

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้คณะฯ ปี 2551

การออกแบบและสร้างวงจรกรองสัญญาณแบบปรับค่าความหน่วงเป็น  
เศษส่วนโดยสมการพหุนามปาสคาลและการประยุกต์ใช้งาน  
(Design and Implementation of Variable Fractional Delay Digital Filter  
by Pascal Polynomial and Applications)

โดย

ดร. ศรวัฒน์ ชิวปรีชา : หัวหน้าโครงการวิจัย

RCH  
TK  
7872

F5  
๑๑๔๗๐  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๖-๑๒๑๖-๐๖๘๔

รายงานการวิจัย

เซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำในโครงสร้าง

Magnetic sensors by metal-semiconductor junction within structure



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 116844  
วัน,เดือน,ปี... 16 ส.ย. 2554

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

b. 1232-8066  
i. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ในนามของผู้วิจัยและหัวหน้าโครงการ ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนทางการเงินสำหรับงานวิจัยนี้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้จนทำให้ได้องค์ความรู้ที่สมบูรณ์ ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณนายวีระ เพ็งจันทร์ นักวิจัยห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นายสุเมธ จันทร์แก้ว นักศึกษาปริญญาโทหลักสูตร ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยในการสร้างอุปกรณ์ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ นายเมธา สร้อยเกลียว นายชัชวฤทธิ์ คังอมรฤทธิกุล และนายอนุภาพ มาตรมูล ที่มีส่วนในการนำไปประยุกต์ใช้งานและจัดทำรายงาน

  
รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย “เซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำในโครงสร้าง”

“Magnetic sensors by metal-semiconductor junction within structure”

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสภาวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2552

ระยะเวลาการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2551 ถึง กันยายน 2552

หัวหน้าโครงการ รศ.ดร.เคิมพงษ์ เพ็ชรกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กระทรวงศึกษาธิการ ถนนลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 02-7390643 E-mail: [kptoempo@kmitl.ac.th](mailto:kptoempo@kmitl.ac.th)

#### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาโครงสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมาแทนรอยต่อพีเอ็นในโครงสร้างเซนเซอร์แม่เหล็กนำเสนอ โดยจะใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่ได้พัฒนาขึ้นมาเป็นต้นแบบสำหรับศึกษาเปรียบเทียบ อุปกรณ์ชนิดนี้อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้า งานวิจัยนี้ทำการศึกษาออกแบบโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบสามขั้วตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำกับแบบรอยต่อพีเอ็น จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแบบรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกับแบบรอยต่อพีเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## **Abstract**

This project studied the junction of metal-semiconductor for magnetic sensor. The structure of magnetic sensor device that use in this study is magnetodiode which the structure composes of two coupled diode devices. This devices use Hall effect and Lorentz's force which apply to carriers caused the difference of current of coupled diodes. We have designed and fabricated devices and measured the magnetic characteristic responses. The parameters, the width between cathode (W) and the length between anode and cathode (L) are varied in this work. The metal-semiconductor junction from Metal-Semiconductor is studied and compared with the pn junction magnetodiode in this work.

The responses show that this device structure can detect magnetic field linealy at any applied currents. Both junctions can work as magnetodiode. Finally, the application of magnetodiode is illustrated as directional magnetic filed detecting system.

# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	I
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 ระบบของงานเซนเซอร์.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 หน่วย (Unit) .....	1
1.2.1 หน่วยมูลฐานและหน่วยเสริม.....	2
1.2.2 หน่วยทางไฟฟ้า.....	3
1.3 ความสำคัญของการวัดและควบคุม.....	3
1.4 การแบ่งหน้าที่การทำงานและระบบการวัดค่า.....	3
1.4.1 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่พื้นฐาน.....	4
1.4.2 อุปกรณ์เสริม.....	4
1.5 เซนเซอร์.....	4
1.5.1 เซนเซอร์.....	5
1.5.2 ความจำเป็นที่ต้องใช้เซนเซอร์.....	5
1.5.3 ทำความรู้จักและเรียนรู้เกี่ยวกับเซนเซอร์.....	6
1.5.4 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์.....	7
1.6 เซนเซอร์ในระบบต่างๆ.....	8
1.6.1 ระบบการวัด.....	8
1.6.2 ระบบควบคุมวงเปิด.....	10
1.6.3 ระบบควบคุมวงปิด.....	10
1.7 คุณสมบัติของเซนเซอร์.....	11
1.7.1 ความแม่นยำ (accuracy) .....	12
1.7.2 ความแน่นอน (precision) .....	12
1.7.3 ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (repeatability หรือ reproducibility) .....	12
1.7.4 ความคลาดเคลื่อน (error) .....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
1.7.5 ความคลาดเคลื่อนสถิต (static error) .....	13
1.7.6 การปรับเทียบ (calibration) .....	13
1.7.7 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone หรือ dead band) .....	14
1.7.8 ขนาด (dimension) .....	14
1.7.9 ครีฟต์ (drift).....	14
1.7.10 ฮีสเทอรีซิส (hysteresis).....	15
1.7.11 การหน่วงสัญญาณ (lag).....	15
1.7.12 ความเป็นเชิงเส้น (linearity).....	15
1.7.13 อายุการใช้งาน (operating life หรือ reliability).....	16
1.7.14 ข่ายปฏิบัติการงาน (range).....	16
1.7.15 อัตราการทำงาน (rating).....	16
1.7.16 ผลตอบสนอง (response).....	17
1.7.17 ความเร็วในการตอบสนอง (speed of Response).....	17
1.7.18 ความละเอียด (resolution).....	17
1.7.19 ความไว (sensitivity).....	17
1.7.20 เสถียรภาพ (stability).....	18
1.7.21 ค่าเบี่ยงเบน (tolerance).....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีเซนเซอร์ต่างๆ.....	19
2.1 บทนำ.....	19
2.1.1 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดัน ไบอัส (p-n junction at for biasing).....	20
2.1.2 ปฏิกิริยาการที่รอยต่อขณะได้รับไบอัสตรง.....	20
2.1.3 แถบพลังงานของรอยต่อพี – เอ็น ในขณะได้รับไบอัสตรง.....	22
2.1.4 ปฏิกิริยาการที่รอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	23
2.1.5 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	24
2.1.6 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....	26
2.2 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุณหภูมิก่อนสัมผัส.....	27
2.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในอุณหภูมิต.....	29
2.3.1 กรณีที่ฟังก์ชันงานของโลหะ $\phi_M$ มีค่ามากกว่า $\phi_D$ ของสารกึ่งตัวนำ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates).....	40
2.4.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์.....	40
2.4.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	45
2.5 อุปกรณ์ที่ใช้หลักการ ปรากฏการณ์ฮอลล์.....	48
2.5.1 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor).....	48
2.5.2 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode).....	50
2.5.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor).....	51
2.5.4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง.....	52
(Vertical magnetotransistor)	
2.5.5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน.....	53
(Lateral magnetotransistor)	
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877.....	55
2.6.1 PIC Microcontroller ชนิดต่างๆ.....	55
2.6.1.1 OTP ( one time programmable ).....	55
2.6.1.2 EPROM ( erasable programmable ROM ) .....	55
2.6.1.3 EEPROM / Flash ( electronically erasable programmable ROM ) .....	56
2.6.2 แรงดันในการทำงาน.....	56
2.6.3 สัญญาณนาฬิกา.....	56
2.6.4 คุณสมบัติของ PIC16F877.....	57
2.6.5 โครงสร้างการทำงานภายในของ PIC16F877.....	59
2.7.6 การจัดสรรหน่วยความจำ โปรแกรมของ PIC16F877.....	63
2.7.7 การจัดสรรหน่วยความจำข้อมูล RAM ของ PIC16F877.....	65
2.7.8 รีจิสเตอร์หลักการของ PIC16F877.....	67
2.7.8.1 รีจิสเตอร์ Configuration word).....	67
2.7.8.2 รีจิสเตอร์ STATUS .....	67
2.7.8.3 รีจิสเตอร์ W .....	69
2.7.8.4 Program Counter (PC).....	69
2.7.8.5 Stack.....	69
2.7.8.6 PORTA, PORTB, PORTC, PORTD, PORTE.....	69

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.8.7 TRISA, TRISB, TRISC, TRISD, TRISE, .....	69
บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบเมกนีโตไดโอดแบบคู่.....	70
3.1 เมกนีโตไดโอดแบบคู่(รอยต่อ PN).....	70
3.2 การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection).....	71
3.3 เมกนีโตไดโอดสามขาชนิดรอยต่อแบบโลหะ (Metal- Semiconductor).....	78
3.4 เมกนีโตไดโอดสามขาชนิดรอยต่อแบบ Schottky.....	81
บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอด.....	84
4.1 กระบวนการทำความสะอาด(Cleaning Process).....	85
4.2 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation Process).....	85
4.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น(Wet Oxidation).....	86
4.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง(Dry Oxidation ).....	86
4.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography Process).....	88
4.3.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์(Wafer Cleaning).....	89
4.3.2 การเคลือบสารไวแสง (Photoresist coating).....	90
4.3.3 การอบขึ้น Softbake .....	90
4.3.4 การปรับซ็อนมาสก์(Mask Alignment).....	90
4.3.5 การฉายแสง(Exposure).....	91
4.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง(Development).....	91
4.3.7 การอบขึ้น Hardbake.....	91
4.3.8 การกัด(Etching).....	91
4.3.9 การลอกน้ำยาไวแสง.....	92
4.3.10 กระบวนการแพร่สารเจือ(Deposition).....	92
4.3.10.1 การแพร่สารเจือขั้นต้น(Pre-deposition).....	92
4.3.10.2.การขั้บลึก.....	94
4.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Meltalztion Process).....	94
4.5 การออกแบบเมกนีโตไดโอดแบบคู่.....	95
4.6 กระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบ Metal Semiconductor. ....	107
4.7 กระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบคู่ชนิดรอยต่อแบบ Schottky Diode .....	114
บทที่ 5 ผลการทดลองและการประยุกต์การใช้งาน.....	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1 คุณลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของ ไดโอดที่มีโครงสร้าง.....	121
5.1.1 ที่ระยะ $L = 50 \mu\text{m}$ .....	121
5.1.2 ที่ระยะ $L = 50 \mu\text{m}$ .....	122
5.2 คุณลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของ ไดโอด โครงสร้างแบบ Schottky Diode .....	123
5.3 คุณลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของ ไดโอด โครงสร้างแบบ Metal – Semiconductor.....	124
5.4 วงจรขยายผลต่าง (INSTRUMENTATION AMPLIFIER) .....	125
5.5 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโต ไดโอด.....	128
5.1.1 ที่โครงสร้างแบบ P-N Junction ที่ระยะ $L = 50\mu\text{m}$ และ $W = 50\mu\text{m}$ .....	128
5.1.2 ที่โครงสร้างแบบ P-N Junction ที่ระยะ $L = 60\mu\text{m}$ และ $W = 60\mu\text{m}$ .....	129
5.1.3 ที่โครงสร้างแบบ P-N Junction ที่ระยะ $L = 80\mu\text{m}$ และ $W = 80\mu\text{m}$ .....	130
5.6 การเปรียบเทียบกันของแต่ละ โครงสร้าง.....	131
5.7 การประยุกต์ใช้งาน.....	132
5.8 การปรับแต่งสัญญาณและการต่อเชื่อมสัญญาณ โดยใช้วงจรแยกทรีฟ.....	133
5.9 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) .....	133
5.10 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์.....	133
5.11 วงจรรวม.....	136
5.12 Flowchart.....	137
5.13 โปรแกรมที่ใช้ในการประยุกต์ใช้งาน.....	138
5.14 การทำงานของวงจร.....	141
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและปัญหา รวมทั้งแนวทางในการแก้ไขและหลังจากทำการแก้ไขปัญหาแล้ว.....	143
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	143
6.2 ปัญหา.....	144
6.2.1 ปัญหาเกิดจากกระบวนการสร้าง.....	144
6.2.2 ปัญหาเกิดจากวงจรที่ใช้ทดสอบชิ้นงาน.....	145
6.2.3 ปัญหาเกิดจากมาร์ค.....	145
6.2.4 ปัญหาเกิดจากทำโลหะสองชนิดในด้านเดียวกัน.....	146

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.3 แนวทางในการแก้ไข.....	146
6.3.1 การแก้ปัญหาเกิดจากกระบวนการสร้าง.....	146
6.3.2 การแก้ปัญหาจากวงจรที่ใช้ทดสอบชิ้นงาน.....	146
6.3.3 การแก้ปัญหาเกิดจากมาร์ค .....	147
6.3.4 การแก้ปัญหาเกิดจากทำ โลหะสองชนิดในด้านเดียวกัน.....	147
6.4 หลังจากทำการแก้ไขปัญหาแล้ว.....	147
6.4.1 หลังจากทำการแก้ไขปัญหาปัญหาเกิดจากกระบวนการสร้าง.....	147
6.4.2 โดยการต่อลง Photo board ให้มีความเรียบร้อยและเป็นระเบียบมาก.....	147
6.4.3 หลังจากการแก้ปัญหาเกิดจากมาร์คผลที่ได้หลังจากการแก้ปัญหามาร์ค.....	148
6.4.4 หลังจากการแก้ปัญหาเกิดจากทำ โลหะสองชนิดในด้านเดียวกัน.....	149

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางแสดงหน่วยมูลฐาน, หน่วยเสริม และที่มาของจำนวนไฟฟ้าบางตัว.....	2
2 ค่าฟังก์ชันงาน $q\mathcal{O}_M$ (Work function) ของโลหะชนิดต่างๆ.....	28
3 แสดงค่าความสูงของกำแพงช็อคต์คีย์ $\mathcal{O}_B$ ที่วัดได้ จากระอยสสัมพัทธ์ระหว่างโลหะระหว่างโลหะชนิดต่างๆ กับสารกึ่งตัวนำ ทั้งซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ (ปกติมีค่าสูงกว่าทฤษฎี).....	31
4 รายละเอียดของขา PIC16F877.....	60
5 คำ PCLATH <4:3> ในการเลือก Page ของ PIC16F877.....	64
6 คำ RPO และ RP1 ในการเลือก Bank ของ PIC16F877.....	66
7 แสดง CLASS ต่างๆของห้องสะอาด.....	88



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์แบบต่างๆ.....	8
รูปที่ 1.2 ระบบการวัด.....	8
รูปที่ 1.3 องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด.....	9
รูปที่ 1.4 ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงเปิด.....	10
รูปที่ 1.5 ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงปิด.....	11
รูปที่ 1.6 การแสดงค่าเอาต์พุต.....	13
รูปที่ 1.7 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone).....	14
รูปที่ 1.8 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเตอรีซิส.....	15
รูปที่ 1.9 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น.....	16
รูปที่ 1.10 ความเร็วในการตอบสนอง.....	17
รูปที่ 2.1 (ก) โครงสร้างง่ายๆของรอยต่อ พี-เอ็น (ข) สัญลักษณ์ของรอยต่อพีเอ็น และ (ค) โครงสร้างที่ใช้งานจริงของ ไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น.....	20
รูปที่ 2.2 การให้ไบอัสตรง $V_A$ แก่รอยต่อพี-เอ็น.....	21
รูปที่ 2.3 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะที่ (ก) รอยต่อขณะไม่ได้รับไบอัส และ (ข) รอยต่อขณะได้รับไบอัสตรง $V_A$ .....	23
รูปที่ 2.4 ลักษณะ การให้ไบอัสย้อนกลับ - $V_A$ แก่ไดโอดแบบรอยต่อพี - เอ็น.....	24
รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของรอยต่อ พี-เอ็น ขณะได้รับไบอัส..... (ก) รอยต่อขณะไม่ได้รับไบอัส (ข) รอยต่อขณะได้รับไบอัสกลับ - $V_A$	25
รูปที่ 2.6 ขั้วสัมผัสส่วนต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ และของไอโอด..... (ก) รอยสัมผัสโอห์มิก ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (ข) รอยสัมผัสเรกติไฟร์ ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ	26
รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติก่อนสัมผัส.....	27
รูปที่ 2.8 ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า.....	32
รูปที่ 2.9 สนามไฟฟ้า.....	32
รูปที่ 2.10 การให้ไบอัสตรง.....	33
รูปที่ 2.11 แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสตรง + $V_A$ .....	33
รูปที่ 2.12 การให้ไบอัสกลับ.....	34
รูปที่ 2.13 แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ - $V_A$ .....	35
รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.15 เริ่มต้นสัมผัส.....	37
รูปที่ 2.16 ภายหลังสัมผัส.....	37
รูปที่ 2.17 กรณีโลหะมีศักย์เป็นบวก.....	38
รูปที่ 2.18 กรณีโลหะมีศักย์เป็นลบ.....	38
รูปที่ 2.19 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact).....	39
หรือ Non rectifying	
รูปที่ 2.20 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี [21].....	40
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการ ใต้ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค.....	42
รูปที่ 2.22 ด้านตัดขวาง โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	45
รูปที่ 2.23 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง.....	46
รูปที่ 2.24 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง.....	47
รูปที่ 2.25 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง.....	48
รูปที่ 2.26 เอ้าท์พุทของเข็มทิศแม่เหล็ก [15].....	48
รูปที่ 2.27 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม.....	50
รูปที่ 2.28 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด.....	50
รูปที่ 2.29 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS.....	51
รูปที่ 2.30 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง.....	52
รูปที่ 2.31 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน.....	53
รูปที่ 2.32 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$ .....	54
รูปที่ 2.33 การจัดขาของ PIC16F877.....	57
รูปที่ 2.34 โครงสร้างการทำงานภายใน PIC16F877.....	59
รูปที่ 2.35 การจัดสรรหน่วยความจำโปรแกรมของ PIC16F877.....	64
รูปที่ 2.36 การจัดสรรหน่วยความจำข้อมูล RAM ของ PIC16F877.....	67
รูปที่ 2.37 รีจิสเตอร์ STATUS .....	68
รูปที่ 3.1 ภาพด้านบนแสดงมิติโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสามขา.....	70
รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านบนมิติของแมกนีโตไดโอด.....	71
รูปที่ 3.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในมุมเบี่ยงเบน $\theta$ .....	72
รูปที่ 3.4 (ก) เส้นศักย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์และ (ข) แรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ .....	74
รูปที่ 3.5 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว L ของอุปกรณ์ฮอลล์.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.6 การลดลงของความยาว L ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า.....	75
รูปที่ 3.7 แสดงมิติของแมกนีโตไดโอดสามขา.....	75
รูปที่ 3.8 มาส์คที่ 1 ( แอนโนค Mask ) .....	76
รูปที่ 3.9 มาส์คที่ 2 ( แครโซค Mask).....	77
รูปที่ 3.10 มาส์คที่ 3 : Contact Windows Mask.....	77
รูปที่ 3.11 มาส์คที่ 4 : Aluminum Mask.....	78
รูปที่ 3.12 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสามขาชนิดรอยต่อแบบโลหะ( Metal- Semiconductor).....	79
รูปที่ 3.13 แสดงมิติของแมกนีโตไดโอดสามขาชนิดรอยต่อแบบโลหะ( Metal- Semiconductor).....	79
รูปที่ 3.14 ภาคตัดขวางของแมกนีโตไดโอด (Magneto Diode).....	80
รูปที่ 3.15 มาส์คที่ 1 : Diode Mask.....	81
รูปที่ 3.16 มาส์คที่ 2 : Contact Windows Mask for Al.....	81
รูปที่ 3.17 มาส์คที่ 3 : Ohmic Contact.....	81
รูปที่ 3.18 มาส์คที่ 4 : Contact Mask.....	81
รูปที่ 3.19 แสดงมิติของแมกนีโตไดโอดสามขาชนิดรอยต่อแบบโลหะ (Metal - Semiconductor).....	82
รูปที่ 3.20 มาส์คที่ 1 : Ohmic Mask.....	83
รูปที่ 3.21 มาส์คที่ 2 : Contact Al.....	83
รูปที่ 3.22 มาส์คที่ 3 : Contact Windows Mask for Al .....	83
รูปที่ 4.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคนิโพลีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	84
รูปที่ 4.2 กระบวนการทำความสะอาด.....	85
รูปที่ 4.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชัน.....	86
รูปที่ 4.4 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง.....	87
รูปที่ 4.5 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน.....	87
รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process.....	89
รูปที่ 4.7 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน.....	93
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของซิลิคอน.....	93
รูปที่ 4.9 ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส.....	94
รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator.....	95
รูปที่ 4.11 แผ่นซิลิคอน.....	96
รูปที่ 4.12 ซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.13 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 1.....	97
รูปที่ 4.14 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี.....	97
รูปที่ 4.15 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์.....	98
รูปที่ 4.16 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง.....	98
รูปที่ 4.17 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ.....	99
รูปที่ 4.18 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in.....	99
รูปที่ 4.19 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 2.....	100
รูปที่ 4.20 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี.....	100
รูปที่ 4.21 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์.....	101
รูปที่ 4.22 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง.....	101
รูปที่ 4.23 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ.....	102
รูปที่ 4.24 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in.....	102
รูปที่ 4.25 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสค์ที่.....	103
รูปที่ 4.26 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี.....	103
รูปที่ 4.27 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์.....	104
รูปที่ 4.28 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง.....	104
รูปที่ 4.29 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม.....	104
รูปที่ 4.30 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 4.....	105
รูปที่ 4.31 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี.....	105
รูปที่ 4.32 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นอลูมิเนียม.....	106
รูปที่ 4.33 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง.....	106
รูปที่ 4.34 แมกนีโคโคโอบแบบคู่เสร็จสมบูรณ์.....	107
รูปที่ 4.35 แผ่นซิลิคอน.....	107
รูปที่ 4.36 ซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน.....	108
รูปที่ 4.37 ขณะถ่ายมาสค์ที่ 1.....	109
รูปที่ 4.38 หลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี.....	109
รูปที่ 4.39 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์.....	109
รูปที่ 4.40 หลังล้างน้ำยาไวแสง.....	110
รูปที่ 4.41 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์.....	110
รูปที่ 4.40 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.41 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์.....	110
รูปที่ 4.42 แผ่นซิลิคอนเคลือบน้ำยาไวแสง (AZ, 1350).....	111
รูปที่ 4.43 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม.....	111
รูปที่ 4.44 Pattern Al .....	112
รูปที่ 4.45 Ni Contact .....	112
รูปที่ 4.46 sputtering Ni .....	113
รูปที่ 4.47 Pattern Ni .....	113
รูปที่ 4.48 แผ่นซิลิคอนที่ได้ทำความสะอาดแล้ว.....	114
รูปที่ 4.49 ซิลิคอน ไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน.....	114
รูปที่ 4.50 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายภาพมาสค์ที่ 1.....	115
รูปที่ 4.51 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟีและได้มีการ Development แล้ว.....	115
รูปที่ 4.52 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์.....	116
รูปที่ 4.53 Dope N+ .....	116
รูปที่ 4.54 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in .....	117
รูปที่ 4.55 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายภาพมาสค์ที่ 2 .....	117
รูปที่ 4.56 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม .....	118
รูปที่ 4.57 Pattern Al .....	118
รูปที่ 4.58 แมกนีโตไดโอดแบบคู่เสร็จสมบูรณ์.....	119
รูปที่ 5.1 (ก) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง P-N Junction ที่ได้หลังจากขบวนการสร้าง (ข) โครงสร้าง P-N Junction ที่ระยะ L=50µm และ W=50µm (ค) โครงสร้าง P-N Junction ที่ระยะ L=60µm และ W=60µm (ง) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง P-N Junction หลังจาก Packaging...120	120
รูปที่ 5.2 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและ ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง (L) = 50µm (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัส กลับได้จากเครื่องบันทึกผลที่ระยะห่าง(L) = 50µm .....	121
รูปที่ 5.3 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและ ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง (L) = 60µm (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัส กลับได้จากเครื่องบันทึกผลที่ระยะห่าง(L) = 60µm .....	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.4 (ก) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Schottky Diode ที่ได้จากหลังขบวนการสร้าง	
(ข) โครงสร้าง Schottky Diode ที่ระยะ $L=80\mu\text{m}$ และ $W=80\mu\text{m}$	
(ค) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Schottky Diode หลังจาก Packaging...123	
รูปที่ 5.5 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับ ไบอัสตรงและ	
ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง ( $L$ ) = $80\mu\text{m}$	
(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับ ไบอัสตรงและไบอัส	
กลับได้จากเครื่องบันทึกผลที่ระยะห่าง( $L$ ) = $80\mu\text{m}$ .....123	
รูปที่ 5.6 (ก) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Metal – Semiconductor ที่ได้จากหลัง	
ขบวนการสร้าง	
(ข) โครงสร้าง Metal – Semiconductor ที่ระยะ $L= 80\mu\text{m}$ และ $W=100\mu\text{m}$	
(ค) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Metal – Semiconductor	
หลังจาก Packaging.....124	
รูปที่ 5.6 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับ ไบอัสตรงและ	
ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง ( $L$ ) = $80\mu\text{m}$	
(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับ ไบอัสตรงและไบอัส	
กลับได้จากเครื่องบันทึกผลที่ระยะห่าง( $L$ ) = $80\mu\text{m}$ .....125	
รูปที่ 5.7 วงจร INSTRUMENTATION AMPLIFIER .....125	
รูปที่ 5.8 วงจรที่จะนำชิ้นงานต่อกับวงจร INSTRUMENTATION AMPLIFIER .....126	
รูปที่ 5.9 เครื่องสร้างสนามแม่เหล็ก.....127	
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (G)และแรงดัน(V)	
ที่กระแสค่าต่างๆที่จ่ายให้กับวงจรวัด.....128	
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (G)และแรงดัน(V)	
ที่กระแสค่าต่างๆที่จ่ายให้กับวงจรวัด.....129	
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (G)และแรงดัน(V)	
ที่กระแสค่าต่างๆที่จ่ายให้กับวงจรวัด.....130	
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกันของแต่ละ โครงสร้าง.....131	
รูปที่ 5.14 การนำแมกนีโตไดโอด ไปประยุกต์ใช้งาน.....132	
รูปที่ 5.15 วงจรบัฟเฟอร์ .....133	
รูปที่ 5.16 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง.....134	
รูปที่ 5.17 วงจรรวมที่ใช้ในการประยุกต์ใช้งาน.....135	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.18 บล็อกการทำงานของวงจร Application .....	136
รูปที่ 5.19 แสดงการทำงานของวงจร.....	141
รูปที่ 5.20 แสดงการทำงานของวงจร.....	141
รูปที่ 6.1 การเกิดการร่อนออกจาก SiO <sub>2</sub> ส่วนโลหะ Ni.....	144
รูปที่ 6.2 รูปวงจรขยายผลต่าง ที่ใช้ทดสอบตัวชิ้นงาน.....	145
รูปที่ 6.3 ผลของลายวงจรที่อยู่บน Flim.....	145
รูปที่ 6.4 น้ำยา AZ 1350 ร่อน.....	146
รูปที่ 6.5 หลังจากการแก้ปัญหาของน้ำยา AZ 1350 ร่อน.....	147
รูปที่ 6.6 การแสดงการต่อที่เรียบร้อย .....	148
รูปที่ 6.7 สายที่ใช้ในการวัด.....	148
รูปที่ 6.8 ผลของลายมาร์คที่อยู่บน Flim .....	148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## ระบบของงานเซนเซอร์

### 1.1 บทนำ

ในระบบการวัด ตลอดจนระบบควบคุมกระบวนการผลิตต่างๆทางอุตสาหกรรมนั้น อุปกรณ์หลักที่มีความจำเป็นอย่างมากและอาจขาดไม่ได้ ก็คือ “อุปกรณ์เซนเซอร์” หรืออาจจะทำงานไม่ได้ ถ้าหากขาดอุปกรณ์นี้ ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญเพราะอุปกรณ์เซนเซอร์เมื่อนำมาเปรียบ กับร่างกายมนุษย์ก็เปรียบเสมือนประสาทสัมผัสที่ทำหน้าที่รับความรู้สึก เช่น ตาเป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่รับภาพหูทำหน้าที่รับเสียง ผิวหนังทำหน้าที่รับความรู้สึกการสัมผัสและอุณหภูมิ ทำให้สมองรับรู้ได้ เช่นเดียวกับเซนเซอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยน แสง เสียง แรงสัมผัส อุณหภูมิ ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปควบคุม

ความเป็นจริง ระบบของการและการควบคุมมีความสำคัญต่องานอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างมากเช่นในระบบการวัดและควบคุมในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า กระบวนการด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ระบบการผลิตเครื่องจักรกลสมัยใหม่ การควบคุมหรือปรับความปลอดกภัยของอุปกรณ์ เป็นต้น ผลที่สืบเนื่องจากการใช้งานระบบการวัดและควบคุมที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้ประหยัดเวลา กำลังงานและกำลังคนลงเป็นจำนวนมาก เพราะเหตุนี้จึงเห็นได้ว่า วิทยาศาสตร์ทางด้านเครื่องมือวัดและควบคุมนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

ดังนั้นด้วยปัจจัยของความสำคัญของเซนเซอร์ที่มีต่อการวัดค่าและควบคุมกระบวนการนี้เองจึงเป็นที่เรื่องที่ควรศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงภาพรวมทั้งหมดและหลักการพื้นฐานที่สำคัญอย่างละเอียดของระบบงานของเซนเซอร์เพื่อที่จะได้มีการพัฒนางานทางด้านการวัดและควบคุม (Instrumentation) เพราะงานดังกล่าวได้เข้ามามีบทบาทแทบจะทุกพื้นที่เกี่ยวกับกระบวนการทางด้านเทคโนโลยี และอาจพบเห็นได้บ่อยในชีวิตประจำวันของเรา ตัวอย่างเช่น นาฬิกาบอกเวลา ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดเวลาที่มีใช้กันอยู่แทบทุกคน หรือในส่วนของรถยนต์ก็ต้องมีหน้าปัดบอกค่าต่างๆทางด้านหน้าของรถขับเพื่อแสดงค่าต่างๆจะเห็นได้ว่ามีบทบาทในการใช้ในชีวิตประจำวันของเราอย่างมาก

### 1.2 หน่วย (Unit)

โดยทั่วไปแล้วในระบบต่างๆจำเป็นต้องมีหน่วยเพื่อแสดงมาตรฐานและที่มาของระบบ จึงจำเป็นต้องรู้ถึงพื้นฐานของหน่วยเพื่อให้มีความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของระบบให้ดียิ่งขึ้น

## 1.2.1 หน่วยมูลฐานและหน่วยเสริม

ตารางที่ 1 ตารางแสดงหน่วยมูลฐาน,หน่วยเสริม และที่มาของจำนวนไฟฟ้าบางตัว

จำนวน	สัญลักษณ์	หน่วย	ตัวย่อ	มิติ
<b>หน่วยมูลฐาน</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	$l^2 m^{-3} i^{-1}$
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

พบว่าหน่วยของทุกจำนวนสามารถหาได้จากหน่วยมูลฐานนี้ ในบางกรณีอาจจะมีหน่วยอื่นๆ ที่พบบ่อยและมีความสำคัญในทางวิศวกรรม เช่น นิวตัน(N) ซึ่ง  $1 N = 1 kg \cdot m / s^2$  หรือพลังงานที่ถูกวัดในหน่วยจูล์(Joules) ซึ่งมีตัวย่อเป็น J ซึ่งก็คือ watt-second(W-s) นั่นเอง คำนี้กำหนดได้จาก  $1 J = 1 kg \cdot m^2 / s^2$  แต่บางครั้งก็อาจจะมีหน่วยอื่นที่แทรกเข้ามา จึงจำเป็นต้องแปลงหน่วยอื่นๆ เหล่านั้นให้เข้าระบบกัน

### 1.2.2 หน่วยทางไฟฟ้า

ซึ่งในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าและจำนวนทางค่านิเล็กทรอนิกส์นั้นประกอบไปด้วยหน่วยทางไฟฟ้าซึ่งที่มาจากหน่วยทางวิทยาศาสตร์ ในตาราง 1 มีจำนวนไฟฟ้าเบื้องต้นจำนวน 6 ตัวที่เกี่ยวข้องกับการวัดทางไฟฟ้า ได้แก่

1. ประจุไฟฟ้า
2. กระแสไฟฟ้า
3. แรงแม่เหล็กโทรมโม่ทึฟ
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

### 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 ลิคร/นาฬิกานิลลิตอนเป็นต้น

### 1.4.2 อุปกรณ์เสริม

อยู่ร่วมกับระบบการวัดที่สร้างขึ้น โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของงาน ธรรมชาติของเทคนิคในการวัด เป็นต้น โดยหลักๆ จะประกอบไปด้วย

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

### 1.5 เซนเซอร์

ปัจจุบันอุปกรณ์เซนเซอร์ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญในทุกๆด้านไม่ว่าจะเป็นทางด้านงานอุตสาหกรรม งานก่อสร้าง หรือแม้กระทั่งภายในบ้านพักอาศัยของพวกเราจึงเห็นได้ว่าเป็นเรื่องที่เกิดลี้ตัวของพวกเราโดยที่พวกเราไม่รู้ตัว ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์เซนเซอร์อาจเป็นโครงสร้างทางกล หรือ โครงสร้างทางไฟฟ้า หรือ โครงสร้างที่มีการผสมกันระหว่างโครงสร้างทางกลกับโครงสร้างทางไฟฟ้าก็ได้ ทำให้อุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ จึงมักมีการทำงานของอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นหลัก ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ แล้วทำหน้าที่เปลี่ยนปริมาณที่ได้จากการตรวจวัดให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งขึ้นมา ซึ่งเป็นสัญญาณที่เซนเซอร์จ่ายออกมาเพื่อที่จะนำไปใช้ประมวลผลต่อ

### 1.5.1 เซนเซอร์

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

ในส่วนของการตรวจวัดและตรวจจับปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆนั้น มักถูกกำหนดตามความต้องการของอุตสาหกรรมการผลิตในการที่จะตรวจสอบ ควบคุมค่ากระบวนการ ตลอดจนนำตัวแปรทางฟิสิกส์เหล่านั้น ไปใช้งานดังนั้นเงื่อนไขซึ่งเป็นปัจจัยในการเลือกเซนเซอร์ใช้งานจึงขึ้นอยู่กับธรรมชาติของปริมาณทางฟิสิกส์ที่จะทำการวัดและควบคุมค่าเป็นสำคัญ รวมไปถึง ราคา ความน่าเชื่อถือ ตลอดจนคุณภาพของข้อมูลที่ทำกรวัด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นที่ควรพิจารณาอีก อาทิเช่น ความเหมาะสมของเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ถูกออกแบบ ใช้งาน ในบ้านพักอาศัยทั่วไปจะมีความแตกต่างและไม่สามารถนำไปใช้แทนเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้งานในโรงงานผลิตสารเคมีได้ ทั้งนี้เนื่องจาก เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิซึ่งใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ นั้น จำเป็นต้องมี อัตราความสามารถในการทนต่อสภาพการใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ความดันสูง หรือสามารถทนต่อสภาพการกัดกร่อน ได้สูงกว่าเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป

### 1.5.2 ความจำเป็นที่ต้องใช้เซนเซอร์

เซนเซอร์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ หรือปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ และไม่ว่าจะเป็นระบบการวัด หรือระบบการวัดคุมค่าและควบคุมกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ตัวแปรของระบบที่จะทำการวัดค่าหรือสภาพของกระบวนการที่ต้องการควบคุม ส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรูปของปริมาณทางฟิสิกส์ ดังนั้นจากเหตุผลในความจำเป็นที่ต้องนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับปริมาณทางฟิสิกส์เหล่านั้นด้วยเซนเซอร์ไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อทำการตรวจสอบหรือเพื่อแสดงสถานะสภาพกระบวนการของระบบ จึงทำให้กล่าวได้ว่าเซนเซอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญส่วนหนึ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในระบบ ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าเทคโนโลยีของเซนเซอร์ได้ถูกนำไปใช้เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในลักษณะงาน 2 ประเภท คือ

1. ใช้ตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์เพื่อนำไปแสดงผลการตรวจวัดหรือจัดเก็บบันทึกเป็นข้อมูลในระบบการวัด (measurement system)

2. ใช้ตรวจสอบสภาพกระบวนการ (process variable) ในระบบควบคุม (control system) เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดข้อมูลที่เป็นตัวแปรทางฟิสิกส์ โดยมากจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงสถานะสภาพของระบบในขณะนั้น เช่น เซนเซอร์วัดความเร็วในรถยนต์ และมีเตอร์วัดความเร็ว (speedometer) เป็นต้น แต่บางครั้งเซนเซอร์อาจจะใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลแสดงสมรรถนะของระบบได้เช่นกัน เช่นทาโคกราฟ (tachograph) ที่บันทึกข้อมูลแสดงเป็นกราฟของความเร็วเทียบกับเวลาในรถก หรือรถบรรทุก เป็นต้น

สำหรับกรณีของเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพกระบวนการในระบบควบคุมนั้น ส่วนใหญ่แล้วจะมีความหลากหลายและแตกต่างกันน้อยกว่าเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดและบันทึกข้อมูลข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดและบันทึกข้อมูลจำเป็นต้องมีความหลากหลายแตกต่างกันไปตามปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำการวัดและจัดเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้งานต่อไป ในส่วนของระบบควบคุมทั่วไปนั้นสัญญาณออกหรือข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกป้อนไปเป็นสัญญาณอินพุตให้กับอุปกรณ์ควบคุมกระบวนการ (controller) จากนั้นอุปกรณ์ควบคุมก็จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมไปปรับสภาพกระบวนการของระบบ เพื่อให้การทำงานของระบบมีความสอดคล้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการยกตัวอย่างเช่น สัญญาณออกหรือข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ตรวจสอบความเร็วล้อรถ (wheel speed sensor) ในระบบเบรกแบบป้องกันล้อล็อก (anti-lock braking) จะถูกส่งไปควบคุมแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกของเบรกทำการบังคับและห้ามล้อรถไม่ให้เกิดการลื่นไถลในขณะที่ผู้ขับขี่รถยนต์ทำการเบรก เป็นต้น

### 1.5.3 ทำความรู้จักและเรียนรู้เกี่ยวกับเซนเซอร์

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์และไมโคร โพรเซสเซอร์ได้มีการพัฒนาเจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็วทำให้เทคโนโลยีดังกล่าวได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของคนเราเป็นอย่างมาก การใช้คอมพิวเตอร์และไมโคร โพรเซสเซอร์เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานของอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ จึงสามารถพบเห็นได้ทั่วไปไม่ว่าจะเป็นภายในบ้านพักอาศัย ที่ทำงาน หรือแม้กระทั่งสิ่งแวดล้อมรอบตัวเราเองก็ตาม ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้การนำเอาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย ก็คือ ความสะดวก รวดเร็ว และยังมี ความคล่องตัวในการใช้งานค่อนข้างสูงอีกด้วย

แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักจะสามารถทำงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้มากน้อยเพียงใดก็ตาม ย่อมขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลจากภายนอกที่ป้อนให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลด้วยเช่นกัน ซึ่งส่วนหนึ่งของข้อมูลต่างๆ เหล่านี้ก็เป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์นั่นเอง โดยข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกปรับปรับให้เหมาะสมเสียก่อน ก่อนที่จะป้อนให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลและตอบสนอง โดยการสร้างสัญญาณควบคุมระบบหรือกระบวนการให้มีสภาพการทำงานเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ ดังนั้นหากมีการเลือกใช้เซนเซอร์ที่มีสมรรถนะและมีความไม่เหมาะสมกับลักษณะของงานที่ใช้แล้ว ย่อมส่งผลให้การทำงานของระบบหรือกระบวนการนั้นๆ ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

