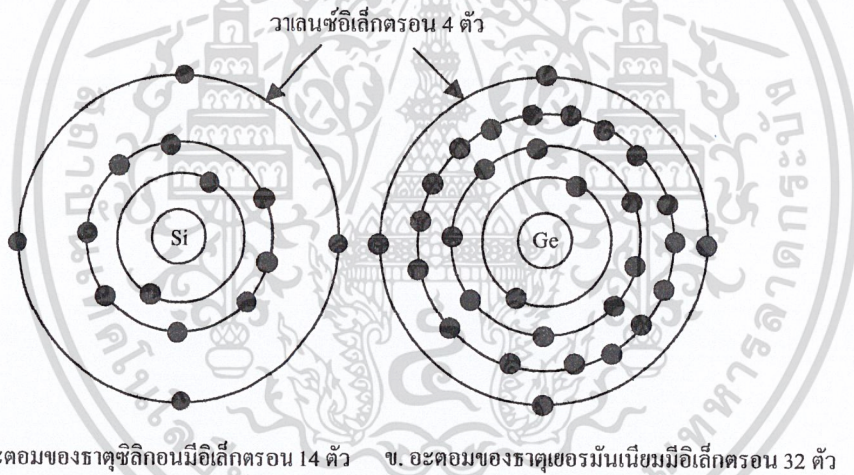
ธาตุที่จัดเป็นจำพวกสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า คือธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ซึ่งมีคุณสมบัติอยู่กึ่งกลางระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า ธาตุกึ่งตัวนำไฟฟ้านี้จะนิยมนำไปใช้ผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ธาตุที่จัดว่าเป็นสารกึ่งตัวนำได้แก่ คาร์บอน ซิลิคอน เยอรมันเนียม ดีบุก ตะกั่ว แต่ที่นิยมนำไปผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มี 2 ชนิด คือ ซิลิคอน (Si) และเยอรมันเนียม (Ge)

### 2.1.5 ฉนวนไฟฟ้า (Insulator)

ธาตุที่จัดเป็นจำพวกฉนวนไฟฟ้า คือธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 - 8 ตัว ซึ่งอิเล็กตรอนไม่สามารถหลุดออกจากอะตอมได้โดยง่าย จะต้องใช้พลังงานสูงมากๆ มากระทำอิเล็กตรอนจึงหลุดออกได้ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยาก มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก ฉนวนเหล่านั้น เช่น ไม้ก้ำ, แก้ว, พลาสติก, ไม้แห้ง เป็นต้น

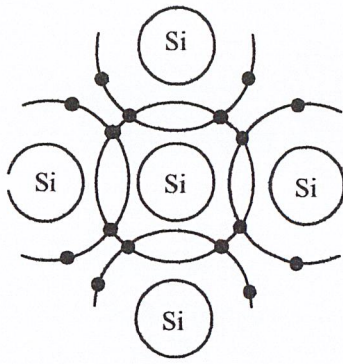
### 2.2 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ยังไม่ได้เติมสารเจือปน (Doping) ใดๆ ลงไป สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำไปทำเป็นสารกึ่งตัวนำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็คือ สารกึ่งตัวนำซิลิกอน และสารกึ่งตัวนำเยอรมันเนียม ธาตุทั้งสองชนิดนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว แต่อิเล็กตรอนทั้งหมดจะไม่เท่ากัน โดยซิลิกอนจะมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 14 ตัว ส่วนเยอรมันเนียมจะมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 32 ตัว ต่อหนึ่งอะตอม

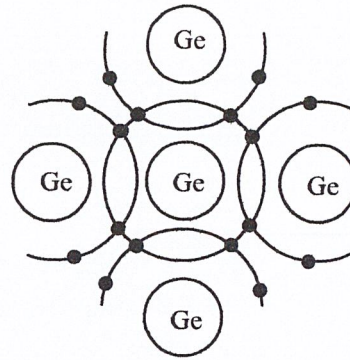


รูปที่ 2.4 แสดงการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกันครบ 8 ตัวของอะตอมซิลิกอนและเยอรมันเนียม

โครงสร้างอะตอมของธาตุซิลิกอนและโครงสร้างอะตอมของธาตุเยอรมันเนียมเมื่ออยู่รวมกันหลายๆ อะตอมจะจับกันเป็นผลึกในรูปของพันธะโควาเลนต์ (Covalence Bond) ดังนั้นหนึ่งอะตอมจะต้องใช้อิเล็กตรอนร่วมกันกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม จึงจะมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดครบ 8 ตัว เพื่อให้อะตอมอยู่ในสภาพเสถียร



ก. ซิลิกอน



ข. เยอรมันเนียม

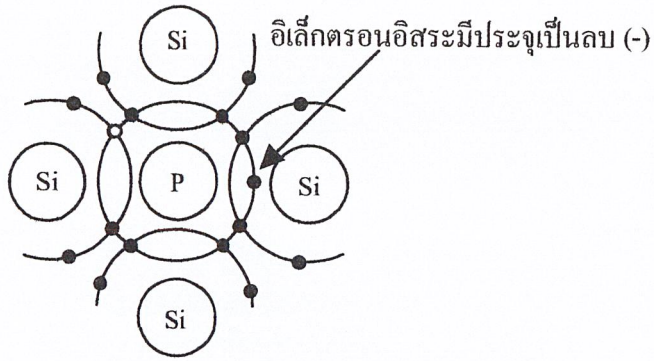
รูปที่ 2.5 แสดงการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกันครบ 8 ตัว ของอะตอมซิลิกอนและเยอรมันเนียม

### 2.2.1 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ คือการนำเอาธาตุซิลิกอนหรือธาตุเยอรมันเนียมบริสุทธิ์มาเติมเจือปนลงไป โดยใช้ธาตุเจือปนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตัว หรือธาตุเจือปนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 5 ตัว ลงไปในอัตราส่วน 108: 1 คือธาตุกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ 108 ส่วนต่อสารเจือปน 1 ส่วน ซึ่งจะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำใหม่ขึ้นมา คือถ้าเติมธาตุเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวลงไป ตัวนำชนิดเอ็น แต่ถ้าเติมธาตุเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ลงไปจะได้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ที่นำมาใช้เป็นธาตุเจือปนเช่น โบรอน อินเดียม แกลเลียม และอลูมิเนียม ส่วนธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวที่นำมาใช้เป็นธาตุเจือปน เช่น ฟอสฟอรัส อาเซนิก

### 2.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิด N (N-Type Semiconductor)

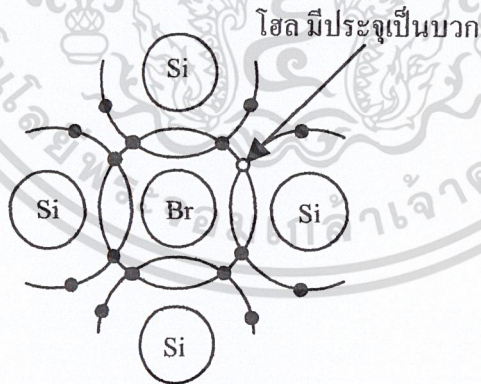
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น ฟอสฟอรัส อาเซนิก อย่างใดอย่างหนึ่งลงไป ในธาตุซิลิกอนหรือเยอรมันเนียมบริสุทธิ์ จะทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของแต่ละอะตอมแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน หรือให้อิเล็กตรอนร่วมกันได้ครบ 8 ตัว ทำให้เหลืออิเล็กตรอน 1 ตัว ที่ไม่สามารถจับตัวกับอะตอมข้างเคียง เรียกอิเล็กตรอนตัวนี้ว่า อิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะแสดงประจุลบออกมา



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างการจับตัวกันของอิเล็กตรอนวงนอกสุดระหว่าง Si กับ P ในสารกึ่งตัวนำชนิด N - Type

### 2.2.3 สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type)

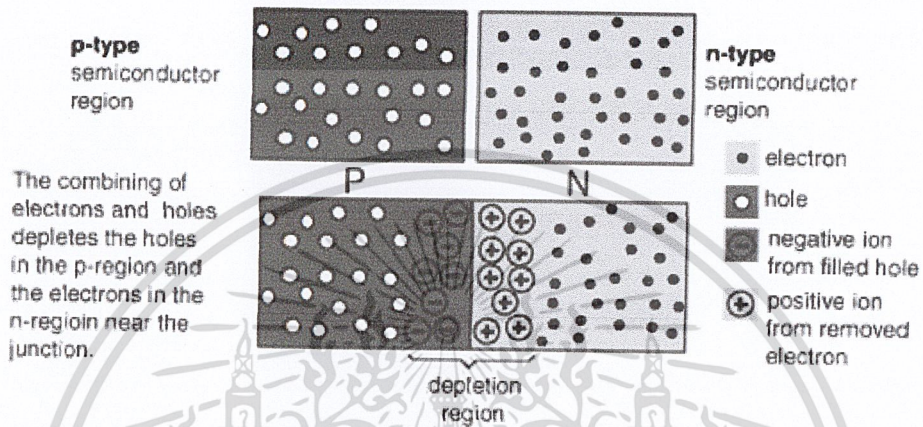
สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการเติมธาตุเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน อินเดียม แกลเลียม อย่างใดอย่างหนึ่งลงไป ในธาตุซิลิคอนหรือธาตุเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ จะทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของแต่ละอะตอมแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกันหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกันได้ครบ 8 ตัว ส่วนอะตอมของธาตุเจือปนจะขาดอิเล็กตรอนอีก 1 ตัว เพราะธาตุเจือปนมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตัว เรียกส่วนที่ขาดอิเล็กตรอนนี้ว่า โฮล ซึ่งแปลว่า หลุม หรือ รู โฮลนี้จะแสดงประจุบวกออกมา



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างการจับตัวกันของอิเล็กตรอนวงนอกสุดระหว่าง Si กับ Br ในสารกึ่งตัวนำชนิด P - Typ

## 2.3 ทฤษฎีรอยต่อ p-n

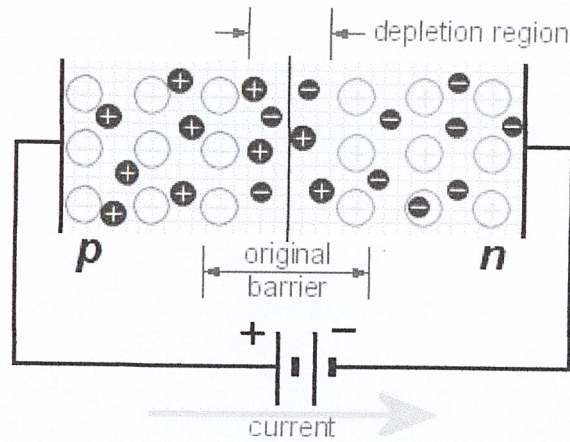
การนำสารกึ่งตัวนำพีและเอ็นมาเชื่อมต่อกัน ณ จุดที่เชื่อมต่อจะเกิดเป็นรอยต่อที่เรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น (P - N junction) อิเล็กตรอนในสารเอ็นจะเคลื่อนที่ไปแทนที่โฮลในสารพีเกิดเป็นช่วง รอยต่อที่เรียกว่า ช่วงดีพลีชัน (depletion region) และรอยต่อนี้ก็เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น จะมีค่า มากน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนประจุที่เกิดขึ้นที่รอยต่อนั้น



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดช่วงดีพลีชันเมื่อนำสารพีและเอ็นมาต่อกัน

### การไบอัสสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น

เมื่อนำสารพี-เอ็นมาต่อกันเกิดช่วงดีพลีชันขึ้น ทำให้ในสภาวะปกติสารกึ่งตัวนำพี-เอ็นนี้ จะไม่สามารถนำกระแสได้ เมื่อต้องการ ให้นำกระแสก็ต้องมีพลังงานจากภายนอกจ่ายแรงดันให้แก่ สารกึ่งตัวนำนั้น เริ่มด้วยต่อแรงดันขั้วบวกเข้ากับสารพี และขั้วลบเข้ากับสารเอ็น อิเล็กตรอนจากขั้วลบ ของแหล่งจ่ายแรงดัน จะผลักอิเล็กตรอน ในสารเอ็นให้เคลื่อนที่ข้ามช่วงดีพลีชัน ในขณะที่เดียวกัน แรงดันที่จ่ายให้นี้ก็ทำให้โฮลในสารพีเคลื่อนที่ออกมา และเคลื่อนที่ไป ยังขั้วบวกของ แหล่งจ่ายแรงดัน ดังนั้นจึงเกิดช่องว่างหรือโฮลขึ้น อิเล็กตรอนจากสารเอ็นจึงสามารถเข้ามารวมได้ ทำให้สารกึ่งตัวนำ สามารถนำกระแสได้ การจ่ายแรงดันเข้าที่จุดต่อของสารพี-เอ็นนี้เรียกว่า การ ไบแอส (bias) ดังนั้นการทำให้สารกึ่งตัวนำพี-เอ็นนำกระแส ได้ต้องต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดัน เข้าที่สารพี และขั้วลบเข้ากับสารเอ็นการไบแอสแบบนี้เรียกว่า การไบแอสตรง (forward bias) ถ้าจ่ายแรงดันสลับขั้วจากเดิมคือ ต่อขั้วบวกเข้ากับสารเอ็น และขั้วลบเข้ากับสารพี จะเรียกว่า ไบแอส กลับ (reverse bias) เมื่อทำเช่นนี้โฮลในสารเอ็นจะเคลื่อนที่ออกห่างจากรอยต่อ ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจากแหล่งจ่ายแรงดันก็จะเข้าไปรวมกับ โฮล ในสารพี ยิ่งทำให้ช่วงดีพลีชัน เพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนในสารเอ็นไม่สามารถข้ามช่วงดีพลีชันที่เพิ่มมากขึ้น ไปรวมกับโฮลในสารพี ได้ สารกึ่งตัวนำพี-เอ็นจำไม่นำกระแส

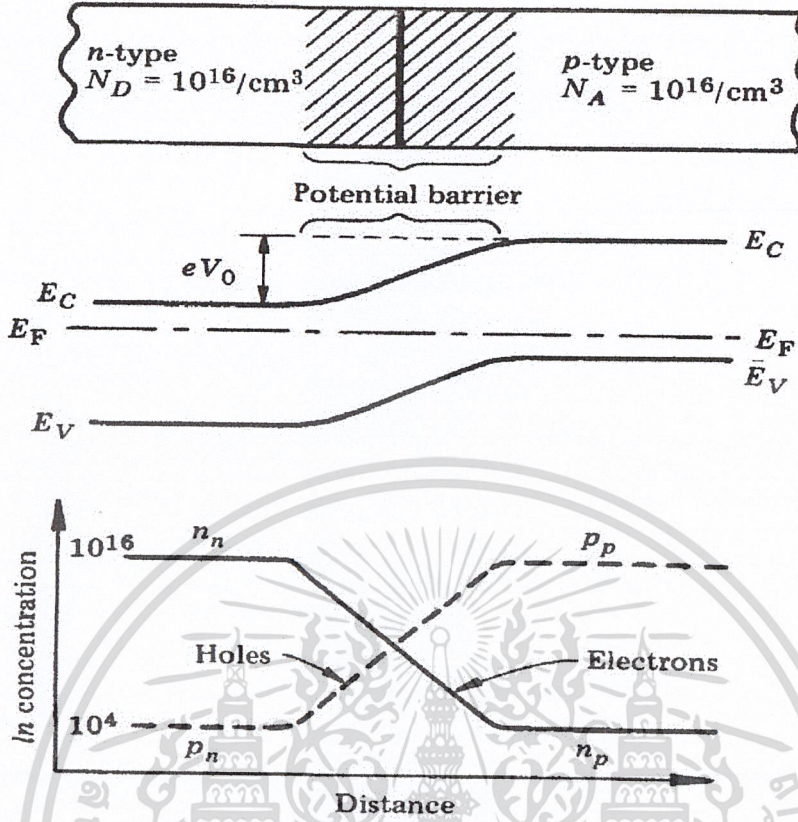


รูปที่ 2.9 แสดงการไหลของกระแสเล็กทรอนิกส์ในสารกึ่งตัวนำ

ในความเป็นจริงทางปฏิบัติจะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่อยู่ใกล้ๆ รอยต่อสามารถข้ามไปรวมกับโฮลในสารพีได้เล็กน้อย ส่งผลให้เกิด กระแสไหลขึ้นเป็นจำนวนน้อยมากๆ นั่นคือเกิดเป็นกระแสรั่วไหลขึ้น (Leakage current) การไบแอสกลับหากจากแรงดันสูงมากๆ และจ่าย เป็นระยะเวลานาน ก็จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นเสียหาย แต่ก็มี การนำการไบแอสกลับนี้ไปใช้กับอุปกรณ์ที่เรียกว่า ซีเนอร์ไดโอด เมื่อวัสดุอยู่ใน thermal equilibrium ระดับ Fermi ของวัสดุทั้งสองฝั่งจะต้องมีค่าเท่ากัน ตัวอย่างในรูป 2.10 แสดง p-n junction ที่สร้างจาก p-type และ n-type Si โดยในแต่ละฝั่งถูกเจือด้วยสารเจือในปริมาณ  $10^{16} / \text{cm}^3$  เท่ากัน ความแตกต่างระหว่างขอบของ conduction band (= barrier height =  $eV_0$ ) มีค่าเท่ากับ

$$eV_0 = E_G - (E_C - E_F)_n - (E_F - E_V)_p \quad (2.1)$$

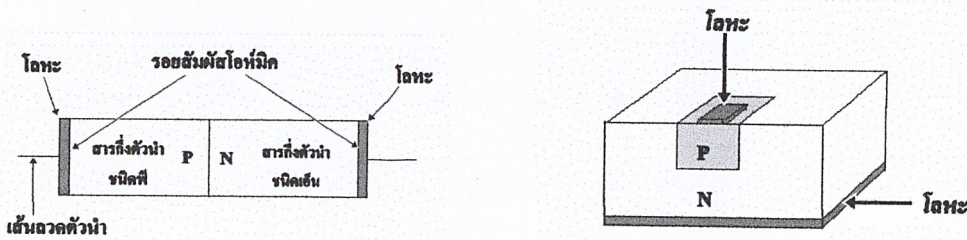
สำหรับวัสดุกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง ( $kT = 0.026 \text{ eV}$ ) ที่มีจำนวน Carrier  $10^{16} / \text{cm}^3$   $N_c = N_v = 10^{19} / \text{cm}^3$   $(E_C - E_F)_n = (E_F - E_V)_p = 0.017 \text{ eV}$  ดังนั้น ถ้า Band gap ( $E_G$ ) =  $1.0 \text{ eV}$  **potential barrier ( $eV_0$ ) =  $0.66 \text{ eV}$**  อันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันให้คงที่



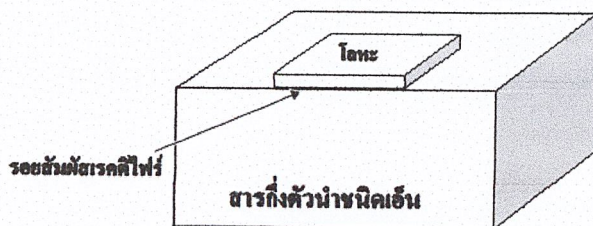
รูปที่ 2.10 แสดง P-N Junction

### 2.4 ทฤษฎีรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเป็นส่วนต่างๆของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหลายๆตัวเช่นขั้วสัมผัสส่วนต่างๆของทรานซิสเตอร์และไดโอด ขณะเดียวกันรอยสัมผัสดังกล่าวไม่สามารถถูกเสมือนว่าไม่มีความต้านทานระหว่างรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งสอง โดยเฉพาะบริเวณระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิที่ไม่ตรงกันของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งผลที่ได้คือรอยสัมผัสเรกติไฟร์ที่มีค่าความต้านทานสูง ทางเลือกที่เหมาะสมคือการเลือกวัสดุที่มีค่าความต้านทานต่ำๆเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก



(ก.) รอยสัมผัสโอห์มมิกระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ



(ข.) รอยสัมผัสสารกึ่งตัวนำระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

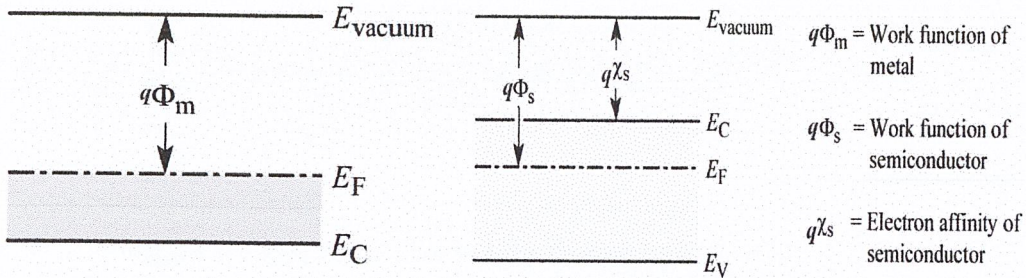
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้ ปกติจะมีคุณสมบัติเป็น “รอยสัมผัสโอห์มิก” (Ohmic contact) กล่าวคือ จะไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง ไม่มีแรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัส สำหรับโลหะที่มักใช้เป็นอะลูมิเนียมและทองคำ เป็นต้น

อย่างไรก็ดีรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในบางกรณีในรูปที่ 2.11 (ข.) อาจจะไม่ใช่อรอยสัมผัสโอห์มิกก็ได้ เช่น บางครั้งอาจแสดงคุณสมบัติเป็นเรกติไฟร์ได้ ซึ่งคล้ายกับไดโอด โดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางหนึ่งทิศทางใดเท่านั้น และรอยสัมผัสเช่นนี้ถูกเรียกว่า “รอยสัมผัสเรกติไฟร์” (Rectifier contact) บางครั้งเรียกว่า “ช็อตกี้ไดโอด” (Schottky diode) ซึ่งไดโอดชนิดนี้สามารถนำไปใช้งาน เช่น วงจรความถี่สูง และวงจรสวิตช์ได้เป็นอย่างดี โดยมีอัตราเร็วในการสวิตช์สูงกว่าไดโอดแบบพี-เอ็นปกติ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสามารถมีคุณสมบัติได้ 2 ลักษณะ คือ อาจเป็น “รอยสัมผัสแบบโอห์มิก” หรือ “รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์” ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างให้เป็นรอยสัมผัส

#### 2.4.1 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ

ก่อนการสัมผัส แถบพลังงานของโลหะ โดยทั่วไป เช่น ทองคำ หรือ อะลูมิเนียม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 (ก.) และสำหรับสารกึ่งตัวนำเช่นซิลิคอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 (ข.) ระดับพลังงาน  $E_0$  หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน นิยมเรียกว่า “ระดับพลังงานสุญญากาศ” (Vacuum level) และนิยามได้ว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดนิ่งที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรืออีกนัยหนึ่งคือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ ดังนั้นระดับพลังงาน  $E_0$  จะมีค่าเท่ากับ 0 eV ส่วนระดับพลังงานอื่นๆที่ปรากฏในรูปจะมีค่าพลังงานเป็นค่าลบ ระดับสุญญากาศของสารทุกชนิดพิจารณาว่าเป็นระดับเดียวกัน หรือมีค่าเท่ากันนั่นเอง



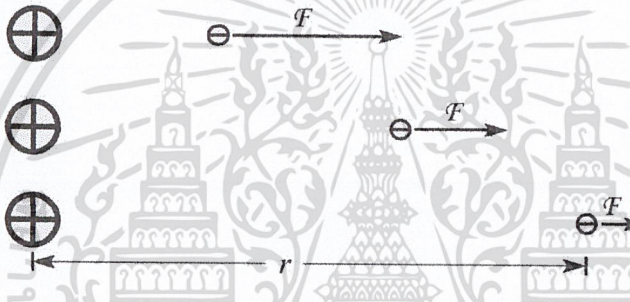
(ก.) โลหะ

(ข.) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

รูปที่ 2.12 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานต่างๆ ที่สำคัญในวัสดุ

(ก.) โลหะ

(ข.) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่ยังไม่สัมผัสกัน



รูปที่ 2.13 แสดงการหลุดจากเนื้อสารของอิเล็กตรอน

ในส่วนของโลหะ ระดับเฟอร์มิของโลหะ หรือ  $E_{FM}$  จะอยู่สูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) เล็กน้อย และถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่อยู่ในโลหะนั้น ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศถูกเรียกว่า “ฟังก์ชันงาน” (Work function) ของโลหะซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\phi_M$  โดยมีหน่วยวัดเป็น โวลต์ ถ้าวัดเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ เขียนแทนด้วย  $q\phi_M$  ซึ่งหมายถึงพลังงานค่าน้อยที่สุด ที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการเพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะนั้นๆ และเป็นอิสระโดยสมบูรณ์ ในโลหะที่ต่างชนิดกันจะมีค่าฟังก์ชันงานที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 ค่าฟังก์ชันงานนี้ต่างก็เป็นคุณสมบัติประจำตัวของตัวนำแต่ละชนิดซึ่งมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \tag{2.1}$$

Work functions of some metals	
Element	Work function, $\phi_M$ (volt)
Ag, silver	4.26
Al, aluminum	4.28
Au, gold	5.1
Cr, chromium	4.5
Mo, molybdenum	4.6
Ni, nickel	5.15
Pd, palladium	5.12
Pt, platinum	5.65
Ti, titanium	4.33
W, tungsten	4.55

Electron affinity of some semiconductors	
Element	Electron affinity, $\chi$ (volt)
Ge, germanium	4.13
Si, silicon	4.01
GaAs, gallium arsenide	4.07
AlAs, aluminum arsenide	3.5

ตารางที่ 2.1 ค่าฟังก์ชันงาน  $q\phi_M$  (Work function) ของโลหะชนิดต่างๆ

สำหรับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ดังในรูปที่ 2.12 (ข.) ระดับเฟอร์มิจะอยู่ในช่องว่างพลังงานโดยอยู่สูงกว่าระดับ  $E_i$  (ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน) และต่ำกว่าระดับ  $E_C$  ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $q\phi_S$ ) มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานสุญญากาศ  $E_0$  และระดับเฟอร์มิ  $E_{FS}$  ดังนั้น จะได้ว่า ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ คือ

$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \quad (2.2)$$

นอกจากนี้ สำหรับในสารกึ่งตัวนำ ความแตกต่างของพลังงานระดับสุญญากาศ  $E_0$  กับระดับนำไฟฟ้า  $E_C$  ของสารกึ่งตัวนำถูกเรียกว่า “อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี” (Electron affinity) โดยเขียนแทนด้วย  $\chi$  มีหน่วยวัดเป็น โวลต์ และเมื่อเป็นหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์เขียนเป็น  $q\chi$  ซึ่ง “อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี” นี้ ถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า  $E_C$  ต้องการ เพื่อที่จะเคลื่อนที่ออกไปหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวภายนอกของสารกึ่งตัวนำ ค่านี้ถือเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ใน เยอรมันเนียม ซิลิคอน และ แกลเลียมอาเซไนด์ จะมีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี  $q\chi$  ต่างๆกันคือ 4.13 eV., 4.01 eV., และ 4.07 eV. ตามลำดับ ซึ่งค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี เป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และจากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่า ค่าฟังก์ชันงานและอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$q\phi_S = q\chi + (E_C - E_F)_{FB} \quad (2.3)$$

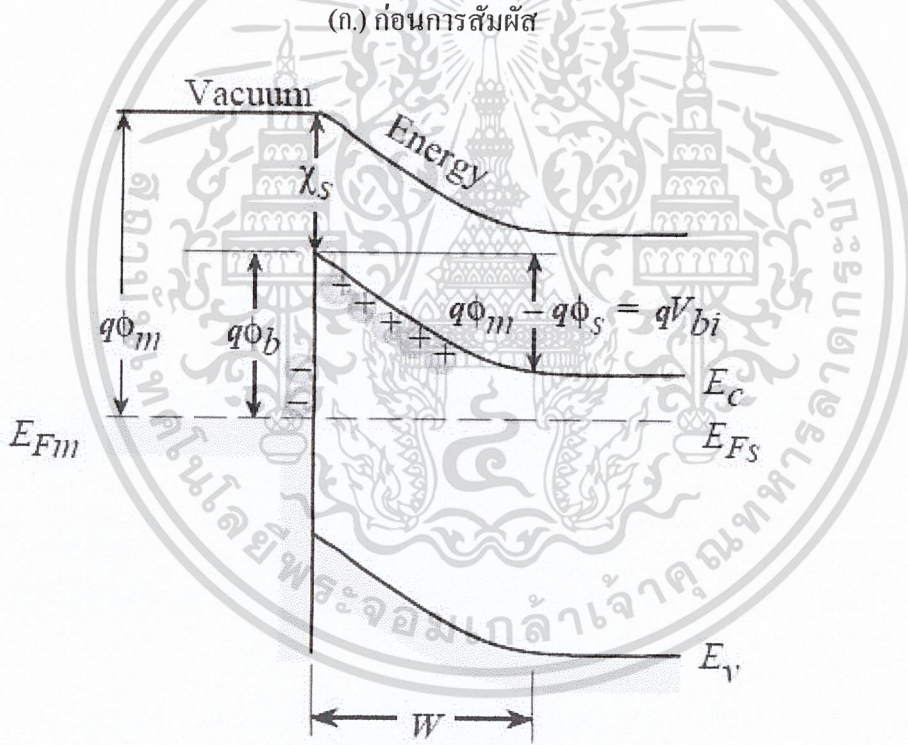
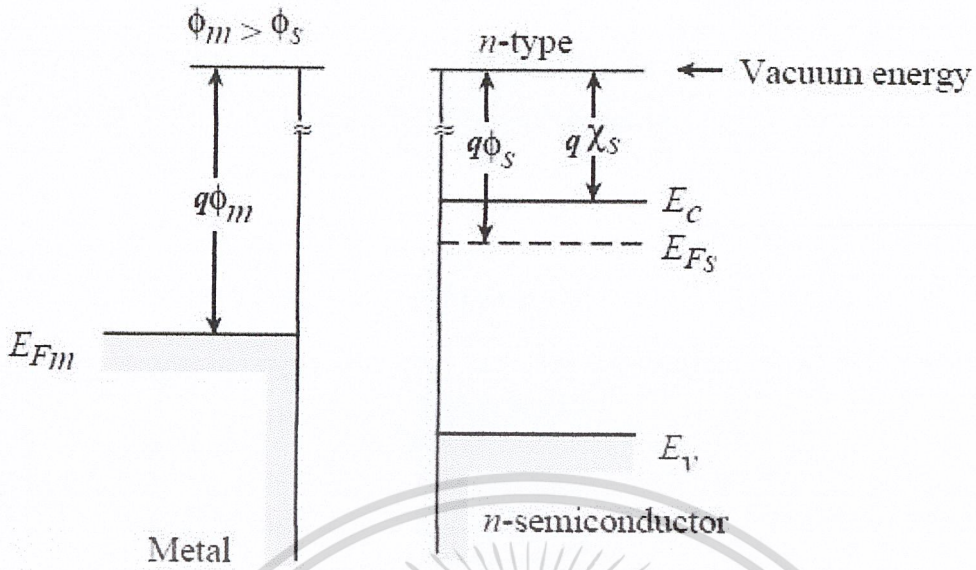
โดยที่อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี

$$q\chi = (E_0 - E_C)_{surface} \quad (2.4)$$

และ  $(E_C - E_F)_{FB}$  หมายถึง ความแตกต่างของระดับ  $E_C$  และระดับ  $E_F$  ที่บริเวณผิวสัมผัสในภาวะ “แบนราบ” (Flat band) หรือในสภาวะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม ตำแหน่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ  $E_{FS}$  มีค่าไม่คงที่ แต่จะเปลี่ยนแปลงกับขนาดของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำนั้นๆ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน  $E_i$  และในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับเฟอร์มิจะปรากฏอยู่ที่ระดับที่ต่ำกว่าระดับ  $E_i$

#### 2.4.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำกรณีที่มีฟังก์ชันงาน $\phi_M$ มีค่ามากกว่า $\phi_S$ ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ลักษณะแถบพลังงานของ โลหะและของสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ ซึ่ง  $\phi_M > \phi_S$  ในภาวะก่อนการสัมผัสหรือเมื่อเริ่มสัมผัส เขียนแสดง ได้ดังรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าแถบพลังงานมีลักษณะเป็นแบนราบปกติ แต่ภายหลังการสัมผัสจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของสารทั้งสองไม่เท่ากัน โดยฟังก์ชันงานของโลหะ  $\phi_M$  มีค่ามากกว่า  $\phi_S$  ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงทำให้เกิดมีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสอง กล่าวคืออิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่แพร่เข้าไปทางด้านโลหะ ที่ทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D^+$ ) ปรากฏอยู่บริเวณรอยสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ และกลายสภาพเป็นบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างเท่ากับ  $W$



(ข.) ภายหลังการสัมผัสที่สภาวะสมดุล

รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็นในอุดมคติโดย  $\phi_m > \phi_s$  ในขณะ (ก.) ก่อนการสัมผัส และ (ข.) ภายหลังการสัมผัสที่สภาวะ สมดุล

อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำซึ่งเคลื่อนที่แพร่เข้าไปในโลหะ จะไปสะสมอยู่ในโลหะเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น ไม่ได้กระจายเข้าไปในส่วนใดของโลหะ (เนื่องจากเป็นกรณีของโลหะในอุดมคติ ซึ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้า หรือแรงดันตกคร่อม) ประจุบวกที่เกิดจากไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ในย่านปลอดพาหะจะมีค่าเท่ากับประจุลบซึ่งสะสมอยู่ที่ผิวสัมผัส (surface interface) ทางด้านโลหะ และประจุบวกเหล่านี้ จะทำให้มีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำ สนามไฟฟ้างกล่าวนี้ จะมีทิศทางจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ เป็นทิศทางที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้แพร่เข้าไปยังด้านโลหะ อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาแรกๆ สนามไฟฟ้านี้จะมีค่าน้อยจึงไม่สามารถต่อต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ทั้งหมด การแพร่ของอิเล็กตรอนจึงยังคงสามารถดำเนินต่อไปได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป สนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในที่สุดก็จะมีค่ามากพอที่จะหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้อย่างสมบูรณ์ ขณะนี้รอยสัมผัสจะเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งกระแสสุทธิที่ไหลผ่านรอยสัมผัสมีค่าเป็นศูนย์ สนามไฟฟ้าที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำสามารถสังเกตเห็นได้ จากการโค้งงอของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำในช่วง  $W$  ดังแสดงในรูป ซึ่งเหมือนกับในกรณีของรอยสัมผัสพี-เอ็น ขนาดความกว้าง  $W$  ของบริเวณปลอดพาหะนี้ อาจคำนวณได้จากสมการความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยสัมผัสพี-เอ็นตามสมการที่ (2.5) และสามารถใช้กรณีของรอยสัมผัสแบบ  $p^+ - n$  มาพิจารณาได้โดยพิจารณาว่าประจุลบที่สะสมอยู่ในด้านโลหะ จะมีลักษณะเป็นแผ่นประจุ (Sheet of charge) หรือคล้ายกับว่า  $X_p \ll X_n$  ( $X_p, X_n$  คือความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านพีและด้านเอ็นตามลำดับ) นอกจากนี้ คุณสมบัติความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสหาได้จากสมการที่ (2.6)

$$W = \left[ \frac{2\epsilon V_{bi}}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

