

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**แมกนีโตไดโอดแบบคู่**  
**DUAL MAGNETODIODE**

โดย

นาย นิวัฒน์ ธรรมสวัสดิ์ 48015256

นาย วรวิทย์ องทวิสุข 48015267

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

วทศ.  
๒๕๖๓  
๒๕๕๐

เลขหางาน.....  
เลขทะเบียน.....**82211**  
วัน,เดือน,ปี.....**9 ก.ค. 2551**

**ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2550**

๑๑๙๔๖๐๐๖  
ด.....  
ร.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร

**แมกนีโตไดโอดแบบคู่**  
**DUAL MAGNETODIODE**



โดย  
นาย นิวัฒน์ ธรรมสวัสดิ์  
นาย วรวิทย์ องทวิสุข

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**  
**สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์**  
**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แมกนีโตไดโอดแบบคู่

ผู้จัดทำ

นาย นิวัฒน์ สรสวัสดิ์ รหัสประจำตัว 48015256

นาย วรวุฒิ จงทวีสุข รหัสประจำตัว 48015267

ลงชื่อ



(รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# แมกนีโตไดโอดแบบคู่

นาย นิวัฒน์ สรสวัสดิ์ รหัส 48015256

นาย วรวิทย์ จงทวีสุข รหัส 48015267

รศ.ดร.เดิมาพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

## บทคัดย่อ

โครงการนี้ เป็นการศึกษาอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีโครงสร้างแบบไดโอด 2 ตัว ประกอบด้วยขาทั้ง 3 คือ ขาแอนโนด 1 ขา และขาแคโทด 2 ขา(แคโทด1กับแคโทด2) สามารถใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอุปกรณ์ โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้มีแรงลอเรนซ์มากระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเกิดการเบี่ยงเบนเป็นเหตุให้มีปริมาณของกระแสไหลที่ ขา แคโทด1 กับขาแคโทด2 ต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบประยุกต์ใช้วัดค่าของสนามแม่เหล็ก แล้วยังได้มีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DUAL MAGNETODIODE

Mr. Niwat Sornsawat ID.48015256

Mr. Warawut Jungtaweasuk ID.48015267

Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul Advisor

Educational Year 2007

## Abstract

This project aims to study the magnetic field sensor with two diodes structure the three terminals are anode and two cathodes(cathode 1 and cathode 2). This sensor can detect the magnetic field perpendicular with device surface by Hall Effect. Lorence force charge to carrier and lead charge carrier to deviate . This is the cause that makes the different currents at cathode 1 and cathode 2 terminals. These currents will be compared and applied to detect the magnetic field value. This result will be used to design and apply for magnetic detecting circuit.

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เดิมีพงษ์ เพ็ชรกุล ในการวางแผนแนวทางดำเนินงานวิจัยและช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนการให้ความรู้ในทุกๆด้านจนทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณ พี่ๆเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่องจนสามารถทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นิวัฒน์ สรสวัสดิ์  
วรวิมล จงทวีสุข

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 ระบบงานเซนเซอร์	1
1.1 บทนำ	1
1.2 หน่วย	2
1.2.1 หน่วยมูลฐานและหน่วยเสริม	2
1.2.2 หน่วยทางไฟฟ้า	3
1.3 ความสำคัญของการวัดและควบคุม	3
1.4 การแบ่งหน้าที่การทำงานและระบบการวัดค่า	4
บทที่ 2 เซนเซอร์	4
2.1 บทนำ	5
2.2 เซนเซอร์ในระบบต่างๆ	5
2.2.1 ระบบการวัด	5
2.2.2 ระบบควบคุมวงเปิด	6
2.2.3 ระบบควบคุมวงปิด	7
2.3 คุณสมบัติของเซนเซอร์	8
2.4 ประเภทของเซนเซอร์	13
2.4.1 เซนเซอร์อุณหภูมิ	13
2.4.1.1 เทอร์มิสเตอร์	14
2.4.1.2 เทมเพอเรเจอร์เซนเซอร์โมดูล	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 เซนเซอร์(ซีวะ)เคมี	15
2.4.2.1 เซนเซอร์แก๊ส	16
2.4.3 เซนเซอร์แผ่รังสี	16
2.4.3.1 โฟโตทรานซิสเตอร์	16
2.4.3.2 โฟโตไดโอด	17
2.4.4 เซนเซอร์เชิงกล	17
2.4.4.1 เซนเซอร์สัมผัส	18
2.4.4.2 สวิทช์กลไก	18
2.4.4.3 รีคสวิทช์	18
2.4.4.4 เซนเซอร์เสียง	19
2.4.4.5 ไมโครโฟน	19
2.4.4.6 อัลตราโซนิกเซนเซอร์	19
2.4.5 เซนเซอร์แม่เหล็ก	20
2.4.5.1 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor)	20
2.4.5.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magneto transistor)	21
2.4.5.3 แมกนีโตไดโอด (Magneto Diode)	23
บทที่ 3 แมกนีโตไดโอดแบบคู่	25
3.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก	25
3.2 ปราคฏการณ์ฮอลล์	27
บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอด	33
4.1 กระบวนการทำความสะอาด	34
4.2 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation Process)	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น(Wet Oxidation)	34
4.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง(Dry Oxidation)	35
4.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	36
4.3.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์	38
4.3.2 การเคลือบสารไวแสง	38
4.3.3 การอบชั้น Softbake	39
4.3.4 การปรับชั้นมาสค์	39
4.3.5 การฉายแสง	39
4.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง	40
4.3.7 การอบชั้น Hardbake	40
4.3.8 การกัด(Etching)	40
4.3.9 การลอกน้ำยาไวแสง	40
4.3.10 กระบวนการแพร่สารเจือ(Deposition)	41
4.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Metalzation Process)	43
4.5 หลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่	44
4.6 การออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่	46
4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอด	49
บทที่ 5 ผลการทดลอง	63
5.1 คุณลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอด	64
5.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด	69
5.3 การประยุกต์การใช้งาน	72
5.3.1 ออปแอมป์ (Op-Amp, Operational Amplifier)	72
5.3.2 วงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier)	74
5.3.3 หลักการทำงานของวงจรวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็ก	77

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.4 หลักการทำงานวงจรเครื่องวัดทิศทางและนับจำนวนครั้งที่ สนามแม่เหล็กตัดผ่าน	79
5.3.5 โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์(AT89C52)	82
บรรณานุกรม	84
ภาคผนวก	85



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงหน่วยมูลฐาน,หน่วยเสริม และที่มาของจำนวนไฟฟ้าบางตัว	2
4.1 แสดง CLASS ต่างๆของห้องสะอาด	37
5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ทางอุดมคติและทางปฏิบัติช่วงการทำงาน ของออปแอมป์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง	74



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด	6
2.2 สัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงเปิด	7
2.3 ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงปิด	8
2.4 บริเวณไร้การตอบสนอง(dead zone)	10
2.5 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิส	11
2.6 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น	12
2.7 อุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์	14
2.8 เทมเพอเรเจอร์ เซนเซอร์มอดูลเบอร์ LM335ที่อ่านค่าอุณหภูมิเป็นระดับแรงดัน	15
2.9 เทมเพอเรเจอร์ เซนเซอร์มอดูลเบอร์ DS1820ที่อ่านค่าอุณหภูมิแล้วส่งสัญญาณดิจิทัล	15
2.10 อุปกรณ์เซนเซอร์แก๊สแบบต่างๆ	16
2.11 อุปกรณ์โฟโตทรานซิสเตอร์	17
2.12 อุปกรณ์โฟโตไดโอด ที่ใช้รับแสงอินฟราเรด	17
2.13 สวิตช์ที่รับแรงกระแทกหลายแบบ	18
2.14 รีดสวิตช์	18
2.15 อุปกรณ์คอนแดนเซอร์ไมโครโฟน	19
2.16 อุปกรณ์อัลตราโซนิกเซนเซอร์	19
2.17 โครงสร้างของเมกนีโตรีซิสเตอร์แบบขนาน	20
2.18 โครงสร้างของเมกนีโตรีซิสเตอร์แบบวงกลม	21
2.19 ด้านตัดขวางโครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง	21
2.20 โครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวอน	22
2.21 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ(โฮล) (ก) $B_z = 0$ (ข) $B_z > 0$	23
2.22 โครงสร้างด้านตัดขวางของเมกนีโตไดโอด	23
2.23 โครงสร้างของเมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS	24

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ [15]	25
3.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	26
3.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	27
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก	29
4.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	33
4.2 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชัน	35
4.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	35
4.4 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน	35
4.5 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process	37
4.6 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆ ในซิลิคอน	41
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส	42
4.8 ความหนาแน่นของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส	42
4.9 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator	43
4.10 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบคู่	44
4.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในสถานะสมดุล	45
4.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในสถานะไม่สมดุล	45
4.13 ประจุพาหะเคลื่อนที่ในมุมกว้างขึ้นตามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก	46
4.14 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 1 ที่ระยะ $50 \mu\text{m}$	46
4.15 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 2 ที่ระยะ $50 \mu\text{m}$	47
4.16 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 3 ที่ระยะ $50 \mu\text{m}$	47
4.17 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 1 ที่ระยะ $100 \mu\text{m}$	48
4.18 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 2 ที่ระยะ $100 \mu\text{m}$	48
4.19 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 3 ที่ระยะ $100 \mu\text{m}$	49
4.20 แผ่นซิลิคอน	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 แผ่นชดเชยคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 1	50
4.22 แผ่นชดเชยคอนหลังผ่านการโฟโวลติโทกราฟี	51
4.23 แผ่นชดเชยคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์	51
4.24 แผ่นชดเชยคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	52
4.25 แผ่นชดเชยคอนขณะทำการแพร์สารเจือ	52
4.26 แผ่นชดเชยคอนหลังการ Drive in	53
4.27 แผ่นชดเชยคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 2	54
4.28 แผ่นชดเชยคอนหลังผ่านการโฟโวลติโทกราฟี	54
4.29 แผ่นชดเชยคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์	55
4.30 แผ่นชดเชยคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	55
4.31 แผ่นชดเชยคอนขณะทำการแพร์สารเจือ	56
4.32 แผ่นชดเชยคอนหลังการ Drive in	56
4.33 แผ่นชดเชยคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 3	57
4.34 แผ่นชดเชยคอนหลังผ่านการโฟโวลติโทกราฟี	58
4.35 แผ่นชดเชยคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์	58
4.36 แผ่นชดเชยคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	59
4.37 แผ่นชดเชยคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม	59
4.38 แผ่นชดเชยคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 4	60
4.39 แผ่นชดเชยคอนหลังผ่านการโฟโวลติโทกราฟี	60
4.40 แผ่นชดเชยคอนหลังกระบวนการกัดชั้นอลูมิเนียม	61
4.41 แผ่นชดเชยคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	61
4.42 แมกนีโตไดโอดแบบคู่เสร็จสมบูรณ์	62
5.1 แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้าง	63
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50 $\mu\text{m}$ แบบที่ 1	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 $\mu\text{m}$ แบบที่ 1	64
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50 $\mu\text{m}$ แบบที่ 2	65
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 $\mu\text{m}$ แบบที่ 2	65
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50 $\mu\text{m}$ แบบที่ 3	66
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 $\mu\text{m}$ แบบที่ 3	66
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=100 $\mu\text{m}$ แบบที่ 2	67
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ ไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=100 $\mu\text{m}$ แบบที่ 2	67
5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=100 $\mu\text{m}$ แบบที่ 3	68
5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ ไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=100 $\mu\text{m}$ แบบที่ 3	68
5.12 ภาพถ่ายอุปกรณ์จากด้านบน	69
5.13 ภาพถ่ายอุปกรณ์จากด้านข้าง	69
5.14 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบที่ 1 ที่ระยะ 50 $\mu\text{m}$	70
5.15 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบที่ 2 ที่ระยะ 50 $\mu\text{m}$	70
5.16 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบที่ 2 ที่ระยะ 100 $\mu\text{m}$	71
5.17 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์	72
5.18 วงจรสมมูลของออปแอมป์	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 บล็อกไดอะแกรมของออปแอมป์	73
5.20 ช่วงการทำงานของออปแอมป์	74
5.21 วงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier)	75
5.22 วงจรการวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็ก	76
5.23 วงจรเครื่องวัดทิศทางและนับรอบสนามแม่เหล็ก	78
5.24 แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดทิศทางสนามแม่เหล็กและนับจำนวนครั้งที่สนามแม่เหล็กตัดผ่าน	81



# บทที่ 1

## ระบบของงานเซนเซอร์

### 1.1 บทนำ

ในระบบการวัด ตลอดจนระบบควบคุมกระบวนการผลิตต่างๆทางอุตสาหกรรมนั้น อุปกรณ์หลักที่มีความจำเป็นอย่างมากและอาจขาดไม่ได้ ก็คือ “อุปกรณ์เซนเซอร์” หรืออาจจะทำงานไม่ได้ถ้าหากขาดอุปกรณ์นี้ ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญเพราะอุปกรณ์เซนเซอร์เมื่อนำมาเปรียบกับร่างกายมนุษย์ก็เปรียบเสมือนประสาทสัมผัสที่ทำหน้าที่รับความรู้สึก เช่น ตาเป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่รับภาพ หูทำหน้าที่รับเสียง ผิวหนังทำหน้าที่รับความรู้สึกการสัมผัสและอุณหภูมิ ทำให้สมองรับรู้ได้ เช่นเดียวกับเซนเซอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยน แสง เสียง แรงสัมผัส อุณหภูมิ ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปควบคุม

ความเป็นจริง ระบบของการและการควบคุมมีความสำคัญต่องานอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างมากเช่นในระบบการวัดและควบคุมใน โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า กระบวนการด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ระบบการผลิตเครื่องจักรกลสมัยใหม่ การควบคุมหรือปรับความปลอดภัยของอุปกรณ์ เป็นต้น ผลที่สืบเนื่องจากการใช้งานระบบการวัดและควบคุมที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้ประหยัดเวลา กำลังงานและกำลังคนลงเป็นจำนวนมาก เพราะเหตุนี้จึงเห็นได้ว่า วิทยาศาสตร์ทางด้านเครื่องมือวัดและควบคุมนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

ดังนั้นด้วยปัจจัยความสำคัญของเซนเซอร์ที่มีต่อการวัดค่าและควบคุมกระบวนการนี้เองจึงเป็นที่เรื่องที่ควรศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงภาพรวมทั้งหมดและหลักการพื้นฐานที่สำคัญอย่างละเอียดของระบบงานของเซนเซอร์เพื่อที่จะได้มีการพัฒนางานทางด้านการวัดและควบคุม (instrumentation) เพราะงานดังกล่าวได้เข้ามามีบทบาทแทบจะทุกพื้นที่เกี่ยวกับกระบวนการทางด้านเทคโนโลยี และอาจพบเห็นได้บ่อยในชีวิตประจำวันของเรา ตัวอย่างเช่น นาฬิกาบอกเวลา ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดเวลาที่มีใช้กันอยู่แทบทุกคน หรือในส่วนของรถยนต์ที่ต้องมีหน้าปัดบอกค่าต่างๆทางด้านหน้าของคนขับเพื่อแสดงค่าต่างๆจะเห็นได้ว่ามีบทบาทในการใช้ในชีวิตประจำวันของเราอย่างมาก

## 1.2 หน่วย(Unit)

โดยทั่วไปแล้วในระบบต่างๆจำเป็นต้องมีหน่วยเพื่อแสดงมาตรฐานและที่มาของระบบ จึงจำเป็นต้องรู้ถึงพื้นฐานของหน่วยเพื่อให้มีความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของระบบให้ดียิ่งขึ้น

### 1.2.1 หน่วยมาตรฐานและหน่วยเสริม

**ตารางที่ 1.1** ตารางแสดงหน่วยมาตรฐาน,หน่วยเสริม และที่มาของจำนวนไฟฟ้าบางตัว

จำนวน	สัญลักษณ์	หน่วย	ตัวย่อ	มิติ
<b>หน่วยมาตรฐาน</b>				
ความยาว	L	Meter	M	L
มวล	M	Kilogram	Kg	M
เวลา	T	Second	S	t
อุณหภูมิ	T	Kelvin	K	T
ความเข้มการส่องสว่าง		Candela	Cd	
กระแสไฟฟ้า	I	Ampere	A	I
จำนวนสาร	n	Mole	Mol	n
<b>หน่วยเสริม</b>				
มุมระนาบ		Radian	Rad	
มุมตัน		Steradian	Sr	
<b>ที่มาของหน่วยไฟฟ้า</b>				
Electromotive force	V	Volt	V	$l^2 mt^{-3} i^{-1}$
Quantity of charge	Q	Coulomb	C	It
Electrical resistance	R	Ohm	$\Omega$	$ml^2 mt^{-2} i^{-2}$
Capacitance	C	Farad	F	$l^{-2} m^{-1} t^4 i^2$

ปกติหน่วยที่เป็นระบบสากลซึ่งใช้กันทั่วโลก ได้แก่ระบบ S.I.(Internal System) และอีกอย่างที่เราต้องเรียนรู้คือ การแปลงหน่วยจากหน่วยหนึ่งไปยังอีกหน่วยหนึ่ง หน่วยระบบนานาชาติที่ทั่วโลกใช้ จะอยู่บนพื้นฐานหน่วยข้อมูลทั้ง 7 หน่วย และอีกหน่วยเสริมอีก 2 หน่วย เพื่อให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าหน่วยของทุกจำนวนสามารถหาได้จากหน่วยมูลฐานนี้ ในบางกรณีอาจจะมีหน่วยอื่นๆ ที่พบบ่อยและมีความสำคัญในทางวิศวกรรม เช่น นิวตัน(N) ซึ่ง  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m/s}^2$  หรือ พลังงานที่ถูกวัดในหน่วยจูล์(Joules) ซึ่งมีตัวย่อเป็น J ซึ่งก็คือ watt-second(W-s) นั่นเอง ค่านี้กำหนดได้จาก  $1 \text{ J} = 1 \text{ kg.m}^2 / \text{s}^2$  แต่บางครั้งก็อาจจะมีหน่วยอื่นที่แทรกเข้ามา จึงจำเป็นต้องแปลงหน่วยอื่นๆ เหล่านั้นให้เข้าระบบกัน

### 1.2.2 หน่วยทางไฟฟ้า

ซึ่งในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าและจำนวนทางด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้นประกอบไปด้วยหน่วยทางไฟฟ้าซึ่งที่มาจากหน่วยทางวิทยาศาสตร์ ในตาราง 1 มีจำนวนไฟฟ้าเบื้องต้นจำนวน 6 ตัว ที่เกี่ยวข้องกับการวัดทางไฟฟ้า ได้แก่

1. ประจุไฟฟ้า
2. กระแสไฟฟ้า
3. แรงอเล็กโทรโมทีฟ
4. ความต้านทานไฟฟ้า
5. ความเหนี่ยวนำ
6. ความจุไฟฟ้า

### 1.3 ความสำคัญของการวัดและควบคุม

วัตถุประสงค์ของการวัดและการควบคุม มีความสำคัญดังต่อไปนี้

1. การวัดเป็นการแสดงตัวแปรซึ่งเป็นรายละเอียดของระบบ เป็นหน้าที่สำคัญในการแสดงตัวแปรของระบบ(parameter) หรือ รายละเอียด(Information) ของระบบหรือกระบวนการ
2. เพื่อควบคุมความแน่นอนในการปฏิบัติงานหรือกระบวนการ
3. การจำลองสภาพของระบบ ในบางครั้งจำเป็นต้องจำลองระบบการทำ เนื่องจากระบบจริงอาจมีความยุ่งยากซับซ้อน ในการหาสภาพที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของระบบจริงภายใต้สภาพหรือเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริง
4. เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการออกแบบ
5. เพื่อใช้ในการปรับกระบวนการ
6. เพื่อทดสอบวัสดุ ศึกษามาตรฐาน
7. เพื่อยืนยันปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์/ทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์
8. เพื่อควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 การแบ่งหน้าที่การทำงานและระบบการวัดค่า

โดยทั่วไประบบการวัดจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นพื้นฐาน(Basic functional elements)
2. อุปกรณ์เสริม(Auxiliary element )

### 1.4.1 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่พื้นฐาน

เป็นอุปกรณ์หลักๆ ในระบบ ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์พื้นฐานของระบบการวัดค่าทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วย

1. ทรานสดิวเซอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนตัวแปรอินพุตที่ต้องการให้อยู่ในรูปของสัญญาณอื่นที่ใช้งานได้สะดวก เช่น เปลี่ยนจากอุณหภูมิเป็นค่าความต้านทาน เป็นต้น
2. ตัวปรับสภาพสัญญาณ หรือ อุปกรณ์ปรับแต่งตัวกลาง ใช้สำหรับปรับแต่งสภาพของสัญญาณเอาต์พุตของทรานสดิวเซอร์ ให้อยู่ในรูปของสัญญาณที่เหมาะสม อาจแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณมาตรฐานสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติ เช่น ทำให้สัญญาณมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เป็นต้น
3. อุปกรณ์แสดงข้อมูลของสัญญาณ ใช้สำหรับแสดงรายละเอียดของตัวแปรที่จะวัดค่า ให้อยู่ในรูปแบบที่เข้าใจ เช่น ลิตร/นาฬิกา มิลลิแอมป์ เป็นต้น

### 1.4.2 อุปกรณ์เสริม

อยู่ร่วมกับระบบการวัดที่สร้างขึ้น โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของงาน ธรรมชาติของเทคนิคในการวัด เป็นต้น โดยหลักๆ จะประกอบไปด้วย

1. อุปกรณ์สอบเทียบ เพื่อทำการสอบเทียบอุปกรณ์ให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง
2. แหล่งจ่ายกำลังงานภายนอก เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ เช่น จ่ายให้กับทรานสดิวเซอร์ ตัวปรับสภาพสัญญาณ อุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณ
3. อุปกรณ์ป้องกัน ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงจำนวนทางกายภาพที่วัดได้ เช่น วงจรวีทส โคนบรีดจ์ เป็นต้น

## บทที่ 2

### เซนเซอร์

#### 2.1 บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์เซนเซอร์ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญในทุกๆด้านไม่ว่าจะเป็นทางด้านงานอุตสาหกรรม งานก่อสร้าง หรือแม้กระทั่งภายในบ้านพักอาศัยของพวกเราจึงเห็นได้ว่ามันเป็นเรื่อง ที่ใกล้ตัวของพวกเรา มาก โดยที่พวกเราไม่รู้ตัว ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์เซนเซอร์อาจเป็น โครงสร้างทางกล หรือโครงสร้างทางไฟฟ้า หรือ โครงสร้างที่มีการผสมกันระหว่างโครงสร้างทาง กลกับ โครงสร้างทางไฟฟ้าก็ได้ ทำให้อุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ จึงมักมีการทำงานของ อุปกรณ์เซนเซอร์เป็นหลัก

ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์ ต่างๆ แล้วทำหน้าที่เปลี่ยนปริมาณที่ได้จากการตรวจวัดให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งขึ้นมา ซึ่งเป็น สัญญาณที่เซนเซอร์จ่ายออกมาเพื่อที่จะนำไปใช้ประมวลผลต่อ

#### 2.2 เซนเซอร์ในระบบต่างๆ

โดยทั่วไปสามารถจะจำแนกชนิดและคุณลักษณะของระบบได้มากมายหลายแบบ แต่ใน ที่นี้จะพิจารณาตามลักษณะของระบบเซนเซอร์ที่ให้ปริมาณทางเอาต์พุตของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลง เป็นสัดส่วนไปตามปริมาตรต่างๆ ที่ตรวจวัดทางอินพุต ซึ่งการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในกระบวนการ สามารถจำแนกการใช้งานในระบบต่างๆ ได้เป็น 3 ระบบ ดังนี้คือ

1. ระบบการวัด
2. ระบบควบคุมวงเปิด
3. ระบบควบคุมวงปิด

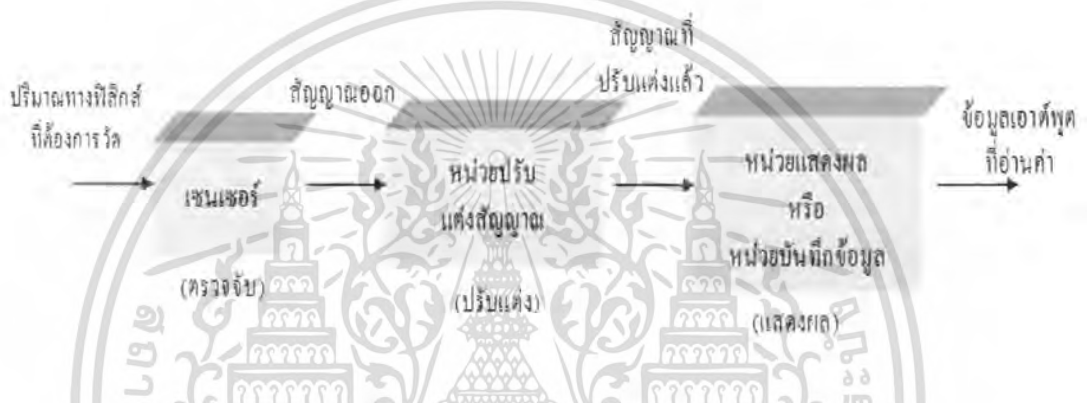
##### 2.2.1 ระบบการวัด

ทำหน้าที่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลของปริมาณทางเอาต์พุตซึ่งได้จากปริมาณทางอินพุตที่ ได้จากการวัดสามารถแสดงคังรูป หลักการทำงานสำคัญของระบบการวัด คือ ระบบการวัดจะทำ หน้าที่เพียงแต่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลค่าที่ได้จากการวัดปริมาณจากอินพุตเท่านั้น ไม่สามารถ ปรับหรือควบคุมสภาพการทำงานของระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการได้เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ส่วนตรวจจับสัญญาณ
2. ส่วนปรับแต่งสัญญาณ
3. ส่วนแสดงผล หรือส่วนบันทึกข้อมูล



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด

ดังแสดงในผังสัญญาณของระบบในรูป ซึ่งปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำการวัดจะถูกเซนเซอร์เปลี่ยนให้สัญญาณออกที่สามารถนำไปปรับแต่งหรือแสดงผลต่อได้ จากนั้นหน่วยของการปรับแต่งสัญญาณจะทำหน้าที่ปรับแต่งสภาพของสัญญาณออกที่ได้จากสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อที่นำไปใช้งานได้กับหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล เช่น ถ้าสัญญาณที่ออกจากเซนเซอร์เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดของสัญญาณที่ต่ำมากก็ต้องมีหน่วยที่ปรับแต่งขนาดของสัญญาณให้มีความเหมาะสมในที่นี้อาจเป็นการขยายขนาดของสัญญาณให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นก่อนที่จะถูกนำไปแสดงผลให้กับผู้ใช้อ่านค่า หรืออาจมีการเก็บค่าที่วัดได้ลงในเครื่องบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในภายหลัง

### 2.2.2 ระบบควบคุมวงเปิด

ระบบควบคุม มีหลักการทำงานพื้นฐานต่างจากระบบการวัด กล่าวคือ ระบบควบคุมพยายามปรับสภาพกระบวนการหรือรักษาสภาพการทำงานของกระบวนการให้มีค่าเป็นไปตามค่าที่ตั้งไว้ทางอินพุต หรือเป็นไปตามที่ผู้ควบคุมกำหนดไว้ ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงเปิดแสดงได้ดังรูป สัญญาณอินพุตที่ตั้งไว้หรือมีการกำหนดจะถูกส่งให้กับอุปกรณ์ควบคุม เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปปรับสภาพการทำงานของระบบภายใต้การควบคุม

เพื่อเป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการ แต่จะเห็นว่าในส่วนของสัญญาณทางเอาต์พุตไม่ได้มีการตรวจวัดเลยมีแต่การส่งสัญญาณอินพุตเป็นลำดับไปยังเอาต์พุต โดยไม่มีส่วนของระบบป้อนกลับของสัญญาณมายังอินพุตอีกเลย



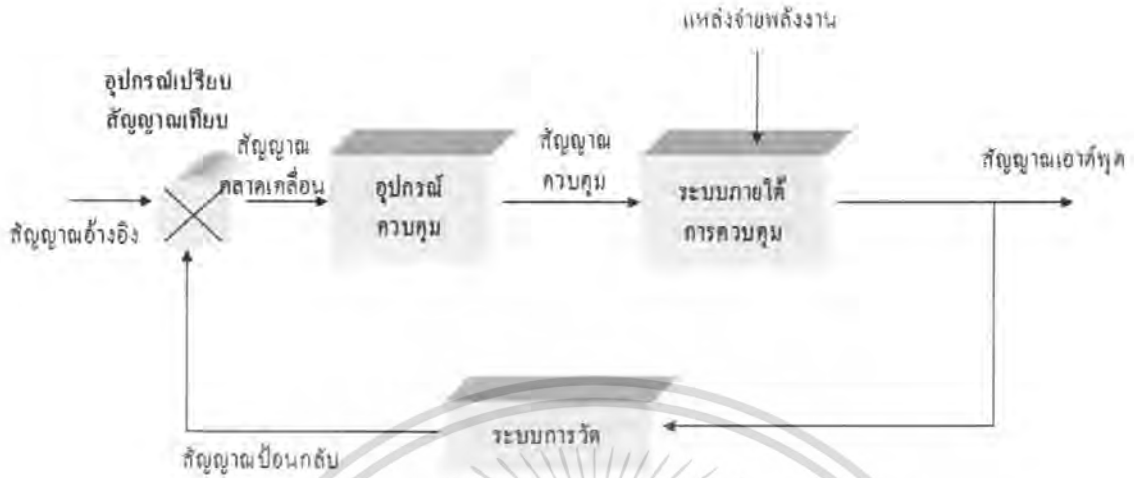
รูปที่ 2.2 ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงเปิด

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าระบบควบคุมวงเปิดเป็นระบบควบคุมพื้นฐานที่มีรูปแบบง่าย การออกแบบระบบไม่ซับซ้อนมีราคาไม่แพงมากนัก แต่ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ทั้งยังต้องมีผู้ควบคุมเข้ามาตรวจสอบหรือปรับแต่งระบบอยู่บ่อยครั้ง จึงไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ควบคุม