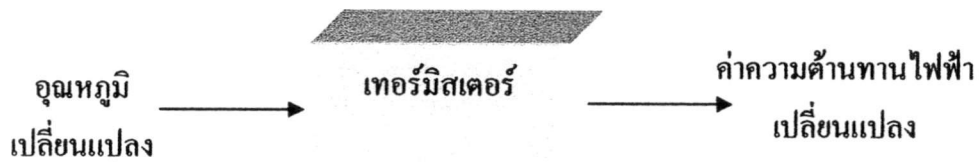
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในการทำงานขึ้นอีกด้วย ตัวอย่างง่ายๆที่แสดงให้เห็นถึงการนำเอา เซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆเช่น อุณหภูมิระดับน้ำ ความเร็ว เชิงมุม และความดัน

#### 1.5.4 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์

จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างหลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์แบบต่างๆ โดยเทอร์มิสเตอร์ (thermistor) และสเตรนเกจ (strain-gauge) จะเป็นเซนเซอร์ที่ให้สัญญาณออกเป็นรูปแบบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าเซนเซอร์หลายชนิดจะให้สัญญาณออกมาในลักษณะของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (voltage) กระแสไฟฟ้า (current) หรือความถี่ (frequency) ด้วย สปริงสมดุล (spring balance) เป็นเซนเซอร์อีกชนิดหนึ่งที่ทำให้ปริมาณเอาต์พุตในลักษณะของระยะขจัดที่แปรเปลี่ยนเป็นสัดส่วนไปตามภาระหรือ โหลด (load) ที่กระทำกับสปริง โดยมีเข็มชี้เป็นอุปกรณ์บอกระยะขจัดที่เกิดขึ้น หลอดเวเนทิวรี (venturi tube) เป็นเซนเซอร์ใช้ทำหน้าที่วัดผลต่างความดัน (pressure) เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการไหล (flow rate) ของของเหลวในท่อที่กำลังตรวจสอบอยู่

จากตัวอย่างแสดงการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์แบบต่างๆ ดังในรูปด้านล่าง จะเห็นว่าสัญญาณออกที่ได้จากเซนเซอร์มีมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งการนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้งานจึงต้องพิจารณาลักษณะของงานที่จะใช้ รวมไปถึงต้องอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับความต้องการในการแสดงผลของระบบที่ใช้งานอีกด้วย ในระบบการวัดและควบคุมกระบวนการมีคำศัพท์อยู่ 2 คำที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมักก่อให้เกิดความสับสนขึ้นได้บ่อยครั้ง นั่นคือ คำว่า “เซนเซอร์” (sensor) กับคำว่า “ทรานสดิวเซอร์” (transducer) ซึ่งทั้งสองคำนี้มีความหมายคล้ายคลึงกันมาก บางครั้งถูกนำมาใช้แทนกันได้ แต่โดยความเป็นจริงแล้ว เซนเซอร์กับทรานสดิวเซอร์นั้นมีความหมายและจุดประสงค์ในการใช้งานต่างกัน กล่าวคือ ทรานสดิวเซอร์นั้นหมายถึง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เซนเซอร์โดยทั่วไปก็คือ ทรานสดิวเซอร์ แต่ในทางกลับกันทรานสดิวเซอร์บางชนิดเท่านั้นที่ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ และเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น จะเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเซนเซอร์กับทรานสดิวเซอร์ ตัวอย่างเช่น หลอดไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านเรือนทั่วไปก็จะเป็นลักษณะของทรานสดิวเซอร์อย่างหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงสว่าง (และพลังงานความร้อน) ในที่นี้จุดประสงค์ในการใช้งานของหลอดไฟก็คือ ทำหน้าที่ให้แสงสว่างภายในห้องเท่านั้น ไม่ใช่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดหรือบ่งชี้หรือแสดงผล (หลอดไฟสว่างขึ้น) ให้รู้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้หลอดไฟที่ใช้ในวงจรจึงจะทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์



รูปที่ 1.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซนเซอร์แบบต่างๆ

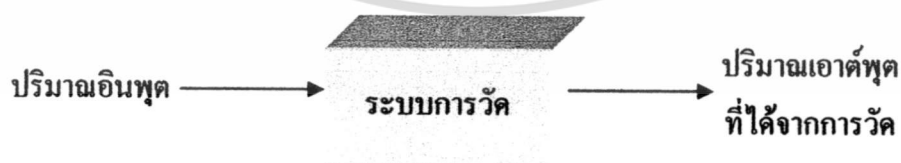
## 1.6 เซนเซอร์ในระบบต่างๆ

โดยทั่วไปสามารถจะจำแนกชนิดและคุณลักษณะของระบบ ได้มากมายหลายแบบ แต่ในที่นี้จะพิจารณาตามลักษณะของระบบเซนเซอร์ที่ให้ปริมาณทางเอาต์พุตของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนไปตามปริมาตรต่างๆ ที่ตรวจวัดทางอินพุต ซึ่งการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในกระบวนการสามารถจำแนกการใช้งานในระบบต่างๆ ได้เป็น 3 ระบบ ดังนี้คือ

1. ระบบการวัด
2. ระบบควบคุมวงเปิด
3. ระบบควบคุมวงปิด

### 1.6.1 ระบบการวัด

ทำหน้าที่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลของปริมาณทางเอาต์พุตซึ่งได้จากปริมาณทางอินพุตที่ได้จากการวัดสามารถแสดงดังรูป หลักการทำงานสำคัญของระบบการวัด คือ ระบบการวัดจะทำหน้าที่เพียงแค่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลค่าที่ได้จากการวัดปริมาณจากอินพุตเท่านั้น ไม่สามารถปรับหรือควบคุมสภาพการทำงานจากระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการได้เพียงอย่างเดียว



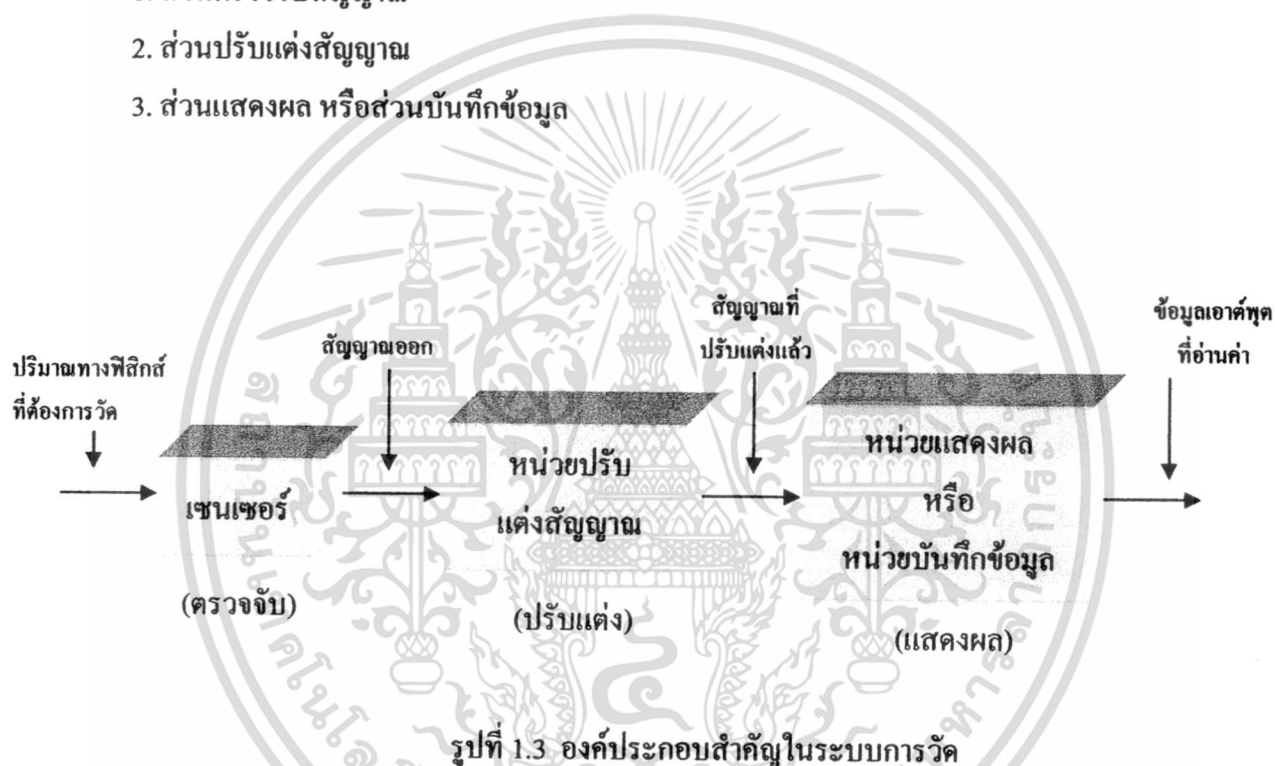
รูปที่ 1.2 ระบบการวัด

ตัวอย่างพื้นฐานที่ง่ายที่สุดของระบบการวัด ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะแก้ว ซึ่งใช้สำหรับวัดอุณหภูมิกรณีนี้ปริมาณอินพุตระบบการวัดอุณหภูมิจะเป็นความร้อนจากอากาศที่ส่งผ่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กับเทอร์โมมิเตอร์ โดยมีปริมาณเอาต์พุตของระบบเป็นค่าอุณหภูมิของอากาศที่อ่านได้จากสเกลแสดงผลอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์เอง ดังนั้นกระบวนการของการวัดอุณหภูมิในกรณีนี้ คือ การเปลี่ยนความร้อนจากอากาศให้เป็นค่าอุณหภูมิที่สามารถอ่านได้บนสเกลแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ และกล่าวได้ว่านี่คือ หลักการทำงานพื้นฐานของระบบการวัด เนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์นั้นไม่สามารถไปควบคุมอุณหภูมิของอากาศได้เลย

องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ส่วนตรวจจับสัญญาณ
2. ส่วนปรับแต่งสัญญาณ
3. ส่วนแสดงผล หรือส่วนบันทึกข้อมูล



ดังแสดงในผังสัญญาณของระบบในรูปที่ 1.3 ซึ่งปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำการวัดจะถูกเซนเซอร์เปลี่ยนให้สัญญาณออกที่สามารถนำไปปรับแต่งหรือแสดงผลต่อได้ จากนั้นหน่วยของการปรับแต่งสัญญาณจะทำหน้าที่ปรับแต่งสภาพของสัญญาณออกที่ได้จากสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อที่นำไปใช้งานได้กับหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล เช่น ถ้าสัญญาณที่ออกจากเซนเซอร์เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดของสัญญาณที่ต่ำมากก็ต้องมีหน่วยที่ปรับแต่งขนาดของสัญญาณให้มีความเหมาะสมในที่นี้อาจเป็นการขยายขนาดของสัญญาณให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นก่อนที่จะถูกนำไปแสดงผลให้กับผู้ใช้อ่านค่า หรืออาจมีการเก็บค่าที่วัดได้ลงในเครื่องบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.6.2 ระบบควบคุมวงเปิด

ระบบควบคุม มีหลักการทำงานพื้นฐานต่างจากระบบการวัด กล่าวคือ ระบบควบคุมพยายามปรับสภาพกระบวนการหรือรักษาสภาพการทำงานของกระบวนการให้มีค่าเป็นไปตามค่าที่ตั้งไว้ทางอินพุต หรือเป็นไปตามที่ผู้ควบคุมกำหนดไว้ ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงจรเปิดแสดงได้ดังรูปที่ 1.4 สัญญาณอินพุตที่ตั้งไว้หรือมีการกำหนดจะถูกส่งให้กับอุปกรณ์ควบคุม เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปปรับสภาพการทำงานของระบบภายใต้การควบคุม เพื่อเป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการ แต่จะเห็นว่าในส่วนของสัญญาณทางเอาต์พุตไม่ได้มีการตรวจวัดเลยมีแต่การส่งสัญญาณอินพุตเป็นลำดับไปยังเอาต์พุต โดยไม่มีส่วนของระบบป้อนกลับของสัญญาณมายังอินพุตอีกเลย

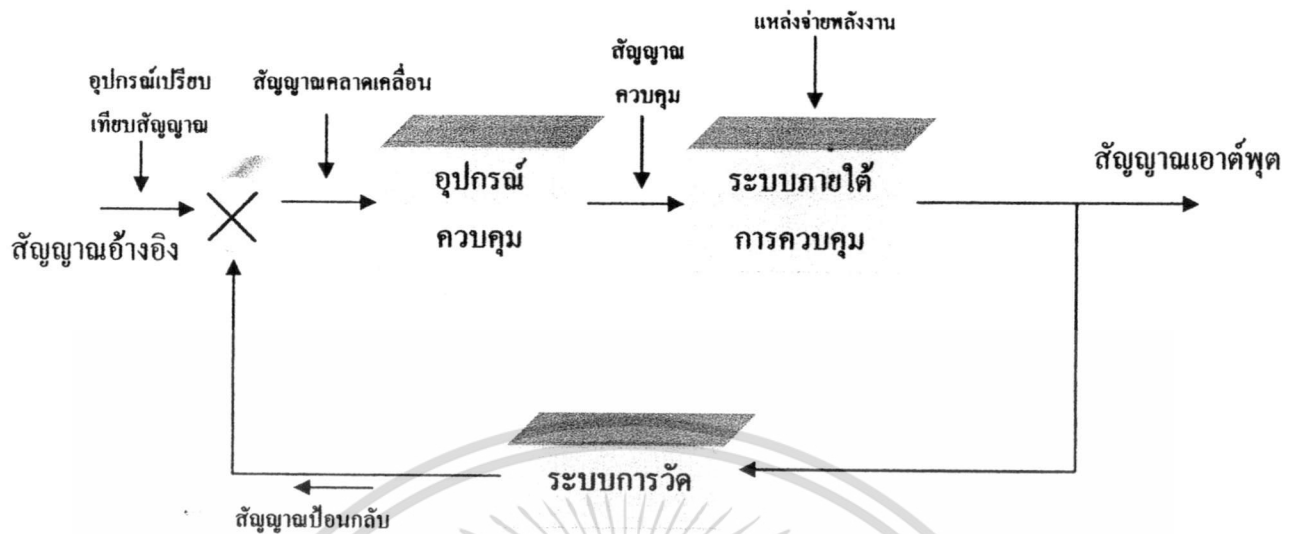


รูปที่ 1.4 ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงเปิด

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าระบบควบคุมวงจรเปิดเป็นระบบควบคุมพื้นฐานที่มีรูปแบบง่าย การออกแบบระบบไม่ซับซ้อนมีราคาไม่แพงมากนัก แต่ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ทั้งยังต้องมีผู้ควบคุมเข้ามาตรวจสอบหรือปรับแต่งระบบอยู่บ่อยครั้ง จึงไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ควบคุม

### 1.6.3 ระบบควบคุมวงปิด

สำหรับระบบควบคุมวงปิด ซึ่งมีแผนผังของระบบดังรูป จะมีส่วนประกอบที่แตกต่างจากระบบควบคุมวงเปิด โดยมีส่วนของระบบควบคุมการวัดเพื่อทำหน้าที่วัดและตรวจสอบการทำงานของกระบวนการทางเอาต์พุตของระบบและนำสัญญาณกลับมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้เป็นสัญญาณอ้างอิงทางอินพุตอีก จึงทำให้สภาพกระบวนการของระบบทางเอาต์พุตมีผล โดยตรงกับเงื่อนไขทางค่านอินพุต



รูปที่ 1.5 ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงปิด

จากรูปที่ 1.5 สัญญาณอ้างอิง หรือค่าที่ตั้งไว้เป็นเป้าหมายที่ใช้ในการควบคุมระบบให้เป็นไปตามกระบวนการที่ต้องการ ซึ่งสัญญาณส่วนนี้จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับที่ได้จากเอาต์พุต โดยผลต่างของสัญญาณทั้งสองที่ได้เรียกว่า สัญญาณคลาดเคลื่อน จากนั้นอุปกรณ์ควบคุมจะนำสัญญาณคลาดเคลื่อนที่ได้ไปปรับแต่งให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม แล้วสร้างเป็นสัญญาณควบคุมเพื่อทำการปรับการทำงานของระบบให้สภาพการทางค่านเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งมีสัญญาณป้อนกลับใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิง ทำให้สัญญาณคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ หรือนั่นคือ สภาพกระบวนการของระบบเข้าสู่เป้าหมายในการควบคุมนั่นเอง

### 1.7 คุณสมบัติของเซนเซอร์

ในการนำเอาเซนเซอร์มาใช้งานในระบบการวัดหรือระบบควบคุมกระบวนการต่างๆ นั้นเราต้องคำนึงหลายด้าน เช่น ราคา ความเหมาะสม ประสิทธิภาพ รวมถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกต่างๆ เป็นต้น แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการเลือกพิจารณา คือ คุณสมบัติของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ควรมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสัญญาณหรือรูปแบบที่ต้องการนำไปใช้งานคือ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดรูปแบบและคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ที่เลือกใช้นับเป็นปัจจัยประการแรกที่ต้องทราบ และในหัวข้อนี้จึงได้อธิบายถึงข้อกำหนดตลอดจนคุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1.7.1 ความแม่นยำ (accuracy)

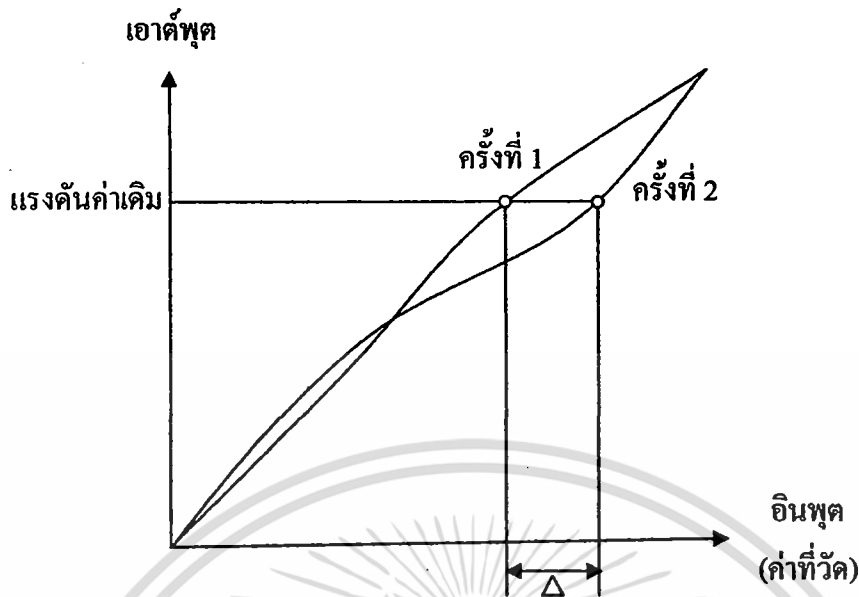
เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าทางเอาต์พุตว่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากน้อยเพียงใด ในทางปฏิบัติในการวัดย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนในตัวอุปกรณ์ แต่จะมีค่ามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำของอุปกรณ์นั้น ซึ่งทั่วไปค่าความแม่นยำนี้อาจแสดงในเทอมของหน่วยในการวัด เช่น เทอร์โมมิเตอร์ตัวหนึ่งถูกกำหนดไว้ว่ามีค่าความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  นั้นหมายถึงว่าหากนำเทอร์โมมิเตอร์ตัวนี้ไปทำการวัดอุณหภูมิแล้วแสดงค่าเท่ากับ  $20.1^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าขณะนี้อุณหภูมิจริงที่ทำการวัดมีค่าอยู่ระหว่าง  $19.9^{\circ}\text{C}$  กับ  $20.3^{\circ}\text{C}$  ในบางครั้งค่าความแม่นยำนี้อาจใช้บ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของย่านการวัดของอุปกรณ์วัดตัวนั้นๆ อีกด้วย

### 1.7.2 ความแน่นอน (precision)

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

### 1.7.3 ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (repeatability หรือ reproducibility)

เป็นข้อกำหนดของความแน่นอนซึ่งถูกระบุมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ โคนหมายถึงค่าความแน่นอนของเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของการวัดแบบเดิม ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการแสดงค่าเอาต์พุตให้มีค่าเหมือนเดิม



รูปที่ 1.6 การแสดงค่าเอาต์พุต

#### 1.7.4 ความคลาดเคลื่อน (error)

ความคลาดเคลื่อน คือ ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง โดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และยังเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแม่นยำของระบบการวัดนั้นอีกด้วย

#### 1.7.5 ความคลาดเคลื่อนสถิต (static error)

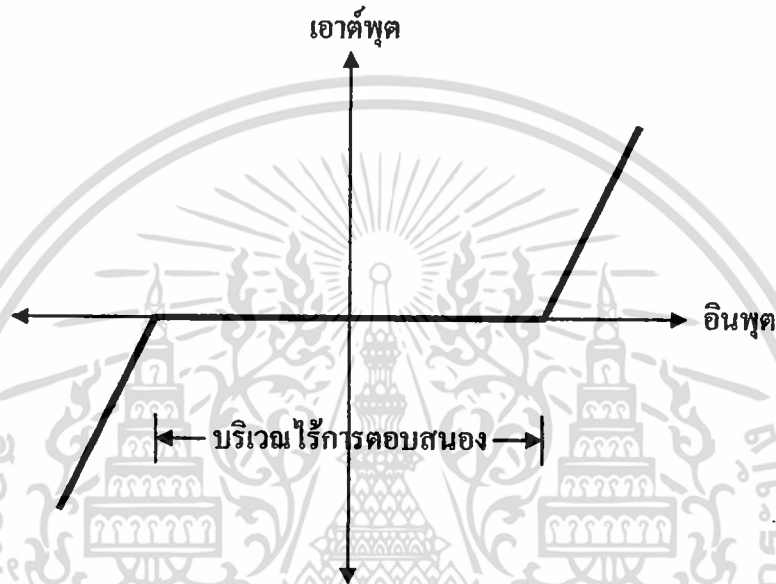
ความคลาดเคลื่อนสถิต คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าคงที่ตลอดช่วงการวัดของอุปกรณ์ ดังนั้น หากทราบค่าความคลาดเคลื่อนสถิตของอุปกรณ์นั้นแล้ว สามารถชดเชยให้มีค่าน้อยลงได้ เพื่อลดผลกระทบต่อค่าความแม่นยำของอุปกรณ์

#### 1.7.6 การปรับเทียบ (calibration)

การปรับเทียบ หมายถึง การเปรียบเทียบหน่วยของสกลในการแสดงผลของเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์ตรวจสอบความเร็วรถยนต์บางชนิดที่ให้เอาต์พุตออกมาอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าแปรผันตรงกับความเร็วรถยนต์ จากนั้นเข็มชี้ของมิเตอร์วัดความเร็วก็จะแสดงผลโดยการเบี่ยงเบนเป็นสัดส่วนไปตามแรงดันไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการอ่านค่าที่ได้จากหน่วยของปริมาณหนึ่งมาเป็นอีกหน่วยของปริมาณหนึ่งโดยการเปรียบเทียบแบบนี้ จึงเรียกว่า การปรับเทียบ

### 1.7.7 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone หรือ dead band)

บริเวณไร้การตอบสนอง เป็นข้อกำหนดที่แสดงถึงขนาดสูงสุดของปริมาณที่ทำการวัดทางอินพุต โดยไม่ทำให้สัญญาณทางเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง หรือขนาดอินพุตสูงสุดที่ยังคงทำให้เอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงได้ดังกราฟความสัมพันธ์ในรูป สาเหตุที่ทำให้เกิดบริเวณไร้การตอบสนองนี้มาจากผลของแรงเสียดทานสถิตหรือเนื่องจากคุณสมบัติฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 1.7 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone)

### 1.7.8 ขนาด (dimension)

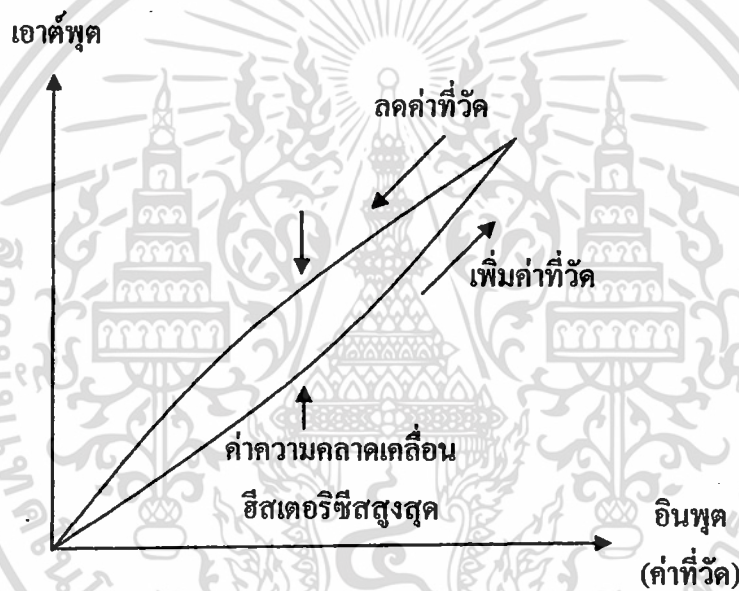
ขนาดของเซนเซอร์ เป็นขนาดของกายภาพของเซนเซอร์ หรือ(กว้าง×ยาว×สูง) ที่ระบบมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ

### 1.7.9 คริปต์ (drift)

แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซนเซอร์ วงจร หรือระบบ เมื่อเวลาในการใช้งานหรือสิ่งแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ คุณสมบัติคริปต์นี้ทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าอินพุตของระบบจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของอุปกรณ์นั้นด้วย อุณหภูมิรอบข้างในการใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดผลของคริปต์ขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซนเซอร์ ทำให้ระบบของการวัดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป

### 1.7.10 ฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

ฮิสเทอรีซิส เกิดขึ้นจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณ ฟิสิกส์ทางอินพุต โดยการปรับค่าจากน้อยไปมากและปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย คุณสมบัติ ฮิสเทอรีซิสนี้ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบ อุปกรณ์ด้วย กราฟคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิสดังกล่าวแสดงได้ดังรูป ปริมาณอินพุตของเซนเซอร์ ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดหรือต้องการตรวจสอบจะถูกปรับค่าให้มีมากขึ้นจนกระทั่งถึงย่านในการวัด สูงสุด ในทางกลับกันก็ทำการปรับค่าให้ลดลงจนกระทั่งถึงย่านในการวัดต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งพบว่า เกิดผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ โดยจะเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณ เอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้ว่าฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 1.8 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิส

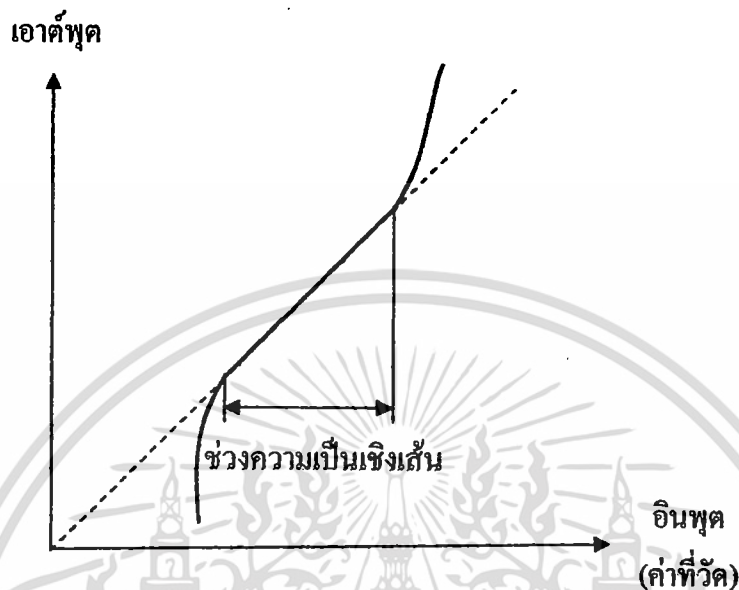
### 1.7.11 การหน่วงสัญญาณ (lag)

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

### 1.7.12 ความเป็นเชิงเส้น (linearity)

คุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้น คือ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น หรือมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงดังรูป คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นยังแสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงช่วงสูงสุดที่กราฟคุณสมบัติยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่ หรือเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า ช่วงปฏิบัติงาน (operating range) ของเซนเซอร์โดยทั่วไปนิยามบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 1.9 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

#### 1.7.13 อายุการใช้งาน (operating life หรือ reliability)

อายุการใช้งานของเซนเซอร์ เป็นค่าแสดงถึงอายุการใช้งานของเซนเซอร์ที่ยังคงให้คุณสมบัติในการทำงานเป็นไปตามข้อกำหนดประจำตัวต่างๆ ที่ระบุมาให้ โดยทั่วไปอาจจะกล่าวมาในเทอมของ ระยะเวลา หรือจำนวนครั้งในการใช้งาน เป็นต้น

#### 1.7.14 ย่านปฏิบัติงาน (range)

ย่านปฏิบัติงานของอุปกรณ์ คือ ขอบเขตในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์นั้นซึ่งสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับย่านปฏิบัติงานของเซนเซอร์ มักกำหนดมาในรูปของค่าอินพุตต่ำสุดและสูงสุดที่ใช้งาน

#### 1.7.15 อัตราการทำงาน (rating)

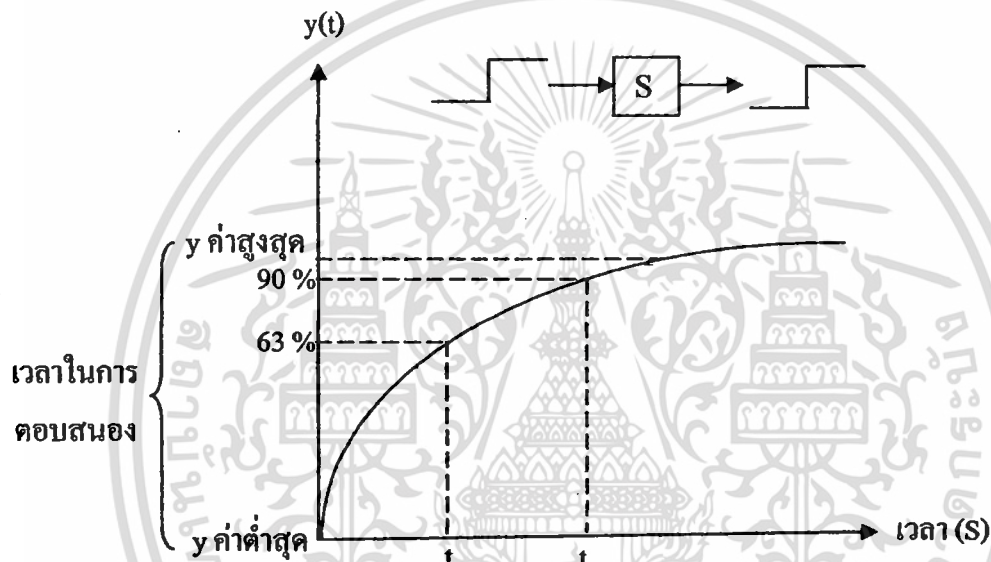
เป็นการแสดงถึงอัตราการทำงานต่อสัญญาณต่างๆ ในการทำงานของอุปกรณ์โดยสามารถที่จะทำงานได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดความเสียหาย ส่วนใหญ่จะระบุโดยละเอียดอัตราการทำงานสัญญาณแต่ละชนิดมาด้วย เช่น อัตราของอุณหภูมิในการทำงานสูงสุด เป็นต้น

**1.7.16 ผลตอบสนอง (response)**

ผลตอบสนองของอุปกรณ์ คือ ช่วงเวลาที่อุปกรณ์ใช้ในการตอบสนองสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าเท่ากับค่าเอาต์พุตสุดท้าย มีหน่วยเป็นวินาที หรือเศษส่วนของวินาที หรือบางครั้งอาจบอกมาในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ของค่าเอาต์พุตสุดท้ายก็ได้

**1.7.17 ความเร็วในการตอบสนอง (speed of Response)**

เวลาที่ค่าเอาต์พุตมีค่า 63% ของค่าสุดท้าย เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแบบ step



รูปที่ 1.10 ความเร็วในการตอบสนอง

**1.7.18 ความละเอียด (resolution)**

ความละเอียดของเซนเซอร์หรืออุปกรณ์การวัด คือ ขนาดปริมาณอินพุตต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถวัดหรือตรวจสอบได้

**1.7.19 ความไว (sensitivity)**

ความไว คือ ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตของอุปกรณ์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอินพุต สำหรับค่าความไวของเซนเซอร์ จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตในย่านวัดที่กำหนดมาให้หารด้วยผลต่างของสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นปริมาณที่ทำการวัด หรือเขียนสมการได้เป็น “ความไว = (ค่าเอาต์พุตสูงสุด-ค่าเอาต์พุตต่ำสุด)/(ค่าอินพุตสูงสุด-ค่าอินพุตต่ำสุด)”

### 1.7.20 เสถียรภาพ (stability)

เสถียรภาพบ่งชี้ให้เห็นสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์หรือระบบว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยแค่ไหน เมื่อป้อนอินพุตที่มีค่าคงที่เป็นเวลานานๆภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลง หากอุปกรณ์หรือระบบมีความเป็นเสถียรภาพแล้วสัญญาณเอาต์พุตควรมีคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

### 1.7.21 ค่าเบี่ยงเบน (tolerance)

ค่าเบี่ยงเบน บอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด ในบางครั้งค่าความเบี่ยงเบนอาจใช้ในแสดงถึงความแม่นยำของอุปกรณ์ได้อีกด้วยรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-Semiconductor Contact)



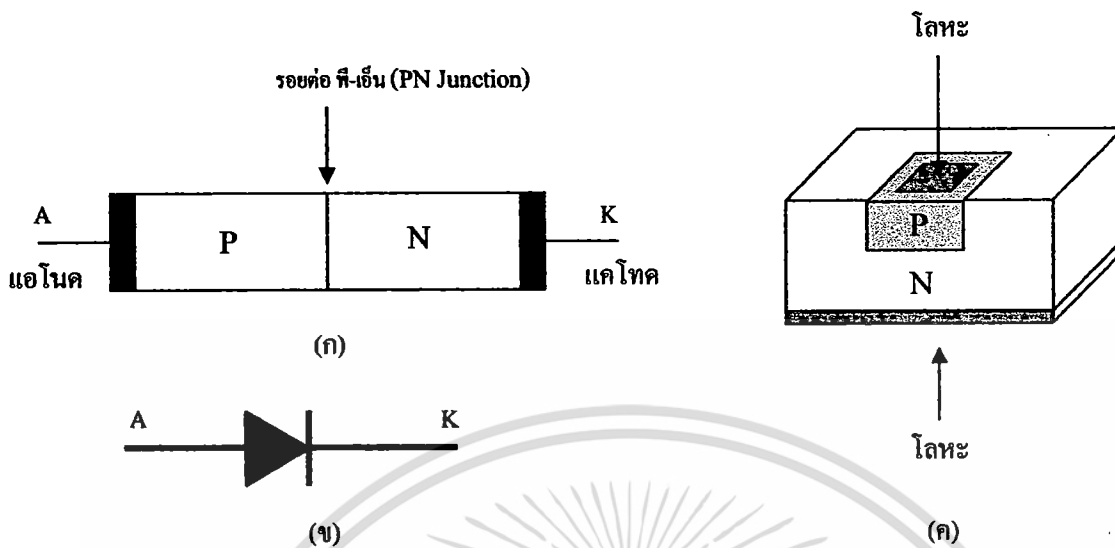
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและทฤษฎีเซนเซอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์

### 2.1 บทนำ

ผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) ที่สมบูรณ์ของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) สามารถที่จะถูกนำไปใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้เพียงไม่กี่ชนิดและใช้งานได้ อย่างจำกัด เช่น เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor), โฟโตคอนดักทีฟเซลล์ (Photoconductive cells) เป็นต้น วิธีการที่จะนำสารกึ่งตัวนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมี ประโยชน์อย่างยิ่งก็คือ การเติมสารอะตอมสารเจือ (impurity atoms) ลงไปในสารกึ่งตัวนำ เพื่อทำ ให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จากนั้นจึงนำสารกึ่งตัวนำชนิด พีและชนิดเอ็น นี้ไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และนิยมเรียกว่า “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ” (semiconductor device) ซึ่งได้แก่ ไอคอนชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยประกอบด้วยสารกึ่ง ตัวนำสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิด พีเรียกว่า “แอโนด” (Anode) หรือขั้วบวก และขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เรียกว่า “แคโทด” (Cathode) หรือขั้วลบ ที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ถูกเรียกว่า “รอยต่อพี-เอ็น” หรือ “p-n junction” ที่รอยต่อพี-เอ็นจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่น่าสนใจและเป็น ประโยชน์อย่างยิ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี ยิ่งไปกว่านั้น รอยต่อพี-เอ็น ยังเป็น โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ คุณสมบัติและทฤษฎีของรอยต่อพี-เอ็น จึงมี ความสำคัญมาก เพราะความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้ง่ายต่อการศึกษาและ เข้าใจการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆแม้ว่าสิ่งประดิษฐ์นั้นๆจะมีโครงสร้าง ซับซ้อนและยุ่งยากเพียงใดก็ตาม



รูปที่ 2.1 (ก) โครงสร้างง่าย ๆ ของรอยต่อ พี-เอ็น (ข) สัญลักษณ์ของรอยต่อพีเอ็น และ (ค) โครงสร้างที่ใช้งานจริงของไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น

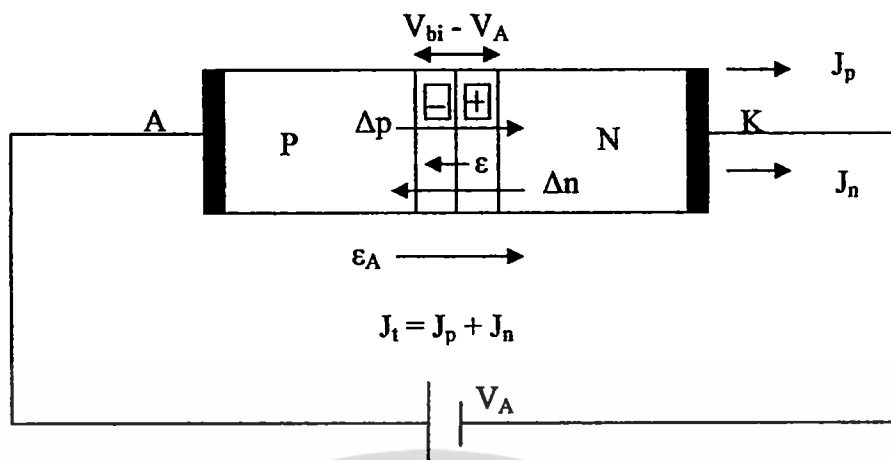
### 2.1.1 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัส (p-n junction at for biasing)

คุณสมบัติที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งของรอยต่อพี-เอ็น หรือไดโอด ก็คือการทำไดโอดยอมให้กระแสไหลได้เป็นอย่างดี เมื่อมีการให้ไบอัสแก่รอยต่อ โดยศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพี มีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ด้านเอ็น หรือศักย์ด้านที่มีค่าสูงกว่าด้านเอ็น ซึ่งเราเรียกการให้ไบอัสแบบนี้ว่า “ไบอัสตรง” (Forward bias) และกระแสที่ไหลในภาวะนี้ถูกเรียกว่า “กระแสตรง” (Forward current) และในทางตรงกันข้ามถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าด้านพีมีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับด้านเอ็น หรือศักย์ด้านเอ็นสูงกว่าด้านพี ซึ่งการไบอัสแบบนี้ ถูกเรียกว่า “ไบอัสย้อนกลับ” (Reverse bias) ไดโอดจะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่าน หรือไหลได้น้อยมาก ซึ่งกระแสค่าน้อยนี้ถูกเรียกว่า “กระแสย้อนกลับ” (Reverse current) ในตอนนี้เราจะพิจารณารายละเอียดเกี่ยวกับ คุณสมบัติหรือคุณลักษณะของรอยต่อพี-เอ็น ทั้งในกรณีที่ได้รับแรงดัน ไบอัสตรงและ ไบอัสย้อนกลับและอยู่ในภาวะ Steady State