$W$  คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ,  $N_D$  คือ อะตอมผู้ให้,  $N_A$  คือ อะตอมผู้รับ,  $V_{bi}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ,  $\epsilon$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ ซึ่ง  $\epsilon = K\epsilon_0$  และ  $q$  คือ ประจุพาหะ

$$C_j = \frac{\epsilon}{W} A \quad \text{ฟารัด} \quad (2.6)$$

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสอง จะปรับอยู่ในระดับเดียวกันโดยตลอด การงอโค้งของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ มีความหมายว่ามีศักย์สัมผัส (Contact potential :  $V_{bi}$ ) หรือกำแพงศักย์ (Potential Barrier) เกิดขึ้น ในด้านสารกึ่งตัวนำและ

ทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ให้เข้าไปในด้านโลหะ การงอโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะมีผลทำให้เกิดการงอโค้งของระดับสูญญากาศในด้านสารกึ่งตัวนำด้วย เนื่องจากค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี  $q\chi$  ต้องมีค่าคงที่ การงอโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามากที่สุด ที่ตำแหน่งผิวสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่จุดนี้จะมีค่ามากที่สุด ขณะที่รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุล กระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ และจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเท่ากัน กระแสสุทธิที่ผ่านรอยสัมผัสจึงมีค่าเป็นศูนย์ ศักย์สัมผัสหรือแรงดันภายในรอยสัมผัส  $V_{bi}$  ซึ่งเป็นกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น กำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านสารกึ่งตัวนำคือ

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \quad (2.7)$$

นอกจากนี้ จะเห็นว่า ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้าน โลหะซึ่งจะเคลื่อนที่ไปด้านสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับ  $q(\phi_M - \chi)$  เราเรียกกำแพงนี้ว่า กำแพงพลังงานศักย์ที่ผิว (surface potential energy barrier) หรือ “กำแพงช็อตต์คีย์” หรือ “ช็อตต์คีย์แบริเออร์” (Schottky barrier) และเขียนแทนด้วย  $q\phi_B$  ดังนั้น กำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้าน โลหะคือ

$$q\phi_B = q(\phi_M - \chi) \quad (2.8)$$

รอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ ค่าของกำแพงช็อตต์คีย์  $q\phi_B$  ค่าต่างๆกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งพิจารณาว่าเป็นกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนในโลหะที่มีพลังงานระดับเฟอร์มิ ที่พยายามจะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ

SCHOTTKY METAL	<i>n</i> Si	<i>p</i> Si	<i>n</i> GaAs
Aluminum, Al	0.7	0.8	
Titanium, Ti	0.5	0.61	
Tungsten, W	0.67		
Gold, Au	0.79	0.25	0.9
Silver, Ag			0.88
Platinum, Pt			0.86
PtSi	0.85	0.2	
NiSi <sub>2</sub>	0.7	0.45	

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความสูงของกำแพงชอตต์คีย์  $\phi_B$  ที่วัดได้ จากรอยสัมผัสโลหะชนิดต่างๆกับสารกึ่งตัวนำ ทั้งซิลิคอนและแกเลียมอาเซนายด์ (ปกติค่าสูงกว่าทฤษฎี)

จากสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกำแพงศักย์ด้านสารกึ่งตัวนำ  $V_{bi}$  และกำแพงชอตต์คีย์  $\phi_B$  ได้ดังนี้

$$V_{bi} = \phi_B - \phi_D \quad (2.9)$$

โดยที่

$$\phi_D = (E_C - E_{FS})/q \quad (2.10)$$

ดังนั้น สมการที่เขียนใหม่ได้ว่า

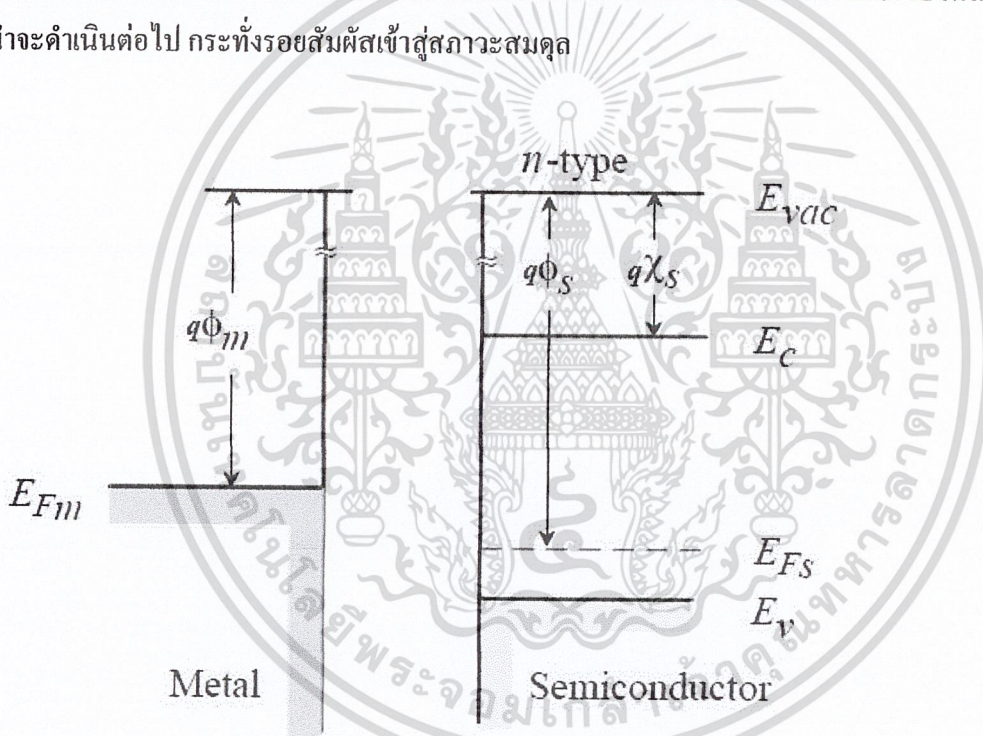
$$qV_{bi} = q\phi_B - (E_C - E_{FS}) \quad (2.11)$$

และจากสมการที่ (2.11) จะเห็นว่ากำแพงศักย์ในสารกึ่งตัวนำ มีค่าน้อยกว่ากำแพงชอตต์คีย์ หรือ ก็คือ

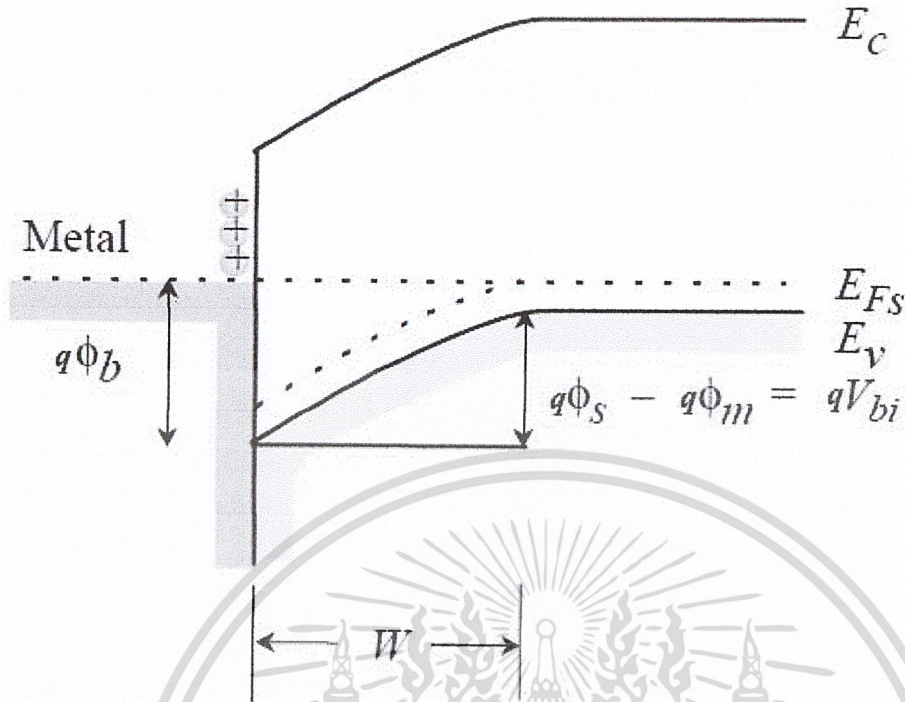
$$V_{bi} < \phi_B$$

### 2.4.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำกรณีที่พักซ์งาน $\phi_M$ มีค่าน้อยกว่า $\phi_S$ ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ในภาวะก่อนสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำกรณีนี้ ลักษณะของแถบพลังงานในทางอุดมคติ แสดงได้ดังในรูปที่ เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำ ที่  $\phi_M < \phi_S$  มาสัมผัสกัน เนื่องจากเมื่อก่อนสัมผัส ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ  $E_{FM}$  จะอยู่ที่ระดับสูงกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ  $E_{FS}$  ดังนั้นเมื่อสารทั้งสองสัมผัสกันแล้ว จะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุพาหะผ่านรอยสัมผัสนี้ โดยที่อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งให้เกิดไอออนบวกขึ้นทางด้านโลหะ และมีอิเล็กตรอนมาสะสมอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ผลของประจุไฟฟ้าดังกล่าวจึงเกิดมีสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่รอยสัมผัส สนามไฟฟ้านี้จะมีทิศทางจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะ และการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะดำเนินต่อไป กระทั่งรอยสัมผัสเข้าสู่สภาวะสมดุล



(ก.) ก่อนการสัมผัส



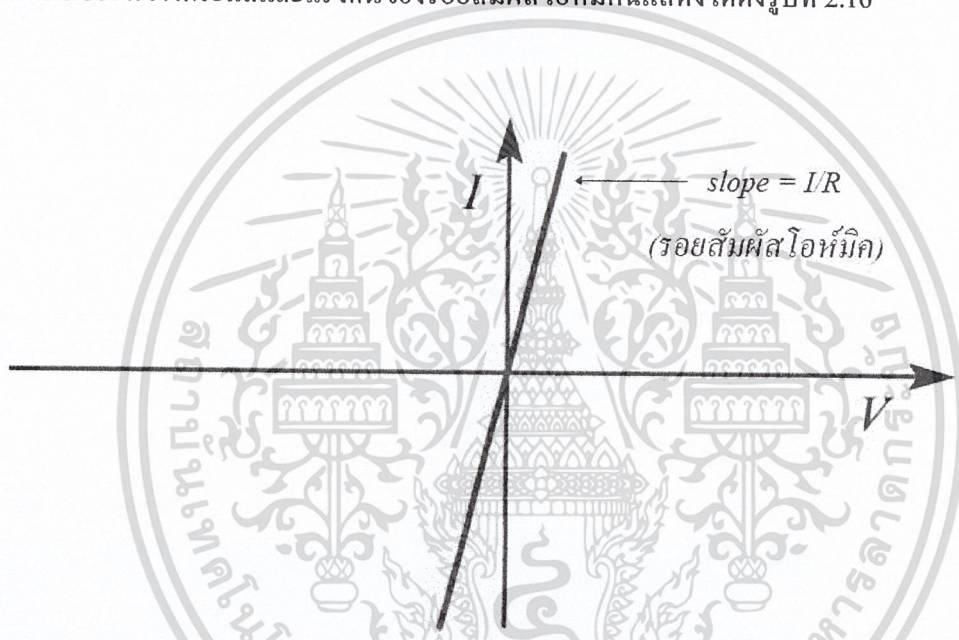
(ข.) ภายหลังการสัมผัสที่สภาวะสมดุล

รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็นในอุดมคติ โดย  $\phi_M < \phi_S$  ในขณะ (ก.) ก่อนการสัมผัส และ (ข.) ภายหลังการสัมผัสที่สภาวะ สมดุล

โดยกระแสสุทธิของรอยสัมผัสมีค่าเป็นศูนย์ และขณะที่ระดับเฟอร์มีของสารทั้งสองจะมาอยู่ที่ ระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยสัมผัส

การที่อิเล็กตรอนมาสะสมอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเช่นนี้ จะไม่มี บริเวณปลดพาหะเกิดขึ้น แต่จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบริเวณนี้ มีค่ามากกว่าความ หนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น จึงเกิดการงอ โค้งของแถบพลังงานด้าน สารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสกับโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข.) และมีแรงดันตกคร่อมสารกึ่ง ตัวนำบริเวณรอยสัมผัส เท่ากับ  $(\phi_M - \phi_S)$  ลักษณะเช่นนี้ไม่มีกำแพงศักย์สำหรับอิเล็กตรอนจาก ด้านทั้งสอง กล่าวคือที่บริเวณรอยสัมผัส ไม่มีกำแพงศักย์ที่จะป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ หรือจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ รอยสัมผัสเช่นนี้ถูก เรียกว่า “รอยสัมผัสโอห์มิก” (Ohmic contact) เราจะสังเกตเห็นได้ว่า รอยสัมผัสนี้มีลักษณะที่ แตกต่างจากกรณีที่แล้ว ทั้งๆที่เป็นรอยสัมผัสของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเช่นเดียวกัน นั่นคือ กรณีนี้ไม่มีกำแพงศักย์ที่รอยสัมผัส ไม่มีประจุบวกสะสมอยู่ที่ด้านเอ็น แต่กลับมีอิเล็กตรอนอิสระ มาสะสมแทน และแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยสัมผัส มีลักษณะงอ โค้งลง ดังนั้น

เมื่อรอยสัมผัสนี้ถูกนำไปให้แรงดันไบอัส  $V_A$  โดยด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ หรือ  $V_A > 0$  เพียงเล็กน้อย จะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากจากด้านสารกึ่งตัวนำไหลไปยังด้านโลหะ จึงทำให้เกิดมีกระแสจำนวนมากไหลผ่านรอยสัมผัสจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ และเมื่อให้ไบอัสในลักษณะตรงข้าม คือด้านโลหะมีศักย์เป็นลบ จะพบว่า อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลผ่านรอยสัมผัสโดยข้ามกำแพงศักย์ค่าน้อย เข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ แต่กำแพงศักย์นี้จะหมดไปทันที เมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพียงไม่ถึงหนึ่งโวลต์ จึงทำให้มีอิเล็กตรอนจำนวนมากไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ กระแสทั้งสองกรณีนี้จะไม่อ้อมตัว แต่จะแปรตามแรงดันไบอัส ตามกฎของโอห์ม กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสโอห์มิกนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) หรือ Non rectifying

ซึ่งจะเห็นว่า มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยสัมผัสได้ทั้งสองทิศทาง คือจากโลหะไปสารกึ่งตัวนำ และจากสารกึ่งตัวนำไปโลหะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางการให้ไบอัสแก่รอยสัมผัส รอยสัมผัสเช่นนี้จึงไม่ใช่รอยสัมผัสเรกติไฟร์ หรือเรียกว่า non-rectifying และเรานิยมเรียกรอยสัมผัสนี้ว่า “รอยสัมผัสโอห์มิก” (Ohmic contact) รอยสัมผัสโอห์มิกนี้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเป็นขั้วสัมผัสของส่วนต่างๆ ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อการต่อเชื่อมภายใน (Interconnection) ระหว่างอุปกรณ์ของวงจรรวม หรือเพื่อต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ

เงื่อนไข	สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	สารกึ่งตัวนำชนิดพี
$\phi_M > \phi_S$	รอยสัมผัสเรกติไฟร์	รอยสัมผัสโอห์มิก
$\phi_M < \phi_S$	รอยสัมผัสโอห์มิก	รอยสัมผัสเรกติไฟร์

ตารางที่ 2.3 แสดงสรุปคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำในทางอุดมคติ

#### 2.4.4 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในทางปฏิบัติ

ในกรณีรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำในทางอุดมคติ จากการวิเคราะห์ เราสามารถสรุปได้ว่า รอยสัมผัสจะมีคุณสมบัติเป็นแบบ เรกติไฟร์ หรือแบบ โอห์มิก จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ และค่าเปรียบเทียบของฟังก์ชันงานระหว่างสารทั้งสองดังในตารางที่

อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติ ข้อกำหนดดังกล่าวอาจใช้ไม่ได้ เพราะไม่สามารถสร้างรอยสัมผัสในอุดมคติอย่างแท้จริงได้ แม้จะใช้กระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงก็ตาม เนื่องจาก มีความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสเกิดขึ้น เช่นกรณีของโลหะและซิลิคอนจะพบว่า บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารทั้งสองจะมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บางๆราว 5 อังสตรอมถึง 25 อังสตรอมกันอยู่เสมอ เนื่องจากผิวซิลิคอนสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย จึงเกิดเป็นชั้นออกไซด์ดังกล่าว นอกจากนี้แล้วมันจะมีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆหรือประจุไฟฟ้าใดๆปรากฏที่บริเวณรอยสัมผัสไม่มากนักก็อาจสาเหตุดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดมีระดับพลังงานปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน (Energy gap) บริเวณผิวสัมผัส ระดับพลังงานนี้ถูกเรียกว่า “สถานะผิว” (Surface states) ระดับพลังงานนี้จะมีคุณสมบัติและทำหน้าที่เป็น ระดับจับอิเล็กตรอน (Electron trapped) หรือ ระดับจับโฮล (Hole trapped) หรือเป็น ศูนย์กลางการรวมตัว (Recombination center) ผลของสถานะผิว จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสแตกต่างไปจากกรณีอุดมคติ ผลจากการวิเคราะห์จึงอาจใช้ไม่ได้ เช่นการคำนวณขนาดความสูงของกำแพงข้อต่อที่อาจผิดพลาด จำเป็นต้องใช้วิธีการวัดจากโดโดจริง ถ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีสถานะผิวซึ่งมีคุณสมบัติเป็นระดับจับอิเล็กตรอน ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบริเวณผิวสัมผัสจะมีค่าลดลงน้อยกว่าเดิม และขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสถานะผิว ทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปจากที่คาดไว้ และยิ่งถ้าสถานะผิวมีปริมาณสูงมากอาจทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสมีลักษณะตรงข้ามจากที่คาดไว้ได้ ในทางปฏิบัติ ความหนาแน่นของสถานะผิวจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ในการกำหนดคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ความแม่นยำในการควบคุมความหนาแน่นสถานะผิว จะทำให้สามารถกำหนดคุณสมบัติของรอยสัมผัสได้อย่างถูกต้อง

กรณีรอยสัมผัสโอห์มิกในทางปฏิบัติ จากตารางที่ จะพบว่า รอยสัมผัสโอห์มิกจะเกิดขึ้นได้กับรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อ  $\phi_M < \phi_S$  หรือ เกิดขึ้นกับรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อ  $\phi_M > \phi_S$  แต่รอยสัมผัสจริงที่สร้างขึ้นจะมีเงื่อนไขแตกต่าง

จากกรณีอุดมคติ เช่น มีผลของสถานะผิว และผลของประจุไฟฟ้าอื่นๆ ดังนั้น จึงทำให้รอยสัมผัสที่สร้างขึ้นซึ่งมีเงื่อนไขเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก กลับมีคุณสมบัติกลายเป็น รอยสัมผัสเรกติไฟร์ได้

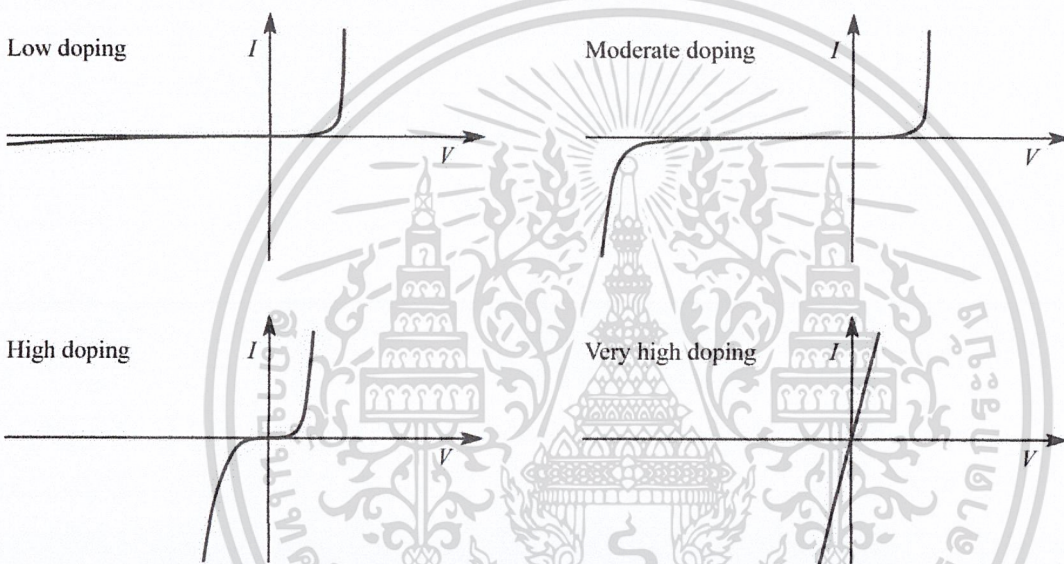
ปกติในทางปฏิบัติ การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิก ทำได้โดยการทำให้ส่วนของสารตั้งตัวนำที่จะสัมผัสกับโลหะ ต้องมีความเข้มข้นของสารเจือสูง เช่น รอยสัมผัสโอห์มิกระหว่างโลหะกับซิลิคอนสามารถทำได้จากโครงสร้างของโลหะ  $n^+ - n_{\text{silicon}}$  ดังแสดงในรูปที่ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยสัมผัสจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเจือด้านสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น และกรณีของชั้น  $n^+$  ซึ่งมีความหนาแน่นของสารเจือสูงมากจะทำให้บริเวณปลอดพาหะมีขนาดแคบมาก กระทั่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ “การทะลุโมงค์” (Tunneling) ของพาหะ ผ่านกำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสของสารทั้งสอง ซึ่งกรณีนี้อิเล็กตรอนจากด้านทั้งสองสามารถเคลื่อนที่ทะลุโมงค์กำแพงศักย์ไป-มา ได้ทั้งสองทิศทางไม่ว่าจะได้รับไบอัสแบบใดก็ตาม รอยสัมผัสนี้จึงแสดงคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกในทางปฏิบัติ

นอกจากนี้ รอยสัมผัสโอห์มิกที่ดีจะต้องมีความต้านทานต่ำ จากที่กล่าวมาแล้วว่าผิวของซิลิคอนมักจะสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางๆปกคลุมอยู่ชั้นของโลหะและสารกึ่งตัวนำจึงถูกแยกด้วยฉนวนออกไซด์ ทำให้รอยสัมผัสโอห์มิกมีค่าความต้านทานสูงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว หลังการสร้างชั้นโลหะบนผิวซิลิคอนที่มีความเข้มข้นสูงบริเวณที่จะเป็นรอยสัมผัสแล้ว รอยสัมผัสนี้จะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าหนึ่ง เพื่อให้อะตอมของโลหะสามารถแพร่ผ่านชั้นออกไซด์บางและเข้าไปในชั้นของสารกึ่งตัวนำได้ จะทำให้ได้รอยสัมผัสโอห์มิกที่ดี มีค่าความต้านทานต่ำ วิธีเช่นนี้ถูกเรียกว่า “การแอนนัล” (Annealing) สำหรับกรณีของอะลูมิเนียมกับซิลิคอน อุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลอยู่ระหว่าง 475-500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ในโตรเจน เป็นเวลาราว 5-10 นาที ระหว่างการแอนนัล จะทำให้อะตอมของอะลูมิเนียมแพร่ผ่านชั้นออกไซด์บาง เข้าไปในเนื้อซิลิคอน ทำให้ได้รอยสัมผัสที่สมบูรณ์ และมีค่าความต้านทานสัมผัสต่ำ (Low contact resistance) ถือว่าเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกที่ดี

อย่างไรก็ดี หากได้รอยสัมผัสนี้มีรอยสัมผัสพี-เอ็นแบบตื้นๆ (Shallowed p-n junction) ของ  $p^+ - n$  หรือ  $n^+ - p$  ดังแสดงในรูปที่ เมื่อมีการแอนนัล อะตอมของอะลูมิเนียมที่แพร่ลึกเข้าไปในส่วน  $p^+$  หรือ  $n^+$  มักจะไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดมีส่วนลึกตื้นไม่เท่ากัน เกิดเป็นปลายแหลมเล็ก หรือที่เรียกว่า “สไปค์” (Spiking) ซึ่งส่วนที่เป็นสไปค์ อาจลึกลงไปถึงบริเวณรอยสัมผัสพี-เอ็นที่มีขนาดตื้นๆ เหล่านี้ได้ กรณีเช่นนี้รอยสัมผัสจะเสียหายเพราะถูกลัดวงจร และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติเรกติไฟร์ได้

การป้องกันการเกิดอะลูมิเนียมสไปค์ ทำได้โดยการเติมอะตอมสารเจือของซิลิคอนลงไป ในอะลูมิเนียม ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้อะลูมิเนียมอิมิตัวด้วยซิลิคอน แล้วจึงแพร่ลงไปชั้นซิลิคอนน้อย ปัญหาการเกิดสไปค์จึงลดลง สำหรับการสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกบนรอยต่อพี-เอ็นแบบตื้น ของวงจรรวมสมัยใหม่ (Modern Integrated Circuits) เช่น ในชิพของวงจรรวมประเภท VLSI

(Very Large Scale Integration) ต้องใช้เทคนิคพิเศษเพื่อป้องกันการเกิดสไปค์ และทำให้ได้รอยสัมผัสโอห์มิกที่ดีที่มีความต้านทานสัมผัสต่ำ เทคนิคดังกล่าวถูกเรียกว่า “**Silicide multilayer ohmic contacts**” ดังแสดงในรูปที่ โดยมีชั้นของสารประกอบโลหะที่เหมือนซิลิคอนหรือที่เรียกว่า “ซิลิไซด์” (Silicide) เช่น  $TiSi_2$ ,  $PtSi$  เป็นชั้นที่ช่วยกำจัดจุดบกพร่อง (defect) และอะตอมแปลกปลอมบริเวณผิวสัมผัส ทำให้รอยสัมผัสสะอาด จึงมีค่าความต้านทานต่ำ และมีชั้นของโลหะอื่นเช่น ทังสแตน หรือ ไททาเนียมทังสแตน ( $TiW$ ) เป็นชั้น Barrier layer ช่วยป้องกันการเกิดสไปค์ของโลหะอะลูมิเนียม รอยสัมผัสแบบนี้จึงสมบูรณ์และมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูงได้ดี

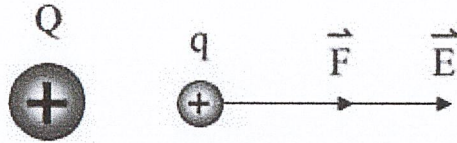


รูปที่ 2.17 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสเมื่อทำการเติมสารเจือ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

## 2.5 ทฤษฎีสานาไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

### 2.5.1 ทฤษฎีสานาไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า หมายถึง “บริเวณ โดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึง” หรือ “บริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้านั้น” ตามจุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้า ย่อมมีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้า จะมีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไป นอกจากนั้น ณ จุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้า ย่อมจะปรากฏศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่างๆ กันด้วย ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าชนิดเดียวกันกับศักย์ไฟฟ้าอันเกิดจากประจุไฟฟ้าที่เป็นเจ้าของสนามไฟฟ้า จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีศักย์สูงกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป



รูปที่ 2.18 สนามไฟฟ้ามีทิศเดียวกับทิศของแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุบวก

### เส้นแรงไฟฟ้า (Line of electric force)

เรากำหนด เพื่อความสะดวกในการศึกษาไม่มีปรากฏอยู่จริงๆ โดยกำหนดเป็นหลักให้เข้าใจตรงกันว่า เมื่อวางประจุไฟฟ้าบวกอิสระลงในสนามไฟฟ้า ถ้าประจุไฟฟ้าบวกอิสระนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ แนวทางที่ประจุไฟฟ้าบวกอิสระนี้จะเคลื่อนที่ไป กำหนดว่าเป็นเส้นแรงไฟฟ้าและทิศทางของเส้นสัมผัส ซึ่งสัมผัสเส้นแรงไฟฟ้าที่จุดใดๆ ก็คือทิศทางของสนามไฟฟ้า ณ จุดนั้น



รูปที่ 2.19 สนามไฟฟ้าและเส้นแรงไฟฟ้าเนื่องจากจุดประจุอิสระ

ในการเขียนเส้นแรงไฟฟ้า ให้ถือเกณฑ์ว่า เส้นแรงไฟฟ้าพุ่งออกจากประจุไฟฟ้าบวก เข้าสู่ประจุไฟฟ้าลบ ให้หัวลูกศรออกประจุไฟฟ้าบวก และหัวลูกศรเข้าสู่ประจุไฟฟ้าลบ

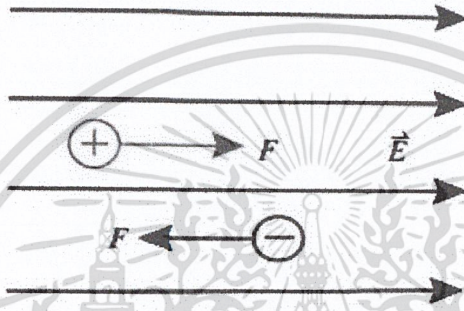
### คุณสมบัติของเส้นแรงไฟฟ้า

คุณสมบัติของเส้นแรงไฟฟ้าที่ควรทราบ คือ

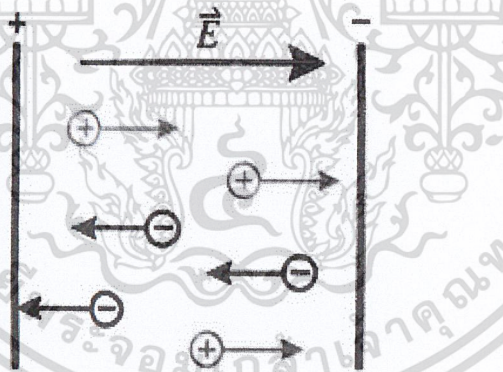
1. เส้นแรงไฟฟ้าพุ่งออกจากประจุไฟฟ้าบวก และพุ่งเข้าสู่ประจุไฟฟ้าลบ
2. เส้นแรงไฟฟ้าแต่ละเส้นจะไม่ตัดกันเลย
3. เส้นแรงไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกัน ไม่เสริมเป็นแนวเดียวกัน แต่จะเบนแยกจากกันเป็นแต่ละแนว ส่วนเส้นแรงไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน จะเสริมเป็นแนวเดียวกัน
4. เส้นแรงไฟฟ้าที่พุ่งออกจากกันหรือพุ่งเข้าสู่ผิวของวัตถุยอมตั้งได้มากกับผิวของวัตถุนั้นๆ เสมอ

5. เส้นแรงไฟฟ้า จะไม่พุ่งผ่านวัตถุตัวนำเลย เส้นแรงไฟฟ้าจะสิ้นสุดอยู่เพียงบริเวณผิวของวัตถุตัวนำเท่านั้น

6. สำหรับวัตถุตัวนำรูปทรงกลมกลวงที่มีประจุไฟฟ้า และไม่มีวัตถุอื่นที่มีประจุไฟฟ้าบรรจุอยู่ภายในทรงกลมกลวงนั้น จะไม่มีเส้นแรงไฟฟ้า อยู่ในในทรงกลมกลวงนั้นเลยเส้นแรงไฟฟ้าจะมีปรากฏสิ้นสุดอยู่เพียงผิวนอกของทรงกลมกลวงเท่านั้น โดยเส้นแรงไฟฟ้าจะมีแนวเข้าสู่จุดศูนย์กลางของทรงกลมกลวง และในกรณีนี้ภายในทรงกลมกลวง จะไม่มีสนามไฟฟ้า ไม่มีแรงกระทำไฟฟ้า กล่าวได้ว่าค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์



(ก.) แรงกระทำต่อประจุในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ



(ข.) การเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

รูปที่ 2.20 แรงกระทำกับประจุและการเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้า

ความแรงของสนาม หมายถึง “ขนาดของแรงที่เกิดขึ้นบนประจุ +1 coulomb ที่เอาไปวางทดสอบ”

จาก

$$F = KQ_1Q_2/r^2 \quad (2.12)$$

ถ้าประจุ  $Q_1, Q_2$  ตัวใดตัวหนึ่ง เป็น 1 coulomb จะได้ว่า

$$E = KQ/r^2 \quad (2.13)$$

เมื่อ  $E$  = ความแรงสนามไฟฟ้า หน่วย N/C  
 $Q$  = ประจุแหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดสนาม หน่วย Coulomb  
 $r$  = ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงจุดที่ต้องการทราบค่าสนาม หน่วยเป็นเมตร

นิยามสนามไฟฟ้า เป็นแรงต่อประจุ 1 Coulomb

$E$  = แรง ( $F$ ) / ประจุ ( $Q$ ) และ  $E = F/Q$  จะได้

$$E = Q/E \quad (2.14)$$

สรุป การหาความเข้มของสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ

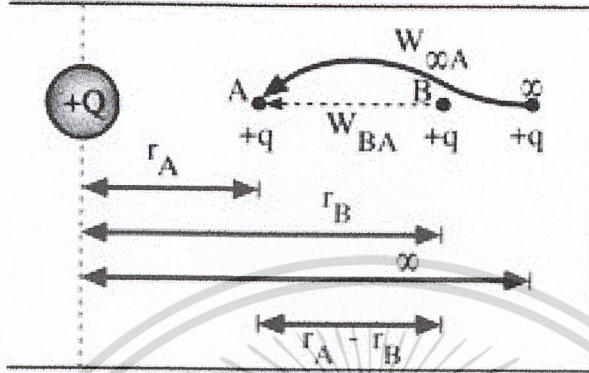
- (1) เขียนรูป แสดงตำแหน่งประจุเข้าของสนาม
- (2) นำประจุ +1 คูลอมบ์ ไปวางไว้ ณ จุดที่จะหาความเข้มของสนามไฟฟ้า
- (3) เขียนทิศทางของแรงที่กระทำต่อประจุ +1 คูลอมบ์ ณ จุดนั้นด้วย
- (4) หาความเข้มของสนามไฟฟ้า จากสูตร  $E = KQ/r^2$