### 2.2.3 ระบบควบคุมวงปิด

สำหรับระบบควบคุมวงปิด ซึ่งมีแผนผังของระบบดังรูป จะมีส่วนประกอบที่แตกต่างจากระบบควบคุมวงเปิด โดยมีส่วนของระบบควบคุมการวัดเพื่อทำหน้าที่วัดและตรวจสอบการทำงานของกระบวนการทางเอาต์พุตของระบบและนำสัญญาณกลับมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้เป็นสัญญาณอ้างอิงทางอินพุตอีก จึงทำให้สภาพกระบวนการของระบบทางเอาต์พุตมีผล โดยตรงกับเงื่อนไขทางด้านอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ผังสัญญาณแสดงหลักการการทำงานของระบบควบคุมวงปิด

จากรูป สัญญาณอ้างอิง หรือค่าที่ตั้งไว้เป็นเป้าหมายที่ใช้ในการควบคุมระบบให้เป็นไปตามกระบวนการที่ต้องการ ซึ่งสัญญาณส่วนนี้จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับที่ได้จากเอาต์พุต โดยผลต่างของสัญญาณทั้งสองที่ได้เรียกว่า สัญญาณคลาดเคลื่อน จากนั้นอุปกรณ์ควบคุมจะนำสัญญาณคลาดเคลื่อนที่ได้ไปปรับแต่งให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม แล้วสร้างเป็นสัญญาณควบคุมเพื่อทำการปรับการทำงานจากระบบให้สภาพการทางด้านเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งมีสัญญาณป้อนกลับใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิง ทำให้สัญญาณคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ หรือนั่นคือ สภาพกระบวนการของระบบเข้าสู่เป้าหมายในการควบคุมนั่นเอง

### 2.3 คุณสมบัติของเซนเซอร์

ในการนำเอาเซนเซอร์มาใช้งานในระบบการวัดหรือระบบควบคุมกระบวนการต่างๆ นั้น เราต้องคำนึงหลายด้าน เช่น ราคา ความเหมาะสม ประสิทธิภาพ รวมถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกต่างๆ เป็นต้น แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการเลือกพิจารณา คือ คุณสมบัติของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ควรมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสัญญาณหรือรูปแบบที่ต้องการนำไปใช้งานต่อ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดรูปแบบและคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ที่เลือกใช้นับเป็นปัจจัยประการแรกที่ต้องทราบ และในหัวข้อนี้จึงได้อธิบายถึงข้อกำหนดตลอดจนคุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### ความแม่นยำ (accuracy)

เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าทางเอาต์พุตว่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากน้อยเพียงใด ในทางปฏิบัติในการวัดย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนในตัวอุปกรณ์ แต่จะมีค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำของอุปกรณ์นั้น ซึ่งทั่วไปค่าความแม่นยำนี้อาจแสดงในเทอมของหน่วยในการวัด เช่น เทอร์โมมิเตอร์ตัวหนึ่งถูกกำหนดไว้ว่ามีค่าความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 0.2$  c นั่นหมายถึงว่าหากนำเทอร์โมมิเตอร์ตัวนี้ไปทำการวัดอุณหภูมิแล้วแสดงค่าเท่ากับ 20.1c แสดงว่าขณะนี้อุณหภูมิจริงที่ทำการวัดมีค่าอยู่ระหว่าง 19.9c กับ 20.3c ในบางครั้งค่าความแม่นยำนี้อาจใช้บ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของย่านการวัดของอุปกรณ์วัดตัวนั้นๆ อีกด้วย

### **ความแน่นอน (precision)**

คือ ค่าบ่งชี้ถึงความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าเอาต์พุตเหมือนค่าเดิมทุกครั้งเมื่อทำการวัดสัญญาณอินพุตค่าเดิมซ้ำหลายๆ ครั้ง โดยทั่วไปมักเข้าใจสับสนว่า ความแน่นอนกับความแม่นยำคือข้อเดียวกัน แต่ในระบบการวัดแล้วจะมีความหมายที่ต่างกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้ เซนเซอร์ตัวใดที่มีค่าความแม่นยำสูง หมายความว่า เซนเซอร์ตัวนั้นสามารถแสดงค่าทางเอาต์พุตได้เหมือนค่าเดิมทุกครั้งในการที่มีอินพุตซ้ำค่าเดิม แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าเซนเซอร์ตัวนี้มีค่าความแม่นยำสูง หากค่าที่ได้จากเอาต์พุตของเซนเซอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนแตกต่างจากค่าที่เป็นจริง

### **ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (repeatability หรือ reproducibility)**

เป็นข้อกำหนดของความแน่นอนซึ่งถูกระบุมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ โคนหมายถึงค่าความแน่นอนของเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของการวัดแบบเดิม ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการแสดงค่าเอาต์พุตให้มีค่าเหมือนเดิม

### **ความคลาดเคลื่อน (error)**

ความคลาดเคลื่อน คือ ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง โดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และยังเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแม่นยำของระบบการวัดนั้นอีกด้วย

### **ความคลาดเคลื่อนสถิต (static error)**

ความคลาดเคลื่อนสถิต คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าคงที่ตลอดย่านการวัดของอุปกรณ์ ดังนั้น หากทราบค่าความคลาดเคลื่อนสถิตของอุปกรณ์นั้นแล้ว สามารถชดเชยให้มีค่าน้อยลงได้ เพื่อลดผลกระทบต่อค่าความแม่นยำของอุปกรณ์

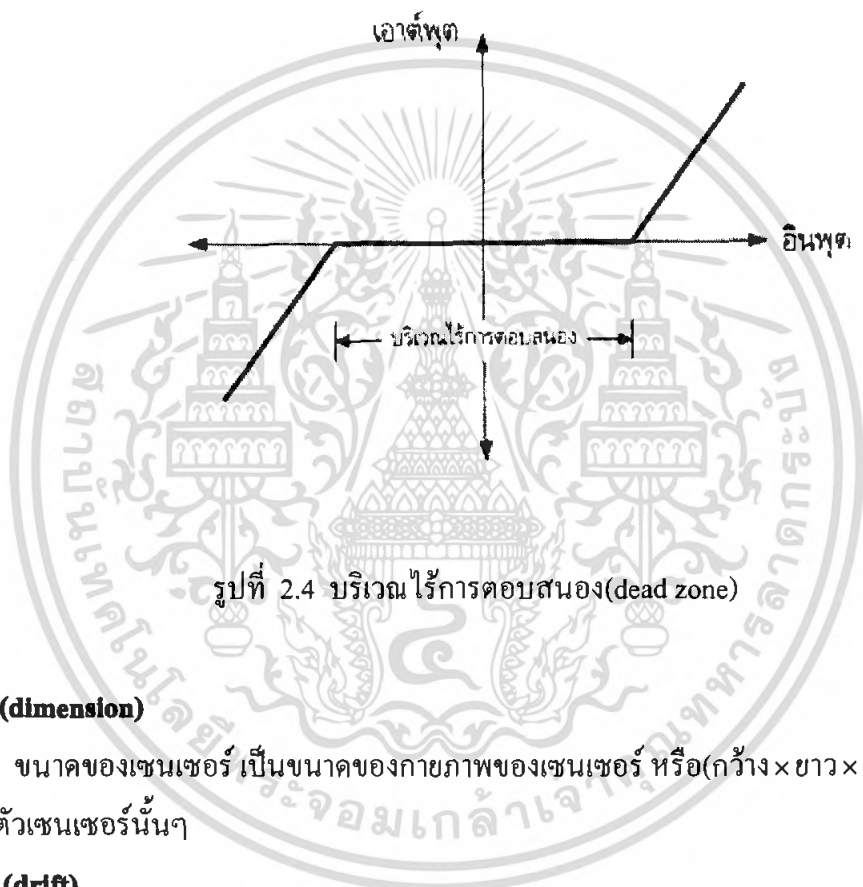
### **การปรับเทียบ (calibration)**

การปรับเทียบ หมายถึง การเปรียบเทียบหน่วยของสกลในการแสดงผลของเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์ตรวจสอบความเร็วรถยนต์บางชนิดที่ให้เอาต์พุตออกมาอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าแปรผันตรงกับความเร็วรถยนต์ จากนั้นเข็มชี้ของมิเตอร์วัดความเร็วก็จะแสดงผล โดยการเบี่ยงเบนเป็นสัดส่วนไปตามแรงดันไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการอ่านค่าที่ได้จากหน่วยของปริมาณหนึ่งมาเป็นอีกหน่วยของปริมาณหนึ่ง โดยการเปรียบเทียบแบบนี้ จึงเรียกว่า การปรับเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone หรือ dead band)

บริเวณไร้การตอบสนอง เป็นข้อกำหนดที่แสดงถึงขนาดสูงสุดของปริมาณที่ทำการวัดทางอินพุต โดยไม่ทำให้สัญญาณทางเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง หรือขนาดอินพุตสูงสุดที่ยังคงทำให้เอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงได้ดังกราฟความสัมพันธ์ในรูป สาเหตุที่ทำให้เกิดบริเวณไร้การตอบสนองนี้มาจากผลของแรงเสียดทานสถิตหรือเนื่องจากคุณสมบัติฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 2.4 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone)

### ขนาด (dimension)

ขนาดของเซนเซอร์ เป็นขนาดของกายภาพของเซนเซอร์ หรือ(กว้าง×ยาว×สูง) ที่ระบบมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ

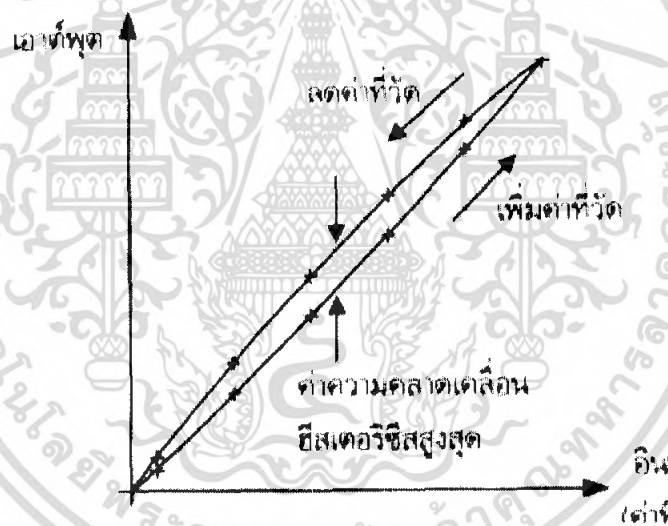
### ครีฟท์ (drift)

แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซนเซอร์ วงจร หรือระบบ เมื่อเวลาในการใช้งาน หรือสิ่งแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ คุณสมบัติครีฟท์นี้ทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าอินพุตของระบบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงก็ตาม ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของอุปกรณ์นั้นด้วย อุณหภูมิรอบข้างในการใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดผลของครีฟท์ขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซนเซอร์ ทำให้ระบบของการวัดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

ฮิสเทอรีซิส เกิดขึ้นจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์เมื่อทำการตรวจวัด ปริมาณฟิสิกส์ทางอินพุต โดยการปรับค่าจากน้อยไปมากและปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย คุณสมบัติฮิสเทอรีซิสนี้ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบ อุปกรณ์ด้วย กราฟคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิสดังกล่าวแสดงได้ดังรูป ปริมาณอินพุตของเซนเซอร์ ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดหรือต้องการตรวจสอบจะถูกปรับค่าให้มีมากขึ้นจนกระทั่งถึงย่านในการวัด สูงสุด ในทางกลับกันก็ทำการปรับค่าให้ลดลงจนกระทั่งถึงย่านในการวัดต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งพบว่า เกิดผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ โดยจะเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณ เอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้ว่าฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิส

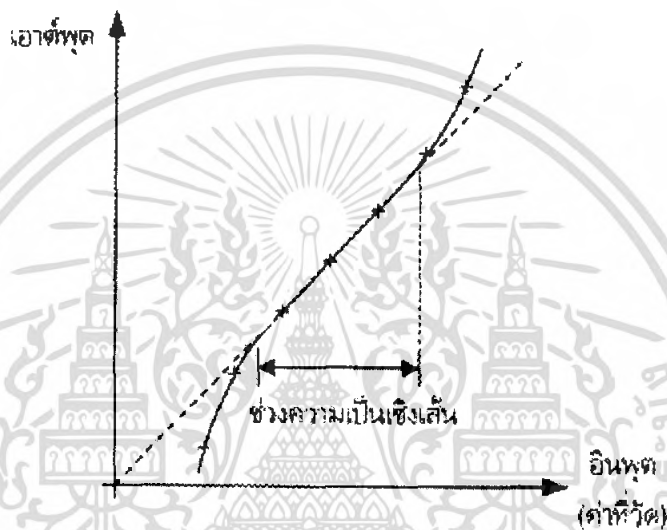
### การหน่วงสัญญาณ (lag)

การหน่วงสัญญาณ คือ การล่าช้าของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตที่ทำการวัด ทั่วไปมีหน่วยเป็นวินาที(seconds) หรือเศษส่วนของวินาที ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท เช่น ในงานระบบควบคุมกระบวนการ การหน่วงสัญญาณเป็นข้อกำหนดสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากมีผลต่อสมรรถนะของระบบเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความเป็นเชิงเส้น (linearity)

คุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้น คือ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของเซนเซอร์ ที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น หรือมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงดังรูป คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นยังแสดงถึงช่วงสูงสุดที่กราฟคุณสมบัติยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่ หรือเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า ช่วงปฏิบัติงาน (operating range) ของเซนเซอร์ โดยทั่วไปนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

### อายุการใช้งาน (operating life หรือ reliability)

อายุการใช้งานของเซนเซอร์ เป็นค่าแสดงถึงอายุการใช้งานของเซนเซอร์ที่ยังคงให้คุณสมบัติในการทำงานเป็นไปตามข้อกำหนดประจำตัวต่างๆ ที่ระบุมาให้ โดยทั่วไปอาจจะกล่าวมาในเทอมของ ระยะเวลา หรือจำนวนครั้งในการใช้งาน เป็นต้น

### ย่านปฏิบัติงาน (range)

ย่านปฏิบัติงานของอุปกรณ์ คือ ขอบเขตในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์นั้นซึ่งสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับย่านปฏิบัติงานของเซนเซอร์ มักกำหนดมาในรูปของค่าอินพุตต่ำสุดและสูงสุดที่ใช้งาน

### อัตราการทำงาน (rating)

เป็นการแสดงถึงอัตราการทนต่อสัญญาณต่างๆ ในการทำงานของอุปกรณ์โดยสามารถที่จะทำงานได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดความเสียหาย ส่วนใหญ่จะระบุโดยอัตรการทนสัญญาณแต่ละชนิดมาด้วย เช่น อัตราของอุณหภูมิในการทำงานสูงสุด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลตอบสนอง (response)

ผลตอบสนองของอุปกรณ์ คือ ช่วงเวลาที่อุปกรณ์ใช้ในการตอบสนองสัญญาณเอาต์พุตให้ มีค่าเท่ากับค่าเอาต์พุตสุดท้าย มีหน่วยเป็นวินาที หรือเศษส่วนของวินาที หรือบางครั้งอาจบอกมา ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าเอาต์พุตสุดท้ายก็ได้

### ความละเอียด (resolution)

ความละเอียดของเซนเซอร์หรืออุปกรณ์การวัด คือ ขนาดปริมาณอินพุตต่ำสุดที่อุปกรณ์ สามารถวัดหรือตรวจสอบได้

### ความไว (sensitivity)

ความไว คือ ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตของอุปกรณ์เทียบกับการ เปลี่ยนแปลงของอินพุต สำหรับค่าความไวของเซนเซอร์ จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณเอาต์พุต ในย่านวัดที่กำหนดมาให้หารด้วยผลต่างของสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นปริมาณที่ทำการวัด หรือเขียน สมการได้เป็น

$$\text{ความไว} = (\text{ค่าเอาต์พุตสูงสุด} - \text{ค่าเอาต์พุตต่ำสุด}) / (\text{ค่าอินพุตสูงสุด} - \text{ค่าอินพุตต่ำสุด}) \quad (2.1)$$

### เสถียรภาพ (stability)

เสถียรภาพบ่งชี้ให้เห็นสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์หรือระบบว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลง ไปมากน้อยแค่ไหน เมื่อป้อนอินพุตที่มีค่าคงที่เป็นเวลานานๆภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลง หาก อุปกรณ์หรือระบบมีความเป็นเสถียรภาพแล้วสัญญาณเอาต์พุตควรมีคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลง มากนัก

### ค่าเบี่ยงเบน (tolerance)

ค่าเบี่ยงเบน บอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด ในบางครั้งค่าความ เบี่ยงเบนอาจใช้ในแสดงถึงความแม่นยำของอุปกรณ์ได้อีกด้วย

## 2.4 ประเภทของเซนเซอร์

### 2.4.1 เซนเซอร์อุณหภูมิ

เซนเซอร์อุณหภูมิเป็นเซนเซอร์ที่ทำหน้าตรวจจับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นแล้วเปลี่ยนรูปของ พลังงานเหล่านั้นกลายมาเป็นระดับอุณหภูมิหรือปริมาณที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิความร้อน อุณหภูมิความเย็น มาเปลี่ยนเป็นค่าในระดับของรูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมนุษย์จะ เหมือนกับส่วนของประสาทที่รับความรู้สึกที่ส่งไปให้สมองรับรู้ ได้แก่ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1.1 เทอร์มิสเตอร์

เทอร์มิสเตอร์มีหลักการของการทำงานคือเปลี่ยนระดับอุณหภูมิให้กลายเป็นระดับของความต้านทาน โดยเทอร์มิสเตอร์สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบคือ

#### เอ็นทีซี

มีการทำงาน คือ เมื่อตัวมันมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานภายในตัวมีค่าที่ต่ำลง และถ้าตัวมันมีอุณหภูมิต่ำลงจะทำให้มีค่าความต้านทานภายในที่สูงขึ้น

#### พีทีซี

มีการทำงาน คือ เมื่อตัวมันมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานภายในตัวมีค่าที่สูงและถ้าตัวมันมีอุณหภูมิต่ำลงจะทำให้มีค่าความต้านทานภายในที่ต่ำลง

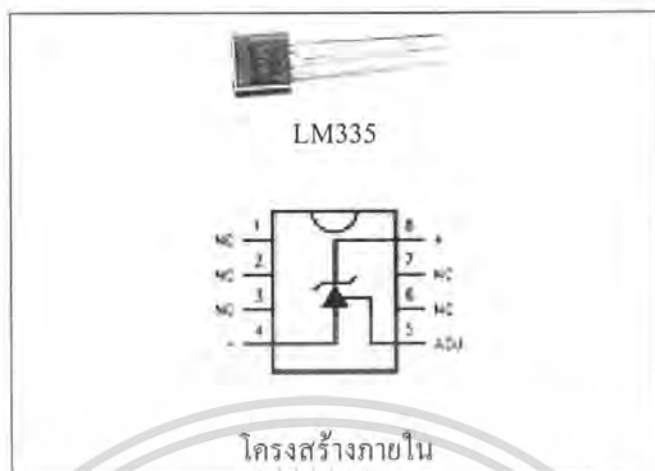


รูปที่ 2.7 อุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์

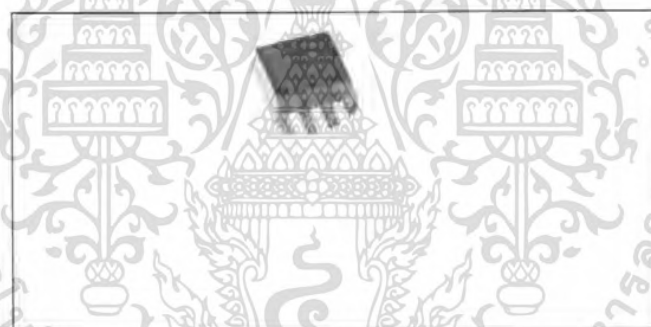
### 2.4.1.2 เทมเพอเรเจอร์เซนเซอร์โมดูล

เทมเพอเรเจอร์เซนเซอร์โมดูลเป็นอุปกรณ์ที่ทำการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความเที่ยงตรงสูง เซนเซอร์แบบนี้จะให้ความเที่ยงตรงของค่าที่อ่านจากเทอร์มิสเตอร์ เช่น ถ้าเรานำเทอร์มิสเตอร์มาใช้งาน ต้องประกอบเทอร์มิสเตอร์เข้ากับวงจรที่เปลี่ยนค่าความต้านทานเป็นระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งถ้าเราออกแบบวงจรไม่ดีทำให้ค่าที่อ่านได้เกิดความผิดพลาดจึงได้มีการสร้างเทมเพอเรเจอร์เซนเซอร์โมดูลเพื่อลดความผิดพลาดในจุดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์เทมเพอเรเจอร์ เซนเซอร์มอดูลเบอร์ LM335  
ที่อ่านค่าอุณหภูมิเป็นระดับแรงดัน



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์เทมเพอเรเจอร์ เซนเซอร์มอดูลเบอร์ DS1820  
ที่อ่านค่าอุณหภูมิแล้วส่งข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัล

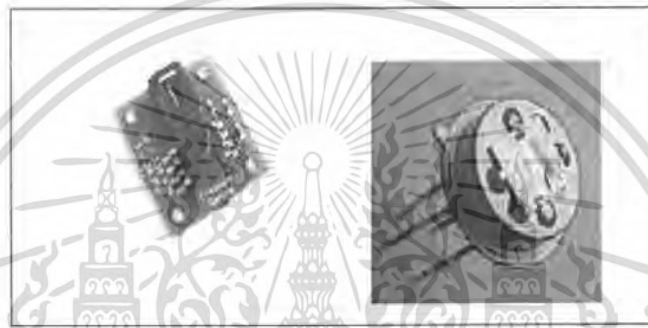
#### 2.4.2 เซนเซอร์(ชีวะ)เคมี

เซนเซอร์(ชีวะ)เคมี คืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณทางเคมีหรือชีวะไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปปริมาณทางเคมีจะอยู่ในรูปแบบการผสมกันหลายชนิด ในรูปของก๊าซของเหลว และของแข็ง ตัวอย่างของเซนเซอร์ทางเคมี เช่น การตรวจจับก๊าซไนโตรเจนในอากาศ (เซนเซอร์ก๊าซ) ตรวจจับไอน้ำในอากาศ(เซนเซอร์ความชื้น) เซนเซอร์เคมีอาจตรวจจับโมเลกุลที่ซับซ้อนได้ เช่น น้ำตาล หรือ โปรตีน ในของเหลว เซนเซอร์ที่ตรวจจับปริมาณทางชีวะภาพจะเรียกว่า เซนเซอร์ชีวะเคมีหรือ เซนเซอร์ชีวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2.1 เซนเซอร์แก๊ส

เซนเซอร์แก๊สจะทำหน้าที่คล้ายกับจมูกของมนุษย์ทำหน้าที่แยกความหนาแน่นของแก๊สที่อยู่ในอากาศ โดยโครงสร้างภายในของเซนเซอร์แก๊สจะมีลักษณะพิเศษที่สามารถเปลี่ยนความหนาแน่นของแก๊สเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันด้วย เช่น ตรวจจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น และส่วนมากจะนำไปใช้ในการตรวจจับอันตราย เช่น ตรวจจับแก๊สรั่ว เป็นต้น



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์เซนเซอร์แก๊สแบบต่างๆ

### 2.4.3 เซนเซอร์แผ่รังสี

การแผ่รังสี หมายถึง การปลดปล่อยอนุภาคหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายอนุภาคที่ปลดปล่อยจากวัตถุปรกติแล้วจะเป็นกัมมันตภาพรังสี ซึ่งหมายถึง อนุภาคที่สามารถปลดปล่อยมาจากนิวเคลียส อาจเกิดจากสารกัมมันตภาพรังสีที่มีค่าเวลาชีวิตลดลง หรือโดยทำปฏิกิริยาภายในนิวเคลียร์กับแหล่งพลังงานอย่างอื่น อนุภาคนิวเคลียสจะไม่เหมือนกับรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตรงที่มวลค่าหนึ่ง มวลนี้จะเป็นตัวแยกประเภทของอนุภาคนิวเคลียร์เป็นกลุ่มต่างๆ เช่น บาร์ยอน(อนุภาคหนัก) เมซอน(อนุภาคปานกลาง) และเลปตอน(อนุภาคเบา)

#### 2.4.3.1 โฟโตทรานซิสเตอร์

โฟโตทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่มีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่ตัวเซนเซอร์จนมีความเข้มที่มีค่าสูงพอจะทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่นำกระแสเหมือนสวิตช์ แต่สามารถนำกระแสได้เพียงทิศทางเดียว เราจึงนิยมใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ไปใช้วัดแสงที่มีความแตกต่างของความเข้มไม่ต่างกันมากเพื่อลดความผิดพลาดในการตัดสินใจของตัวเซนเซอร์ นอกจากนี้ยังสามารถรับแสงที่ตาเปล่าของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ เช่น แสงเอกซเรย์อินฟราเรดที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์โฟโตทรานซิสเตอร์

### 2.4.3.2 โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอด(Photo Diode) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีหลักการทำงานเหมือนกับโฟโตทรานซิสเตอร์ แต่จะนำกระแสได้น้อยกว่าเท่านั้นเอง และตัวโฟโตไดโอดก็มีแบบที่สามารถรับแสงที่ตาเปล่ามองเห็น เช่น แสงอินฟราเรด ได้เหมือนกัน



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์โฟโตไดโอด ที่ใช้รับแสงอินฟราเรด

### 2.4.4 เซนเซอร์เชิงกล

เซนเซอร์เชิงกล อาจเป็นเซนเซอร์ตระกูลใหญ่ที่สุดในบรรดาเซนเซอร์ทั้งหมด เพราะว่าการใช้งานในด้านต่างๆ มีมาก ปริมาณเชิงกลมีอยู่มากมายตัวอย่างปริมาณเชิงกลต่างๆ

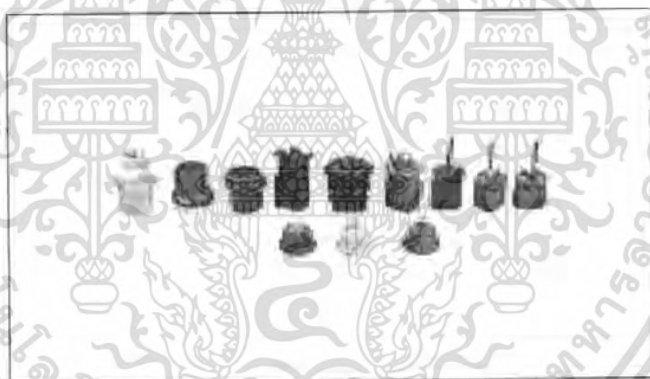
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ 82211 อย่างยิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4.1 เซนเซอร์สัมผัส

เซนเซอร์สัมผัสเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนการสัมผัส เช่น การกด การกระแทก ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเปรียบเสมือนกับผิวหนังของมนุษย์ซึ่งทำหน้าที่รับรู้สิ่งที่สัมผัสจากภายนอกมากระทำ

#### 2.4.4.2 สวิตช์กลไก

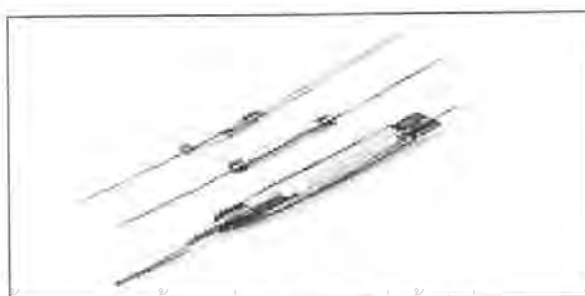
สวิตช์กลไก(mechanical Switch) เป็นอุปกรณ์กลไกที่ทำหน้าที่รับแรงกด แรงกระแทก โดยที่หน้าสัมผัสสวิตช์จะทำการนำกระแสทำให้เราสามารถนำหลักการนี้ไปใช้ในการตัดต่อให้เกิดสัญญาณทางไฟฟ้าได้ สวิตช์ที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมีด้วยกันหลายแบบแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น ในงานหุ่นยนต์ขนาดเล็ก เราจะเลือกใช้สวิตช์ที่มีขนาดเล็กหรือหุ่นยนต์ที่ต้องมีการกระแทกแรงๆ ก็ต้องมีการใช้สวิตช์ที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น



รูปที่ 2.13 สวิตช์ที่รับแรงกระแทกหลายแบบ

#### 2.4.4.3 รีดสวิตช์

รีดสวิตช์(Reed Switch) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ แต่ไม่ได้ตรวจับการกดแต่เป็นการตรวจับแรงแม่เหล็ก เช่น เมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาใกล้จะทำให้รีดสวิตช์นำกระแส



รูปที่ 2.14 รีดสวิตช์

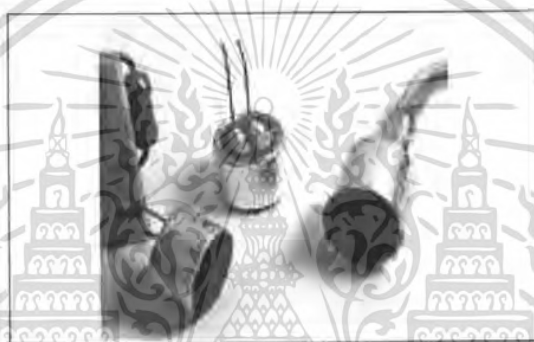
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ทางการศึกษา อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4.4 เซนเซอร์เสียง

เซนเซอร์เสียงมีหลักการทำงานคือทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่เสียงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีหน้าที่คล้ายกับหูของมนุษย์ และนิยมนำไปใช้ในการควบคุมต่างๆ

#### 2.4.4.5 ไมโครโฟน

ไมโครโฟน เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เปลี่ยนระดับของเสียงให้กลายเป็นระดับของแรงดันไฟฟ้า ไมโครโฟนมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ โดยไมโครโฟนที่ใช้เป็นเซนเซอร์คือแบบคอนเดนเซอร์ ไมโครโฟนซึ่งมีขนาดเล็ก ความไวสูง ซึ่งจะเหมาะต่อการนำไปใช้เป็นเซนเซอร์