### 2.1.2 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อขณะได้รับไบอัสตรง

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็น อยู่ในภาวะสมดุล โดยไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ ให้แก่รอยต่อพี-เอ็น จะพบว่าไม่มีกระแสใดๆ ไหลผ่านรอยต่อ ทั้งนี้ เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าภายใน หรือ ศักย์ภายในปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งศักย์สัมผัสภายในรอยต่อนี้ จะทำหน้าที่ขัดขวางหรือต่อต้านการเคลื่อนที่แพร่ข้ามรอยต่อของพาหะ เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกให้ไบอัสตรง (forward bias) โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพี เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็น ซึ่งทำได้โดยต่อขั้วโลหะด้านพี หรือขั้วแอโนด เข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ และขั้วโลหะด้านเอ็น หรือขั้วแคโทด ต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ดังแสดง ในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



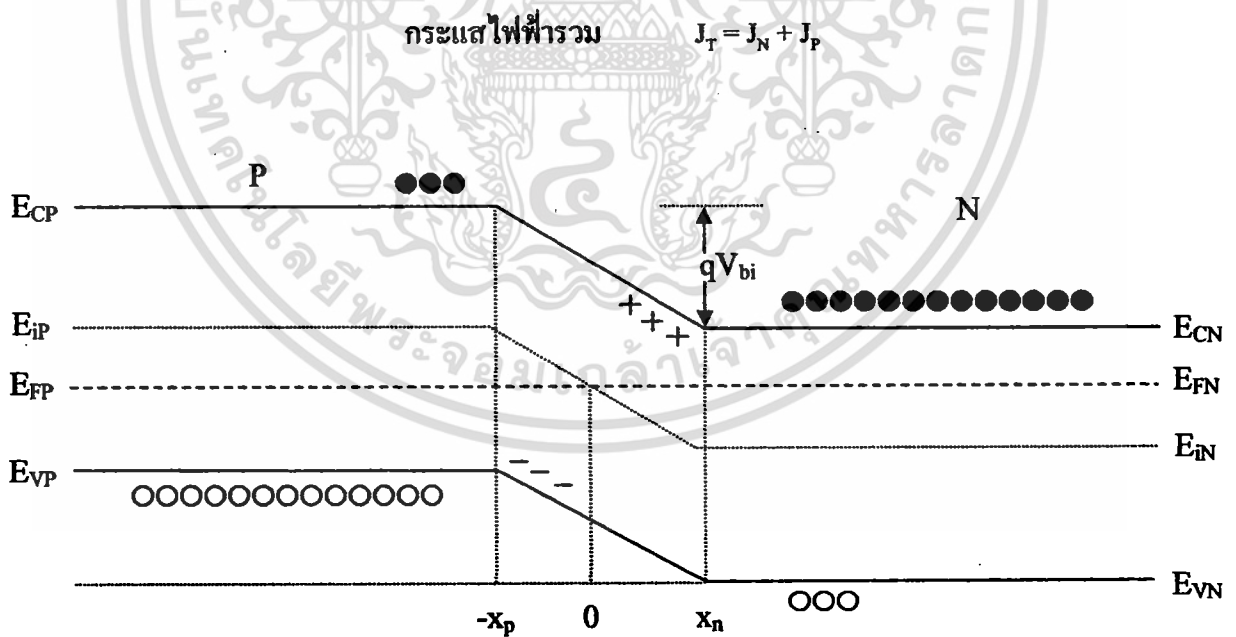
รูปที่ 2.2 การให้ไบอัสตรง  $V_A$  แก่รอยต่อพี-เอ็น

โดยการตั้งสมมติฐานและกำหนดให้ค่าความต้านทานในส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ทั้งชนิดพี และชนิดเอ็น มีค่าน้อยมาก และเป็นกรณีของการฉีดระดับต่ำ (low level injection) ซึ่งหมายถึงกรณีที่กระแสมีค่าไม่สูงมาก ดังนั้น จึงพิจารณาได้ว่าไม่มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของสารกึ่งตัวนำ ทั้งในด้านพี และด้านเอ็น รวมทั้งในเส้นลวดตัวนำ ดังนั้น ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่า  $V_A$  โวลต์ แรงดัน  $V_A$  ทั้งหมดนี้จะไปปรากฏที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น และมีทิศทางตรงกันข้ามกับศักย์ภายในที่รอยต่อ จึงทำให้เกิดการหักล้างของแรงดัน โดยศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหรือกำแพงศักย์ ในขณะนี้มีค่าเป็น  $V_{bi} - V_A$  นั่นคือ กำแพงศักย์จะมีขนาดลดลงจากเดิม หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ สนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดัน ไบอัสภายนอก มีทิศตรงกันข้ามกับสนามภายใน ทำให้สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อมีขนาดลดลง ดังนั้น โฮลส่วนหนึ่ง  $\Delta p$  จากด้านพี จึงสามารถฉีด (injection) ข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนส่วนหนึ่ง  $\Delta n$  จากด้านเอ็นก็สามารถฉีดข้ามรอยต่อ เข้าไปยังด้านพีได้โดยสะดวก ผลจากการที่มีพาหะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ จึงทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ซึ่งเราเรียกว่า “กระแสไบอัสตรง” (Forward current) ปริมาณของกระแสหาได้จากผลรวมของกระแสโฮลและอิเล็กตรอน และการที่สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อลดลง จะทำให้ขนาดของความกว้างบริเวณปลอดพาหะลดลง หรือ ก็คือ การลดลงของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนั่นเอง การเปลี่ยนแปลงความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าและศักย์ภายในบริเวณรอยต่อเนื่องจากแรงดันไบอัสตรง

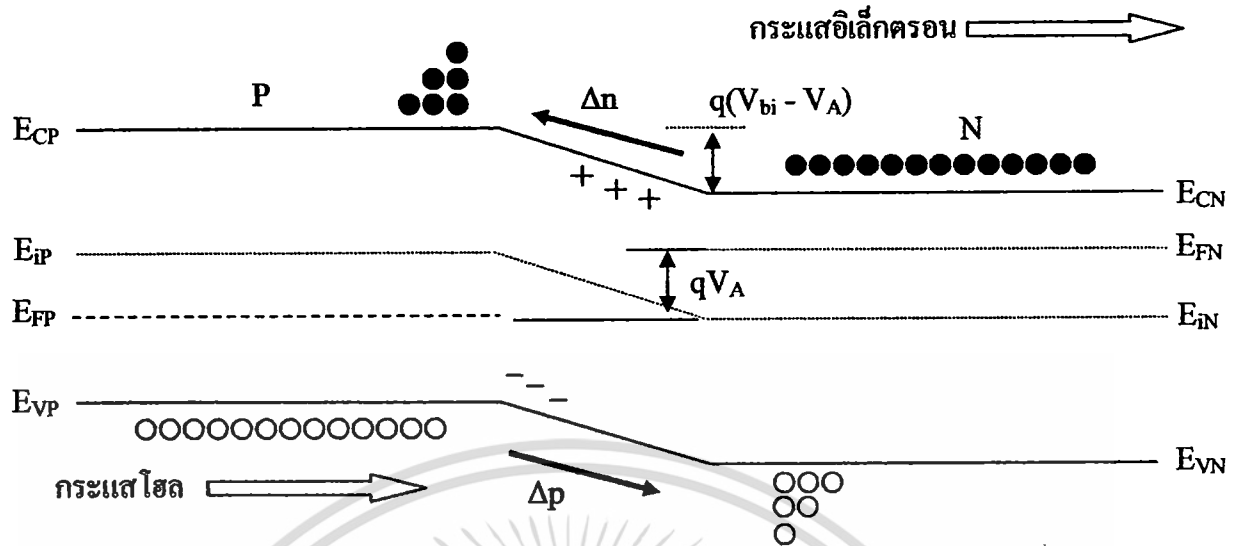
ปริมาณโฮล  $\Delta p$  และอิเล็กตรอน  $\Delta n$  ที่ฉีดข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านตรงข้าม จะแปรตามค่าเอ็กโปเนนเชียล (exponential) ของแรงดันไบอัส  $V_A$  หรือก็คือ กระแสที่ไหลจะแปรตามค่าเอ็กโปเนนเชียลของแรงดันไบอัสนั่นเอง ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

2.1.3 แลพบพลังงานของรอยต่อพี – เอ็น ในขณะที่ได้รับไบอัสตรง

เนื่องจากรอยต่อพี – เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสตรง  $V_A$  จึงทำให้กัมพวงศักย์  $V_{bi}$  มีขนาดลดลงเป็น  $(V_{bi} - V_A)$  ทำให้มีโฮลจากด้านพีและอิเล็กตรอนจากด้านเอ็น สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ และเกิดเป็นกระแสไหลในวงจร ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านทั้งสอง ของรอยต่อพี – เอ็น ในขณะนี้จะแตกต่างกันเท่ากับ  $q \cdot V_A$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งขนาดของความชัน หรือสโลป (slop) ของกราฟแลพบพลังงานที่บริเวณปลอดพาหะในรูปที่ 2.3 (ก) มีค่ามากกว่าในรูปที่ 2.3 (ข) การลดลงของความชันของกราฟนี้ มีความหมายแสดงให้เห็นถึงการลดลงของสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงนั่นเอง ความแตกต่างของระดับพลังงานต่างๆของด้านทั้งสองจะมีค่าเท่ากับ  $q(V_{bi} - V_A)$  และเนื่องจากระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อมีระดับต่างกัน พาหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากด้านเอ็น ข้ามกัมพวงศักย์ (potential barrier) ที่รอยต่อ แล้วแพร่เข้าไปยังด้านพี ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอน ไหลจากด้านพีไปด้านเอ็น ส่วนพาหะโฮลจะเคลื่อนที่จากด้านพีข้ามกัมพวงศักย์ที่รอยต่อ แล้วแพร่เข้าไปยังด้านเอ็น ทำให้มีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากโฮลไหลจากด้านพีไปยังด้านเอ็น ดังนั้นจะเห็นว่า มีกระแสไหลในวงจร โดยออกจากขั้วบวกของแบตเตอรี่เข้าด้านพี ผ่านรอยต่อออกมาทางด้านเอ็น ไปยังขั้วลบ และกระแสไฟฟ้านี้เป็นผลรวมของกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอน  $J_n$  และโฮล  $J_p$  ดังนั้น



(ก) รอยต่อขณะไม่ได้รับไบอัส



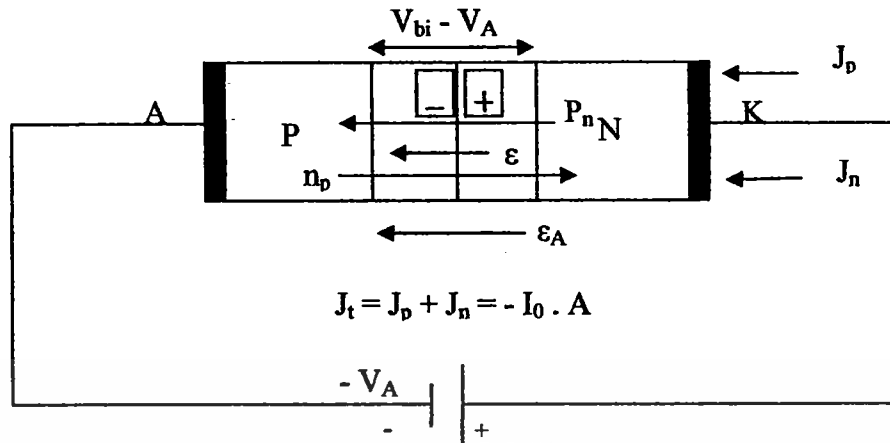
(จ) รอยต่อขณะได้รับไบอัสตรง  $V_A$

รูปที่ 2.3 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะที

(ก) รอยต่อขณะไม่ได้รับไบอัส และ (ข) รอยต่อขณะได้รับไบอัสตรง  $V_A$

**2.1.4 ปฏิกิริยาการณที่รอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ**

ในกรณีทีให้แรงดันไบอัสแก่รอยต่อพี-เอ็น โดยทีขั้วแอโนดหรือด้านทีมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับด้านแคโทดหรือด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที 2.12 การให้ไบอัสลักษณะนีถูกรู้จักว่า “ไบอัสย้อนกลับ” (Reverse biased) ผลของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $-V_A$ ) จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นทีบริเวณรอยต่อ เช่นเดียวกับกรณีไบอัสตรง แต่กรณีนี้สนามไฟฟ้าจากแรงดันไบอัส ( $-V_A$ ) จะมิติศทางเดียวกัน กับสนามไฟฟ้าภายในของรอยต่อ ดังนั้น สนามไฟฟ้าทีบริเวณรอยต่อจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น โสและอิเล็กตรอนทีอยู่ใกล้ๆกับขอบของบริเวณปลอดพาหะ จะถูสนามไฟฟ้านี้พัดพาให้เคลื่อนห่างออกไป จารรอยต่อมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายกว้างมากขึ้น และกำแพงศักย์ทีรอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $(V_{bi} + V_A)$



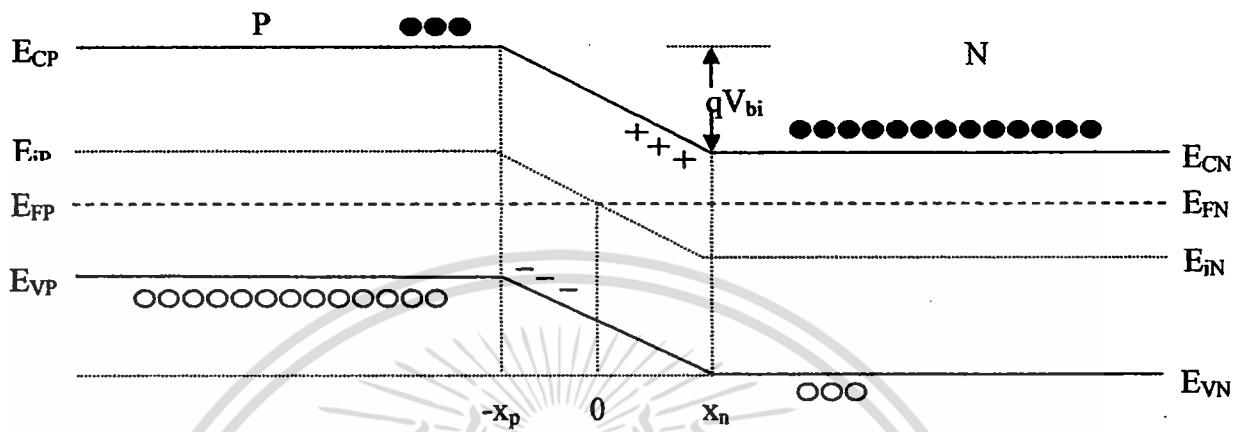
รูปที่ 2.4 ลักษณะ การให้ไบอัสย้อนกลับ  $-V_A$  แก่ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆที่รอยต่อในขณะที่ได้รับ ไบอัสย้อนกลับ การเพิ่มขึ้นของกำแพงศักย์ที่รอยต่อ ทำให้โฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในด้านพีและด้านเอ็นมีพาหะส่วนน้อยคือ  $n_p$  และ  $P_n$  จากด้านเอ็นก็สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านพีได้จึงทำให้เกิดมีกระแสค่าหนึ่งที่มีขนาดน้อยๆเพราะพาหะดังกล่าวนี้มีปริมาณน้อยมาก ไหลผ่านรอยต่อ โดยมีทิศทางตรงข้าม หรือย้อนกลับกับกระแสที่ไหลในกรณีไบอัสตรง กระแสที่ไหลนี้ พบว่ามีขนาดน้อยมากราว  $10^{-6} - 10^{-15}$  แอมแปร์ (ขึ้นอยู่กับพื้นที่ของรอยต่อ) และมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งๆ ดังนั้นจึงถูกเรียกว่า “กระแสอิ่มตัว” (Saturation Current) หรือ “กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ” (Reverse-bias Saturation Current)

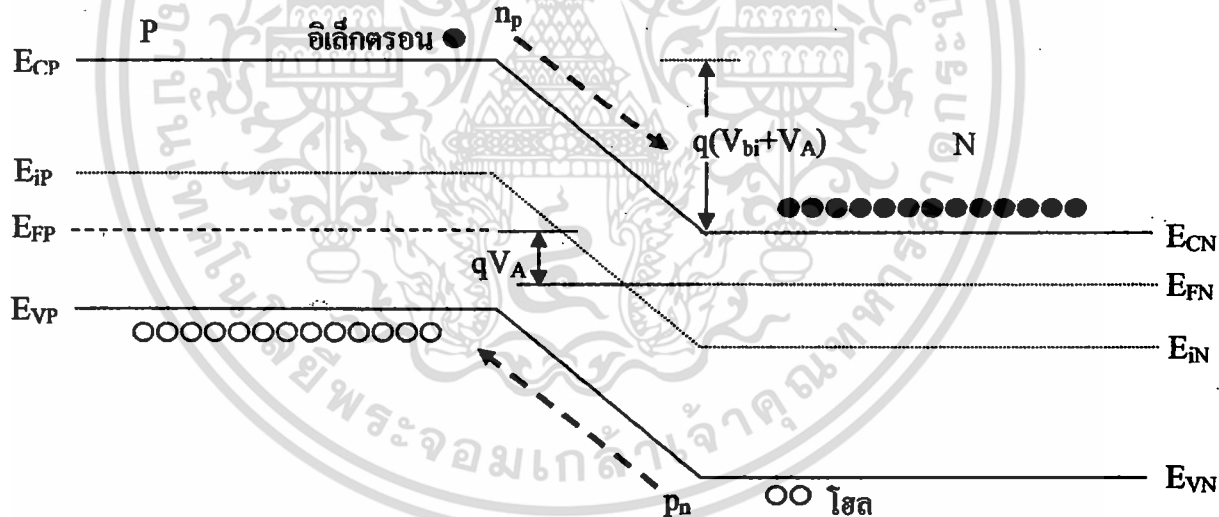
### 2.1.5 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

แถบพลังงานของรอยต่อ พี-เอ็น ขณะได้รับ ไบอัสย้อนกลับ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (ข) เนื่องจากรอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $-V_A$  จึงทำให้กำแพงศักย์ที่รอยต่อเพิ่มขึ้นเป็น  $V_{bi} + V_A$  ดังนั้นอิเล็กตรอนในด้านเอ็นและโฮลในด้านพีจะไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ นอกจากนี้โฮลในด้านพีและอิเล็กตรอนในด้านเอ็นบริเวณรอยต่อ จะถูกสนามไฟฟ้าภายใน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ผลักให้เคลื่อนห่างออกไปจากรอยต่อมากขึ้น บริเวณปลอดพาหะจึงมีการขยายกว้างมากขึ้นระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านเอ็นและด้านพีของรอยต่อ จะมีขนาดแตกต่างกันเท่ากับ  $qV_A$  โดยที่ระดับเฟอร์มิด้านพี จะสูงกว่าระดับเฟอร์มิด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) สนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ สามารถสังเกตเห็นได้จากความชันของแถบพลังงานซึ่งเพิ่มขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ แม้ว่าพาหะส่วนมากจากด้านทั้งสอง ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ แต่พาหะส่วนน้อยจากด้านทั้งสอง คืออิเล็กตรอนจากด้านพี ( $n_p$ ) และ โฮลจากด้านเอ็น ( $P_n$ ) บริเวณใกล้ๆ กับย่านปลอดพาหะ

สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังด้านตรงข้ามได้ ดังในรูปที่ 2.5 (ข) และทำให้เกิด “กระแสอิ่มตัว” (saturation current :  $I_0$ ) ไหลผ่านรอยต่อได้



(ก) รอยต่อขณะไม่ได้รับไบอัส



(ข) รอยต่อขณะได้รับไบอัสกลับ  $-V_A$

รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของรอยต่อ พี-เอ็น ขณะได้รับไบอัส

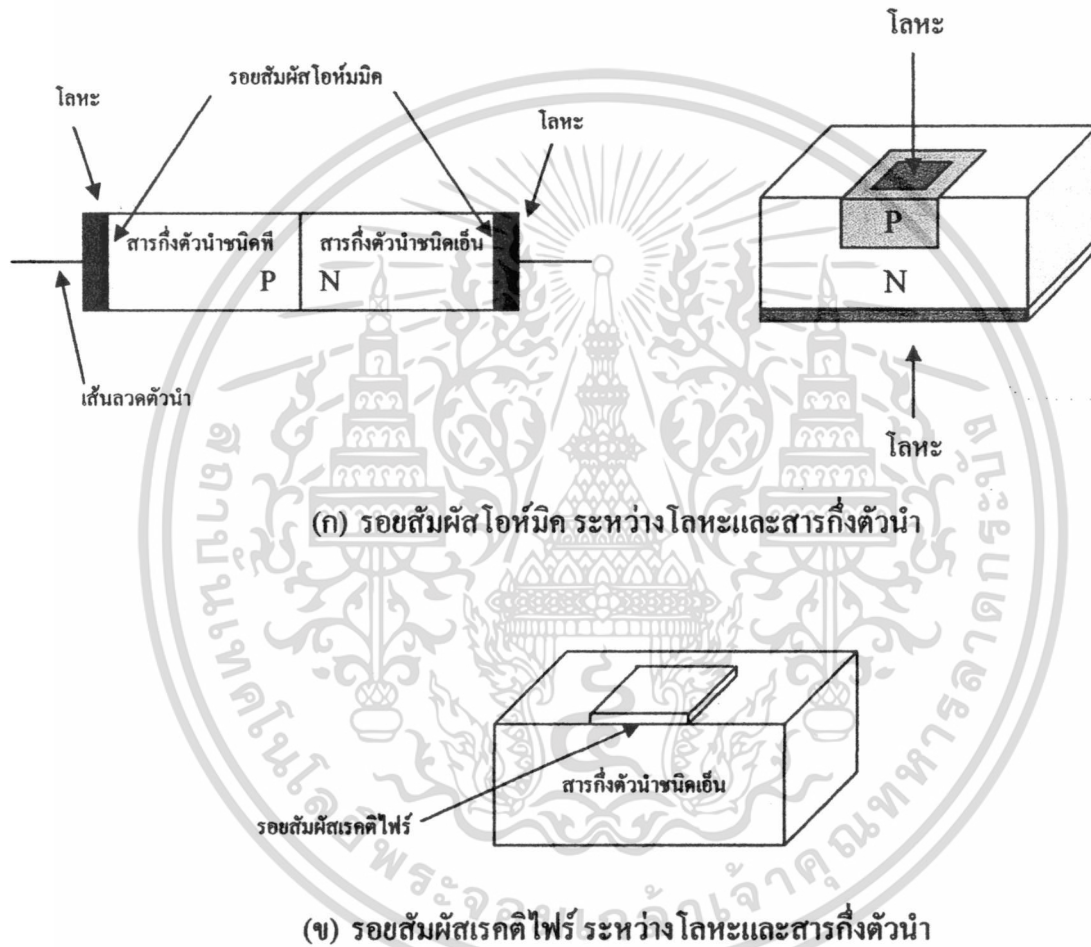
(ก) รอยต่อขณะไม่ได้รับไบอัส

(ข) รอยต่อขณะได้รับไบอัสกลับ  $-V_A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.6 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

โดยปกติภายหลังจากที่อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำถูกสร้างขึ้นมาเสร็จเรียบร้อยแล้ว จำเป็นจะต้องมีการต่อเส้นลวดโลหะ หรือขาโลหะออกไปภายนอก เพื่อต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างรอยสัมผัส (contact) ระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ ที่เป็นส่วนต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เช่น ขั้วสัมผัสส่วนต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ และของไอโอดคั้งแสดงในรูปที่ 2.6 (ก)



รูปที่ 2.6 ขั้วสัมผัสส่วนต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ และของไอโอดคั้ง

(ก) รอยสัมผัส โอห์มมิก ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

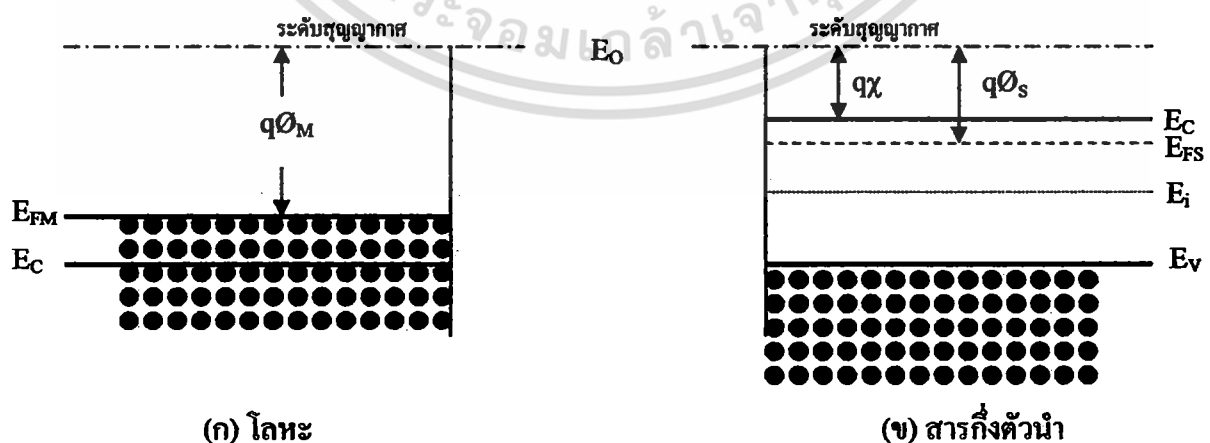
(ข) รอยสัมผัสเรกติไฟร์ ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้ โดย ปกติจะมีคุณสมบัติเป็น “รอยสัมผัส โอห์มมิก” (ohmic contact) กล่าวคือ จะไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง ไม่มีแรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัส สำหรับ โลหะที่ใช้มักเป็นอะลูมิเนียม และทองคำ เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดี รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในบางกรณี ดังในรูปที่ 2.6 (ข) อาจจะไม่ใช่อรอยสัมผัสโอห์มิกก็ได้ เช่น บางครั้งอาจแสดงคุณสมบัติเป็นเรกติไฟร์ได้ ซึ่งคล้ายกับไดโอด โดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางหนึ่งทิศทางใดเท่านั้น และรอยสัมผัสเช่นนี้ถูกเรียกว่า “รอยสัมผัสเรกติไฟร์” (Rectifier contact) บางครั้งเรียกว่า ไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำหรือ Metal-Semiconductor diode หรือ “ซีดต์คีย์ไดโอด” (Schottky diode) ซึ่งไดโอดชนิดนี้สามารถนำไปใช้งาน เช่น ในวงจรความถี่สูง และวงจรสวิตซ์ได้เป็นอย่างดี โดยมีอัตราเร็วในการสวิตซ์สูงกว่าไดโอดแบบรอยสัมผัสพี-เอ็นปกติ ดังนั้นจึงกล่าวสรุปได้ว่า รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ สามารถให้คุณสมบัติได้ 2 ลักษณะ คือ อาจเป็น “รอยสัมผัสแบบโอห์มิก” หรือ “รอยสัมผัสเรกติไฟร์” ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างให้เป็นรอยสัมผัส

## 2.2 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติก่อนสัมผัส

ก่อนการสัมผัส แถบพลังงานของโลหะ โดยทั่วไป เช่น ทองคำ หรือ อะลูมิเนียม สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.7 (ก) และสำหรับสารกึ่งตัวนำเช่น ซิลิกอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.7 (ข) ระดับพลังงาน  $E_0$  หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน นิยมเรียกว่า “ระดับสุญญากาศ” (Vacuum level) และนิยามได้ว่า เป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็ง และหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ ดังนั้นระดับพลังงาน  $E_0$  จะมีค่าเท่ากับ 0 eV. ส่วนระดับพลังงานอื่นๆที่ปรากฏในรูป จะมีค่าพลังงานเป็นค่าลบ ระดับสุญญากาศของสารทุกชนิดพิจารณาว่าเป็นระดับเดียวกัน หรือมีค่าเท่ากันนั่นเอง



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติก่อนสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของโลหะ ระดับเฟอร์มิของโลหะหรือ  $E_{FM}$  จะอยู่สูงกว่าระดับค่าพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_c$ ) เล็กน้อย และถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่อยู่ในโลหะนั้น ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศถูกเรียกว่า “ฟังก์ชันงาน” (work function) ของโลหะซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\phi_M$  โดยมีหน่วยวัดเป็น โวลต์ ถ้าวัดเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ เขียนแทนด้วย  $q\phi_M$  ซึ่งหมายถึง พลังงานค่าน้อยที่สุด ที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการ เพื่อให้ อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหุคหนึ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะนั้นๆ และเป็นอิสระโดยสมบูรณ์ ในโลหะที่ต่างชนิดกันจะมีค่าฟังก์ชันงาน  $q\phi_M$  ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2 เช่น ฟังก์ชันงาน นี้ต่างก็เป็นคุณสมบัติประจำตัวของตัวนำแต่ละชนิดซึ่งมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงและจากรูปที่ 2.7 (ก) จะเขียนได้ว่า ฟังก์ชันงานของโลหะคือ

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

ตารางที่ 2 ค่าฟังก์ชันงาน  $q\phi_M$  (Work function) ของโลหะชนิดต่างๆ

ชนิดของโลหะ	ฟังก์ชันงาน	ชนิดของโลหะ	ฟังก์ชันงาน
Ag (Silver)	4.26	Ni (Nikel)	5.15
Al (Aluminum)	4.28	Pd (Pulladium)	5.12
Au (Gold)	5.1	Pt (Platinum)	5.65
Cr (Chromium)	4.5	Ti (Titanium)	4.33
Mo (Molybdenum)	4.6	Tungsten	4.55

สำหรับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ดังในรูปที่ 2.7 (ข) ระดับเฟอร์มิจะอยู่ในช่วงพลังงาน โดยอยู่สูงกว่าระดับ  $E_i$  (ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน) และต่ำกว่าระดับ  $E_c$  ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $q\phi_s$ ) มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานสุญญากาศ  $E_0$  และระดับเฟอร์มิ  $E_{FS}$  ดังนั้น จะได้ว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ คือ  $q\phi_s = E_0 - E_{FS}$  นอกจากนี้ สำหรับในสารกึ่งตัวนำ ความแตกต่างของพลังงานระดับสุญญากาศ  $E_0$  กับระดับนำไฟฟ้า  $E_c$  ของสารกึ่งตัวนำถูกเรียกว่า “อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี” (electron affinity) โดยเขียนแทนด้วยตัวอักษรกรีก ( $\chi$ ) คือ  $\chi$  มีหน่วยวัดเป็น โวลต์ และเมื่อเป็นหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์เขียนเป็น  $q\chi$  ซึ่ง “อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี” นี้ ถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า  $E_c$  ต้องการ เพื่อที่จะเคลื่อนที่ออกไปหุคหนึ่งอยู่ที่ผิวภายนอกของสารกึ่งตัวนำ ค่าแกแลียมอาเซไนต์ จะมีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี  $q\chi$  ต่างๆกันคือ 4.13 eV 4.01 eV. และ 4.07 eV

ตามลำดับ ซึ่งค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี เป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และจากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าค่าฟังก์ชันงานและอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (1)

$$q\phi_s = q\chi + (E_c - E_f)_{FB} \quad (1)$$

โดยที่อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี

$$q\chi = (E_o - E_c)_{\text{บริเวณผิว}} \quad (2)$$

และ  $(E_c - E_f)_{FB}$  หมายถึง ความแตกต่างของระดับ  $E_c$  และระดับ  $E_f$  ที่บริเวณผิวสัมผัสในภาวะ “แถบราบ” (flat band) หรือในภาวะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม ตำแหน่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ  $E_{fs}$  มีค่าไม่คงที่ แต่จะเปลี่ยนแปลงกับขนาดของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำนั้นๆ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน  $E_g$  และในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับเฟอร์มิ จะปรากฏอยู่ที่ระดับซึ่งต่ำกว่าระดับ  $E_g$

## 2.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในอุดมคติ

### 2.3.1 กรณีที่ฟังก์ชันงานของโลหะ $q\phi_M$ มีค่ามากกว่า $q\phi_S$ ของสารกึ่งตัวนำ

ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและของสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ ซึ่ง  $q\phi_M > q\phi_S$  ในภาวะก่อนการสัมผัสหรือเมื่อเริ่มสัมผัส จะเห็นว่าแถบพลังงานมีลักษณะเป็นแถบราบปกติ แต่ภายหลังจากสัมผัสจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของสารทั้งสองไม่เท่ากัน โดยฟังก์ชันงานของโลหะ  $q\phi_M$  มีค่ามากกว่า  $q\phi_S$  ของสารกึ่งตัวนำดังนั้นจะเห็นว่า ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงทำให้เกิดมีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสอง กล่าวคืออิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่แพร่เข้าไปทางด้านโลหะ ทิ้งให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D^+$ ) ปรากฏอยู่บริเวณรอยสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ และกลายเป็นบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างเท่ากับ  $W$ ,

อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำซึ่งเคลื่อนที่แพร่เข้าไปใน โลหะ จะไปสะสมอยู่ในโลหะเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น ไม่ได้กระจายเข้าไปในส่วนใดของโลหะ (เนื่องจากเป็นกรณีของโลหะในอุดมคติ ซึ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้า หรือแรงดันตกคร่อม) ประจุบวกที่เกิดจากไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ในย่านปลอดพาหะ จะมีค่าเท่ากับประจุลบซึ่งสะสมอยู่ที่ผิวสัมผัส (surface interface) ทางด้าน โลหะ และประจุบวกเหล่านี้ จะมีทิศทางจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ เป็นทิศทางที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้แพร่เข้าไปยังด้านโลหะ อย่างไรก็ดี ในช่วงเวลาแรกๆสนามไฟฟ้านี้จะมีค่าน้อยจึง ไม่สามารถต่อต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ทั้งหมด การแพร่ของอิเล็กตรอนจึงยังคงสามารถดำเนินต่อไปได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป

สนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในที่สุดก็จะมีค่ามากพอที่จะหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ได้อย่างสมบูรณ์ ขณะนี้รอยสัมผัสจะเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งกระแสสุทธิที่ไหลผ่านรอยสัมผัสมีค่าเป็นศูนย์ สนามไฟฟ้าที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำสามารถสังเกตเห็นได้ จากการงอโค้งของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำ ในช่วง  $W$  ซึ่งเหมือนกับในกรณีของรอยสัมผัสพี-เอ็น ขนาดความกว้าง  $W$  ของบริเวณปลอดพาหะนี้ อาจคำนวณได้จากสมการความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยสัมผัสพี-เอ็นตามสมการที่ 1 และสามารถใช้กรณีของรอยสัมผัสแบบ  $P^+ - N$  มาพิจารณาได้ โดยพิจารณาว่าประจุลบที่สะสมอยู่ในด้าน โลหะ จะมีลักษณะเป็นแผ่นประจุ (Sheet of charge) หรือคล้ายกับว่า  $X_p \ll X_n$

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสอง จะปรับอยู่ในระดับเดียวกัน โดยตลอด การงอโค้งของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับ โลหะ มีความหมายว่ามีศักย์สัมผัส (Contact potential :  $V_{ct}$ ) หรือกำแพงศักย์ (potential barrier) เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำและทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ให้เข้าไปในด้านโลหะ การงอโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะมีผลทำให้เกิดการงอโค้งของระดับสูญญากาศในด้านสารกึ่งตัวนำด้วย เนื่องจากค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี  $\chi$  ต้องมีค่าคงที่ การงอโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามากที่สุด ที่ตำแหน่งผิวสัมผัสกับ โลหะ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่จุดนี้จะมีค่ามากที่สุด ขณะที่รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุล กระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ และจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ จะมีค่าเท่ากัน กระแสสุทธิที่ผ่านรอยสัมผัสจึงมีค่าเป็นศูนย์ ศักย์สัมผัสหรือแรงดันภายในรอยสัมผัส  $V_{ct}$  ซึ่งเป็นกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะ และของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น กำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านสารกึ่งตัวนำ คือ

$$qV_{ct} = q(\phi_M - \phi_S) \quad (3)$$

นอกจากนี้แล้ว จะเห็นว่า ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้าน โลหะซึ่งจะเคลื่อนที่ไปด้านสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับ  $(\phi_M - \chi)q$  เราเรียกกำแพงนี้ว่า กำแพงพลังงานศักย์ที่ผิว (surface potential energy barrier) หรือ “กำแพงช็อคกี้” หรือ “ช็อคกี้แบริเออร์” (Schottky barrier) และเขียนแทนด้วย  $q\phi_B$   
ดังนั้น กำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้าน โลหะ คือ

$$q\phi_B = q(\phi_M - \chi) \quad (4)$$

รอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ ค่าของกำแพงช็อคติย์  $q\phi_B$  ค่าต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพิจารณาว่าเป็นกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนในโลหะที่มีพลังงานระดับเฟอร์มิ ที่พยายามจะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ

ตารางที่ 3 แสดงค่าความสูงของกำแพงช็อคติ  $\phi_B$  ที่วัดได้ จากรอยสัมผัสระหว่างโลหะชนิดต่างๆกับสารกึ่งตัวนำ ทั้งซิลิคอนและ แกลเลียมอาเซนไนด์(ปกติมีค่าสูงกว่าทฤษฎี)

	Al	Au	W	PtSi
Si(N)	0.72 eV.	0.80 eV.	0.67 eV.	0.85 eV.
Si(P)	0.58 eV.	0.34 eV.	0.45 eV.	-
GaAs(N)	0.80 eV.	0.90 eV.	0.80 eV.	-

จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกำแพงศักย์ด้านสารกึ่งตัวนำ  $V_{bi}$  และกำแพงช็อคติ  $\phi_B$  ได้ดังนี้

$$V_{bi} = \phi_B - \phi_D \quad (5)$$

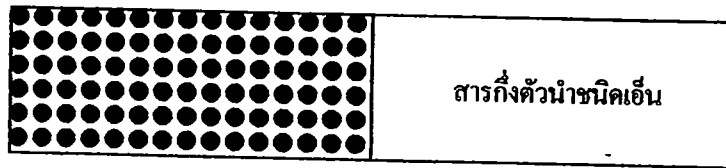
โดยที่

$$\phi_D = (E_C - E_{FS})/q \quad (6)$$

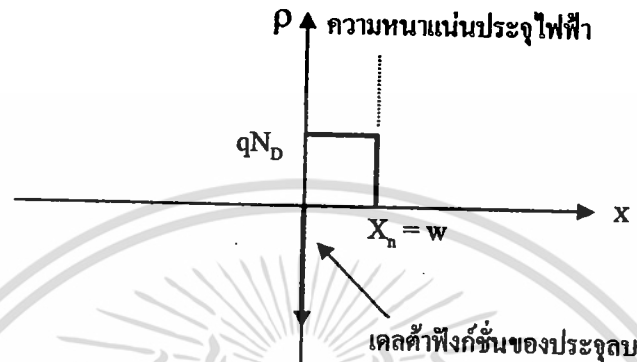
ดังนั้นสมการที่ (5) เขียนใหม่ได้ว่า

$$q V_{bi} = q \phi_B - (E_C - E_{FS}) \quad (7)$$

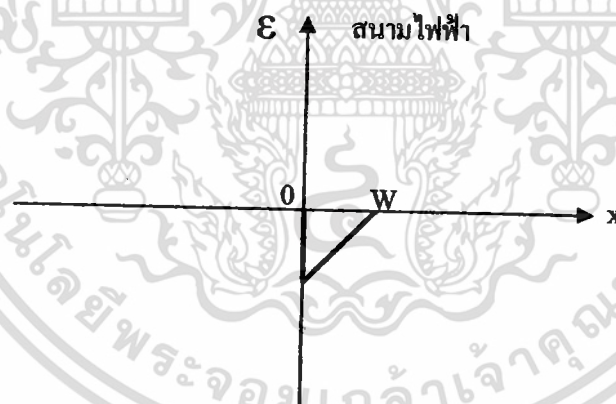
และจากสมการที่ (5) จะเห็นว่ากำแพงศักย์ในสารกึ่งตัวนำ มีค่าน้อยกว่ากำแพงช็อคติ หรือ ก็คือ  $V_{bi} < \phi_B$