ข้อสังเกต

1. ถ้านำประจุบวกไปวางในสนามไฟฟ้า ความเข้มของสนามไฟฟ้ากับ แรงบนประจุไฟฟ้าจะมีทิศเดียวกัน
2. ถ้านำประจุลบไปวางในสนามไฟฟ้า ความเข้มของสนามไฟฟ้ากับแรงบนประจุไฟฟ้าจะมีทิศตรงกันข้าม

ศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential)

ศักย์ไฟฟ้า คือ ขนาดของงานที่สูญเสียไปในการเคลื่อน 1 หน่วยประจุจากระยะอนันต์ (Infinity) มาจนถึงจุดนั้น



รูปที่ 2.21 การหาค่าศักย์ไฟฟ้า

จากนิยามความต่างศักย์

$$v_{AB} = (v_A - v_B) = \frac{W_{BA}}{q} \tag{2.15}$$

จากกฎของคูลอมบ์ จะได้ว่า

$$F_A = \frac{KQq}{r_A^2}, F_B = \frac{KQq}{r_B^2} \tag{2.16}$$

และ

$$F_{average} = \sqrt{F_A \cdot F_B} \tag{2.17}$$

ดังนั้น

$$F_{average} = \sqrt{\frac{KQq}{r_A^2} \cdot \frac{KQq}{r_B^2}} = \frac{KQq}{r_A r_B} \tag{2.18}$$

แต่งาน = แรงเฉลี่ย × ระยะทาง ดังนั้น

$$w_{BA} = \frac{KQq}{r_A r_B} (r_B - r_A) \tag{2.19}$$

จากสมการที่ (2.19) จะได้ว่า

$$v_{AB} = (v_A - v_B) = \frac{w_{BA}}{q} = KQ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (2.20)$$

$$v_A = \frac{w_{\infty A}}{q} = \frac{KQ}{r_A}, \quad v_B = \frac{w_{\infty B}}{q} = \frac{KQ}{r_B} \quad (2.21)$$

ดังนั้น

$$v = \frac{KQ}{r} \quad (2.22)$$

- ในที่นี้
- $Q$  คือ ประจุต้นเหตุ (หรือประจุเจ้าของสนามไฟฟ้า) (คูลอมบ์)
  - $q$  คือ ประจุทดสอบ (หรือประจุที่นำไปวางในสนามไฟฟ้า) (คูลอมบ์)
  - $K$  คือ ค่าคงที่ (ในอากาศหรือสุญญากาศ  $K = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ )
  - $r_A, r_B$  คือ ระยะที่วัดจากศูนย์กลางของประจุต้นเหตุถึงจุด A และจุด B ตามลำดับ
  - $w$  คือ งานที่สูญเสียไปในการเคลื่อนประจุทดสอบในระหว่าง 2 จุดใดๆ
  - $v_A, v_B$  คือ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด A และ B ตามลำดับ (จูล/คูลอมบ์ หรือ โวลต์)
  - $v_{AB}$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับจุด B (จูล/คูลอมบ์ หรือ โวลต์)

ข้อควรทราบเกี่ยวกับศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

1. ถ้าประจุต้นเหตุ  $Q$  เป็นประจุนิรนาบ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้  $Q$  จะมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ไกลกว่าเสมอ
2. ถ้าประจุต้นเหตุ  $Q$  เป็นประจุนิลบ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้  $Q$  จะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจุดที่อยู่ไกลกว่าเสมอ
3. โดยทั่วไปแล้วความต่างศักย์ระหว่าง 2 จุดใดๆ เป็นบวกลบเสมอ (คือเอาศักย์สูง ลบศักย์ต่ำ) แต่บางครั้งจะเป็นค่าติดลบก็ได้ (เพราะเอาศักย์ต่ำลบศักย์สูง) ดังนั้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจึงต้องระบุเครื่องหมายว่าเป็นบวก หรือ ลบ ไว้ด้วย
4. สำหรับศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดๆ นั้น อาจเป็นได้ทั้งศักย์บวกและลบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประจุต้นเหตุ  $Q$  เป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าเป็นบวก  $+Q$  ศักย์จะเป็น บวก และ  $-Q$  ศักย์จะเป็นลบ ดังนั้น ในการใช้สูตร  $V = kQ/r$  นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใส่เครื่องหมาย  $\pm$  บ่งบอกชนิดของประจุ  $Q$  เอาไว้ด้วย
5. ตำแหน่งที่ถือว่ามีความศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ มี 2 ตำแหน่ง คือ
  - จุดที่อยู่ไกลจากประจุต้นเหตุมากๆ (ระยะอนันต์)
  - จุดต่างๆ บนพื้นโลก (หรือจุดที่ต่างๆ ที่ต่อลงดินนั่นเอง)

6. เส้นที่ลากต่อเชื่อมจุดต่างๆ ในสนามไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน เราเรียกว่า เส้นสมศักย์ (Equipotential Line)

### ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดใดๆ

ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดใดๆ หมายถึง “งานต่อหนึ่งหน่วยประจุ ในการเคลื่อนประจุระหว่างจุดทั้งสอง”

ถ้า  $q$  เป็นประจุบวก จะพบว่า

$W$ เป็น +	เมื่อศักย์ที่ B สูงกว่าที่ A (ได้งาน)
$W$ เป็น -	เมื่อศักย์ที่ B ต่ำกว่าที่ A (ได้งาน)
$W$ เป็นศูนย์	เมื่อศักย์ที่ B เท่ากับศักย์ที่ A (ไม่มีงาน)

$$v = \frac{w}{q} \quad (2.23)$$

$$w = qv \quad (2.24)$$

$W$  = พลังงาน ในการเคลื่อนที่ประจุหน่วย Joule

$q$  = ประจุไฟฟ้าหน่วย coulomb

$V$  = ความต่างศักย์ระหว่าง 2 จุดหน่วย (J/C หรือ Volt)

### 2.5.2 ทฤษฎีสสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กเป็นบริเวณรอบๆ แท่งแม่เหล็ก ซึ่งมีแรงแม่เหล็กกระทำต่อวัตถุ ความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กแสดงโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

#### เส้นแรงแม่เหล็ก หรือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic field lines or flux lines)

เป็นเส้นที่แสดงทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก นอกจากนั้นยังแสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วย ทิศของสนามคือ ทิศของแรงนี้กระทำกับขั้วเหนือ ในสนามแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กแสดงให้เห็นได้โดยใช้ผงเหล็กโรยรอบๆ แท่งแม่เหล็ก หรือการระบุตำแหน่งของเข็มทิศ เล็กๆ ณ จุดต่างๆ รอบๆ แท่งแม่เหล็ก

#### ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)

เป็นการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดๆหนึ่ง แสดงได้โดย เส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ชิดกัน โดยปกติความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากรอบๆขั้ว

### จุดเป็นกลาง(Neutral point)

เป็นจุดที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์ เกิดจากมีสนามแม่เหล็ก 2 สนามหรือมากกว่า มีปฏิริยาต่อกันและกันด้วยอำนาจที่เท่ากัน แต่ทิศตรงกันข้าม แม่เหล็กที่แขวนตามเมริเดียนแม่เหล็ก โดยที่ขั้วได้ ซึ่งทิศเหนือจะมีจุดสะเทิน 2 จุด ในแนวแกนแม่เหล็ก

### ไดอะแมกเนติซึม(Diamagnetism)

เป็นสภาวะแม่เหล็กของสารเมื่อวางไว้ในสนามแม่เหล็กความเข้มสูง ชั้นวัตถุชนิดนี้มีแนวโน้มจะขยายเส้นแม่เหล็กให้ห่างออกไปและตัวมันเองจะวางตัวตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้มีสาเหตุมาจากการที่อิเล็กตรอนถูกรบกวน

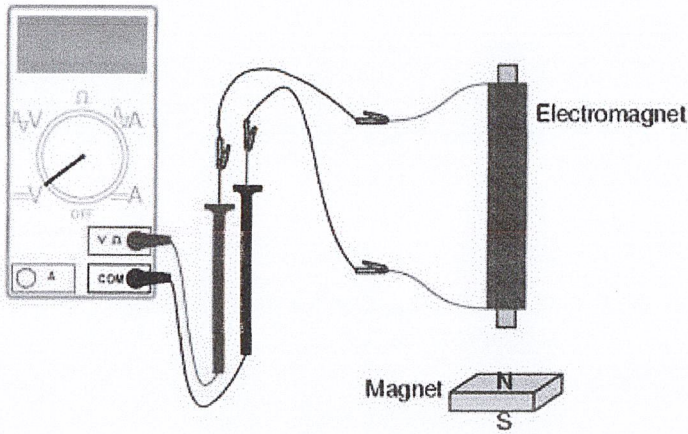
### พาราแมกเนติซึม(Paramagnetism)

เป็นสภาวะแม่เหล็กของสารเมื่อวางไว้ในสนามแม่เหล็กความเข้มสูง ชั้นวัตถุชนิดนี้จะมีแนวโน้มทำให้เส้นแม่เหล็กเข้าใกล้กัน และตัวมันเองจะวางตัวตามแนวขนานกับเส้นแรงแม่เหล็ก มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของไดโพล

### 2.5.3 ทฤษฎีสานแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field)

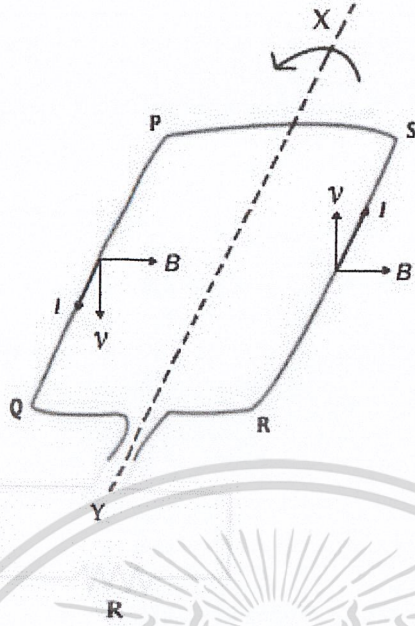
เมื่อต้องการทราบว่า ฟลักซ์แม่เหล็กทำให้มีกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำได้หรือไม่ จะพบว่า เข็มของแอมมิเตอร์เบนไปจากตำแหน่งเดิม แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในขดลวดทองแดง ในทางกลับกัน ถ้าให้ขดลวดทองแดงอยู่กับที่ แต่เคลื่อนที่แม่เหล็กไป-มา ให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดทองแดงเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าผ่านแอมมิเตอร์ได้เช่นกัน นั่นคือ มีกระแสไฟฟ้าในขดลวดทองแดง

กระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง เรียกการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลักษณะนี้ว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction) และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced current)



รูปที่ 2.22 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำ

เมื่อเคลื่อนเส้นลวดตัวนำในสนามแม่เหล็ก เส้นลวดตัวนำ PQ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ดังนั้น จะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระในเส้นลวดตัวนำในทิศตั้งฉากกับระนาบของ  $\vec{v}$  และ  $\vec{B}$  ซึ่งจะอยู่ในแนวเส้นลวด PQ มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างปลาย PQ หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ปลายทั้งสองของเส้นลวดตัวนำมีความต่างศักย์  $V_{PQ}$  ดังนั้น ถ้าต่อเส้นลวดตัวนำนี้ให้ครบวงจร ก็จะมีกระแสไฟฟ้าในวงจร แสดงว่า ปลายทั้งสองของเส้นลวดตัวนำทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced electromotive force) จากที่กล่าวมาแล้ว เป็นการใช้เส้นลวดตัวนำตรงเคลื่อนที่ตัดฟลักซ์แม่เหล็ก ถ้าให้ขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก หมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็กจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.23 ขดลวดตัวนำหมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็ก

ให้ขดลวด PQRS หมุนรอบแกน XY ในทิศทางเข็มนาฬิกา เมื่อพิจารณาขดลวดตัวนำ ส่วน PQ และ RS จะเห็นว่า ลวด PQ และ RS เคลื่อนที่ตัดฟลักซ์แม่เหล็ก ในทิศลงและขึ้น ดังนั้น จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ I โดยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีทิศจาก P ไป Q และจาก R ไป S พร้อมกัน เมื่อนำขดลวดตัวนำต่อกับแอมมิเตอร์ที่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าค่าน้อยๆ ได้ และนำขดลวดนี้เคลื่อนที่เข้าไปใกล้หรือออกจากแท่งแม่เหล็ก จะพบว่า ขณะที่ขดลวดตัวนำเคลื่อนที่นั้น จะมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากการเบนของเข็มชี้ของแอมมิเตอร์ แต่ขณะที่ขดลวดตัวนำอยู่นิ่ง จะไม่มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นผลที่ได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กผ่านที่ขดลวดตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวดตัวนำ ซึ่งเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำนั้น

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง และสรุปได้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดนั้น เมื่อเทียบกับเวลา ข้อความนี้เรียกว่า กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction) เรียกสั้นๆ ว่า กฎของฟาราเดย์ ซึ่งเป็นกฎพื้นฐานของไฟฟ้าและแม่เหล็ก

พิจารณาระนาบของขดลวดอยู่ในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก ในตอนแรกไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กผ่านขดลวด เมื่อขดลวดหมุนจากตำแหน่งเริ่มต้น ระนาบของขดลวดจะทำมุมต่างๆ กับสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงสุดเมื่อระนาบของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก สรุปคือ ในช่วงการหมุนของขดลวดที่ระนาบขดลวดหมุนกวาดมุมไป 90 องศา จากตำแหน่งเริ่มต้นนี้ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขดลวด ต่อไปจะศึกษาว่า ถ้าขดลวดอยู่กับที่และฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลง จะมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นหรือไม่ และกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับทิศทางการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กอย่างไร

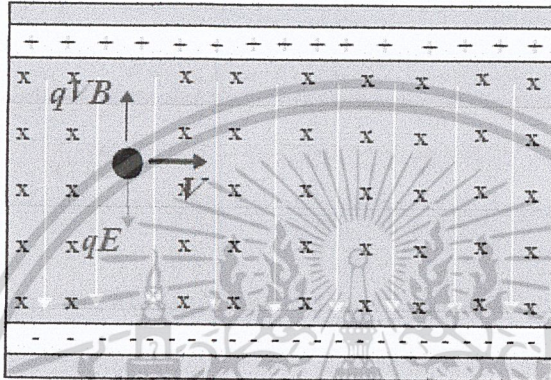
การหาทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ หาได้จากกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ซึ่งมีใจความว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทิศที่จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ขึ้นมาต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวดนั้น



รูปที่ 2.24 ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้กฎของเลนซ์

## 2.6 แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)

ถ้าให้ประจุ  $q$  เคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่มีทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า แรงลัพธ์ที่กระทำต่อประจุย่อมเกิดจากผลรวมของแรงอันเนื่องมาจากสนามทั้งสองชนิด และเรียกแรงลัพธ์นี้ว่า “แรงลอเรนซ์” (Lorentz Force)



รูปที่ 2.25 แสดงการเคลื่อนที่ของประจุ  $q$  ภายใต้สนามแม่เหล็ก

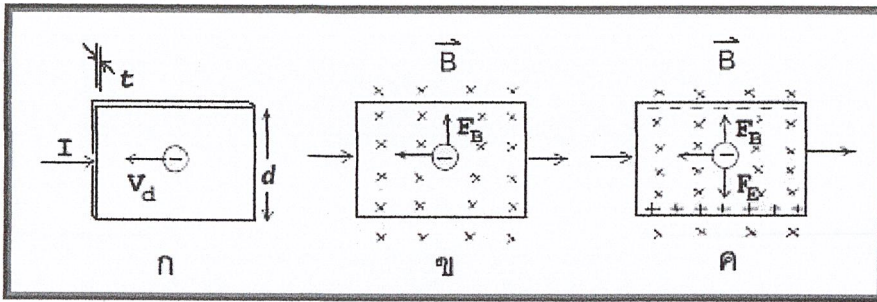
สมการของแรงลอเรนซ์จะได้ว่า

$$F = F_B + F_H \quad (2.25)$$

$$F_L = q(E + vB) \quad (2.26)$$

## 2.7 ปรากฏการณ์ ฮอลล์ (Hall Effect)

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปคินส์ ซึ่งในขณะนั้นมีอายุ 24 ปี ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)



รูปที่ 2.26 ก-ค แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อธิบายได้โดยใช้รูป 2.26 ก-ค ดังนี้

รูป 2.26 ก แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง  $d$  หนา  $t$  และมีกระแสไฟฟ้า (conventional current)  $I$  ผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน  $V_d$ ) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า  $I$  จากด้านขวาไปด้านซ้าย

รูป 2.26 ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก  $B$  ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางหรือกระดาษ จะเกิดแรงแม่เหล็ก  $F_B$  กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง

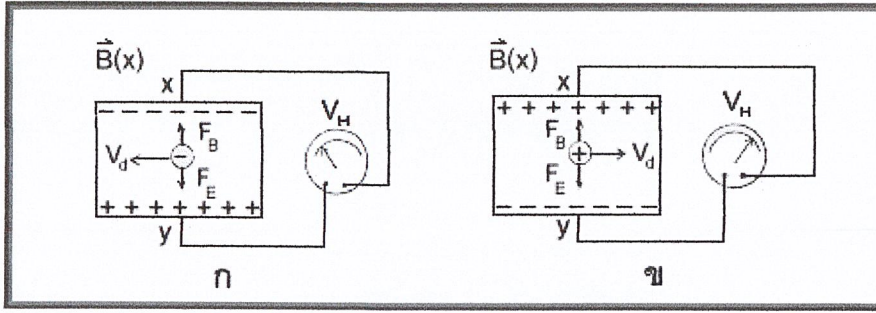
รูป 2.26 ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (hall field)  $E_H$  ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า  $F_E$  กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบน

สนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลเตจ  $V$  ดังนี้

$$E_H = V/d \quad (2.27)$$

ความต่างศักย์หรือโวลเตจที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (hall potential difference หรือ hall voltage)  $V_H$  พบว่า ความต่างศักย์ฮอลล์มีค่ามากที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำบางทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน และเจอร์เมเนียม ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่ามาก จากสมการ (1) จะได้ว่า

$$V_H = E_H d \quad (2.28)$$

รูป 2.27 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์  $V_H$ 

เราสามารถวัด  $V_H$  โดยต่อ มิลลิโวลต์มิเตอร์เข้ากับจุด  $x$  และจุด  $y$  ดังรูป 2.25 ก สภาพขั้วของ  $V_H$  ทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จาก มิลลิโวลต์มิเตอร์ จากรูป 2.27 ก พาหะประจุคืออิเล็กตรอนจึงมีประจุลบ ถ้าพาหะประจุมีประจุบวก ทิศของ  $V_d$  และ  $E_H$  จะตรงข้ามกับในรูป 2.27 ก แต่ทิศของ  $F_B$  และ  $E_E$  ยังคงเดิม ดังแสดงในรูป 2.27 ข ทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านขวา ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านซ้าย และสภาพขั้วของ  $V_H$  จะตรงข้ามกับกรณีที่พาหะประจุมีประจุลบ จากรูป 2.26 ค ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน เราจะได้

$$E_H = V_d B \quad (2.29)$$

จากสมการ (2.28) จะได้

$$V_H = V_d B d \quad (2.30)$$

เนื่องจากอัตราเร็วลอยเลื่อน  $V_d$  มีค่า

$$V_d = I/neA \quad (2.31)$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร (หรือความหนาแน่นของพาหะประจุ) และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง

แทนสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.4) จะได้

$$V_H = IBd/neA \quad (2.32)$$

เนื่องจาก  $t = A/d$  คือความหนาของแผ่นตัวนำบาง ดังนั้น

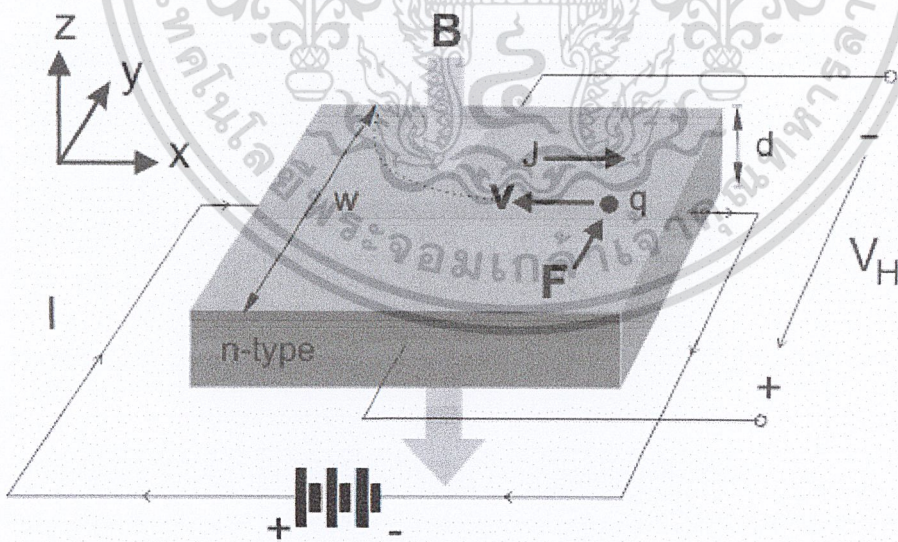
$$V_H = IB/net \quad (2.33)$$

สมการ (2.33) เขียนได้ใหม่เป็น

$$B = netI^{-1}V_H \quad (2.34)$$

ปริมาณ  $V_H I$  และ  $t$  ในสมการ (2.34) หาได้จากการวัด ส่วนค่า  $n$  ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนฉนวนมีจำนวนพาหะประจุน้อยมาก แต่ก็ยอมให้กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยผ่าน จากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำที่เจือสิ่งเจือปนมีค่า  $n \cong 10^{22} \text{ m}^{-3}$  และโลหะทั่วไปมีค่า  $n \cong 10^{28} \text{ m}^{-3}$  ดังนั้น เราจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการ (2.34) ได้

ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นเทสลา (tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์ T หน่วยเดิมของความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ เกาส์ (gauss) แทนด้วยสัญลักษณ์ G โดยที่  $1\text{T} = 10^4 \text{ G}$



รูปที่ 2.28 แสดงทิศของกระแสที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และแรงลอเรนซ์ ( $F$ )

## บทที่ 3

### ทฤษฎีอุปกรณ์

#### 3.1 เซนเซอร์ (Sensors)

##### 3.1.1 เซนเซอร์

โดยทั่วไปเซนเซอร์ คือ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ หรือปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ แสง เสียง แรงทางกล (Force) ความดันบรรยากาศ (pressure) ระยะขจัด (displacement) ความเร็ว (speed) อัตราเร่ง (acceleration) ระดับของเหลว (liquid level) หรือแม้กระทั่ง อัตราการไหล (flow rate) เป็นต้น จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนให้เป็น สัญญาณออก หรือปริมาณเอาต์พุตที่ได้จากการวัดในอีกรูปแบบหนึ่ง (measurable output) ที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้

ในส่วนของการตรวจวัดและตรวจจับปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆนั้น มักจะถูกกำหนดตามความต้องการของอุตสาหกรรมการผลิตในการที่จะตรวจสอบ ควบคุมค่ากระบวนการ ตลอดจนนำตัวแปรทางฟิสิกส์เหล่านั้น ไปใช้งานดังนั้นเงื่อนไขซึ่งเป็นปัจจัยในการเลือกเซนเซอร์ใช้งานจึงขึ้นอยู่กับธรรมชาติของปริมาณทางฟิสิกส์ที่จะทำการวัดและควบคุมค่าเป็นสำคัญ รวมไปถึง ราคา ความน่าเชื่อถือ ตลอดจนคุณภาพของข้อมูลที่ทำกรวัด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นที่ควรพิจารณาอีก อาทิเช่น ความเหมาะสมของเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิซึ่งใช้ในกระบวนการผลิตใน โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆนั้น จำเป็นต้องมีอัตราความสามารถในการทนต่อสภาพการใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ความดันสูง หรือความสามารถทนต่อสภาพกัดกร่อนได้สูงกว่าเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป

##### 3.1.2 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างหลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์แบบต่างๆ โดยเทอร์มิสเตอร์ (thermistor) และสเตรนเกจ (strangage) จะเป็นเซนเซอร์ที่ให้สัญญาณออกเป็นรูปแบบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าเซนเซอร์หลายชนิดจะให้สัญญาณออกมาในลักษณะของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (voltage) และกระแสไฟฟ้า (current) หรือความถี่ (frequency) ด้วยสปริงสมดุล (spring balance) เป็นเซนเซอร์อีกชนิดหนึ่งที่ทำให้ปริมาณเอาท์พุตในลักษณะของระยะขจัดที่แปรเปลี่ยนเป็นสัดส่วนไปตามภาระหรือ โหลด (load) ที่กระทำกับสปริง โดยมีเข็มชี้เป็นอุปกรณ์บอกระยะขจัดที่เกิดขึ้น หลอดเวนทูรี (venture tube) เป็นเซนเซอร์ใช้ทำหน้าที่วัดผลต่างความดัน (pressure) เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการไหล (flow rate) ของของเหลวในท่อที่กำลังตรวจสอบอยู่

จากรูปตัวอย่างแสดงการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์แบบต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณออกที่ได้จากเซนเซอร์มีมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งการนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้งานจึงต้องพิจารณาลักษณะของงานที่จะใช้ รวมไปถึงต้องอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับความต้องการในการแสดงผลของระบบที่ใช้งานอีกด้วย ในระบบการวัดและควบคุมกระบวนการมีคำศัพท์อยู่ 2 คำ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมักก่อให้เกิดความสับสนขึ้นได้บ่อยครั้ง นั่นคือ คำว่า “เซนเซอร์” (sensor) กับคำว่า “ทรานสดิวเซอร์” (transducer) ซึ่งทั้งสองคำนี้มีความหมายคล้ายคลึงกันมาก บางครั้งถูกนำมาใช้แทนกันได้ แต่โดยความเป็นจริงแล้ว เซนเซอร์กับทรานสดิวเซอร์นั้นมีความหมายและจุดประสงค์ในการใช้งานต่างกัน กล่าวคือ ทรานสดิวเซอร์นั้นหมายถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เซนเซอร์โดยทั่วไปก็คือ ทรานสดิวเซอร์ แต่ในทางกลับกันทรานสดิวเซอร์บางชนิดเท่านั้นที่ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ และเพื่อให้เข้าใจง่ายๆ จะเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเซนเซอร์กับทรานสดิวเซอร์ ตัวอย่างเช่น หลอดไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านเรือนทั่วไปก็จะเป็นลักษณะของทรานสดิวเซอร์อย่างหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงสว่าง (และพลังงานความร้อน) ในที่นี้จุดประสงค์ในการใช้งานของหลอดไฟก็คือทำหน้าที่ให้แสงสว่างภายในห้องเท่านั้น ไม่ใช่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดหรือบ่งชี้หรือแสดงผล (หลอดไฟสว่างขึ้น) ให้รู้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจร ดังนั้นกรณีเช่นนี้หลอดไฟจึงทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์

### 3.1.3 คุณสมบัติของเซนเซอร์

ในการนำเอาเซนเซอร์มาใช้งานในระบบการวัดหรือระบบควบคุมกระบวนการต่าง ๆ นั้น เราต้องคำนึงหลายด้าน เช่น ราคา ความเหมาะสม ประสิทธิภาพ รวมถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกต่างๆ เป็นต้น แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการเลือกพิจารณา คือ คุณสมบัติของสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ควรมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสัญญาณหรือรูปแบบที่ต้องการนำไปใช้งานต่อ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดรูปแบบและคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ที่

เลือกใช้นับเป็นปัจจัยประการแรกที่ควรทราบ และในหัวข้อนี้จึงได้อธิบายถึงข้อกำหนดตลอดจนคุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. **ความแม่นยำ (accuracy)** เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าทางเอาต์พุตว่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากน้อยเพียงใด ในทางปฏิบัติ การวัดย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนในตัวอุปกรณ์ แต่จะมีค่ามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำของอุปกรณ์นั้น ซึ่งทั่วไปค่าความแม่นยำนี้อาจแสดงในเทอมของหน่วยในการวัด เช่น เทอร์โมมิเตอร์ตัวหนึ่งถูกกำหนดไว้ว่ามีค่าความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  นั้นหมายถึงว่าหากนำเทอร์โมมิเตอร์ตัวนี้ไปทำการวัดอุณหภูมิแล้วแสดงค่าเท่ากับ  $20.1^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าขณะนี้อุณหภูมิจริงที่ทำการวัดมีค่าอยู่ระหว่าง  $19.9^{\circ}\text{C}$  กับ  $20.3^{\circ}\text{C}$  ในบางครั้งค่าความแม่นยำนี้อาจใช้บ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของย่านการวัดของอุปกรณ์วัดตัวนั้นๆ อีกด้วย

2. **ความแน่นอน (precision)** คือค่าบ่งชี้ถึงความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าเอาต์พุตเหมือนค่าเดิมทุกครั้งเมื่อทำการวัดสัญญาณอินพุตค่าเดิมซ้ำๆ หลายๆ ครั้ง โดยทั่วไปมักเข้าใจสับสนว่า ความแน่นอนกับความแม่นยำคือชื่อเดียวกัน แต่ในระบบการวัดแล้วจะมีความหมายที่ต่างกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้ เซนเซอร์ตัวใดที่มีค่าความแม่นยำสูง หมายความว่า เซนเซอร์ตัวนั้นสามารถแสดงค่าทางเอาต์พุตได้เหมือนค่าเดิมทุกครั้งในการที่มีอินพุตซ้ำค่าเดิม แต่ก็ได้ไม่ได้หมายความว่าเซนเซอร์ตัวนี้มีค่าความแม่นยำสูง หากค่าที่ได้จากเอาต์พุตของเซนเซอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนแตกต่างจากค่าที่เป็นจริง

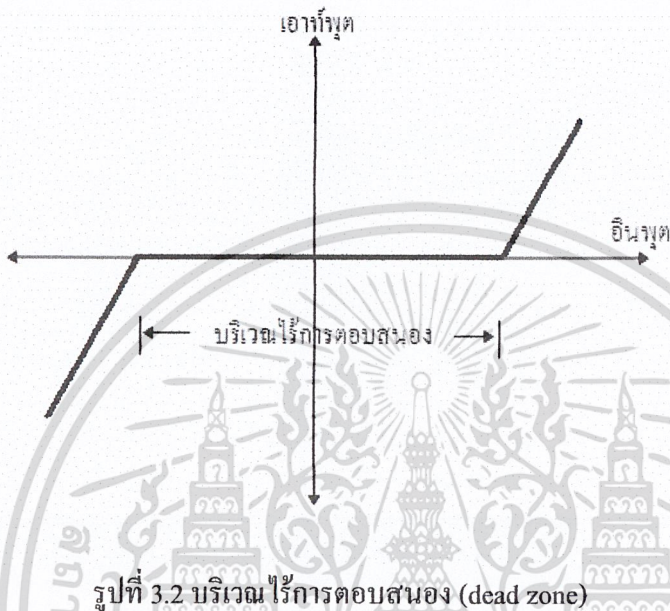
3. **ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (repeatability หรือ reproducibility)** เป็นข้อกำหนดของความแน่นอนซึ่งถูกระบุมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ โดยหมายถึง ค่าความแน่นอนของเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของการวัดแบบเดิม ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการแสดงค่าเอาต์พุตให้มีค่าเหมือนเดิม

4. **ความคลาดเคลื่อน (error)** คือผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง โดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และยังเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแม่นยำของระบบการวัดนั้นอีกด้วย

5. **ความคลาดเคลื่อนสถิต (static error)** คือค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าคงที่ตลอดย่านการวัดของอุปกรณ์ ดังนั้น หากทราบค่าความคลาดเคลื่อนสถิตของอุปกรณ์นั้นแล้ว สามารถชดเชยให้มีค่าน้อยลงได้เพื่อลดผลกระทบต่อค่าความแม่นยำของอุปกรณ์

6. **การปรับเทียบ (calibration)** หมายถึงการเปรียบเทียบหน่วยของสกุลในการแสดงผลของเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์ตรวจสอบความเร็วรถยนต์บางชนิดที่ให้เอาต์พุตออกมาอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าแปรผันตรงกับความเร็วรถยนต์ จากนั้นเข็มชี้ของมิเตอร์วัดความเร็วจะแสดงผลโดยการเบี่ยงเบนเป็นสัดส่วนไปตามแรงดันไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการอ่านค่าที่ได้จากหน่วยของปริมาณหนึ่งมาเป็นอีกหน่วยของปริมาณหนึ่งโดยการเปรียบเทียบแบบนี้ จึงเรียกว่า การปรับเทียบ

7. บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone dead หรือ band) เป็นข้อกำหนดที่แสดงถึงขนาดสูงสุดของปริมาณที่ทำการวัดทางอินพุต โดยไม่ทำให้สัญญาณทางเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง หรือขนาดอินพุตสูงสุดที่ยังคงทำให้เอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงได้ดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดบริเวณไร้การตอบสนองนี้มาจากผลของแรงเสียดทานสถิตหรือเนื่องจากคุณสมบัติฮิสเทอรีซิส