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์คอนเดนเซอร์ไมโครโฟน

#### 2.4.4.6 อัลตราโซนิกเซนเซอร์

อัลตราโซนิกเซนเซอร์มีหลักการคล้ายกับ ไมโครโฟนแต่จะรับเฉพาะที่ความถี่ที่สูงประมาณ 38-40 กิโลเฮิรตซ์ซึ่งสูงกว่าความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยิน ความถี่นี้มักนำไปใช้กับการวัดระยะทาง เช่น เซนเซอร์กันชนของรถที่ใช้เตือน



รูปที่ 2.16 อุปกรณ์อัลตราโซนิกเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภารกิจงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.5 เซนเซอร์แม่เหล็ก

### 2.4.5.1 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

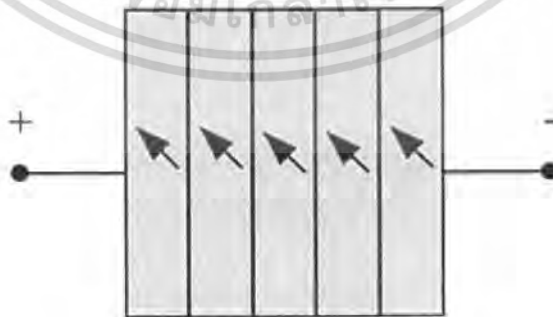
สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยมีโครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้า เรียกว่า แมกนีโตรีซิสเตอร์ จะอาศัยหลักการแมกนีโตรีซิสเทนซ์ (Magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก คือ จะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำพาหะเกิดเป็นมุม  $\theta$  ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระยะทางที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ความต้านทานเบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ 2.1 และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบนมุมการเคลื่อนที่  $\theta$  หาได้สมการที่ 2.2

$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \quad (2.2)$$

$$R(B_z) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{dr} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \quad (2.3)$$

แมกนีโตรีซิสเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

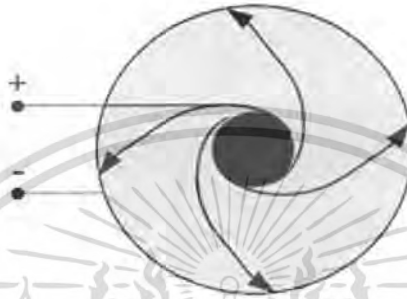
1. **ฮอลล์เทตแบบขนาน** ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานต่อเรียงกันเป็นแผ่นขนาน ซึ่งในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.ฮอลล์เอฟเฟกต์แบบวงกลม** จะมีหลักการทำงานคือสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านไฟฟ้า นอกจากนี้ความต้านทานจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุ ในการสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ควรจะเลือกความคล่องตัวสูง



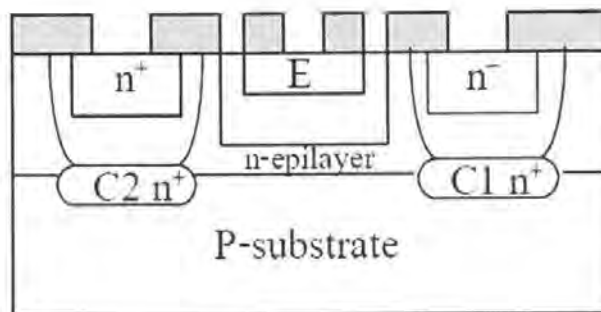
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์แบบวงกลม

#### 2.4.5.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magneto transistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์จะอาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

##### 1.แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่แนวตั้ง (Vertical magneto transistor)

ดังรูป 2.19 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่แนวตั้ง จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (Buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลกเตอร์ทั้งสองตัวสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด  $n^+$  เพื่อไม่ให้ฮอลล์เอฟเฟกต์จึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างชั้น (Buried layer) ทั้งสอง

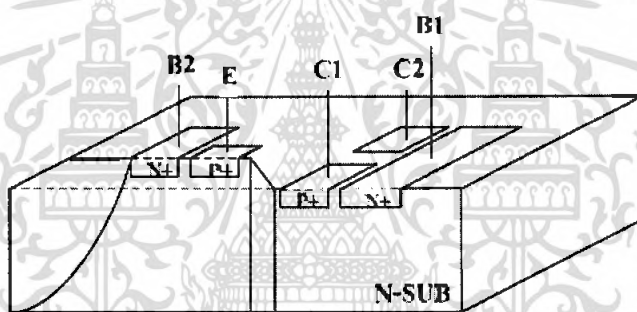


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดและห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
รูปที่ 2.19 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปถึงคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วน โดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้น (Buried layer) ทั้งสองขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแส คอลเลคเตอร์จะอยู่ในสภาวะสมดุล แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแส คอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่อยู่ในสภาวะสมดุลจะเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขึ้น

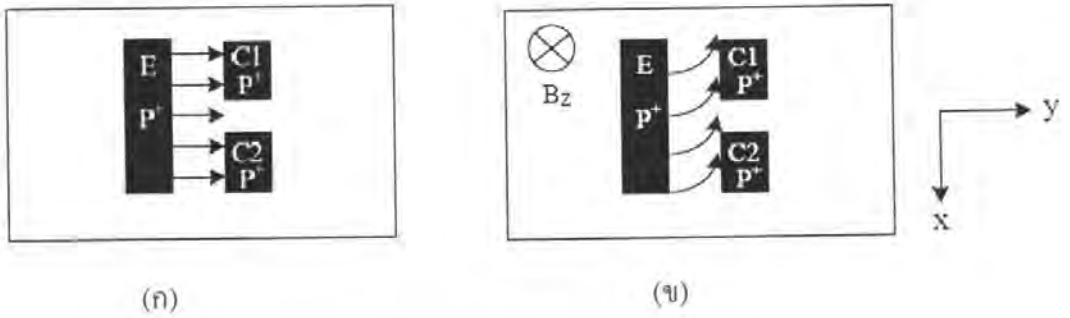
## 2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่แนวอน (Lateral magnetotransistor)

ผังรูป 2.20 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่แนวอน จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวอน ประกอบด้วยอิมิตเตอร์ E, สองคอลเลคเตอร์ C1, C2 และ สองขั้วเบสคอนแทค B1, B2



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวอน

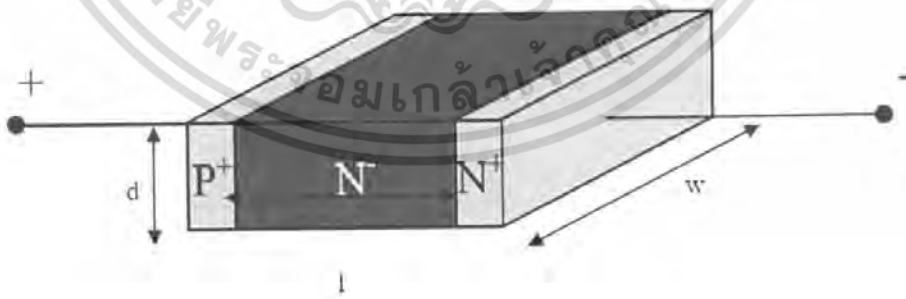
ในการทำงานอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสและไปยังคอลเลคเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปคอลเลคเตอร์ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลคเตอร์จะมีปริมาณเท่ากัน ดังรูป 2.21(ก) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้แรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากันทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่อยู่ในสภาวะสมดุล ดังรูป 2.21(ข)



รูปที่ 2.21 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ(โฮล) (ก) $B_z=0$  (ข) $B_z>0$

**2.4.5.3 แมกนีโตไดโอด (Magneto Diode)**

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสามแม่เหล็กโดยมีโครงสร้างเป็นไดโอด โดยมีมิติความยาว,ความกว้างและความสูง ( $l \times w \times d$ ) จะอาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะระหว่างสองรอยต่ออันเป็นผลเนื่องมาจากแมกนีโตคอนเซนเตรชัน (Magneto concentration effect) โดยพาหะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของแมกนีโตไดโอดอีกด้วย โดยการใช้  $Si-Al_2-O_2$  และ  $Si-SiO_2$  ที่พื้นผิวเรียกว่า SOS (Silicon-On-Sapphire) ดังรูป 2.22



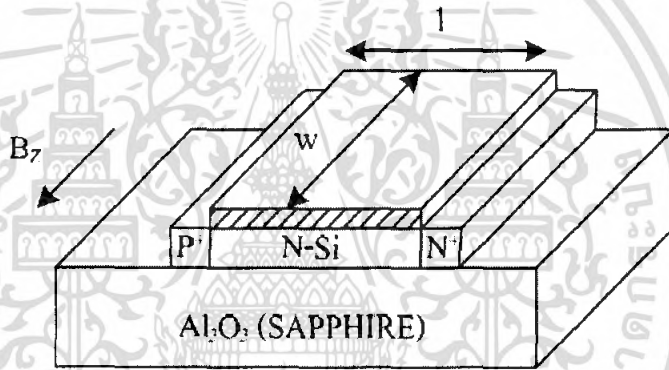
รูปที่ 2.22 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

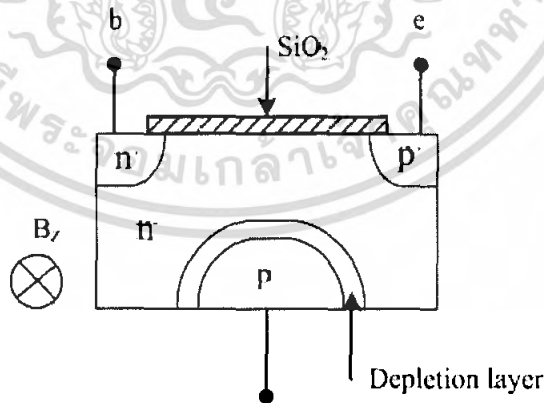
ข้อเสียของ SOS

1. การสร้าง Si-Al<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> จะเกิดขึ้นได้ยากบริเวณผิวหน้า
2. การตรวจจับสนามแม่เหล็กจะไม่เป็นเชิงเส้น
3. อุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ

พื้นฐานการใช้แมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS ดังรูป 2.23 โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตรการรวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS แมกนีโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปทางคอลเลกเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลกเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.23 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

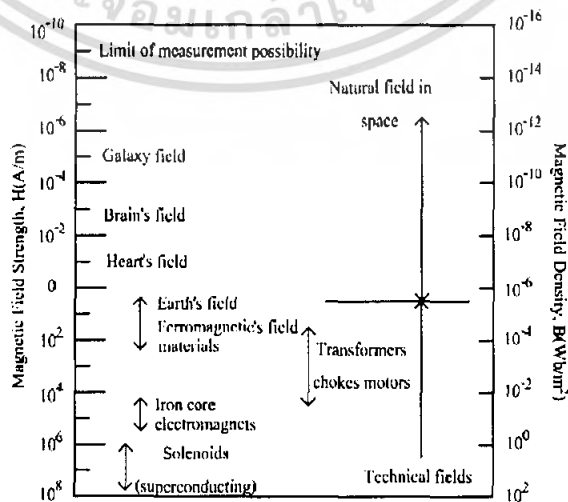
## บทที่ 3

### แมกนีโตไดโอดแบบคู่

เป็นการศึกษาอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีโครงสร้างแบบไดโอด 2 ตัว ประกอบด้วยขาทั้ง 3 คือ ขาแอนโนด 1 ขาและขาแคโทด 2 ขา(แคโทด1กับแคโทด2) สามารถใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอุปกรณ์ โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ทำให้มีแรงลอเรนซ์มากระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเกิดการเบี่ยงเบน เป็นเหตุให้มีปริมาณของกระแสไหลที่ ขา แคโทด1 กับขาแคโทด2ต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบประยุกต์ใช้วัดค่าของสนามแม่เหล็ก แล้วยังได้มีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

#### 3.1 ทฤษฎีสานแม่เหล็ก

โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติเช่น ร่างกายของมนุษย์ บริเวณกล้ามเนื้อซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 210-5 A/m หรือบริเวณพื้นผิวของดวงอาทิตย์ซึ่งมีสนามแม่เหล็กประมาณ 600 A/m [20] สนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบร่างกายของมนุษย์ยกตัวอย่างเช่น สมองของมนุษย์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเวียนในระดับไมโคร, หัวใจ และเส้นเอ็นกล้ามเนื้อซึ่งจะมีสนามแม่เหล็กประมาณ  $10^{-2}$  A/m อยู่ในร่างกายของมนุษย์ในรูปที่ 2.4 แสดงระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่  $10^{-9}$  A/m จนถึง  $10^8$  A/m โดยสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูงสามารถเกิดได้จาก กระบวนเทคนิคการสร้าง, สายส่งสัญญาณ, หม้อแปลงไฟฟ้า (101-105 A/m), วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ( $1-10^6$  A/m) และขดลวดสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด ( $10^6-10^7$  A/m)



รูปที่ 3.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ [15]

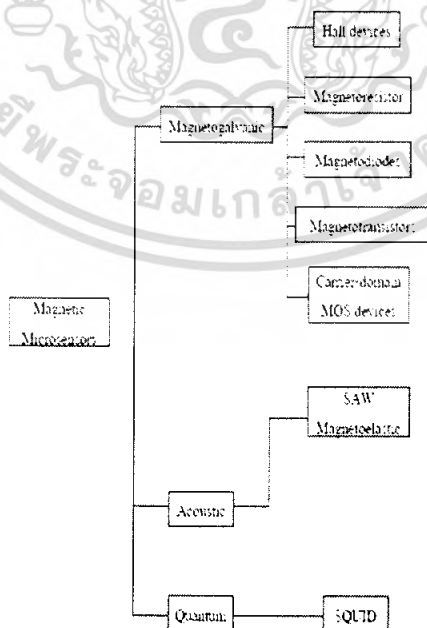
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (H) แสดงหน่วยเป็น แอมแปร์/เมตร (A/m) โดยที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) มีหน่วยเป็น เทสลา (T) ซึ่งนิยามของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B คือเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) เวเบอร์ ตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ 1 ตารางเมตร ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ในวัสดุจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยแสดงได้โดยสมการ 3.1

$$B = \mu^B H = \mu_0^B \mu_R^B H \quad (3.1)$$

โดย  $\mu^B$  คือค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุซึ่งค่าซึมซาบแม่เหล็กในอวกาศ  $\mu^B$  จะมีค่า  $4\pi \times 10^{-7}$  และค่าซึมซาบแบบสัมพัทธ์  $\mu^B$  จะมีค่าประมาณ  $\mu^B \gg 1$  ในวัสดุที่ค่าซึมซาบระดับสูง แต่อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจะใช้ค่าซึมซาบระดับต่ำคือประมาณ  $\mu^B \cong 1$

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจัดเป็นอุปกรณ์ชนิดไมโครเซนเซอร์โดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการเกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะที่เคลื่อนที่ขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน รูปที่ 3.2 แสดงการจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยจำแนกตามหลักการพื้นฐานของแต่ละอุปกรณ์, ชนิดของอุปกรณ์ และชนิดของสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งชนิดที่ใช้ฟิล์มที่บางและหนาของเซนเซอร์ SAW (Surface Acoustic Wave) นอกจากนี้แสดงถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีหลักการแตกต่างชนิดอื่นและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กขนาดเล็กได้โดยมีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สูงมาก คือ SQUID (Super Conducting Quantum Interference)



รูปที่ 3.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

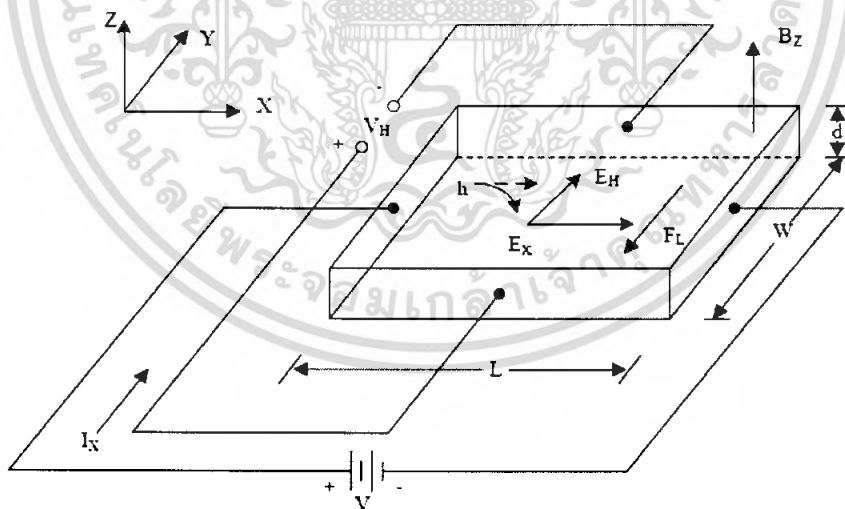
### 3.2 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

เป็นการทดลองที่มีความสำคัญ เพราะการทดลองนี้ทำให้เราทราบค่าต่างๆ หลายค่าที่สำคัญ ที่อยู่ภายในสารกึ่งตัวนำ เช่น ความหนาแน่นของพาหะ ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ เลยเป็นที่นิยมในการวัด

#### หลักการ

ขณะที่มีกระแส  $I_x$  ไหลผ่านในแท่งตัวนำทิศทาง  $+x$  และให้สนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศทาง  $z$  โดยมีทิศทางที่ตั้งฉากกับกระแส  $I_x$  จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าด้านขวางเกิดขึ้น โดยมีทิศทาง  $+y$  ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์”(Hall Effect) ผลจากการทดลองเรื่องนี้ ยังสามารถพิสูจน์ได้ว่ามีพาหะที่นำประจุอยู่ 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอน กับ โฮล

เราพิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีแท่งหนึ่ง ซึ่งยาว  $L$  กว้าง  $W$  และหนา  $d$  ถูกนำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันมีความต่างศักย์  $V_x$  โวลต์ ทำให้เกิดกระแส  $I_x$  ไหลในทิศทาง  $+x$  และให้สนาม  $B_z$  ตัดผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทาง  $+z$  โดยมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของกระแส  $I_x$



รูปที่ 3.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก และมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกอยู่ภายในแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า  $E_x$  จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $V_x$  ในทิศทาง  $+x$  และเมื่อมีสนามไฟฟ้า  $B_z$  ตัดผ่าน โดยมีทิศทางตั้งฉากกับกระแส จะเกิดมีแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำต่อโฮล โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (3.2)$$

โดยที่  $\vec{F}_L$  คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\vec{F}_L| = F_L = e.v_x.B_z \quad (3.3)$$

และมีทิศทางในแกน-y ดังนั้นจะทำให้โฮลเบี่ยงเบนมาทางแกน-y และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม(ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลด้านหน้ามีจำนวนมาก ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $E_H$  ในทิศ +y สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศทาง+y ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ ( $F_L$ ) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน( $eE_H$ ) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$eE_H = F_L = e.v_x.B_z \quad (3.4)$$

จาก

$$E_H = v_x.B_z \quad (3.5)$$

$$J_x = p.e.v_x \quad (3.6)$$

หรือ

$$v_x = \frac{J_x}{p.e}$$

แทนค่า  $v_x$  ลงในสมการ จะได้

$$E_H = \frac{J_x.B_z}{p.e} \quad (3.7)$$

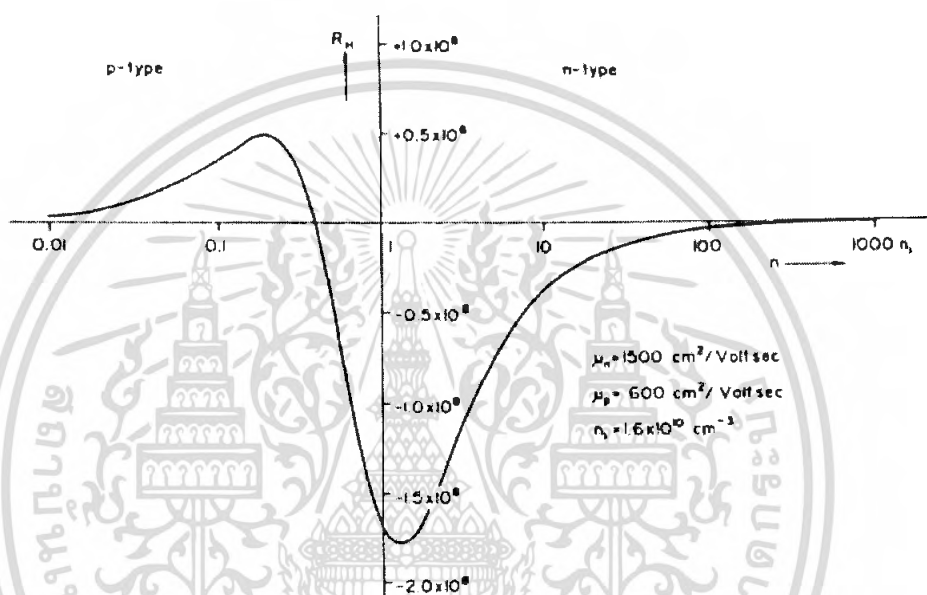
ดังนั้นจะได้

$$\frac{E_H}{J_x.B_z} = \frac{1}{p.e} = R_H \quad (3.8)$$

โดย  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์(Hall coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการได้ระดับต่ำ สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าแรงดันฮอลล์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการได้ระดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการได้ปในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการ ได้ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก

จากรูป 3.3 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $w$  จะได้

$$V_H = E_H \cdot w \quad (3.9)$$

โดยที่  $V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำโดยการแทนค่า

$$J_x = \frac{I}{w \cdot d} \text{ และ } E_H = \frac{V_H}{w} \text{ ลงในสมการ (3.8) จะได้}$$

$$R_H = \frac{V_H}{w \cdot I \cdot B_z} \cdot w \cdot d \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 
$$R_H = \frac{d.V_H}{I.B_z} = \frac{1}{p.e} \quad (3.11)$$

$$V_H = \frac{I.B_z}{p.e.d} \quad (3.12)$$

ความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = \frac{1}{e.R_H} = \frac{I.B_z}{e.d.V_H} \quad (3.13)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$p = R \frac{w.d}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{w.d}{L} \quad (3.14)$$

จาก

$$p = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e.p.\mu_p}$$

ดังนั้นจะได้

$$u_p = \frac{1}{e.p.P} = \frac{1}{\rho} R_H \quad (3.15)$$

จากสมการ (3.13), (3.14) และ (3.15) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดีในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ มีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $R_H$  แสดงดังนี้

$$R_H = -\frac{1}{n.e} \quad (3.16)$$

ดังนั้น โดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็กจะเป็น

$$S = \frac{V_H}{I.B} = \frac{R_H.G}{d} = \frac{G.r_n}{q.n.d} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าค่าความไว ที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำ และฮอลล์เพลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ  $E_H$  และ  $E_x$  ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม  $\theta_H$  กับแกน +x ดังรูปซึ่งมุม  $\theta_H$  ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta_H = \frac{E_H}{E_x}$$

โดยแทนค่า  $E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p.e}$  และ  $J_x = \sigma \cdot E_x$  จะได้

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

หรือ

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

จะได้

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

$$\mu = \sigma \cdot R_H$$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ  $R_{Hl}$  สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{Hl} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (3.18)$$

และ

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

หรือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_{HI} = \mu_H = 1.18\mu_p \quad (3.19)$$

โดย  $\mu_H$  คือ สภาพความคล่องตัวของโฮล (Hall mobility) และ  $\mu_{HI}$  คือสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ  $R_{HI}$  แสดงได้ดังสมการที่ 3.19

$$R_{HI} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93R_H \quad (3.20)$$

และ

$$\mu_{HI} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93\mu_p \quad (3.21)$$

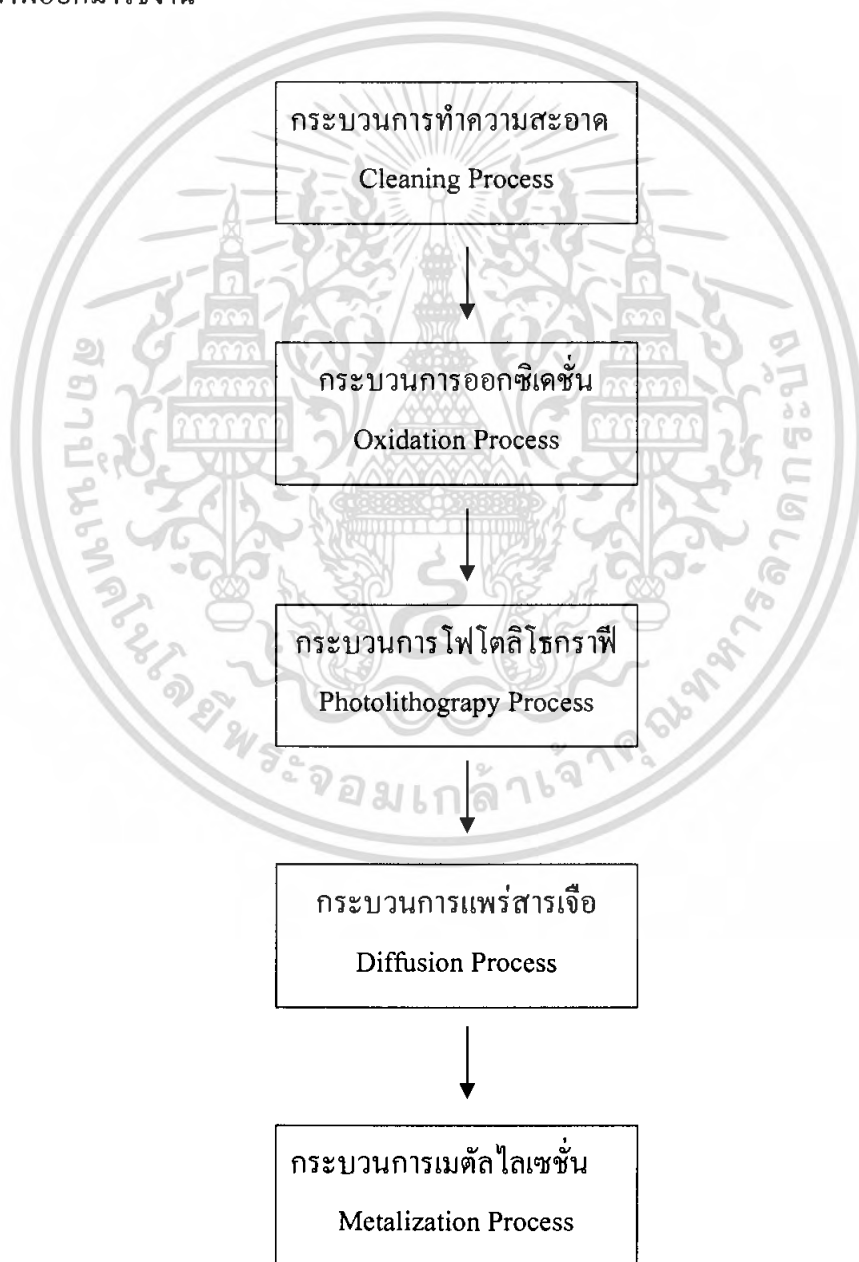


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอด

เป็นขั้นตอนหรือกระบวนการที่ถือว่ามีความสำคัญที่สุดก็ได้ เพราะอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติหรือการทำงานที่จะไปไปตามหลักการและทฤษฎีต่างๆ ได้อย่างถูกต้องนั้นก็ต้องขึ้นอยู่กับกระบวนการนี้ จึงควรมีการศึกษาให้มีความรู้ความเข้าใจถึงกระบวนการวิธีสร้างเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพออกมาใช้งาน



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.1 แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 กระบวนการทำความสะอาด(Cleaning Process)

กระบวนการทำความสะอาดมีเป้าหมายหลักคือ กำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอน เช่น กำจัดฝุ่น กำจัดไขมัน กำจัดเศษโลหะ เพื่อความสะอาดของแผ่นซิลิคอนก่อนลงมือทำการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

#### 4.2 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation Process)

คือการก่อตัวของซิลิคอน ไดออกไซด์บนพื้นผิวซิลิคอน โดยที่ซิลิคอนออกในบรรยากาศของออกซิเจน :O<sub>2</sub> และน้ำ:H<sub>2</sub>O ที่อุณหภูมิสูงประกอบด้วย

##### 1. Wet Oxidation



##### 2. Dry Oxidation

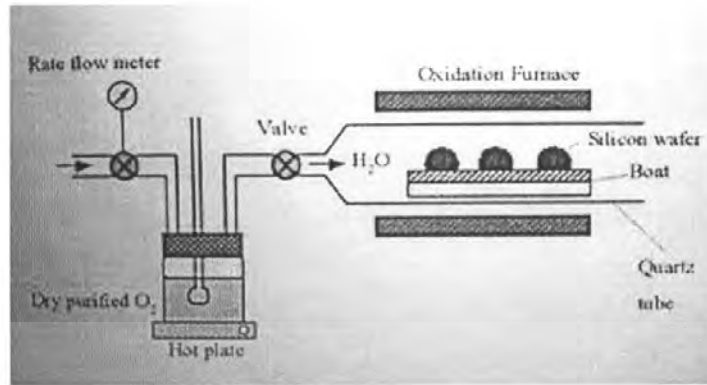


ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะ โปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีและยังช่วยควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น

จากสมการทางเคมีข้างต้นกระบวนการออกซิเดชัน มีอยู่ 2 แบบคือ

##### 4.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น(Wet Oxidation)

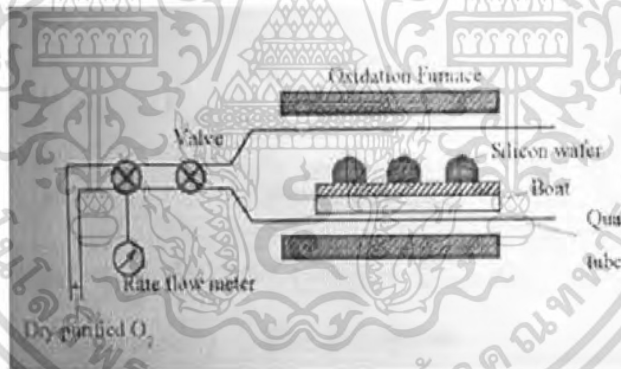
เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ การเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า **Dry Oxidation** เนื่องจากโมเลกุลเองดังที่ได้กล่าว แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ **Wet Oxidation** คือคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ไม่ดี ประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ของอะตอมของสารเจือน้อยกว่า สภาพผิวสัมผัสที่ไม่สมบูรณ์ และมีรูพรุน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวไฮโดรเจนที่หลุดจากโมเลกุลของไอน้ำ