โลหะ



รูปที่ 2.8 ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า

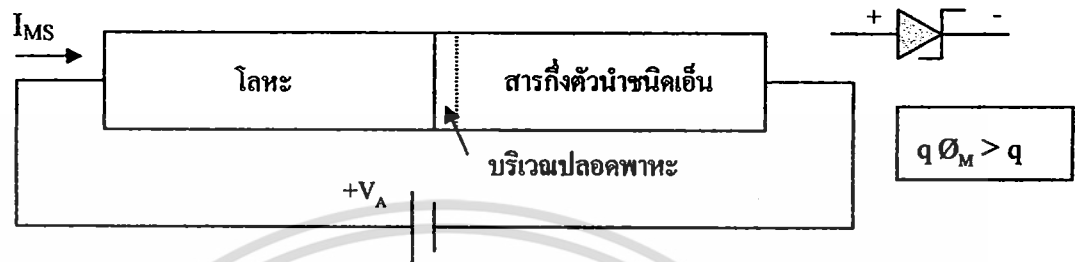


รูปที่ 2.9 สนามไฟฟ้า

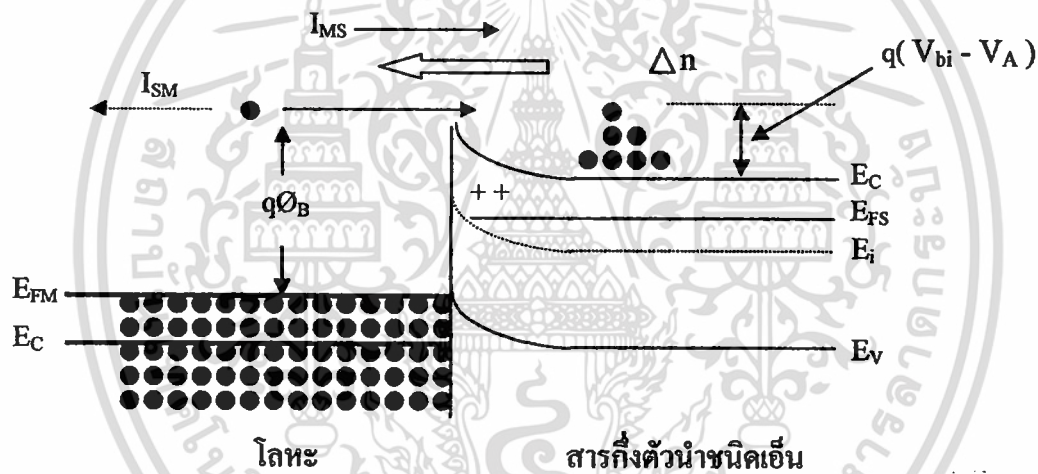
พิจารณาในย่าน  $0 < x < x_n$  ซึ่ง  $\rho = qN_D$  ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัส ( $V_A$ ) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในกรณีนี้จะทำให้ความสูงของศักย์สัมผัส หรือกำแพงศักย์  $V_{bi}$  ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น  $(V_{bi} - V_A)$  และทำให้ระดับพลังงาน  $E_{FS}$  สูงกว่าระดับ  $E_{FM}$  ดังนั้น อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้า ( $I_{MS}$ ) ไหล จากด้านโลหะผ่านรอยสัมผัส ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงขอดก็เข้าไปในด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้า ( $I_{SM}$ ) ไหลในทิศทางข้ามกับกระแสแรก โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ



รูปที่ 2.10 การให้ไบอัสตรง



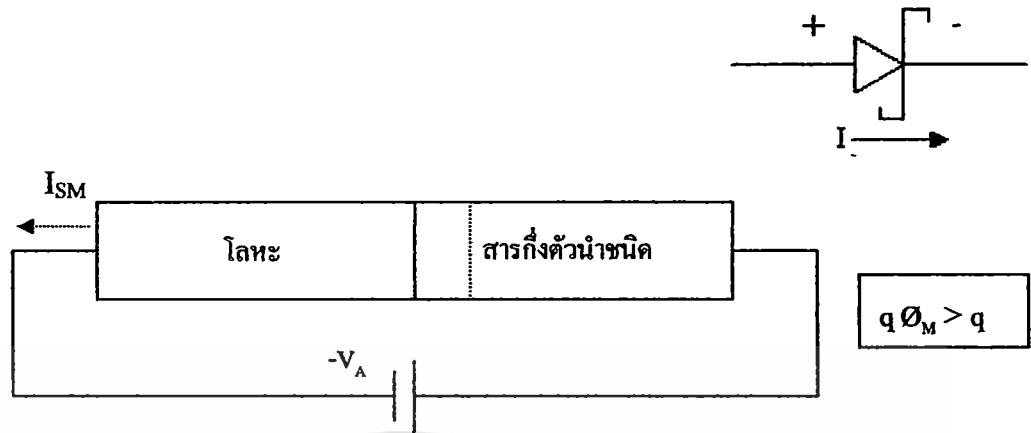
รูปที่ 2.11 แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสตรง  $+V_A$

แต่เนื่องจาก กำแพงชอตก็มีความสูงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแส ( $I_{SM}$ ) นี้ จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล

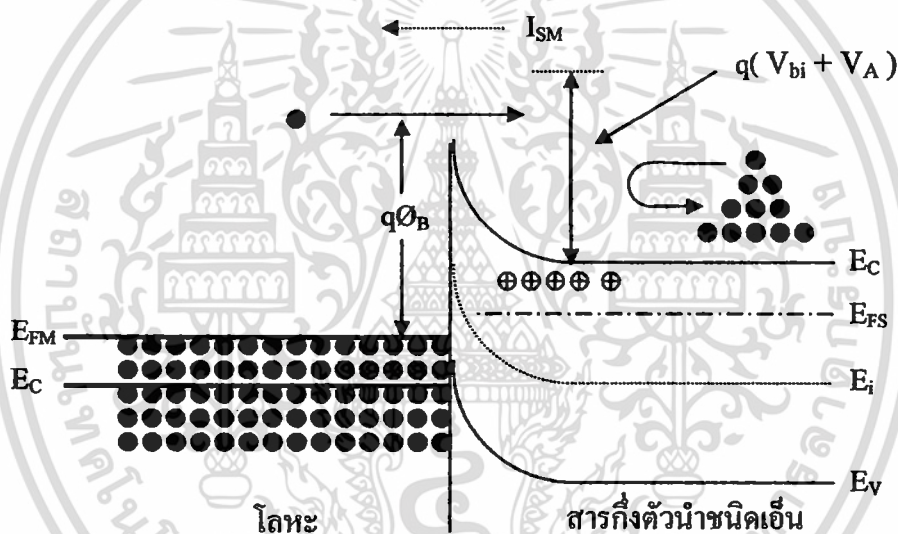
ดังนั้นกระแสสุทธิที่ได้ จึงมีค่าประมาณกระแส  $I_{MS}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และกระแสนี้ถูกเรียกว่า “กระแส ไบอัสตรง” (forward current) และการ ไบอัสในลักษณะนี้ถูกพิจารณาว่าเป็น “ไบอัสตรง” (forward biasing)

ในทางตรงกันข้าม ถ้าเราให้แรงดันไบอัส ( $-V_A$ ) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังในรูปที่ 2.12 กรณีนี้จะทำให้ระดับ  $E_{FM}$  อยู่สูงกว่าระดับ  $E_{FS}$  กำแพงศักย์  $V_{bi}$  จะ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $(V_{bi} + V_A)$  และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น สนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัสมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



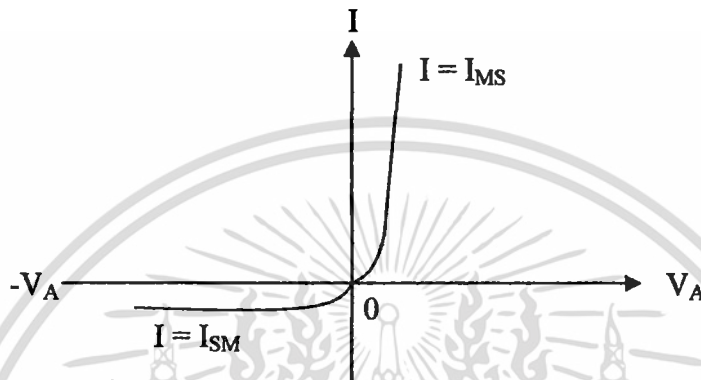
รูปที่ 2.12 การให้ไบอัสกลับ

รูปที่ 2.12 แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ  $-V_A$ 

ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงชอตกกี ( $q\phi_B$ ) เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดกระแส ( $I_{SM}$ ) ไหล จากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ กระแสนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งมีค่าน้อยมาก และเป็นกระแสคงที่โดยประมาณ ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัส โดยเฉพาะเมื่อแรงดัน ( $-V_A$ ) มีค่ามากกว่า  $\frac{kT}{q}$  โวลต์ และเนื่องจากกระแสนี้มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสไบอัสตรง จึงถูกเรียกว่า “กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ” (reverse saturation current) กระแสนี้จะมีค่าน้อยกว่ากระแสไบอัสตรงมาก ผลจากการให้แรงดันไบอัสดังกล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่า รอยสัมผัสดังกล่าวนี้ มีคุณสมบัติเป็น “รอยสัมผัสเรกติไฟร์” (rectifier contact) ซึ่งมีคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้ายกับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น กล่าวคือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว คือ ไบอัสตรง เมื่อให้ไบอัสกลับทางหรือไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลผ่านน้อยมาก กราฟกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสนี้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในทางอุดมคติซึ่ง  $q\phi_M > q\phi_S$  จึงถูกพิจารณาว่าเป็นไดโอดชนิดหนึ่งคือ Metal-Semiconductor diode หรือ MS diode หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า “ชอตตี้ไดโอด” (Schottky diode)

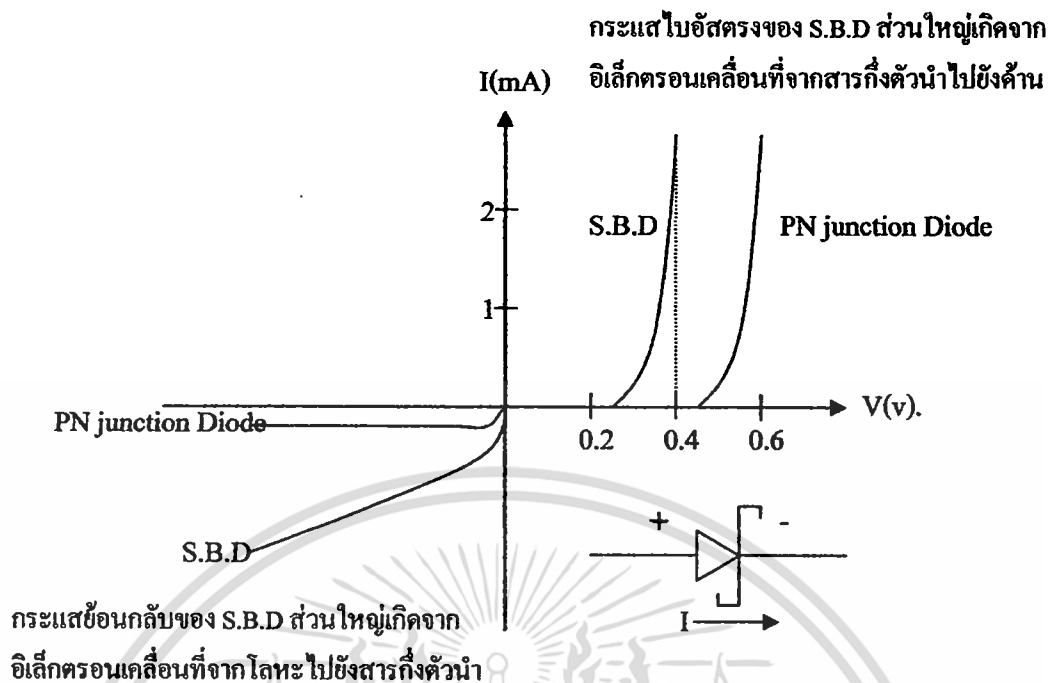


รูปที่ 2.13 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดัน ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่ง ฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าของสารกึ่งตัวนำ

คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของชอตตี้ไดโอด คล้ายกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น แต่กรณีของชอตตี้ไดโอด ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ  $J_0$  จะขึ้นอยู่กับขนาดของกำแพงศักย์ชอตตี้  $q\phi_B$  เพื่อให้อิเล็กตรอนจะสามารถข้ามจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ยิ่งกำแพงชอตตี้มีค่ามากกระแสอิ่มตัวย้อนกลับก็จะยิ่งมีค่าน้อย ดังนั้น จากตารางที่ 3 จะเห็นว่า ชอตตี้ไดโอดที่เกิดจากซิลิคอนชนิดเอ็นกับ Platinum Silicide (PtSi) ซึ่งมีค่า  $q\phi_B = 0.85$  eV. จะมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับน้อยกว่า การใช้โลหะอะลูมิเนียม หรือทังสเตน หรือก็คือ มีกระแสรั่วค่าน้อยนั่นเอง คุณสมบัติ กระแสและแรงดันของชอตตี้ไดโอด และของรอยสัมผัสพี-เอ็นสามารถเขียนแสดงเปรียบเทียบได้ดังในรูปที่ 2.14

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นว่า ชอตตี้ไดโอด จะให้ความหนาแน่นกระแสสูงกว่าไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น และเริ่มทำงานที่แรงดันต่ำกว่า ดังนั้น ไดโอดแบบชอตตี้จึงมีประโยชน์และถูกนำไปใช้งานในลักษณะแรงดันต่ำและกระแสสูง เช่น การนำชอตตี้ไดโอดไปต่อระหว่างขั้วของเบสและคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ จะทำให้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มีคุณสมบัติที่ความสูงได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะทำให้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มีอัตราเร็วในการทำงานเป็นสวิตช์ได้เร็วขึ้นจากเดิมราว 10 เท่า โดยที่ชอตตี้ไดโอด จะทำหน้าที่ bypass พาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดมาจากอิมิตเตอร์ ไปยังส่วนคอลเลคเตอร์ ทำให้อายุของพาหะมีค่าน้อยลง นั่นก็คือ อัตราความเร็วของการทำหน้าที่สวิตช์จะดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

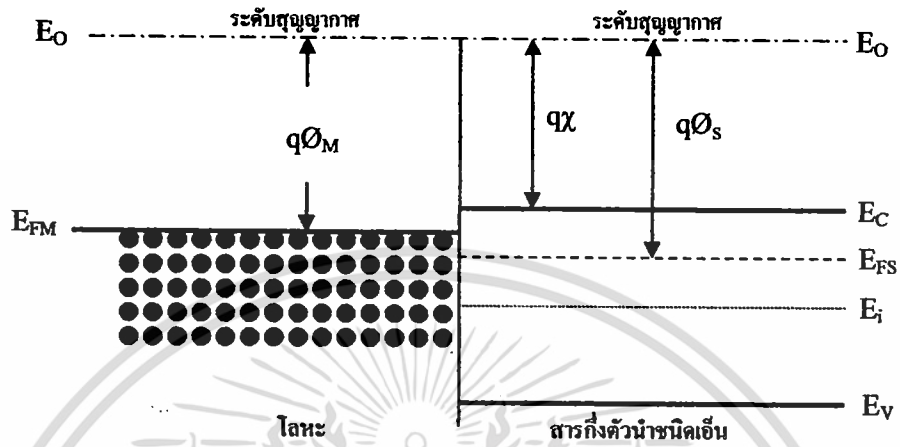


รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

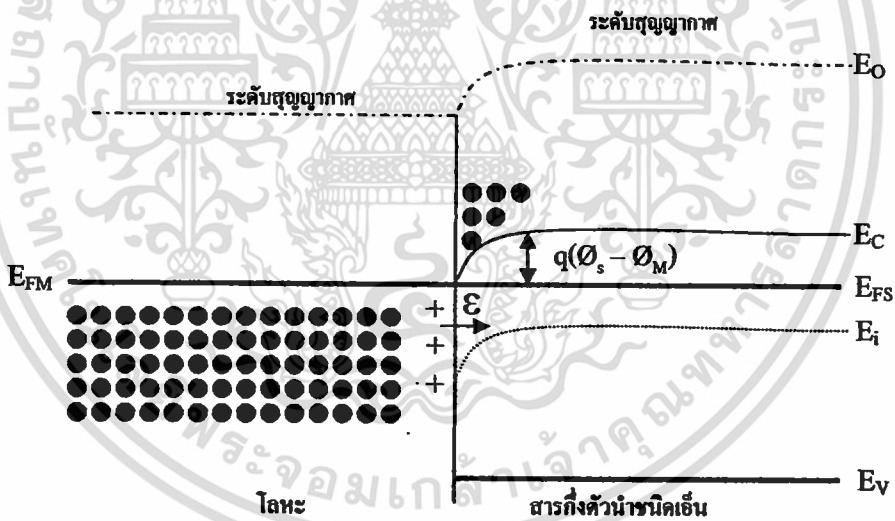
นอกจากนี้ ข้อดีที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ กระแสที่ไหลในขอตักโคไดโอดเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก (Majority carrier) จึงทำให้ไม่มีความจุไฟฟ้าสะสม (Storage capacitance) อันเนื่องมาจากพาหะส่วนน้อย การตอบสนองในภาวะชั่วคราว (transient response) ของโคไดโอดนี้จึงเป็นไปอย่างรวดเร็วและขึ้นอยู่กับผลคูณของ  $RC$  เท่านั้น โดยที่  $C$  คือ ความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสบริเวณปลดพาหะ (depletion layer capacitance) และ  $R$  คือค่าความต้านทานอนุกรมของโคไดโอด ดังนั้นเมื่อโคไดโอดทำงานเป็นสวิตช์เปลี่ยนจากสถานะ ON หรือ forward state ไปเป็นสถานะ OFF หรือ reverse state กระแสจะเปลี่ยนไปเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ที่แรงดันเป็นไบอัสย้อนกลับ เวลาที่นิ้วตัวย้อนกลับ (reverse recovery time) ของโคไดโอดจะขึ้นอยู่กับค่า  $RC$  เพียงเท่านั้น ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าโคไดโอดแบบรอยต่อ  $P^+ - n$  ทั่วไป มาก เช่นน้อยกว่าถึง  $10^4$  เท่า สำหรับข้อเสียของขอตักโคไดโอดก็คือ การมีกระแสในตัวย้อนกลับมากกว่าโคไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็นราว  $10^4$  เท่า

ในภาวะก่อนสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำกรณีนี้ ลักษณะของแถบพลังงานในทางอุดมคติแสดงได้ดังในรูปที่ 2.15 เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำที่  $\phi_M < \phi_S$  มาสัมผัสกัน เนื่องจากเมื่อก่อนสัมผัสระดับเฟอร์มิของโลหะ  $E_{FM}$  จะอยู่ที่ระดับที่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ  $E_{FS}$  ดังนั้นเมื่อสารทั้งสองสัมผัสกันแล้ว จะทำให้เกิดการถ่ายเทพริจพาหะผ่านรอยสัมผัสนี้ โดยที่อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งให้เกิดไอออนบวกขึ้นทางด้านโลหะและมีอิเล็กตรอนมาสะสมอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ผลของประจุไฟฟ้าดังกล่าวจึงเกิดมีสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่รอยสัมผัส สนามไฟฟ้านี้จะมีทิศทางจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่ง

จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะ และการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะดำเนินต่อไป กระทั่งรอยสัมผัสเข้าสู่ภาวะสมดุล

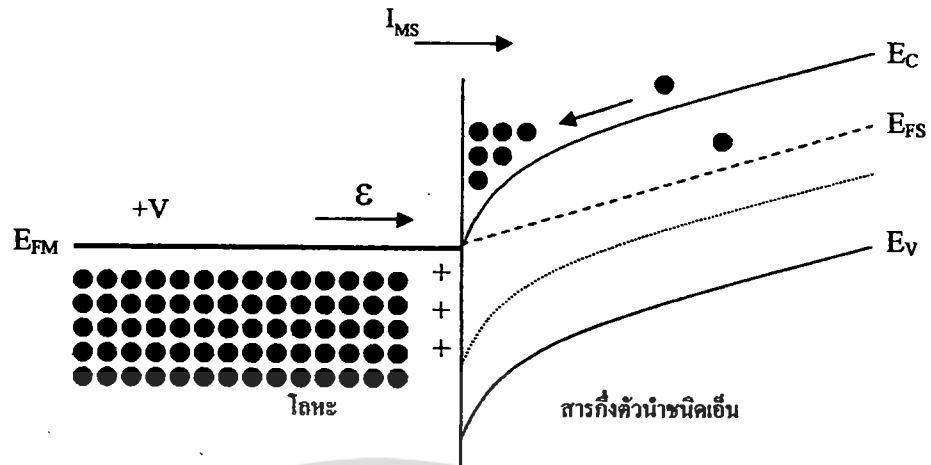


รูปที่ 2.15 เริ่มต้นสัมผัส

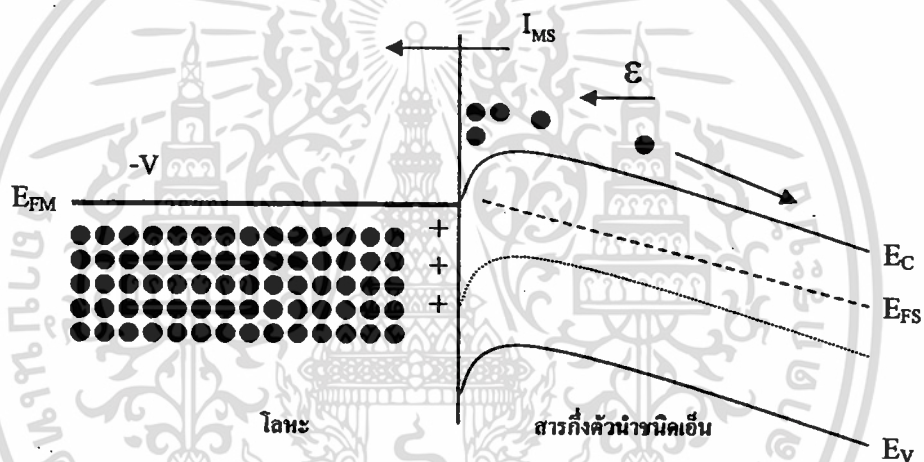


รูปที่ 2.16 ภายหลังสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กรณีโลหะมีศักย์เป็นบวก



รูปที่ 2.18 กรณีโลหะมีศักย์เป็นลบ

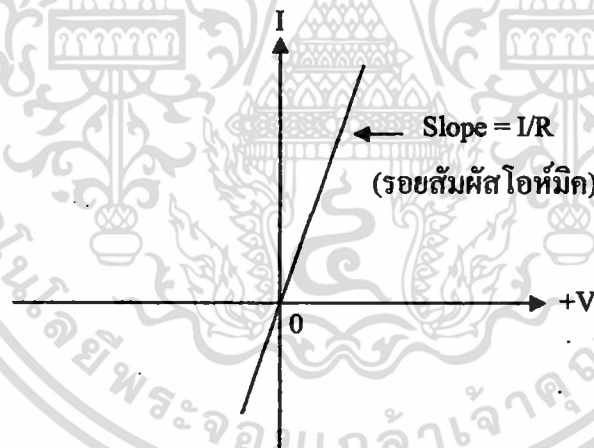
โดยกระแสสุทธิของรอยสัมผัสมีค่าเป็นศูนย์ และขณะนี้ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสอง จะมาอยู่ที่ระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยสัมผัส

การที่อิเล็กตรอนมาสะสมอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัส ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นเช่นนี้ จะไม่มีบริเวณปลอดพาหะเกิดขึ้น แต่จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบริเวณนี้ มีค่ามากกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น จึงเกิดการจ่อ โกงลงของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสกับ โลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และมีแรงดันตกคร่อมสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัส เท่ากับ  $(\phi_M - \phi_S)$  ลักษณะเช่นนี้ ไม่มีกำแพงศักย์สำหรับอิเล็กตรอนจากด้านทั้งสอง กล่าวคือที่บริเวณรอยสัมผัส ไม่มีกำแพงศักย์ที่จะป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้าน โลหะ หรือจากด้าน โลหะ ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ รอยสัมผัสเช่นนี้ถูกเรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“รอยสัมผัส โอห์มิก” (Ohmic contact) เราจะสังเกตเห็นได้ว่ารอยสัมผัสนี้มีลักษณะที่แตกต่างจากกรณีที่แล้ว ทั้งๆที่เป็นรอยสัมผัสของ โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเช่นเดียวกัน นั่นคือกรณีนี้ไม่มีกำแพงศักย์ที่รอยสัมผัส ไม่มีประจุบวกสะสมอยู่ที่ด้านเอ็น แต่กลับมีอิเล็กตรอนอิสระมาสะสมแทน และแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยสัมผัส มีลักษณะงอโค้งลง ดังนั้น เมื่อรอยสัมผัสนี้ถูกนำไปให้แรงดันไบอัส  $V_A$  โดยด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.17 หรือ  $V_A > 0$  แม้เพียงเล็กน้อย จะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากจากด้านสารกึ่งตัวนำไหลไปยังด้านโลหะ จึงทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านรอยสัมผัสจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ และเมื่อให้ไบอัสในลักษณะตรงข้ามคือ ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบ ดังในรูปที่ 2.18 จะพบว่า อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลผ่านรอยสัมผัสโดยข้ามกำแพงศักย์ค่าน้อย เข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ แต่กำแพงศักย์นี้จะหมดไปทันที เมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพียงไม่ถึงหนึ่ง โวลต์ จึงทำให้มีอิเล็กตรอนจำนวนมากไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ กระแสทั้งสองกรณีนี้จะไม่อ้อมค้อม แต่จะแปรตามแรงดันไบอัส ตามกฎของโอห์ม กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัส โอห์มิกนี้ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.19 ซึ่งจะเห็นว่า มีกระแสไฟฟ้าไหล



รูปที่ 2.19 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) หรือ Non rectifying

ผ่านรอยสัมผัสได้ทั้งสองทิศทางคือ จากโลหะไปสารกึ่งตัวนำ และจากสารกึ่งตัวนำไปโลหะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางทำให้ไบอัสแก่รอยสัมผัส รอยสัมผัสเช่นนี้จึงไม่ใช่รอยสัมผัสเรกติไฟร์ หรือเรียกว่า non-rectifying และเรานิยมเรียกรอยสัมผัสนี้ว่า “รอยสัมผัส โอห์มิก” (Ohmic contact) รอยสัมผัสโอห์มิกนี้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเป็นขั้วสัมผัสของส่วนต่างๆ ในอุปกรณ์

สารกึ่งตัวนำ เพื่อการเชื่อมภายใน (Interconnection) ระหว่างอุปกรณ์ ของวงจรรวม หรือเพื่อต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ

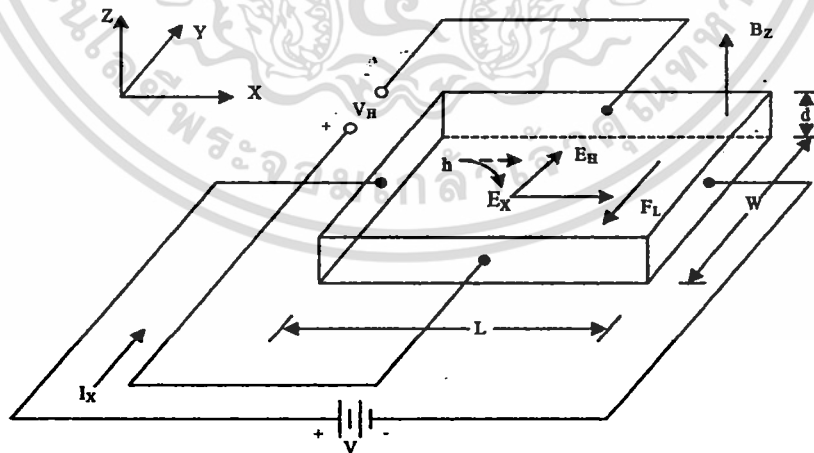
## 2.4 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)

### 2.4.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิด โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถอธิบายการทำงานจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มีแรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (Charge Carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮลที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัดและคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์อื่นๆ ได้อีกด้วย

แท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูป 2.20 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความต่างศักย์  $V$  โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (Current Density)  $J_x$  ไหลในทิศ  $+x$  และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (Flux Density)  $B_z$  ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศบวก (+)



รูปที่ 2.20 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $+x$  จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟท์ (Drift Velocity)  $v_x$  ในทิศทาง  $+x$  และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแสจะเกิดมีแรงลอเรนซ์กระทำต่อโฮลด้วย ตามสมการ

$$\overline{F_L} = e\overline{v} \times \overline{B} \quad (1)$$

โดยที่  $\overline{F_L}$  คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\overline{F_L}| = F_L = e.v_x.B_z \quad (2)$$

และมีทิศทางในแกน  $-y$  ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาแกน  $-y$  และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $E_H$  ในทิศ  $+y$  สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ  $+y$  ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ ( $F_L$ ) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน ( $eE_H$ ) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$eE_H = F_L = e.v_x.B_z \quad (3)$$

จาก

$$E_H = v_x.B_z \quad (4)$$

$$J_x = p.e.v_x$$

หรือ

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

แทนค่า  $v_x$  ลงในสมการ (4) จะได้

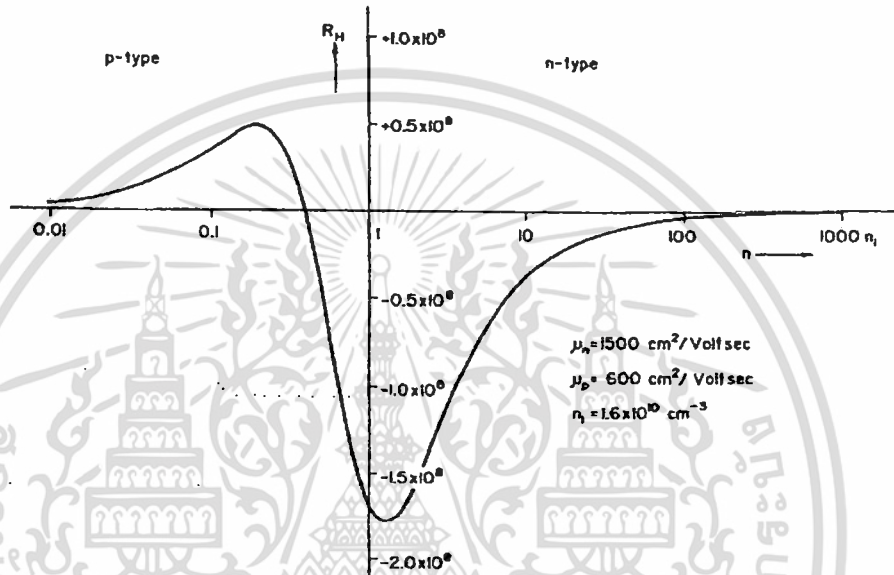
$$E_H = \frac{J_x.B_z}{p.e}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{E_H}{J_x.B_z} = \frac{1}{p.e} = R_H \quad (5)$$

โดย  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall Coefficient)

ซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการได้ระดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าแรงดันฮอลล์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยจึงจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการได้ระดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการได้ปในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการ ได้ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก

จากรูป 2.21 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $w$  จะได้

$$V_H = E_H \cdot w \tag{6}$$

โดย  $V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่า  $J_x = \frac{I}{w \cdot d}$  และ  $E_H = \frac{V_H}{w}$  ลงในสมการ (5) จะได้

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

หรือ

$$R_H = \frac{d \cdot V_H}{I \cdot B_z} = \frac{1}{p \cdot e} \tag{7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = \frac{I.B_z}{p.e.d} \quad (8)$$

ความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = \frac{1}{e.R_H} = \frac{I.B_z}{e.d.V_H} \quad (9)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \frac{w.d}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{w.d}{L} \quad (10)$$

จาก

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

ดังนั้นจะได้

$$\mu_p = \frac{1}{e.p.\rho} = \frac{1}{\rho} R_H \quad (11)$$

จากสมการ (9), (10) และ (11) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ มีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $R_H$  แสดงดังนี้

$$R_H = -\frac{1}{n.e} \quad (12)$$

ดังนั้น โดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแส และสนามแม่เหล็กจะเป็น

$$S = \frac{V_H}{I.B} = \frac{R_H.G}{d} = \frac{G r_n}{q.n.d} \quad (13)$$

จะเห็นว่า ค่าความไว ที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำ และฮอลล์เฟลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ  $E_H$  และ  $E_x$  ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม  $\theta_H$  กับแกน +x ดังรูป ซึ่งมุม  $\theta_H$  ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

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

โดยการแทนค่า  $E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p.e}$  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

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

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

จะได้

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

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ  $R_{Hl}$  สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{Hl} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (14)$$

และ

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

หรือ

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

$$\mu_{Hl} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\mu_H$  คือ สภาพความคล่องตัวของโฮล (Hall mobility) และ  $\mu_{Hi}$  คือสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ  $R_{Hi}$  แสดงได้ดังสมการที่ 15

$$R_{Hi} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93 R_H \quad (16)$$

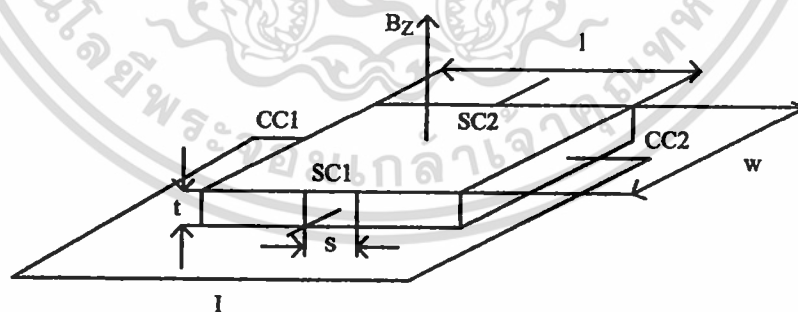
และ

$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p \quad (17)$$

โดย  $\mu_{Hi}$  คือสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

#### 2.4.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีฮอลล์ (Hall Effect) โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แสดงดังรูปที่ 2.23 โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนาที่บาง โครงสร้างประกอบด้วย 4 ขั้วใช้งานคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 ซึ่งแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) ถูกวัดที่ขั้ว SC1 และ SC2 โดยที่การไบอัสกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC1 และ CC2 แรงดันฮอลล์สามารถหาได้ดังสมการที่ 17



รูปที่ 2.22 ด้านตัดขวาง โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

$$V_H = \frac{R_H}{t} \cdot G \left( \frac{l}{w}, \frac{s}{w}, \frac{y}{l}, \theta_H \right) \cdot B_z \cdot I \quad (18)$$

โดยที่  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์,  $G$  คือพารามิเตอร์โครงสร้าง,  $t$  คือ ความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์,  $B_z$  คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง,  $s$  คือ ความกว้างของขั้วเซนเซอร์คอนแทค (SC),  $w$  คือ ความกว้างของอุปกรณ์และ  $l$  คือความยาวของอุปกรณ์ฮอลล์

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาพฤติกรรมของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ( $n \gg p$ ) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot t} \cdot G \cdot B_z \cdot I \quad (19)$$

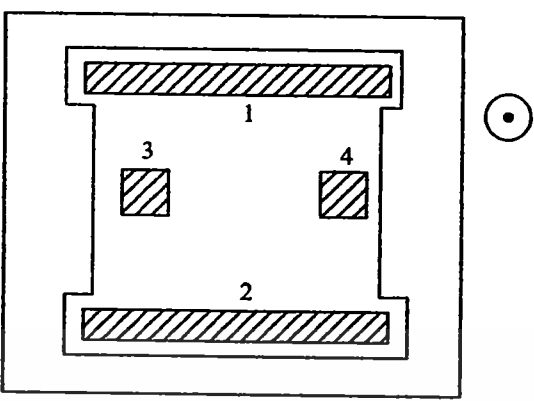
โดยที่  $r_n$  คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

จากสมการที่ 18 และ 19 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง  $G$  จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง  $G$  สามารถประมาณดังสมการที่ 19

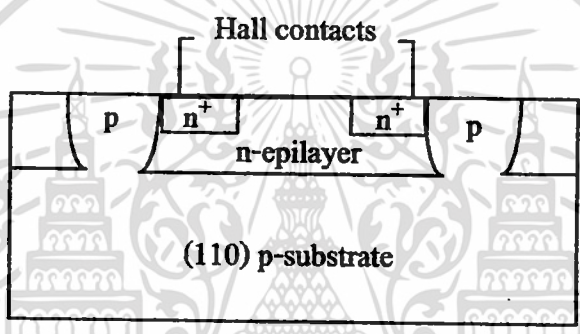
$$G = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi \cdot l}{2 \cdot w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot s}{\pi \cdot w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (20)$$

โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า  $G=1$  ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้  $l/w = 3$  และ  $s/w < 1$  โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์คอนแทคจะออกแบบที่ระยะ  $1/2$

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคืออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน [15] โดยรูปที่ 2.24 และรูปที่ 2.25 แสดงด้านบนและด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งชนิดเอ็น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ  $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  และมีความหนาชั้นอิพิทาเซียล 5 - 10  $\mu\text{m}$  โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ  $200 \times 200 \mu\text{m}$  สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการอิมพลานท์ (ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้



รูปที่ 2.23 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง



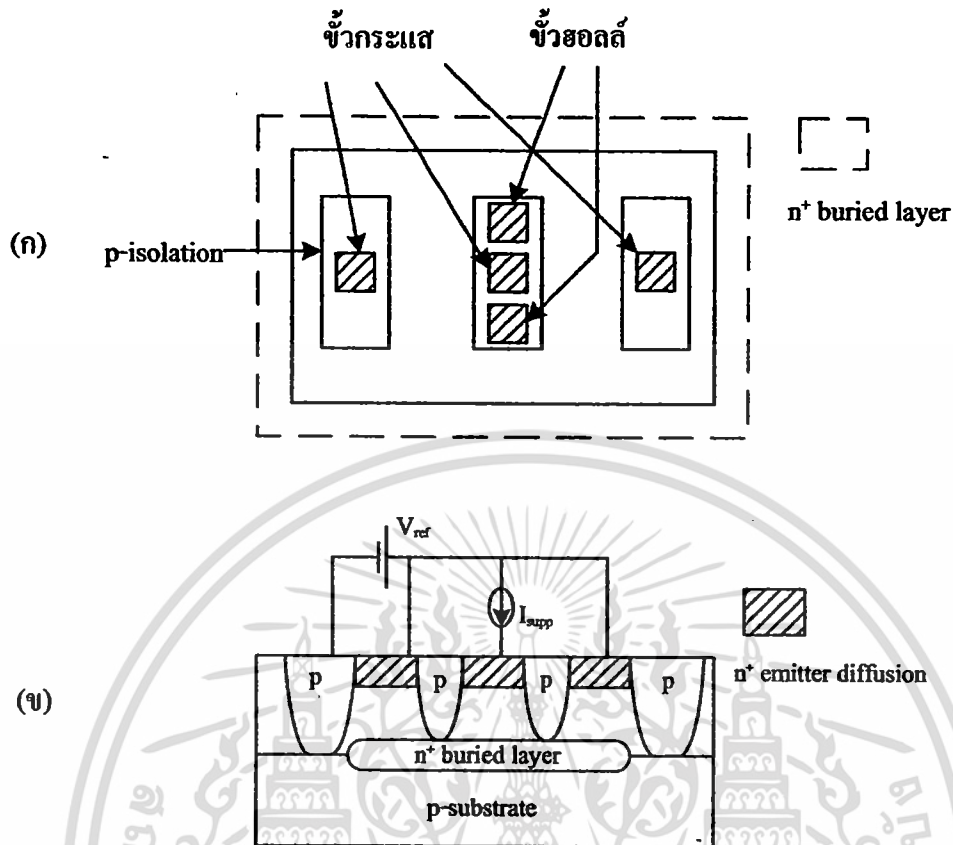
รูปที่ 2.24 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