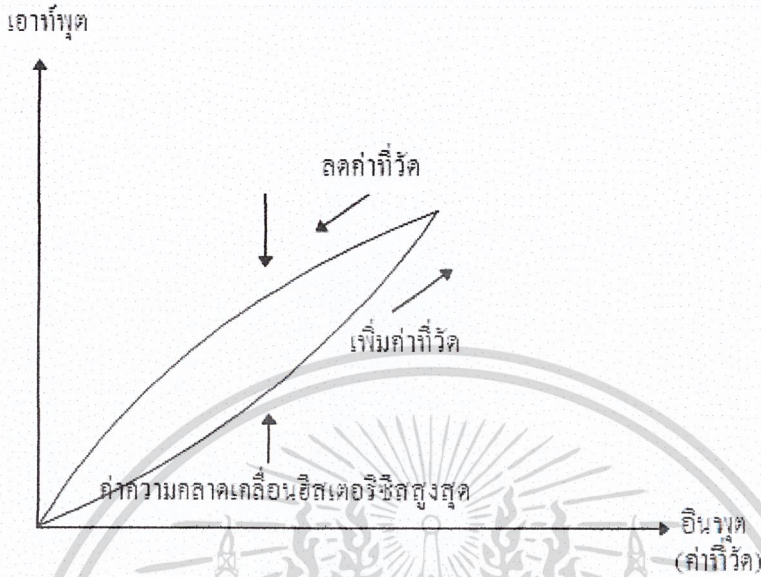


8. ขนาด (dimension) ขนาดของเซนเซอร์เป็นขนาดทางกายภาพ คือ กว้าง×ยาว×สูง ที่ประจำตัวของเซนเซอร์นั้นๆ

9. ครีฟท์ (drift) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซนเซอร์ วงจร หรือระบบ เมื่อเวลาในการใช้งานหรือสิ่งแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ คุณสมบัติครีฟท์นี้ทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าอินพุตของระบบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงก็ตาม ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของอุปกรณ์นั้นด้วย อุณหภูมิรอบข้างในการใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดผลของการครีฟท์ขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซนเซอร์ ทำให้ระบบของการวัดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป

10. ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) เกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณฟิสิกส์ทางอินพุต โดยการปรับค่าจากน้อยไปมาก และปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย คุณสมบัติฮิสเทอรีซิสนี้ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบอุปกรณ์ด้วย กราฟคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิสดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ปริมาณอินพุตของเซนเซอร์ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดหรือต้องการตรวจสอบจะถูกปรับค่าให้มีมากขึ้นจนกระทั่งถึงย่านในการวัดสูงสุด ในทางกลับกันก็ทำการปรับค่าให้ลดลงจนกระทั่งถึงย่านในการวัดต่ำสุดเช่นกัน ซึ่ง

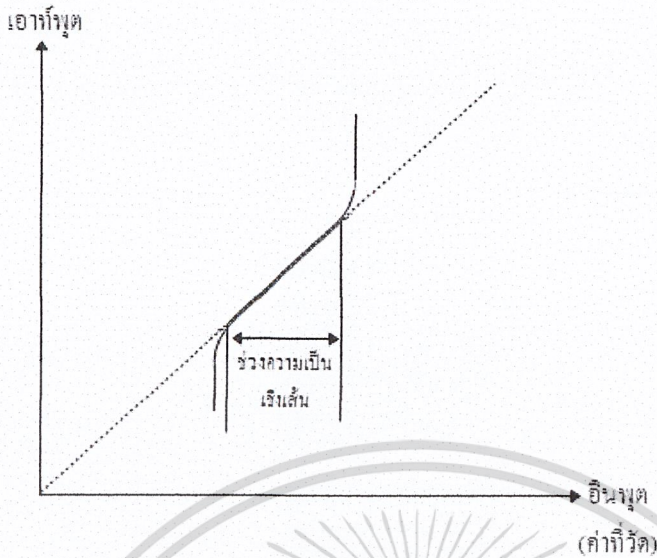
พบว่าเกิดผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ โดยจะเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้ว่า ฮิสเตอร์ซิส



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเตอร์ซิส

11. การหน่วงสัญญาณ (lag) คือการล่าช้าของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตที่ทำการวัด ทั่วไปมีหน่วยเป็นวินาที (second) หรือเศษส่วนของวินาที ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท เช่น ในงานระบบควบคุมกระบวนการ การหน่วงสัญญาณเป็นข้อกำหนดสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากมีผลต่อสมรรถนะของระบบเป็นอย่างมาก

12. ความเป็นเชิงเส้น (linearity) คุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้น คือ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น หรือมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงดังรูปที่ 3.4 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นยังแสดงถึงช่วงสูงสุดที่กราฟคุณสมบัติยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่ หรือเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า ช่วงปฏิบัติงาน (operating range) ของเซนเซอร์ โดยทั่วไปนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.4 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

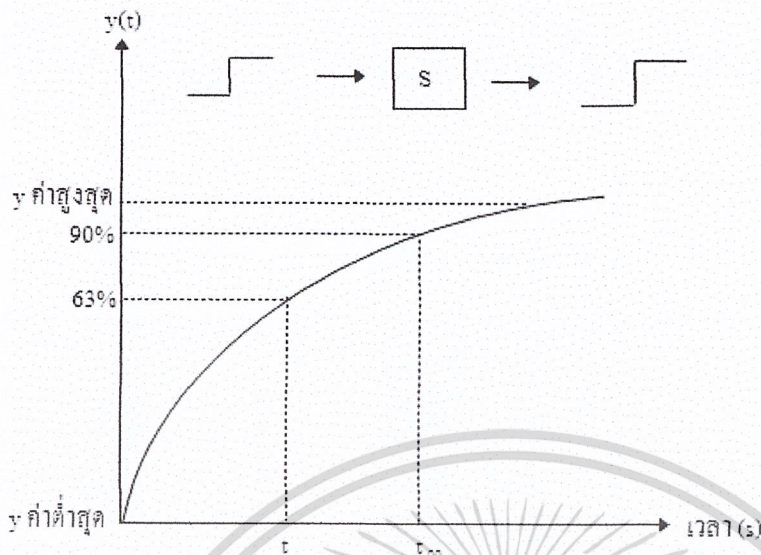
13. อายุการใช้งาน (operating life หรือ reliability) เป็นค่าที่แสดงถึงอายุการใช้งานที่ยังคงให้คุณสมบัติในการทำงานเป็นไปตามข้อกำหนดประจำตัวต่างๆที่ระบุมาให้ โดยทั่วไปอาจจะกล่าวมาในเทอมของระยะเวลาหรือจำนวนครั้งในการใช้งาน เป็นต้น

14. อัตราการทำงาน (rating) เป็นการแสดงถึงอัตราการทนต่อสัญญาณต่างๆในการทำงานของอุปกรณ์ โดยสามารถที่จะทำงานได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดความเสียหาย ส่วนใหญ่จะระบุรายละเอียดอัตราการทนสัญญาณแต่ละชนิดมาด้วย เช่น อัตราของอุณหภูมิในการทำงานสูงสุด เป็นต้น

15. ย่านปฏิบัติงาน (range) คือขอบเขตในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์นั้นๆซึ่งสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับย่านปฏิบัติงานของเซนเซอร์ มักกำหนดมาในรูปของค่าอินพุตต่ำสุดและสูงสุดในการใช้งาน

16. ผลตอบสนอง (response) คือช่วงเวลาที่อุปกรณ์ใช้ในการตอบสนองสัญญาณเอาท์พุทให้มีค่าเท่ากับค่าเอาท์พุทสุดท้าย มีหน่วยเป็นวินาที หรือเศษส่วนของวินาที หรือบางครั้งอาจบอกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าเอาท์พุทสุดท้ายได้

17. ความเร็วในการตอบสนอง (speed of response) เวลาที่ค่าเอาท์พุทเป็น 63% ของค่าสุดท้าย เมื่อสัญญาณอินพุทเป็นแบบ step แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความเร็วในการตอบสนอง

18. ความละเอียด (resolution) คือขนาดปริมาณอินพุตต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถวัดหรือตรวจสอบได้

19. ความไว (sensitivity) คือความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตของอุปกรณ์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอินพุต สำหรับค่าความไวของเซนเซอร์ จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตในย่านวัดที่กำหนดมาให้หารด้วยผลต่างของสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นปริมาณที่ทำการวัดหรือเขียนสมการได้ดังนี้

$$\text{ความไว} = (\text{ค่าเอาต์พุตสูงสุด} - \text{ค่าเอาต์พุตต่ำสุด}) / (\text{ค่าอินพุตสูงสุด} - \text{ค่าอินพุตต่ำสุด})$$

20. เสถียรภาพ (stability) บ่งชี้ให้เห็นสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์หรือระบบว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยแค่ไหนเมื่อป้อนอินพุตที่มีค่าคงที่เป็นเวลานานๆภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงมากนัก

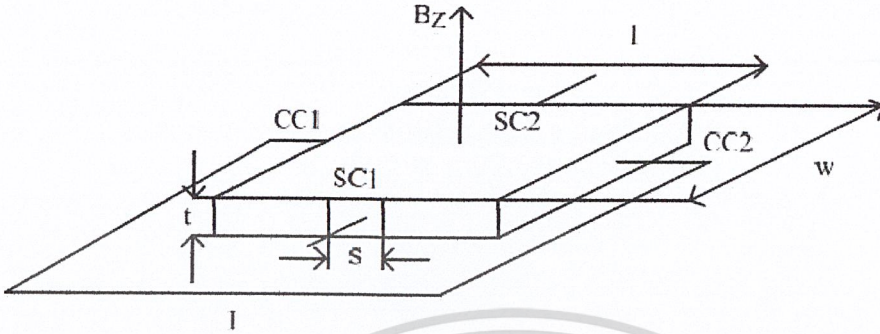
21. ค่าเบี่ยงเบน (tolerance) บอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด ในบางครั้ง ค่าความเบี่ยงเบนอาจใช้ในการแสดงถึงความแม่นยำของอุปกรณ์ได้อีกด้วย

## 3.2 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Equipment)

### 3.2.1 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีฮอลล์ (Hall Effect) โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แสดงดังรูปที่ โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความบาง โครงสร้างประกอบด้วย 4 ขั้วใช้งานคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 ซึ่ง

แรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) ถูกวัดที่ขั้ว SC1 และ SC2 โดยที่การไบอัสกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC1 และ CC2 แรงดันฮอลล์สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.6 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

$$V_H = \frac{R_H}{t} \cdot G \left( \frac{l}{w}, \frac{s}{w}, \frac{y}{l}, \theta_H \right) \cdot B_z \cdot I \quad (3.1)$$

โดยที่  $R_H$  คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์,  $G$  คือพารามิเตอร์โครงสร้าง,  $t$  คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์,  $B_z$  คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง,  $S$  คือความกว้างของขั้วเซนเซอร์คอนแทค (SC),  $w$  คือความกว้างของอุปกรณ์และ  $l$  คือความยาวของอุปกรณ์ฮอลล์

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาพฤติกรรมของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ( $n \gg p$ ) สามารถแสดงได้ดังสมการแรงดันฮอลล์ดังนี้

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot t} \cdot G \cdot B_z \cdot I \quad (3.2)$$

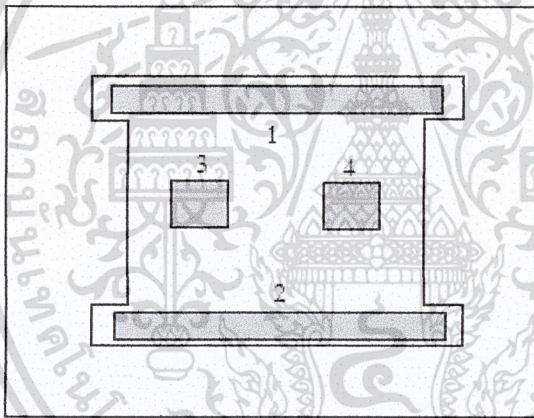
โดยที่  $r_n$  คือพารามิเตอร์การกระเจิง (Scattering parameter)

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง  $G$  จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง  $G$  สามารถประมาณดังสมการที่ (3.3)

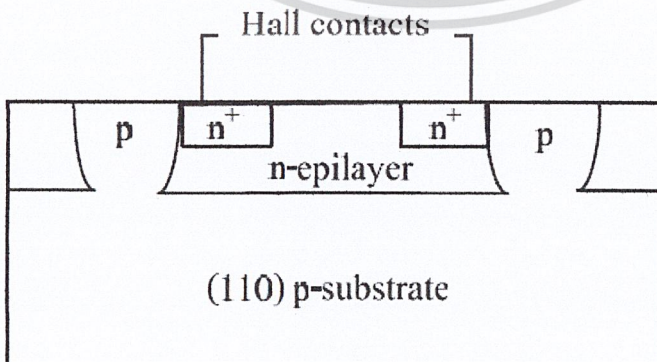
$$G = \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (3.3)$$

โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า  $G=1$  ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ ถ้าออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์ให้  $l/w = 3$  และ  $s/w < 1$  โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์คอนแทคจะออกแบบที่ระยะ  $\frac{1}{2}$

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคืออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน โดยที่ รูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดงด้านบนและด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งชนิดเอ็น โครงสร้างฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะรั่วไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ  $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  และมีความหนาชั้นอิพิแทกเซียล  $5-10 \mu\text{m}$  โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ  $200 \times 200 \mu\text{m}$  สภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการอิมพลานท์ (ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้



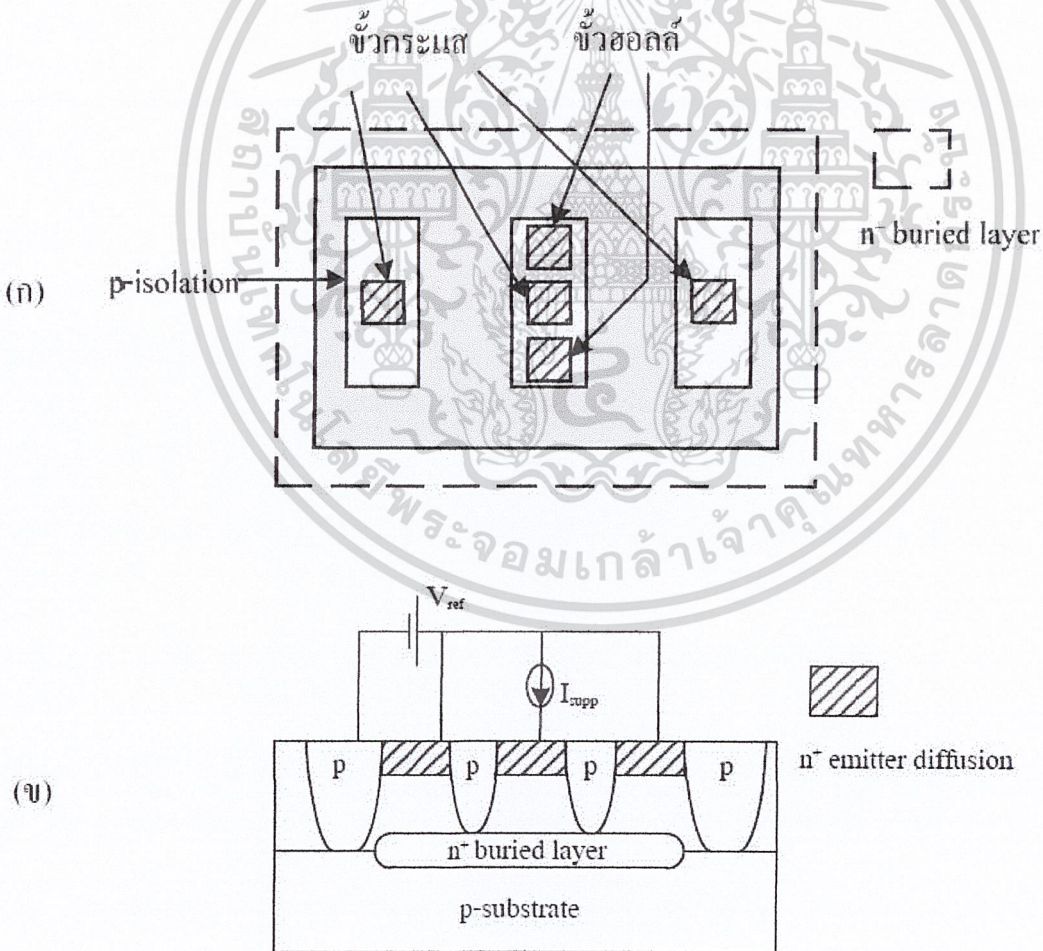
รูปที่ 3.7 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง



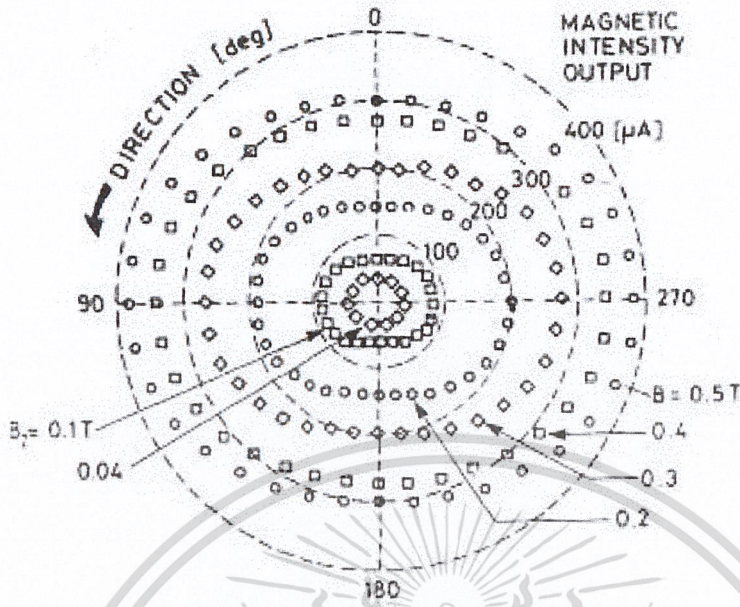
รูปที่ 3.8 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

อุปกรณ์ฮอลล์นี้ใช้วัดตรวจสอบแม่เหล็กแวนดิงแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แวนอน แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยโครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $100 \times 100 \mu\text{m}$  ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กประมาณ  $41 \text{ V/AT}$  โดยมีระดับสัญญาณรบกวน  $1 \times 10^{-5} T/\sqrt{H_z}$  ที่  $40 \text{ Hz}$

อุปกรณ์ฮอลล์ชนิดแวนดิงและแวนอนสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้าง CMOS เช่น อุปกรณ์ฮอลล์สามมิติแบบเข็มทิศแม่เหล็กสามารถสร้างได้ในระดับ  $2 \mu\text{m}$  แสดงดังรูปที่ 3.8 สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามทิศทาง ( $B_x, B_y, B_z$ ) โดยการวัดอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะในมุมเบี่ยงเบนต่างๆซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ ข้อดีของอุปกรณ์ฮอลล์นี้คือมีชั้นเลขอร์ที่บางมากประมาณ  $100 \text{ \AA}$  ทำให้มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงประมาณ  $500\text{-}1,000 \text{ V/AT}$  แต่มีข้อเสียคือจะมีค่าสภาพคล่องตัวต่ำ



รูปที่ 3.9 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง



รูปที่ 3.10 เอาท์พุทของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก

### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้หลักการ ปรากฏการณ์ฮอลล์

#### 3.2.2.1 แมกนีโตรซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

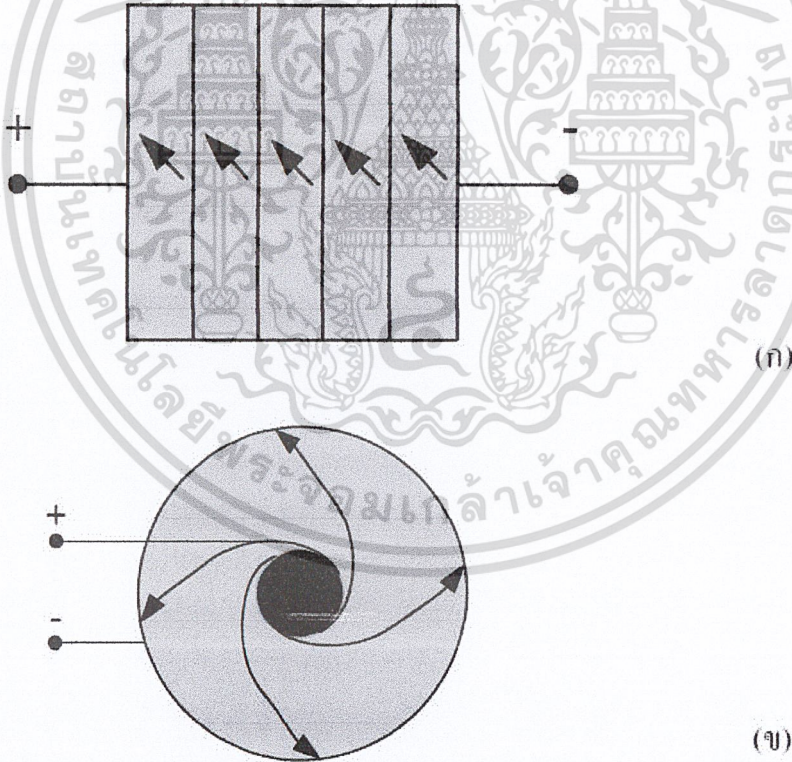
สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า แมกนีโตรซิสเตอร์ อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ (magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์ กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม  $\theta$  ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบน  $\theta$  หาได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \quad (3.4)$$

$$R(\theta) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{ar} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \quad (3.5)$$

โดยที่  $K_{ar}$  ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดफलซึ่งในอุดมคติफलมีความกว้างมากกว่าความยาว

โดยปกติแล้วแมกนีโตริซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (parallel Hall plates) และ แบบวงกลม (caibino disc) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดย รูปที่ 3.11 (ก) แสดง โครงสร้างแมกนีโตริซิสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนานซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์คือ ในอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์แต่จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 3.11 (ข) แสดง โครงสร้างแมกนีโตริซิสเตอร์แบบวงกลมซึ่งเป็น โครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดย สนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วย โดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีสภาพความคล่องตัวต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้ว อุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะเลือกสารประกอบที่มีค่าสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของแมกนีโตริซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม

### 3.2.2.2 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดโดยมีมิติความยาว ความกว้าง และความสูง ( $l \times w \times d$ ) อาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะระหว่างสองรอยต่ออันเป็นผลเนื่องมาจากแมกนีโตคอนเซนเตรชัน (magneto concentration effect) โดยพาหะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของแมกนีโตไดโอดอีกด้วย โดยการใช้  $Si-Al_2-O_2$  และ  $Si-SiO_2$  ที่ผิวเรียกว่า SOS (Silicon On Sapphire) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่กระแสดังกล่าวสามารถหาได้โดยสมการที่ (3.6)

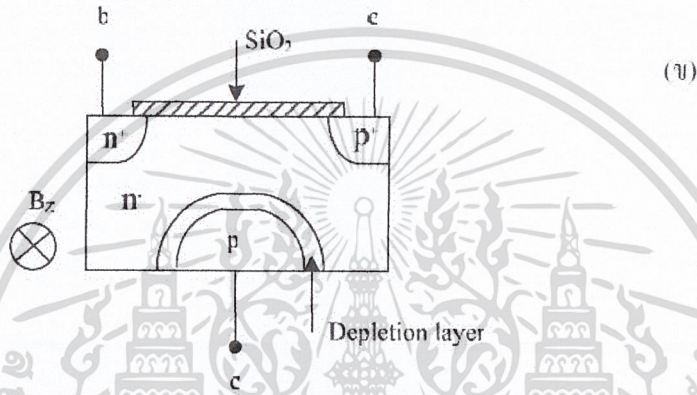
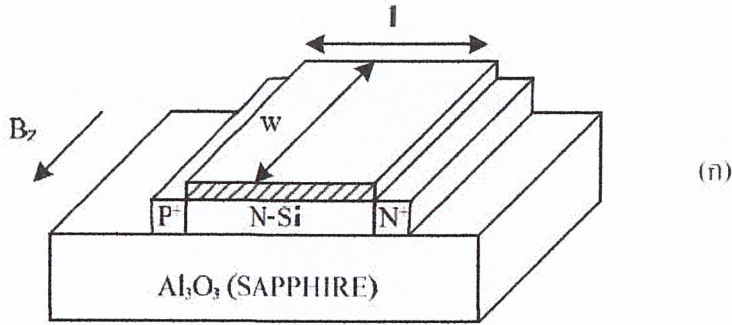
$$S_{vf} = \frac{dV_f}{dB_z} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)\tau_{eff}(v_2 - v_1)}{8KTI} \cdot V_f^2 \quad (3.6)$$

โดยที่  $I$  คือความยาวของซิลิคอนชนิดเอ็น,  $v_1$  และ  $v_2$  คืออัตราการรวมตัวของพาหะ,  $\mu_p$  และ  $\mu_n$  คือสภาพความคล่องตัวของพาหะ และ  $\tau_{eff}$  คืออายุของพาหะ



รูปที่ 3.12 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด

ข้อเสียของ SOS แมกนีโตไดโอด เช่น การสร้าง  $Si-Al_2-O_3$  จะเกิดขึ้นได้ยากในบริเวณผิวหน้า ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ พื้นฐานของการใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS แสดงดังรูปที่ 3.13 (ข) โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตราการรวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS แมกนีโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปจากคอลเลกเตอร์ ดังนั้น กระแสคอลเลกเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS

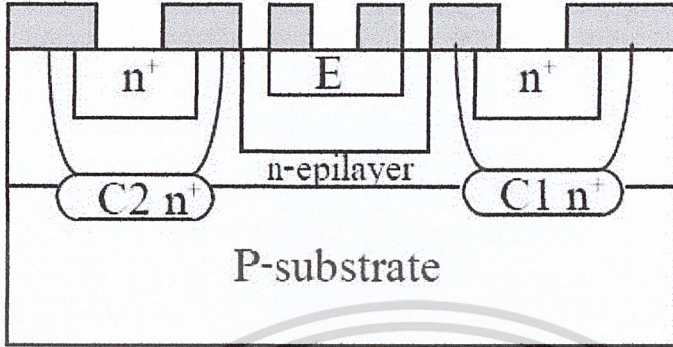
### 3.2.2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้ง โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magnetotransistor) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (lateral magnetotransistor) ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_c$ ) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดูเลต (modulation current injection)

#### แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor)

รูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้งโดยสร้างจากกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลคเตอร์ทั้งสอง

สร้างจากอะตอมสารเจือชนิด  $n^+$  เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจร จึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง



รูปที่ 3.14 ด้านตัดขวาง โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านส่วนเบสไปถึงชั้นอีพีของคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วน โดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน อยู่ในสถานะสมดุล  $I_{C1} = I_{C2} = I_{C0}$  โดยที่  $I_{C0}$  คือ ผลรวมกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง  $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$  ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองหาได้โดยสมการที่ (3.7)

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n (L/W_E) \cdot I_{C0} \cdot B \quad (3.7)$$

โดยที่  $L$  คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์,  $W_E$  คือ ความกว้างอิมิตเตอร์ และ  $G$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดย

$$S = |\Delta I_C / I_{C0} B| \quad (3.8)$$

แทนสมการที่ (3.7) ลงในสมการที่ (3.8) จะได้

$$S = G \cdot \mu_n (L/W_E) \quad (3.9)$$

ในสถานะปกติขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.10) และ (3.11)

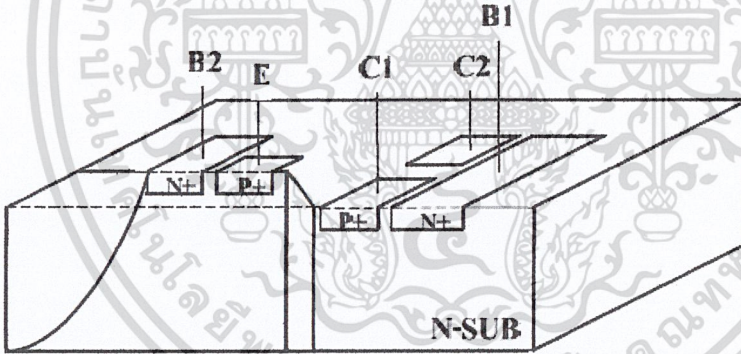
$$S_A = \left. \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left. \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (3.10)$$

$$S = V_C^{-1} \left. \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = I_C^{-1} \left. \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (3.11)$$

ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์นี้มีค่าประมาณ  $0.03/T - 0.05/T$  ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์ MAGFET

### แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor)

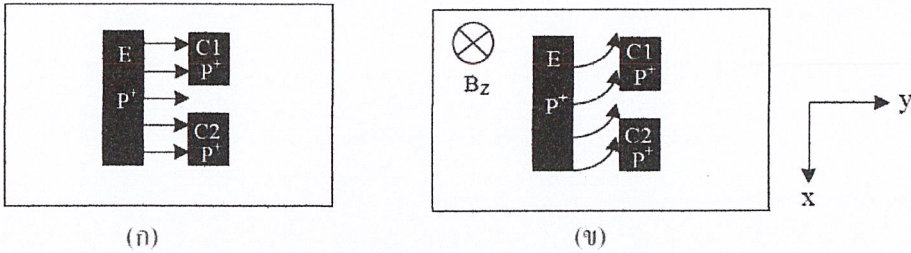
โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนแสดงดังรูปที่ 3.15 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองขาอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากกรมอดูเลต (modulation current injection) อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, คอลเลคเตอร์ C1,C2 และสองขั้วเบสคอนแทค B1,B2



รูปที่ 3.15 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก (majority carriers) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลคเตอร์ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ( $\Delta I_C = 0$ ) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความ

แตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C \neq 0$ ) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุล เป็นไม่สมดุล แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก)  $B_z = 0$  และ (ข)  $B_z > 0$

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  หาได้ดังสมการที่ (3.12) เพราะฉะนั้น ผลรวมของ  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  ก็คือกระแสคอลเลกเตอร์ที่ไหลในภาวะปกตินั่นเอง ดังสมการที่ (3.13) ส่วนสมการที่ (3.14) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta I_C$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง  $\Delta I_C$  แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสเอมิเตอร์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์และแบบสัมบูรณ์แสดงได้ดังสมการที่ (3.12), (3.13) และ (3.14)

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \quad (3.12)$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \quad (3.13)$$

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_z \cdot I_E \quad (3.14)$$

ซึ่ง  $\mu_p$  และ  $\mu_n$  คือสภาพความคล่องตัวของพาหะของโฮลและอิเล็กตรอน,  $K_g$  คือค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์ (ก)

$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_0 \cdot \Delta B_z} \quad (3.15)$$

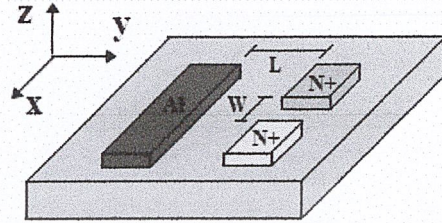
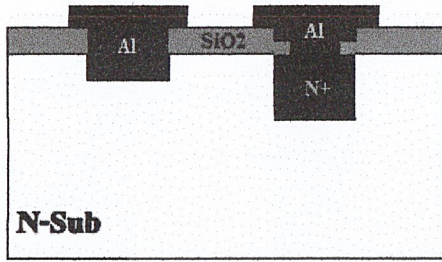
$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \quad (3.16)$$

ซึ่ง  $I_0$  คือแหล่งจ่ายกระแสคงที่ และ  $\Delta B_z$  คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

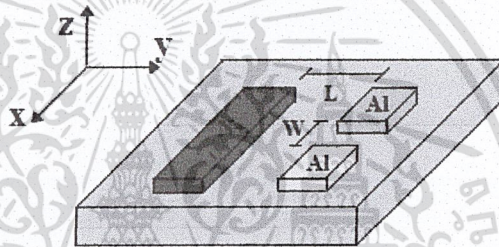
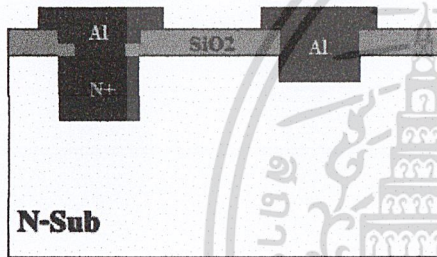
### 3.3 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

#### 3.3.1 โครงสร้าง

แมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อ METAL มีรูปแบบโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.1



(ก.) โครงสร้างที่ 1



(ข.) โครงสร้างที่ 2

รูปที่ 3.17 โครงสร้างแมกนีโตไดโอด

แมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อ METAL มีโครงสร้าง 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 3.17(ก) และ (ข) ประกอบด้วยขั้วแคโทด และ แอโนด สร้างอยู่บนฐานรองชนิด N ระนาบ (100) โดยขั้วแคโทดของ ไดโอดแบบรอยต่อ METAL จะใช้แผ่นซิลิกอนชนิด N เป็นขั้วแคโทดแทนการแพร่สารกึ่งตัวนำ ชนิด P ลงบนแผ่นซิลิกอนนั้น ซึ่งโครงสร้างถูกออกแบบให้มีระยะความกว้างระหว่างแคโทดกับ แคโทด (W) 50 ไมครอน และระยะห่างระหว่างรอยต่อแคโทดกับแอโนด (L) 50 ไมครอน

#### 3.3.2 หลักการทำงาน

##### 3.3.2.1 กระบวนการสร้าง

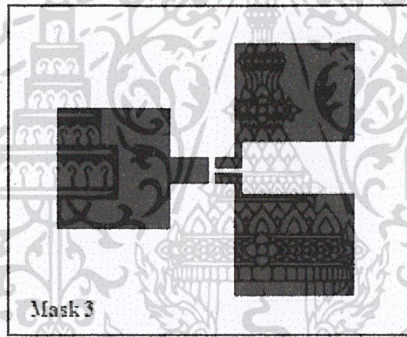
แมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อโลหะเริ่มต้นด้วยการใช้แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีระนาบ (100) ใช้กระบวนการ Oxidation ในการสร้างชั้นออกไซด์โดยใช้ขั้นตอนการสร้างแบบ Dry-Wet-Dry Oxidation ใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีในการเปิดช่องเพื่อทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเข้าไป เพื่อทำให้เกิดบริเวณเอ็น โดยการใช้อาร์คที่ 1 ในการเปิดช่องเพื่อแพร่สารฟอสฟอรัสเพื่อสร้างรอยต่อ

แบบโอห์มมิกให้กับขั้วแคโทด ใช้มาร์ค 2 ซึ่งเป็นมาร์คคอนแทค ใช้ในการเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้ทำการแพร่ไปก่อนแล้ว ส่วนมาร์คที่ 3 ใช้สำหรับกระบวนการระเหยของอะลูมิเนียมเพื่อทำการสกัดเอาเฉพาะอะลูมิเนียมส่วนที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า