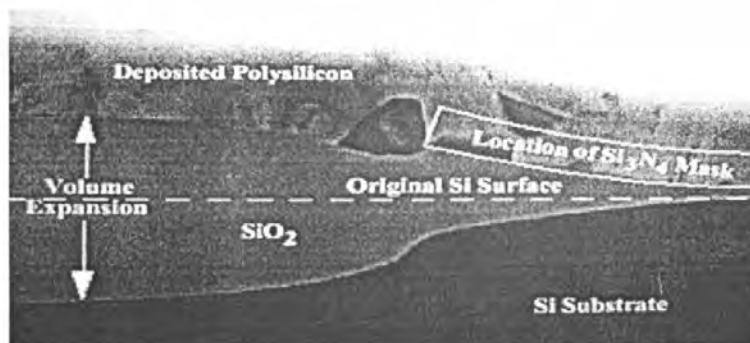
รูปที่ 4.2 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชัน

**4.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง(Dry Oxidation )**

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูง พื้นผิวที่ได้ค่อนข้างเรียบกว่า กรณีของ **Wet Oxidation** แต่ ปฏิกิริยาเกิดช้าและอัตราการเกิดต่ำกว่า



รูปที่ 4.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง



รูปที่ 4.4 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการออกซิเดชัน

1. ระยะเวลาของผลึกผลเนื่องจากระนาบผลึกพิจารณาจาก

- จำนวนพันธะของซิลิคอนที่มีต่อพื้นที่บนผิวหน้าของซิลิคอนที่แต่ละระนาบ
- ทิศทางของผลึกมีผลกับค่าพลังงานกระตุ้นที่เริ่มปฏิกิริยา

2. ผลเนื่องจากสารเจือ

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

3. ผลเนื่องจาก  $\text{H}_2\text{O}$

4. ผลเนื่องจากคลอรีน

Cl เป็นตัวช่วยแก้ไขคุณลักษณะของอุปกรณ์ให้ดีขึ้น ซึ่งได้มาจากการเป่าแก๊ส  $\text{HCl}$ ,  $\text{TCE}$ ,  $\text{TCA}$  ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชันด้วยเช่นกัน

5. ผลเนื่องจากความดัน

#### 4.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography Process)

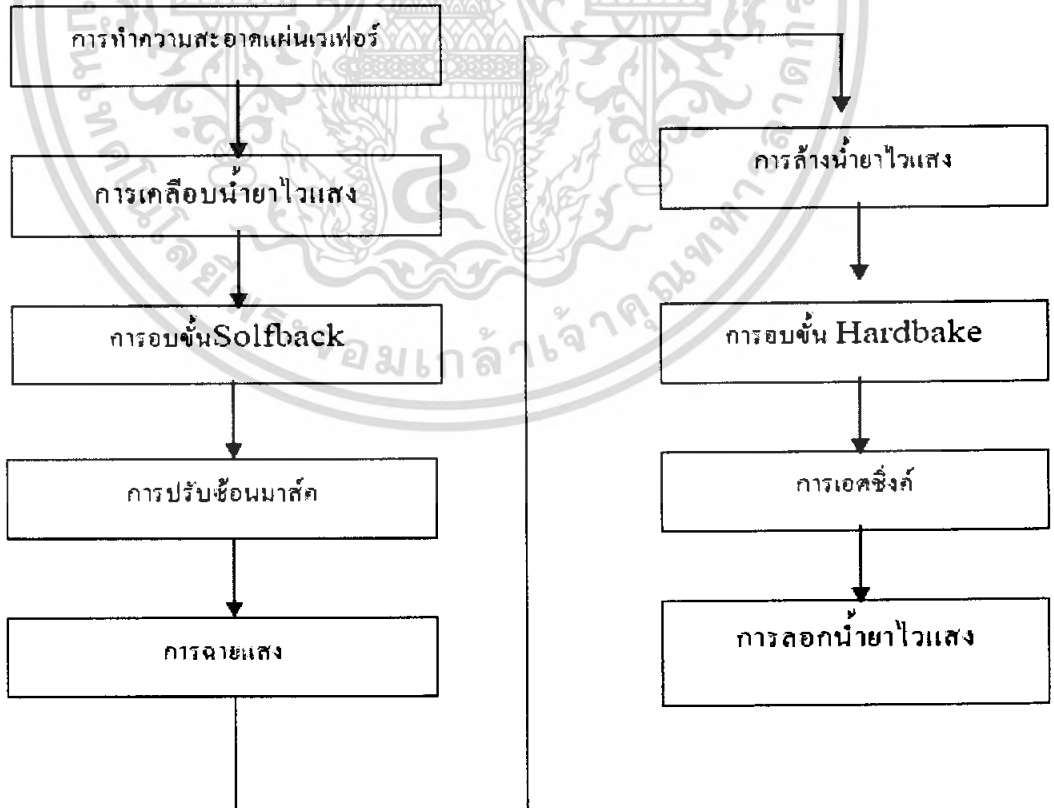
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography Process) คือกระบวนการเกี่ยวกับการส่งผ่านลวดลาย(pattern) จากมาร์คลงไปยังบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

กระบวนการ Photolithography ต้องการห้องที่สะอาดสำหรับการปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในขั้นตอนน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียที่เกิดขึ้นควรควบคุมไม่ให้เกิน 10% ไม่เช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะมีการมาส์คที่ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50% ดังนั้นการที่ห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับกระบวนการ Photolithography การสร้างห้องสะอาดส่วนมากจะเป็นแบบ Vertical Laminar Flow ที่มีการกรองฝุ่นออกจากอากาศเพื่อให้เป็นห้องสะอาดในระดับตั้งแต่ Class10K-Class1 ดังแสดงในตาราง 4.1

**ตารางที่ 4.1** แสดง CLASS ต่างๆของห้องสะอาด

ลำดับชั้น ห้องสะอาด	จำนวนอนุภาคขนาด $0.5 \mu m$ ต่อลูกบาศก์เมตร	จำนวนอนุภาคขนาด $5 \mu m$ 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)

**กระบวนการPhotolithography Process โดยขั้นตอนพื้นฐานต่างๆ ดังต่อไปนี้**



**รูปที่ 4.5** แสดงขั้นตอนกระบวนการPhotolithography Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นหน้าเปิดประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์(Wafer Cleaning)

ขั้นตอนแรกของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีคือการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดอยู่บนผิวเวเฟอร์ เช่น โลหะ ผุ่นละออง สารอินทรีย์หรืออิมพริวติวต่างๆ สิ่งสำคัญของกระบวนการPhotolithography สารละลายที่สำคัญมากและใช้บ่อยที่สุดก็คือ น้ำ DI(deionized) ซึ่งเป็นน้ำที่ทำให้บริสุทธิ์และผ่านตัวกรองหรือฟิลเตอร์เพื่อกรองผุ่นละอองอนุภาคและสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำDI เป็นน้ำที่มีความต้านทานสูงมาก

### 4.3.2 การเคลือบสารไวแสง(Photoresist coating)

สารไวแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

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

สารไวแสงทั้งสองชนิด จะให้ผลของการทำงานที่ตรงกันข้ามกัน กล่าวคือถ้าหากใช้ Negative Photoresist ส่วนที่ถูกแสงจะไม่ลอกออกเมื่อถูก Development ส่วน Positive Photoresist ส่วนที่ถูกแสงจะลอกออกเมื่อถูก Development

สิ่งสำคัญก่อนเคลือบสารไวแสงคือแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าและสร้างชั้นออกไซด์แล้ว อบในตู้ประมาณ 30-60 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดออกได้ง่าย ซึ่งการเคลือบสารไวแสงสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

**แบบที่ 1** สปินเนอร์(Spinner) เริ่มต้นโดยการหยดสารไวแสงลงบนแผ่นซิลิคอนที่ติดอยู่บนเป็นหมุนของเครื่องสปินเนอร์ โดยใช้ความเร็วรอบสูงเพื่อที่จะให้สารไวแสงเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ บนแผ่นผลึกหนาประมาณ 1000-2000 อังสตรอม โดยใช้ความเร็วรอบ 3000-6000 rpm เป็นเวลา 30 นาที ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำเกินไป ลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบอยู่บนผิวผลึกจะเกิดการนูนบริเวณกลางแผ่น แต่ถ้าใช้ความเร็วรอบที่สูงเกินไป ชั้นฟิล์มที่เคลือบก็จะกระจ่ายไปนูนบริเวณขอบและถ้ามีการเคลือบสารที่หนาเกินไปจะทำผิวฟิล์มหยาบไม่เรียบ โดยขั้นตอนในระหว่างการเคลือบสารไวแสงนี้ต้องระมัดระวังผุ่นละอองอย่างมาก

**แบบที่ 2** การเคลือบด้วยสเปรย์(Spray Coating) มีหลายแบบ ส่วนมากใช้ในโรงงาน

**แบบที่ 3** วิธีใช้ลูกกลิ้ง(Roller Coating) ซึ่งวิธีนี้จะใช้เคลือบเฉพาะตอนที่ตัดแยกชิพโดยเคลือบหมดทั้งแผ่น 2 ด้าน และนำไปทำการถ้ำลายเส้นที่จะทำการตัด ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวสำหรับใบเพชรตัด และยังเป็นกำบังกันผุ่นและรอยเปื้อนต่างๆ จากการตัด ซึ่งส่วนมากจะใช้สารไวแสงแบบบวกเพราะถ้าใช้สารไวแสงแบบลบ ผุ่นและจุลินทรีย์อาจทำให้เกิด Pinhole บนฟิล์มได้ หลังจาก develop แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การอบขึ้น Softback

การอบขึ้น Softback จะช่วยในการยึดติดกับแผ่นซิลิคอนและช่วยในการลอกออกชั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 10 ถึง 30 นาที ในเตาที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศา ในอากาศหรือบรรยากาศไนโตรเจน

### 4.3.4 การปรับชั้นมาสก์(Mask Alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาสก์ โดยการนำกระจกโฟโตมาสก์วางทับบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโตมาสก์ชั้นแรกสามารถทำได้โดยไม่มีการปรับชั้นมาสก์ ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งของวงจรรวมบนแผ่นผลึกเลยแต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้นได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

ดังนั้นการใช้กระจกมาสก์ตั้งแต่มาสก์ 2 เป็นต้นไปก่อนที่จะฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับชั้นมาสก์ เพื่อให้ลวดลายบนกระจกมาสก์ซ้อนทับกับลวดลายที่อยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ซึ่งทำให้ขบวนการโฟโตกราฟิสามารถเปิดชั้นออกไซด์ได้อย่างถูกต้อง และเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมากดังนั้นการปรับชั้นจึงใช้อุปกรณ์ช่วยเรียกว่า ตัวปรับชั้นมาสก์ ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือ นำแผ่นผลึกวางและติดกับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับเลื่อนได้ในแนวนอนแนวตั้งฉากและแนวสูงนอกจากนี้ยังปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมอเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาสก์จะถูกยึดให้อยู่หนึ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนแผ่นโฟโตมาสก์พร้อมกับการปรับแผ่นเลื่อนแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงจนกระทั่งภาพลวดลายที่บนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาสก์ซ้อนทับกันตรงตำแหน่งที่ถูกต้องจากนั้นทำการปรับแผ่นผลึกเลื่อนขึ้นในแนวสูงจนแนบสนิทกับกระจกมาสก์ดังนั้นเราก็จะได้ตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อเตรียมชั้นตอนการฉายแสงต่อไป

### 4.3.5 การฉายแสง(Exposure)

การฉายแสง(Exposure) คือขั้นตอนที่ต่อจากการปรับชั้นมาสก์(Alignment) วิธีการก็คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงย่านอุลตราไวโอเลตเอ็กโพสหรือฉายผ่านลวดลายฟิล์มโลหะบนกระจกมาสก์ที่ทำการอัลไลน์กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ด้านบนมีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่แสงจะผ่านลวดลายหรือไม่ผ่านลวดลายฟิล์มโลหะด้านบนจะเป็นตัวบังแสงไว้ส่วนที่ผ่านได้จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสงหรือโฟโตริซิสบนผิวซิลิคอน การเอ็กโพสหรือฉายแสงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งพอให้แสงทำปฏิกิริยากับโฟโตริซิสอย่างสมบูรณ์

#### 4.3.6 การฉาบน้ำยาไวแสง(Development)

Development เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงด้วยน้ำยา Developer โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการ Develop ส่วนที่ถูกแสงจะละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่

#### 4.3.7 การอบชั้น Hardbake

หลังจากการฉายแสงและทำการ Development ชั้นตอน Hardbakeing จะช่วยทำให้โฟโตริซิส ติดกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดีขึ้น ชั้นตอนนี้จะอบในเตาที่อุณหภูมิ 120 องศา ถึง 180 องศา เป็นเวลา 20 ถึง 30 นาที

#### 4.3.8 การกัด(Etching)

การแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ กัดด้วยสารละลายทางเคมี(Wet chemical etching)และการกัดโดยใช้ก๊าซหรือการกัดแบบกัดแห้ง(Dry etching)

การกัดคือการกัดชั้นของซิลิคอน ไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องหรือพื้นที่ให้ได้ตามต้องการ สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีส่วนผสมหลักคือกรดไฮโดรฟลูอริกหรือ HF จะเป็นสารละลายที่ใช้กัดซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีอัตราการกัดอยู่ในช่วง 10 ถึง 100  $\mu\text{m}/\text{min}$  ที่ 25 องศา เราต้องคำนวณหาความหนาของซิลิคอน ไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ให้เหมาะสมเพราะสารละลายทางเคมีจะกัดทุกทิศทุกทางเท่ากันหมดถ้าเราปล่อยให้กัดในเวลาที่มากไปจะทำให้เกิดการกัดที่ด้านข้างทำให้ลวดลายเสียหายได้ หลังจากกัดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เราจะได้ช่องหรือลวดลายตามมาส์คบนผิวหน้าซิลิคอน ไดออกไซด์แล้ว

#### 4.3.9 การลอกน้ำยาไวแสง

การลอกน้ำยาไวแสงออกจากแผ่นผลึกเป็นขั้นตอนต่อจากการ Etching โดยการจุ่มแผ่นผลึกลงไปใต้น้ำยาลอกฟิล์ม อาจเป็นสารเคมีหรือใช้พลาสมาเพื่อทำให้ผิวผลึกสะอาดเตรียมนำไปแพร์สารเจือได้ ซึ่งถ้าบนผิวหน้าของซิลิคอนมีความสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพร์สารเจือ

เมื่อลอกชั้นไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์(microscope)เพื่อดูว่ามี การกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่ติดไม่แน่นหรือเกิดการกัดที่มากเกินไปถ้าเสียหายมาก อาจต้องกลับไปเริ่มทำใหม่

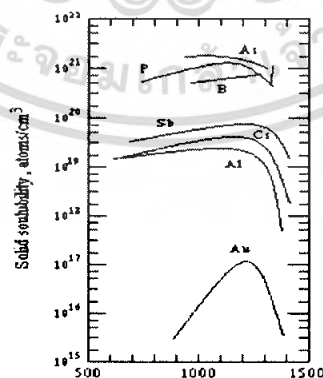
#### 4.3.10 กระบวนการแพร่สารเจือ(Deposition)

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการแพร่สารเจือลงในแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการแพร่ด้วยอุณหภูมิสูงทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ(Source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรองและถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็นขึ้น

ขั้นตอนการแพร่สารเจือทำได้โดยกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งเป็นแหล่งเจือ โบรอน(Boron Source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และฟอสฟอรัสใช้สร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปในบรรยากาศของสารเจือ ทำให้อะตอมของสารเจือเคลื่อนที่เข้าไปยังฐานรองความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิตลอดจนระยะเวลาในการแพร่ที่มีผลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพร่ ในกระบวนการแพร่สารเจือแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การแพร่สารเจือ ขั้นต้น(Pre-deposition)และการขับลึก(Drive-in)

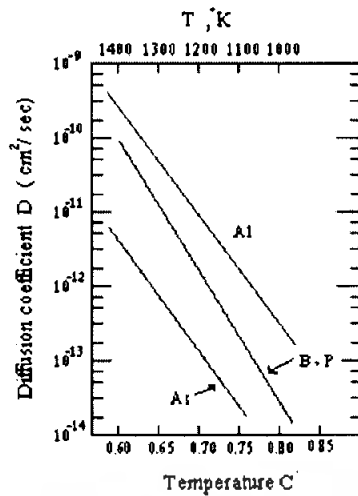
##### 1. การแพร่สารเจือขั้นต้น(Pre-deposition)

การแพร่สารเจือขั้นต้น ในอุณหภูมิเป็นการควบคุมปริมาณสารเจือ โดยควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแพร่สารเจือ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆจะมีปริมาณสารเจือสูงสุดในการแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรอง ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการแพร่เข้าไปในของแข็ง(Solid solubility)และปริมาณสารเจือที่ผลึกฐานรองจะเรียกว่าความเข้มข้นผิว(Surface concentration) โดยความสำคัญของค่า Solid solubility กับอุณหภูมิในการแพร่สามารถแสดงดังรูปต่อไปนี้



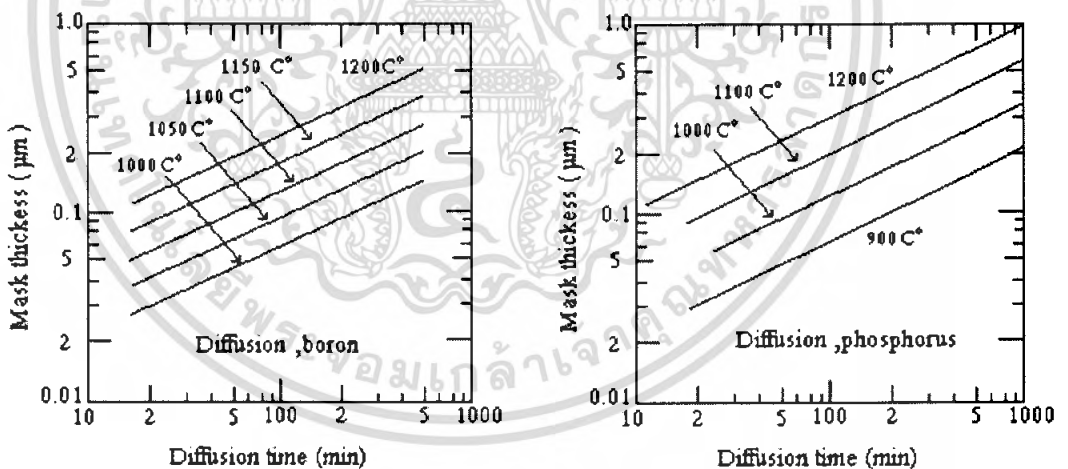
รูปที่ 4.6 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอุณหภูมิ

สำหรับความสามารถในการแพร่ของสารเจือ เช่น As,P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิคอน ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นหน้ากากเพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของฐานรอง โดยความหนาของชั้นซิลิคอนที่พิจารณาจาก อุณหภูมิ เวลาและสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส

## 2. การขั้วลึก

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารเจือบริเวณผิวที่ได้จากขั้นตอนการแพร่ชั้นต้น แพร่ลงไปในเนื้อสารมากขึ้นความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

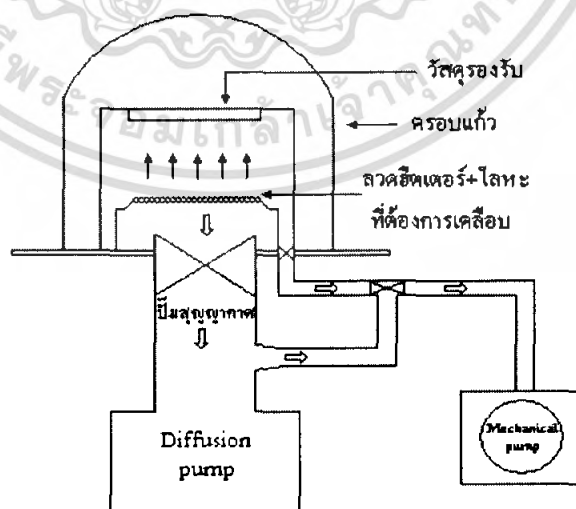
#### 4.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Metalzation Process)

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ตามลำดับขั้นตอนต่างๆจนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ละส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงแยกกันอยู่ในสภาพยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้จึงจำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metalzation Process)ก่อน

กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Metalzation Process) คือกระบวนการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายใน สำหรับการเลือกโลหะเพื่อใช้เคลือบแผ่นซิลิคอนเพื่อให้เป็นรอยต่อแบบโอห์มมิครอยต่อโอห์มมิก(Ohmic contact) หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายในของวงจรรวมซึ่งมีคุณสมบัติเช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูงติดแน่นกับผิวซิลิคอนไดออกไซด์และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ได้แก่ อะลูมิเนียม(AL), ทอง(Au)และเงิน Ag เป็นต้น

เทคนิคในกระบวนการเมทัลไลเซชันใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศโดยใช้เทคนิคกระบวนการระเหยในสุญญากาศ(Evaporation)ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลต่อการแพร่กระจายไอออนแต่มีข้อเสียตรงอายุการใช้งานของไส้หลอดจะสั้น สำหรับการเคลือบโลหะทำได้โดยการทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจากไส้ที่ทำจากทังสเตท(Tungstan)หรือ(Molynum)

#### เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

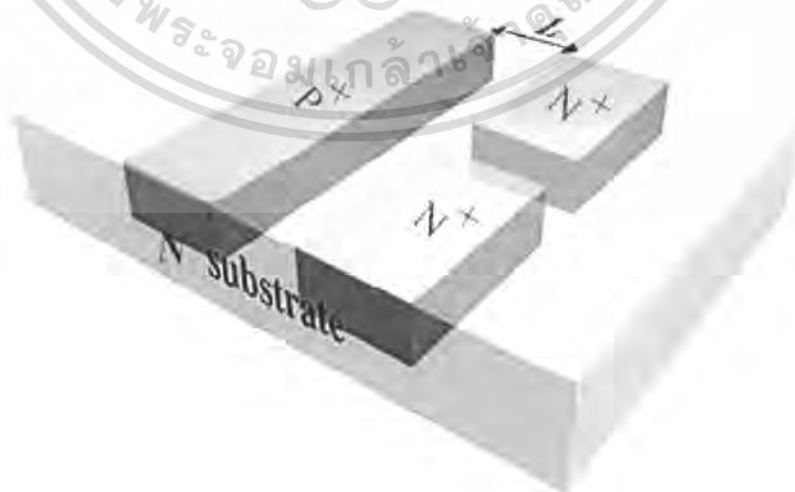
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใส่หลอดทำให้ร้อนโดยผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลื่อนโลหะจะถูกควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไส้เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้จนเป็นของเหลวที่ติดกับไส้ก็จะระเหยเป็นไอพุ่งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางไว้ใน Chamber

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า ระเหยกลายเป็นไอก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ไส้ต้องเลือกให้มีขนาดที่พอเหมาะ สมกับสารที่ใช้ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการและพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร AL, Au, Ag, Pd เป็นต้น

#### 4.5 หลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่

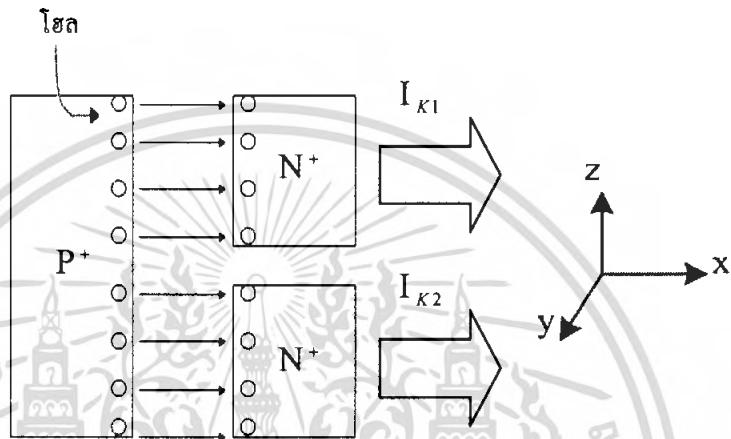
โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบคู่แสดงดังรูป 4.10 ประกอบด้วยขาทั้ง 3 คือ ขาเอาโนด 1 ขา และขาแคโทด 2 ขา (แคโทด 1 กับ แคโทด 2) สามารถใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอุปกรณ์ โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้มีแรงลอเรนซ์มากระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเกิดการเบี่ยงเบน เป็นเหตุให้มีปริมาณของกระแสไหลที่ ขา แคโทด 1 กับขา แคโทด 2 ต่างกันหรืออยู่ในสถานะที่ไม่สมดุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

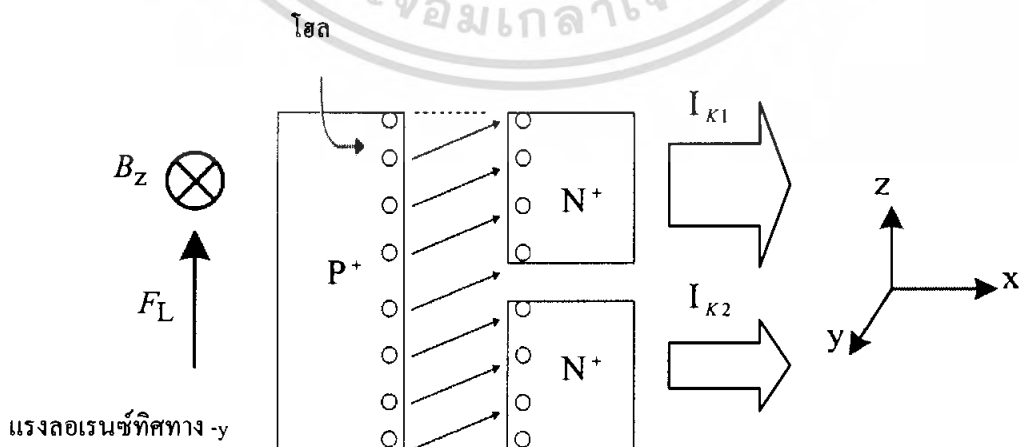
รูปที่ 4.10 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบคู่

แมกนีโตไดโอดแบบคู่ขณะที่ไม่มีความแม่เหล็กตัดผ่าน ( $B_z=0$ ) และได้รับไบอัสตรง มีการทำงานภายในหรือการเดินทางของประจุพาหะอยู่ในสภาวะที่สมดุลกล่าวคือ ประจุพาหะจากสาร  $P^+$  (วาเลนซ์) จะมีการเคลื่อนที่ตามทิศทางของกระแส ซึ่งทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปยังสาร  $N^+$  ทั้งสอง (แคโรด 1 กับแคโรด 2) เป็นแนวเส้นตรง และมีปริมาณของกระแสที่ขั้วของแคโรด 1 กับแคโรด 2 เท่ากันจึงทำให้มีผลต่างของกระแสเป็นศูนย์



รูปที่ 4.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในสภาวะสมดุล

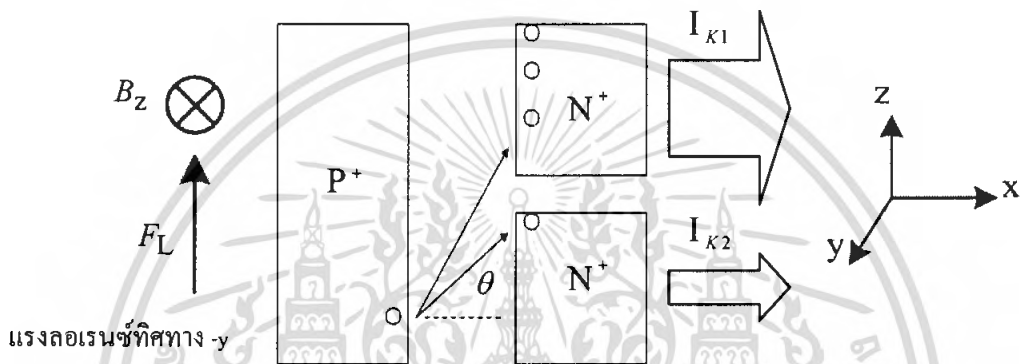
แต่เมื่อมีความแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวอุปกรณ์ (ทิศทาง  $z$ ) พาหะจึงถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทิศทาง  $-y$  ทำให้พาหะซึ่งเคลื่อนที่อยู่ในทิศทาง  $x$  ถูกเบี่ยงเบนไปในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสแคโรด 1 กับกระแสแคโรด 2 จึงทำให้มีผลต่างของกระแสไม่เท่ากับศูนย์



รูปที่ 4.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในสภาวะไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงลอเรนซ์มีแรงกระทำกับประจุพาหะมากขึ้น ตามสมการ  $|FL| = F_L = e \cdot V_{DX} \cdot B_Z$  พาหะถูกแรงกระทำจากแรงลอเรนซ์มากขึ้นทำให้ประจุพาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้น จาก  $\theta_H = \mu_p \cdot B_Z$  ซึ่งประจุพาหะบางส่วนที่เบี่ยงเบนที่แคโรด 2 เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นไปยังแคโรด 1 ดังรูป จึงทำให้กระแสแคโรด 1 เพิ่มขึ้นแต่ในทางกลับกันแคโรด 2 ลดลง จึงเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง

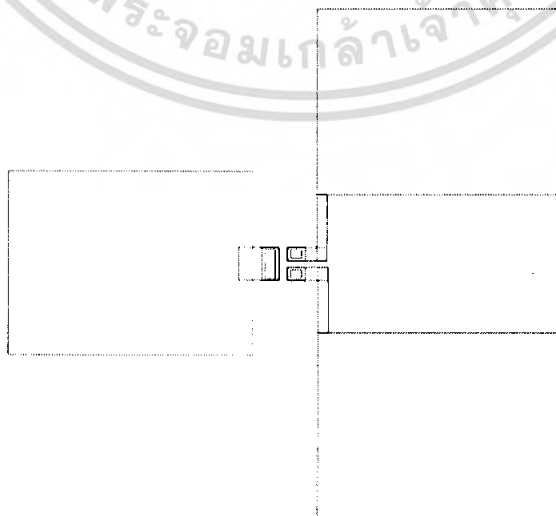


รูปที่ 4.13 ประจุพาหะเคลื่อนที่ในมุมกว้างขึ้นตามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

#### 4.6 การออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่

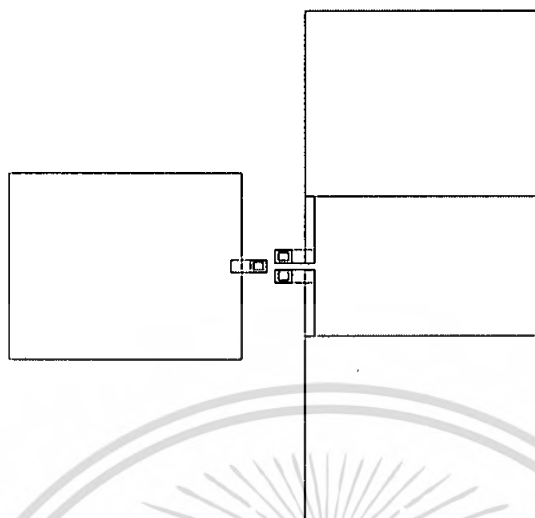
สามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ และแต่ละรูปแบบมีอยู่ด้วยกัน 2 ระยะ คือ  $50 \mu m$  กับ  $100 \mu m$  (คือ ระยะห่างระหว่างสาร P+ กับ N+)

- ที่ระยะ  $50 \mu m$

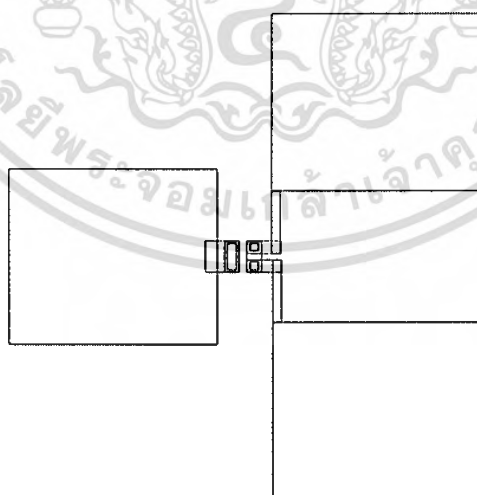


รูปที่ 4.14 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 1 ที่ระยะ  $50 \mu m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



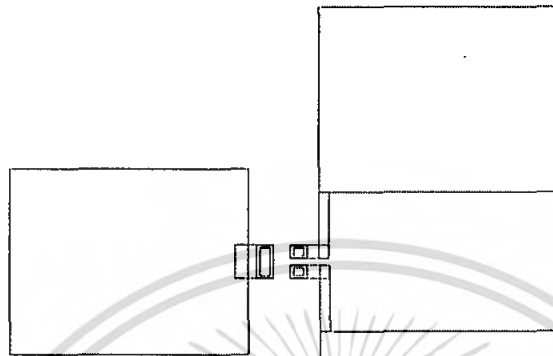
รูปที่ 4.15 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 2 ที่ระยะ  $50 \mu\text{m}$



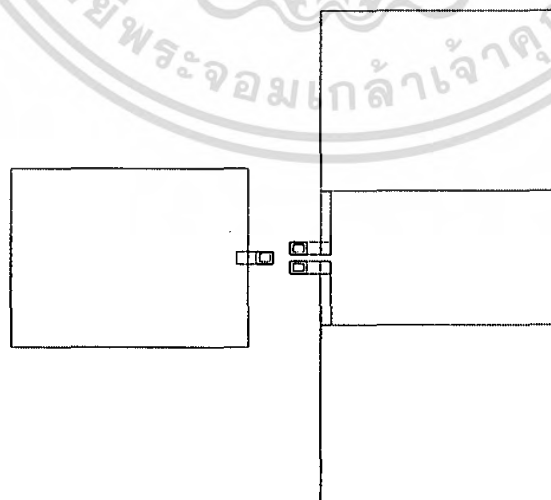
รูปที่ 4.16 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 3 ที่ระยะ  $50 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ระยะ  $100 \mu\text{m}$

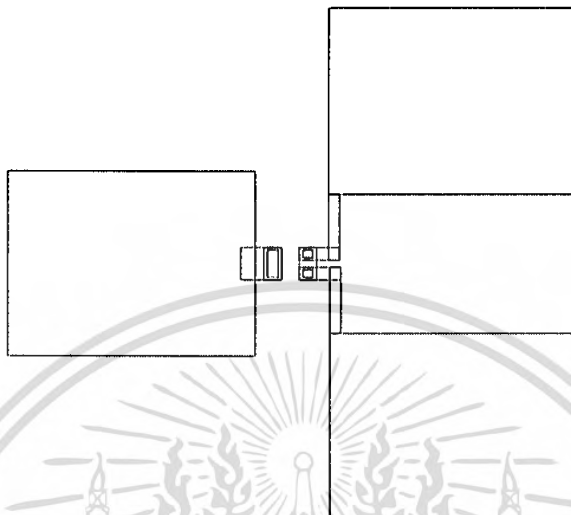


รูปที่ 4.17 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 1 ที่ระยะ  $100 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.18 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 2 ที่ระยะ  $100 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

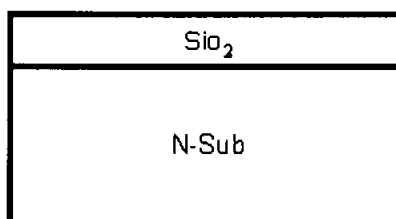


รูปที่ 4.19 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบที่3 ที่ระยะ  $100 \mu\text{m}$

#### 4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่

##### 1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

- ดั้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง ประมาณ 4 วินาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่สอง ประมาณ 4 วินาที
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$



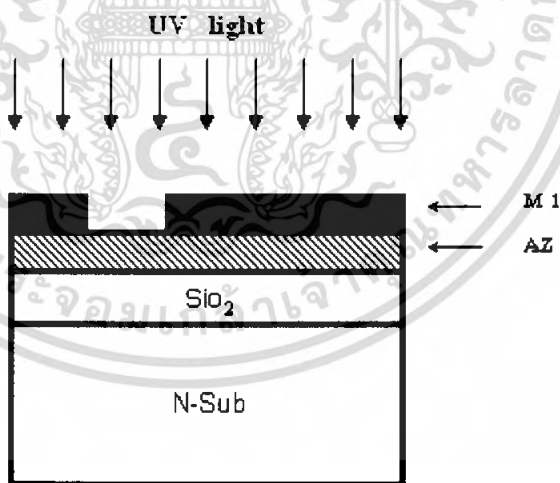
รูปที่ 4.20 แผ่นซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. กระบวนการ โฟโวลิตโทกราฟี มาส์คที่ 1

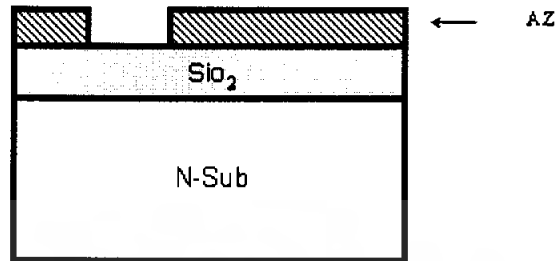
ทำการถ่ายมาส์คไปยังผิวน้ำของแผ่นซิลิคอน

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ,1350) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  20 นาที
- การปรับชั้นมาส์ค (Alignment (M 1))
- การฉายแสง (UV Expose) 20 วินาที
- Development1 15วินาที
- Development2 15วินาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$
- อบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  20 นาที



รูปที่ 4.21 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาส์คที่ 1

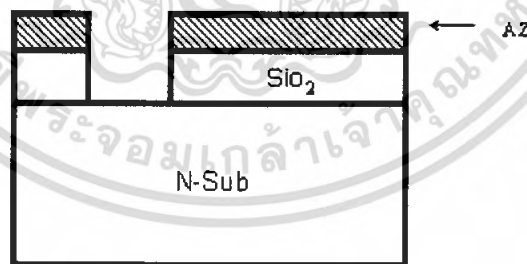
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี

### 3. กระบวนการ Etching

- จุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



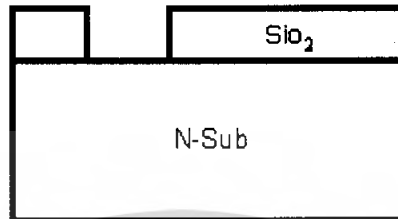
รูปที่ 4.23 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

### 4. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

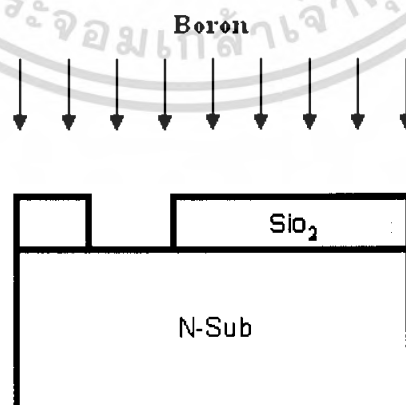
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 4.24 แผ่นซิลิกอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

#### 5. กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน (Diffusion)

- Activate แผ่น  $B_2O_3$  ด้วย  $O_2$  1200 cc/min
- Diffusion 25 นาที
- $O_2$  1200 cc/min 10 นาที
- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

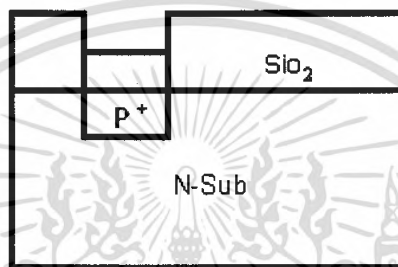


รูปที่ 4.25 แผ่นซิลิกอนขณะทำการแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6. กระบวนการ drive in (Temp 1100<sup>o</sup>C)

- Dry Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min 30 นาที
- Wet Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1000 cc/min 30 นาที
- Dry Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min 30 นาที

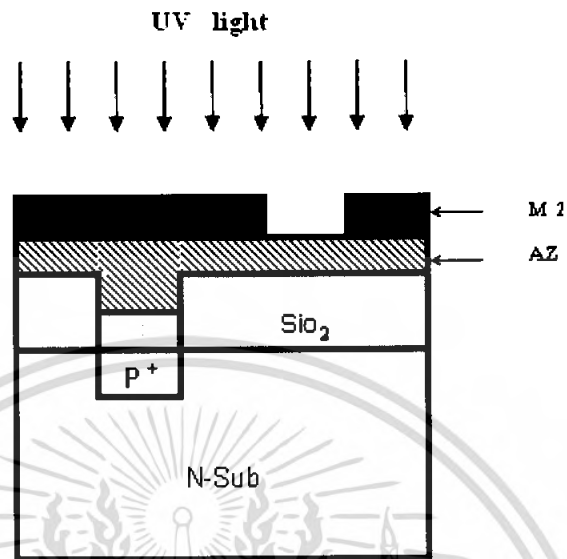


รูปที่ 4.26 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in

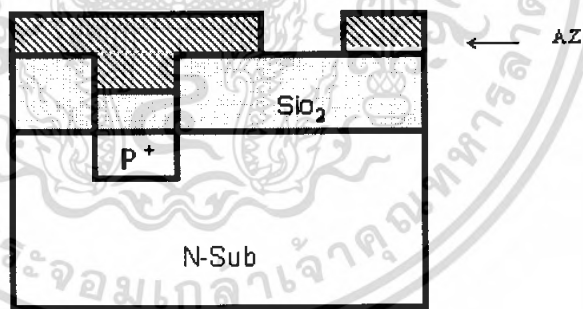
#### 7. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95<sup>o</sup>C 20 นาที
- การปรับซ้อนมาส์ค (Alignment (M 2))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development1 15วินาที
- Development2 15วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟิล์มที่ 95<sup>o</sup>C 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 2

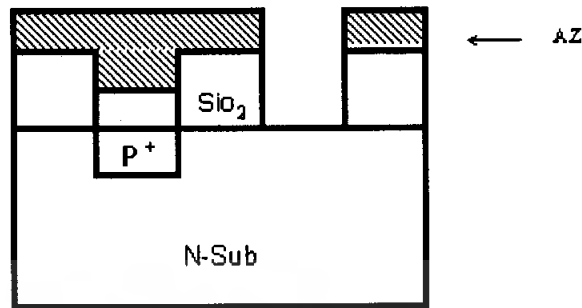


รูปที่ 4.28 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโต้ลิโทกราฟี

#### 8. กระบวนการ Etching

- จุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

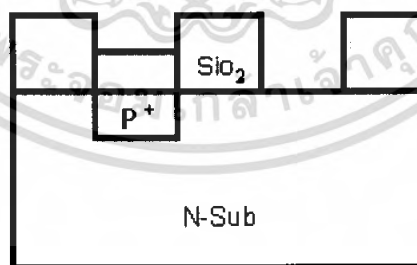
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

#### 9. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



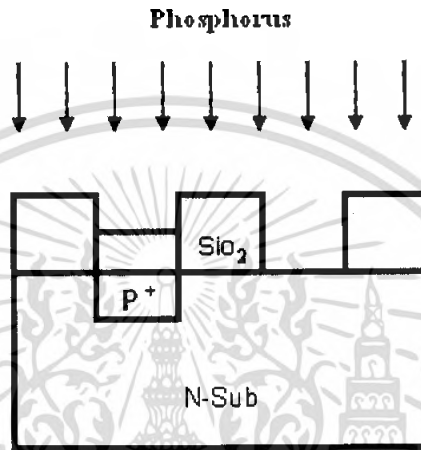
รูปที่ 4.30 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

#### 10. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (Diffusion)

- Diffusion  $N_2$  800 cc/min 25 นาที
- $O_2$  1200 cc/min 10 นาที
- จุ่มในสารละลาย HF 5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

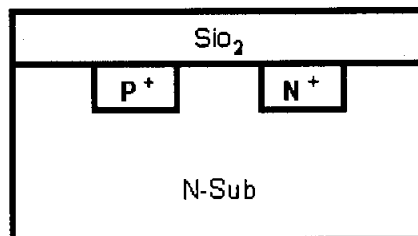
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 4.31 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ

11. กระบวนการ drive in (Temp  $1100^{\circ}C$ )

- Dry Oxidation ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 15 นาที
- Wet Oxidation ด้วย  $O_2$  1000 cc/min 20 นาที
- Dry Oxidation ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 15 นาที

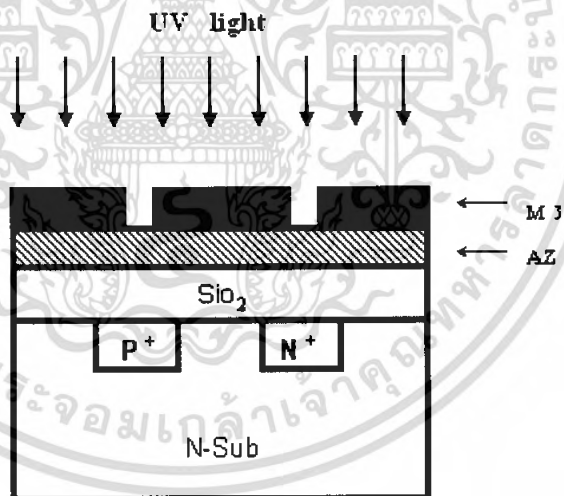


รูปที่ 4.32 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

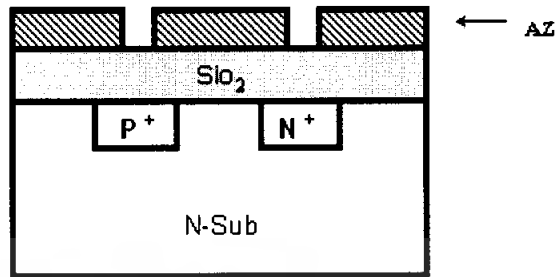
## 12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3 (Contact)

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับซอแนมาส์ค (Alignment (M 3))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development1 15วินาที
- Development2 15วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที



รูปที่ 4.33 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาส์คที่ 3

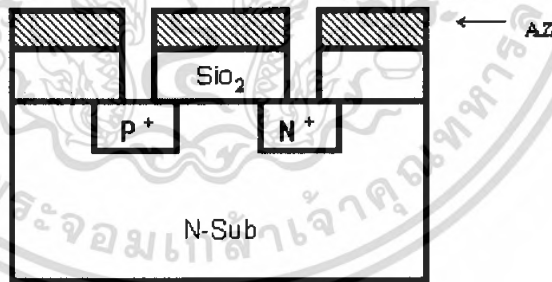
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แผ่นซอลิโคนหลังผ่านการโฟโต้ลิโทกราฟี

### 13. กระบวนการ Etching

- จุ่มในน้ำสารละลาย buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



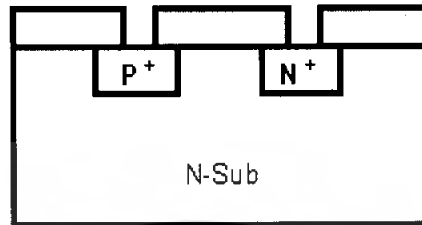
รูปที่ 4.35 แผ่นซอลิโคนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

### 14. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง

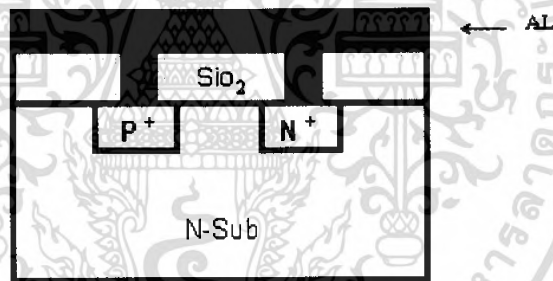
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 4.36 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

15. การเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator



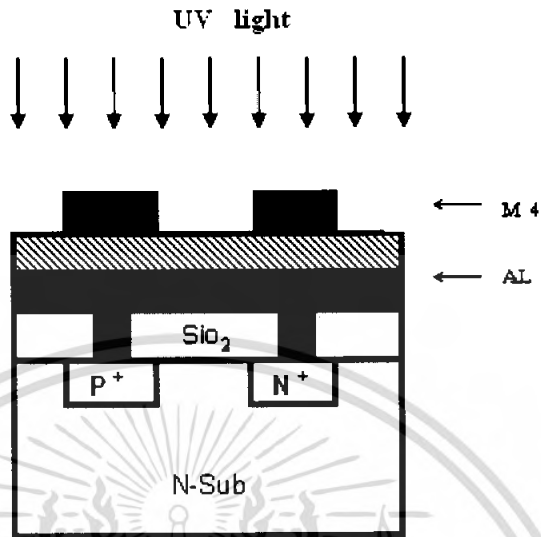
รูปที่ 4.37 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม

16. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 4 (AL)

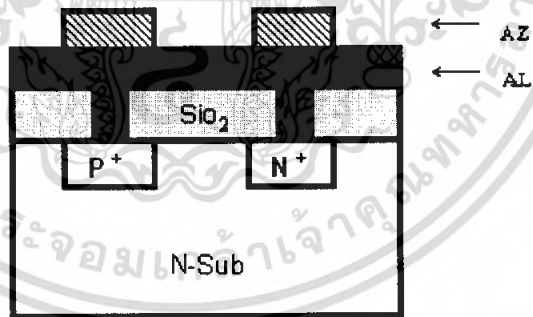
- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่  $95^{\circ}C$  20 นาที
- การปรับซ็อนมาส์ค (Alignment (M 4))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที



รูปที่ 4.38 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 4

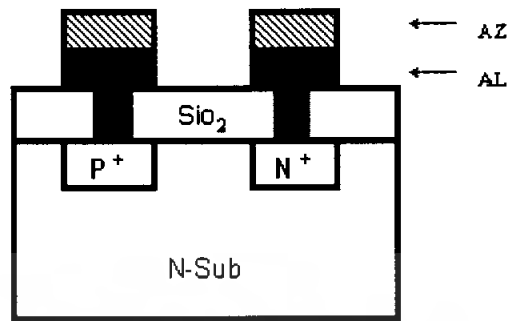


รูปที่ 4.39 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโต้ลิโทกราฟี

17. กระบวนการ Etching (Al)

- จุ่มในน้ำสารละลาย Phosphoric Aid
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง

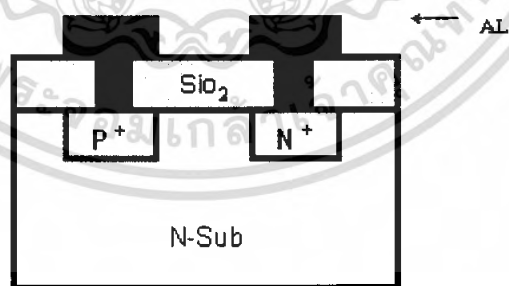
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นอลูมิเนียม

18. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

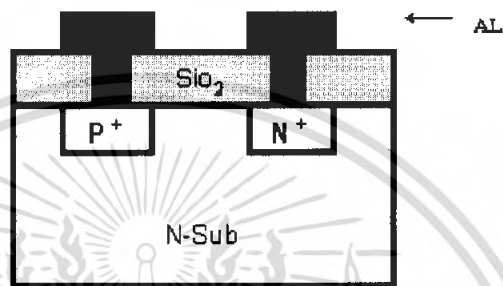


รูปที่ 4.41 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 19. Sintering

ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 10 นาที



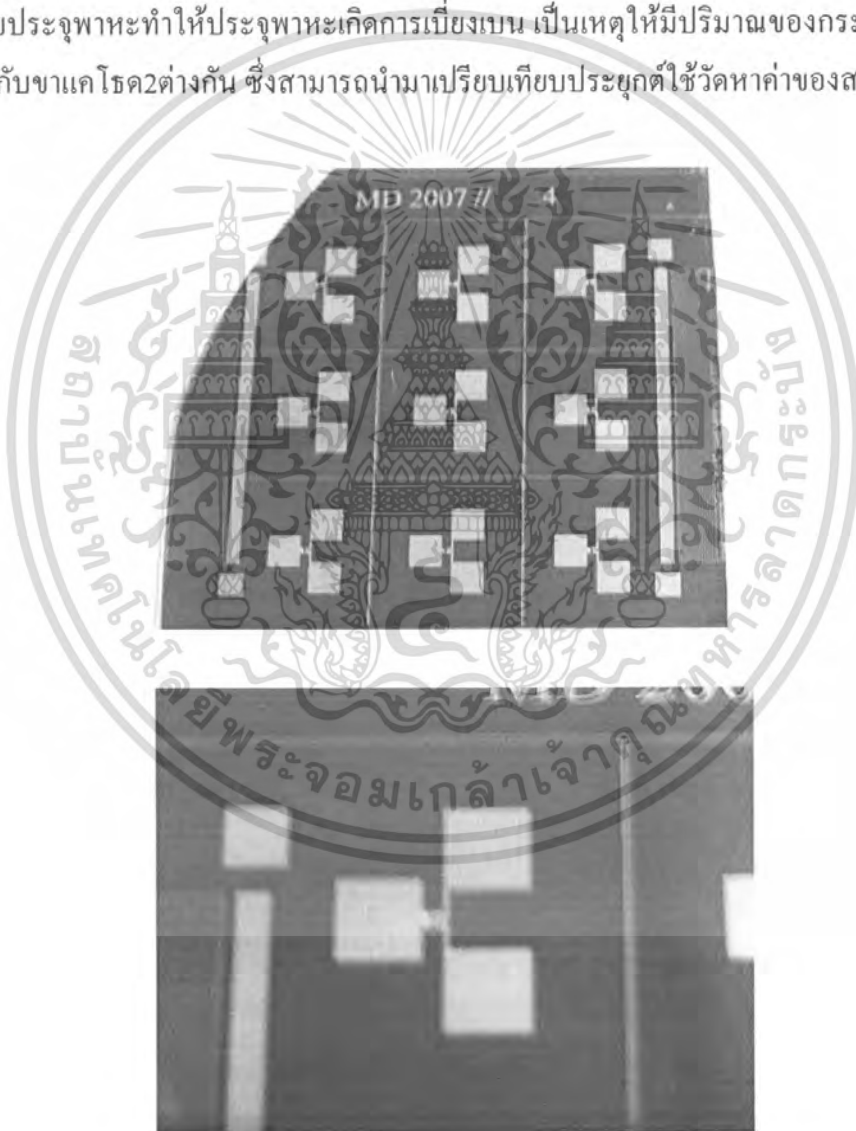
รูปที่ 4.42 แมกนีโตไดโอดแบบคู่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการประยุกต์การใช้งาน

โครงการงานในเทอมนี้เป็นการศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งเป็นการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับผิวของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ จากหลักการดังกล่าวทำให้ทราบว่าตัวแมกนีโตไดโอดแบบคู่สามารถอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้มีแรงลอเรนซ์มากระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเกิดการเบี่ยงเบน เป็นเหตุให้มีปริมาณของกระแสไหลที่ขาแคโรด1 กับขาแคโรด2ต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบประยุกต์ใช้วัดค่าของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5.1 แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.1 คุณลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอด

### 5.1.1 ที่ระยะห่าง(L)=50 $\mu\text{m}$

#### แบบที่ 1

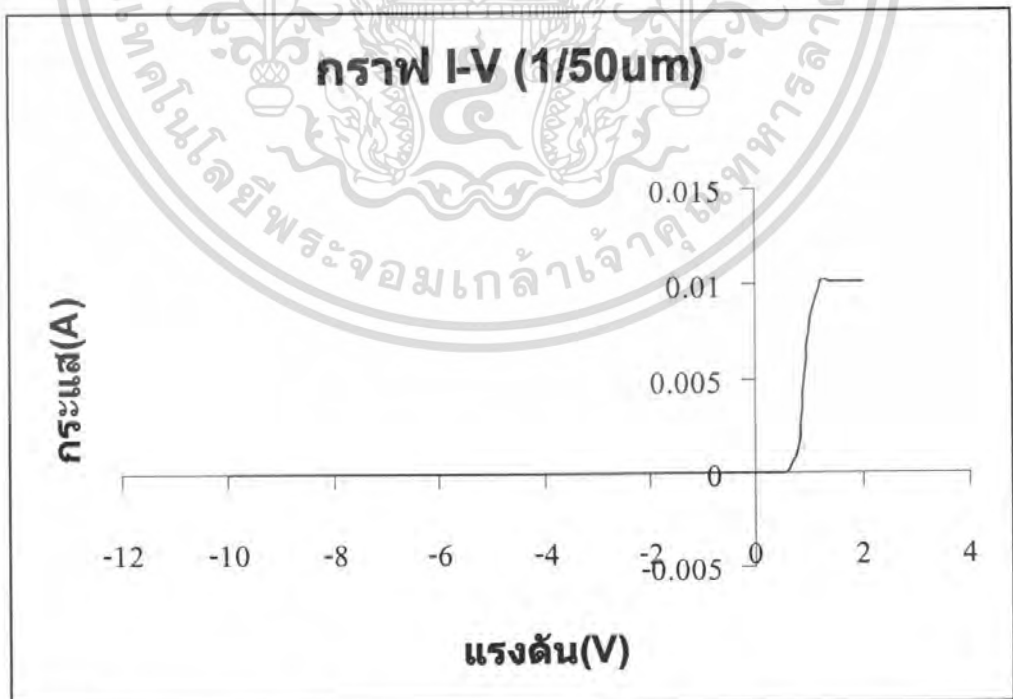


V/D = 5 V

I/D = 0.1 mA

Breakdown voltage > 25 V

รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50  $\mu\text{m}$  แบบที่ 1



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50  $\mu\text{m}$  แบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบที่ 2

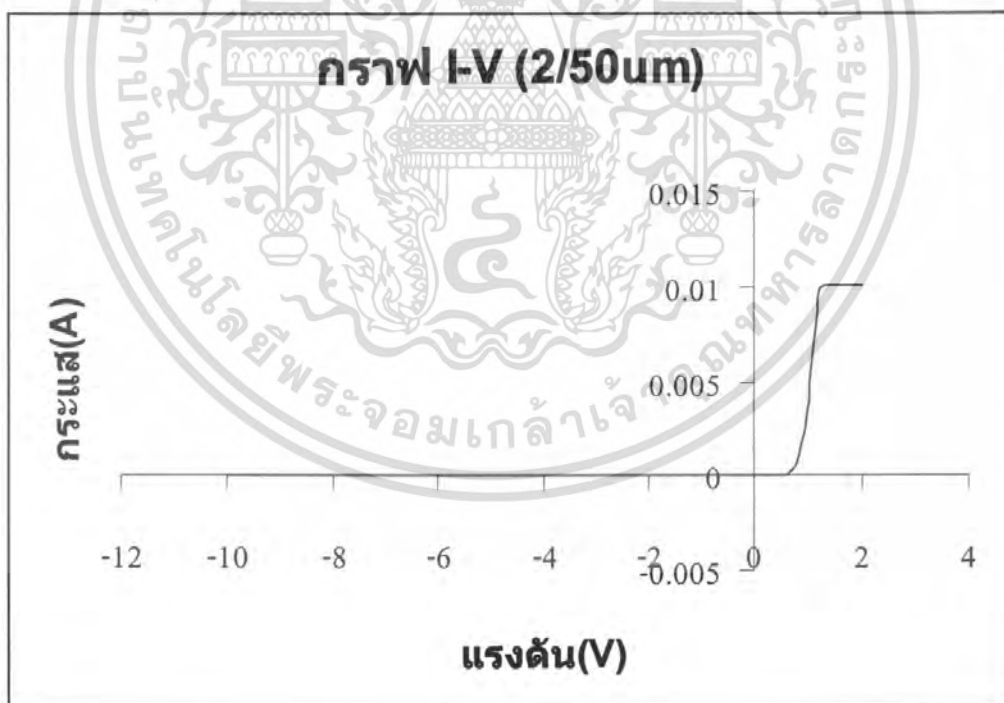


$$V/D = 5 \text{ V}$$

$$I/D = 0.1 \text{ mA}$$

$$\text{Breakdown voltage} > 25 \text{ V}$$

รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50  $\mu\text{m}$  แบบที่ 2