อุปกรณ์ฮอลล์นี้ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน แสดงดังรูปที่ 2.25 โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $100 \times 100 \mu\text{m}$  ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กประมาณ  $41 \text{ V/AT}$  โดยมีระดับสัญญาณรบกวน  $1 \times 10^{-5} \text{ T/}\sqrt{\text{Hz}}$  ที่  $40 \text{ Hz}$

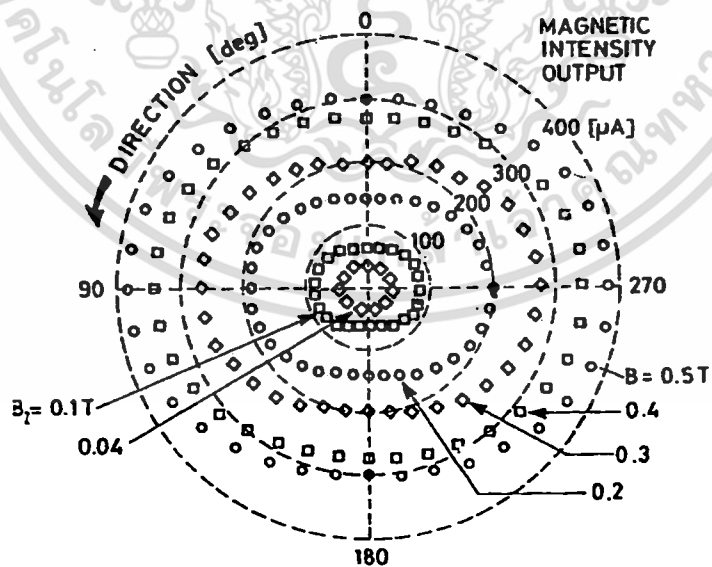
อุปกรณ์ฮอลล์ชนิดแนวตั้งและแนวนอนสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้าง CMOS เช่น อุปกรณ์ฮอลล์สามมิติแบบเข็มทิศแม่เหล็กสามารถสร้างได้ในระดับ  $2\mu\text{m}$  แสดงดังรูปที่ 2.26 สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามทิศทาง ( $B_x, B_y, B_z$ ) โดยการวัดค่าการเบี่ยงเบนของพาหะในมุมเบี่ยงเบนต่างๆซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ ข้อดีของอุปกรณ์ฮอลล์นี้คือมีชั้นเลขอร์ที่บางมากประมาณ  $100 \text{ \AA}$  ทำให้มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงประมาณ

$500 - 1,000 \text{ V/AT}$  แต่มีข้อเสียคือจะมีค่าสภาพความคล่องที่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง



รูปที่ 2.26 เอ้าท์พุทของเข็มทิศแม่เหล็ก[15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 อุปกรณ์ที่ใช้หลักการ ปรากฏการณ์ฮอลล์

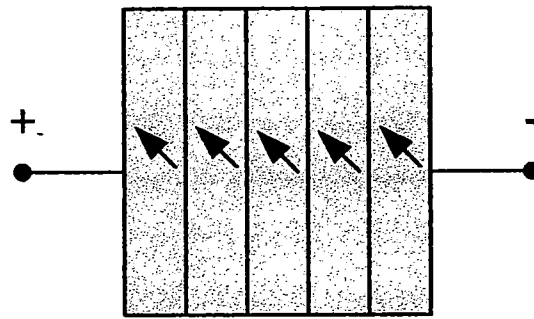
### 2.5.1 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแมกนีโตรีซิสเตอร์ อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสเทนซ์ (magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม  $\theta$  ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ 1 และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบน  $\theta$  หาได้ดังสมการที่ 2

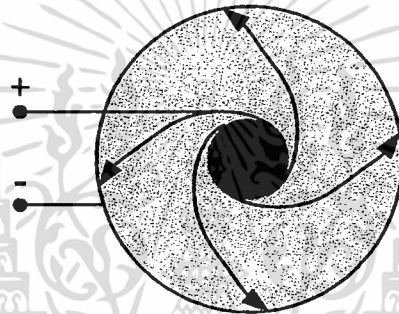
$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \quad (1)$$

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

โดยที่  $K_{dr}$  ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเพลทซึ่งในอุดมคติเพลทมีความกว้างมากกว่าความยาว โดยปกติแล้วแมกนีโตรีซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (parallel Hall plates) และแบบวงกลม (caibino disc) ดังแสดงรูปที่ 2.28 โดยที่รูป 2.28(ก) แสดงโครงสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนานซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์คือในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์จะไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์แต่จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 2.27(ข) แสดงโครงสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์แบบวงกลมซึ่งเป็นโครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วย โดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.27 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม

### 2.5.2 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดโดยมีมิติความยาว, ความกว้างและความสูง ( $l \times w \times d$ ) อาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะระหว่างสองรอยต่ออันเป็นผลเนื่องมาจากแมกนีโตคอนเซนเตรชัน (magneto concentration effect) โดยพาหะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของแมกนีโตไดโอดอีกด้วย โดยการใช้  $\text{Si-Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Si-SiO}_2$  ที่พื้นผิวเรียกว่า SOS (Silicon-On-Sapphire) ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่กระแสดังกล่าวสามารถหาได้โดยสมการที่ 3 [15]

$$S_f = \frac{dV_f}{dB_z} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)\tau_{eff}(v_2 - v_1)}{8KTI} V_f^2 \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอลเลกเตอร์ทั้งสองไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง  $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$  ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสองหาได้โดยสมการที่ 4

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n' (L/W_E) \cdot I_{CO} \cdot B \quad (4)$$

โดยที่  $L$  คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์,  $W_E$  คือ ความกว้างอิมิตเตอร์ และ  $G$  คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดย

$$S = |\Delta I_C / I_{CO} B| \quad (5)$$

แทนสมการที่ 5 ลงในสมการที่ 6 จะได้

$$S = G \cdot \mu_n' (L/W_E) \quad (6)$$

ในสภาวะปกติขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ 7 และ 8

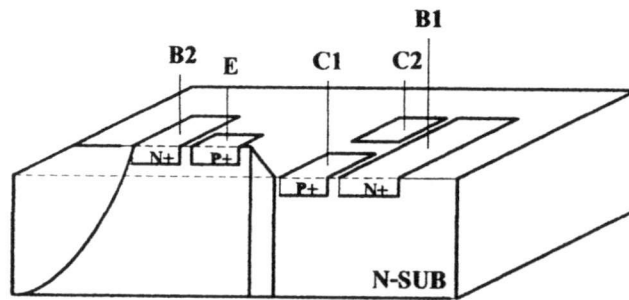
$$S_A = \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (7)$$

$$S = V_C^{-1} \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = I_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (8)$$

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

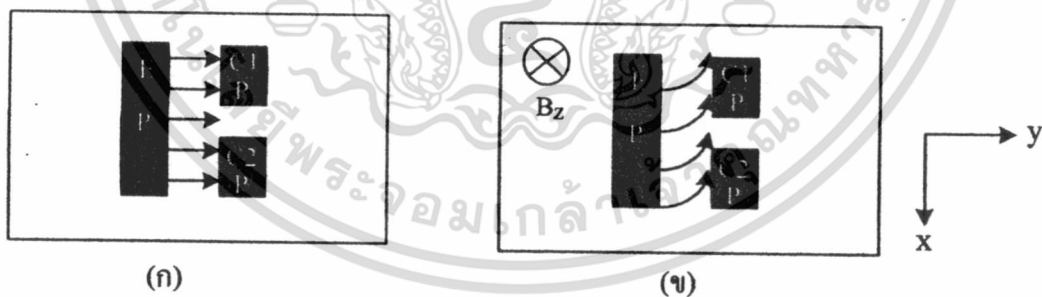
#### 2.5.5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor)

โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2.32 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลกเตอร์ที่แยกกันอยู่สองข้างอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, สองคอลเลกเตอร์ C1, C2 และสองขั้วเบสคอนแทค B1, B2



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของเมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน

เมกนีโททรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก ( majority carriers ) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลกเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลกเตอร์ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลกเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ( $\Delta I_C = 0$ ) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 2.33(ก) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลกเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C \neq 0$ ) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุลแสดงดังรูปที่ 2.32(ข)



รูปที่ 2.32 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ ( โสตร ) (ก)  $B_z = 0$  และ (ข)  $B_z > 0$

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  ได้ตั้งสมการที่ 2.28 เพราะฉะนั้นผลรวมของ  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  คือกระแสคอลเลกเตอร์ที่ไหลในภาวะปกตินั่นเอง ดังสมการที่ 2.29 ส่วนสมการที่ 2.30 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta I_C$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง  $\Delta I_C$  แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์และแบบสมบูรณ์แสดงได้ดังสมการที่ 2.31-2.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \quad (2.28)$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \quad (2.29)$$

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_Z \cdot I_E \quad (2.30)$$

ซึ่ง  $\mu_p$  และ  $\mu_n$  คือค่าความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮล  
 $K_g$  เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์(ก)

$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_O \cdot \Delta B_Z} \quad (2.31)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_Z} \quad (2.32)$$

ซึ่ง  $I_O$  คือแหล่งจ่ายกระแสคงที่และ  $\Delta B_Z$  คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

## 2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877

PIC คือ microcontroller อีกตระกูลหนึ่ง ย่อมาจาก Peripheral Interface Controller ซึ่งข้อดีของ microcontroller ตระกูลนี้ก็คือ พยายามรวมเอาการทำงานทุกอย่างเอามาไว้ในตัว ไม่ว่าจะเป็น PROGRAM MEMORY, RAM, EEPROM, SERIAL, I2C, PWM, A/D ฯลฯ โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ในตัวของ PIC จะมีฟังก์ชันที่ใช้ในการประมวลผล รวมทั้งหน่วยความจำซึ่งทำให้ PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์นี้สามารถทำงานได้เหมือน CPU ตัวหนึ่ง

### 2.6.1 PIC Microcontroller ชนิดต่างๆ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล PIC ถ้าแบ่งออกตามชนิดของ Program Memory แบ่งได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆคือ

#### 2.6.1.1 OTP (one time programmable)

OTP เป็น chip ที่มีราคาถูกที่สุด ในสามประเภท สาเหตุก็มาจากว่า chip แบบ OTP จะสามารถทำการโปรแกรมได้แค่ครั้งเดียวเท่านั้น หลังจาก chip ได้ถูกโปรแกรมไปแล้วจะไม่สามารถโปรแกรมเข้าไปใหม่ได้อีก ดังนั้น chip ประเภทนี้จะนิยมใช้หลังจาก ได้พัฒนาโปรแกรมจนกระทั่ง

จุดบกพร่องต่างๆ ในโปรแกรม ไม่มีอีกแล้ว เพราะจะมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับ memory ประเภทอื่น จะมีตัวอักษร C แสดงบนตัว chip เช่น 16c84, 16c74

### 2.6.1.2 EPROM (erasable programmable ROM)

EPROM เป็น chip ที่มี program memory ที่เมื่อเขียน โปรแกรมเข้าไปแล้วสามารถ โปรแกรมใหม่ด้วยการลบโปรแกรมเดิมโดยใช้แสง uV (ultra Violet) ส่องผ่านไปยัง chip ประมาณ 5-10 นาที คำนึงที่ด้านบนของ chip ได้ แต่ก็มีจำนวนครั้งในการลบโปรแกรมเช่นกัน เมื่อลบโปรแกรมด้วยแสง uV มากๆ เข้าจะเกิดอาการด้าน คือ โปรแกรมไม่เข้านั่นเอง จะมีตัวอักษร JW หรือสามารถดูได้จากการมีกรอบกระจกอยู่บน chip หรือไม่

### 2.6.1.3 EEPROM / Flash (electronically erasable programmable ROM)

EPROM / Flash เป็น chip ที่ออกมาล่าสุด ส่วนของ program memory สามารถอ่านหรือเขียนด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า ใช้เวลาในการ ลบข้อมูลไม่กี่วินาที และสามารถลบ และเขียนใหม่ได้ หลายพันครั้ง ทำให้เป็นที่นิยมที่สุดใน 3 ประเภท มีตัวอักษร F เป็นตัวบอก เช่น 16F84, 16F877

### 2.6.2 แรงดันในการทำงาน

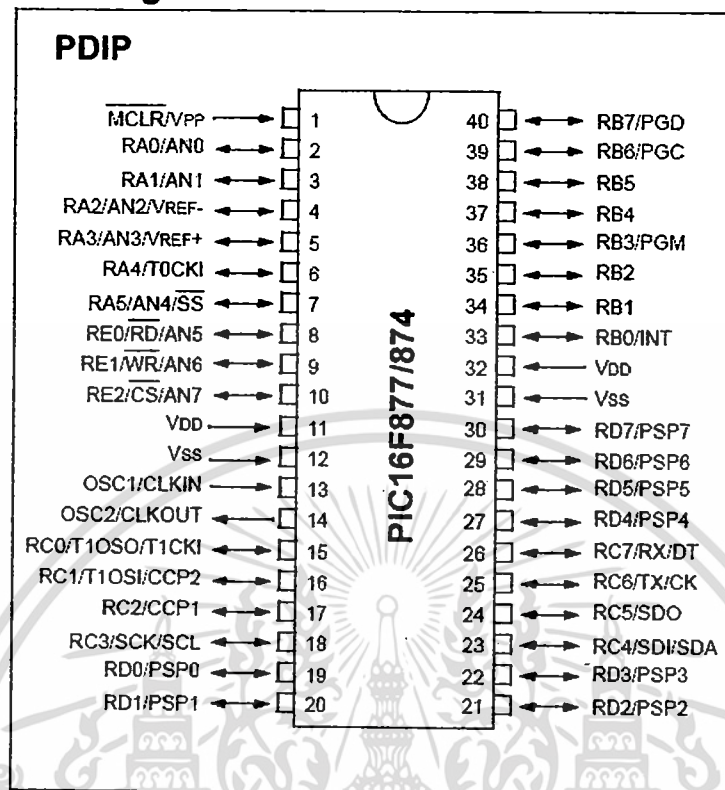
ช่วงแรงดันการทำงานของ PIC โดยปกติมาตรฐานแล้วจะอยู่ระหว่าง 4.5 – 6.0 V จะมีบางเบอร์ ที่ออกแบบมาให้สามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันต่ำ ประมาณ 2.5 – 6.0 V ได้ ซึ่งจะมีการระบุไว้ให้ทราบ โดยมีการเพิ่มรหัสตัว L เข้าไปในเบอร์ของอุปกรณ์ เช่น PIC16LFXXX เป็นต้น

### 2.6.3 สัญญาณนาฬิกา

PIC จะใช้สัญญาณนาฬิกา โดยมองเป็นลักษณะของ วงรอบ (Cycle) ซึ่งระบุเอาไว้ว่า 1 คำสั่ง นั้นจะประกอบไปด้วย 1 – 2 วงรอบ โดยแต่ละวงรอบนั้นจะแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ Q1, Q2, Q3 และ Q4 ด้วยเหตุนี้ ความเร็วโดยรวมของ PIC จึงเท่ากับ ค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกาหารด้วย 4

$$I_{cycle} = Q1 + Q2 + Q3 + Q4 = \frac{XTAL}{4}$$

## Pin Diagram



รูปที่ 2.33 การจัดขาของ PIC16F877

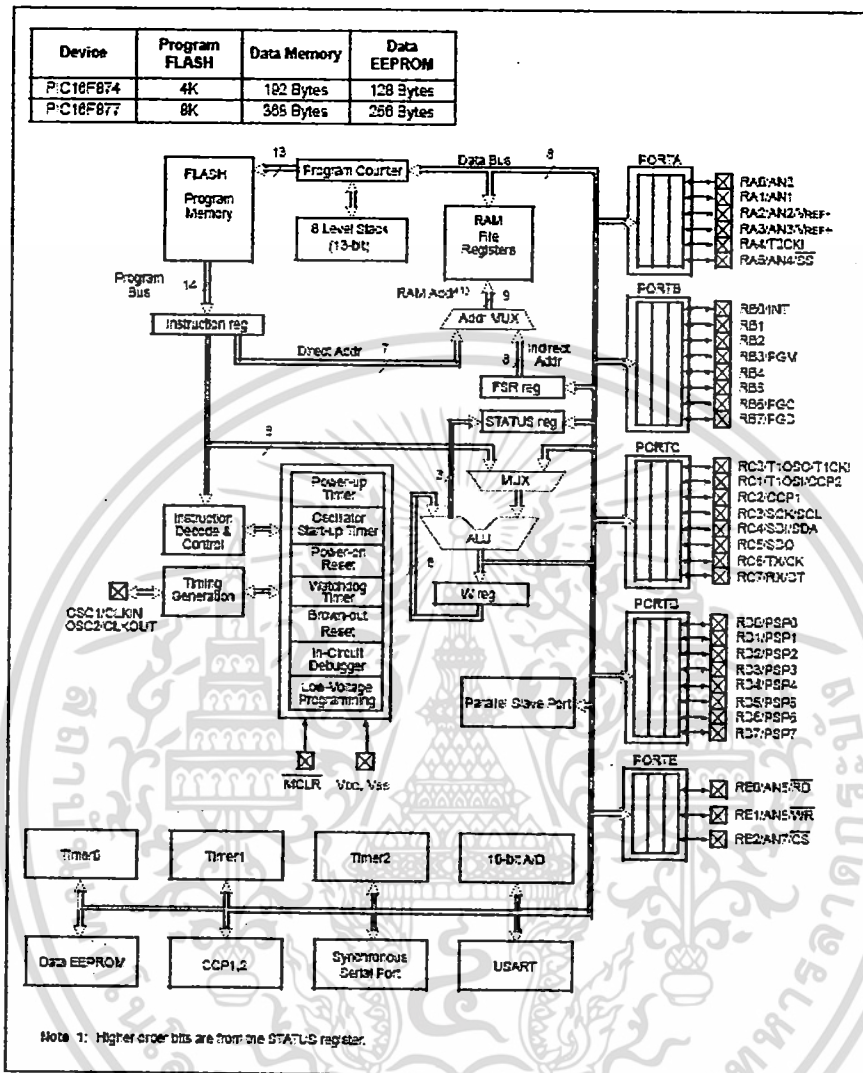
### 2.6.4 คุณสมบัติของ PIC16F877

- ซีพียูแบบ RISC ( Reduced Instruction-Set ) มีคำสั่งให้ใช้งาน 35 คำสั่ง
- คำสั่งหนึ่งๆที่ใช้เวลาทำงาน 1 ถึง 2 Cycle
- ทำงานได้สูงสุดที่ 20MHz ( PIC16F877-20/P )
- สัญญาณนาฬิกา มีหลายโหมดให้เลือกใช้งาน
  - โหมด RC ใช้วงจรภายในไมโครคอนโทรลเลอร์กำเนิดสัญญาณนาฬิกา
  - โหมด LP ใช้คริสตอลพลังงานต่ำ ความถี่สูงสุดไม่เกิน 200 KHz
  - โหมด XT ใช้คริสตอลความถี่ตั้งแต่ 100 KHz-4 MHz
  - โหมด HS ใช้คริสตอลความถี่สูง สูงสุดไม่เกิน 20 MHz
- มี I/O พอร์ตทั้งหมด 5 พอร์ต [ PORT A ( 6 bits), B ( 8 bits), C ( 8 bits), D ( 8 bits), E ( 3 bits) ]
- หน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบ Flash มีขนาด 8K Word ( 1 Word=14bits )
- มี RAM ขนาด 368 bytes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มี EEPROM ขนาด 256 bytes
- ทำงานแบบ Pipe-line ทำให้ ณ เวลาหนึ่งสามารถทำคำสั่ง Fetch และ Execute ได้พร้อมกัน
- ตอบสนองกับอินเทอร์รัพท์ได้ทั้งหมด 14 แหล่ง
- มี Stack ให้ใช้ได้สูงสุด 8 ระดับ
- มีระบบ POR ( Power On Reset ), PWRT ( Power Up Timer ), OST ( Oscillator Start-up Timer )
- มีระบบ WDT ( Watchdog Timer )
- มีระบบ CP ( Code Protection ) และสามารถเลือกระดับการป้องกันได้
- มีโหมด ประหยัดพลังงาน
- สามารถโปรแกรมด้วยไฟ +5 VDC ได้
- สามารถโปรแกรมแบบ In-Circuit Serial Programming
- ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2 VDC ถึง 5.5 VDC
- Current Sink และ Current Source ของ PORT อยู่ที่ 25 mA
- มี Timer/Counter 3 ตัว
- มีโมดูล Capture/Compare/PWM 2 ชุด
- มี A/D Converter แบบ 10 bits จำนวน 8 ช่องนำเข้าไปในตัวเอง
- มีระบบ USART สำหรับการสื่อสารแบบอนุกรม
- มีระบบตรวจระดับไฟเลี้ยง BODEN ( Brown-Out Detection ) เพื่อสร้างสัญญาณรีเซ็ตซีพียู BOR ( Brown-Out Reset )

2.6.5 โครงสร้างการทำงานภายในของ PIC16F877



รูปที่ 2.34 โครงสร้างการทำงานภายใน PIC16F877

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 รายละเอียดของขา PIC16F877

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	ชนิดของขา	ชนิดของวงจรบัฟเฟอร์	รายละเอียด
OSC1/CLKIN	13	I	ST/CMOS <sup>(4)</sup>	Oscillator crystal input/external clock source input.
OSC2/CLKOUT	14	O	-	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in crystal oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKOUT which has $\frac{1}{4}$ the frequency of OSC1, and denotes the instruction cycle rate
MCLR/V <sub>PP</sub>	1	I/O	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active low RESET to the device.
RA0/AN0	2	I/O	TTL	PORTA is a bi-directional I/O port RA0 can also be analog input0. RA1 can also be analog input1. RA2 can also be analog input2. or negative analog reference voltage. RA3 can also be analog input3. or positive analog reference voltage RA4 can also be the clock input to the Timer0 timer/counter. Output is open drain type RA5 can also be analog input4 or the slave select for the synchronous serial port.
RA1/AN1	3	I/O	TTL	
RA2/AN2/V <sub>REF-</sub>	4	I/O	TTL	
RA3/AN3V <sub>REF+</sub>	5	I/O	TTL	
RA4/T0CKI	6	I/O	ST	
RA5/SS/AN4	7	I/O	TTL	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 รายละเอียดของขา PIC16F877(ต่อ)

				<p>PORTB is a bi-directional I/O port.</p> <p>PORTB can be soft-ware programmed for internal weak pull-up on all inputs.</p>
RB0/INT	33	I/O	TTL/ST <sup>(1)</sup>	RB2 can also be the external interrupt pin
RB1	34	I/O	TTL	
RB2	35	I/O	TTL	
RB3/PGM	36	I/O	TTL	
RB4	37	I/O	TTL	
RB5	38	I/O	TTL	RB3 can also be the low voltage programming input.
RB6/PGC	39	I/O	TTL/ST <sup>(2)</sup>	Interrupt-on-change pin.
RB7/PGD	40	I/O	TTL/ST <sup>(2)</sup>	Interrupt-on-change pin. Interrupt-on-change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming clock. Interrupt-on-change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 รายละเอียดของขา PIC16F8779(ต่อ)

RC0/T1OSO/T1CK	15	I/O	ST	<p>PORTC is a bi-directional I/O port.</p> <p>RC0 can also be the Timer 1 oscillator output or a Timer 1 clock input.</p> <p>RC1 can also be the Timer 1 oscillator output or a Timer 1 clock input/Compare2 output/PWM2 output.</p> <p>RC2 can also be the Capture1 input/Capture1 output/PWM1 output.</p> <p>RC3 can also be the synchronous serial clock input/output for both SPI and I2C modes.</p> <p>RC4 can also be the SPI Data In (SPI mode) or data I/O (I2C mode)</p> <p>RC5 can also be the SPI Data Out (SPI mode)</p> <p>RC6 can also be the USART Asynchronous Transmit or Synchronous Clock.</p> <p>RS7 can also be the USART Asynchronous Receive or Synchronous Data.</p>
I	16	I/O	ST	
RC0/T1OSI/CCP2	17	I/O	ST	
RC2/CCP1	18	I/O	ST	
RC3/SCK/SCL	23	I/O	ST	
RC4/SDI/SDA	24	I/O	ST	
RC5/SDO	25	I/O	ST	
RC6/TX/CK	26	I/O	ST	
RC7/RX/DT	26	I/O	ST	
RD0/PSP0	19	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	
RD1/PSP1	20	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	<p>PORTD is a bi-directional I/O port or parallel slave port when interfacing to a microprocessor bus</p>
RD2/PSP2	21	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	
RD3/PSP3	22	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	
RD4/PSP4	27	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	
RD5/PSP5	28	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	
RD6/PSP6	29	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	
RD7/PSP7	30	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

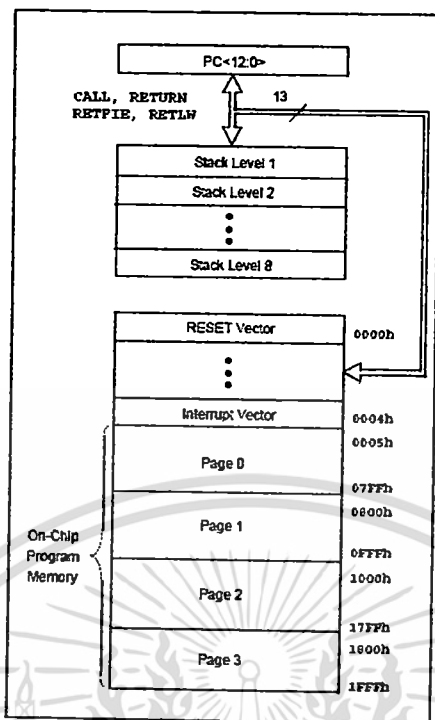
ตารางที่ 4 รายละเอียดของขา PIC16F877(ต่อ)

RE0/RD/AN5	8	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	PORTD is a bi-directional I/O port. RE0 can also be read control for the parallel slave port, or analog input5. RE1 can also be write control for the parallel slave port, or analog input6. RE2 can also be select control for the parallel slave port, or analog input7.
RE1/WR/AN6	9	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	
RE2/CS/AN7	10	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	
V <sub>SS</sub>	12,31	P	-	Ground reference for logic and I/O pins.
V <sub>DD</sub>	11,32	P	-	Positive supply for logic and I/O pins.
NC	-		-	These pins are not internally connected. These pins should be left unconnected

### 2.7.6 การจัดการหน่วยความจำโปรแกรมของ PIC16F877

PIC16F877 จะมีขนาดของ Program Memory ซึ่งสามารถอ้างได้ถึง 8 K x 14 bits ซึ่งตำแหน่ง Reset Vector จะอยู่ที่ 000h และ Interrupt Vector จะอยู่ที่ 0004h

PIC จะแบ่ง Program Memory ออกเป็น Page ซึ่งแต่ละ Page ก็จะมีขนาด 2 Kbytes ซึ่งคำสั่ง CALL และ GOTO สามารถสั่งให้ Program Counter กระโดดไปมาได้ในช่วง Page เท่านั้นแต่ถ้าเมื่อต้องการกระโดดจาก Page หนึ่งไปยังอีก Page หนึ่งดังนั้นจึงต้องไปควบคุม PCLATH<4:3> (Bit Address ที่ 12 และ 13) ให้ชี้ไปยัง Page ที่ต้องการเสียก่อน หลังจากนั้นจึงเรียกคำสั่ง CALL หรือ GOTO ตามอีกที



รูปที่ 2.35 การจัดสรรหน่วยความจำโปรแกรมของ PIC16F877

การเลือก Page ของหน่วยความจำโปรแกรม จะต้องเลือกในรีจิสเตอร์ PCLATH โดยระบุตำแหน่งที่บิต 3 และ บิต4

ตารางที่ 5 ค่า PCLATH <4:3> ในการเลือก Page ของ PIC16F877

PCLATH <4:3>	Page
00	0
01	1
10	2
11	3

เมื่อใช้คำสั่ง CALL ไปที่ Routine ใด Routine หนึ่งแล้ว แล้วจะใช้คำสั่ง RETURN ในการกลับไปตำแหน่งเดิม การ RETURN กลับนั้น ไม่จำเป็นต้องสั่ง PCLATH ให้ชี้ไปยัง Page ก่อนหน้าที่จะเรียก CALL เพราะค่า Address ดังกล่าวถูกเก็บไว้ใน STACK อยู่แล้ว แต่สำหรับคำสั่ง GOTO เวลาข้าม Page จะต้องสั่งให้ PCLATH ชี้ไปยัง Page ที่ต้องการจะไปทุกครั้ง

### 2.7.7 การจัดสรรหน่วยความจำข้อมูล RAM ของ PIC16F877

PIC16F877 มีหน่วยความจำข้อมูล RAM สำหรับใช้งานทั่วไป 368 bytes และมีรีจิสเตอร์ไฟล์ 8bytes 57 ตัว ดังรูปที่\_ แต่ละ Bank มีขนาดสูงสุด 128 bytes แต่มีการใช้งานได้จริงในแต่ละ Bank ต่างกัน โดยในแต่ละ Bank มีการจัดสรรพื้นที่ ดังนี้

- Bank 0 มีช่วง Address 0x00-0x7F
  - Address 0x00-0x1F เป็นพื้นที่รีจิสเตอร์ไฟล์
  - Address 0x20-0x7F เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 96 bytes
- Bank 1 มีช่วง Address 0x80-0xFF
  - Address 0x80-0x9F เป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ไฟล์ แต่มีบาง Address ไม่ใช้งาน
  - Address 0xA0-0xFF เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 80 bytes
  - Address 0xF0-xFF บรรจุข้อมูลเหมือนกันใน Address 0x70-0x7F ใน Bank 0 เพื่อช่วยให้สามารถใช้ข้อมูลจาก Address 0x70-0x7F ได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยน Bank
- Bank 2 มีช่วง Address 0x100-0x17F
  - Address 0x100-0x10F เป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ไฟล์ แต่มีบาง Address ไม่ใช้งาน
  - Address 0x110-0x11F เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 16 bytes
  - Address 0x120-0x16F เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 80 bytes
  - Address 0x170-0x17F บรรจุข้อมูลเหมือนกันใน Address 0x70-0x7F ใน Bank 0 เพื่อช่วยให้สามารถใช้ข้อมูลจาก Address 0x70-0x7F ได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยน Bank
- Bank 3 มีช่วง Address 0x180-0x1FF
  - Address 0x180-0x18F เป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ไฟล์ แต่มีบาง Address ไม่ใช้งาน
  - Address 0x190-0x19F เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 16 bytes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Address 0x1A0-0x1EF เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 80 bytes
- Address 0x1F0-0x1EF บรรจุข้อมูลเหมือนกันใน Address 0x70-0x7F ใน Bank 0 เพื่อช่วยให้สามารถใช้ข้อมูลจาก Address 0x70-0x7F ได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยน Bank

การเลือก Bank ของหน่วยความจำข้อมูล RAM จะต้องเลือกในรีจิสเตอร์ STATUS โดยการ

ระบุตำแหน่งที่บิต 5 และ 6 (RP0,RP1)

ตารางที่ 6 ค่า RP0 และ RP1 ในการเลือก Bank ของ PIC16F877

RP1:RP0	Bank
00	0
01	1
10	2
11	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R-1	R-1	R/W-x	R/W-x	R/W-x
IRP	RP1	RP0	TO	PD	Z	DC	C
bit 7							bit 0

รูปที่ 2.37 รีจิสเตอร์ STATUS

- บิต 7 IRP (Indirect Register Bank Select bit) ใช้เลือก Bank ของหน่วยความจำข้อมูล RAM เมื่อใช้การอ้างตำแหน่งโดยทางอ้อม  
1 = Bank 2,3 (100h-1FFh)  
0 = Bank 0,1 (00h-FFh)
- บิต 6-5 RP1:RP0 (Register Bank Select bit) ใช้เลือก Bank ของหน่วยความจำข้อมูล RAM เมื่อใช้การอ้างตำแหน่งโดยตรง  
11 = Bank 3 (180h-1FFh)  
10 = Bank 2 (100h-17Fh)  
01 = Bank 1 (80h-FFh)  
00 = Bank 0 (00h-7Fh)
- บิต 4 TO (Time-out bit) บิตแสดงการเกิด Time Out เมื่อ Watchdog Time ทำงานครบเวลาที่กำหนด  
1 = After power-up, CLRWDT instruction, or SLEEP instruction  
0 = A WDT time-out occurred
- บิต 3 PD (Power-down bit) บิตแสดงการทำงานโหมดประหยัดพลังงาน  
1 = After power-up or by the CLRWDT instruction  
0 = By execution of the SLEEP instruction
- บิต 2 Z (Zero bit) ใช้แสดงผลการกระทำคำสั่งทางคณิตศาสตร์  
1 = The result of an arithmetic or logic operation is zero  
0 = The result of an arithmetic or logic operation is not zero
- บิต 1 DC (Digit carry/borrow bit) ใช้แสดงการทดลองหรือยืมระหว่างหลักในกรณีคำสั่ง ADDWF หรือ ADDLW  
1 = A carry-out from the 4<sup>th</sup> low order bit of the result occurred  
0 = No carry-out from the 4<sup>th</sup> low order bit of the result  
และแสดงค่ากลับกันเมื่อกระทำคำสั่ง SUBW หรือ SUBLW
- บิต 0 C (Carry/borrow bit) ใช้แสดงการทดลองหรือยืมของบิต MSB ในกรณีคำสั่ง ADDWF หรือ ADDLW

1 = A carry-out from the Most Significant bit of the result occurred  
 0 = No carry-out from the Most Significant bit of the result occurred  
 และแสดงค่ากลับกันเมื่อกระทำคำสั่ง SUBW หรือ SUBLW

### 2.7.8.3 รีจิสเตอร์ W

เป็นรีจิสเตอร์ที่มีบทบาทสำคัญ เพราะในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ จะต้องทำผ่านรีจิสเตอร์ W และทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านสถานะของ Output ไปยัง I/O PORT อีกด้วย

### 2.7.8.4 Program Counter (PC)

เป็นรีจิสเตอร์พิเศษที่ใช้ระบุ Address ของ Program Memory ที่กำลังทำการประมวลผล ซึ่งจะเป็น Counter ขนาด 13 bits โดยทั่วไปแล้ว Counter ตัวนี้จะเพิ่มขึ้น 1 ทุกๆ ครั้งเมื่อมีการประมวลผลคำสั่งเกิดขึ้น 1 ครั้ง ซึ่งค่าที่แสดงก็คือตำแหน่งที่คำสั่ง JUMP นั้นอ้างถึง

### 2.7.8.5 Stack

เป็นหน่วยความจำสำรองสำหรับเก็บค่าของ PC ขนาด 13 bits โดยเก็บข้อมูลได้ 8 ระดับ โดยเก็บตำแหน่งของ PC เข้าเมื่อมีคำสั่ง CALL และส่งคำสั่งที่เก็บไว้ออกไปยัง PC เมื่อมีคำสั่ง RETURN โดยการเก็บจะเป็นแบบ LIFO (Last In First Out)

### 2.7.8.6 PORTA, PORTB, PORTC, PORTD, PORTE

เก็บค่าสถานะของ PORT นั้นๆ

### 2.7.8.7 TRISA, TRISB, TRISC, TRISD, TRISE,

ใช้กำหนดทิศทางของขาของ PORT นั้นๆ ว่าขาใดเป็น Input หรือ Output โดยถ้าหนดให้เป็น 0 จะเป็น Output ถ้าให้เป็น 1 จะเป็น Input

### บทที่ 3

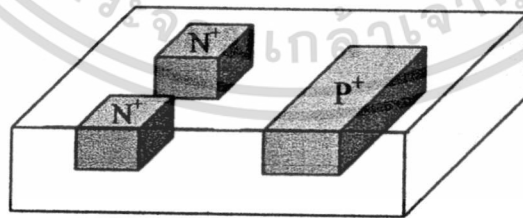
## โครงสร้างและการออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างแมกนีโตไดโอดสองตัวแบบสามขาซึ่งมีขาอาโนคร่วมกันอธิบายกลไกการทำงานและอธิบายความสัมพันธ์ทางโครงสร้างอัตราส่วน  $L/W$  ที่มีผลต่อความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ แมกนีโตไดโอดสามขา ทำการศึกษาโดยความแตกต่างเพื่อเปรียบเทียบเอาท์พุทของ ( $\Delta I$ ) และความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กระหว่างโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ทั้งโครงสร้างที่เป็นรอยต่อแบบ P-N และ รอยต่อ Metal- Semiconductor (schottky diode)

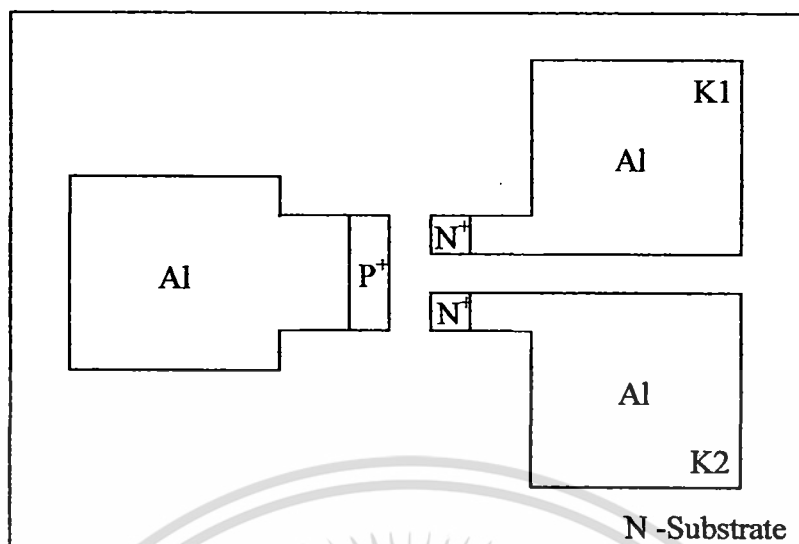
อีกทั้งบทนี้กล่าวรวมถึงรูปแบบมาส์คและวิธีการออกแบบมาส์คโดยใช้โปรแกรม Corel Draw ของแมกนีโตไดโอดทั้งสองแบบอีกด้วย

### 3.1 แมกนีโตไดโอดแบบคู่ (รอยต่อ PN)

โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสามขา ซึ่งนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยรูปนี้เป็นภาพโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดกระแสไหลตามแนวนอน โดยมีขาสองขามีขนาดสมมาตรกันและแยกออกจากกันซึ่งสร้างจากสารชนิด  $N^+$  ซึ่งเป็นขาแคโรดซึ่งมีจุดประสงค์ทำให้เกิดรอยต่อแบบ โอมีค contact ส่วนอีกหนึ่งขาซึ่งสร้างจากสารชนิด  $P^+$  จุดประสงค์ให้เกิดรอยต่อ P-N ทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดอื่น