(ก.) มาร์ค 1

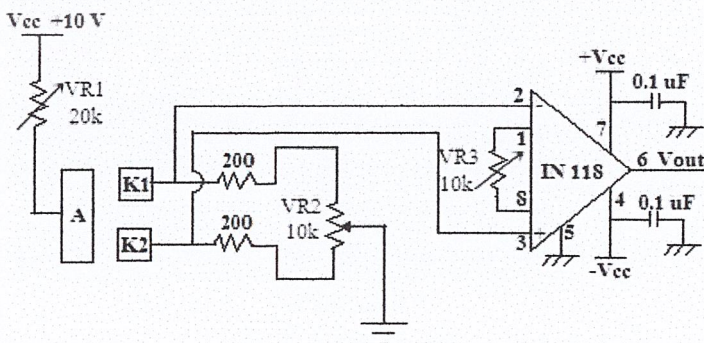
(ข.) มาร์ค 2



(ค.) มาร์ค 3

รูปที่ 3.18 ชุดมาร์คที่ใช้สำหรับกระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อโลหะ (Metal)

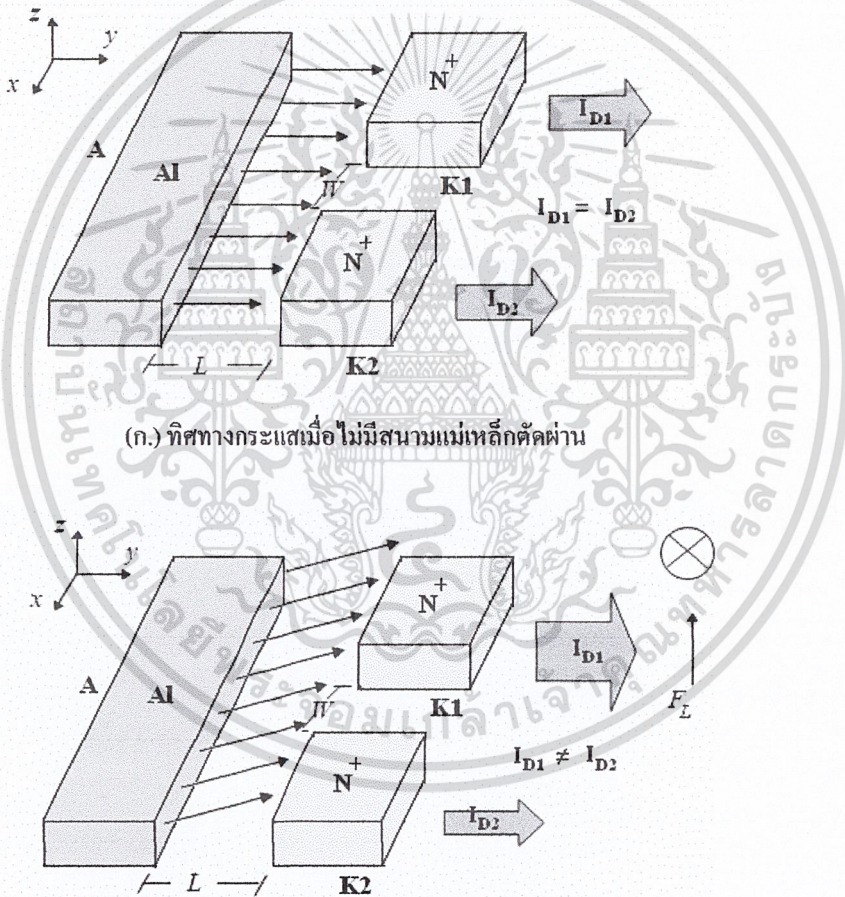
### 3.3.2.2 การตรวจจับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.19 การวัดทดลองของเมกนีโตไดโอด

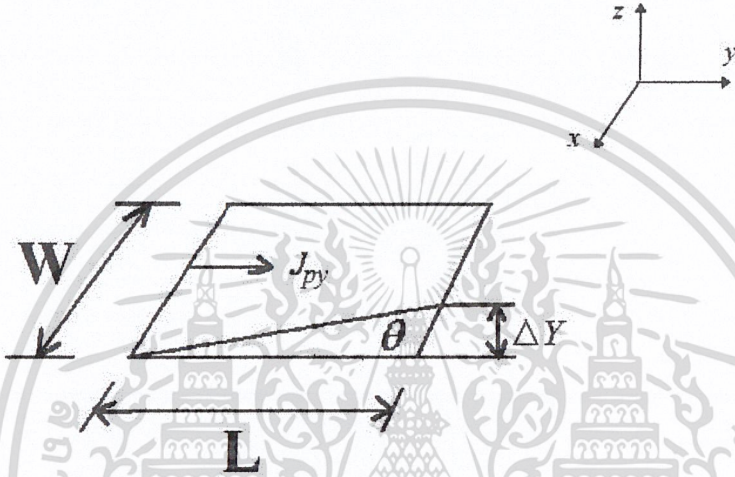
จากวงจรอินเตอร์เฟสสำหรับการวัดแสดงในรูปที่ 3.19 กระแสคงที่ถูกต้องเข้ากับขั้วแอโนด ผ่านไปแคโทด ตัวต้านทาน  $R_{B1}$  และ  $R_{B2}$  เป็นตัวปรับค่ากระแสให้เกิดความสมดุลที่เอาต์พุต เพื่อให้มีค่าเป็นศูนย์ในขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.20 การเบี่ยงเบนพาหะโดยแรงลอเรนซ์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านในทิศทาง  $-Z$  จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์เคลื่อนที่ในทิศทาง  $-X$  กระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสองนั้นจะเกิดความไม่สมดุลขึ้น ทำให้กระแส  $I_{D1}$  มีค่าความหนาแน่นมากกว่ากระแส  $I_{D2}$  ในทางกลับกันเมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านในทิศทางออกในทิศ  $Z$  แรงลอเรนซ์ก็จะเคลื่อนที่ในทิศทาง  $X$  เมื่อเกิดแรงลอเรนซ์จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแส ความหนาแน่นของกระแส  $I_{D2}$  มีค่ามากกว่ากระแส  $I_{D1}$  เช่นกัน



รูปที่ 3.20 การเบี่ยงเบนพาหะ Hall โดย Lorentz force

กลไกการเบี่ยงเบนพาหะโฮลของแมกนีโตไดโอดสามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.21 กระแสไดโอดที่เพิ่มขึ้นกับค่าความไวที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการฉีดพาหะโฮลที่มีมากขึ้นที่กระแสสูงขึ้น และเป็นสัดส่วนกับการเบี่ยงเบนพาหะโฮล แม้การฉีดพาหะจะมีทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า แต่จะมีพาหะโฮลเท่านั้นที่มีผลต่อเอาท์พุท อัตราส่วนของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถควบคุมได้ จากความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็น พาหะโฮลที่ถูกฉีดจากแอนโอด ( $p$ ) ไปยังแคโทด ( $n^+$ ) มีค่าเบี่ยงเบนด้วยมุมหักเห  $\theta$  เนื่องจากแรงลอเรนซ์กับสนามแม่เหล็ก  $B_z$



รูปที่ 3.21 พื้นที่ของการเบี่ยงเบนพาหะ (Hole)

กระแสแอนโอด  $I_D$  คือผลรวมกันของกระแส  $I_{D1}$  และ  $I_{D2}$  สามารถแสดงในสมการที่ (3.17)

$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (3.17)$$

กระแสแอนโอด  $I_D$  สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮลดังสมการที่ (3.18)

$$I_D = J_{py} \cdot W \cdot d \quad (3.18)$$

เมื่อ  $d$  คือความลึกรอยต่อแอนโอด  $p^+$ ,  $W$  คือความกว้างของแอนโอด มุมความแตกต่างสามารถเขียนสมการโดยใช้มุมฮอลล์

$$\tan \theta = \mu_p B_z \quad (3.19)$$

เมื่อ  $\mu_p$  คือ การเคลื่อนไหวของโฮล และ  $B_z$  คือความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก การขจัด  $\Delta y$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.20)

$$\Delta y = L \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (3.20)$$

เมื่อ  $L$  คือความยาวระหว่างแคโทดทั้งสอง กระแสเอ้าท์พุทคือความแตกต่างของกระแสไดโอด ( $\Delta I_D$ ) จากสมการ (3.19) และ (3.20) กระแสเอ้าท์พุทสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta I_D = J_{py} \cdot W \cdot L \tan \theta \quad (3.21)$$

ความสัมพันธ์ของสมการความไวและความไวสัมบูรณ์สามารถเขียนแสดงได้ดังสมการ (3.22) และ (3.23) ตามลำดับ

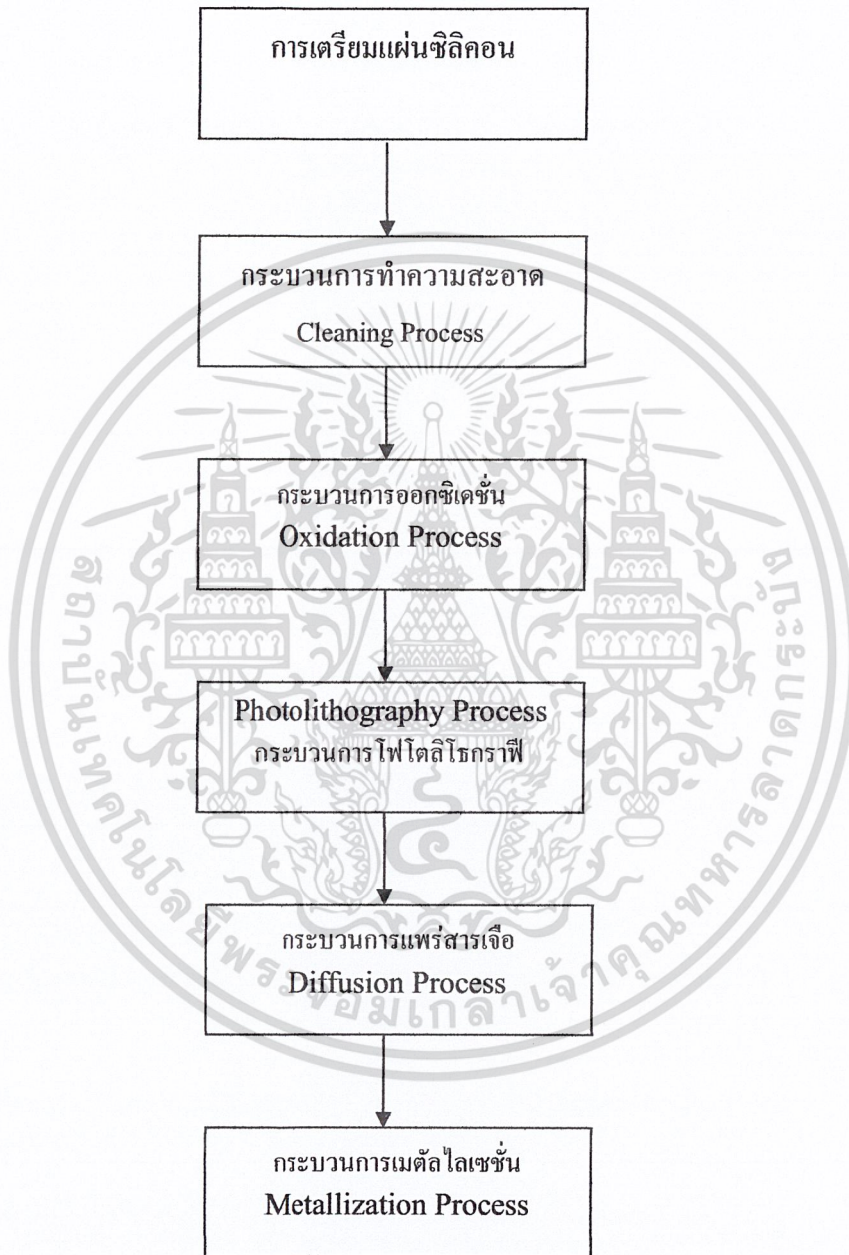
$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D B_z} \quad (3.22)$$

$$S_A = \frac{V_0}{\Delta B} \quad (3.23)$$

โดยที่  $V_0$  คือ ความแตกต่างแรงดันเอ้าท์พุทเนื่องจากค่าความแตกต่างของกระแส  $\Delta I_D$  ที่เกิดจากการเบี่ยงเบนพาหะโดยตรง

## บทที่ 4

### เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อโลหะ



รูปที่ 4.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

#### 4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน

แผ่นซิลิคอนที่ใช้ในการสร้างแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Initial Wafer) ที่ใช้ในการสร้างเป็นดังนี้

- แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 100
- ค่าพิถีความต้านทาน 3-6 โอห์ม-เซนติเมตร
- ขนาดความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400 um

ซึ่งแผ่นซิลิคอนที่เราใช้ในการสร้างเป็นชนิดเอ็น โดยจะต้องทำการหักแผ่น (Break) ซิลิคอนให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งระนาบซิลิคอนจะมี 2 แบบคือ

1. ระนาบ (100) ระนาบนี้การเรียงตัวของอะตอมที่ผิวหน้านั้นจะไม่มีอะตอมแขนขาอยู่ที่ผิวหรือจะพูดว่าเป็นอะตอมที่มีแขนครบทั้ง 8 แขน ซึ่งการที่ผิวหน้ามีอะตอมที่ครบแขนครบแล้วนั้นทำให้สิ่งแปลกปลอมที่จะมาเกาะนั้นทำได้ยาก เพราะแขนของอะตอมครบแล้ว ผิวหน้าจึงค่อนข้างจะสะอาด ระนาบ (100) นี้จึงเหมาะสมกับการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอส เพราะสารกึ่ง-ตัวนำประเภทมอสนั้นมีกระแสไหลที่ผิวหน้า และการหักแผ่นนั้นจะใช้ปากกาหัวเพชร (Diamond Pen) จัดที่ปลายแล้วใช้คีมจับทั้งสองข้างของรอยซิลิคอนที่ต้องการจะหัก แล้วบิดเบาๆ แผ่นซิลิคอนจะหักตามรอยที่เราขีดไว้ เป็นเส้นตรงตามการเรียงตัวของอะตอม

2. ระนาบ (111) ระนาบนี้การเรียงตัวของอะตอมที่ผิวหน้านั้นจะมีอะตอมแขนขาอยู่ 1 แขน ซึ่งการที่ผิวหน้ามีอะตอมแขนขาอยู่ 1 นั้น ทำให้สิ่งแปลกปลอมที่จะมาเกาะนั้นทำได้ง่ายผิวหน้าจึงไม่ค่อยสะอาด และที่ระนาบ (111) นี้จึงไม่มีความเหมาะสมในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอส เพราะมอสมีกระแสไหลผ่านผิวหน้าอาจทำให้มีกระแสรั่วไหลได้ จึงนิยมนำไปสร้างอุปกรณ์สารกึ่ง-ตัวนำประเภททรานซิสเตอร์ และในการหักแผ่นซิลิคอนนั้นทำได้ยาก ซึ่งใช้ปากกาหัวเพชร (Diamond Pen) จัดเป็นแนวยาว แล้วนำแผ่นซิลิคอนนั้นไปไว้บนที่รองโดยให้รอยที่ขีดไว้อยู่ตรงขอบพอดี แล้วใช้ไม้บรรทัดกดตรงรอยที่ขีดไว้บนแผ่นซิลิคอนเพื่อให้แผ่นซิลิคอนนั้นแตกตามรอยที่ขีดไว้ จากนั้นเราจะทำการบิดซึ่งจะใช้แรงมากกว่าระนาบ (100) แล้วจะได้ขนาดซิลิคอนตามขนาดที่ต้องการ

#### 4.2 กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process)

กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process) มีเป้าหมายหลักคือ กำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอนเช่น กำจัดฝุ่น กำจัดไขมัน กำจัดเศษโลหะ เพื่อความสะอาดของแผ่นซิลิคอนก่อนลงมือทำการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

#### 4.2.1. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

ชื่อกระบวนการ “ERC Cleaning” มีขั้นตอน ดังนี้

- Ultrasonic ในน้ำ DI 5 นาที
- จุ่มน้ำ DI ในแก้ว 1 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
- ต้มในกรด Nitric ( $HNO_3$ ) 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- ต้มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น ชื่อกระบวนการ “Piranha cleaning” มีขั้นตอน ดังนี้

- จุ่มในสารละลายของ Sulfuric ( $H_2SO_4$ ) : Hydrogen Peroxide ( $H_2O_2$ ) 30% = 1 : 3 ที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  ในแก้ว 1 5 นาที
- จุ่มในสารละลายของ Sulfuric ( $H_2SO_4$ ) : Hydrogen Peroxide ( $H_2O_2$ ) 30% = 1 : 3 ที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  ในแก้ว 2 5 นาที
- Rinse ด้วย DI 10 นาที จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

#### 4.2.2. การกำจัดฝุ่น

- Ultrasonic ในน้ำ DI 5 นาที
- จุ่มน้ำ DI ในแก้ว 1 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

#### 4.2.3. การกำจัดไขมัน

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที โดยในระหว่างเอาขึ้นต้องทำอย่างรวดเร็ว มี  
เช่นนั้น

Trichloroethylene จะแห้งเกาะติดแผ่นทำให้อาจจะต้องมีการทำกระบวนการทำความสะอาดใหม่

- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

#### 4.2.4.การกำจัดเศษโลหะ

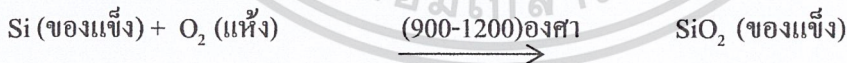
- ต้มในกรด Nitric ( $HNO_3$ ) 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- ต้มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF 5 %) 10 – 20 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

โดยหลังจากได้ทำตามกระบวนการทำความสะอาดแล้ว เราสามารถบอกได้ว่าแผ่นนั้นสะอาดหรือไม่ เราได้จากการนำแผ่นซิลิคอนไปจุ่มในน้ำ DI แล้วหยิบขึ้นมาดูว่ามีหยดน้ำติดอยู่ที่แผ่นหรือไม่ ถ้าไม่มีหยดน้ำติดหรือหยดน้ำที่ติดมีอยู่น้อย แสดงว่าแผ่นซิลิคอนนั้นไม่มีสิ่งสกปรกติดอยู่ แต่ถ้ามีหยดน้ำติดอยู่เป็นจำนวนมากแสดงว่าแผ่นซิลิคอนนั้นมีสิ่งสกปรกติดอยู่

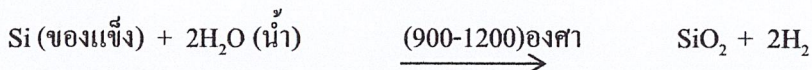
#### 4.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

คือการการก่อตัวของซิลิคอนไดออกไซด์บนพื้นผิวซิลิคอนโดยที่ซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของออกซิเจน : $O_2$  และ น้ำ :  $H_2O$  ที่อุณหภูมิสูงประกอบด้วย

##### Wet Oxidation



##### Dry Oxidation



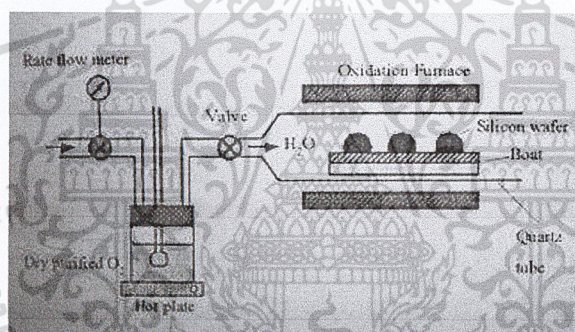
ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีและยังช่วยควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น จากสมการทางเคมีข้างต้นกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process) มีอยู่ 2 แบบคือ

#### 4.3.1 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ การเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า Dry Oxidation เนื่องจากโมเลกุลเองดังที่ได้กล่าว แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ Wet Oxidation คือคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ไม่ดี ประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมของสารเจือปนน้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ได้ไม่สมบูรณ์ และมีรูพรุน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ

**ข้อดี** ทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้รวดเร็วกว่าแบบ (Dry) เพราะวาโมเลกุลของน้ำนั้นเล็กกว่าของออกซิเจนทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า จึงสามารถสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาได้ดี

**ข้อเสีย** เป็นฉนวนที่ไม่ดี จึงทำให้ทนแรงดันได้ต่ำ จึงใช้เป็น Gate Oxide ไม่ได้ เพราะวาชั้นตอนนี้จะทำให้ผลึกที่ได้นั้นมีความหนาแน่นต่ำ เพราะมีรูพรุนเกิดขึ้น



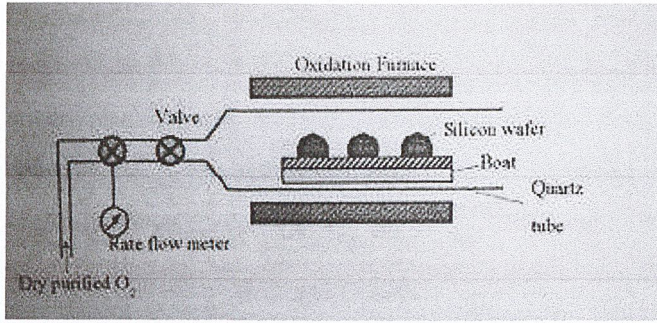
รูปที่ 4.2 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบ ไอน้ำอิ่มตัว

#### 4.3.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

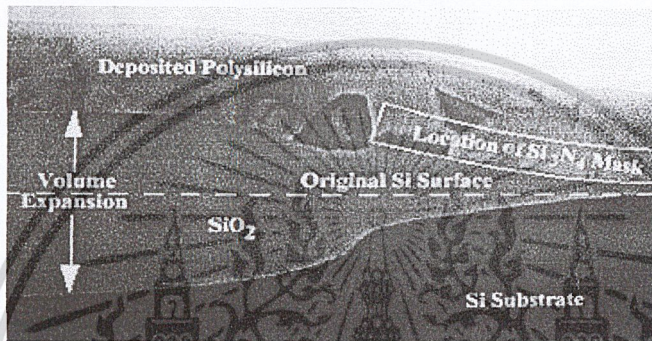
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูง พื้นผิวที่ได้ค่อนข้างเรียบกว่า กรณีของ Wet Oxidation แต่ ปฏิกิริยาการเกิดช้า และอัตราการเกิดต่ำกว่า

**ข้อดี** การสร้างชั้นซิลิคอนด้วยชั้นออกไซด์ด้วยวิธีนี้ จะให้ชั้นออกไซด์ที่มีความเป็นฉนวนสูงและมีคุณภาพดี เพราะมีความหนาแน่นสูง ทำให้สามารถสร้างเป็น Gate Oxide

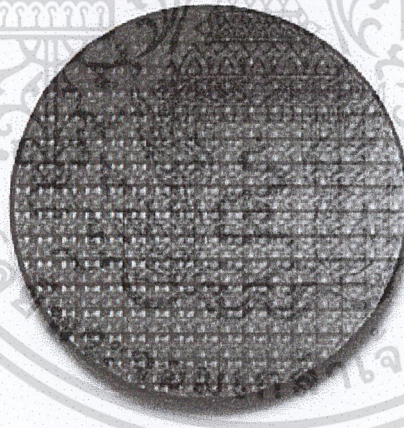
**ข้อเสีย** เนื่องจากชั้นตอนนี้ใช้ก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดการรวมตัวกับซิลิคอนได้ยากกว่าแบบ Wet ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นั้น จะต้องใช้เวลานานในการสร้าง จึงสร้างชั้นออกไซด์หนาได้ยาก



รูปที่ 4.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง



รูปที่ 4.4 การเกิดซิลิคอน ไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 4.5 แผ่นเวเฟอร์

#### ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการออกซิเดชัน

ระนาบของผลึกผลเนื่องจากระนาบผลึกพิจารณาจาก

- จำนวนพันธะของซิลิคอนที่มีต่อพื้นที่บนผิวหน้าของซิลิคอนที่แต่ละนาบ
- ทิศทางของผลึกมีผลกับค่าพลังงานกระตุ้นที่ใช้เริ่มปฏิกิริยา

ผลเนื่องจากสารเจือ

สารเจือที่ใช้โดยปกติคือธาตุหมู่ 3 และหมู่ 5 คือ โบรอน ฟอสฟอรัส อาร์เซนิก ซึ่งจะช่วยให้การเพิ่มอัตราการออกซิเดชันเมื่อมีความเข้มข้นปริมาณสูง ทำให้โครงสร้างพันธะของ  $\text{SiO}_2$  อ่อนลง ซึ่งทำให้  $\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{O}_2$  เข้าสู่  $\text{SiO}_2$  ได้โดยง่าย และแพร่ผ่านอย่างรวดเร็ว

ผลเนื่องจาก  $H_2O$

ผลเนื่องจากคลอรีน Cl เป็นตัวที่ช่วยแก้ไขคุณสมบัติของอุปกรณ์ให้ดีขึ้น ซึ่งได้มาจากการเป่าก๊าซ HCl, TCE, TCA ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชันด้วยเช่นกัน

ผลเนื่องจากความดัน จะเห็นว่าในกระบวนการสร้างชั้น Oxide ด้วยกระบวนการนั้น Thermal Oxidation จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป แต่ในการสร้างไดโอดแบบโลหะนั้นจะใช้ทั้งกระบวนการ Wet Oxidation และ Dry Oxidation โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

1. กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกรด HF
2. ล้างด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
3. ปรับอุณหภูมิในเตาให้คงที่ตามต้องการ
4. นำแผ่นผลึกซิลิคอนวางลงบนถาด (Boat) แล้วนำไปวางไว้ที่ปากควอทซ์ 5 นาที
5. ค่อยๆดัน Boat ให้เข้าไปกลางท่อควอทซ์อย่างช้าๆเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จนทำให้โครงสร้างผลึกเสียหาย
6. ทำการออกซิเดชันด้วยวิธีที่ต้องการ Wet Oxidation หรือ Dry Oxidation
7. ทิ้งแผ่นผลึกไว้เพื่อให้ได้ชั้นออกไซด์ขนาดตามที่ต้องการ
8. ค่อยๆดึง Boat ออกเหมือนขั้นตอนการนำเข้า

กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์นั้นมีประโยชน์คือ สามารถป้องกันสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ มาเกาะบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยการป้องกันสารเจือนี้ทำให้สามารถ การแพร่สารหรือฝังไอออนเข้าไปในแผ่นซิลิคอนได้ โดยส่วนที่ไม่ต้องการให้มีการแพร่ ก็จะมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบไว้ ส่วนที่ต้องการการแพร่ก็จะเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ไว้ด้วย กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี ในกระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อโลหะนั้น จะสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขนาด  $5000 \text{ \AA}$  ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Dry Oxidation ด้วย  $O_2$  1200cc/min 1 ชม. 1200 cc
2. Wet Oxidation ด้วย  $O_2$  1000cc/min 1.30 ชม. 1000 cc
3. Dry Oxidation ด้วย  $O_2$  1200cc/min 1 ชม. 1000 cc

เหตุผลที่ต้องสร้างชั้นตอน 3 ขั้นตอนข้างต้นคือ

1. Dry Oxidation ที่สร้างแบบ Dry Oxidation ก่อนเพราะออกไซด์แบบนี้มันต้องการให้ผิวหน้านั้นสมบูรณ์ ไม่เกิดการรั่วไหลของกระแส ถ้าสร้างแบบ Wet Oxidation นั้น อะตอมของธาตุอื่นจะปะปนอยู่ด้วยทำให้ผิวหน้าไม่สะอาดมากพอ

2. Wet Oxidation ที่สร้างแบบ Wet Oxidation เพราะในการสร้างชั้นออกไซด์ การสร้างแบบ Dry Oxidation นั้นจะใช้เวลานานมากกว่าแบบ Wet Oxidation มากๆ ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงใช้การสร้างแบบ Wet Oxidation แทน

3. Dry Oxidation ที่สร้างแบบ Dry Oxidation เพราะที่ผิวบนสุดนั้นชั้นออกไซด์ควรจะป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือได้ดี โดยการแพร่แบบ Dry Oxidation นั้นจะป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือได้ดีกว่า แบบ Wet Oxidation

หน้าที่ของ  $\text{SiO}_2$

1. ใช้เป็น Field Oxide ที่ความหนา  $3,000 - 10,000 \text{ \AA}$
2. ใช้เป็น Mask ในกระบวนการ Lithography ที่ความหนา  $2,000 - 5,000 \text{ \AA}$
3. ใช้เป็น Mask ในกระบวนการ การเจือสาร ที่ความหนา  $2,000 - 5,000 \text{ \AA}$
4. ปกป้องผิวหน้า Si ที่ความหนา  $2,000 - 5,000 \text{ \AA}$
5. แยกตัวอุปกรณ์ออกจากกัน ในกรณี LOCOS ที่ความหนา  $200 - 500 \text{ \AA}$

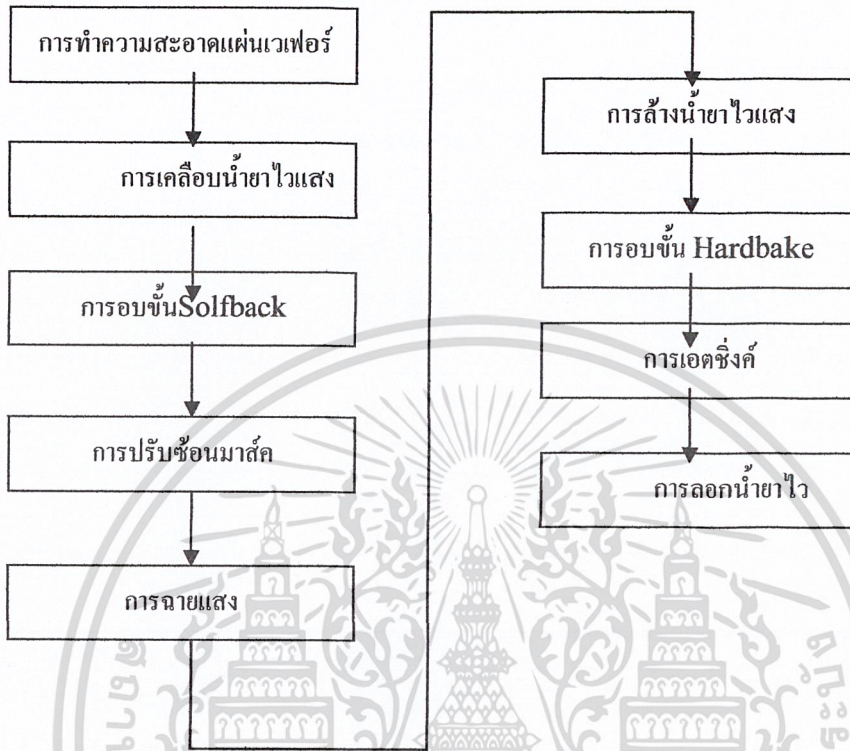
#### 4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) คือกระบวนการเกี่ยวกับการส่งผ่านลวดลาย (pattern) จากมาสก์ลงไปยังบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ กระบวนการ Photolithography ต้องการห้องสะอาดสำหรับปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอนในขั้นตอนนำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียที่เกิดขึ้นควรควบคุมให้ไม่เกิน 10 % ไม่เช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะใช้มาสก์ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50 % ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับกระบวนการ Photolithography การสร้างห้องสะอาดส่วนมากจะเป็นแบบ Vertical Laminar Flow ที่มีการกรองฝุ่นออกจากอากาศ เพื่อให้เป็นห้องสะอาดในระดับตั้งแต่ Class 10K – Class 1 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดง Class ต่าง ๆ ของห้องสะอาด

ลำดับชั้น ห้องสะอาด	จำนวนอนุภาคขนาด $0.5 \mu\text{m}$ ต่อลูกบาศก์เมตร	จำนวนอนุภาคขนาด $5 \mu\text{m}$ ต่อลูกบาศก์เมตร
10,000	10,000 (350,000)	65 (23,000)
1,000	1,000 (35,000)	6.5 (2,300)
100	100 (3,500)	0.65 (230)
10	10 (350)	0.065 (23)
1	1 (35)	0.0065 (2.3)

## กระบวนการ Photolithography Process โดยมีขั้นตอนพื้นฐานต่างดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process

### 4.4.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Cleaning)

ขั้นตอนแรกของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีคือการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารเคมี เพื่อ กำจัดสิ่งสกปรกต่างๆที่ติดอยู่บนผิวเวเฟอร์ เช่น โลหะ ผุ่นละออง สารอินทรีย์หรืออไอออนต่างๆ สิ่งสำคัญของขบวนการ Photolithography สารละลายที่สำคัญมากและใช้บ่อยที่สุดคือน้ำ DI(deionized)ซึ่งเป็นน้ำที่ทำให้บริสุทธิ์และผ่านตัวกรองหรือฟิลเตอร์เพื่อกรองผุ่นละออง อนุภาค และสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำDI ซึ่งน้ำ DI เป็นน้ำที่มีความต้านทานสูงมาก

### 4.4.2 การเคลือบสารไวแสง (Photoresist coating)

สารไวแสง แบ่งออกออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารไวแสงแบบลบ (Negative Photoresist)
2. สารไวแสงแบบบวก (Positive Photoresist)

สารไวแสงทั้งสองชนิด จะให้ผลในการทำงานตรงกันข้ามกัน กล่าวคือถ้าหากใช้ Negative Photoresist ส่วนใดที่ถูกแสงจะไม่ถูกลอกออกเมื่อถูก Development ส่วน Positive Photoresist ส่วนที่ถูกแสงจะถูกลอกออกเมื่อถูก Development

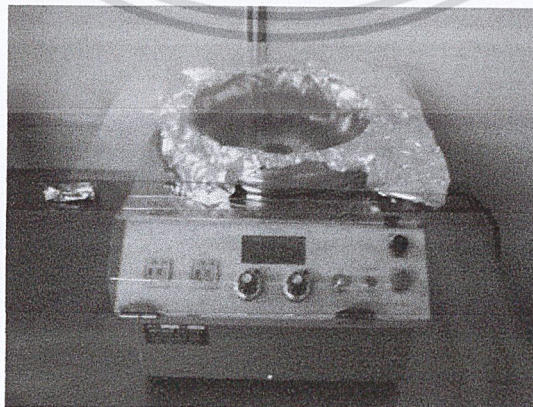
สิ่งสำคัญก่อนการเคลือบสารไวแสงคือแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาด ผิวหน้าและสร้างชั้นออกไซด์แล้ว อบในตู้อบประมาณ 30-60 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดลอกได้ง่าย ซึ่งการเคลือบสารไวแสงสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