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50  $\mu\text{m}$  แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบที่ 3

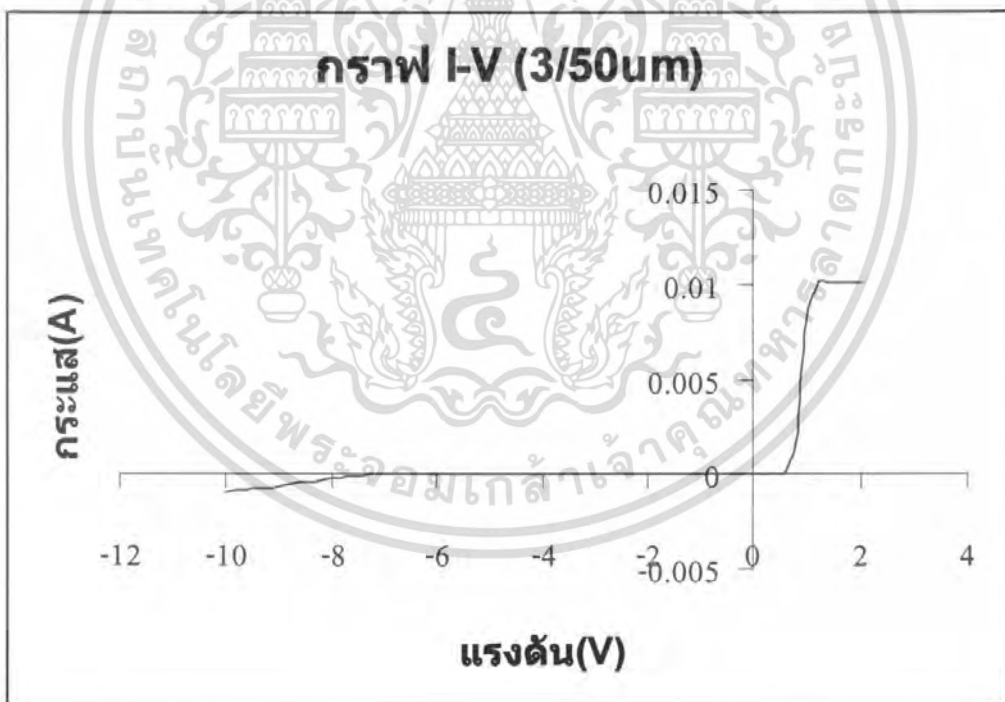


$$V/D = 5 \text{ V}$$

$$I/D = 0.1 \text{ mA}$$

$$\text{Breakdown voltage} \cong 6 \text{ V}$$

รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติที่ระยะห่าง(L)=50  $\mu\text{m}$  แบบที่ 3



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50  $\mu\text{m}$  แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 ที่ระยะห่าง(L)=100 $\mu\text{m}$

แบบที่ 1

เนื่องจากอุปกรณ์เกิดความเสียหายจากกระบวนการผลิต

แบบที่ 2

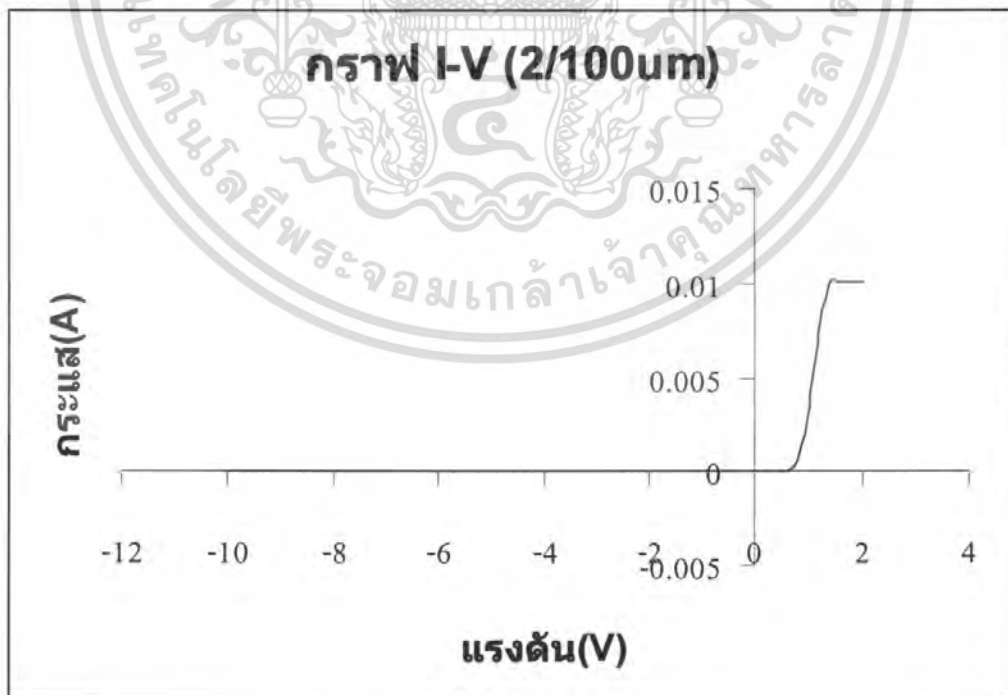


$$V/D = 5 \text{ V}$$

$$I/D = 0.1 \text{ mA}$$

Breakdown voltage > 25 V

รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับ ไบอัสตรง และ ไบอัสกลับ ได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=100  $\mu\text{m}$  แบบที่ 2



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับ ไบอัสตรง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ออกให้สำหรับผู้ที่ได้รับอนุญาตให้ใช้เท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่ภายนอกให้ว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และ ไบอัสกลับ ที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=100  $\mu\text{m}$  แบบที่ 2 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบที่ 3

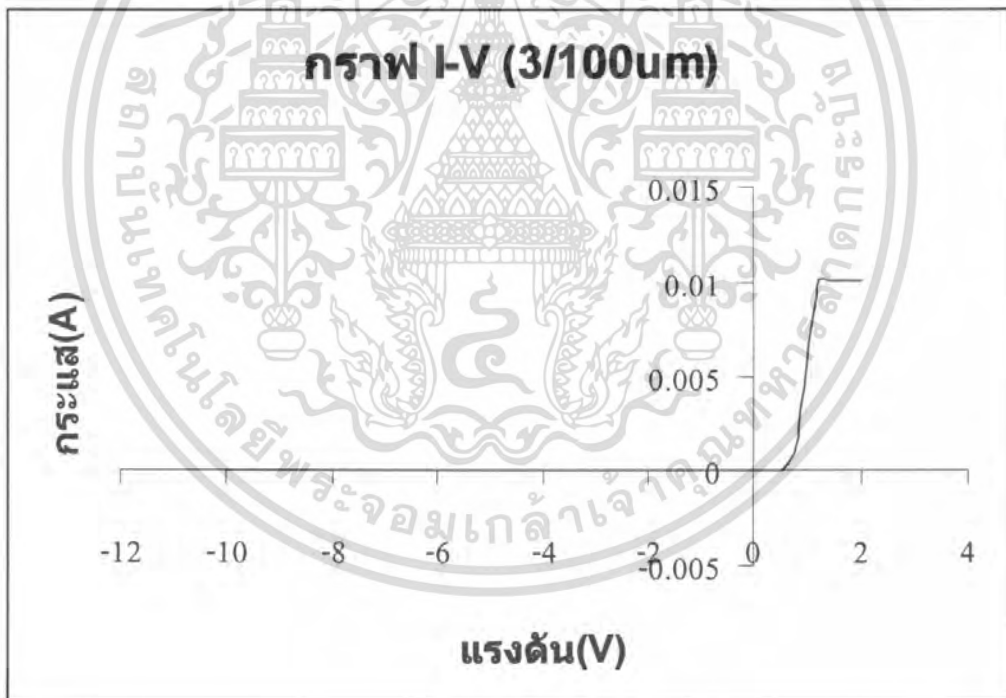


$$V/D = 5 \text{ V}$$

$$I/D = 0.1 \text{ mA}$$

$$\text{Breakdown voltage} > 25 \text{ V}$$

รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=100  $\mu\text{m}$  แบบที่ 3



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=100  $\mu\text{m}$  แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด



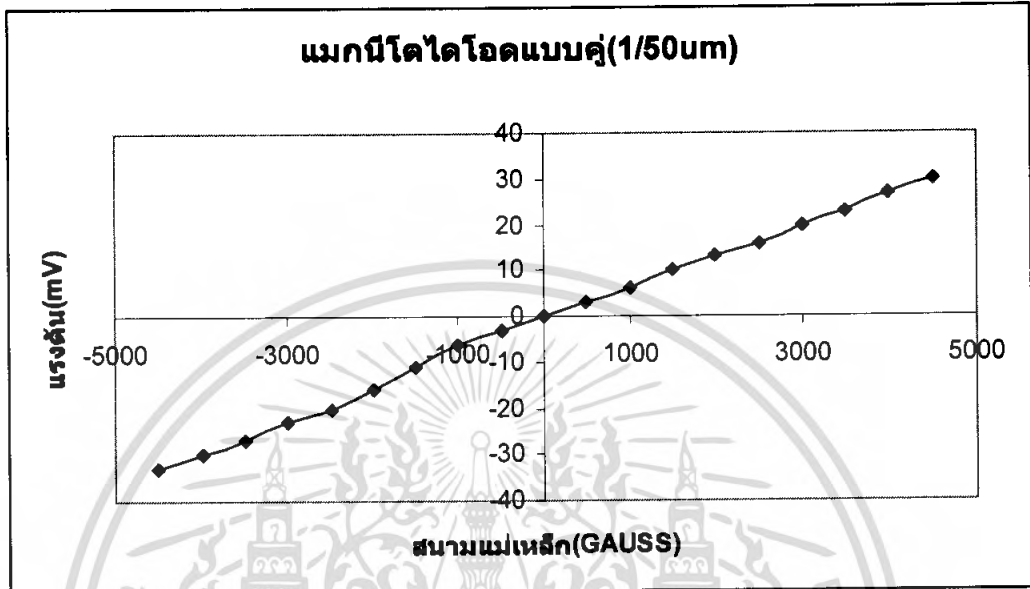
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายอุปกรณ์จากด้านบน

รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายอุปกรณ์จากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

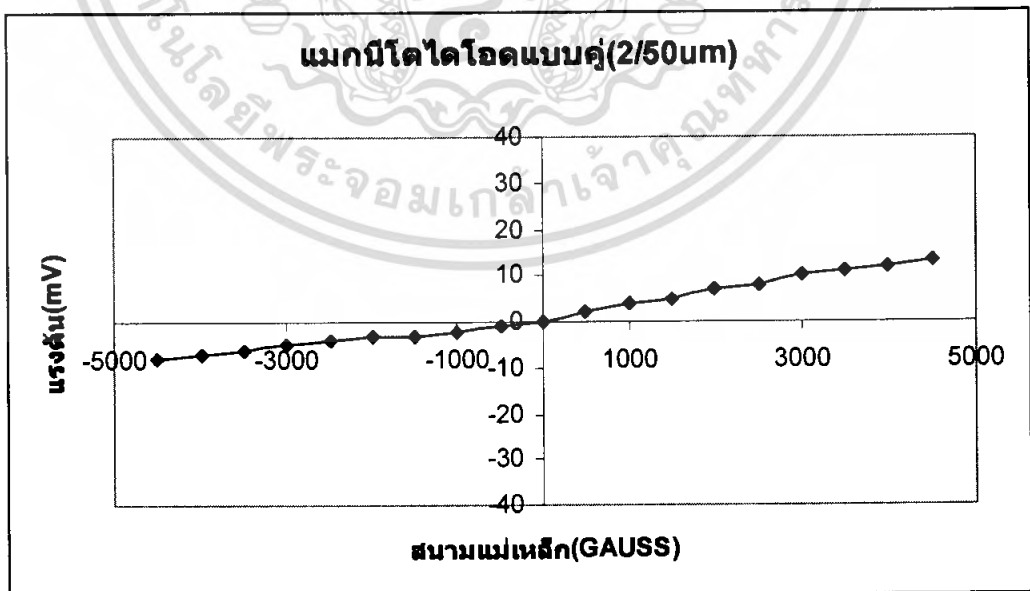
### 5.2.1 ที่ระยะห่าง(L)=50 $\mu\text{m}$

#### แบบที่ 1



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบที่ 1 ที่ระยะ 50  $\mu\text{m}$

#### แบบที่ 2



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบที่ 2 ที่ระยะ 50  $\mu\text{m}$   
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### แบบที่ 3

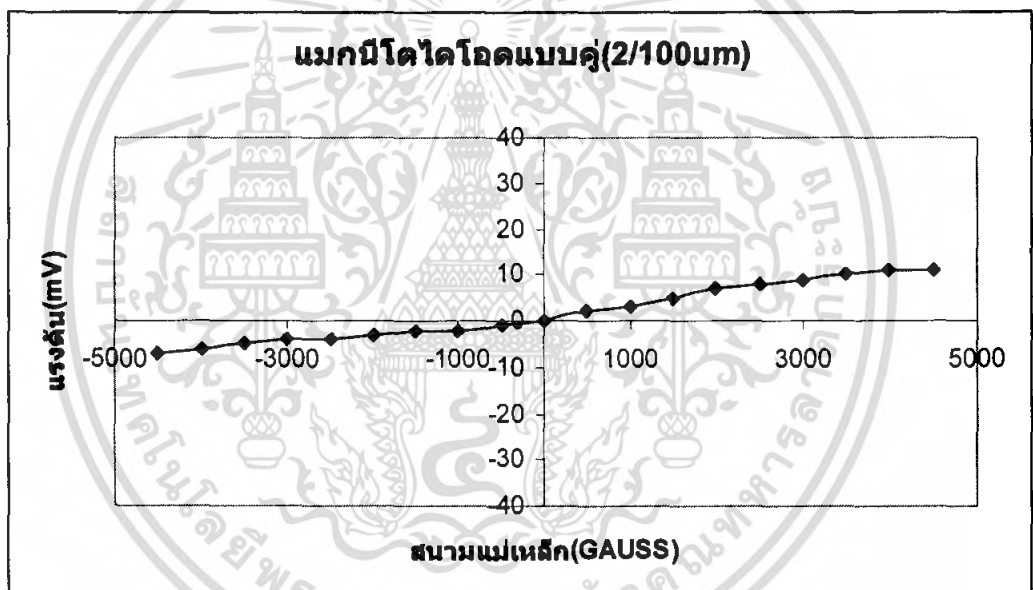
ผลของการตอบสนองที่ได้มีค่าเปลี่ยนตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก สักพักหนึ่งค่าจะกลับมายังค่าเริ่มต้น หรือกลับมามีอยู่ในสถานะที่สมดุล

#### 5.2.2 ที่ระยะห่าง(L)=100 $\mu\text{m}$

### แบบที่ 1

เนื่องจากอุปกรณ์เกิดความเสียหายจากกระบวนการผลิต

### แบบที่ 2



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของเมกนีโตไดโอดแบบที่ 2 ที่ระยะ 100  $\mu\text{m}$

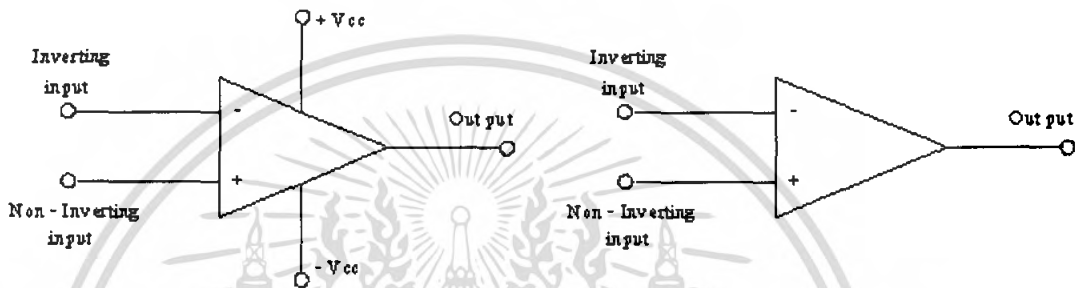
### แบบที่ 3

ผลของการตอบสนองที่ได้มีค่าเปลี่ยนตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก สักพักหนึ่งค่าจะกลับมายังค่าเริ่มต้น หรือกลับมามีอยู่ในสถานะที่สมดุล

## 5.3 การประยุกต์การใช้งาน

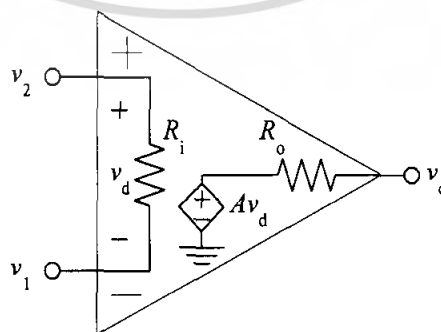
### 5.3.1 ออปแอมป์ (Op-Amp, Operational Amplifier)

ออปแอมป์(Op-Amp) เป็นชื่อย่อสำหรับเรียกวงจรรขยายที่มาจาก Operational Amplifier เป็นวงจรรขยายแบบต่อตรง(Direct coupled amplifier) ที่มีอัตราขยายสูงมากใช้การป้อนกลับแบบลบไปควบคุมลักษณะการทำงาน ทำให้ผลของวงจรมั่นอยู่กับพารามิเตอร์ภายในออปแอมป์



รูปที่ 5.17 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์

- ขั้วอินพุตบวก (Non-inverting Terminal)
- ขั้วอินพุตลบ (Inverting Terminal)
- ขั้วเอาต์พุต (Output Terminal)
- ขั้วแรงดันไฟเลี้ยง บวก และลบ ปกติไม่ได้แสดงไว้ในสัญลักษณ์



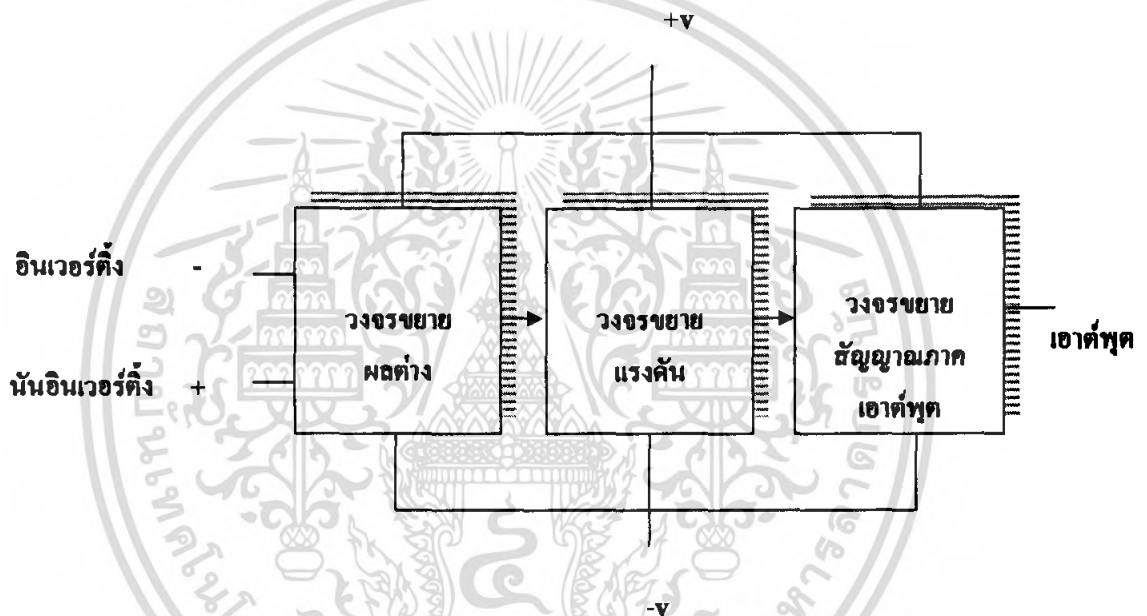
รูปที่ 5.18 วงจรสมมูลของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความต้านทานด้านอินพุต :  $R_i$
- ความต้านทานด้านเอาต์พุต :  $R_o$
- แรงดันระหว่างขาอินพุต :  $V_d$

วงจรภายในประกอบด้วยวงจรมีอินพุตที่ต่ออนุกรมกัน โดยแบ่งเป็นภาคต่างๆ ดังนี้ คือ

1. วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier) ที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก
2. วงจรขยายแรงดัน (Voltage Amplifier) ที่มีอัตราขยายสูงมาก
3. วงจรขยายสัญญาณภาคเอาต์พุต (Output Amplifier) ที่มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำมาก



รูปที่ 5.19 บล็อกไดอะแกรมของออปแอมป์

รูปที่ 5.19 แสดงบล็อกไดอะแกรมภาคต่างๆ ของออปแอมป์ และจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันไฟตรง ที่จ่ายให้ออปแอมป์เป็นไฟบวก และไฟลบ เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตสามารถที่จะสวิงได้ทั้งซีกบวก และซีกลบเมื่อเทียบกับกราวด์

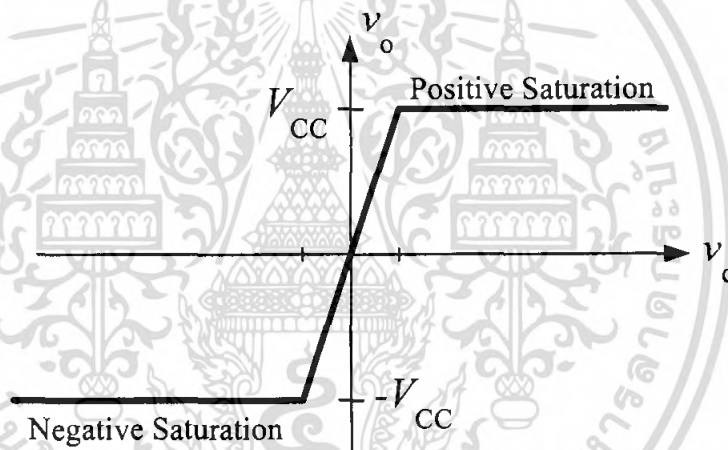
จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่กล่าวมา ทำให้เราสามารถสรุป คุณสมบัติของออปแอมป์ในทางอุดมคติ (Ideal) ได้ดังนี้คือ

1. อัตราขยายมีค่าสูงเป็นอนันต์หรือ อินฟินิตี้ ( $AV = \infty$ )
2. อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูงเป็นอนันต์ ( $Z_{in} = \infty$ )
3. เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำมากเท่ากับศูนย์ ( $Z_{out} = 0$ )
4. ความกว้างของแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการขยายสูงมาก ( $BW = \infty$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของออปแอมป์	ทางอุดมคติ	ทางปฏิบัติ
Voltage Gain ( $A_v$ )	$\infty$	$> 200,000$
Band Width (BW)	$\infty$	1 MHz (ที่ $A_v = 1$ )
Input Resistance( $R_i$ )	$\infty$	2 M $\Omega$
Output Resistance( $R_o$ )	0	50 $\Omega$ ถึง 75 $\Omega$

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ทางอุดมคติและทางปฏิบัติ  
ช่วงการทำงานของออปแอมป์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง

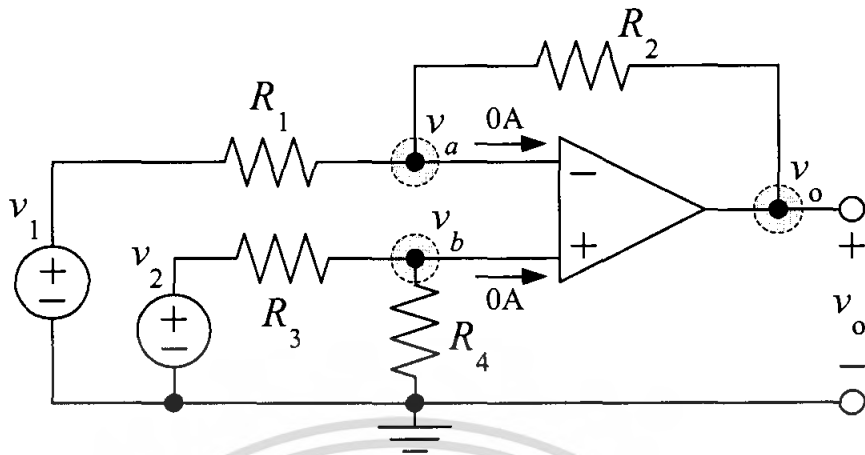


รูปที่ 5.20 ช่วงการทำงานของออปแอมป์

- ช่วงอิ่มตัวด้านบวก (Positive saturation)
- ช่วงการทำงานแบบเชิงเส้น (Linear region)
- ช่วงอิ่มตัวด้านลบ (Negative saturation)

### 5.3.2 วงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier)

เป็นวงจรที่สัญญาณเอาต์พุตเป็นผลของการลบของสัญญาณทั้งสองคือจุด a และจุด b ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับอินพุตผลต่างของออปแอมป์มาตรฐาน แต่ต่างกันที่วงจรขยายผลต่างมีการป้อนกลับทางลบเพื่อควบคุมอัตราขยายของวงจรตามต้องการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 วงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier)

- KCL ที่โนด  $v_a$  :

$$\frac{v_a - v_1}{R_1} + \frac{v_a - v_o}{R_2} = 0$$

$$v_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) v_a - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (5.1)$$

- KCL ที่โนด  $v_b$  :

$$\frac{v_b - v_2}{R_3} + \frac{v_b - 0}{R_4} = 0$$

$$v_b = \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) v_2 \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรมีการป้อนกลับแบบลบ  $v_a = v_b$  แทนค่า  $v_b$  จาก (5.2) ใน  $v_a$  ของ(5.1)

$$v_o = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1$$

- จัดรูปใหม่ได้

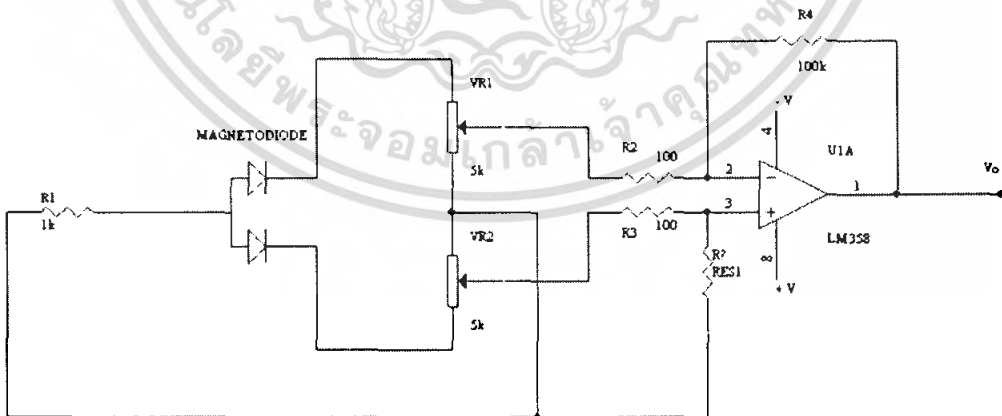
$$v_o = \frac{R_2 (1 + R_1/R_2)}{R_1 (1 + R_3/R_4)} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (5.3)$$

- ถ้า  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  จะได้

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) \quad (5.4)$$

- ถ้า  $R_1 = R_2$  และ  $R_3 = R_4$  จะได้

$$v_o = v_2 - v_1 \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.21 วงจรการวัดผลตอบสองสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.3 หลักการทำงานวงจรการวัดผลตอบสนองของสนามแม่เหล็ก

เมื่อป้อนแรงดันให้กับขั้วอินพุตจะทำให้เกิดกระแสไหลจากขั้วอินพุตไปยังขั้วเอาต์พุต 1 กับขั้วเอาต์พุต 2 โดยมีความต้านทานจำกัดกระแสทางด้านอินพุต จากนั้นจะใช้หลักการของวงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier) ในการหาผลตอบสนองของสนามแม่เหล็กแรงดันที่ขั้วเอาต์พุต 1 กับขั้วเอาต์พุต 2 จะต้องมามีค่าเท่ากันทำให้ค่าผลต่างของแรงดันเป็นศูนย์ส่งต่อไปยังวงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier) ซึ่งมีสมการ คือ

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$$

$V_1 =$  แรงดันที่ขั้วเอาต์พุต 1 ,  $V_2 =$  แรงดันที่ขั้วเอาต์พุต 2

ซึ่งวงจรมีเกนซ์การขยาย 1000 เท่า จากที่กล่าวจากด้านบน  $v_1 = v_2$  จึงทำให้เอาต์พุตที่ได้มีค่าเท่ากับ 0 หรือแมกนีโตไดโอดอยู่ในสถานะที่สมดุล และถ้าในกรณีที่  $v_1$  ไม่เท่ากับ  $v_2$  อันเนื่องมาจากมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวแมกนีโตไดโอดในทิศทางที่ตั้งฉากเป็นผลให้กระแสเกิดการเบี่ยงเบนไปที่ขั้วใดขั้วหนึ่งมากกว่า กล่าวคือถ้ามีทิศทางของสนามแม่เหล็กพุ่งลงตัวแมกนีโตไดโอดจะทำให้มีกระแสเบี่ยงเบนไปยังขั้วเอาต์พุต 2 มากกว่า เอาต์พุต 1 จึงทำให้เกิด  $v_1 < v_2$  และเมื่อนำไปแทนในสมการด้านบนจะทำให้เราได้ค่าแรงดันเอาต์พุตออกมาเป็นค่าบวก(+) และในทางกลับกันถ้ามีทิศทางของสนามแม่เหล็กพุ่งขึ้นจากตัวแมกนีโตไดโอดจะทำให้มีกระแสเบี่ยงเบนไปยังขั้วเอาต์พุต 1 มากกว่า เอาต์พุต 2 จึงทำให้เกิด  $v_1 > v_2$  และเมื่อนำไปแทนในสมการด้านบนจะทำให้เราได้ค่าแรงดันเอาต์พุตออกมาเป็นค่าลบ(-) แล้วยังเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กก็จะทำให้ค่าของเอาต์พุตเพิ่มขึ้นตาม