รูปที่ 3.1 ภาพด้านบนแสดงมิติโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสามขา



รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านบนชนิดของแมกนีโตไดโอด

รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านบนชนิดของแมกนีโตไดโอดตามลักษณะการออกแบบประกอบด้วย แอนโนดรวมกันหนึ่งขา และขาแคโทดสองขา อธิบายหน้าที่ความสำคัญของแต่ละขาได้ดังนี้

K1 และ K2 เป็นขาแคโทดของไดโอดทั้งสองตัวตามลำดับ ขนาดเท่ากันแยกออกจากกัน ในสภาวะปกติ (ไม่มีสนามแม่เหล็ก) กระแสที่ไหลผ่านชั้นสารทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตั้งฉากกับ ทิศทางการไหลของกระแส แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำกับพาหะทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะเบี่ยงเบน ปริมาณของกระแสที่ชั้นสารคอลเลกเตอร์ทั้งสองขึ้นมีปริมาณไม่เท่ากัน ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมากจะทำให้ปริมาณความแตกต่างกระแสระหว่างชั้นสาร  $N^+$  ทั้งสองมีค่ามากขึ้น ด้วยระยะห่างระหว่างชั้นสารทั้งสอง มีผลต่อการเบี่ยงเบนของพาหะด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าระยะห่างระหว่างชั้นสารทั้งสองมากจะต้องใช้ปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมาก ในการทำให้พาหะเบี่ยงเบน

ขั้ว (Pad) ขั้วอลูมิเนียมสำหรับใช้ในการวัดทดสอบอุปกรณ์ ออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพื่อความคล่องตัวในการตรวจวัดทดสอบ เนื่องจากแมกนีโตไดโอดสามขาตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสของขาแคโทดของไดโอดทั้งสองตัว กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ และการแสการฉีด

### 3.2 การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection)

แมกนีโตไดโอดสามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง ( $\Delta I$ ) กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

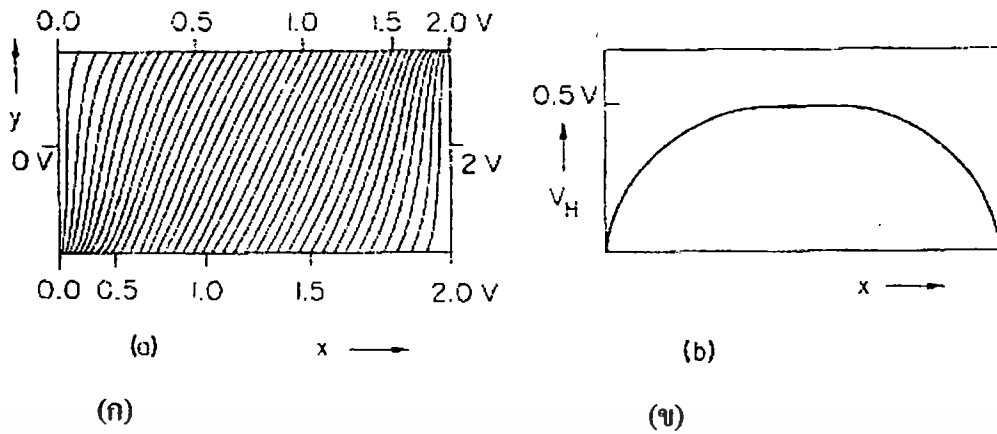
$$S = \frac{\Delta I}{\Delta B} \quad (3)$$

แทนสมการที่ 2 ลงในสมการที่ 3 จะให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์โครงสร้างแสดงได้โดยสมการที่ 4

$$S = \frac{\Delta I \cdot L \cdot \mu_p}{W} \quad (4)$$

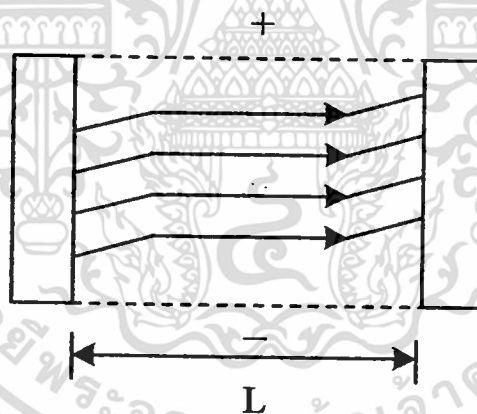
จากสมการที่ 4 สามารถอธิบายได้ว่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับระยะ L และระยะ W ในการออกแบบอุปกรณ์การกำหนดให้ระยะ W มีค่าน้อยและระยะ L ที่มีความยาวสามารถทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงขึ้นได้ ความกว้าง w กำหนดเป็นระยะระหว่างแคโทด K1 และ K2 จากสมการที่ 4 ความกว้าง W ควรจะมีค่าน้อยที่สุดซึ่งในเทคโนโลยีการสร้างสามารถสร้างได้ที่ความกว้างสั้นที่สุด คือ  $50 \mu m$  จึงทำการออกแบบที่  $50 \mu m$

ในการพิจารณาการกำหนดระยะความยาว L สามารถทำการศึกษาจากทฤษฎีฮอลล์โดยที่รูปที่ 3.4 แสดงเส้นศักย์เท่ากัน (equipotential lines) ของอุปกรณ์ฮอลล์ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทำให้พาหะเคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่คงที่ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ได้สมบูรณ์ ซึ่งจะแตกต่างกับบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์โดยสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถมีค่าได้สูงสุดรูปที่ 3.4(ข) แสดงค่าแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) ที่ตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ฮอลล์แรงดันฮอลล์มีค่าสูงที่สุดในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์และบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์จะมีค่าแรงดันฮอลล์ที่น้อยเพราะฉะนั้นการออกแบบเพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้ววัดแรงดันฮอลล์โดยส่วนใหญ่แล้วจะออกแบบให้อยู่ตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์



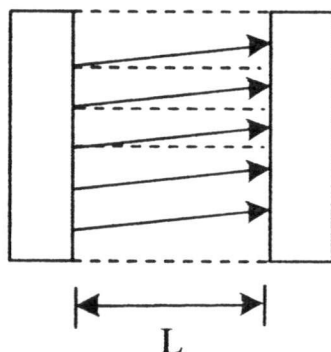
รูปที่ 3.4 (ก) เส้นสัจย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอตล์และ (ข) แรงดันฮอตล์ในบริเวณต่างๆ

จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 3.5 สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบแมกนีโตไดโอดได้โดยในการออกแบบจะกำหนดระยะความยาว  $L$  เป็นระยะระหว่างแอโนดและแคโทดของแมกนีโตไดโอดสามขา โดยอุปกรณ์ฮอตล์ที่มีความยาว  $L$  รูปที่ 3.5 แสดงการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็กได้สมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์นั้น คือ กระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางเคลื่อนที่ในแนวตรง ซึ่งทิศทางกระแสไฟฟ้าในบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์จะมีการเบี่ยงเบนเพราะสนามไฟฟ้าไม่สามารถเหนี่ยวนำได้อย่างสมบูรณ์

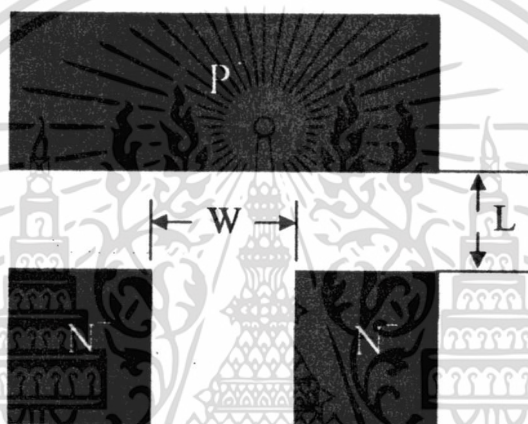


รูปที่ 3.5 การเกิดแรงดันฮอตล์ที่ระยะความยาว  $L$  ของอุปกรณ์ฮอตล์

รูปที่ 3.6 แสดงการลดลงของความยาว  $L$  ซึ่งสามารถแสดงการเบี่ยงเบนได้ชัดเจนเนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้กระแสเกิดการเบี่ยงเบนได้อย่างชัดเจน ( $\Delta I$ ) ซึ่งลักษณะของกระแสที่เบี่ยงเบนจะเป็นพื้นฐานในการออกแบบแมกนีโตไดโอดนั้นคือแสดงให้เห็นว่าระยะความยาว  $L$  ไม่สามารถที่จะออกแบบให้มีความกว้างมากได้



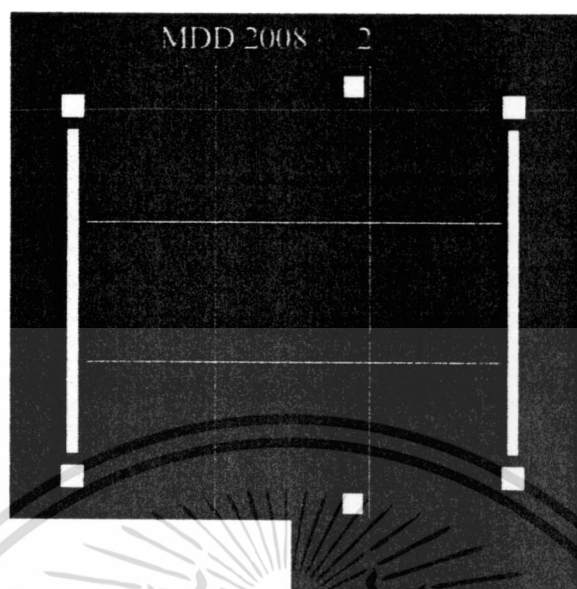
รูปที่ 3.6 การลดลงของความยาว  $L$  ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 แสดงมิติของแมกนีโตไดโอดสามขา

จากการศึกษาความกว้าง  $W$  และความยาว  $L$  ของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถนำประยุกต์ใช้ในการออกแบบแมกนีโตไดโอดสามขาได้ซึ่งสรุปได้ว่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถสูงขึ้นจากการออกแบบให้ระยะ  $W$  มีความกว้างที่น้อยและระยะ  $L$  มีค่าที่สูง โดยที่ระยะ  $L$  นั้นไม่สามารถออกแบบให้มีระยะที่ยาวมาก ได้ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบแสดงได้ดังขารูปที่ 3.7 แสดงมิติของแมกนีโตไดโอดสามขา โดยออกแบบเปรียบเทียบระยะระหว่างแคโรดทั้งสอง ( $W$ ) และระยะระหว่างแอโนดกับแคโรดการออกแบบโดยทำการออกแบบด้วยโปรแกรม COREL DRAW ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 หลังจากนั้นทำการถ่ายมาตรฐานฟิล์มเพื่อใช้ในการสร้างต่อไปหลังจากการออกแบบอุปกรณ์แมกเนติกเซ็นเซอร์ โครงสร้างแมกนีโตไดโอด แล้วซึ่งจะมีพารามิเตอร์ ความยาว  $L$  และความกว้าง  $W$  ทั้ง 1 ค่า

จากนั้นทำการออกแบบมาสก์ ซึ่งหลังจากการออกแบบมาสก์แล้วจะมีมาสก์ทั้งหมด 4 มาสก์ในการออกแบบทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 4 มาสก์ ซึ่งประกอบด้วย

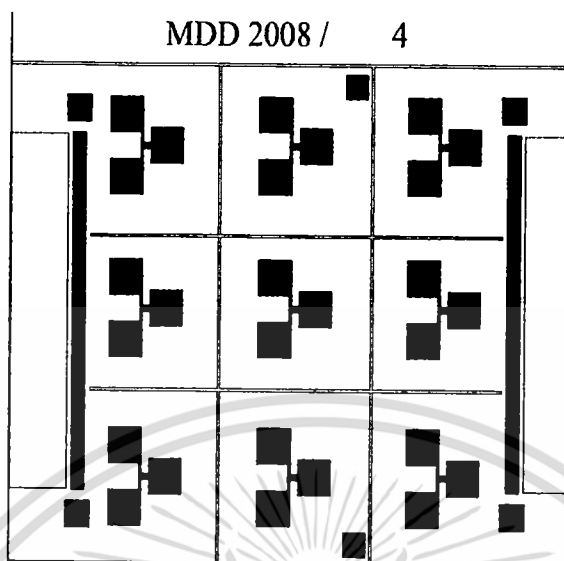


รูปที่ 3.9 มาส์กที่ 2 (แค โหวค Mask)



รูปที่ 3.10 มาส์กที่ 3 : Contact Windows Mask

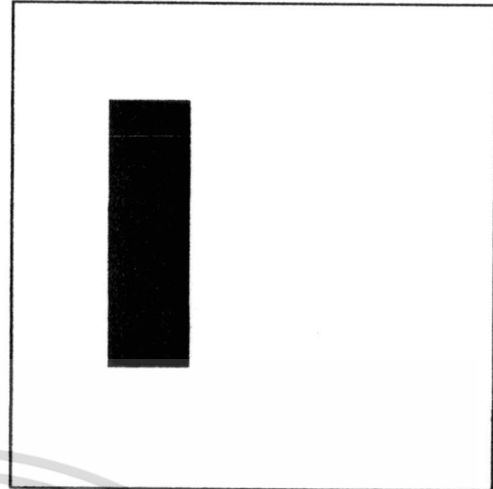
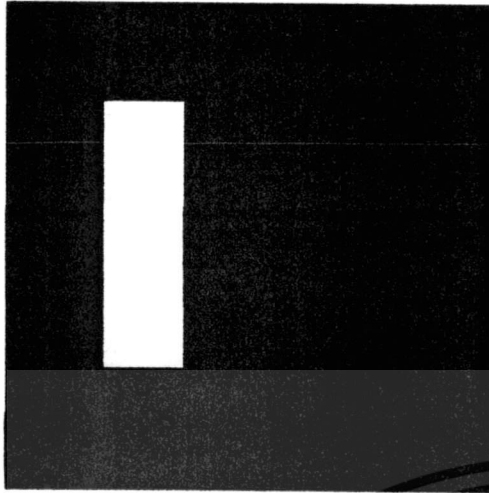
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



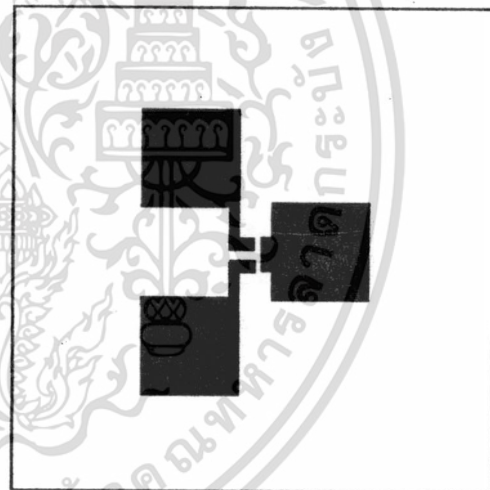
รูปที่ 3.11 มาส์คที่ 4 : Aluminum Mask

### 3.3 แมกนีโตไดโอดสามขาชนิดรอยต่อแบบโลหะ (Metal- Semiconductor)

โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสามขาซึ่งนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยรูปที่นี้เป็นภาพโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดกระแสไหลตามแนวอน โดยมีขาสองขามีขนาดสมมาตรกันและแยกออกจากกันซึ่งสร้างจากรอยต่อohmic ซึ่งเป็นขาแคโทดซึ่ง ส่วนอีกหนึ่งขาซึ่งสร้างจากรอยต่อ Metal- Semiconductor จุดประสงค้ให้เกิดรอยต่อ schottky ทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น



รูปที่ 3.15 มาส์คที่ 1 : Schottky Diode Mask

รูปที่ 3.16 มาส์คที่ 2 : Contact Windows  
Mask for Al

รูปที่ 3.17 มาส์คที่ 3 : Ohmic Contact

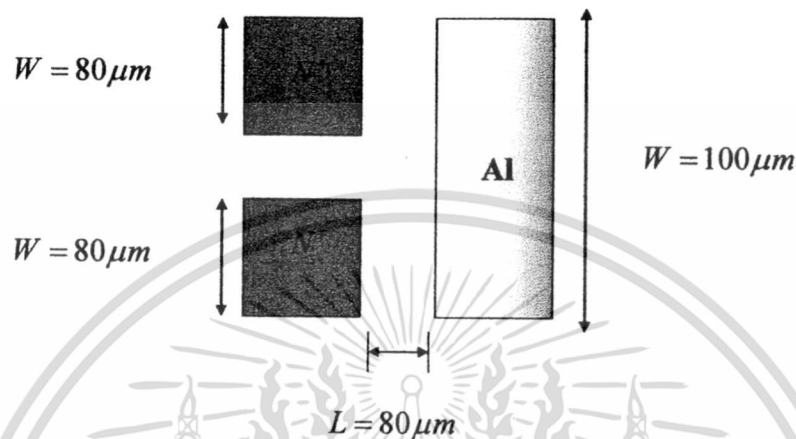
รูปที่ 3.18 มาส์คที่ 4 : Contact Mask

### 3.4 แมกนีโตไดโอดสามขาชนิดรอยต่อแบบ schottky

โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสามขาซึ่งนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากดังแสดง  
ในรูปที่ 3.19 โดยรูปนี้เป็นภาพโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดกระแสไหลตามแนวนอน โดย  
มีขาสองขามีขนาดสมมาตรกันและแยกออกจากกันซึ่งสร้างจากรอยต่อohmic ซึ่งเป็นขาแคโรตซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนอีกหนึ่งข้างซึ่งสร้างจากรอยต่อ Metal- Semiconductor จุดประสงค์ให้เกิดรอยต่อ schottky  
ทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น



รูปที่ 3.19 แสดงมิติของแมกนีโตไดโอดสามขาชนิดรอยต่อแบบโลหะ (Metal- Semiconductor)

การออกแบบแมกนีโตไดโอดสามขาที่มีรูปแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแสดำหนดระยะความกว้างเบส  $L = 80 \mu\text{m}$  โดยที่ขั้วแคโทดมีขนาดเท่ากันและสมมาตรกันการออกแบบมาส์คของไดโอดสามขาทำการออกแบบด้วยโปรแกรม COREL DRAW หลังจากนั้นทำการถ่ายมาส์คลงบนฟิล์มเพื่อใช้ในการสร้างต่อไป

ในการออกแบบทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 4 มาส์ค ซึ่งประกอบด้วย ได้แก่

มาส์คที่ 1: เป็นลวดลายเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างส่วน รอยต่อ Ohmic โดยการสร้าง Film ด้วย

วิธีการ Dope n+ บน ชั้นสาร Si

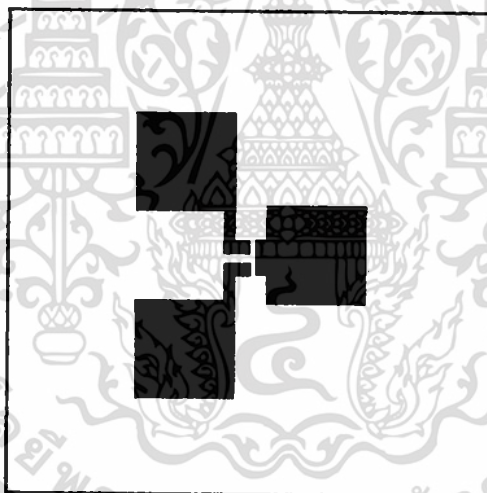
มาส์คที่ 2 : เปิด Contact Al

มาส์คที่ 3: Contact Windows Mask for Al โดยกัลดาวดต้นแบบที่ใช้สร้างขั้ว



รูปที่ 3.15 มาส์กที่ 1 : Ohmic Mask

รูปที่ 3.16 มาส์กที่ 2 : Contact AI



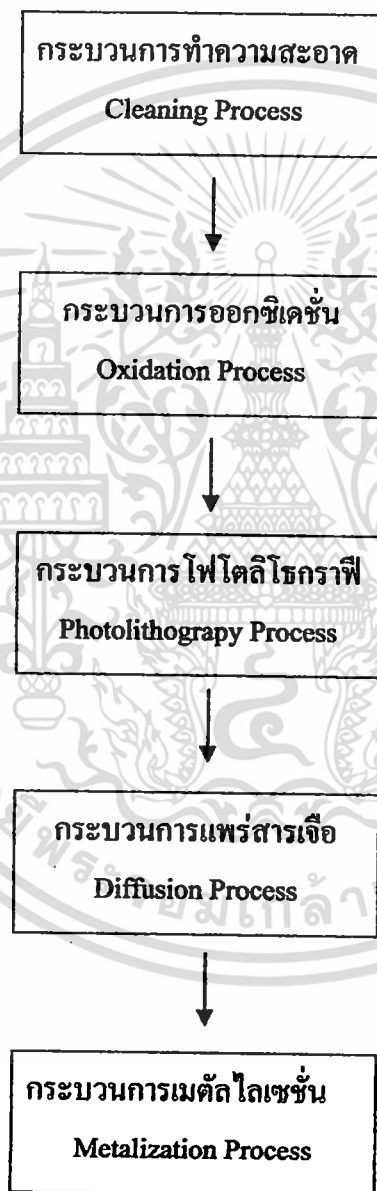
รูปที่ 3.17 มาส์กที่ 3 Contact Windows Mask for AI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอด

เป็นขั้นตอนหรือกระบวนการที่ถือว่ามีสำคัญที่สุดก็ว่าได้ เพราะอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติหรือการทำงานที่จะไปไปตามหลักการและทฤษฎีต่างๆ ได้อย่างถูกต้องนั้นก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการนี้ จึงควรมีการศึกษาให้มีความรู้ความเข้าใจถึงกระบวนการวิธีสร้างเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพออกมาใช้งาน



รูปที่ 4.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 กระบวนการทำความสะอาด(Cleaning Process)

กระบวนการทำความสะอาดมีเป้าหมายหลัก คือ กำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอนเช่น กำจัดฝุ่น กำจัดไขมัน กำจัดเศษ โลหะ เพื่อความสะอาดของแผ่นซิลิคอนก่อนลงมือทำการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

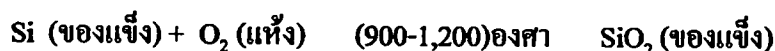


รูปที่ 4.2 กระบวนการทำความสะอาด

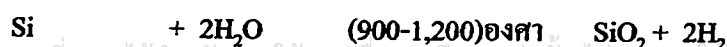
#### 4.2 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation Process)

กระบวนการออกซิเดชัน คือ การก่อตัวของซิลิคอนไดออกไซด์บนพื้นผิวซิลิคอน โดยที่ซิลิคอนออกในบรรยากาศของออกซิเจน :O<sub>2</sub> และน้ำ:H<sub>2</sub>O ที่อุณหภูมิสูงประกอบด้วย

##### 1. Wet Oxidation



##### 2. Dry Oxidation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography Process) คือกระบวนการเกี่ยวกับการส่งผ่านลวดลาย (pattern) จากมาร์คลงไปยังบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

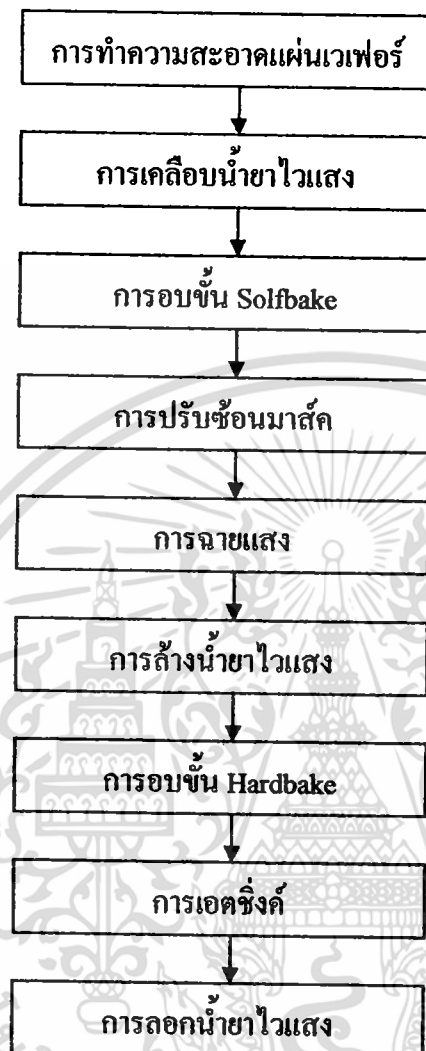
กระบวนการ Photolithography ต้องการห้องที่สะอาดสำหรับการปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในชั้นคอนน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียหายที่เกิดขึ้นควรควบคุมไม่ให้เกิน 10% ไมเช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะมีการมาส์คที่ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50% ดังนั้นการที่ห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับกระบวนการ Photolithography การสร้างห้องสะอาดส่วนมากจะเป็นแบบ Vertical Laminar Flow ที่มีการกรองฝุ่นออกจากอากาศ

เพื่อให้เป็นห้องสะอาดในระดับตั้งแต่ Class10K-Class1 ดังแสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 7 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)

## กระบวนการ Photolithography Process โดยขั้นตอนพื้นฐานต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process

### 4.3.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์(Wafer Cleaning)

ขั้นตอนแรกของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี คือ การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดอยู่บนผิวเวเฟอร์ เช่น โลหะ ฟุ้งละออง สารอินทรีย์หรืออไอออนต่างๆ สิ่งสำคัญของกระบวนการ Photolithography สารละลายที่สำคัญมากและใช้บ่อยที่สุดก็คือน้ำ DI(deionized) ซึ่งเป็นน้ำที่ทำให้บริสุทธิ์และผ่านตัวกรองหรือฟิลเตอร์เพื่อกรองฟุ้งละออง อนุภาคและสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำ DI เป็นน้ำที่มีความต้านทานสูงมาก

มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวมบนแผ่นผลึกเลขแต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้นได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

ดังนั้นการใช้กระจกมาสก์ตั้งแต่มาสก์ 2 เป็นต้นไปก่อนที่จะฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับซ็อนมาสก์ เพื่อให้ลวดลายบนกระจกมาสก์ซ้อนทับกับลวดลายที่อยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ซึ่งทำให้ขบวนการโฟโตกราฟฟีสามารถเปิดชั้นออกไซด์ได้อย่างถูกต้อง และเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการปรับซ็อนจึงใช้อุปกรณ์ช่วยเรียกว่า ตัวปรับซ็อนมาสก์ ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือ นำแผ่นผลึกวางและติดกับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับเลื่อนได้ในแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงนอกจากนี้ยังปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาสก์จะถูกยึดให้อยู่เหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนแผ่นโฟโตมาสก์พร้อมกับการปรับแผ่นเลื่อนแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงจนกระทั่งภาพลวดลายที่บนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาสก์ซ้อนทับกันตรงตำแหน่งที่ถูกต้องจากนั้นทำการปรับแผ่นผลึกเลื่อนขึ้นในแนวสูงจนแนบสนิทกับกระจกมาสก์ดังนั้นเราก็จะได้ตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อเตรียมขั้นตอนการฉายแสงต่อไป

#### 4.3.5 การฉายแสง(Exposure)

การฉายแสง(Exposure) คือขั้นตอนที่ต่อจากการปรับซ็อนมาสก์(Alignment) วิธีการก็คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงย่านอุลตราไวโอเลตเอ็็กโพสหรือฉายผ่านลวดลายฟิล์มโลหะบนกระจกมาสก์ที่ทำการอัลไลน์กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ด้านบนมีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่แสงจะผ่านลวดลายหรือไม่ผ่านลวดลายฟิล์มโลหะด้านบนจะเป็นตัวบังแสงไว้ส่วนที่ผ่านได้จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสงหรือโฟโตริซิสบนผิวซิลิคอน การเอ็็กโพสหรือฉายแสงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งพอให้แสงทำปฏิกิริยากับโฟโตริซิสอย่างสมบูรณ์

#### 4.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง(Development)

Development เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงด้วยน้ำยาDeveloper โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการDevelop ส่วนที่ถูกแสงจะละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่

#### 4.3.7 การอบชั้น Hardbake

หลังจากการฉายแสงและทำการ Development ขั้นตอน Hardbakeing จะช่วยทำให้โฟโตริซิส ติดกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดีขึ้น ขั้นตอนนี้จะอบในเตาที่อุณหภูมิ 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) ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดคือการกัดชั้นของซิลิคอน ไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องหรือพื้นที่ให้ได้ตามต้องการ สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีส่วนผสมหลักคือกรดไฮโดรฟลูอริกหรือ HF จะเป็นสารละลายที่ใช้กัดซิลิคอน ไดออกไซด์โดยมีอัตราการกัดอยู่ในช่วง 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

เมื่อลอกชั้น ไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ (microscope) เพื่อดูว่ามีการกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่ติดไม่แน่นหรือเกิดการกัดที่มากเกินไปถ้าเสียหายมากอาจต้องกลับไปเริ่มทำใหม่

#### 4.3.10 กระบวนการแพร์สารเจือ (Deposition)

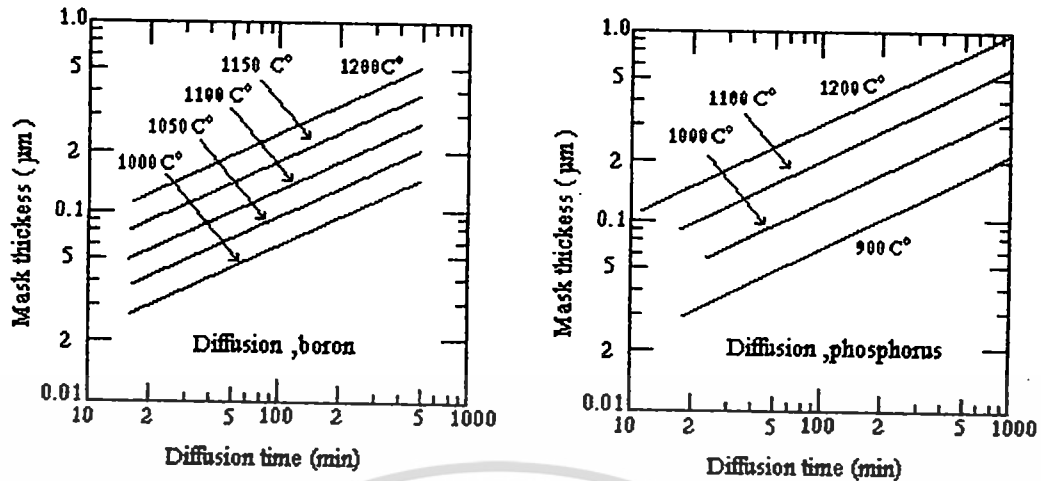
กระบวนการแพร์สารเจือเป็นการแพร์สารเจือลงในแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการแพร์ด้วยอุณหภูมิสูงทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (Source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรองและถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็น ขึ้น

ขั้นตอนการแพร์สารเจือทำได้โดยกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งเป็นแหล่งเจือ โบรอน (Boron Source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และฟอสฟอรัสใช้สร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปในบรรยากาศของสารเจือทำให้อะตอมของสารเจือเคลื่อนที่เข้าไปยังฐานรองความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิตลอดจนระยะเวลาในการแพร์ที่มีผลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพร์ ในขบวนการแพร์สารเจือแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การแพร์สารเจือ ชั้นต้น (Pre-deposition) และการขับลึก (Drive-in)

##### 4.3.10.1 การแพร์สารเจือชั้นต้น (Pre-deposition)

การแพร์สารเจือชั้นต้น ในอุณหภูมิสูงเป็นการควบคุมปริมาณสารเจือ โดยการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแพร์สารเจือ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆจะมีปริมาณสารเจือสูงสุดในการแพร์เข้าไปยังผลึกฐานรอง ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการแพร์เข้าไปในของแข็ง (Solid solubility) และปริมาณสารเจือที่ผลึกฐานรองจะเรียกว่าความเข้มข้นผิว (Surface concentration) โดยความสัมพันธ์ของค่า Solid solubility กับอุณหภูมิในการแพร์สามารถแสดงดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของ โบรอนและฟอสฟอรัส

#### 4.3.10.2 การขัปลึก

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารเจือบริเวณผิวที่ได้จากขั้นตอนการแพร่ชั้นต้น แพร่ลงไปในเนื้อสารมากขึ้น ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นซิลิคอน

#### 4.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Metalzation Process)

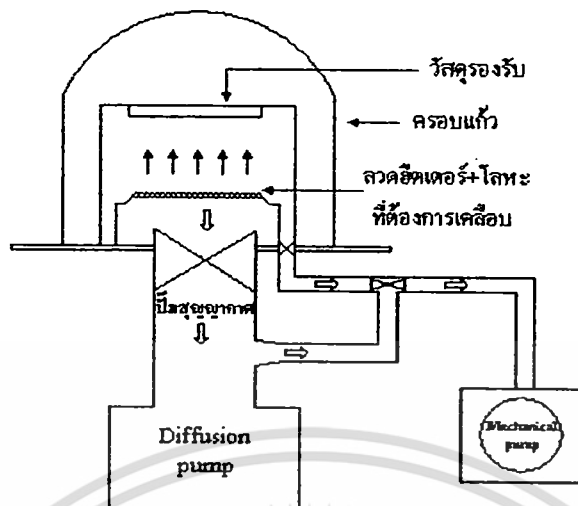
ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ตามลำดับขั้นตอนต่างๆ จนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ละส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงแยกกันอยู่ในสภาพยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้จึงจำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Metalzation Process)ก่อน

กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Metalzation Process) คือขบวนการสร้างชั้นของ โลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อกายใน สำหรับการเลือกโลหะเพื่อใช้เคลือบแผ่นซิลิคอนเพื่อให้เป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกรอยต่อโอห์มมิก(Ohmic contact) หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อกายในของวงจรรวมซึ่งมีคุณสมบัติเช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูงติดแน่นกับผิวซิลิคอนไดออกไซด์และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำ ได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ได้แก่ อะลูมิเนียม(AL),ทอง(Au)และเงิน Ag เป็นต้น

เทคนิคในกระบวนการเมทัลไลเซชันใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศ โดยใช้เทคนิคกระบวนการระเหยในสุญญากาศ(Evaporation)ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลต่อการแพร่กระจายไอออนแต่มีข้อเสียตรงอายุการใช้งานของไส้หลอดจะสั้น สำหรับการเคลือบโลหะทำได้โดยการทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจากไส้ที่ทำจากทังสเตท(Tungstan)หรือ(Molynum)

#### เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

เมื่อไส้หลอดถูกทำให้ร้อนโดยผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะ จะถูกควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไส้เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้เงินเป็นของเหลวที่ติดกับไส้ก็จะระเหยเป็นไอพุ่งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางไว้ใน Chamber

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าระเหยกลายเป็นไอก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ไส้ต้องเลือกให้มีขนาดที่พอเหมาะสมกับสารที่ใช้ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการและพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร AL,Au,Ag,Pd เป็นต้น

#### 4.5 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบกึ่งนึ่งรอยต่อแบบพีเอ็น(P-N)

##### การเตรียมแผ่นซิลิคอน

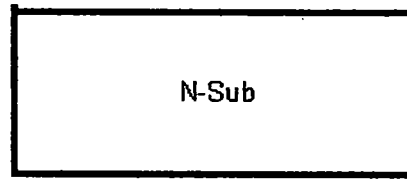
ในการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบกึ่งนึ่ง ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ค่า Resistivity ความหนาได้ 19-25  $\Omega$ -cm ความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นมีความหนาประมาณ 400  $\mu$ m

##### 1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

- คั้มใน Piranya ( $3H_2SO_4 : H_2O_2$  ) 10 นาที
- ล้างในน้ำ DI (ให้น้ำไหลผ่าน) 5 นาที
- คั้มใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง ประมาณ 4 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

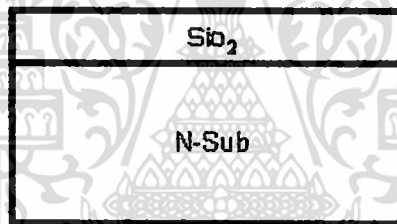
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่สอง ประมาณ 4 วินาที
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 4.11 แผ่นซิลิคอนที่ได้ทำความสะอาดแล้ว

## 2. กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

- dry oxidation ที่อุณหภูมิ  $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$  1 ชั่วโมง 30 นาที
- wet oxidation ที่อุณหภูมิ  $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$  1 ชั่วโมง 30 นาที
- dry oxidation ที่อุณหภูมิ  $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$  1 ชั่วโมง 30 นาที

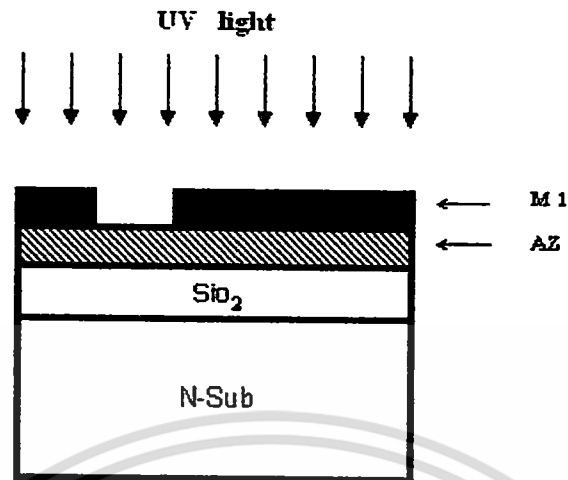


รูปที่ 4.12 ซิลิคอน ไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน

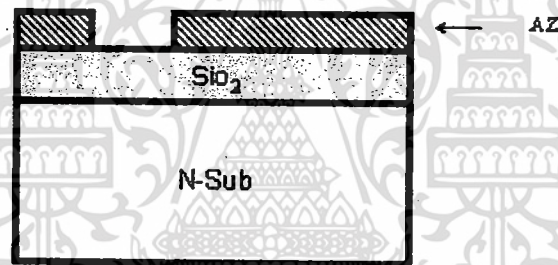
## 2. กระบวนการ โฟโวลิตโทกราฟีที่ มาส์คที่ 1

- ทำการถ่ายมาส์คไปยังผิวน้ำของแผ่นซิลิคอน
- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ,1350) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  20 นาที
- การปรับชั้นมาส์ค (Alignment (M 1))
- การฉายแสง (UV Expose) 20 วินาที
- Development1 15วินาที
- Development2 15วินาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



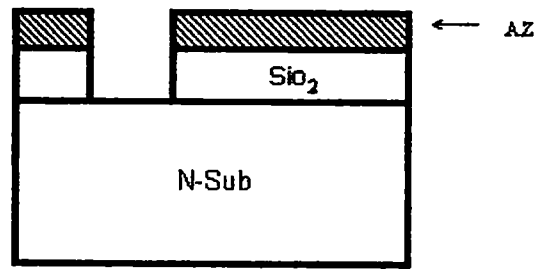
รูปที่ 4.13 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 1



รูปที่ 4.14 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟีและได้มีการ Development แล้ว

### 3. กระบวนการ Etching

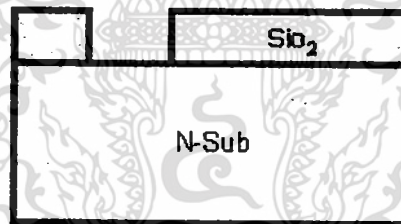
- จุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>