แบบที่ 1 สปินเนอร์ (Spinner) เริ่มต้นโดยการหยดสารไวแสงลงบนแผ่นซิลิคอนที่ติดอยู่บนเป็นหมุนของเครื่องสปินเนอร์ โดยใช้ความเร็วรอบสูง ๆ เพื่อที่จะให้สารไวแสงเคลือบเป็นฟิล์มบาง ๆ บนแผ่นผลึกหนาประมาณ 1000-2000 อังสตรอม โดยใช้ความเร็วรอบ 3000-6000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำเกินไป ลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นผลึกจะเกิดการนูนตรงบริเวณกลางแผ่น แต่ถ้าใช้ความเร็วรอบสูงเกินไป ชั้นฟิล์มที่เคลือบก็จะกระจายไปนูนที่บริเวณขอบ และถ้าเคลือบหนาไปผิวฟิล์มจะหยาบไม่เรียบ โดยขั้นตอนในระหว่างการเคลือบสารไวแสงนี้ต้องระวังฝุ่นละอองอย่างมาก

แบบที่ 2 การเคลือบด้วยสเปรย์ (Spray Coating) มีหลายแบบส่วนมาใช้ภายในโรงงาน

แบบที่ 3 วิธีใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating) ซึ่งวิธีนี้จะใช้เคลือบเฉพาะตอนที่ตัดแยกชิพ โดยเคลือบหมดทั้งแผ่น 2 ด้าน แล้วนำไปทำการละลายเส้นที่จะทำการตัด ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวสำหรับใบมีเพชรตัด และยังเป็น การป้องกันฝุ่นและรอยเปื้อนต่างๆ จากการตัด ซึ่งส่วนมากจะใช้สารไวแสงแบบบวกเพราะถ้าใช้สารไวแสงแบบลบ ฝุ่นและจุดที่บวมแสงอาจทำให้เกิด Pinhole บนฟิล์ม ได้หลังจาก develop แล้ว

ซึ่งในขั้นตอนนี้เราได้ใช้น้ำยาไวแสงแบบบวก (AZ 1350) หลังจากที่เราทำการอบเสร็จก็จะนำมาเคลือบน้ำยาไวแสง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เราใช้วิธีสปินเนอร์ในการเคลือบน้ำยาไวแสง



รูปที่ 4.7 เครื่องสปินเนอร์

โดยเริ่มแรกให้เรานำแผ่นซิลิคอนที่ทำการอบเสร็จแล้วไปวางลงในจานหมุนในเครื่องสปินเนอร์ จากนั้นเราจะทำการเปิดสวิทช์ของปั๊มลม เพื่อทำการดูดแผ่นซิลิคอนให้อยู่กับที่ และไม่เกิดการหลุดของแผ่นขณะทำการหมุน แล้วใช้น้ำยาไวแสง หยดลงไปตรงกลางของแผ่นซิลิคอน 3-4 หยด แล้วเปิดเครื่องสปินเนอร์โดยใช้ความเร็วรอบครั้งแรกประมาณ 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 วินาที ซึ่งในรอบแรกจะทำการเพื่อเกลี่ยน้ำยาไวแสงให้กระจายไปทั่ว แล้วต่อด้วย 3000 รอบ/นาที อีก 30 วินาที เพื่อที่จะทำให้น้ำยาไวแสงที่เคลือบผิวหน้านั้นเรียบสม่ำเสมอ หลังจากรอบแรกเสร็จหากแผ่นซิลิคอนที่ได้ นั้น มีการกระจายของน้ำยาไวแสงที่ไม่สม่ำเสมอโดยอาจ จะมีการเกิดการนูนขึ้นตอนปลายของแผ่นหรือผิวหยาบไม่เรียบนั้น จะมีผลมาจากการหยดน้ำยาไวแสงมากเกินไป หรือใช้ความเร็วรอบในการหมุนที่ไม่เหมาะสม

#### 4.4.3 การอบชั้นSolfbake

การอบชั้น Solfbake จะช่วยในการยึดติดกับแผ่นซิลิคอนและช่วยในการลอกออก ชั้นตอนนี้จะใช้เวลาอบประมาณ 10 ถึง 30 นาที ในเตาที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศา ในอากาศหรือบรรยากาศไนโตรเจน

#### 4.4.4 การปรับซ็อนมาส์ค (Mask Alignment)

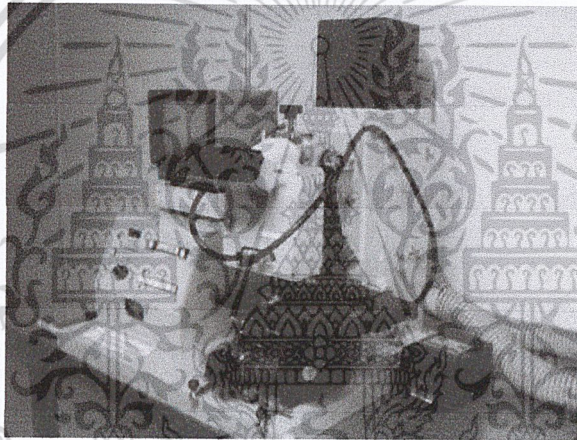
การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์ค โดยการนำกระจกโฟโตมาส์ค วางทับทับบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็กระจกโฟโตมาส์คชิ้นแรกสามารถทำได้โดยไม่มีการปรับซ็อนมาส์คทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวมบนแผ่นผลึกเลยแต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ถูกต้อง

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาส์คตั้งแต่มาส์ค 2 เป็นต้นไปก่อนการฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับซ็อนมาส์ค เพื่อให้ลวดลายบนกระจกมาส์คซ็อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ซึ่งจะทำการใช้ซอฟต์แวร์สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ได้ตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง และเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมากดังนั้นการปรับซ็อนจึงใช้อุปกรณ์ช่วยเรียกว่า ตัวปรับซ็อนมาส์ค ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆคือ นำแผ่นผลึกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนได้ในแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงนอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาส์คจะถูกยึดให้อยู่เหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาส์คพร้อมกับทำการปรับแผ่นเลื่อนแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงจนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาส์คซ็อนกันลงตรงตำแหน่งที่ถูกต้องจากนั้นปรับแผ่น

ผลึกเลื่อนขึ้นในแนวสูงจนแนบสนิทกับกระจกมาส์ค ดังนั้นเราก็จะได้ตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อเตรียมสู่ขั้นตอนการฉายแสงต่อไป

#### 4.4.5 การฉายแสง (Exposure)

การฉายแสง (Exposure) คือขั้นตอนที่ต่อจากการปรับชั้นอนมาส์ค (Alignment) วิธีการก็คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงย่านอุลตราไวโอเล็ตเอ็กโพสหรือฉายผ่านลวดลายฟิล์มโลหะบนกระจกมาส์คที่ทำการอัลไลน์กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ด้านบนมีน้ำยาไวแสงติดอยู่ แสงจะผ่านลวดลายหรือไม่ผ่านลวดลายฟิล์มโลหะด้านบนจะเป็นตัวบังแสงไว้ส่วนที่ผ่านได้จะมาทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสงหรือโฟโตริซิสบนผิวซิลิคอน การเอ็กโพสหรือการฉายแสงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งพอให้แสงทำปฏิกิริยากับโฟโตริซิสอย่างสมบูรณ์



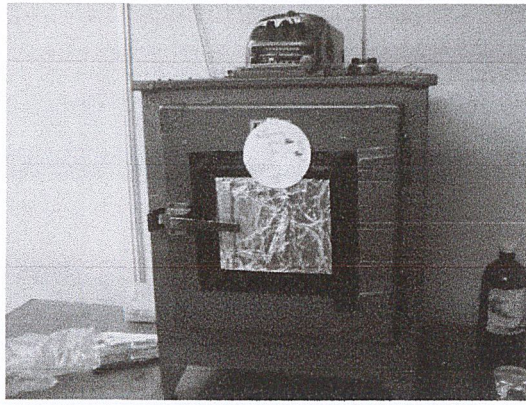
รูปที่ 4.8 เครื่องฉายมาร์ค (Mask Alignment)

#### 4.4.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

Development เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงแล้วด้วยน้ำยา Developer โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการ Develop ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่ จากนั้นจะทำการ Postbake เพื่อให้ส่วนที่เป็นฟิล์มแห้งและยึดเกาะติดกับแผ่นผลึกแน่นยิ่งขึ้นและเมื่อนำออกจากเตาอบแล้วควรนำไป Etching ทันทีไม่ควรปล่อยให้ฟิล์มทิ้งไว้นานเกินไป

#### 4.4.7 การอบชั้น Hardbake

หลังผ่านการฉายแสงและเคลือบลอกเฟรมที่ ขั้นตอน Hard baking จะช่วยทำให้โฟโตริซิสติดกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดีขึ้น ขั้นตอนนี้จะอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศา ถึง 180 องศา เป็นเวลา 20 ถึง 30 นาที



รูปที่ 4.9 เตาอบ

#### 4.4.8 การกัด (Etching)

การกัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การกัดด้วยสารละลายทางเคมี (Wet chemical etching) และการกัดโดยใช้ก๊าซหรือการกัดแบบกัดแห้ง (Dry etching)

การกัดคือการกัดชั้นป้องกันหรือซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องหรือพื้นที่ตามต้องการ สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีส่วนผสมหลักคือกรดไฮโดรฟลูอริกหรือ HF จะเป็นสารละลายที่กัดซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีอัตราการกัดอยู่ในช่วง 10 ถึง 100  $\mu\text{m}/\text{min}$  ที่ 25 องศาเราต้องคำนวณความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ให้เหมาะสมเพราะสารละลายทางเคมีจะกัดทุกทิศทุกทางเท่ากันหมดถ้าเราปล่อยให้กัดในเวลาที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดที่ด้านข้างทำให้ลวดลายเสียหายได้

หลังจากกัดชั้นซิลิคอนออกไซด์แล้วเราจะได้ช่องหรือลวดลายที่มีช่องหรือลวดลายตามมาส์คบนผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว

- Oxide Etching**
- จุ่มในสารละลาย Buffer 5 นาที อัตราการEtching  $1000\text{\AA}/\text{นาที}$
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่1
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่2
  - เป่าให้แห้งด้วย $\text{N}_2$

การกำจัดออกซิเจนออกจะใช้สารที่เรียกว่าAl-Etching โดยจะนำไปต้มให้อุ่นพอประมาณ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ต้องการกัดออกซิเจนส่วนที่ไม่ต้องการออกใส่ลงไป ซึ่งสักพักจะเห็นว่าน้ำนั้นจะขุ่นขึ้น และจะเห็นลายที่แผ่นปรากฏชัดเจน

- Al-Etching**
- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ40 องศา
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่1
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่2
  - เป่าให้แห้งด้วย $\text{N}_2$

#### 4.4.9 การล่อน้ำยาไวแสง

การล่อน้ำยาไวแสงออกจากแผ่นฟิล์มเป็นขั้นตอนต่อจากการ Etching โดยการจุ่มแผ่นฟิล์มลงในน้ำยาลอกฟิล์ม อาจเป็นสารเคมีหรือใช้พวกพลาสติกเพื่อทำให้ผิวของแผ่นฟิล์มสะอาดเตรียมนำไปแพร์สารเจือได้ ซึ่งถ้าผิวหน้าของซิลิคอนมีสิ่งสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพร์สารเจือ

เมื่อลอกชั้นสารไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์(Microscope) เพื่อดูว่าเกิดการกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่ติดไม่แน่นหรือเกิดการกัดมากเกินไปถ้าเสียหายมากอาจจะต้องกลับไปเริ่มทำใหม่

ในขั้นตอนนี้จะล่อน้ำยาไวแสงออก โดยใช้Acetone ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

1. Acetone1 1 นาที
2. Acetone2 1 นาที
3. DI 1 5 นาที
4. DI 2 5 นาที
5. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

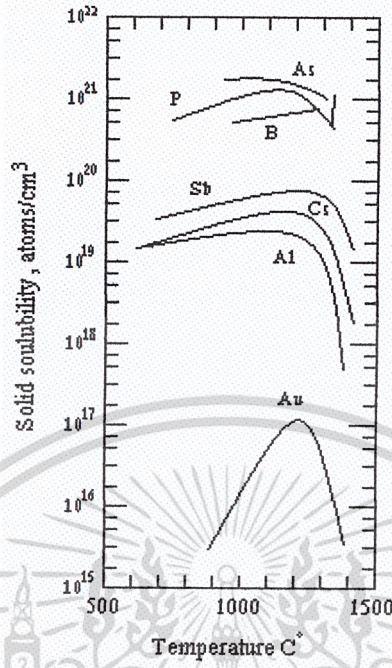
#### 4.4.10 กระบวนการแพร์สารเจือ (Deposition)

กระบวนการแพร์สารเจือเป็นกระบวนการเป็นกระบวนการแพร์สารเจือลงในแผ่นซิลิคอน ด้วยวิธีการแพร์ที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ(Source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรองและถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็น ขึ้น

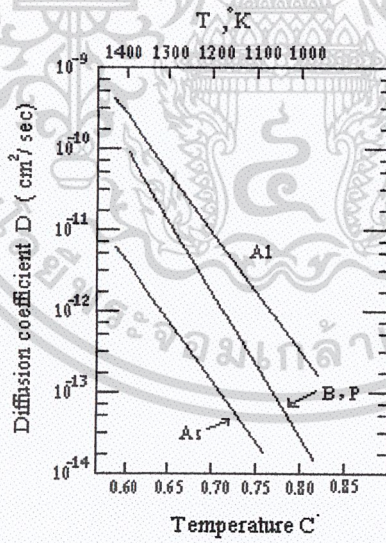
ขั้นตอนการแพร์สารเจือทำได้โดยกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งแหล่งสารเจือ โบรอน(Boron source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด พี และใช้ฟอสฟอรัส ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปในบรรยากาศของสารเจืออะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่เข้าไปยังแผ่นฐานรองความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการแพร์มีอิทธิพลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพร์ ในกระบวนการแพร์สารเจือแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ การแพร์สารเจือ ขึ้นต้น (Pre-deposition) และการขับลึก (Drive-in)

##### 1.การแพร์สารเจือขั้นต้น (Pre-deposition)

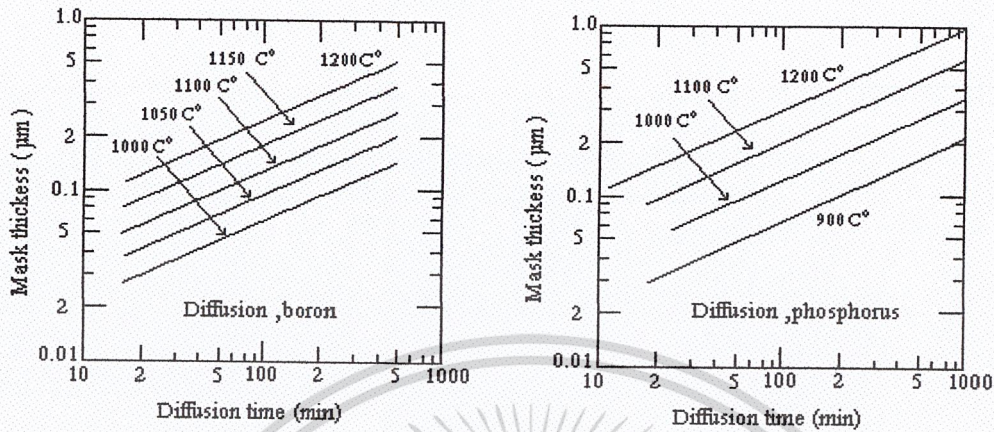
การแพร์สารเจือขั้นต้น ในอุณหภูมิสูงเป็นการควบคุมปริมาณสารเจือ โดยการควบคุมเวลา และอุณหภูมิในการแพร์สารเจือ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆจะมีปริมาณสารเจือสูงสุดในการแพร์เข้าไปยังผลึกฐานรอง ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการแพร์เข้าไปในของแข็ง(Solid solubility) และปริมาณสารเจือที่ผลึกฐานรองจะเรียกว่าความเข้มข้นผิว (Surface concentration) โดยความสัมพันธ์ของค่า Solid solubility กับอุณหภูมิในการแพร์สามารถแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.11 (ก.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอุณหภูมิต่ำ

(ข.) ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส

สำหรับความสามารถในการแพร่ของสารเจือ เช่น As,P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิคอน ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นหน้ากากเพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของฐานรอง โดยความหนาของชั้นซิลิคอนที่ใช้พิจารณาจาก อุณหภูมิ เวลาและสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข)

## 2. การขัปลึ้ก

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารเจือบริเวณผิวที่ได้จากขั้นตอนการแพร่ขั้นต้น แพร่ลงไปในเนื้อสารมากขึ้น ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นซิลิคอน

ดังนั้นในการสร้างไดโอดแบบรอยต่อโลหะครั้งนี่จึงได้เลือกใช้การแพร่สารเจือ 2 ขั้นตอน คือ ประกอบไปด้วย การแพร่แบบ Deposition และ Drive-in ซึ่งรายละเอียด มีดังนี้

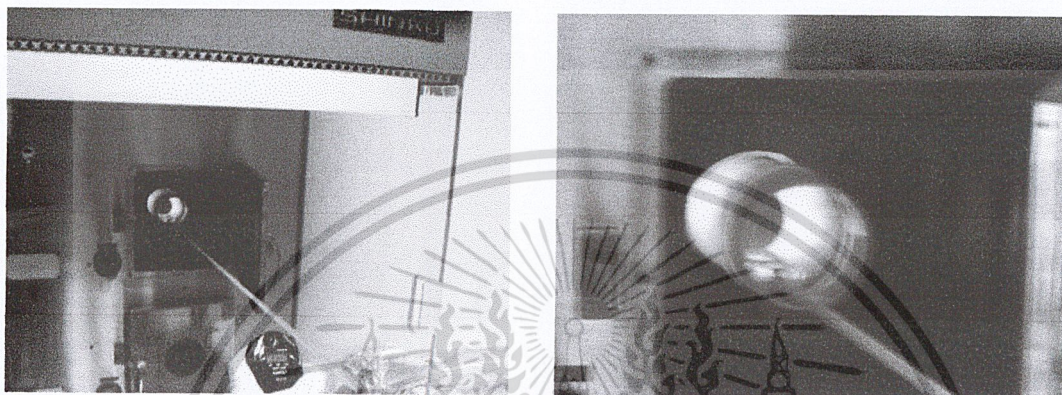
การแพร่แบบ Deposition นี้จะใช้ Solid หรือแผ่นที่เป็นสารเจือที่ต้องการแพร่ แพร่ไปยังบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

- หลังจากเตรียมแผ่นและสารเจือที่แพร่เสร็จเรียบร้อยแล้ว
- จากนั้นก็นำถาดค่อยๆเข้าไปในเตาเหมือนกระบวนการสร้างชั้นออกไซด์
- ถ้าเป็นสารเจือแบบโบรอนจะต้องทำการ Activate ก่อน โดย Flow O<sub>2</sub> 1000 cc

เป็นเวลา 20 นาที เพื่อจะให้แผ่นโบรอนกลายเป็น B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพื่อสารโบรอนจะได้แพร่ได้ แต่ถ้าเป็นสารเจือแบบฟอสฟอรัสสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้เลย

- Flow N<sub>2</sub> 800 cc 20 นาที ที่ใช้ ก๊าซ N<sub>2</sub> เพราะก๊าซนี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งอื่นๆ

- Flow  $O_2$  1000 cc 10 นาที เพื่อที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่มีการการแพร่สารเจือเข้าไป จะมีสารเจือตกค้างอยู่บนผิวหน้าและการที่จะทำให้ผิวหน้าสะอาดนั้นทำได้ยากจึงมีการใช้ก๊าซ  $O_2$  เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเจือที่อยู่บนผิวหน้า ซึ่งจะช่วยให้การทำความสะอาดได้สะอาดขึ้นมาก



รูปที่ 4.12 เตาสำหรับแพร่สารเจือ

ส่วนการแพร่แบบ Drive in จะทำหลังจากการแพร่แบบ Depositive แล้วซึ่งหลังจากที่ได้แพร่แบบ Depositive แล้ว สารเจือที่เข้ามาอยู่ในแผ่นจะรวมตัวกัน ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้ความร้อนในการกระจายสารเจือที่รวมกลุ่มกันอยู่ออกไป และทำให้สารเจือเคลื่อนที่ลึกลงไปในผิวอีก อีกทั้งจะทำการสร้างชั้นออกไซด์ไปในตัวด้วย

- Dry Oxidation  $O_2$  1200 cc/min เป็นเวลา 15 นาที
- Wet Oxidation  $O_2$  1000 cc/min เป็นเวลา 30 นาที
- Dry Oxidation  $O_2$  1200 cc/min เป็นเวลา 15 นาที

#### 4.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process)

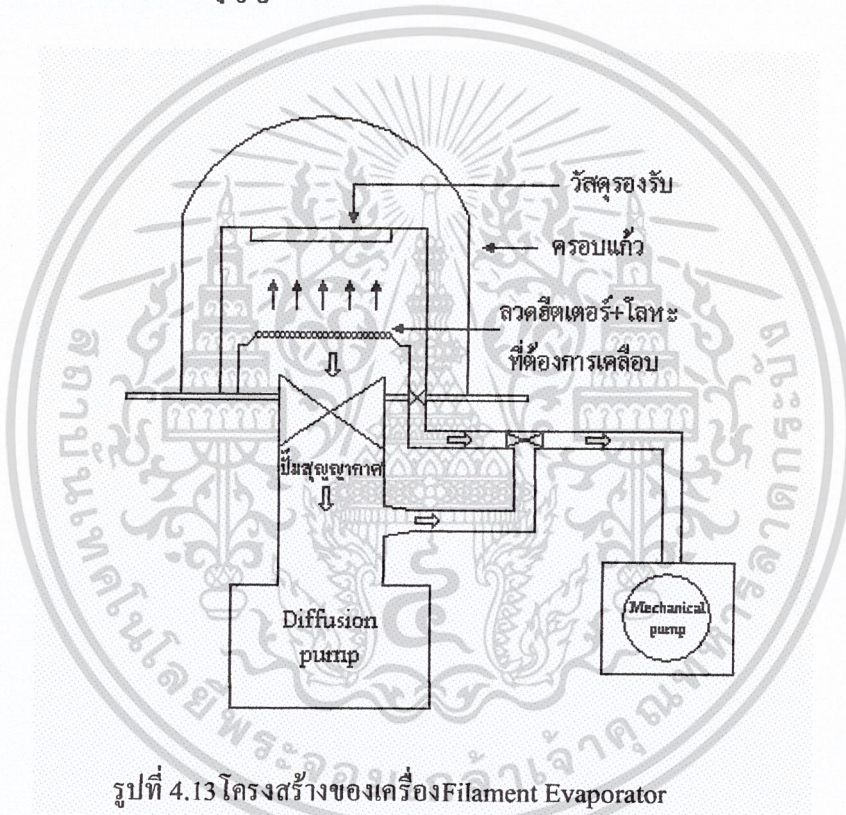
ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวด้วยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนตามลำดับขั้นตอนต่างๆจนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้จะยังคงแยกกันอยู่ในสภาพยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้จำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process) ก่อน

กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process) คือกระบวนการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายใน สำหรับการเลือกโลหะเพื่อใช้เคลือบบนแผ่นซิลิคอนเพื่อให้เป็นรอยต่อโอห์มมิกรอยต่อโอห์มมิก (Ohmic contact) หรือแถบตัวนำ

เชื่อมต่อภายใน ของวงจรรวมควรมีคุณสมบัติเช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับผิวซิลิคอนได้ออกไซด์และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ได้แก่ อะลูมิเนียม (AL), ทอง (Au) และเงิน Ag เป็นต้น

เทคนิคในกระบวนการเมทัลไลเซชันใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศ โดยใช้เทคนิคกระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลของการแพร่กระจายไอออนแต่มีข้อเสียที่อายุการใช้งานของไส้หลอดจะสั้น สำหรับการเคลือบโลหะทำได้โดยทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจากไส้ที่ทำจากทังสเตน (Tungsten) หรือ (Molybdenum)

#### เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

เมื่อไส้หลอดถูกทำให้ร้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก ไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไหลผ่านไส้ เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้ หลอมตั้งเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็น ไอฟุ้งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางใน Chamber

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า ระเหยเป็น ไอก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ไส้ต้องพิจารณาให้มีขนาดพอเหมาะ สมกับสารที่จะใช้ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้

ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการและพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร Al,Au,Ag,Pd เป็นต้น

ซึ่งการนำโลหะมาเคลือบเพื่อสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ให้กับไดโอดแบบรอยต่อโลหะครั้งนี้มีขั้นตอนการปฏิบัติ คือ

- เลือกใช้โลหะที่จะใช้ทำการแพร่ซึ่งก็คือ อลูมิเนียม จากนั้นนำมาตัดเป็นส่วนๆ โดยจะยาวเส้นละ 1 ซม. จำนวน 7 เส้น แล้วนำลวดอลูมิเนียมที่ตัดออกมานี้มางอเพื่อจะนำไปแขวนได้ หลังจากนั้นก็จะนำลวดอลูมิเนียมนี้ไปทำความสะอาด โดยนำไปจุ่มลงในบัฟเฟอร์เพื่อกัดออกไซด์ที่เคลือบออก โดยทิ้งไว้จนลวดนั้นขาว แล้วนำไปจุ่มในน้ำ DI เป่าให้แห้ง

- นำใส่หลอดทั้งสแตนมาทำความสะอาด โดยทำการต้ม Tricolor แล้วใส่ลวดลงในหลอดแก้วที่สะอาดจากนั้นนำไปจุ่มลงใน Tricolor จากนั้นนำไป Ultrasonic ใน Acetone เป็นเวลา 3 นาที

- ทำการเตรียมเครื่อง Evaporation นำอุปกรณ์ที่จะใช้ไปวางบนตำแหน่งต่างๆ ให้เสร็จแล้วทำให้ภายในนั้นเป็นสุญญากาศ ซึ่งจะใช้ grease ทาที่ขอบยางของระฆัง แล้วปิดลง แล้วก็ทำการสูบอากาศออก เพื่อให้ภายในเป็นสุญญากาศ ซึ่งจะสามารถตรวจสอบดูได้ว่าเป็นสุญญากาศหรือไม่ก็ดูได้จาก Grislier ถ้ากดแล้วยังเป็นสีม่วงแสดงว่ายังมีอากาศอยู่ จากนั้นเมื่อเป็นสุญญากาศแล้วก็ลดความดันลงเรื่อยๆ จนมีค่าประมาณ  $10^{-6}$  Torr จากนั้นจะทำการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทั้งสแตนเป็นจำนวนมากซึ่งจะเกิดความร้อนขึ้น ทำให้อลูมิเนียมที่แขวนไว้นั้นระเหยกลายเป็นไอแล้วฟุ้งกระจายไปทั่วซึ่งจะทำให้อลูมิเนียมนี้ไปเคลือบบนแผ่นซิลิคอนได้

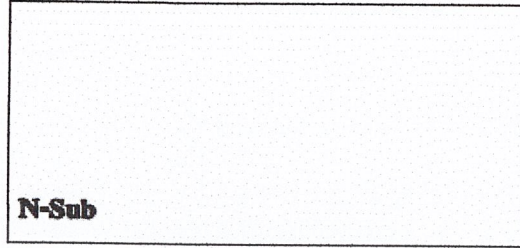
ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำหลังจากที่ทำการแพร่สารเจือเสร็จแล้วนำไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อชั่งคอนแทคแล้วจึงนำมาเข้าสู่กระบวนการ Evaporation

#### 4.7 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

กระบวนการซินเตอร์ริงเป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที โดยมีอัตราการ Flow 1 ลิตร/ นาที เพื่อให้ผิวสัมผัสระหว่างซิลิคอนกับอลูมิเนียมเป็นผิวสัมผัสที่ดี ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้เทอร์โมคัปเปิล เป็นตัววัดอุณหภูมิ

ซึ่งขั้นตอนนี้หลังจากทำกระบวนการ Evaporation เสร็จแล้ว ให้นำไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีและการ Al-Etching และหลังจากผ่านกระบวนการนี้เสร็จแล้วก็จะสิ้นสุดขั้นตอนในการสร้างไดโอดแบบรอยต่อโลหะ

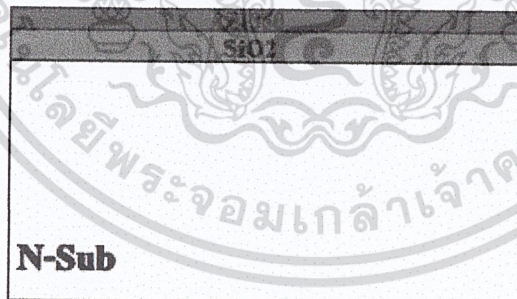
#### 4.8 สรุปกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อโลหะ



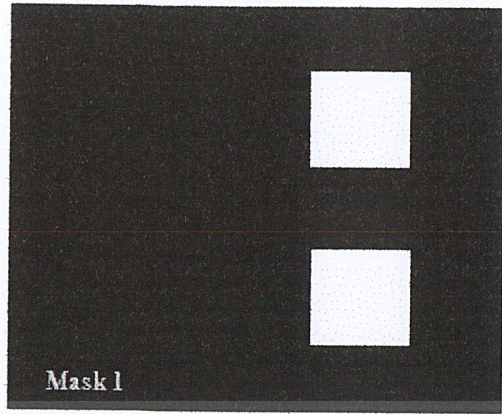
รูปที่ 4.14 แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น



รูปที่ 4.15 สร้าง SiO<sub>2</sub>

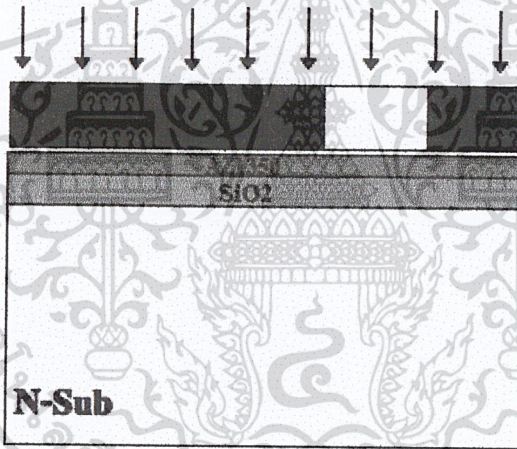


รูปที่ 4.16 เคลือบน้ำยาไวแสง AZ 1350

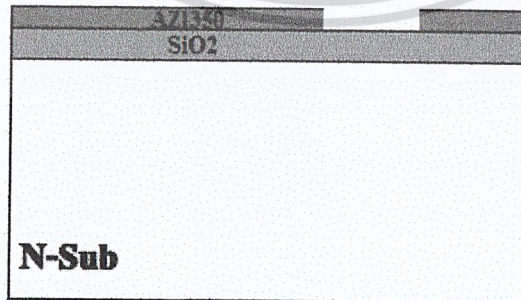


รูปที่ 4.17 Mask 1

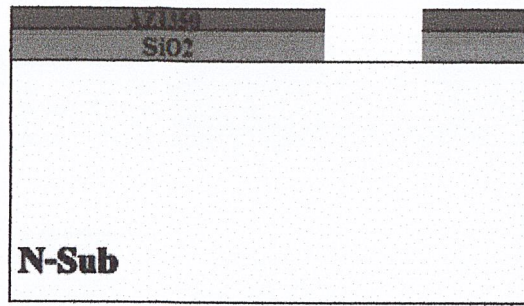
อัลตราไวโอเลต



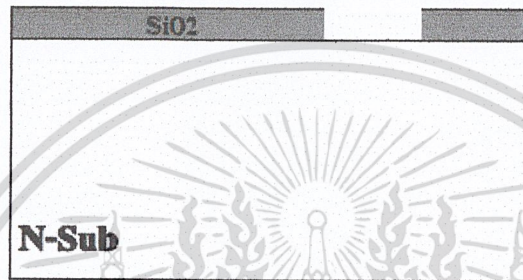
รูปที่ 4.18 ฉายมาร์ค 1



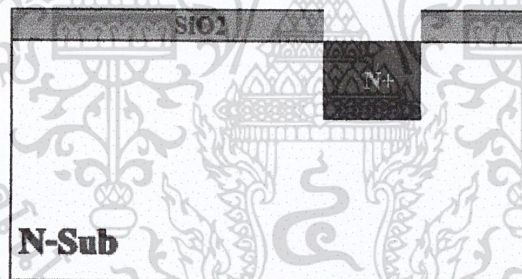
รูปที่ 4.19 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Develop



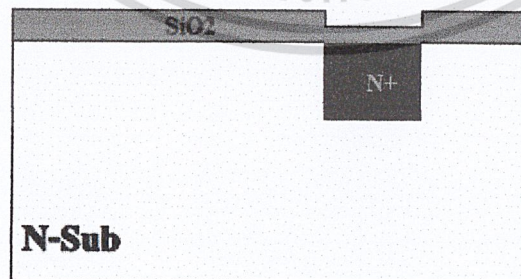
รูปที่ 4.20 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Etching



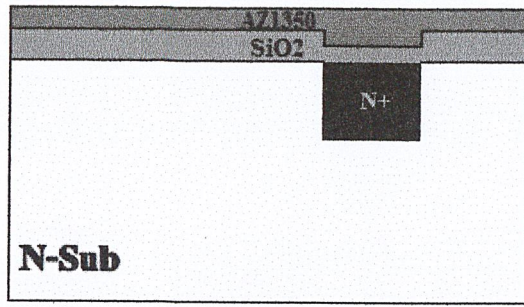
รูปที่ 4.21 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Photo resists Removal



รูปที่ 4.22 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการแพร่สารเจือชนิด N



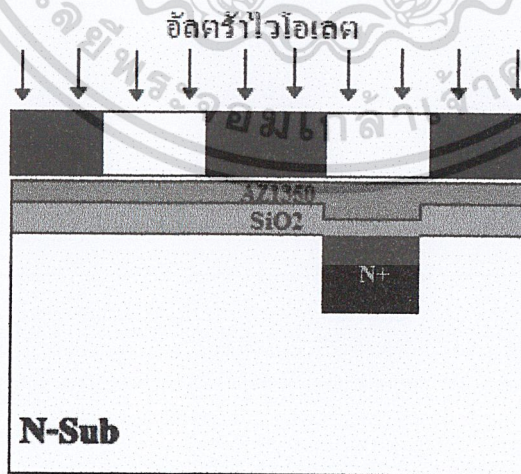
รูปที่ 4.23 แผ่นซิลิกอนหลังจากการ Flow  $O_2$  ปิดปากหลุม แบบ Dry Wet Dry