### 5.3.4 หลักการทำงานวงจรเครื่องวัดทิศทางและนับรอบสนามแม่เหล็ก

จากวงจรการวัดผลตอบสนองของสนามแม่เหล็กเราจะใช้แหล่งจ่ายเพียงชุดเดียวให้กับวงจรวงจรถยายผลต่าง(Difference Amplifier) ทำให้ค่าแรงดันทางเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกอย่างเดียว ทำให้เมื่อมีทิศทางของสนามแม่เหล็กพุ่งลงจะทำให้แรงดันทางเอาต์พุตเป็นบวกเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันเมื่อมีทิศทางของสนามแม่เหล็กพุ่งขึ้นจะทำให้แรงดันทางเอาต์พุตเป็นบวกลดลงก็จะทำให้เห็นค่าแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงไปตามทิศของสนามแม่เหล็ก จากนั้นเอาต์พุตที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจรเปรียบเทียบ(Comparator) 2 ชุด โดยที่แต่ละชุดจะมีขาหนึ่งรับแรงดันเอาต์พุตจากวงจรถยายผลต่าง(IC2 ขา 2 ,5) ส่วนอีกขาหนึ่งจะเป็นแรงดันอ้างอิงในการเปรียบเทียบ(IC2 ขา 3 ,6) ซึ่งใช้ ไอซีเบอร์ LM 358 (ใช้แหล่งจ่ายไฟชุดเดียว +5 V)

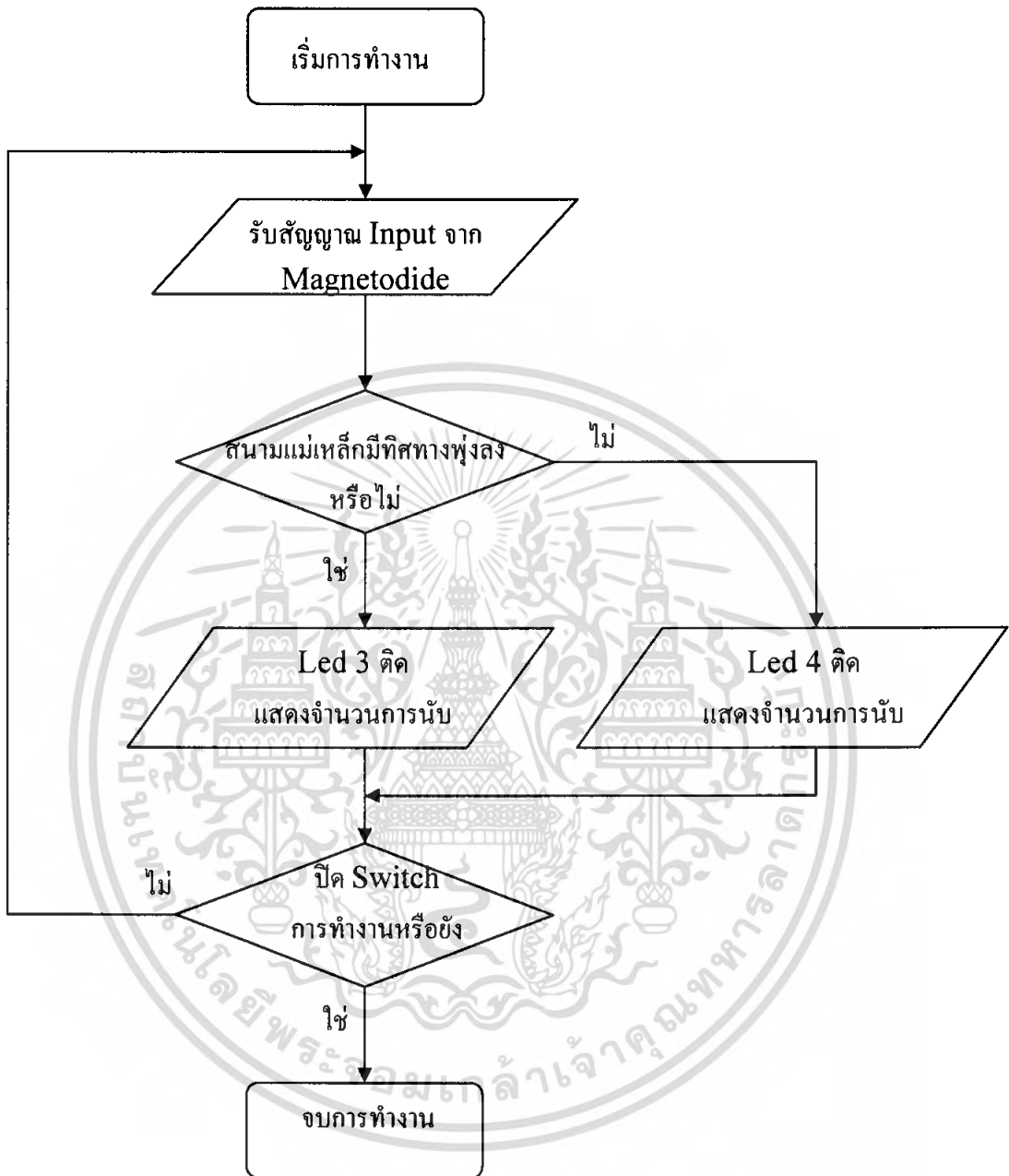
ดังนั้นเมื่อมีสนามแม่เหล็กในทิศทางพุ่งลงทำให้วงจรเปรียบเทียบ(Comparator) มีแรงดันอินพุตที่ขา 5 มากกว่าแรงดันอ้างอิงที่ขา 6 ก็จะได้เอาต์พุตออกที่ขา 7 เป็นสถานะ “High” ทำให้ LED 2 ติดสว่างและถ้ามีสนามแม่เหล็กในทิศทางพุ่งขึ้นก็จะทำให้วงจรเปรียบเทียบ(Comparator) มีแรงดันอินพุตที่ขา 2 น้อยกว่าแรงดันอ้างอิงที่ขา 3 ก็จะได้เอาต์พุตออกที่ขา 1 เป็นสถานะ “High” ทำให้ LED 1 ติดสว่าง ซึ่งในส่วนของตรงนี้เราก็จะได้วงจรที่สามารถบอกขั้วสนามแม่เหล็กได้

ต่อมาจะเป็นวงจรในส่วนของ การแสดงผลการนับจำนวนครั้งที่สนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านตัวแมกนีโตไดโอด โดยจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C52 เข้ามาควบคุม โดยมีการตอบสนองอินเทอร์พรัต(ขัดจังหวะ)จากสัญญาณภายนอกซึ่งจะมีอยู่ 2 ขา คือ INT0(P3.2)กับ INT1(P3.3)ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และจะทำงานก็ต่อเมื่อขาของ INT0(P3.2)หรือ INT1(P3.3) ได้รับลอจิก 0 ก็จะเกิดการอินเทอร์พรัตทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานตามโปรแกรมที่ได้เขียนไว้ จากที่ได้กล่าวทางด้านบนเมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านเราก็จะได้แรงดันเอาต์พุตออกทาง ขา1 หรือ ขา 7 ของไอซีเบอร์ LM 358 ตามทิศทางที่สนามแม่เหล็กตัดผ่านซึ่งเราจะเอาแรงดันตรงส่วนนี้ไปไบอัสให้กับขาเบสของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 (NPN switching transistor) ซึ่งขาคอลเลคเตอร์ต่ออนุกรมกับรีเลย์และความต้านทานปรับค่า วงจรในส่วนนี้มีด้วยกัน 2 ชุด(Q1,Q2 และRelay1,Relay2)เมื่อมีแรงดันจากขา 1 ของไอซีเบอร์ LM 358 มาไบอัสที่ขาเบสของ Q1ทำให้ทรานซิสเตอร์ON เป็นผลให้รีเลย์1ทำงานผลักหน้าสวิทช์ไปที่ NO ซึ่งต่ออยู่กับขา INT0(P3.2) ส่วนขาCommon ของรีเลย์นั้นจะต่อลงกราวด์ จึงเปรียบเสมือนว่าขา INT0(P3.2) ถูกต่อลงกราวด์หรือได้รับลอจิก 0 จึงเกิดการอินเทอร์พรัตเกิดขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงไปทำงานในส่วนโปรแกรมที่เกิดจากการอินเทอร์พรัตของ INT0 ซึ่งการทำงานของโปรแกรมตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งค่าอาร์เรย์ออกทางPort 1 กับ Port 2 (Port 1 แสดงเลขในหลักหน่วย ส่วน Port 2 แสดงเลขในหลักสิบ)ไปยัง 7- Segments แสดงตัวเลข ขณะที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งขึ้นซึ่งสามารถนับได้ตั้งแต่ 1-99 นอกจากนี้ยังแสดงทิศทางของ