รูปที่ 4.15 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

#### 4. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

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

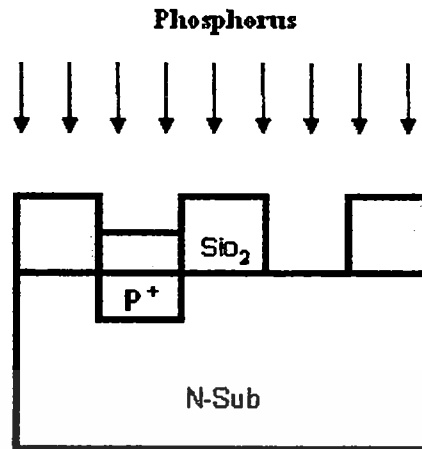


รูปที่ 4.16 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

#### 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  $N_2$

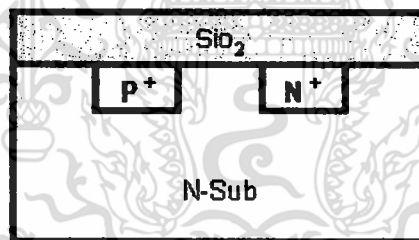
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ

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

- Dry Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min 15 นาที
- Wet Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1000 cc/min 20 นาที
- Dry Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min 15 นาที



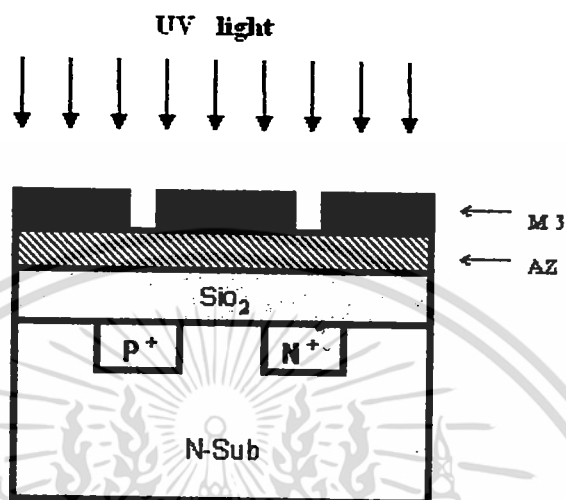
รูปที่ 4.24 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in

## 12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3 (Contact)

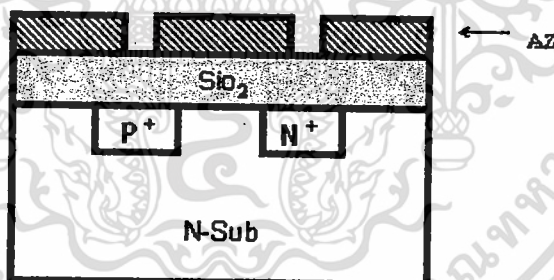
- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95<sup>o</sup>C 20 นาที
- การปรับชั้นมาสค์ (Alignment (M 3))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development1 15วินาที
- Development2 15วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนเตรียมทหารใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่  $95^\circ C$  20 นาที



รูปที่ 4.25 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 3

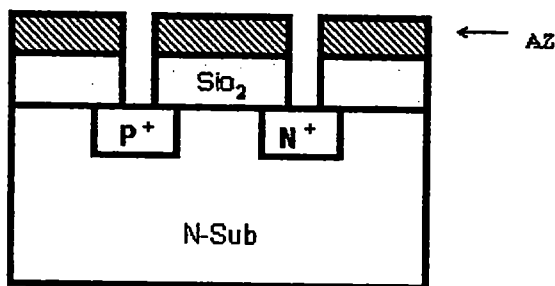


รูปที่ 4.26 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโต้ลิโทกราฟี

### 13. กระบวนการ Etching

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

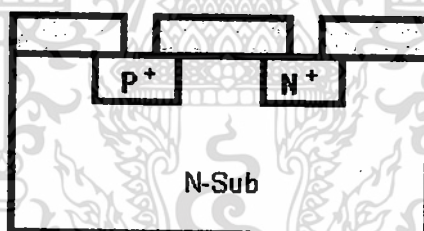
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แผ่นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

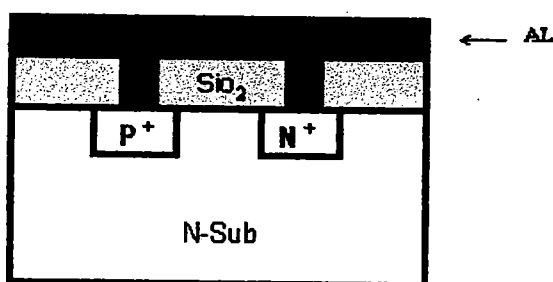
#### 14. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

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



รูปที่ 4.28 แผ่นซิลิกอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

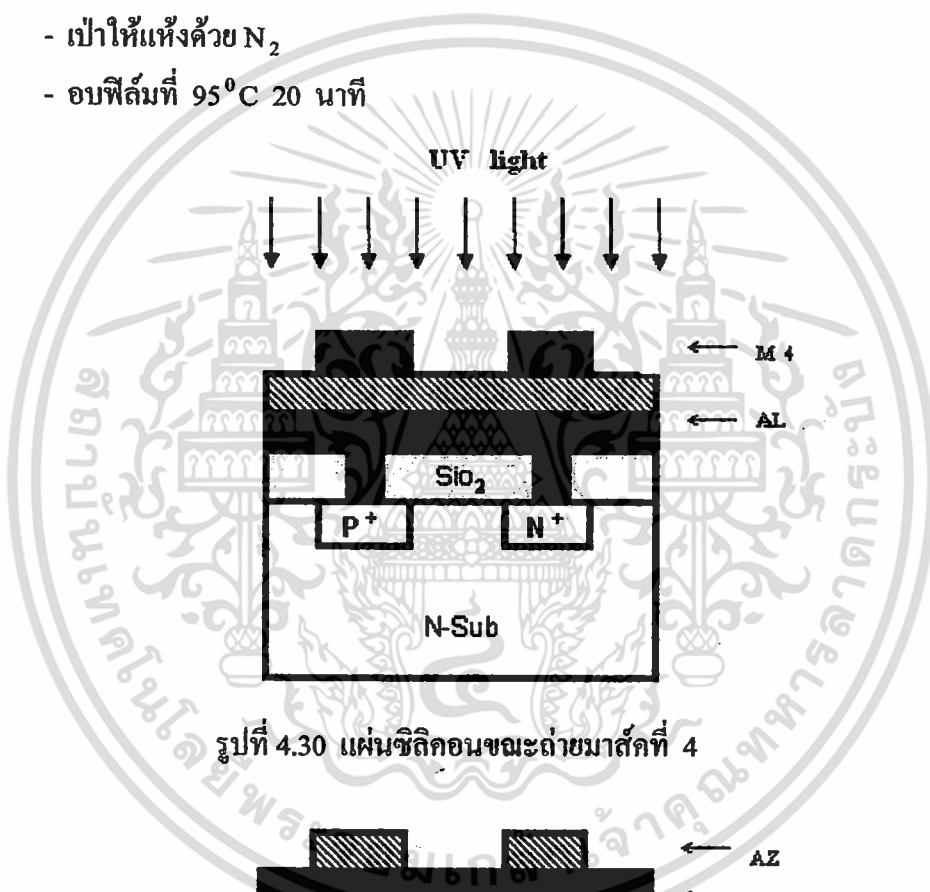
#### 15. การเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator



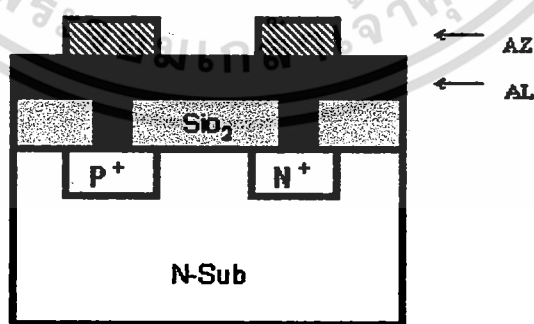
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.29 แผ่นซิลิกอนหลังเคลือบอลูมิเนียม

### 16. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาตรฐานที่ 4 (AL)

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับชั้นอนมาส์ค (Alignment (M 4))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที



รูปที่ 4.30 แผ่นซิลิกอนขณะฉายมาสก์ที่ 4

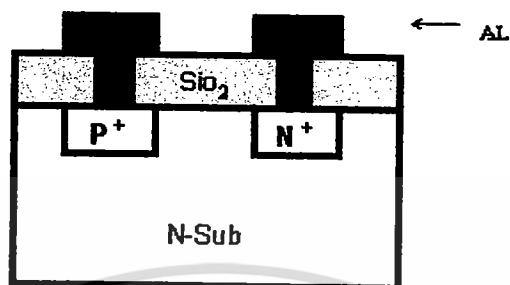


รูปที่ 4.31 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 19. Sintering

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



รูปที่ 4.34 แมกนีโตไดโอดแบบคู่เสร็จสมบูรณ์

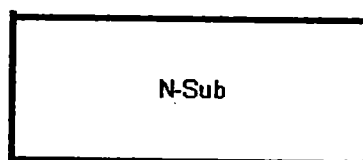
#### 4.6 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่ชนิดรอยต่อแบบ Schottky Diode (แบบโลหะ 2 ชนิด)

##### การเตรียมแผ่นซิลิคอน

ในการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่ ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ค่า Resistivity ความหนาได้  $19\text{-}25\ \Omega\text{-cm}$  ความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นมีความหนาประมาณ  $400\ \mu\text{m}$

##### 1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

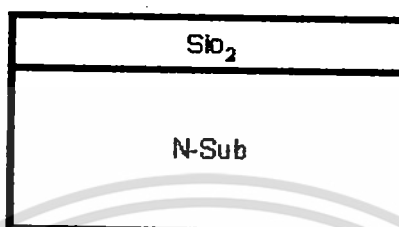
- ต้มใน Piranya ( $3\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$ ) 10 นาที
- ล้างในน้ำ DI (ให้น้ำไหลผ่าน) 5 นาที
- ต้มใน Trichloroethylenc 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง ประมาณ 4 วินาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่สอง ประมาณ 4 วินาที
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 4.35 แผ่นซิลิคอนที่ได้ทำความสะอาดแล้ว ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

- dry oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที
- wet oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที
- dry oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที

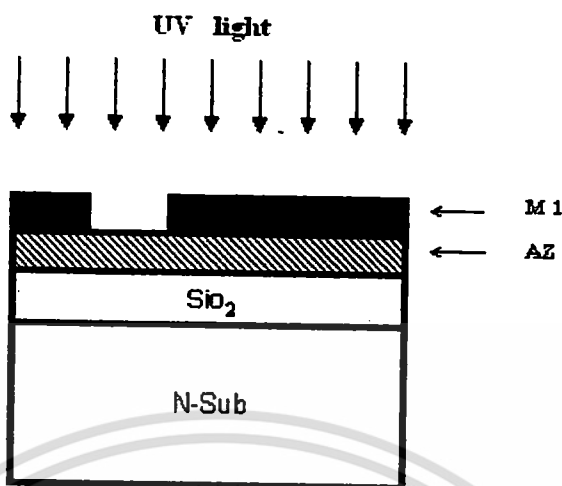


รูปที่ 4.36 ซิลิกอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอน

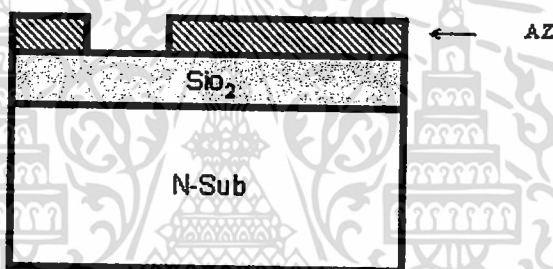
## 2. กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี มาตรฐานที่ 1

ทำการถ่ายมาสก์ไปยังผิวน้ำของแผ่นซิลิกอน

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ,1350) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95 °C 20 นาที
- การปรับชั้นมาสก์ (Alignment (M 1))
- การฉายแสง (UV Expose) 20 วินาที
- Development1 15 วินาที
- Development2 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่ 95 °C 20 นาที



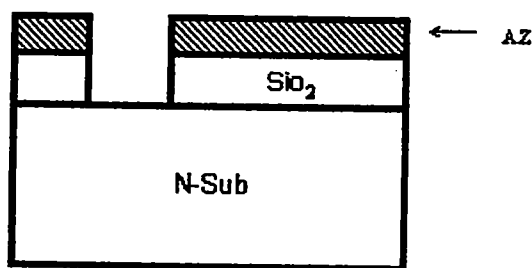
รูปที่ 4.37 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายภาพมาส์คที่ 1



รูปที่ 4.38 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโต้ลิโทกราฟีและได้มีการ Development แล้ว

3. กระบวนการ Etching

- จุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

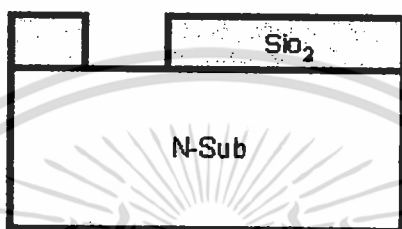


รูปที่ 4.39 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

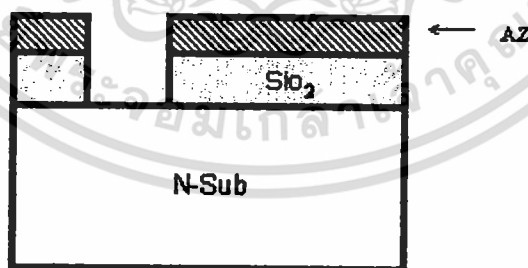
- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 4.40 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

#### 5. กระบวนการ Etching

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

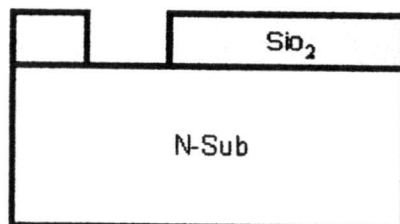


รูปที่ 4.41 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

#### 6. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

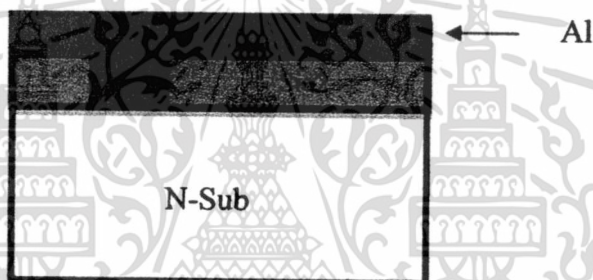
- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง

- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 4.42 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

#### 7. การเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator

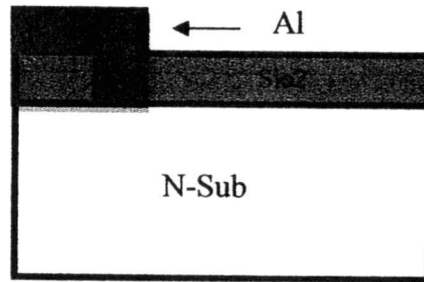


รูปที่ 4.43 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม

#### 8. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2 (Al)

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  20 นาที
- การปรับซ็อนมาส์ค (Alignment (M 2))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  20 นาที

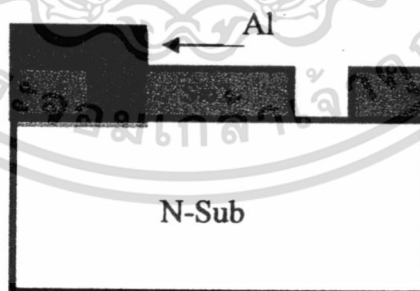
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 Pattern Al

### 9. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3

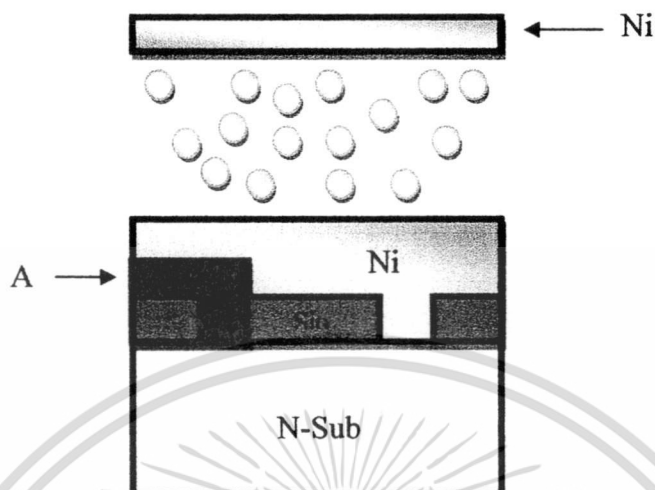
- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับซ็อนมาส์ค (Alignment (M 2))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที



รูปที่ 4.45 Ni Contact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

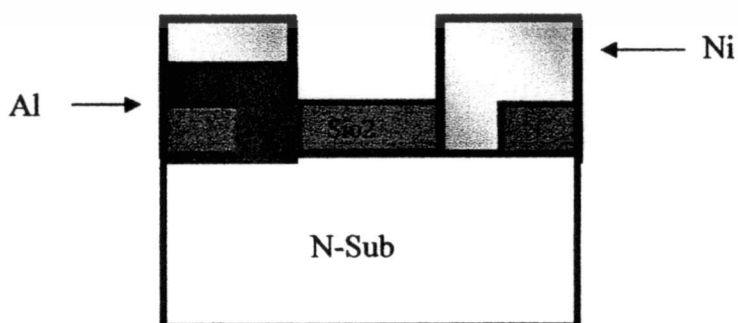
## 9. Sputtering Ni



รูปที่ 4.46 sputtering Ni

## 10. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 4

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับชั้นมาสค์ (Alignment (M 2))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **รูปที่ 4.47 Pattern Ni** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 กระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบกึ่งนึ่งรอยต่อแบบ Schottky Diode

### การเตรียมแผ่นซิลิคอน

ในการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบกึ่งนึ่ง ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ค่า Resistivity ความหนา  
ได้ 19-25  $\Omega$ -cm ความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นมีความหนาประมาณ 400  $\mu$ m

#### 1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

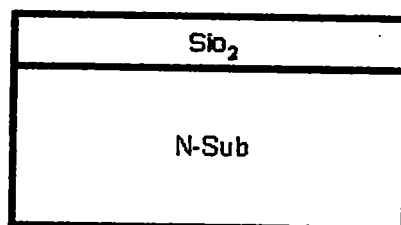
- คัดใน Piranya ( $3\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$ ) 10 นาที
- ล้างในน้ำ DI (ให้น้ำไหลผ่าน) 5 นาที
- คัดใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง ประมาณ 4 วินาที
- ล้างในน้ำ DI แก้วที่สอง ประมาณ 4 วินาที
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$



รูปที่ 4.48 แผ่นซิลิคอนที่ได้ทำความสะอาดแล้ว

#### 2. กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

- dry oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที
- wet oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที
- dry oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที



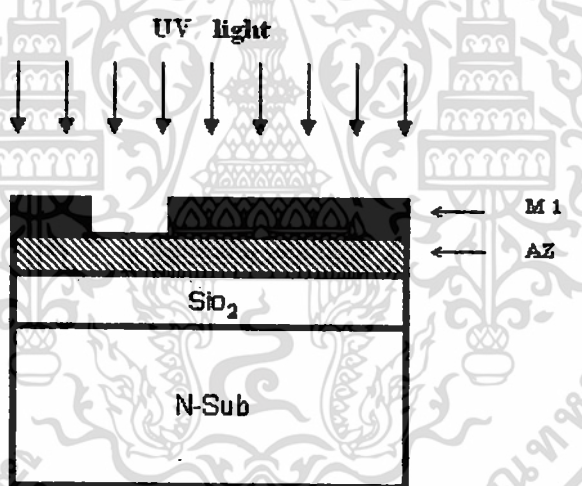
รูปที่ 4.49 ซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

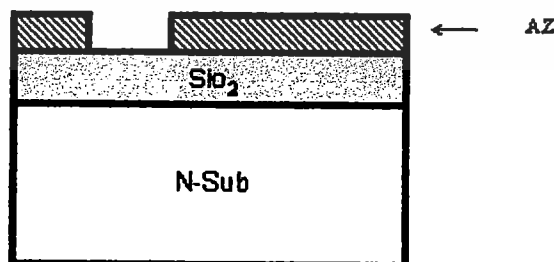
### 3. กระบวนการ โฟโวลิตโทกราฟี มาส์คที่ 1

ทำการถ่ายมาส์คไปยังผิวงหน้าของแผ่นซิลิคอน

- 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 4.50 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาส์คที่ 1

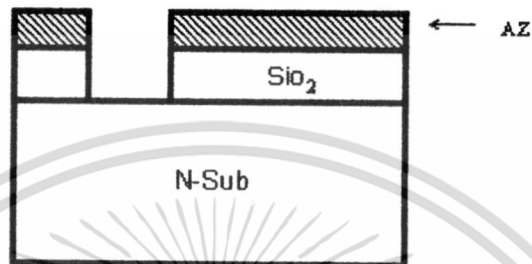


รูปที่ 4.51 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโวลิตโทกราฟีและได้มีการ Development แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. กระบวนการ Etching

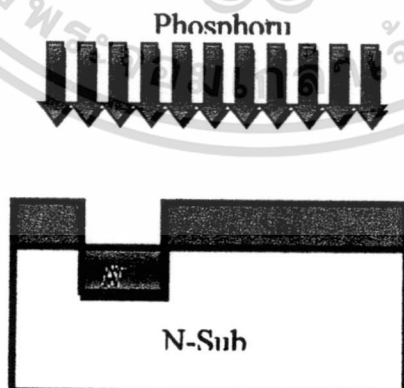
- จุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 4.52 แผ่นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

#### 5. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (Diffusion)

- Diffusion  $N_2$  800 cc/min 25 นาที
- $O_2$  1200 cc/min 10 นาที
- จุ่มในสารละลาย HF 5 %
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

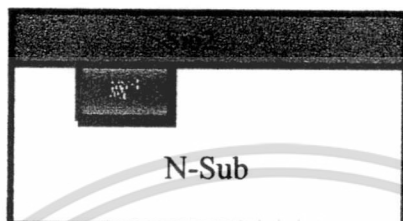


รูปที่ 4.53 Dope N+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

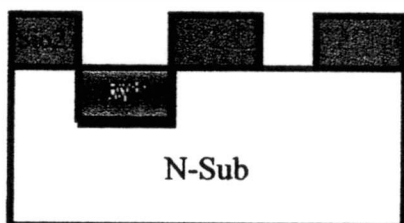
- Dry Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min 15 นาที
- Wet Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1000 cc/min 20 นาที
- Dry Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min 15 นาที



รูปที่ 4.54 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in

## 7. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2

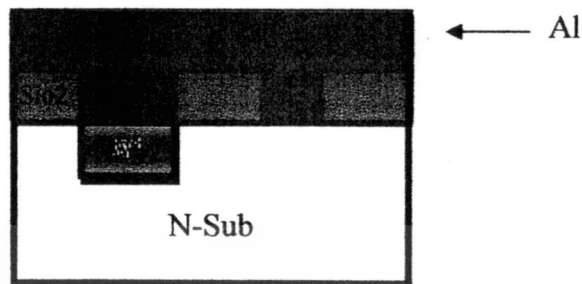
- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95<sup>o</sup>C 20 นาที
- การปรับชั้นมาสค์ (Alignment (M 2))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development1 15วินาที
- Development2 15วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟิล์มที่ 95<sup>o</sup>C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



รูปที่ 4.55 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

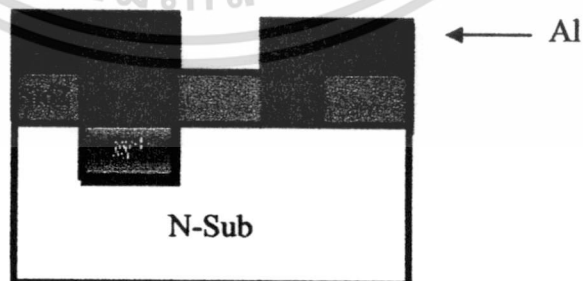
### 5. การเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator



รูปที่ 4.56 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม

### 6. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3 (Al)

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับซ็อนมาส์ค (Alignment (M 2))
- การฉายแสง (UV. Expose)
- Development
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที

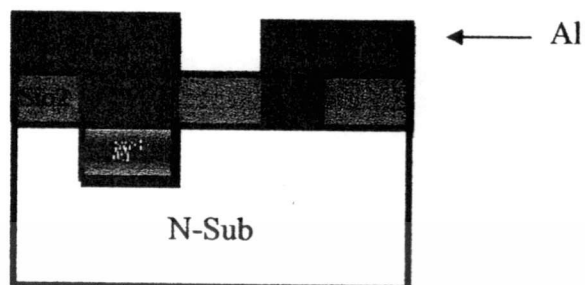


รูปที่ 4.57 Pattern Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. Sintering

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



รูปที่ 4.58 แมกนีโตไดโอดแบบคู่เสร็จสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการประยุกต์ใช้งาน

โครงการนี้เป็นการศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งเป็นการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับผิวของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ จากหลักการดังกล่าวทำให้ทราบว่าตัวแมกนีโตไดโอดแบบคู่สามารถอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ให้มีแรงลอเรนซ์มากระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเกิดการเบี่ยงเบน เป็นเหตุให้มีปริมาณของกระแสไหลที่ ขา แคโรด 1 กับขาแคโรด 2 ต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบประยุกต์ใช้วัดค่าของสนามแม่เหล็ก

จากการที่ได้ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้ทำให้ได้สร้างอุปกรณ์แมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบคู่ทั้งสองชนิดผลจากการสร้างที่ระยะ  $L=60\mu\text{m}$  และ  $L=80\mu\text{m}$  ลงบนแผ่นซิลิกอนแผ่นเดียวกันจะได้รูปดังรูปที่ 5.1 (ก) ทั้งสิ้น 16 ตัวและเนื่องจากทำการ Evaporation Al หลายกลุ่มในครั้งเดียวและเพื่อไม่ให้เป็นการเสียเวลาจึงจำเป็นต้องยอมเสียอุปกรณ์บางตัวไป ในส่วนหลังจากการสร้างเป็นชิ้นงานเรียบร้อยแล้วรูป (ข) เป็นรูปการมองหรือซูมได้กล้องเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างว่าไม่มีการเกินกันของการอะลายมาร์คต่างๆและพบว่าอุปกรณ์ส่วนใหญ่มีความถูกต้องในการสร้างมาก



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 5.1 (ก) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง P-N Junction ที่ได้หลังจากขบวนการสร้าง

(ข) โครงสร้าง P-N Junction ที่ระยะ  $L=50\mu\text{m}$  และ  $W=50\mu\text{m}$

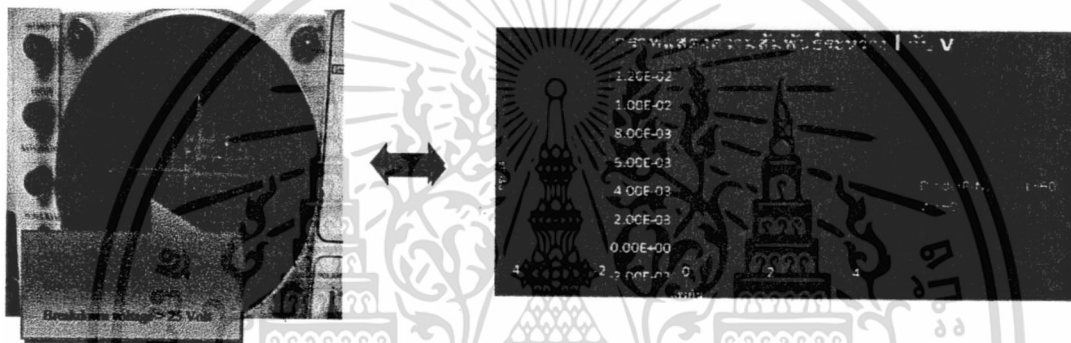
(ค) โครงสร้าง P-N Junction ที่ระยะ  $L=60\mu\text{m}$  และ  $W=60\mu\text{m}$

(ง) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง P-N Junction หลังจาก Packaging

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 ที่ระยะห่าง $L=60\ \mu\text{m}$

หลังจากการสร้างอุปกรณ์บนแผ่นซิลิกอนเรียบเรียบร้อยแล้วเราจะทำการดูว่า P-N Junction ที่ได้ทำการสร้างสมบูรณ์ดังที่ต้องการหรือไม่ผลของการวัดภายใต้เครื่องมือวัดเป็นดังรูปที่ 5.3 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง ( $L$ ) =  $60\ \mu\text{m}$  ส่วนในรูปที่ 5.3 (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องบันทึกผลที่ระยะห่าง ( $L$ ) =  $60\ \mu\text{m}$  เป็นรูปของการ Plot กราฟจากค่าที่เก็บมาได้จากเครื่องวัดและได้นำมาทำเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5.3 (ข) แสดงให้เห็นว่ามีรอยต่อที่เป็น โครงสร้างของ P-N Junction อย่างที่ต้องการ และกระแสรั่วไหลทางด้าน Revers Bias มีค่าต่ำยังมีแรงดัน Brack Down สูงมากกว่า  $25\text{V}$



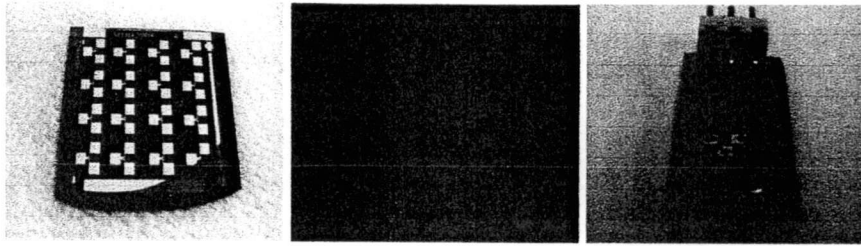
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.3 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง ( $L$ ) =  $60\ \mu\text{m}$

(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง ( $L$ ) =  $60\ \mu\text{m}$

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงภาพถ่ายหลังการสร้างเมกนีโค ไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วย โครงสร้าง Schottky Diode ที่ได้จากหลังขบวนการสร้างในรูปที่ 5.4 (ก) และได้ทำการขมเพื่อเป็นการตรวจสอบโครงสร้างอีกครั้งได้โครงสร้าง Schottky Diode ที่ระยะ  $L=80\ \mu\text{m}$  และ  $W=80\ \mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ข) ส่วนในรูปที่ 5.4 (ค) เป็นรูปที่ได้ทำการ เชื่อมต่อสายและตรวจเช็คจึงได้ทำการ Packaging ด้วย เรซินอีกครั้งเพื่อป้องกันเสียหายของอุปกรณ์ในการทำงานหรือตรวจวัดในครั้งต่อไป



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.4 (ก) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Schottky Diode ที่ได้จากหลังขบวนการสร้าง

(ข) โครงสร้าง Schottky Diode ที่ระยะ  $L=80\mu\text{m}$  และ  $W=80\mu\text{m}$

(ค) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Schottky Diode หลังจาก Packaging

### 5.2 คุณลักษณะความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของไดโอดโครงสร้างแบบ Schottky Diode



(ก)

(ข)

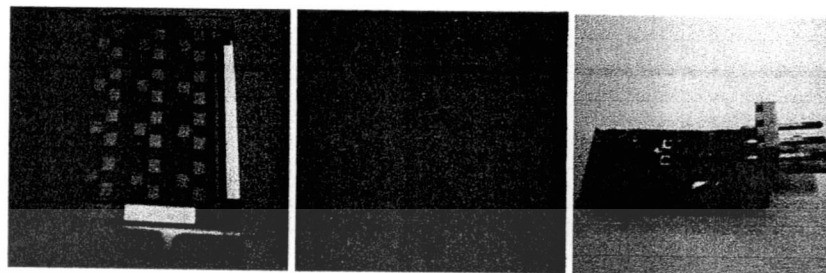
รูปที่ 5.4 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง ( $L$ ) =  $80\mu\text{m}$

(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง ( $L$ ) =  $80\mu\text{m}$

ในรูปที่ 5.5 (ก) เป็นการแสดงหน้าจอของเครื่องมือวัดที่ได้ทำการวัดอุปกรณ์แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Schottky Diode พบว่าหลังจากการสร้างจะได้กราฟทางด้าน Forward Bias มีการเกิดเป็น โครงสร้าง Schottky Diode ดังต้องการ โดยตรวจสอบทางด้าน Reverd Bias อีก

นอกจากนี้เอกสารหลังรณรงค์ให้รื้อถอนสิ่งผิดกฎหมายที่มีอยู่ทุกแห่งในกรุงเทพมหานคร และการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งยังมี Break Down ที่ยังใช้การได้ตามวัตถุประสงค์ แม้ว่าจะมี Break Down ไม่สูงมากเท่าในความเป็นจริงก็ตาม



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.5 (ก) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Metal – Semiconductor ที่ได้จากหลังขบวนการสร้าง

(ข) โครงสร้าง Metal – Semiconductor ที่ระยะ  $L=80\mu\text{m}$  และ  $W=100\mu\text{m}$

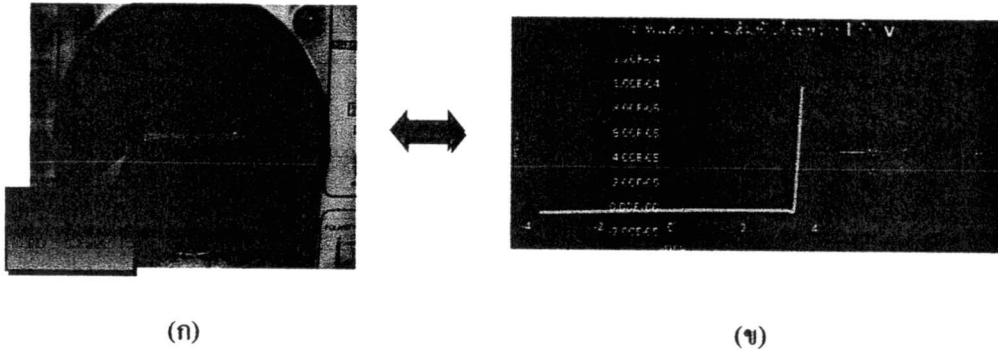
(ค) แมกนีโตไดโอดที่ได้จากการสร้างด้วยโครงสร้าง Metal – Semiconductor หลังจาก Packaging

หลังการสร้างเรียบร้อยแล้ว ดังรูป 5.5(ก) และได้ทำการถ่ายภาพได้ก็ต้งพบว่าสร้างถูกต้องตามต้องการจึงได้ทำการเชื่อมต่อสายและ Packaging จนเรียบร้อยดังรูปที่ 5.5 (ค) เป็นอุปกรณ์ที่พร้อมนำไปใช้งานต่อไป

### 5.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดโครงสร้าง

#### แบบ Schottky Diode (แบบโลหะ 2 ชนิด)

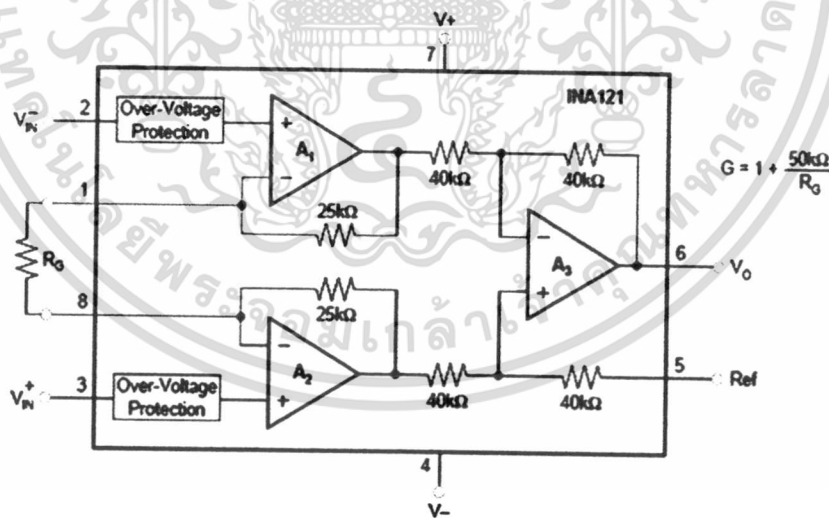
จากรูปที่ 5.6 (ก) จะพบว่าโลหะทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติที่เป็นรอยต่อแบบ Schottky Diode ทั้งสองชนิดคืออลูมิเนียมและนิกเกิลซึ่งจากผลที่ได้ไม่เป็น ได้อย่างที่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่แรกทำให้มีลักษณะโครงสร้างเหมือนเป็นการต่อ Schottky Diode ชนกัน โดยมีด้าน Cathode ร่วมกันดังกราฟที่ได้แสดงไว้แต่จากการสังเกตจากกราฟจะพบว่าอลูมิเนียมที่ Break Down ที่ต่ำกว่าโลหะนิกเกิลจึงมีกราฟในลักษณะดังรูปที่ 5.6 (ข)



รูปที่ 5.6 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L) = 80  $\mu\text{m}$   
 (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L) = 80  $\mu\text{m}$

### 5.4 วงจรขยายผลต่าง (INSTRUMENTATION AMPLIFIER)

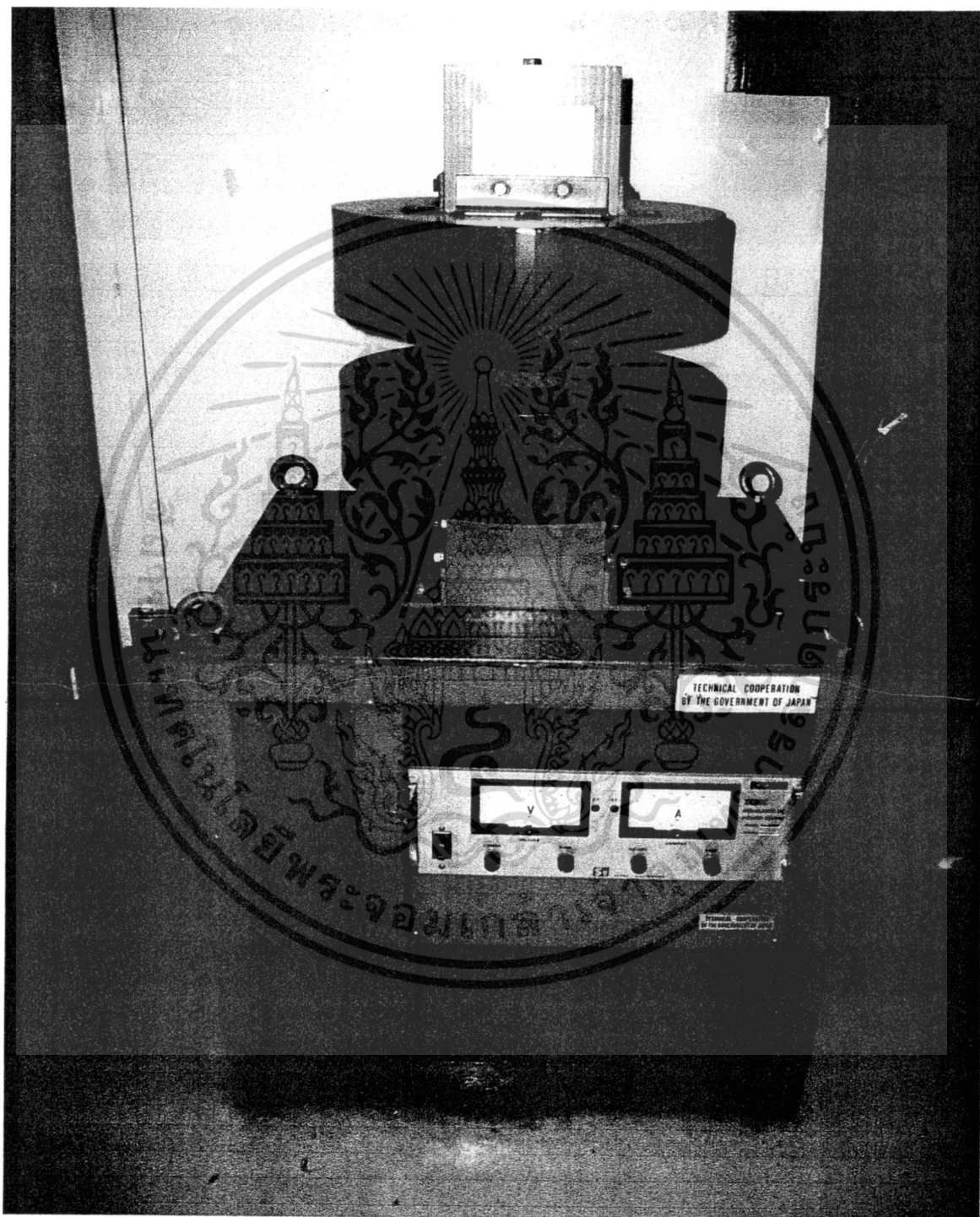
เป็นวงจรที่สัญญาณเอาต์พุตเป็นผลของการลบของสัญญาณทั้งสองคือจุด v1 และจุด v2 ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับอินพุตผลต่างของออปแอมป์มาตรฐาน แต่ต่างกันที่วงจรขยายผลต่างมีการป้อนกลับทางลบเพื่อควบคุมอัตราขยายของวงจรตามต้องการ