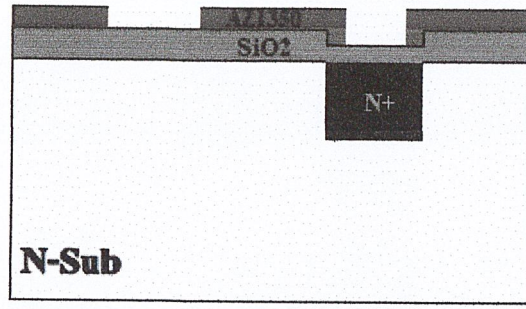
รูปที่ 4.24 เคลื่อนย้ายไอแสง AZ 1350



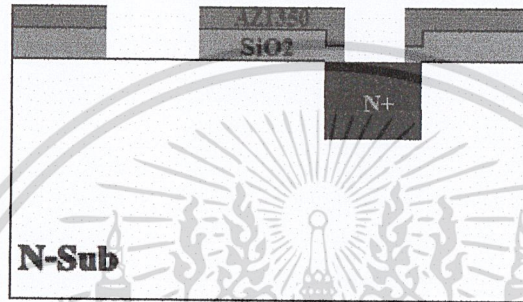
รูปที่ 4.25 Mask 2



รูปที่ 4.26 ฉายมาร์ค 2



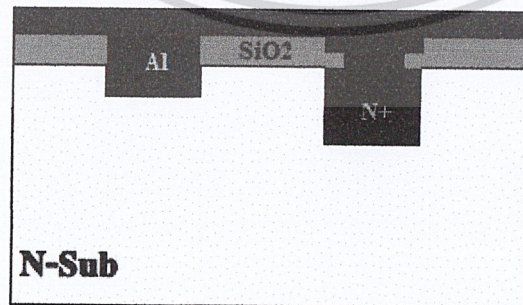
รูปที่ 4.27 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Develop



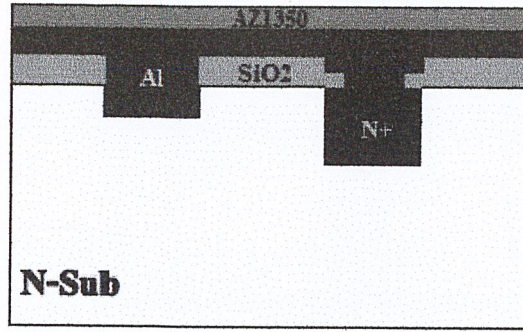
รูปที่ 4.28 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Etching



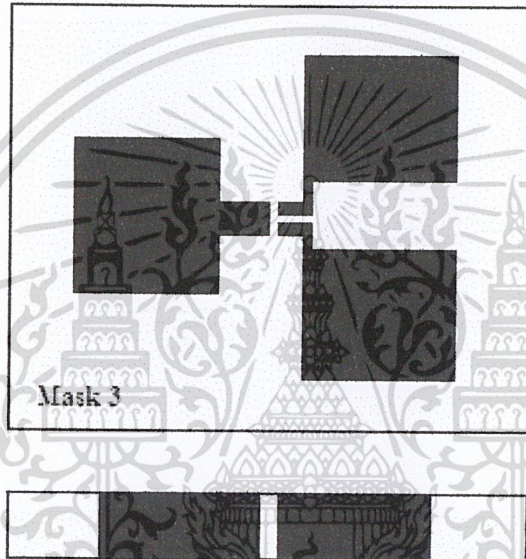
รูปที่ 4.29 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Photo resists Removal



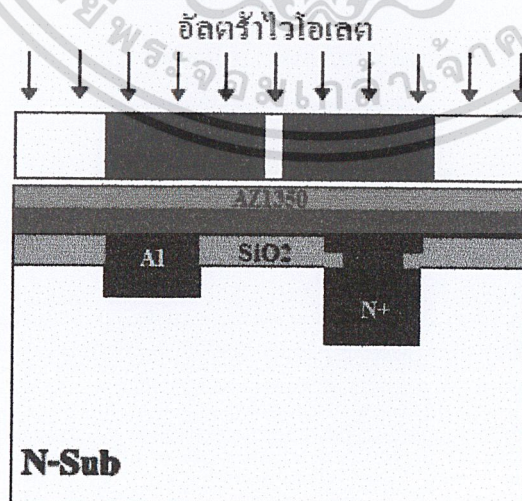
รูปที่ 4.30 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการ Evaporation เพื่อทำขั้วของแมกนีโดไดโอด



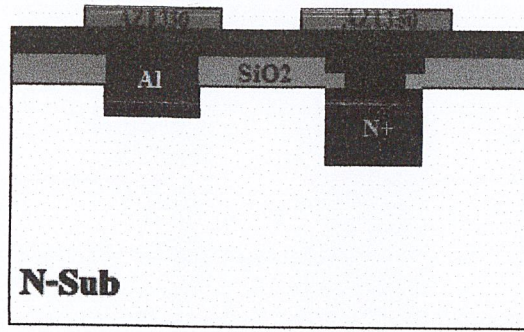
รูปที่ 4.31 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการเคลือบน้ำยาไวแสง



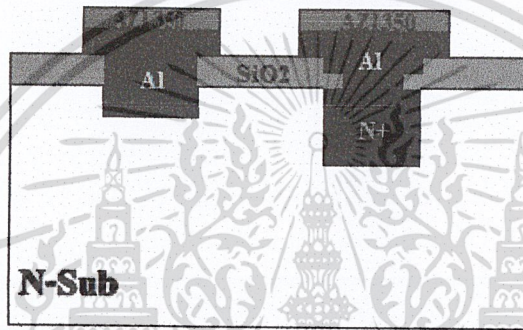
รูปที่ 4.32 Mark 3



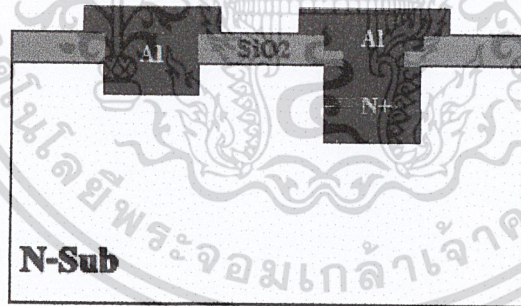
รูปที่ 4.33 ฉายมาร์ค 3



รูปที่ 4.34 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Develop



รูปที่ 4.35 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Al Etching



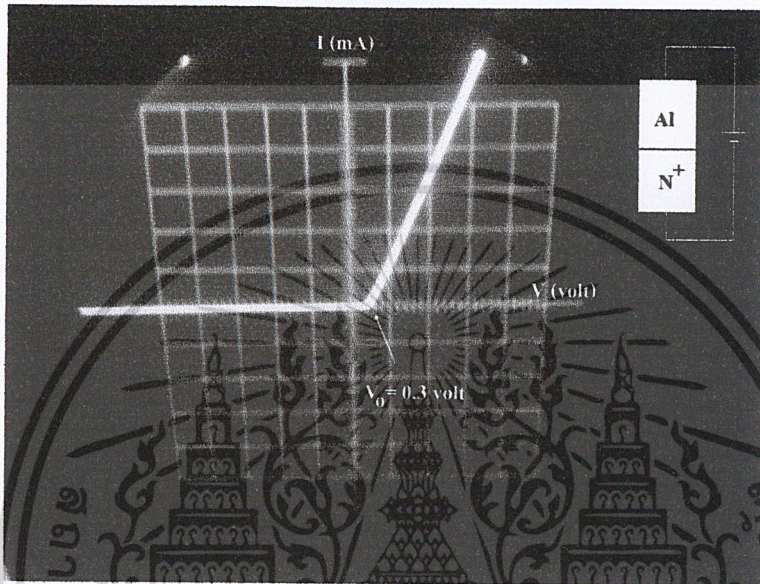
รูปที่ 4.36 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการ Photo resists Removal ได้แมกนีโตไดโอดอย่างสมบูรณ์

## บทที่ 5

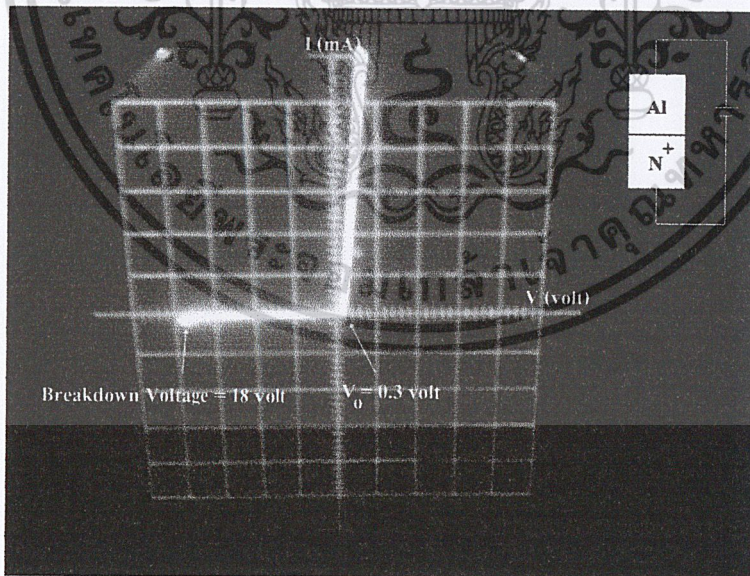
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 ผลการวัดคุณสมบัติเบื้องต้นของเมกนีโตไดโอด

##### 5.1.1 วัดคุณสมบัติความเป็นไดโอด (N+ กับ Al)



(ก.)



(ข.)

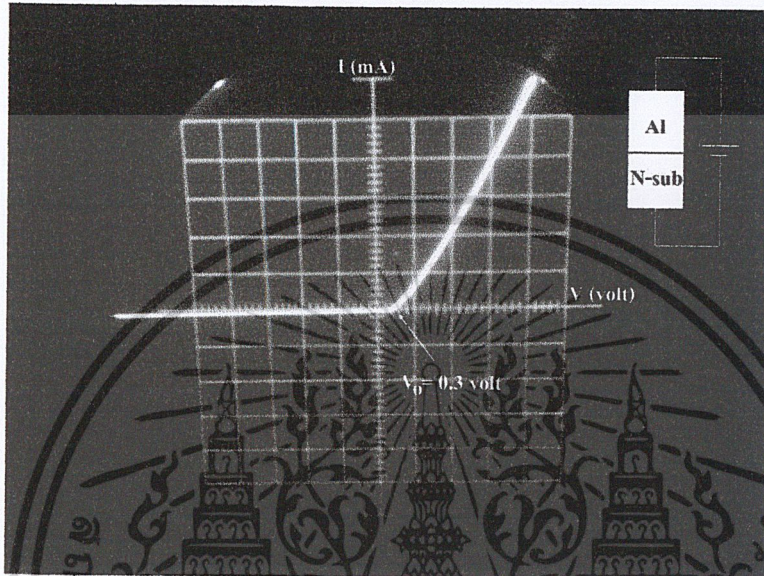
รูปที่ 5.1 ผลการวัด N+ กับ Al

(ก.) Forward Bias 1 volt/div, 0.5 mA/div,  $V_0 = 0.3$  volt

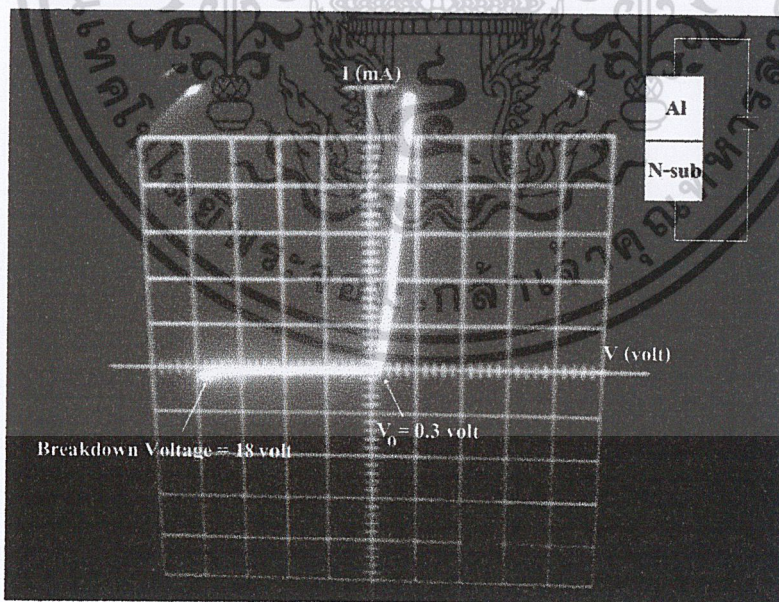
(ข.) Breakdown voltage 5 volt/div, 0.5 mA/div,  $V_{BD} = 18$  volt

จากรูปที่ 5.1 (ก.) และ (ข.) เป็นกราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดแบบรอยต่อโลหะ โดยวัดระหว่างขั้วอานิน (Al) และคาโทด ( $N^+$ ) ซึ่งให้แกน X เป็นแรงดันและแกน Y เป็นกระแส พบว่ามีแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ 0.3 โวลต์ และมีแรงดันพังทลายเท่ากับ 18 โวลต์

### 5.1.2 วัดคุณสมบัติรอยสัมผัสเรกติไฟร์ (Rectifier Contact or Schottky Contact) (Al กับ N-sub)



(ก.)



(ข.)

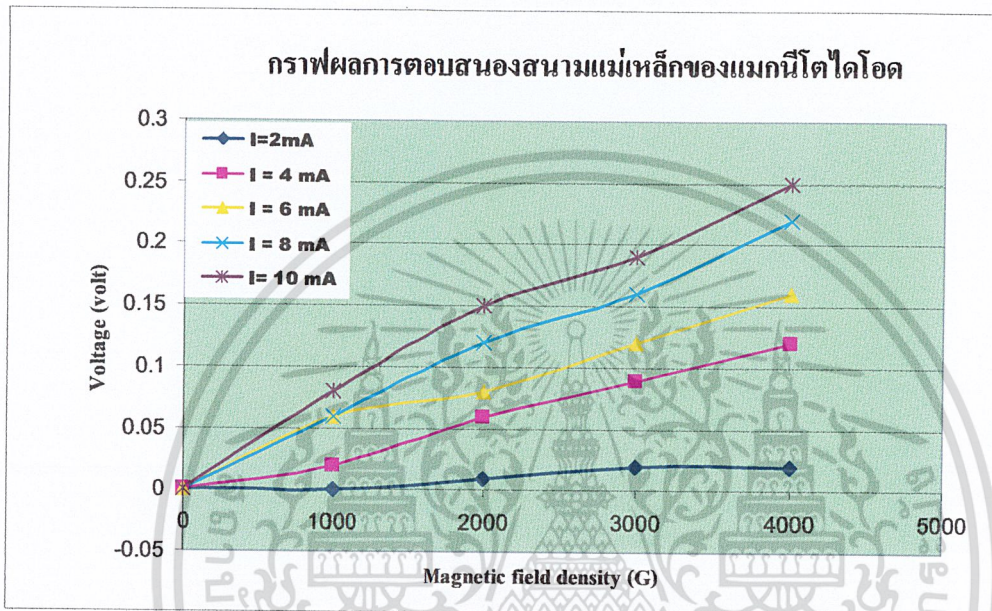
รูปที่ 5.2 กราฟคุณสมบัติของรอยสัมผัสรีดกึ่ง (Al กับ N-substrate)

(ก.) Forward Bias 1 volt/div, 0.5 mA/div,  $V_0 = 0.3$  volt

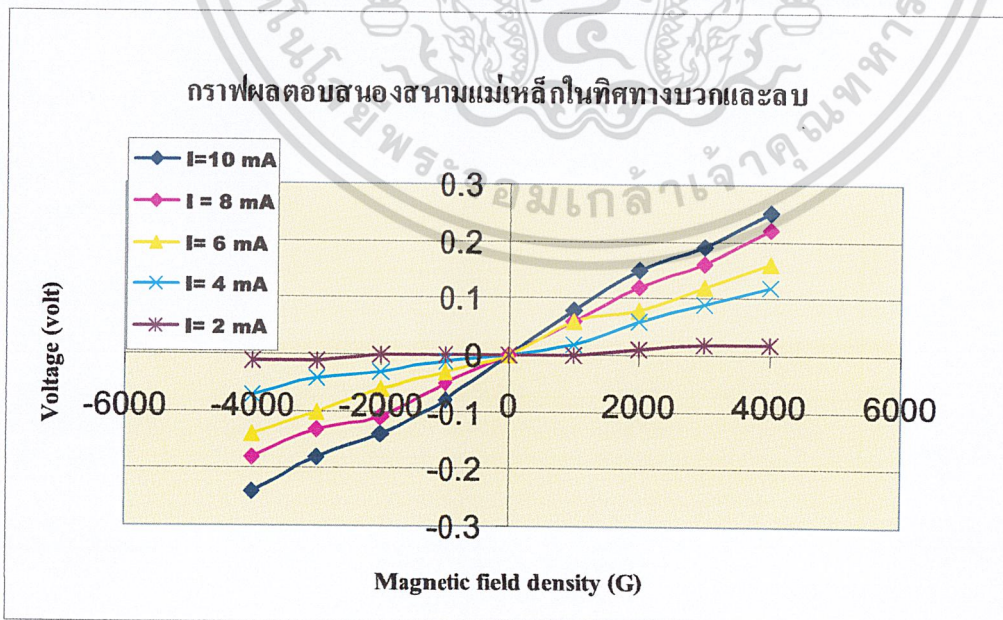
(ข.) Breakdown voltage 5 volt/div, 0.5 mA/div,  $V_{BD} = 18$  volt

รูปที่ 5.2 เป็นกราฟแสดงรอยสัมผัสแบบข้อต่อกึ่ง โดยทำการวัดรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม (Al) กับฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น (N-substrate) ซึ่งให้แกน X เป็นแรงดันและแกน Y เป็นกระแส พบว่ามีแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ 0.3 โวลต์ และมีแรงดันพังทลายเท่ากับ 18 โวลต์

## 5.2 การวัดการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด



รูปที่ 5.3 กราฟคุณสมบัติการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง ด้านหน้า



รูปที่ 5.4 กราฟคุณสมบัติการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งในทิศทางบวกและลบ

รูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยรูปที่ 5.3 ทำการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางบวก และรูปที่ 5.4 ทำการทดลองตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้งในทิศทางบวกและลบ เมื่อนำมาเขียนกราฟจะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีมาก อุปกรณ์แมกนีโตก็สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดี และเช่นเดียวกัน เมื่อให้กระแสไหลผ่านตัวอุปกรณ์ในปริมาณมาก ก็สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดีเช่นกัน

### 5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการนำแมกนีโตไดโอดไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กนั้น เป็นการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง

จากรูปที่ 3.20 (ก.) ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านและได้รับการไบอัสพาหะจะเคลื่อนที่จากอานโอดไปแคโทด ทั้งสองเท่าๆกัน ทำให้กระแสไดโอดไม่เกิดความต่าง เมื่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านในทิศทาง  $-Z$  ดังรูปที่ 3.20 (ข.) จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-X$  โดยแรงนี้จะกระทำกับพาหะให้เบี่ยงเบนไปในทิศเดียวกับแรงทำให้เกิดความต่างของกระแสไดโอดเกิดขึ้น

กระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสองนั้นจะเกิดความไม่สมดุลขึ้น ทำให้กระแส  $I_{D2}$  มีค่ามากกว่ากระแส  $I_{D1}$  เช่นกัน ให้กระแส  $I_{D1}$  มีค่าความหนาแน่นมากกว่ากระแส  $I_{D2}$  ในทางกลับกันเมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านในทิศทางออกในทิศ  $Z$  แรงลอเรนซ์ก็จะเคลื่อนที่ในทิศทาง  $Y$  เมื่อเกิดแรงลอเรนซ์จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแส ความหนาแน่นของกระแส  $I_{D2}$  มีค่ามากกว่ากระแส  $I_{D1}$  เช่นกัน

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

#### สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อโลหะที่อุปรกรณ์แมกนีโตที่มีความกว้างระหว่างแอโนดกับแคโทด (W) และความยาวระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด (L) เท่ากับ 50 ไมครอน

ตามหลักกระบวนการสร้างไดโอด ใต้ แมกนีโตไดโอดที่มีคุณสมบัติ คือ ไดโอดเริ่มนำกระแสเมื่อให้แรงดันไบอัสที่ 0.3 โวลต์ มีแรงดันพังทลาย ที่ 18 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของไดโอดแบบรอยต่อโลหะ (metal junction diode) สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด โดยการวัดแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็ก ที่กระแสค่าแตกต่างกัน และที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่างกันด้วย

พิจารณาที่กระแสคงที่ค่าหนึ่งจากกราฟผลการทดลอง พบว่าเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น แมกนีโตไดโอดจะสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าที่ความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยๆ และ เมื่อพิจารณาที่ความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ค่าหนึ่งพบว่า เมื่อกระแสเพิ่มขึ้น แมกนีโตไดโอดจะสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าที่กระแสค่าน้อยๆ

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า แมกนีโตไดโอดสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้จริง และเมื่อป้อนกระแสมากก็ยังสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดี ความเข้มสนามแม่เหล็กมาก ก็สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดีเช่นกัน

### บรรณานุกรม

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M Paranjape, '2D integrate magnetic Field sensor in CMOS technology,' Circuit Syst.(1989)701-704.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals." Sensors and ActuatorsA, 58(1997) 137-140
- [3] R.S. Popovic, "The vertical Hall-effect Device." IEEE Electron Device Lett, vol. EDL-5, pp.357-358.1984
- [4] Henry p. Baltes, "Integrate Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Trans. Electron Device, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986.
- [5] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrate Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [6] H.P. Baltes, R.S. Popovic, Integrate semiconductor magnetic field sensors, Proc, IEEE 74(8)(1986) 1107-1132.
- [7] H. Pfeleiderer, "Magneticdiode model, Solid-State Electron.," vol.15, p.335, 1972.
- [8] O.S. Lutes, P.S. Nussbaum, and O.S. Aadland, "Sensitivity limit in SOS magnetodiodes," IEEE Trans, Electron Devices, vol.ED-27, p.68, 1979.
- [9] A. Mohaghaegh, S. Crjistoloveanu, and J. De Poncharra, " Double-injection phenomena under magnetic field in SOS film: A new generation of magneto sensitive microdevices," IEEE Trans. Electron Devices., vol.ED-28, p. 237, 1981.



# 1.คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน

Properties of Si at 300 K	
Properties	Si
Atoms/cm <sup>3</sup>	5.010 <sup>22</sup>
Atomic weight	28.09
Breakdown field, V/cm	~310 <sup>5</sup>
Crystal Structure	Diamond
Density, g/cm <sup>3</sup>	2.328
Distance between neighboring atoms, nm	0.2328
Effective density of states	
Valence band, cm <sup>3</sup>	1.0410 <sup>19</sup>
Conduction band, cm <sup>-3</sup>	2.810 <sup>19</sup>
Effective mass, m*/m <sub>0</sub>	
Electron	m* <sub>e</sub> =0.98
	m* <sub>e</sub> =0.19
Holes	m* <sub>lh</sub> =0.16
	m* <sub>hh</sub> =0.49
Electron affinity, V	4.05
Energy gap, eV	1.12
Index of refraction	3.42
Intrinsic carrier concentration, cm <sup>-3</sup>	1.4510 <sup>10</sup>
Intrinsic Debye length, nm	24
Intrinsic resistivity, W-cm	2.310 <sup>5</sup>
Lattice constant, nm	0.5431
Linear coefficient of thermal expansion, cm/(cm-K)	2.610 <sup>-6</sup>
Melting point, °C	1415
Minority-carrier lifetime, s	2.510 <sup>-3</sup>
Mobility, cm <sup>2</sup> /(V.s)	

Properties	Si
Electron	1500
Holes	475
Optical phonon energy, eV	0.063
Phonon mean free path, nm	7.6 (electron) 5.5 (hole)
Poisson's ratio	0.42
Relative permittivity	11.9
Specific heat, J/(g.K)	0.7
Thermal conductivity, W/(cm-K)	1.5
Thermal diffusivity, cm <sup>2</sup> /s	0.9
vapor pressure, Pa	1 at 1659 °C 10 <sup>-6</sup> at 900 °C
Young's modulus, g/cm	1.08910 <sup>9</sup>

## 2. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิกอนไดออกไซด์

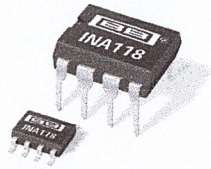
Properties of SiO <sub>2</sub> at 300 K	
Properties	SiO <sub>2</sub>
Density, g/cm <sup>3</sup>	2.2
DC resistivity, cm.cm	10 <sup>14</sup> -10 <sup>16</sup>
Dielectric strength, V/cm	~10 <sup>7</sup>
Energy gap, eV	9
Infrared absorption band, cm	9.3
Melting point, °C	~1600
Refraction index	1.46
Relative permittivity (dielectric constant)	3.9
Structure	Amorphous
Thermal expansion coefficient, K <sup>-1</sup>	510 <sup>-7</sup>

Thermal conductivity, W/(cm.K)	0.014
--------------------------------	-------



# Datasheet





INA118

## Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIER

### FEATURES

- LOW OFFSET VOLTAGE: 50µV max
- LOW DRIFT: 0.5µV/°C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 5nA max
- HIGH CMR: 110dB min
- INPUTS PROTECTED TO ±40V
- WIDE SUPPLY RANGE: ±1.35 to ±18V
- LOW QUIESCENT CURRENT: 350µA
- 8-PIN PLASTIC DIP, SO-8

### APPLICATIONS

- BRIDGE AMPLIFIER
- THERMOCOUPLE AMPLIFIER
- RTD SENSOR AMPLIFIER
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION

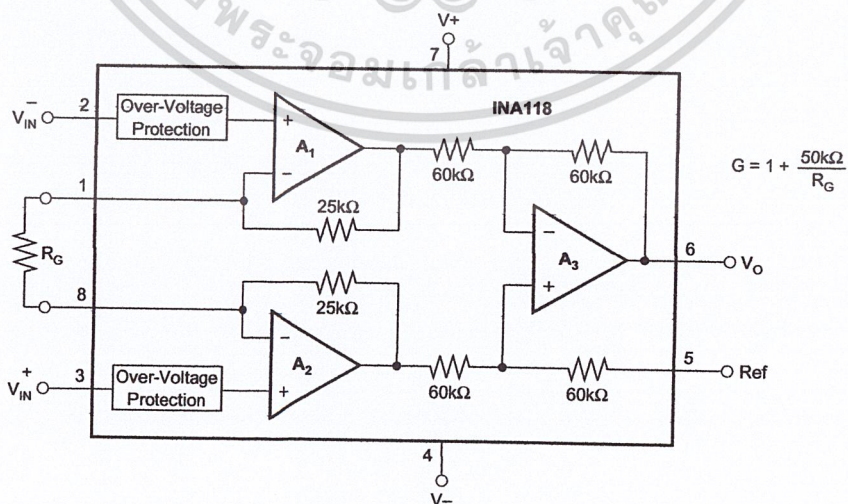
### DESCRIPTION

The INA118 is a low power, general purpose instrumentation amplifier offering excellent accuracy. Its versatile 3-op amp design and small size make it ideal for a wide range of applications. Current-feedback input circuitry provides wide bandwidth even at high gain (70kHz at G = 100).

A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. Internal input protection can withstand up to ±40V without damage.

The INA118 is laser trimmed for very low offset voltage (50µV), drift (0.5µV/°C) and high common-mode rejection (110dB at G = 1000). It operates with power supplies as low as ±1.35V, and quiescent current is only 350µA—ideal for battery operated systems.

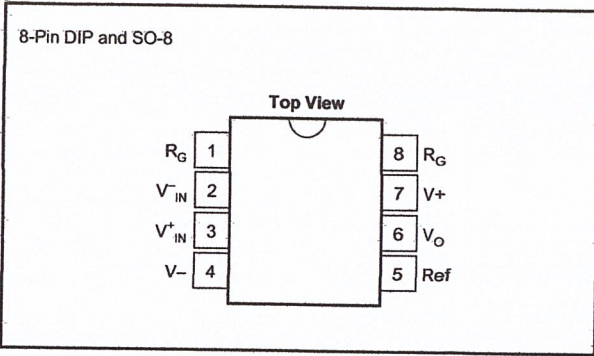
The INA118 is available in 8-pin plastic DIP, and SO-8 surface-mount packages, specified for the -40°C to +85°C temperature range.



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Twx: 910-952-1111  
 Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAXLine: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132



## PIN CONFIGURATION



## ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage .....	$\pm 18V$
Analog Input Voltage Range .....	$\pm 40V$
Output Short-Circuit (to ground) .....	Continuous
Operating Temperature .....	$-40^\circ C$ to $+125^\circ C$
Storage Temperature .....	$-40^\circ C$ to $+125^\circ C$
Junction Temperature .....	$+150^\circ C$
Lead Temperature (soldering, 10s) .....	$+300^\circ C$

## ORDERING INFORMATION

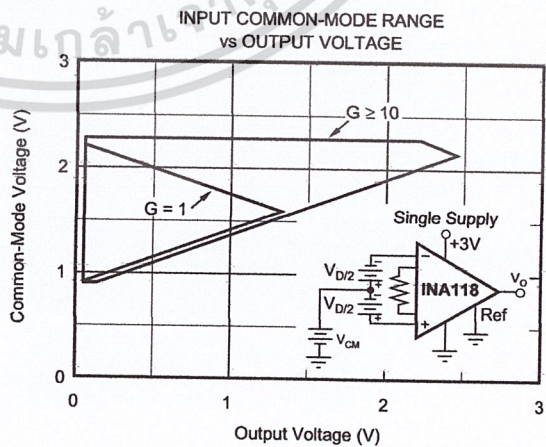
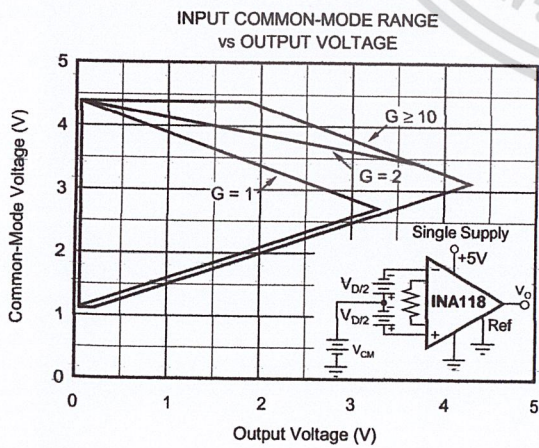
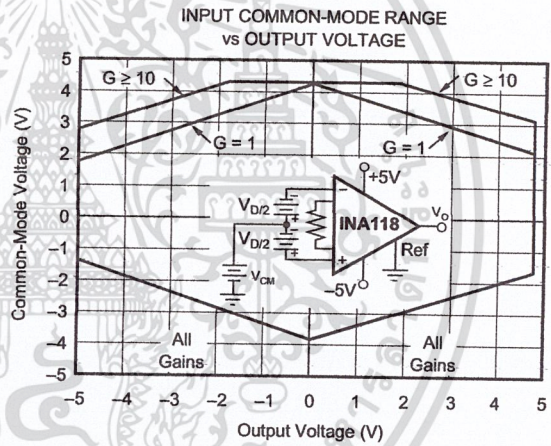
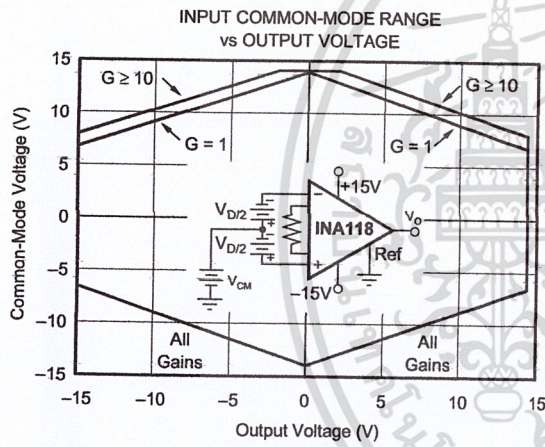
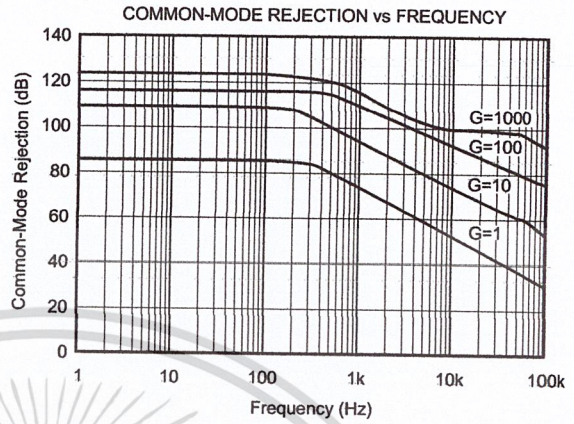
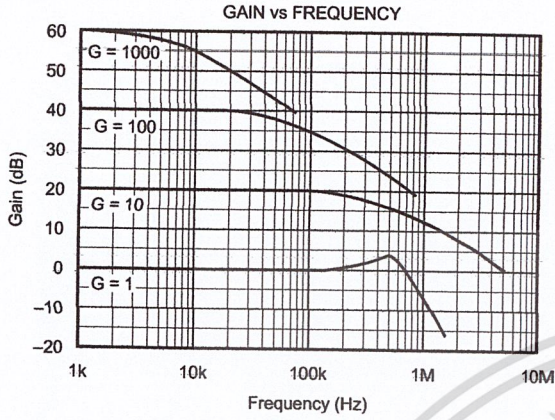
PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER <sup>(1)</sup>	TEMPERATURE RANGE
INA118P	8-Pin Plastic DIP	006	$-40^\circ C$ to $+85^\circ C$
INA118PB	8-Pin Plastic DIP	006	$-40^\circ C$ to $+85^\circ C$
INA118U	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^\circ C$ to $+85^\circ C$
INA118UB	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^\circ C$ to $+85^\circ C$

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

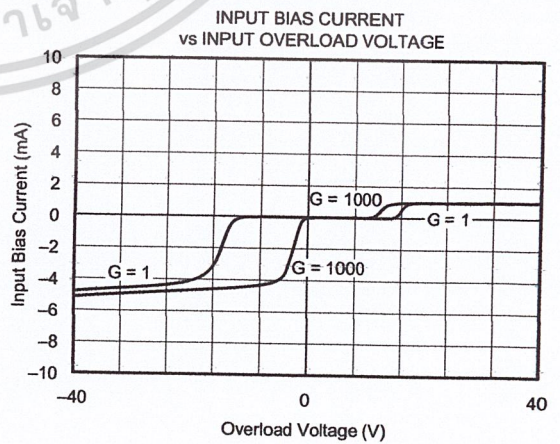
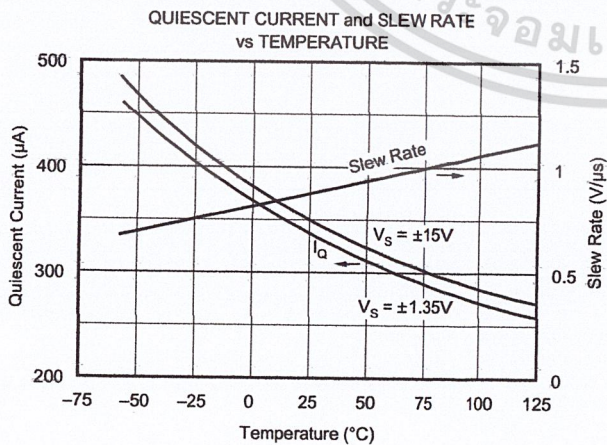
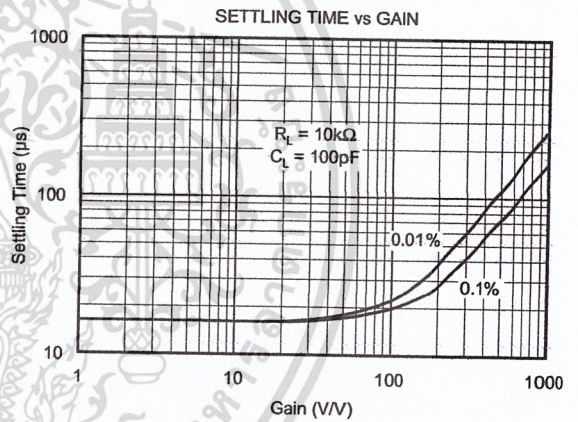
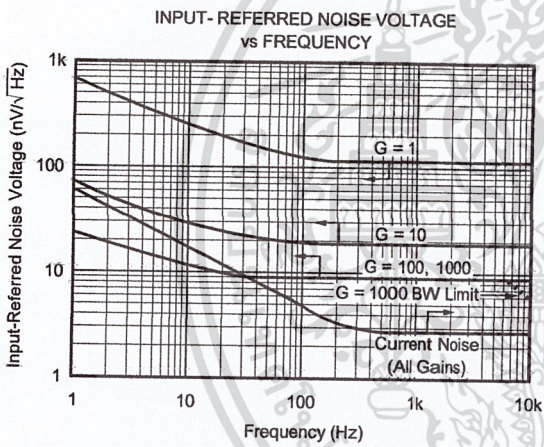
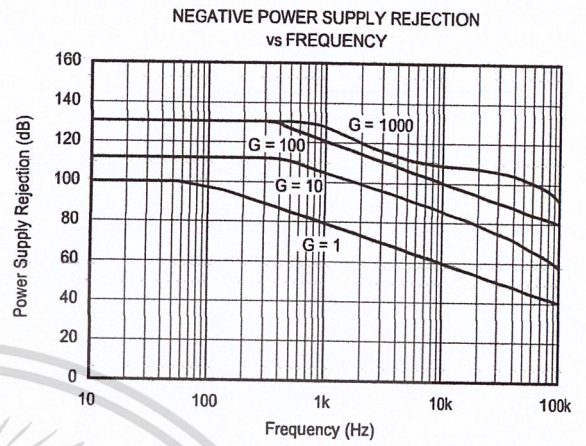
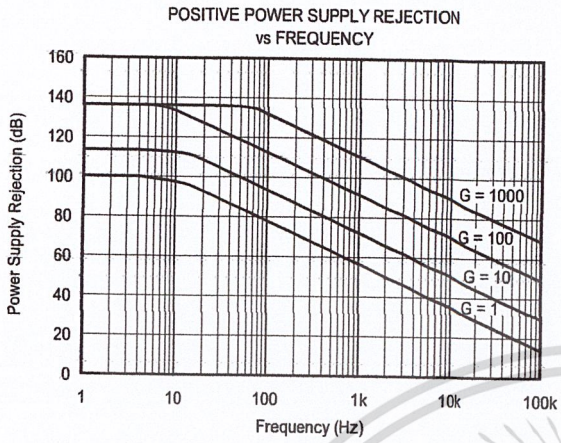
# TYPICAL PERFORMANCE CURVES

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = \pm 15\text{V}$ , unless otherwise noted.