ขณะที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งขึ้นซึ่งสามารถนับได้ตั้งแต่ 1-99 นอกจากนี้ยังแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กำลังวัดอยู่ได้จากLED3 และเมื่อมีแรงดันจากขา 7 ของไอซีเบอร์ LM 358 มาไบอัสที่ขาเบสของ Q2ทำให้ทรานซิสเตอร์ON เป็นผลให้รีเลย์ 2 ทำงานพลิกหน้าสวิทช์ไปที่ NO ซึ่งต่ออยู่กับขา INT1(P3.3) ส่วนขาCommon ของรีเลย์นั้นจะต่อลงกราวด์ จึงเปรียบเสมือนว่าขา INT1(P3.3) ถูกต่อลงกราวด์หรือได้รับลอจิก 0 จึงเกิดการอินเตอร์ปรัตเกิดขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงไปทำงานในส่วน โปรแกรมที่เกิดจากการอินเตอร์ปรัตของ INT1 ซึ่งการทำงานของโปรแกรมตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งค่าอาร์เรย์ออกทางPort 1 กับ Port 2 (Port 1แสดงเลขในหลักหน่วย ส่วน Port 2 แสดงเลขในหลักสิบ)ไปยัง 7-Segments แสดงตัวเลขขณะที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งลงซึ่งสามารถนับได้ตั้งแต่ 1-99 นอกจากนี้ยังแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กำลังวัดอยู่ได้จากLED4 ในการนับถ้ามีทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปจากเดิมไมโครคอนโทรลเลอร์จะเริ่มทำการนับใหม่ตั้งแต่แรกจนถึงค่าสุดท้ายถ้าไม่มีการเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็กเสียก่อนก็จะกลับมาเริ่มนับใหม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดทิศทางสนามแม่เหล็กและนับจำนวนครั้งที่สนามแม่เหล็กตัดผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.5 โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์(AT89C52)

```

#include <REGX51.H>

unsigned char a=0,b=0,c=0,d=0;

unsigned char number1[]={0x3f,0x06,0x5b,0x4f,0x66,0x6d,0x7d,0x07,0x7f,0x6f,0x00};

unsigned char number2[]={0xbf,0x86,0xdb,0xcf,0xe6,0xed,0xfd,0x87,0xff,0xef,0x80};

North_pole(void) interrupt 0
{
    c=0;
    d=0;
    a++;
    if(a==10)
    {
        a=0;
        b++;
        if(b==10)
        {
            b=0;
            P1=number2[a];
            P2=number1[b];
        }
        P1=number2[a];
        P2=number1[b];
    }
    P1=number2[a];
    P2=number1[b];
}

South_pole(void) interrupt 2
{
    a=0;
    b=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c++;
if(c==10)
{
c=0;
d++;
if(d==10)
{
d=0;
P1=number1[c];
P2=number2[d];
}
P1=number1[c];
P2=number2[d];
}
P1=number1[c];
P2=number2[d];
}
main(void)
{
P1=0x3f;
P2=0x3f;
IT0=1;
IT1=1;
EA=1;
EX0=1;
EX1=1;
while(1);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] H. P. Baltes and R. S. Popovic, “**Integrated semiconductor magnetic field sensors,**” IEEE, vol. 74, p.1107, 1986.
- [2] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, “**Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor,**” Sensors and Actuators A, 45 (1994) 179-182.
- [3] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues and F. Rodrigues, “**Merged lateral bipolar magnetotransistor,**” Sensors and Actuators A, 50 (1995) 177-181.
- [4] L. Ristic, T. Smy and Henry P. Baltes, “**A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic field,**” IEEE Trans Electron Devices, vol.36, NO 6, 1989.
- [5] Henry P. Baltes, “**Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor,**” IEEE Trenton Electron Devices, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986.
- [6] T. Nakamura and K. Maenaka, “**Integrated Magnetic Sensor,**” Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [7] รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเกษ “**เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Dual Low Power Operational Amplifiers

Utilizing the circuit designs perfected for recently introduced Quad Operational Amplifiers, these dual operational amplifiers feature 1) low power drain, 2) a common mode input voltage range extending to ground/ $V_{EE}$ , 3) single supply or split supply operation and 4) pinouts compatible with the popular MC1558 dual operational amplifier. The LM158 series is equivalent to one-half of an LM124.

These amplifiers have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. They can operate at supply voltages as low as 3.0 V or as high as 32 V, with quiescent currents about one-fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

- Short Circuit Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V
- Low Input Bias Currents
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Single and Split Supply Operation
- Similar Performance to the Popular MC1558
- ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness of the Device without Affecting Operation

## MAXIMUM RATINGS ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	LM258 LM358	LM2904 LM2904V	Unit
Power Supply Voltages				Vdc
Single Supply	$V_{CC}$	32	26	
Split Supplies	$V_{CC}, V_{EE}$	$\pm 16$	$\pm 13$	
Input Differential Voltage Range (Note 1)	$V_{IDR}$	$\pm 32$	$\pm 26$	Vdc
Input Common Mode Voltage Range (Note 2)	$V_{ICR}$	-0.3 to 32	-0.3 to 26	Vdc
Output Short Circuit Duration	$t_{SC}$	Continuous		
Junction Temperature	$T_J$	150		$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55 to +125		$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	$T_A$			$^\circ\text{C}$
LM258		-25 to +85	-	
LM358		0 to +70	-	
LM2904		-	-40 to +105	
LM2904V		-	-40 to +125	

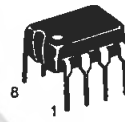
NOTES: 1. Split Power Supplies.

2. For Supply Voltages less than 32 V for the LM258/358 and 26 V for the LM2904, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

# LM358, LM258, LM2904, LM2904V

## DUAL DIFFERENTIAL INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

### SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

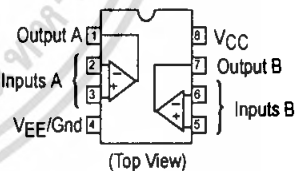


**N SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 626



**D SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751  
(SO-8)

## PIN CONNECTIONS



## ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
LM2904D	$T_A = -40^\circ$ to $+105^\circ\text{C}$	SO-8
LM2904N		Plastic DIP
LM2904VD	$T_A = -40^\circ$ to $+125^\circ\text{C}$	SO-8
LM2904VN		Plastic DIP
LM258D	$T_A = -25^\circ$ to $+85^\circ\text{C}$	SO-8
LM258N		Plastic DIP
LM358D	$T_A = 0^\circ$ to $+70^\circ\text{C}$	SO-8
LM358N		Plastic DIP

# LM358, LM258, LM2904, LM2904V

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V<sub>CC</sub> = 5.0 V, V<sub>EE</sub> = Gnd, T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise noted.)

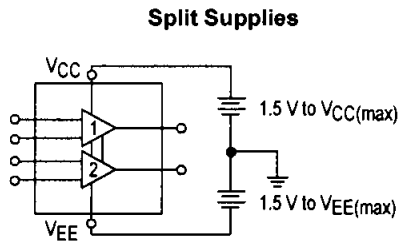
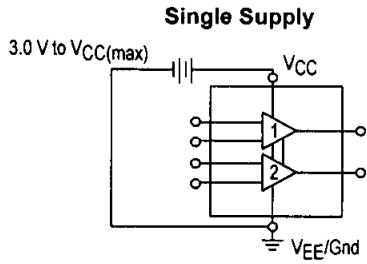
Characteristic	Symbol	LM258			LM358			LM2904			LM2904V			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage V <sub>CC</sub> = 5.0 V to 30 V (26 V for LM2904, V), V <sub>IC</sub> = 0 V to V <sub>CC</sub> -1.7 V, V <sub>O</sub> = 1.4 V, R <sub>S</sub> = 0 Ω T <sub>A</sub> = 25°C T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> (Note 1) T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> (Note 1)	V <sub>IO</sub>	-	2.0	5.0	-	2.0	7.0	-	2.0	7.0	-	-	-	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	ΔV <sub>IO</sub> /ΔT	-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	μV/°C
Input Offset Current T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	I <sub>IO</sub>	-	3.0	30	-	5.0	50	-	5.0	50	-	5.0	50	nA
Input Bias Current T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	I <sub>IB</sub>	-	-45	-150	-	-45	-250	-	-45	-250	-	-45	-250	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	ΔI <sub>IO</sub> /ΔT	-	10	-	-	10	-	-	10	-	-	10	-	pA/°C
Input Common Mode Voltage Range (Note 2), V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V) V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V), T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub>	V <sub>ICR</sub>	0	-	28.3	0	-	28.3	0	-	24.3	0	-	24.3	V
Differential Input Voltage Range	V <sub>IDR</sub>	-	-	V <sub>CC</sub>	-	-	V <sub>CC</sub>	-	-	V <sub>CC</sub>	-	-	V <sub>CC</sub>	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ, V <sub>CC</sub> = 15 V, For Large V <sub>O</sub> Swing, T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	A <sub>VOL</sub>	50	100	-	25	100	-	25	100	-	25	100	-	V/mV
Channel Separation 1.0 kHz ≤ f ≤ 20 kHz, Input Referenced	CS	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	dB
Common Mode Rejection R <sub>S</sub> ≤ 10 kΩ	CMR	70	85	-	65	70	-	50	70	-	50	70	-	dB
Power Supply Rejection	PSR	65	100	-	65	100	-	50	100	-	50	100	-	dB
Output Voltage—High Limit (T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> ) (Note 1) V <sub>CC</sub> = 5.0 V, R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ, T <sub>A</sub> = 25°C V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V), R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V), R <sub>L</sub> = 10 kΩ	V <sub>OH</sub>	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	V
Output Voltage—Low Limit V <sub>CC</sub> = 5.0 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ, T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> (Note 1)	V <sub>OL</sub>	-	5.0	20	-	5.0	20	-	5.0	20	-	5.0	20	mV
Output Source Current V <sub>ID</sub> = +1.0 V, V <sub>CC</sub> = 15 V	I <sub>O+</sub>	20	40	-	20	40	-	20	40	-	20	40	-	mA
Output Sink Current V <sub>ID</sub> = -1.0 V, V <sub>CC</sub> = 15 V V <sub>ID</sub> = -1.0 V, V <sub>O</sub> = 200 mV	I <sub>O-</sub>	10	20	-	10	20	-	10	20	-	10	20	-	mA
		12	50	-	12	50	-	-	-	-	-	-	-	μA
Output Short Circuit to Ground (Note 3)	I <sub>SC</sub>	-	40	60	-	40	60	-	40	60	-	40	60	mA
Power Supply Current (T <sub>A</sub> = T <sub>high</sub> to T <sub>low</sub> ) (Note 1) V <sub>CC</sub> = 30 V (26 V for LM2904, V), V <sub>O</sub> = 0 V, R <sub>L</sub> = ∞ V <sub>CC</sub> = 5 V, V <sub>O</sub> = 0 V, R <sub>L</sub> = ∞	I <sub>CC</sub>	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	mA
		-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	mA

NOTES: 1. T<sub>low</sub> = -40°C for LM2904  
= -40°C for LM2904V  
= -25°C for LM258  
= 0°C for LM358

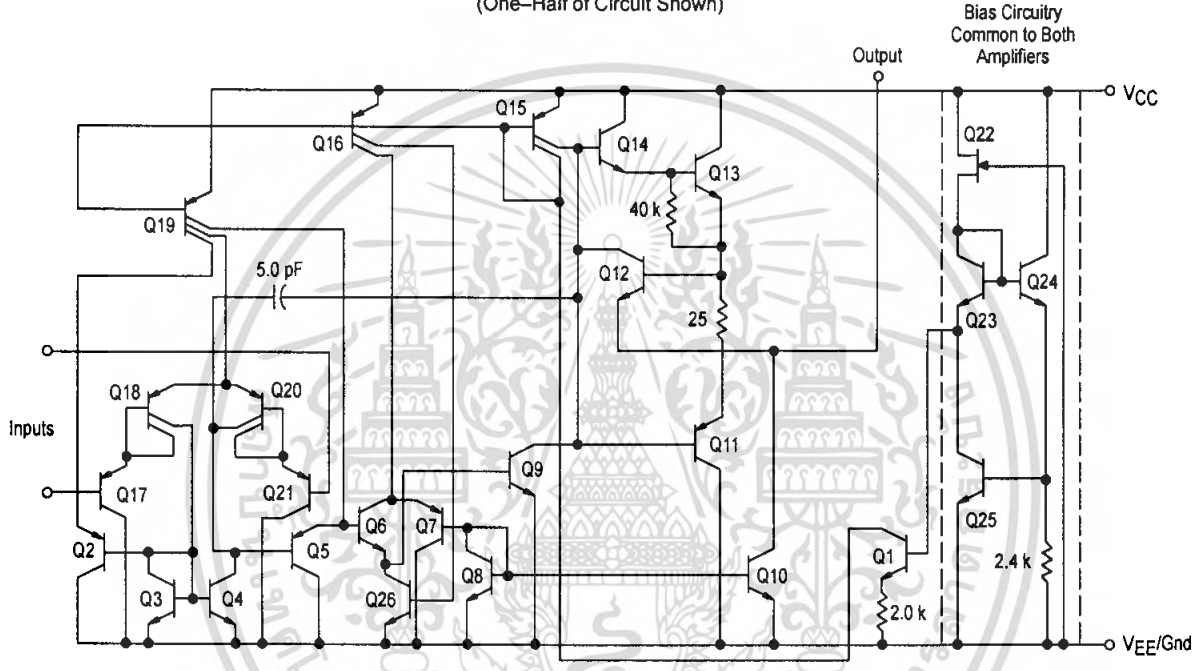
T<sub>high</sub> = +105°C for LM2904  
= +125°C for LM2904V  
= +85°C for LM258  
= +70°C for LM358

- The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is V<sub>CC</sub> -1.7 V.
- Short circuits from the output to V<sub>CC</sub> can cause excessive heating and eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

# LM358, LM258, LM2904, LM2904V



**Representative Schematic Diagram**  
(One-Half of Circuit Shown)

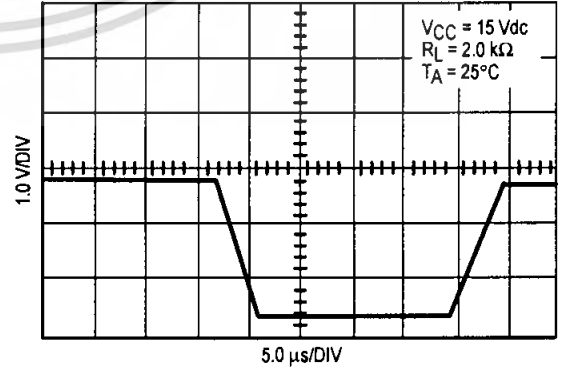


**CIRCUIT DESCRIPTION**

The LM258 series is made using two internally compensated, two-stage operational amplifiers. The first stage of each consists of differential input devices Q20 and Q18 with input buffer transistors Q21 and Q17 and the differential to single ended converter Q3 and Q4. The first stage performs not only the first stage gain function but also performs the level shifting and transconductance reduction functions. By reducing the transconductance, a smaller compensation capacitor (only 5.0 pF) can be employed, thus saving chip area. The transconductance reduction is accomplished by splitting the collectors of Q20 and Q18. Another feature of this input stage is that the input common mode range can include the negative supply or ground, in single supply operation, without saturating either the input devices or the differential to single-ended converter. The second stage consists of a standard current source load amplifier stage.

Each amplifier is biased from an internal-voltage regulator which has a low temperature coefficient thus giving each amplifier good temperature characteristics as well as excellent power supply rejection.

**Large Signal Voltage Follower Response**



# LM358, LM258, LM2904, LM2904V

Figure 1. Input Voltage Range

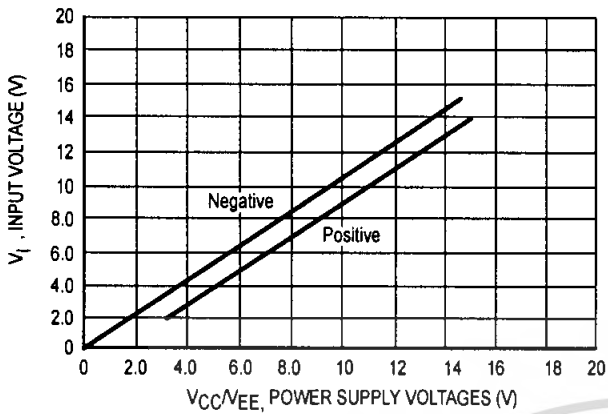


Figure 2. Large-Signal Open Loop Voltage Gain

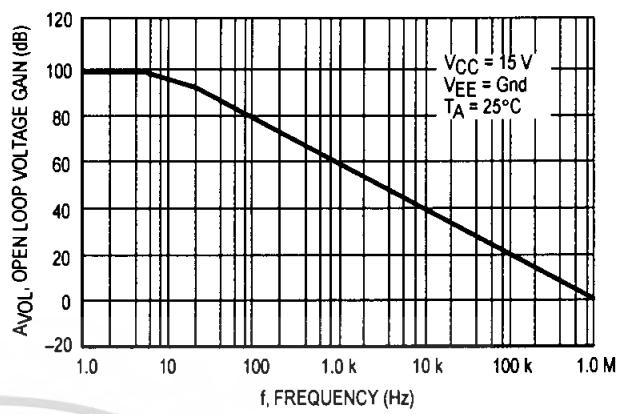


Figure 3. Large-Signal Frequency Response

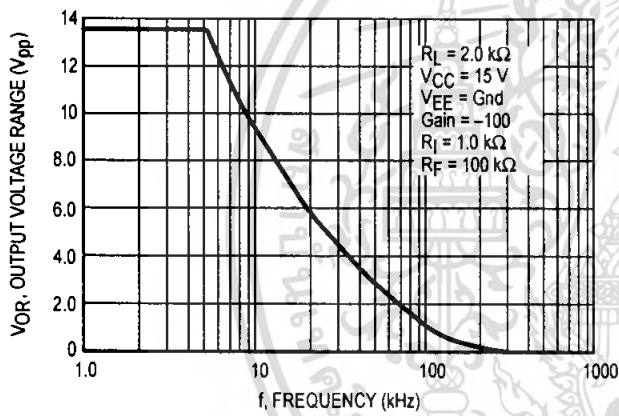


Figure 4. Small Signal Voltage Follower Pulse Response (Noninverting)

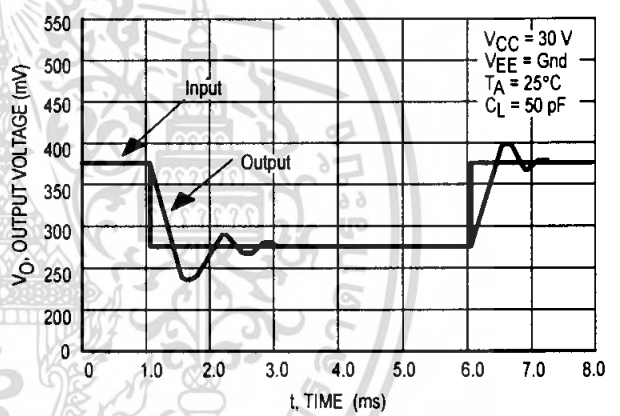


Figure 5. Power Supply Current versus Power Supply Voltage

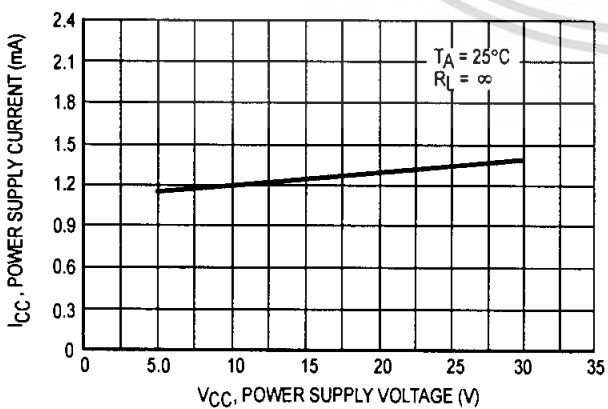
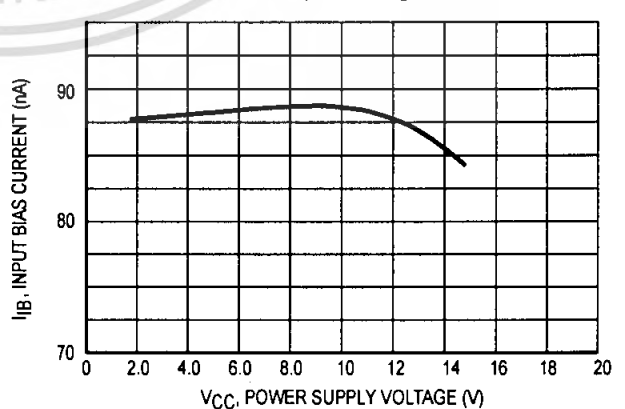


Figure 6. Input Bias Current versus Supply Voltage



# LM358, LM258, LM2904, LM2904V

Figure 7. Voltage Reference

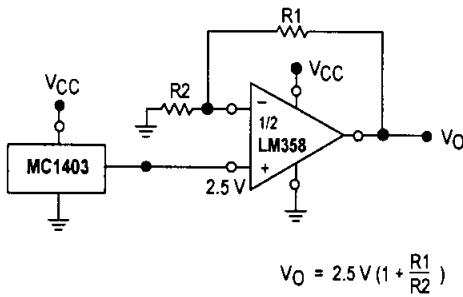


Figure 8. Wien Bridge Oscillator

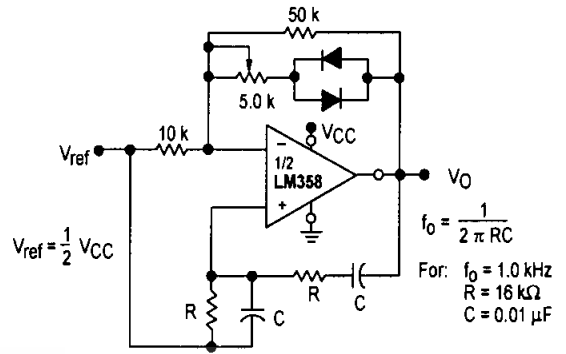


Figure 9. High Impedance Differential Amplifier

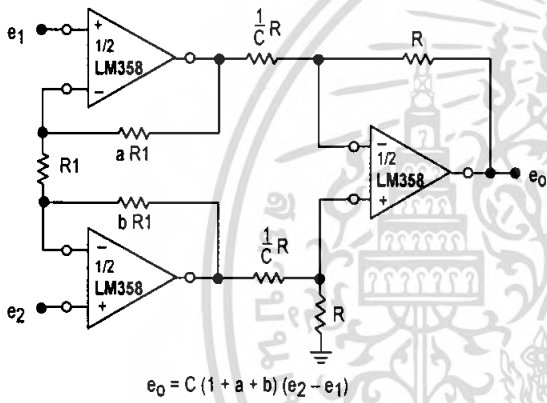


Figure 10. Comparator with Hysteresis

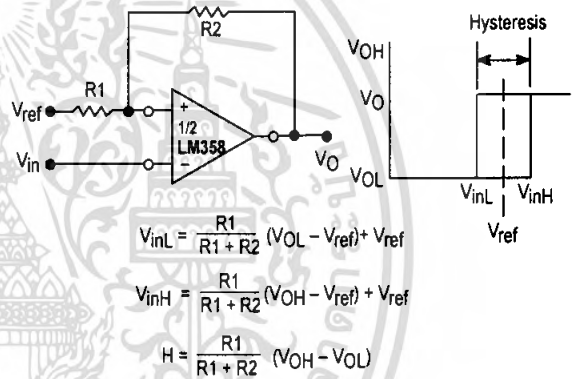
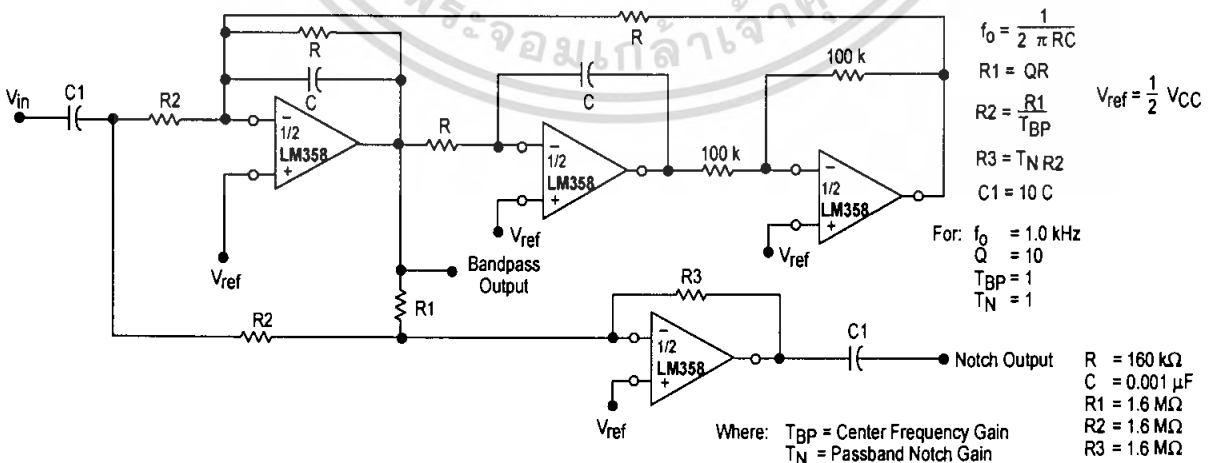
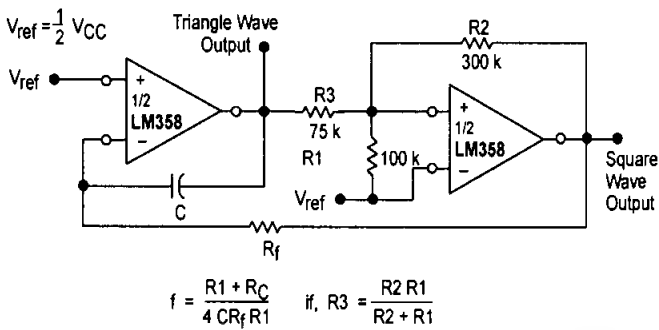


Figure 11. Bi-Quad Filter

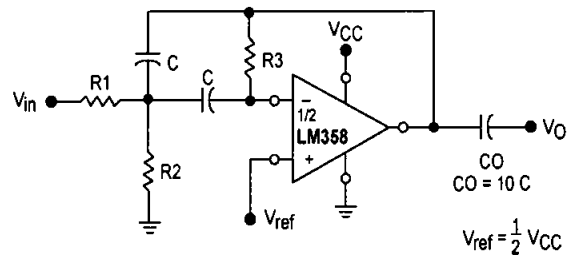


## LM358, LM258, LM2904, LM2904V

**Figure 12. Function Generator**



**Figure 13. Multiple Feedback Bandpass Filter**



Given:  $f_0$  = center frequency  
 $A(f_0)$  = gain at center frequency

Choose value  $f_0, C$

Then:  $R3 = \frac{Q}{\pi f_0 C}$

$R1 = \frac{R3}{2 A(f_0)}$

$R2 = \frac{R1 R3}{4Q^2 R1 - R3}$

For less than 10% error from operational amplifier.  $\frac{Q_0 f_0}{BW} < 0.1$

Where  $f_0$  and BW are expressed in Hz.

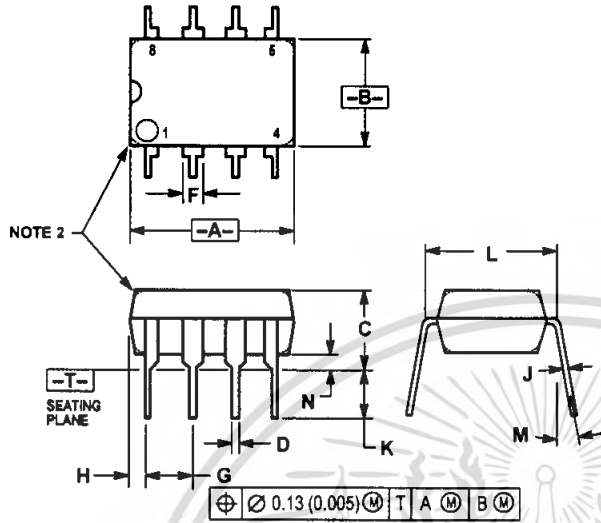
If source impedance varies, filter may be preceded with voltage follower buffer to stabilize filter parameters.



# LM358, LM258, LM2904, LM2904V

## OUTLINE DIMENSIONS

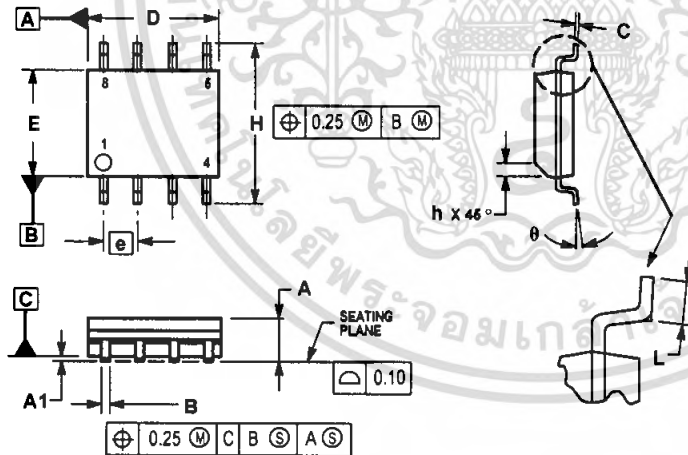
### N SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 626-05 ISSUE K



- NOTES:
1. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL
  2. PACKAGE CONTOUR OPTIONAL (ROUND OR SQUARE CORNERS)
  3. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.40	10.16	0.370	0.400
B	6.10	6.60	0.240	0.260
C	3.94	4.45	0.155	0.175
D	0.38	0.51	0.015	0.020
F	1.02	1.78	0.040	0.070
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
H	0.76	1.27	0.030	0.050
J	0.20	0.30	0.008	0.012
K	2.92	3.43	0.115	0.135
L	7.62 BSC		0.300 BSC	
M	10°		10°	
N	0.76	1.01	0.030	0.040

### D SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 751-05 (SO-8) ISSUE R




- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
  2. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
  3. DIMENSION D AND E DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION
  4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 PER SIDE.
  5. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 TOTAL IN EXCESS OF THE B DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS	
	MIN	MAX
A	1.35	1.75
A1	0.10	0.25
B	0.35	0.49
C	0.18	0.25
D	4.80	5.00
E	3.80	4.00
e	1.27 BSC	
H	5.80	6.20
h	0.25	0.50
L	0.40	1.25
θ	0°	7°

# LM358, LM258, LM2904, LM2904V



Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and  are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

#### How to reach us:

USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;  
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1-800-441-2447 or 602-303-5454

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE 602-244-6609  
INTERNET: <http://Design-NET.com>

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, 6F Seibu-Butsuryu-Center,  
3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 03-81-3521-8315

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,  
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298



**MOTOROLA**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนําไปใช้

LM358/D



This datasheet has been downloaded from:

[www.DatasheetCatalog.com](http://www.DatasheetCatalog.com)

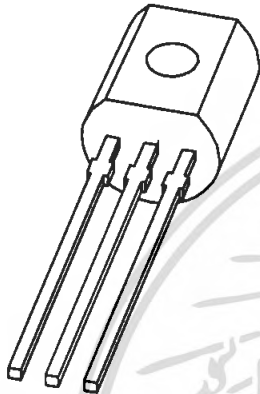
Datasheets for electronic components.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# DATA SHEET



## 2N3904 NPN switching transistor

Product specification  
Supersedes data of September 1994  
File under Discrete Semiconductors, SC04

1997 Jul 15

Philips  
Semiconductors



# PHILIPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## NPN switching transistor

2N3904

## FEATURES

- Low current (max. 200 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

## APPLICATIONS

- High-speed switching.

## DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-92; SOT54 plastic package. PNP complement: 2N3906.

## PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	collector
2	base
3	emitter

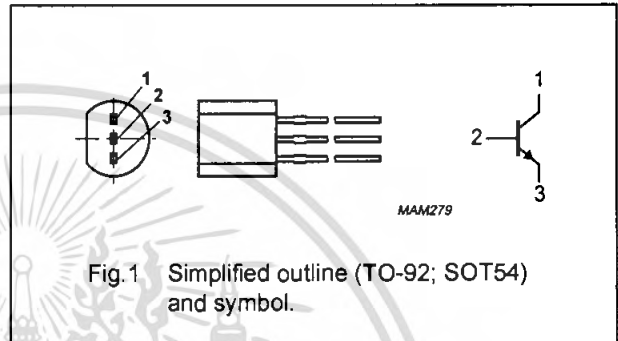


Fig. 1. Simplified outline (TO-92; SOT54) and symbol.

## QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{CB0}$	collector-base voltage	open emitter	–	60	V
$V_{CE0}$	collector-emitter voltage	open base	–	40	V
$I_C$	collector current (DC)		–	200	mA
$P_{tot}$	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$	–	500	mW
$h_{FE}$	DC current gain	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 1\text{ V}$	100	300	
$f_T$	transition frequency	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 20\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	300	–	MHz
$t_{off}$	turn-off time	$I_{Con} = 10\text{ mA}; I_{Bon} = 1\text{ mA}; I_{Boff} = -1\text{ mA}$	–	240	ns

## NPN switching transistor

2N3904

## LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{CBO}$	collector-base voltage	open emitter	–	60	V
$V_{CEO}$	collector-emitter voltage	open base	–	40	V
$V_{EBO}$	emitter-base voltage	open collector	–	6	V
$I_C$	collector current (DC)		–	200	mA
$I_{CM}$	peak collector current		–	300	mA
$I_{BM}$	peak base current		–	100	mA
$P_{tot}$	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ °C}$ ; note 1	–	500	mW
$T_{stg}$	storage temperature		–65	+150	°C
$T_j$	junction temperature		–	150	°C
$T_{amb}$	operating ambient temperature		–65	+150	°C

## Note

1. Transistor mounted on an FR4 printed-circuit board.

## THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j-a}$	thermal resistance from junction to ambient	note 1	250	K/W

## Note

1. Transistor mounted on an FR4 printed-circuit board.

## CHARACTERISTICS

 $T_{amb} = 25\text{ °C}$ .

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$I_{CBO}$	collector cut-off current	$I_E = 0$ ; $V_{CB} = 30\text{ V}$	–	50	nA
$I_{EBO}$	emitter cut-off current	$I_C = 0$ ; $V_{EB} = 6\text{ V}$	–	50	nA
$h_{FE}$	DC current gain	$V_{CE} = 1\text{ V}$ ; note 1 $I_C = 0.1\text{ mA}$ $I_C = 1\text{ mA}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $I_C = 50\text{ mA}$ $I_C = 100\text{ mA}$	60 80 100 60 30	– – 300 – –	
$V_{CEsat}$	collector-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}$ ; $I_B = 1\text{ mA}$ ; note 1 $I_C = 50\text{ mA}$ ; $I_B = 5\text{ mA}$ ; note 1	–	200 200	mV mV
$V_{BEsat}$	base-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}$ ; $I_B = 1\text{ mA}$ ; note 1 $I_C = 50\text{ mA}$ ; $I_B = 5\text{ mA}$ ; note 1	–	850 950	mV mV
$C_c$	collector capacitance	$I_E = I_B = 0$ ; $V_{CB} = 5\text{ V}$ ; $f = 1\text{ MHz}$	–	4	pF
$C_e$	emitter capacitance	$I_C = I_C = 0$ ; $V_{EB} = 500\text{ mV}$ ; $f = 1\text{ MHz}$	–	8	pF
$f_T$	transition frequency	$I_C = 10\text{ mA}$ ; $V_{CE} = 20\text{ V}$ ; $f = 100\text{ MHz}$	300	–	MHz

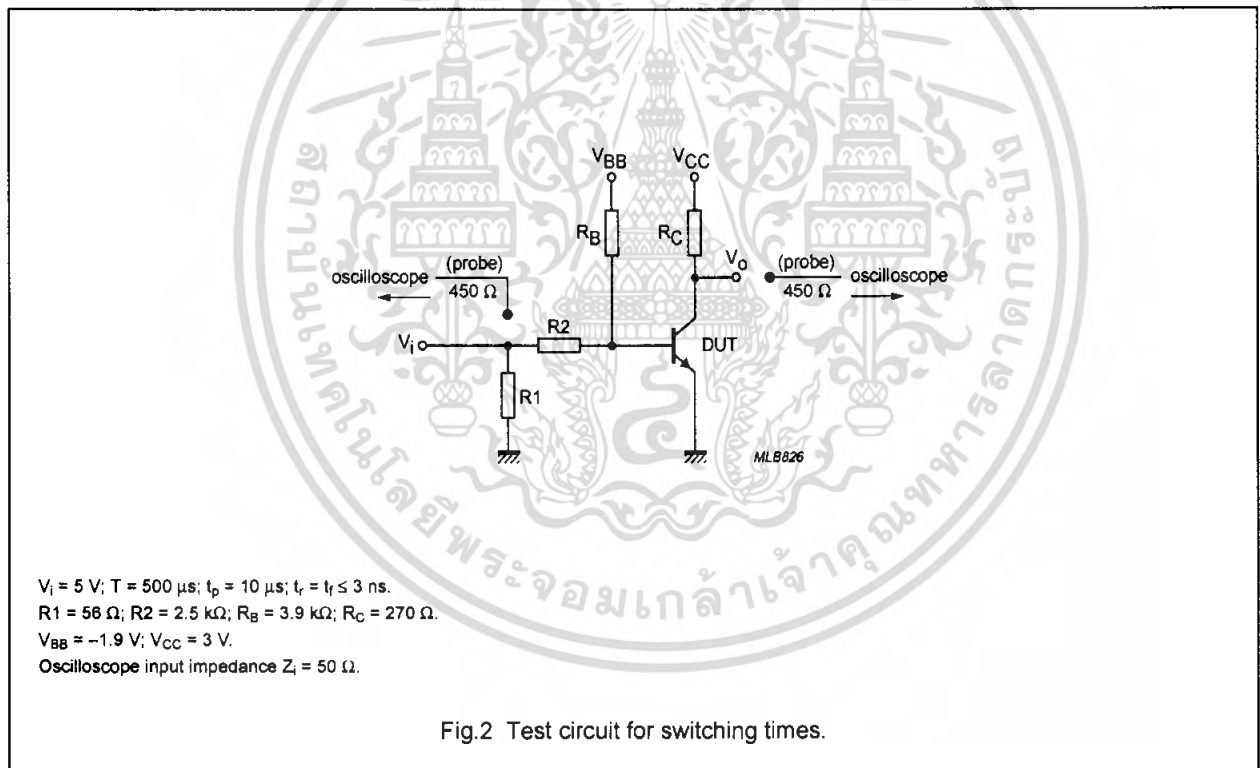
NPN switching transistor

2N3904

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
F	noise figure	$I_C = 100 \mu\text{A}$ ; $V_{CE} = 5 \text{ V}$ ; $R_S = 1 \text{ k}\Omega$ ; $f = 10 \text{ Hz to } 15.7 \text{ kHz}$	–	5	dB
<b>Switching times (between 10% and 90% levels); see Fig.2</b>					
$t_{on}$	turn-on time	$I_{Con} = 10 \text{ mA}$ ; $I_{Bon} = 1 \text{ mA}$ ; $I_{Boff} = -1 \text{ mA}$	–	65	ns
$t_d$	delay time		–	35	ns
$t_r$	rise time		–	35	ns
$t_{off}$	turn-off time		–	240	ns
$t_s$	storage time		–	200	ns
$t_f$	fall time		–	50	ns

Note

1. Pulse test:  $t_p \leq 300 \mu\text{s}$ ;  $\delta \leq 0.02$ .



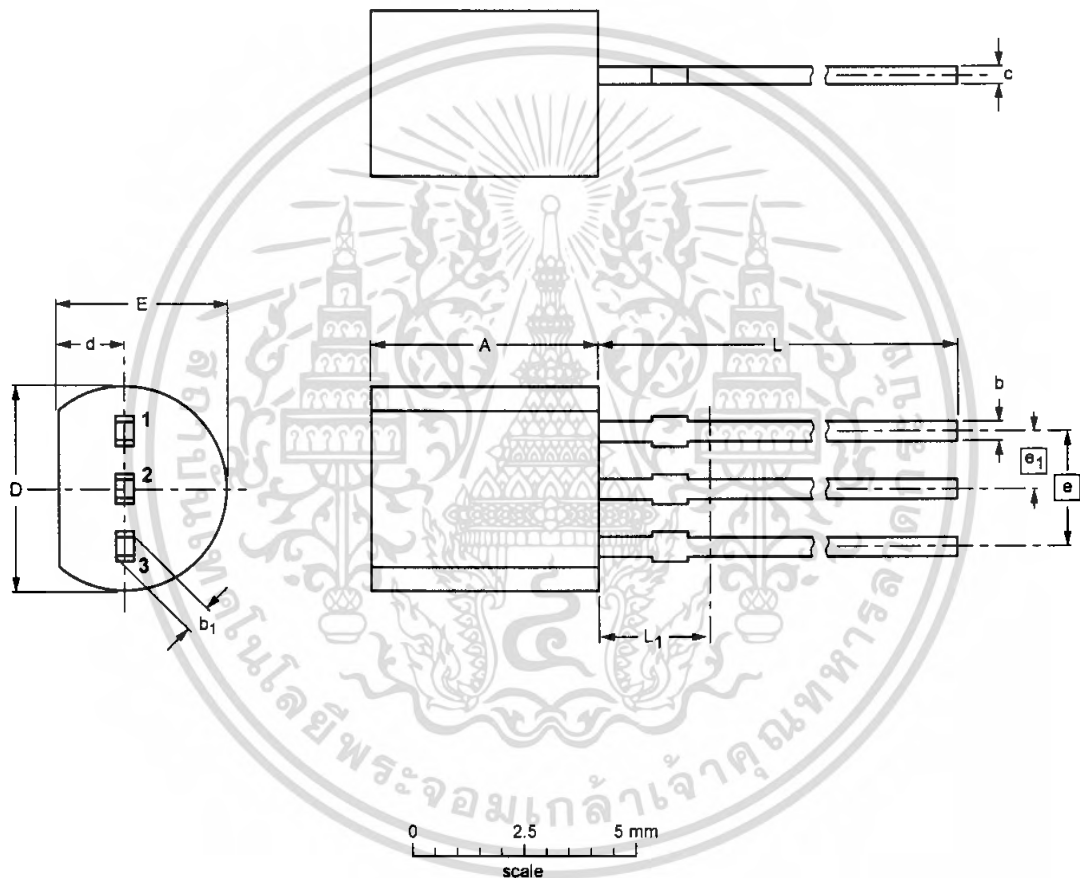
NPN switching transistor

2N3904

PACKAGE OUTLINE

Plastic single-ended leaded (through hole) package; 3 leads

SOT54



DIMENSIONS (mm are the original dimensions)

UNIT	A	b	b <sub>1</sub>	c	D	d	E	e	e <sub>1</sub>	L	L <sub>1</sub> (1)
mm	5.2 5.0	0.48 0.40	0.66 0.56	0.45 0.40	4.8 4.4	1.7 1.4	4.2 3.6	2.54	1.27	14.5 12.7	2.5

Note

1. Terminal dimensions within this zone are uncontrolled to allow for flow of plastic and terminal irregularities.

OUTLINE VERSION	REFERENCES				EUROPEAN PROJECTION	ISSUE DATE
	IEC	JEDEC	EIAJ			
SOT54		TO-92	SC-43			97-02-28

## NPN switching transistor

2N3904

## DEFINITIONS

<b>Data sheet status</b>	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
<b>Limiting values</b>	
Limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
<b>Application information</b>	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	

## LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices, or systems where malfunction of these products can reasonably be expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.

## NPN switching transistor

2N3904

## NOTES



# Philips Semiconductors – a worldwide company

**Argentina:** see South America

**Australia:** 34 Waterloo Road, NORTH RYDE, NSW 2113,  
Tel. +61 2 9805 4455, Fax. +61 2 9805 4466

**Austria:** Computerstr. 6, A-1101 WIEN, P.O. Box 213, Tel. +43 160 1010,  
Fax. +43 160 101 1210

**Belarus:** Hotel Minsk Business Center, Bld. 3, r. 1211, Volodarski Str. 6,  
220050 MINSK, Tel. +375 172 200 733, Fax. +375 172 200 773

**Belgium:** see The Netherlands

**Brazil:** see South America

**Bulgaria:** Philips Bulgaria Ltd., Energoproject, 15th floor,  
51 James Bourchier Blvd., 1407 SOFIA,  
Tel. +359 2 689 211, Fax. +359 2 689 102

**Canada:** PHILIPS SEMICONDUCTORS/COMPONENTS,  
Tel. +1 800 234 7381

**China/Hong Kong:** 501 Hong Kong Industrial Technology Centre,  
72 Tat Chee Avenue, Kowloon Tong, HONG KONG,  
Tel. +852 2319 7888, Fax. +852 2319 7700

**Colombia:** see South America

**Czech Republic:** see Austria

**Denmark:** Prags Boulevard 80, PB 1919, DK-2300 COPENHAGEN S,  
Tel. +45 32 88 2636, Fax. +45 31 57 0044

**Finland:** Sinikalliontie 3, FIN-02630 ESPOO,  
Tel. +358 9 615800, Fax. +358 9 61580920

**France:** 4 Rue du Port-aux-Vins, BP317, 92156 SURESNES Cedex,  
Tel. +33 1 40 99 6161, Fax. +33 1 40 99 6427

**Germany:** Hammerbrookstraße 69, D-20097 HAMBURG,  
Tel. +49 40 23 53 60, Fax. +49 40 23 536 300

**Greece:** No. 15, 25th March Street, GR 17778 TAVROS/ATHENS,  
Tel. +30 1 4894 339/239, Fax. +30 1 4814 240

**Hungary:** see Austria

**India:** Philips INDIA Ltd, Band Box Building, 2nd floor,  
254-D, Dr. Annie Besant Road, Worli, MUMBAI 400 025,  
Tel. +91 22 493 8541, Fax. +91 22 493 0966

**Indonesia:** see Singapore

**Ireland:** Newstead, Clonskeagh, DUBLIN 14,  
Tel. +353 1 7640 000, Fax. +353 1 7640 200

**Israel:** RAPAC Electronics, 7 Kehilat Saloniki St, PO Box 18053,  
TEL AVIV 61180, Tel. +972 3 645 0444, Fax. +972 3 649 1007

**Italy:** PHILIPS SEMICONDUCTORS, Piazza IV Novembre 3,  
20124 MILANO, Tel. +39 2 6752 2531, Fax. +39 2 6752 2557

**Japan:** Philips Bldg 13-37, Kohnan 2-chome, Minato-ku, TOKYO 108,  
Tel. +81 3 3740 5130, Fax. +81 3 3740 5077

**Korea:** Philips House, 260-199 Itaewon-dong, Yongsan-ku, SEOUL,  
Tel. +82 2 709 1412, Fax. +82 2 709 1415

**Malaysia:** No. 76 Jalan Universiti, 46200 PETALING JAYA, SELANGOR,  
Tel. +60 3 750 5214, Fax. +60 3 757 4880

**Mexico:** 5900 Gateway East, Suite 200, EL PASO, TEXAS 79905,  
Tel. +9-5 800 234 7381

**Middle East:** see Italy

**Netherlands:** Postbus 90050, 5600 PB EINDHOVEN, Bldg. VB,  
Tel. +31 40 27 82785, Fax. +31 40 27 88399

**New Zealand:** 2 Wagener Place, C.P.O. Box 1041, AUCKLAND,  
Tel. +64 9 849 4160, Fax. +64 9 849 7811

**Norway:** Box 1, Manglerud 0612, OSLO,  
Tel. +47 22 74 8000, Fax. +47 22 74 8341

**Philippines:** Philips Semiconductors Philippines Inc.,  
106 Valero St. Saicedo Village, P.O. Box 2108 MCC, MAKATI,  
Metro MANILA, Tel. +63 2 816 6380, Fax. +63 2 817 3474

**Poland:** Ul. Lukiska 10, PL 04-123 WARSZAWA,  
Tel. +48 22 612 2831, Fax. +48 22 612 2327

**Portugal:** see Spain

**Romania:** see Italy

**Russia:** Philips Russia, Ul. Usatcheva 35A, 119048 MOSCOW,  
Tel. +7 095 755 6918, Fax. +7 095 755 6919

**Singapore:** Lorong 1, Toa Payoh, SINGAPORE 1231,  
Tel. +65 350 2538, Fax. +65 251 6500

**Slovakia:** see Austria

**Slovenia:** see Italy

**South Africa:** S.A. PHILIPS Pty Ltd., 195-215 Main Road Martindale,  
2092 JOHANNESBURG, P.O. Box 7430 Johannesburg 2000,  
Tel. +27 11 470 5911, Fax. +27 11 470 5494

**South America:** Rua do Rocio 220, 5th floor, Suite 51,  
04552-903 São Paulo, SÃO PAULO - SP, Brazil,  
Tel. +55 11 821 2333, Fax. +55 11 829 1849

**Spain:** Balmas 22, 08007 BARCELONA,  
Tel. +34 3 301 6312, Fax. +34 3 301 4107

**Sweden:** Kottbygatan 7, Akalla, S-16485 STOCKHOLM,  
Tel. +46 8 632 2000, Fax. +46 8 632 2745

**Switzerland:** Allmendstrasse 140, CH-8027 ZÜRICH,  
Tel. +41 1 488 2686, Fax. +41 1 481 7730

**Taiwan:** Philips Semiconductors, 6F, No. 96, Chien Kuo N. Rd., Sec. 1,  
TAIPEI, Taiwan Tel. +886 2 2134 2865, Fax. +886 2 2134 2874

**Thailand:** PHILIPS ELECTRONICS (THAILAND) Ltd.,  
209/2 Sanpavuth-Bangna Road Prakanong, BANGKOK 10260,  
Tel. +66 2 745 4090, Fax. +66 2 398 0793

**Turkey:** Talatpasa Cad. No. 5, 80640 GÜLTEPE/ISTANBUL,  
Tel. +90 212 279 2770, Fax. +90 212 282 6707

**Ukraine:** PHILIPS UKRAINE, 4 Patrice Lumumba str., Building B, Floor 7,  
252042 KIEV, Tel. +380 44 264 2776, Fax. +380 44 268 0461

**United Kingdom:** Philips Semiconductors Ltd., 276 Bath Road, Hayes,  
MIDDLESEX UB3 5BX, Tel. +44 181 730 5000, Fax. +44 181 754 8421

**United States:** 811 East Arques Avenue, SUNNYVALE, CA 94088-3409,  
Tel. +1 800 234 7381

**Uruguay:** see South America

**Vietnam:** see Singapore

**Yugoslavia:** PHILIPS, Trg N. Pasica 5/v, 11000 BEOGRAD,  
Tel. +381 11 625 344, Fax. +381 11 635 777

**For all other countries apply to:** Philips Semiconductors, Marketing & Sales Communications,  
Building BE-p, P.O. Box 218, 5600 MD EINDHOVEN, The Netherlands, Fax. +31 40 27 24825

**Internet:** <http://www.semiconductors.philips.com>

© Philips Electronics N.V. 1997

SCA55

All rights are reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written consent of the copyright owner.

The information presented in this document does not form part of any quotation or contract, is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice. No liability will be accepted by the publisher for any consequence of its use. Publication thereof does not convey nor imply any license under patent- or other industrial or intellectual property rights.

Printed in The Netherlands

117047/00/02/pp8

Date of release: 1997 Jul 15

Document order number: 9397 750 02642

*Let's make things better.*

**Philips  
Semiconductors**



**PHILIPS**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้