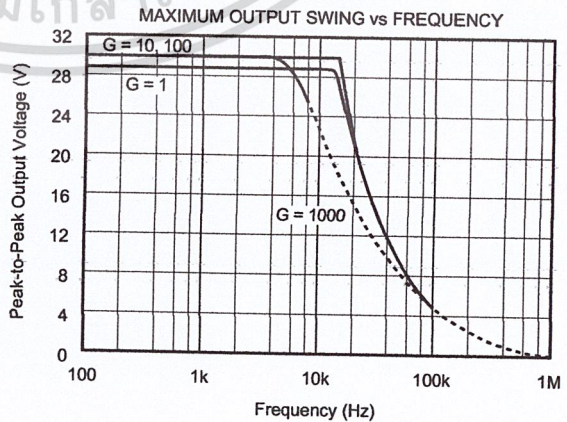
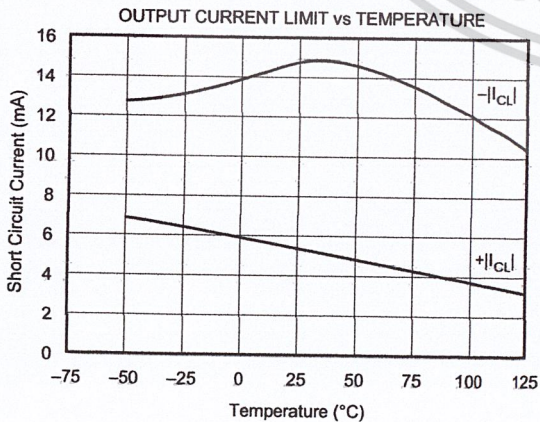
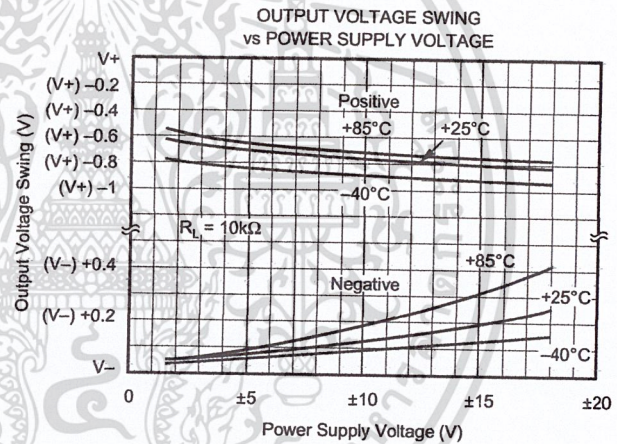
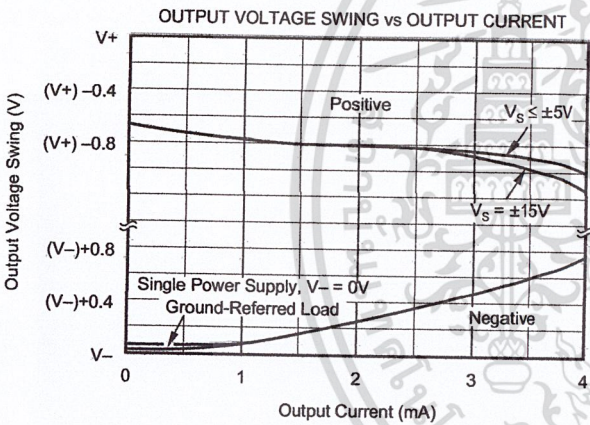
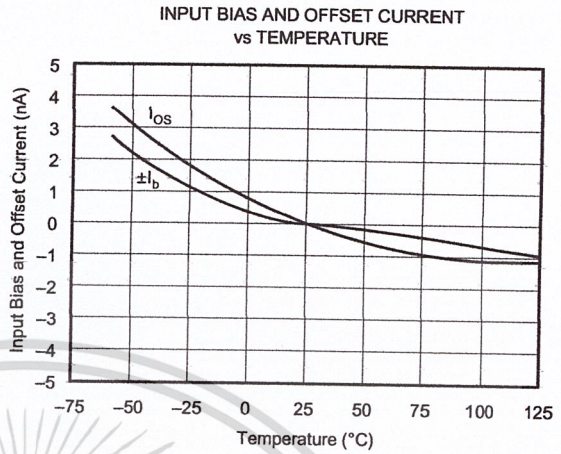
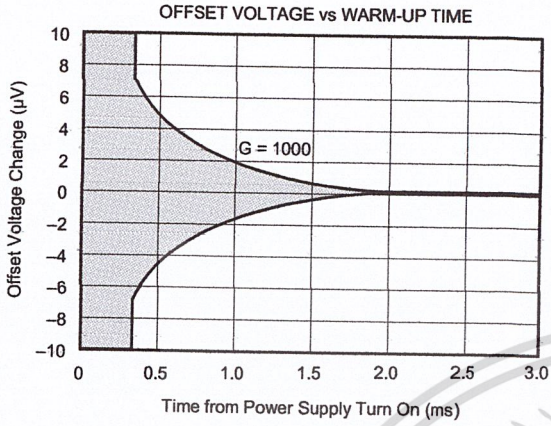
# TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = \pm 15\text{V}$ , unless otherwise noted.



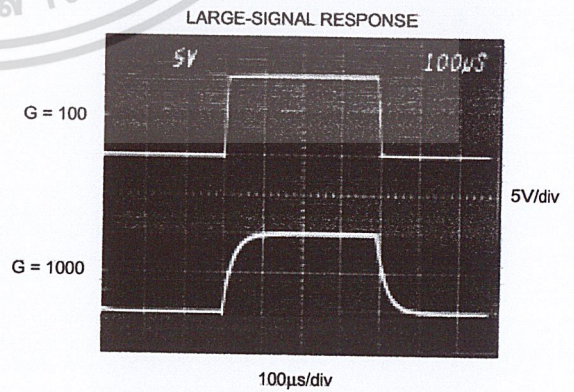
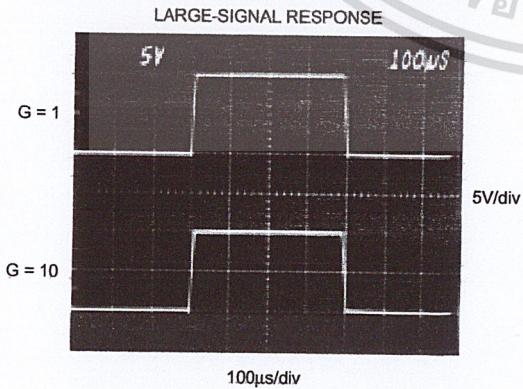
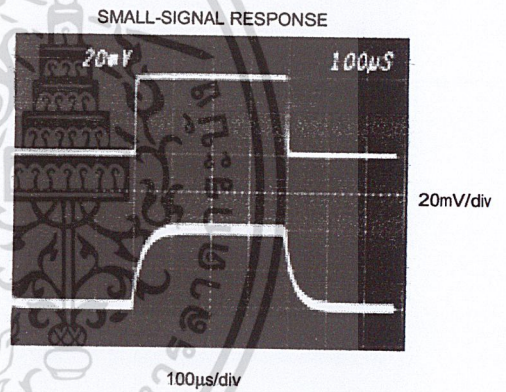
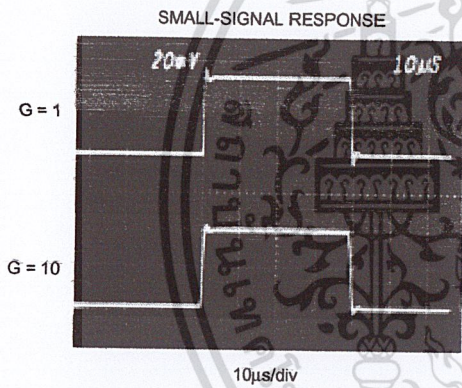
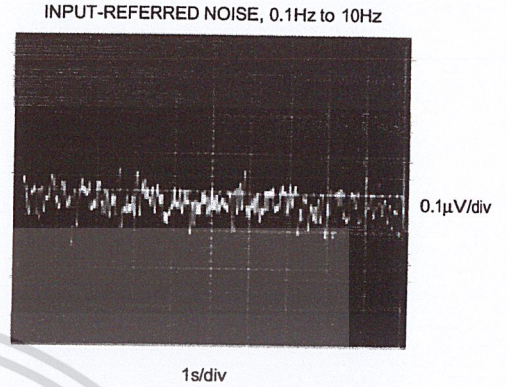
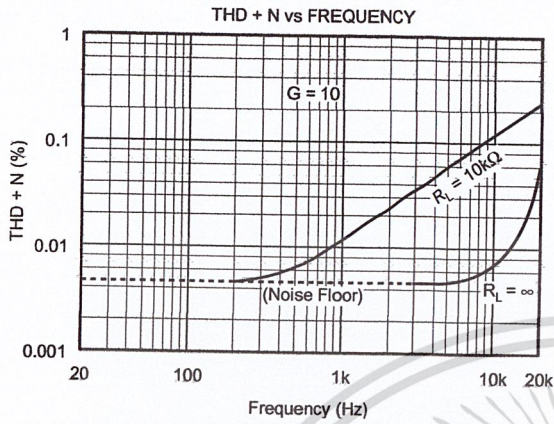
# TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = \pm 15\text{V}$ , unless otherwise noted.



# TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = \pm 15\text{V}$ , unless otherwise noted.



# APPLICATION INFORMATION

Figure 1 shows the basic connections required for operation of the INA118. Applications with noisy or high impedance power supplies may require decoupling capacitors close to the device pins as shown.

The output is referred to the output reference (Ref) terminal which is normally grounded. This must be a low-impedance connection to assure good common-mode rejection. A resistance of 12Ω in series with the Ref pin will cause a typical device to degrade to approximately 80dB CMR (G = 1).

## SETTING THE GAIN

Gain of the INA118 is set by connecting a single external resistor, R<sub>G</sub>, connected between pins 1 and 8:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (1)$$

Commonly used gains and resistor values are shown in Figure 1.

The 50kΩ term in Equation 1 comes from the sum of the two internal feedback resistors of A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub>. These on-chip metal film resistors are laser trimmed to accurate absolute values. The accuracy and temperature coefficient of these resistors are included in the gain accuracy and drift specifications of the INA118.

The stability and temperature drift of the external gain setting resistor, R<sub>G</sub>, also affects gain. R<sub>G</sub>'s contribution to gain accuracy and drift can be directly inferred from the gain equation (1). Low resistor values required for high gain can make wiring resistance important. Sockets add to the wiring resistance which will contribute additional gain error (possibly an unstable gain error) in gains of approximately 100 or greater.

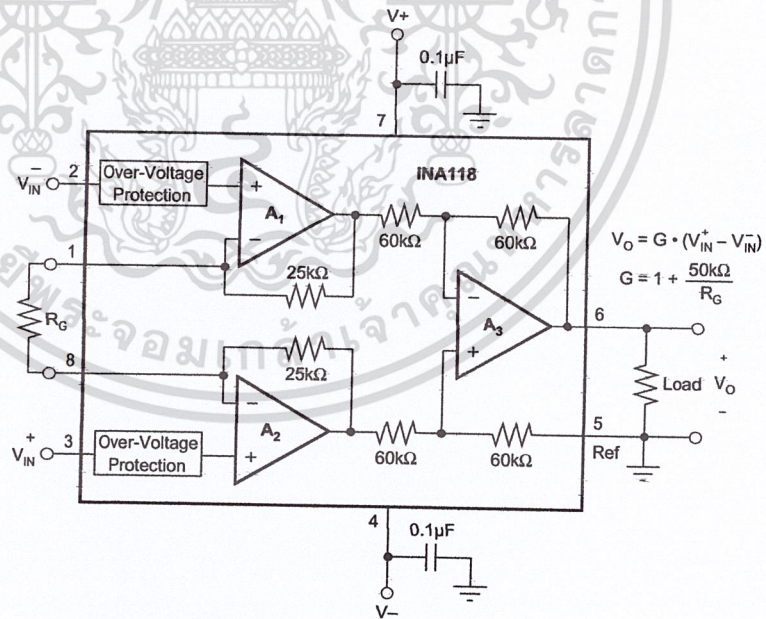
## DYNAMIC PERFORMANCE

The typical performance curve "Gain vs Frequency" shows that, despite its low quiescent current, the INA118 achieves wide bandwidth, even at high gain. This is due to the current-feedback topology of the INA118. Settling time also remains excellent at high gain.

The INA118 exhibits approximately 3dB peaking at 500kHz in unity gain. This is a result of its current-feedback topology and is not an indication of instability. Unlike an op amp with poor phase margin, the rise in response is a predictable +6dB/octave due to a response zero. A simple pole at 300kHz or lower will produce a flat passband unity gain response.

DESIRED GAIN	R <sub>G</sub> (Ω)	NEAREST 1% R <sub>G</sub> (Ω)
1	NC	NC
2	50.00k	49.9k
5	12.50k	12.4k
10	5.556k	5.62k
20	2.632k	2.61k
50	1.02k	1.02k
100	505.1	511
200	251.3	249
500	100.2	100
1000	50.05	49.9
2000	25.01	24.9
5000	10.00	10
10000	5.001	4.99

NC: No Connection.



Also drawn in simplified form:

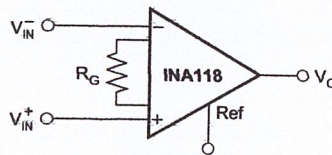


FIGURE 1. Basic Connections.

## NOISE PERFORMANCE

The INA118 provides very low noise in most applications. For differential source impedances less than 1 k $\Omega$ , the INA103 may provide lower noise. For source impedances greater than 50 k $\Omega$ , the INA111 FET-Input Instrumentation Amplifier may provide lower noise.

Low frequency noise of the INA118 is approximately 0.28  $\mu$ Vp-p measured from 0.1 to 10 Hz ( $G \geq 100$ ). This provides dramatically improved noise when compared to state-of-the-art chopper-stabilized amplifiers.

## OFFSET TRIMMING

The INA118 is laser trimmed for low offset voltage and drift. Most applications require no external offset adjustment. Figure 2 shows an optional circuit for trimming the output offset voltage. The voltage applied to Ref terminal is summed at the output. The op amp buffer provides low impedance at the Ref terminal to preserve good common-mode rejection.

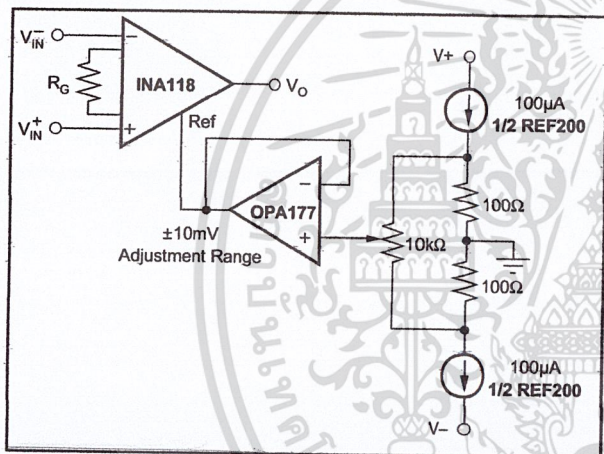


FIGURE 2. Optional Trimming of Output Offset Voltage.

## INPUT BIAS CURRENT RETURN PATH

The input impedance of the INA118 is extremely high—approximately  $10^{10} \Omega$ . However, a path must be provided for the input bias current of both inputs. This input bias current is approximately  $\pm 5$  nA. High input impedance means that this input bias current changes very little with varying input voltage.

Input circuitry must provide a path for this input bias current for proper operation. Figure 3 shows various provisions for an input bias current path. Without a bias current path, the inputs will float to a potential which exceeds the common-mode range of the INA118 and the input amplifiers will saturate.

If the differential source resistance is low, the bias current return path can be connected to one input (see the thermocouple example in Figure 3). With higher source impedance, using two equal resistors provides a balanced input with possible advantages of lower input offset voltage due to bias current and better high-frequency common-mode rejection.

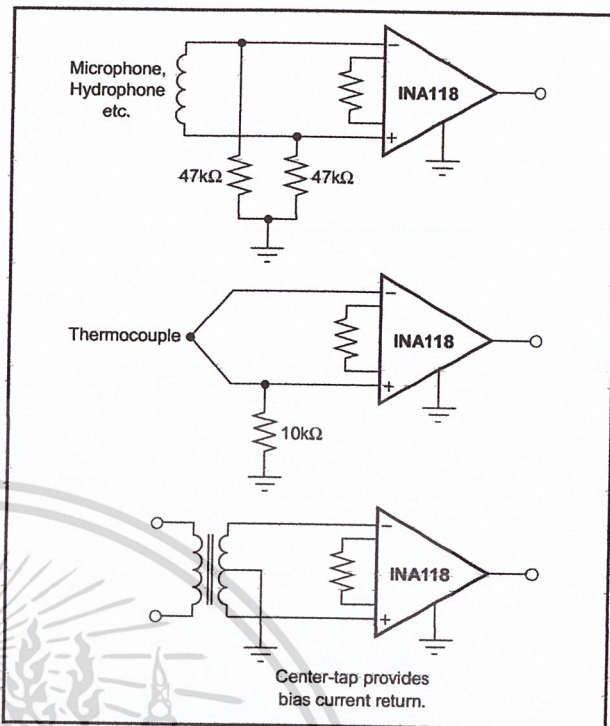


FIGURE 3. Providing an Input Common-Mode Current Path.

## INPUT COMMON-MODE RANGE

The linear input voltage range of the input circuitry of the INA118 is from approximately 0.6V below the positive supply voltage to 1V above the negative supply. As a differential input voltage causes the output voltage to increase, however, the linear input range will be limited by the output voltage swing of amplifiers  $A_1$  and  $A_2$ . Thus, the linear common-mode input range is related to the output voltage of the complete amplifier. This behavior also depends on supply voltage—see performance curves “Input Common-Mode Range vs Output Voltage”.

Input-overload can produce an output voltage that appears normal. For example, if an input overload condition drives both input amplifiers to their positive output swing limit, the difference voltage measured by the output amplifier will be near zero. The output of the INA118 will be near 0V even though both inputs are overloaded.

## LOW VOLTAGE OPERATION

The INA118 can be operated on power supplies as low as  $\pm 1.35$  V. Performance of the INA118 remains excellent with power supplies ranging from  $\pm 1.35$  V to  $\pm 18$  V. Most parameters vary only slightly throughout this supply voltage range—see typical performance curves. Operation at very low supply voltage requires careful attention to assure that the input voltages remain within their linear range. Voltage swing requirements of internal nodes limit the input common-mode range with low power supply voltage. Typical performance curves, “Input Common-Mode Range vs Output Voltage” show the range of linear operation for a various supply voltages and gains.

## SINGLE SUPPLY OPERATION

The INA118 can be used on single power supplies of +2.7V to +36V. Figure 5 shows a basic single supply circuit. The output Ref terminal is connected to ground. Zero differential input voltage will demand an output voltage of 0V (ground). Actual output voltage swing is limited to approximately 35mV above ground, when the load is referred to ground as shown. The typical performance curve "Output Voltage vs Output Current" shows how the output voltage swing varies with output current.

With single supply operation,  $V_{IN}^+$  and  $V_{IN}^-$  must both be 0.98V above ground for linear operation. You cannot, for instance, connect the inverting input to ground and measure a voltage connected to the non-inverting input.

To illustrate the issues affecting low voltage operation, consider the circuit in Figure 5. It shows the INA118, operating from a single 3V supply. A resistor in series with the low side of the bridge assures that the bridge output

voltage is within the common-mode range of the amplifier's inputs. Refer to the typical performance curve "Input Common-Mode Range vs Output Voltage" for 3V single supply operation.

## INPUT PROTECTION

The inputs of the INA118 are individually protected for voltages up to  $\pm 40V$ . For example, a condition of  $-40V$  on one input and  $+40V$  on the other input will not cause damage. Internal circuitry on each input provides low series impedance under normal signal conditions. To provide equivalent protection, series input resistors would contribute excessive noise. If the input is overloaded, the protection circuitry limits the input current to a safe value of approximately 1.5 to 5mA. The typical performance curve "Input Bias Current vs Input Overload Voltage" shows this input current limit behavior. The inputs are protected even if the power supplies are disconnected or turned off.

## INSIDE THE INA118

Figure 1 shows a simplified representation of the INA118. The more detailed diagram shown here provides additional insight into its operation.

Each input is protected by two FET transistors that provide a low series resistance under normal signal conditions, preserving excellent noise performance. When excessive voltage is applied, these transistors limit input current to approximately 1.5 to 5mA.

The differential input voltage is buffered by  $Q_1$  and  $Q_2$  and impressed across  $R_G$ , causing a signal current to flow through  $R_G$ ,  $R_1$  and  $R_2$ . The output difference amp,  $A_3$ , removes the common-mode component of the input signal and refers the output signal to the Ref terminal.

Equations in the figure describe the output voltages of  $A_1$  and  $A_2$ . The  $V_{BE}$  and IR drop across  $R_1$  and  $R_2$  produce output voltages on  $A_1$  and  $A_2$  that are approximately 1V lower than the input voltages.

$$A_1 \text{ Out} = V_{CM} - V_{BE} - (10\mu A \cdot 25k\Omega) - V_{O/2}$$

$$A_2 \text{ Out} = V_{CM} - V_{BE} - (10\mu A \cdot 25k\Omega) + V_{O/2}$$

$$\text{Output Swing Range } A_1, A_2: (V^+) - 0.65V \text{ to } (V^-) + 0.06V$$

$$\text{Amplifier Linear Input Range: } (V^+) - 0.65V \text{ to } (V^-) + 0.98V$$

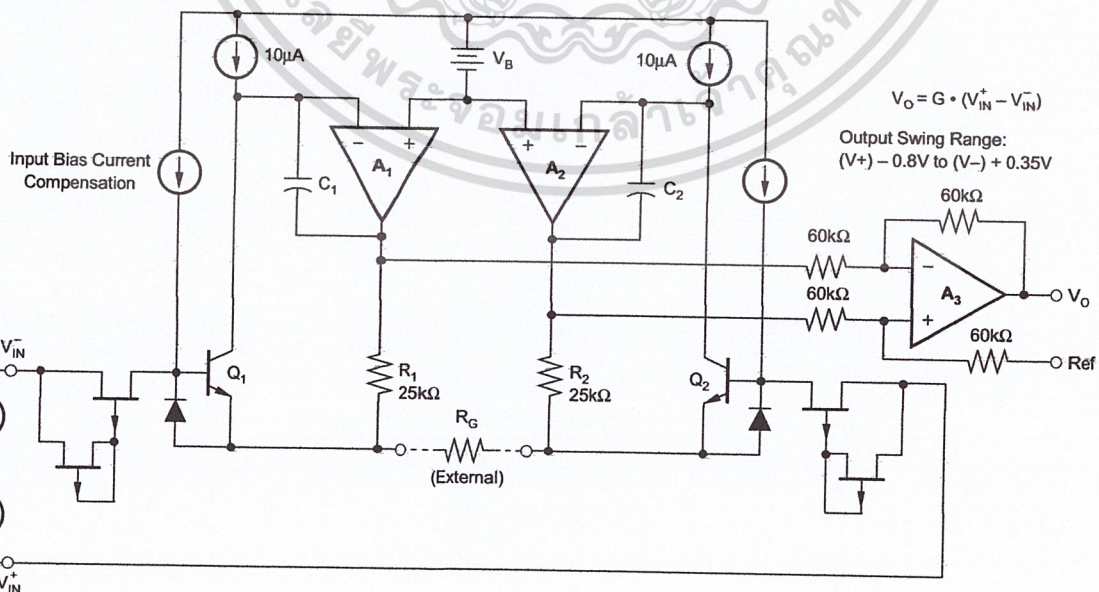


FIGURE 4. INA118 Simplified Circuit Diagram.

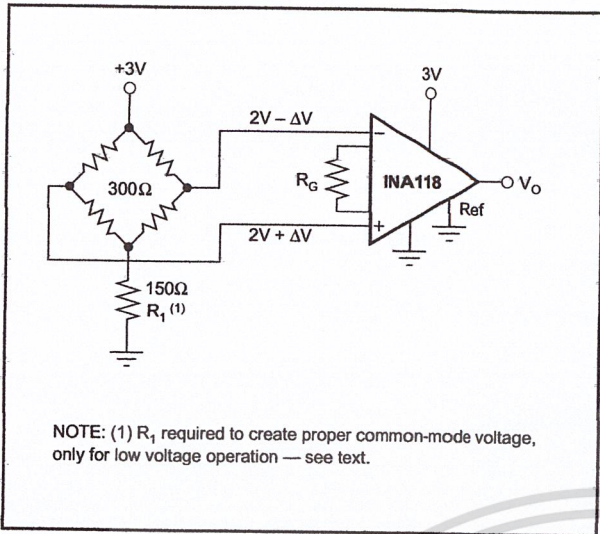


FIGURE 5. Single-Supply Bridge Amplifier.

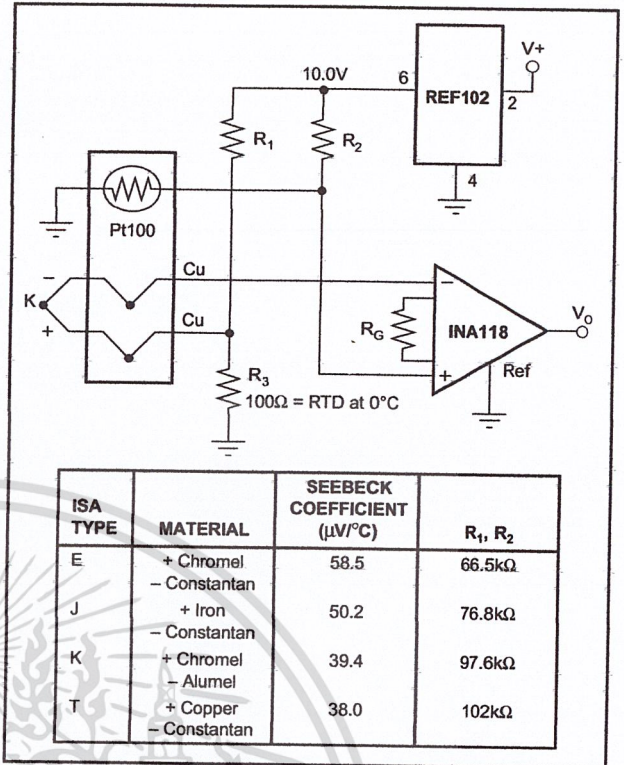


FIGURE 7. Thermocouple Amplifier With Cold Junction Compensation.

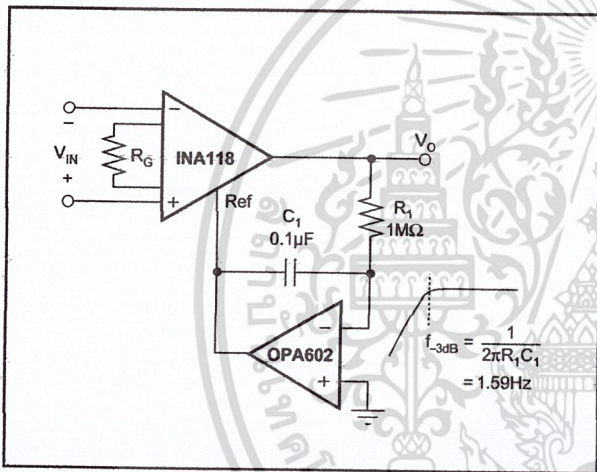


FIGURE 6. AC-Coupled Instrumentation Amplifier.

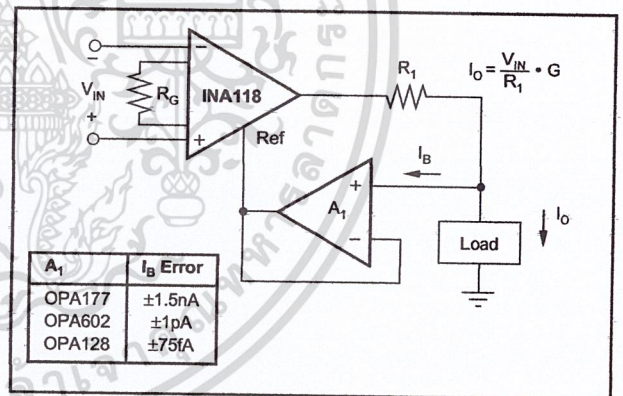


FIGURE 8. Differential Voltage to Current Converter.

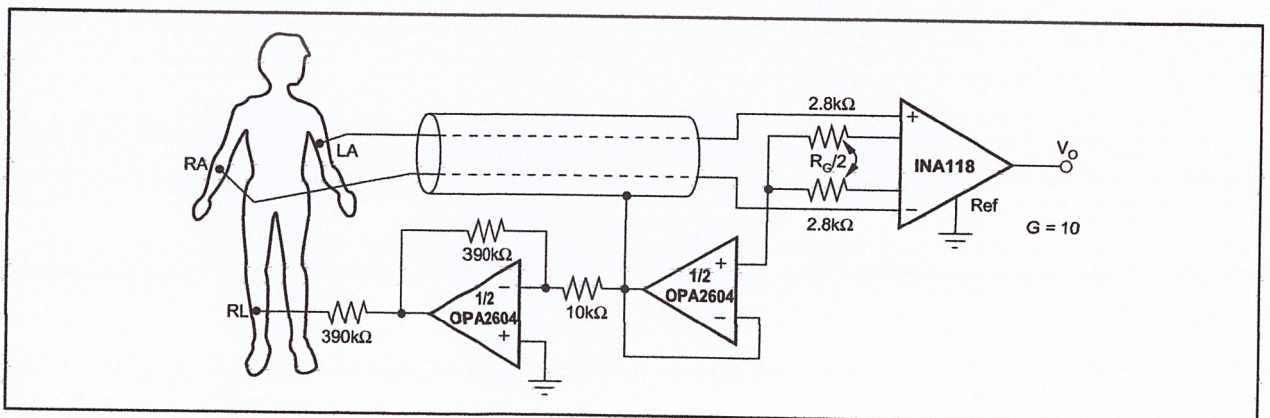


FIGURE 9. ECG Amplifier With Right-Leg Drive.