รูปที่ 5.7 วงจร INSTRUMENTATION AMPLIFIER

เป็นรูปลักษณะโครงสร้างภายในของ INSTRUMENTATION AMPLIFIER เบอร์ INA121P ที่การปรับอัตราขยายโดยการปรับค่า R<sub>G</sub> ระหว่างขาที่ 1 กับ ขาที่ 8 และมี v<sup>+</sup> ที่ขา 3 ส่วน V<sup>-</sup> อยู่ที่ขาที่ 2 จากรูปที่ 5.8 เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ Bias กระแสให้กับตัว Device จะทำให้อุปกรณ์ทำงานได้จะเห็นได้ว่า R<sub>1k</sub> จะทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ให้กับอุปกรณ์ซึ่งมีความสำคัญว่ากระแสจะมากหรือน้อยไม่ว่าเกี่ยวกับผลต่ออินพุตของตัวอุปกรณ์ถ้ากระแสมีค่ามากจะทำให้มี Sensitivity สูงขึ้นส่วน R<sub>k1</sub> กับ

เครื่องที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองของอุปกรณ์ต่อสนามแม่เหล็ก เครื่องสามารถปรับเพิ่มหรือลดสนามแม่เหล็กได้โดยการเพิ่ม Voltage และกระแสที่หน้าปัดด้านล่างโดยเครื่องสามารถจ่ายสนามแม่เหล็กสูงสุดได้ 5000 Gauss



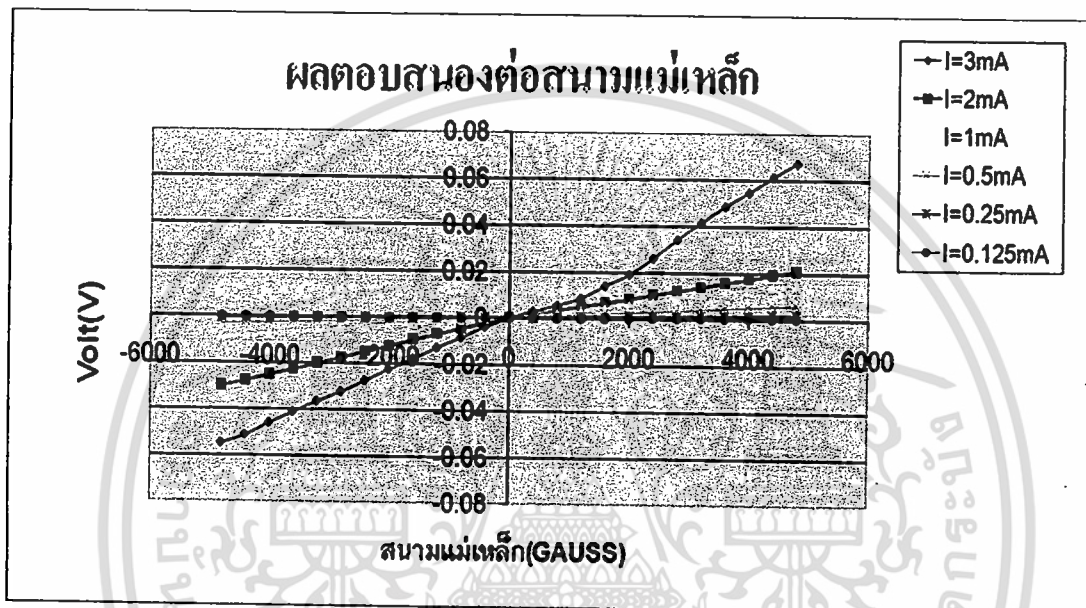
รูปที่ 5.9 เครื่องสร้างสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด

### 5.5.1 ที่โครงสร้างแบบ P-N Junction ที่ระยะ $L=50\mu\text{m}$ และ $W=50\mu\text{m}$

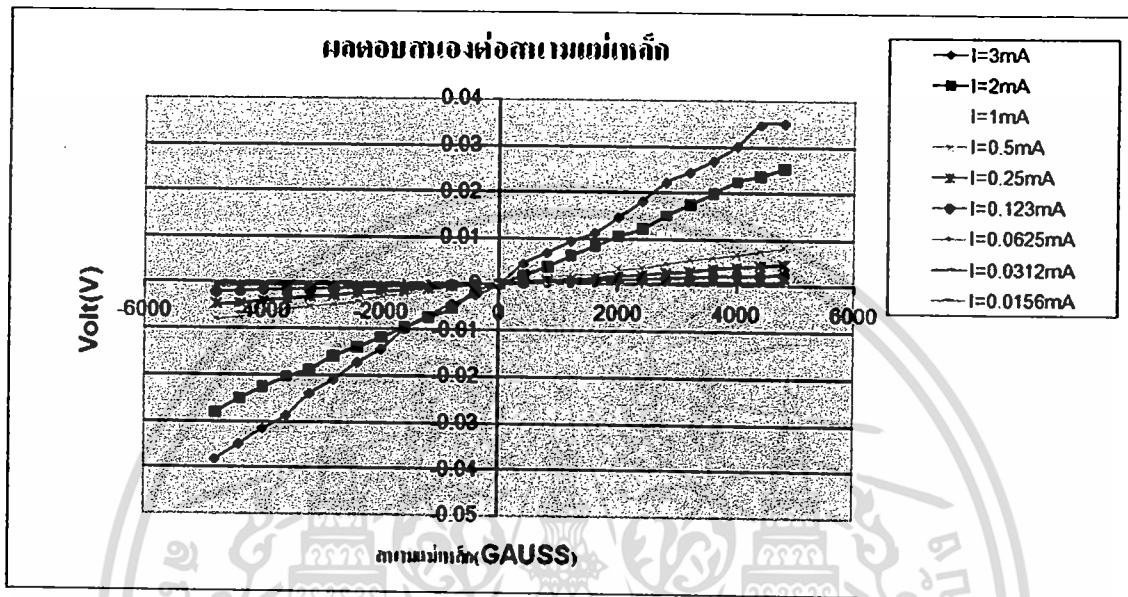
เป็นรูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระแสต่างๆ จะสามารถเห็นได้ว่า ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้นและเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับอุปกรณ์มีการเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองเห็น ได้ชัดเจนขึ้น ได้หรือมี Sensitivity มากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก(G)และแรงดัน(V) ที่กระแสค่าต่างๆที่จ่ายให้กับวงจรวัด

### 5.5.2 ที่โครงสร้างแบบ P-N Junction ที่ระยะ $L=60\mu\text{m}$ และ $W=60\mu\text{m}$

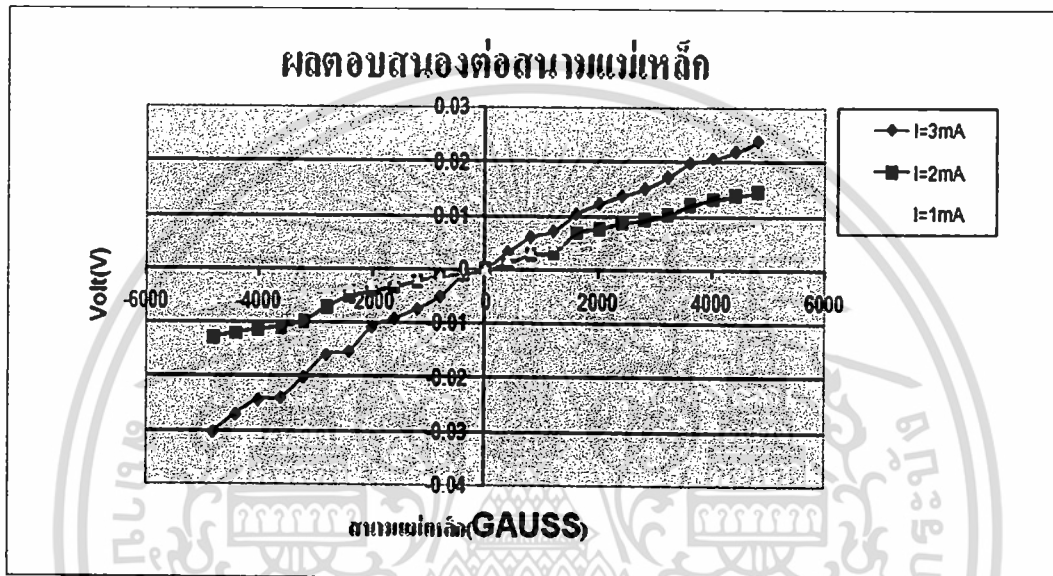
จากรูปที่ 5.11 จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นแรงดันกับการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กลดน้อยลงทำให้การเปลี่ยนแปลงกระแสเพิ่มขึ้นก็ยังคงทำให้ Sensitivity เพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (G) และแรงดัน (V) ที่กระแสค่าต่างๆที่จ่ายให้กับวงจรวัด

### 5.5.3 ที่โครงสร้างแบบ Schottky ที่ระยะ $L=80\mu\text{m}$ และ $W=80\mu\text{m}$

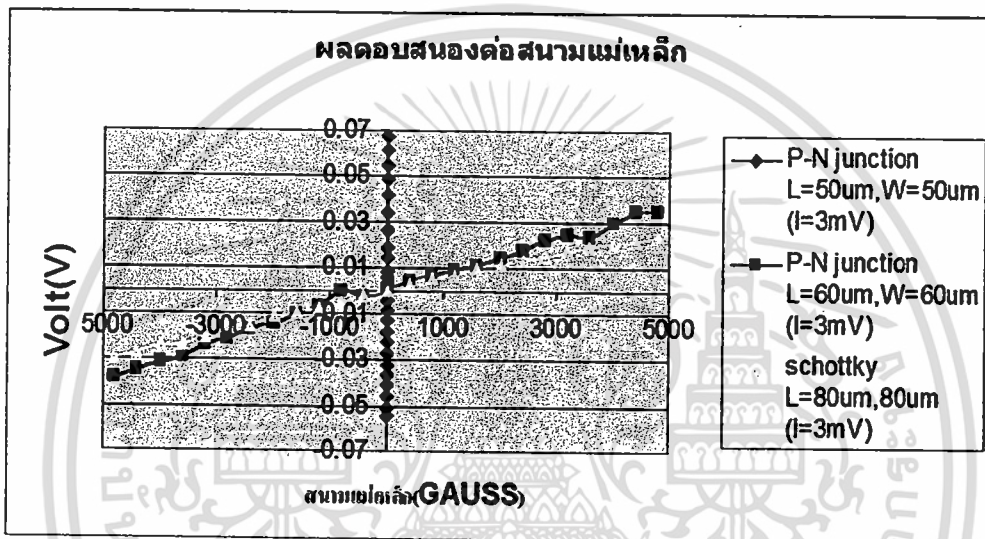
จากรูปที่ 5.12 เป็นผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ชนิด โครงสร้างแบบ Schottky ที่ระยะ  $L=80\mu\text{m}$  และ  $W=80\mu\text{m}$  เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.10 และ รูปที่ 5.11 แม้จะเป็นคนละ โครงสร้างการตามจะเห็นจากผลการทดลองอย่างชัดเจนว่ามีการลดลงของผลตอบสนองอย่าง ชัดเจนมากขึ้นที่กระแสเท่ากันและจะเห็น ได้ว่า โครงสร้างแบบ Schottky ก็สามารถทำงานหรือ คอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกัน โครงสร้างที่เป็นแบบ Diode



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก(G)และแรงดัน(V) ที่กระแสค่าต่างๆที่จ่ายให้กับวงจรวัด

## 5.6 การเปรียบเทียบกันของแต่ละโครงสร้าง

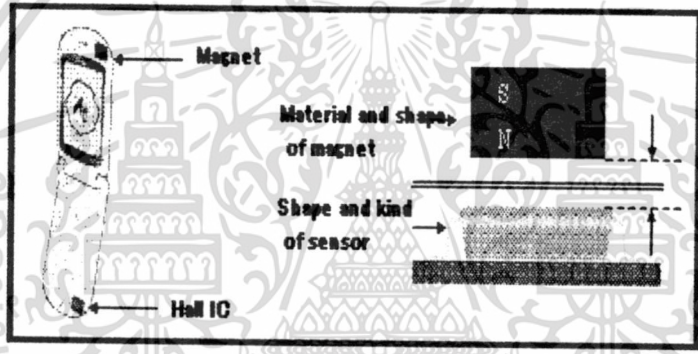
จากรูปที่ 5.13 กราฟจะแสดงให้เห็นว่าจากทุกแบบ โครงสร้างนำมาเปรียบเทียบกันแล้ว ระยะ L ยังมีค่าน้อยเท่าไรยิ่งทำให้ทุกโครงสร้างมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีขึ้นหรือมีค่า Sensitivity มากขึ้นนั่นเอง ถ้าเรานำเอาโครง Schottky มาทำให้มีขนาดเล็กเท่ากับ  $50\mu\text{m}$  ก็จะทำให้มี Sensitivity มากขึ้นด้วย



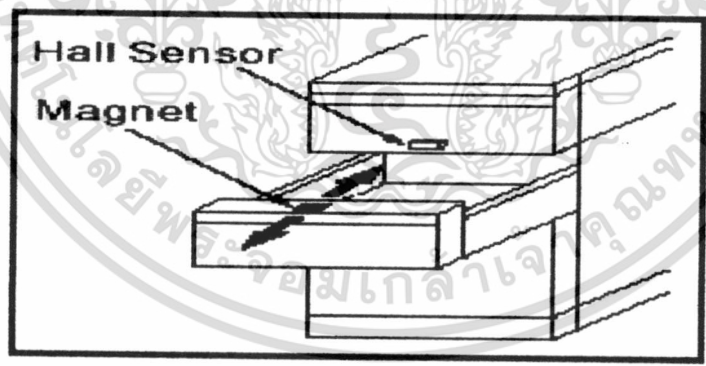
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกันของแต่ละ โครงสร้าง

### 5.7 การประยุกต์ใช้งาน

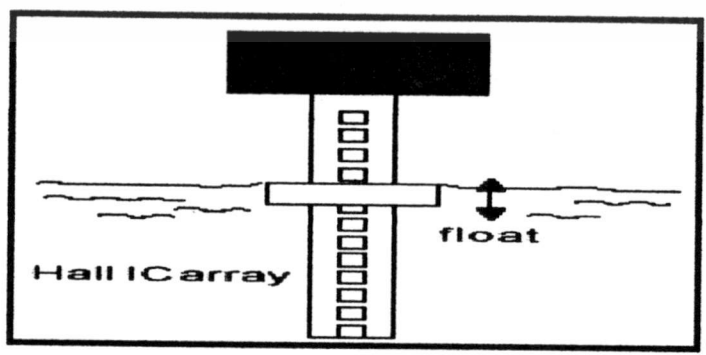
จากรูปที่ 5.14 แสดงถึงแนวทางการนำแมกนีโตไดโอดแบบคู่ (DUAL MAGNETODIODE) ในชนิดของรอยต่อชนิดต่างๆ ทั้ง P-N Junction และ Schottky Diode ไปใช้งาน รูปที่ 5.14 (ก) เป็นการนำ Sensor ไปใช้งานกับโทรศัพท์มือถือเพื่อเป็นสวิตช์ในการตรวจการปิดหรือเปิดของบานพับโทรศัพท์มือถือ โดยทำการติดตั้ง แม่เหล็กถาวรหนึ่งชิ้นและมี Sensor ที่ใช้ในการตรวจจับ โดยใช้แมกนีโตไดโอดแบบคู่ ในรูปที่ 5.14 (ข) เป็นรูปที่แสดงในการนำไปใช้เป็นสวิตช์ในการตรวจจับการปิดเปิดของลิ้นชักของชั้นวางของโดยใช้หลักการทำงานดังรูป 5.14 (ก) ส่วนรูปที่ 5.14 (ค) คือรูปการใช้ Sensor ในการตรวจวัดระดับน้ำโดยการติดตั้ง แม่เหล็กถาวรไว้ในตำแหน่งของระดับน้ำค่าต่างๆ



(ก)



(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

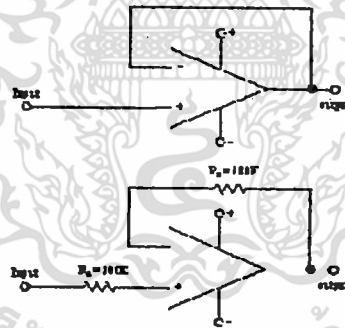
รูปที่ 5.14 การนำแมกนีโตไดโอดไปประยุกต์ใช้งานให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.8 การปรับแต่งสัญญาณและการต่อเชื่อมสัญญาณโดยใช้วงจรแอกทิฟ

ในปัจจุบันนี้นิยมการปรับแต่งสัญญาณของ ระบบเซนเซอร์โดยการขยายแรงดันหรือกระแส ของระบบเซนเซอร์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และอาจมีการปรับแต่งสัญญาณให้เหมาะสม โดยวงจรขยาย สัญญาณที่ใช้เป็นอุปกรณ์พาสซีฟและแอกทิฟทำงานร่วมกัน ก่อนป้อนให้คอมพิวเตอร์โดยใช้วงจร ADC ที่มีช่วงรับแรงดันอินพุตเท่ากับ 0 – 5 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับความชันและตำแหน่งศูนย์ สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ก่อนป้อนให้วงจร ADC

## 5.9 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer)

วงจรบัฟเฟอร์หรือวงจรกันชน เป็นวงจรที่ใช้เชื่อมวงจรสองวงจรเข้าด้วยกัน เช่นระบบไอซีที่ ต่างตระกูลกันหรือทรานซิสเตอร์ที่ไม่แมทซ์อินพุตที่แคนซ์กัน คือวงจรที่จำเป็นต้องใช้บัฟเฟอร์เพราะ คุณสมบัติของออปแอมป์ทางเอาต์พุตอินพุตที่แคนซ์ค่า เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรอื่นแล้วจะ ไม่ทำให้วงจร อื่นมีผลแตกต่างไปจากเดิม วงจรบัฟเฟอร์นั้นจะมีอัตราขยายเท่ากับ 1

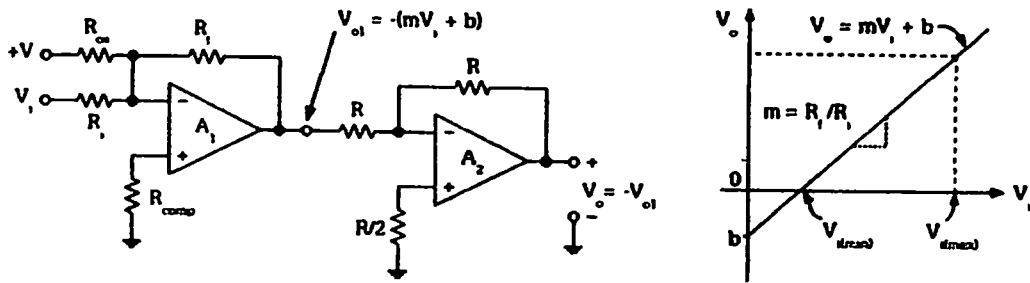


รูปที่ 5.15 วงจรบัฟเฟอร์

## 5.10 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เป็นวงจรที่มีความสำคัญวงจรหนึ่งในระบบ เครื่องมือวัดและคุมค่ากระบวนการ โดยทำหน้าที่ส่งผ่าน และปรับแต่งสัญญาณ ระหว่างสัญญาณ เอาต์พุตและอินพุตให้มีความสัมพันธ์เป็น ไปตามเงื่อนไขที่ระบบต้องการ ซึ่งวงจรนี้ทำหน้าที่ เปลี่ยนแปลงความชัน และปรับตำแหน่งศูนย์ ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับ สัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์และกราฟคุณสมบัติระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $V_0$  กับแรงดันอินพุต  $V_i$  ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 5.16 ซึ่งประกอบด้วยวงจรรวมสัญญาณ  $A_1$  และวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส  $A_2$  ที่มีอัตราขยายเท่ากับ  $-1$  ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของ  $A_1 (V_{01})$  จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{01} = -\left[ \frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{os}} V \right] \quad (1)$$

จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก  $A_1$  จะถูกป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้กับ  $A_2$  ซึ่งคือเป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราขยายเท่ากับ  $-1$  ทำให้แรงดันเอาต์พุตของ  $A_2 (V_{02})$  มีค่าเท่ากับ

$$V_0 = V_{02} = (-1)V_{01} = \left[ \frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{os}} V \right] \quad (2)$$

สมการที่ 2 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_0$  กับ  $V_i$  ของวงจรมันอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง และจากรูปแบบโดยทั่วไปของสมการเส้นตรง

$$y = mx + b \quad (3)$$

ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบสมการ 1 กับสมการ 2 แล้วพบว่า

$$m = \frac{R_f}{R_i} \quad \text{คือ ความชันของกราฟ หรือ อัตราขยายของวงจร}$$

$$b = \frac{R_f}{R_{os}} (\pm V) \quad \text{คือ จุดตัดแกน y ของกราฟ หรือ ตำแหน่งศูนย์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การปรับค่าความต้านทานสามารถทำการปรับแต่งได้จากค่าความต้านทาน  $R_f$  กับ  $R_i$  ของวงจร ในขณะที่ตำแหน่งศูนย์ของกราฟความสัมพันธ์จะปรับค่าได้ที่ค่าความต้านทาน  $R_{os}$  หรือแรงดันอ้างอิง +V

โดยจากวงจรที่ใช้ในการทดลองในปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้ ค่าแรงดันเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ออกมาแล้วจะมีค่าประมาณซึ่งจะนำไปผ่านวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าระหว่าง 0 – 5 V

วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรแสดงนี้ โดยจากวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ ความชันที่ต้องการคือ

$$m = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_{o(max)} - V_{o(min)}}{V_{i(max)} - V_{i(min)}} = \frac{5V - 0V}{3.04V - 1.62V} = 3.52$$

หรือ  $m = \frac{R_f}{R_i} = 3.52$  โดยเลือก  $R_i = 100k\Omega$

$$\therefore R_f \cong 352k\Omega$$

จาก  $y = mx + b$  หรือ สามารถเขียนได้เป็น  $V_o = mV_i + b$

ดังนั้นที่  $V_i = 1.62V$  แล้ว  $V_o = 0V$

นั่นคือ  $0 = (3.52) \times (1.62) + b$

$$b = -5.703V$$

เลือกไฟเลี้ยงเป็น -.....

จาก  $b = \frac{R_f}{R_{os}} (\pm V) = -5.703$

ให้  $V = 15V$

ได้  $R_{os} = \frac{(352 \times 10^3)(-15)}{-5.703}$

$$R_{os} \cong 926k\Omega$$

และ

$$R_{COMP} = R_f // R_i // R_{os}$$

$$= 352k\Omega // 100k\Omega // 926k\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.13 โปรแกรมที่ใช้ในการประยุกต์ใช้งาน

### เริ่ม โปรแกรม

```

/*****
* File   : analoginput.c
* Purpose : Using port A to analog input port
* Author  : G.Magnetic Sensor
* E-mail  : chatcharittt@hotmail.com
* Release : PCW Compiler 3.180
*****/

#include <18f458.h> // Standard Header file for the PIC18f458 device
#define CLOCK_SP 2000000 // Clock Speed(Hz)
// Device Specification
#fuses HS // Oscillator mode HS
#fuses NOLVP, NOWDT // No Low Voltage Program, No Watchdog timer
#fuses NOPROTECT // Code no protection
#device ADC=10 // ADC 10 Bit (111111111=1,023)
#use delay (clock=CLOCK_SP) // Use built-in function: delay_ms() & delay_us()
#include <stdlib.h>
#include <input.c>
#include <string.h>
#include <LCD.C>

/*****
* Constants
*****/

#define Vbe 0.0048875855327468230694037145650049 // Vref/1023 (5/1023)
/*****

* FUNCTION: main
* DESCRIPTION: This is the main entry point for the program.
* PARAMETERS: nothing
* RETURNED: nothing
*****/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void main(void) {
    int16 value;
    float volt;
    int1 check;
    int cont=0;
    unsigned char count;

    lcd_init();           //LCD initialize
    lcd_putc("Welcome to project");
    delay_ms(2000);
    lcd_putc("\f");

    lcd_gotoxy(0,1);
    printf(lcd_putc,"MegnaticField = NON ");
    lcd_gotoxy(0,2);
    printf(lcd_putc,"Door Counter = %d ",cont);

    setup_port_a(ALL_ANALOG); // A0 A1 A2 A3 A5 E0 E1 E2 Ref=Vdd
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); // Clock RC
    set_adc_channel(0); // Read Analog input RA0(channel=0)

    do {
        value = Read_ADC();
        volt = Vbe * (float) value;
        delay_ms(1000);

        if(volt >= 3){
            if(check!=1){
                output_high(PIN_B0);
                cont++;
                lcd_gotoxy(0,1);
                printf(lcd_putc,"MegnaticField = UP ");
                lcd_gotoxy(0,2);
                printf(lcd_putc,"Door Counter = %d ",cont);
            }
        }
    } while(1);
}

```

เอกสารนี้ **lcd\_gotoxy(0,2);**ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด **printf(lcd\_putc,"Door Counter = %d ",cont);** อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    delay_ms(100);
    output_low(PIN_B0);
    check=1;
    }
}

if(volt <= 1.5){
    if(check!=1){
        output_high(PIN_B1);
        cont--;
        lcd_gotoxy(0,1);
        printf(lcd_putc,"MegnaticField = DOWN ");
        lcd_gotoxy(0,2);
        printf(lcd_putc,"Door Counter = %d ",cont);
        delay_ms(100);
        output_low(PIN_B1);
        check=1;
    }
}

if((volt > 1.3)&&(volt < 2.8)){
    check=0;
    lcd_gotoxy(0,1);
    printf(lcd_putc,"MegnaticField = NON ");
}

} while (TRUE);
}

/*****
*****/

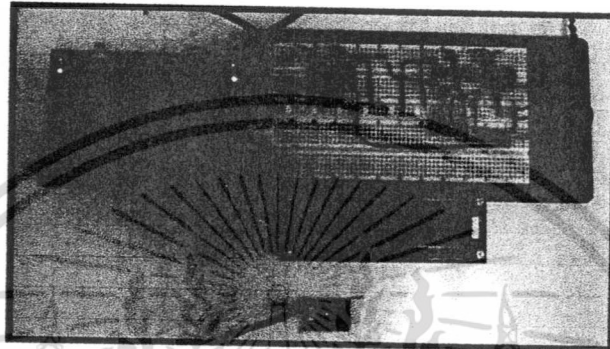
สิ้นสุดโปรแกรม

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.14 การทำงานของวงจร

การทำงานจะทำการนับจำนวนครั้งเมื่อมีสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรตัดผ่านและจะมีการนับขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กพุ่งจากล่างขึ้นบน และจะทำการนับลงเมื่อมีการพุ่งจากบนลงล่าง และจะมีคำอธิบายบอกเป็นตัวอักษรที่บรรทัดบน



รูปที่ 5.19 แสดงการทำงานของวงจร

จากรูปเมื่อขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะแสดงข้อความในบรรทัดบนว่า magnetic filed = non และบรรทัดล่าง Door Counter = 0



รูปที่ 5.20 แสดงการทำงานของวงจร

เมื่อทำการนำแม่เหล็กถาวรตัดผ่านจะมีการแสดงค่า Magnetic Filed = up ในส่วนบรรทัดล่างจะแสดงและบรรทัดล่าง Door Counter = 1 เมื่อมีการตัดผ่านอีกครั้งจะแสดง และบรรทัดล่าง Door Counter = 2 และเมื่อกลับขั้วแม่เหล็กถาวร และเมื่อมีการตัดผ่านของสนามแม่เหล็กจะแสดง และบรรทัดล่าง Door Counter = 1 จะทำการลดค่าลงหนึ่งค่า และจะแสดงในส่วนบรรทัด Magnetic Filed = down

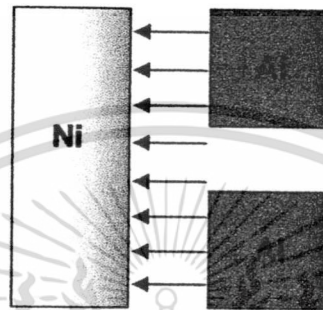
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้งาน Sensor ที่สร้างขึ้นทั้งแบบรอยต่อชนิดต่างๆ ทั้ง P-N Junction และ Schottky Diode สามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้จริงในการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ



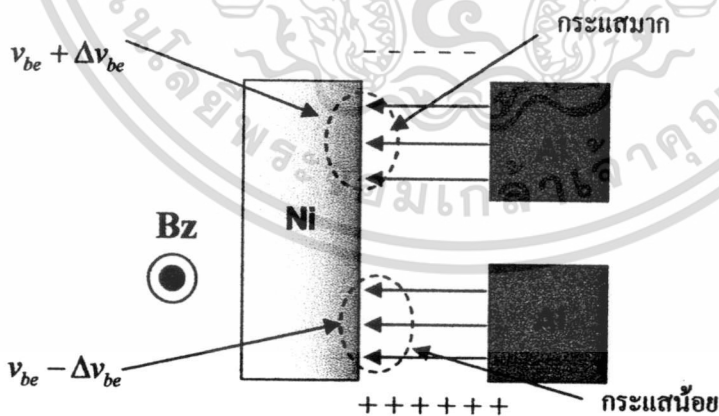
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จากผลการทดลองของ Schottky Diode ได้ทำการพิจารณาโครงสร้างและหลักการทำงาน อีกครั้งว่าตรงตามที่ได้คาดหมายหรือไม่ได้พบว่าจากผลการทดลองโครงสร้างโดยปกติ แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นสาร Silicon ชนิด N-Type จะเคลื่อนที่ไปในชั้นสารโลหะ Al ซึ่งจะมีพาหะชนิดเดียวคืออิเล็กตรอนจะทำการเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดทั้งสองขั้วไปยังขั้วแอโนด ทำให้เราทราบว่าพาหะที่เคลื่อนที่นั้นไม่สามารถทำให้เกิดความแตกต่างของกระแส ( $\Delta I$ ) เกิดขึ้นได้ดังรูป 6.1



รูปที่ 6.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของโครงสร้างรอยต่อ Schottky Diode

จากที่ได้เห็นดังรูปเราจึงกล่าวได้ว่าผลของการทดลองที่ได้นี้ไม่ได้เกิดจากการเบี่ยงเบนของอิเล็กตรอนแต่เกิดจากการที่กระแสฉีดข้ามมีการมอดดูเลท(modulation current injection) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเมื่อมีสนามตัดผ่านอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดประจุบวกกับประจุลบอยู่ที่ด้านบนและด้านล่างดังรูป 6.2



รูปที่ 6.2 การมอดดูเลทที่รอยต่อ โครงสร้าง Schottky Diode

และทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างพาหะที่มีการมอดดูเลทที่ตำแหน่งระหว่างรอยต่อโลหะกับ Silicon ทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสเกิดขึ้นที่ขาแคโทดของไดโอดทั้งสองตัวนี้เองเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างของกระแส( $\Delta I$ )

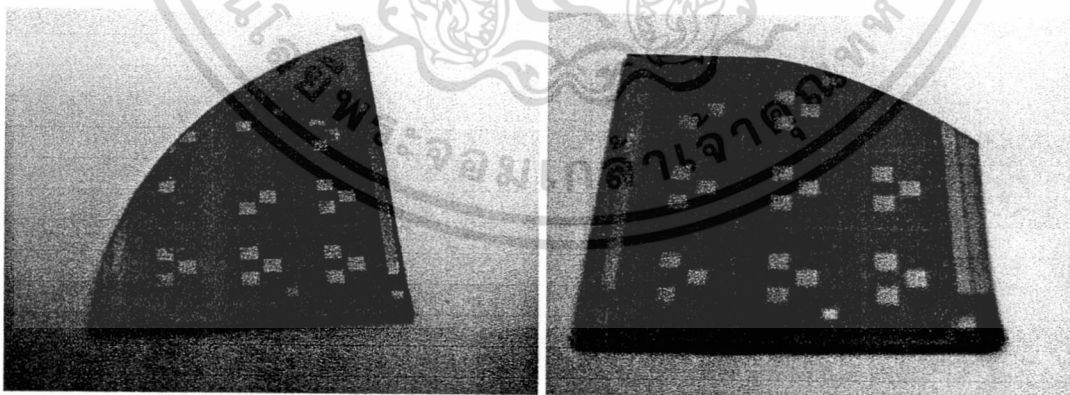
8. จากรูป 6.1 แสดงให้เห็นว่าเป็นการเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดถ้านำมาเปรียบเทียบกับลักษณะการเคลื่อนที่ของ โครงสร้างแบบรอยต่อ P-N Junction แล้วจะเป็นการแสดงให้เห็นได้ว่า แมกนีโตไดโอดแบบคู่สามารถทำงานได้ขณะมีการไบอัสย้อนกลับ แต่อย่างไรก็ดีในการที่ P-N Junction ไม่สามารถเห็นผลตอบสนองได้เนื่องจากพหะอยู่น้อยหรือมีกระแสอยู่น้อยนั่นเองเป็นสาเหตุที่เราไม่สามารถเห็นผลการตอบสนองได้ ดังนั้น โครงสร้างของ Schottky Diode อาจเป็นเครื่องมือพิสูจน์ได้ในหลักการการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่

โครงสร้างที่ง่ายของแมกนีโตไดโอดชนิดรอยต่อแบบ Schottky Diode โครงสร้างแบบ สามขา สามารถช่วยลดความยุ่งยากในกระบวนการสร้างได้

## 6.2 ปัญหา

### 6.2.1 ปัญหาเกิดจากกระบวนการสร้าง

จากกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดชนิดรอยต่อแบบ Metal - Semiconductor ในส่วนของกระบวนการ Sintering โลหะ Ni เพื่อสร้าง Contact ในการนำไปใช้งานและสร้างในเกิดรอยต่อ Ohmic โลหะ Ni มีการเกิดการร่อนออกจาก  $\text{SiO}_2$  ส่วนโลหะ Ni ที่อยู่ส่วนบนโลหะ Al มีส่วนทำให้โลหะ Al เกิดความเสียหายดังรูปที่ 6.3

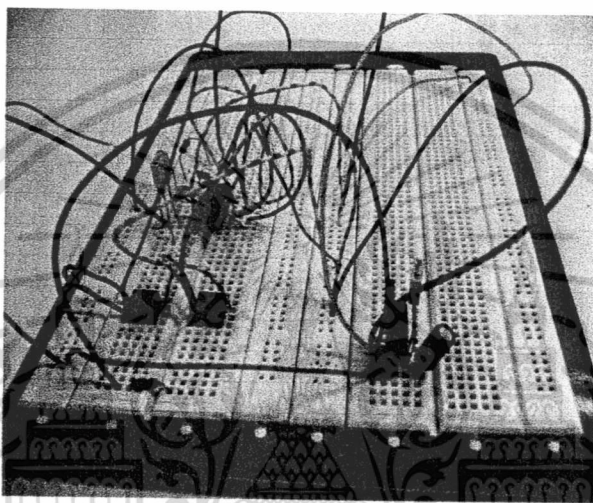


รูปที่ 6.3 การเกิดการร่อนออกจาก  $\text{SiO}_2$  ส่วนโลหะ Ni

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.2 ปัญหาเกิดจากวงจรที่ใช้ทดสอบชิ้นงาน

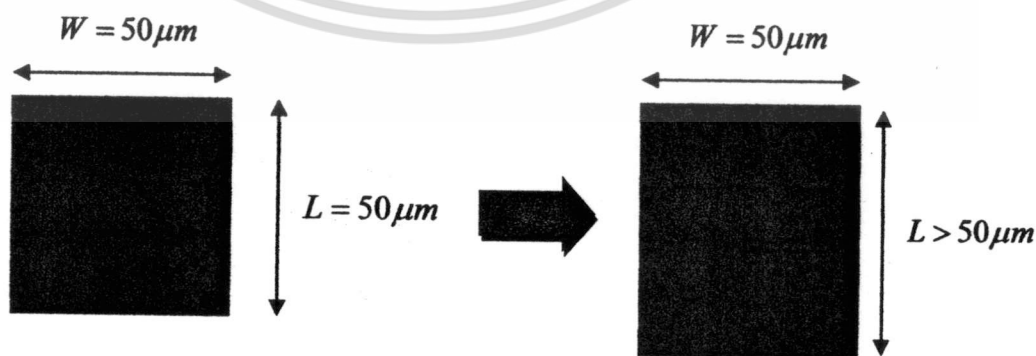
เมื่อสร้างชิ้นงานเสร็จก็ต้องทำการทดสอบชิ้นงาน โดยทำการต่อวงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier) เพื่อทดสอบชิ้นงานนี้ เกิดปัญหาสัญญาณรบกวนจึงทำให้มีผลต่อค่าที่วัดออกมาเนื่องจากค่าที่ทำการวัดนั้นมีผลต่างของแรงดันน้อยมาก จนทำให้สัญญาณรบกวนมีผลต่อการวัดเกิดขึ้น เนื่องจากค่าที่ทำการวัดนั้นมีผลต่างของแรงดันน้อยมาก จนทำให้สัญญาณรบกวนมีผลต่อการวัดเกิดขึ้น



รูปที่ 6.4 รูปวงจรถ่ายขยายผลต่าง ที่ใช้ทดสอบตัวชิ้นงาน

### 6.2.3 ปัญหาเกิดจากมาร์ค

ตัวมาร์คที่ใช้มีรูปทรงไม่เป็นไปตามต้องการจากที่สร้างไว้ในโปรแกรม Corel Draw จึงทำให้ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานเกิดปัญหารูปทรงในชิ้นงานไม่สมมาตรกันในลายวงจรเกิดขึ้น

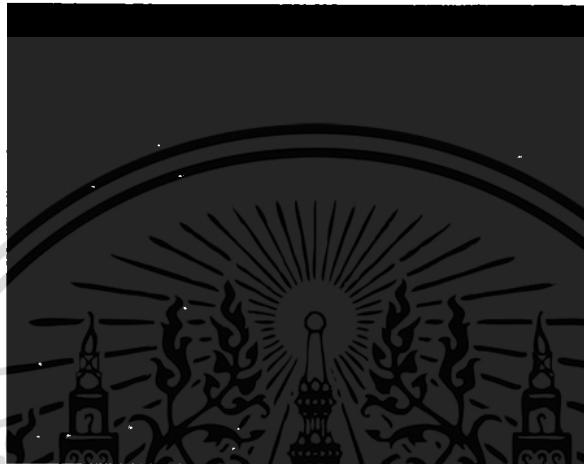


รูปที่ 6.5 ผลของลายมาร์คที่อยู่บน Flim

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.4 ปัญหาเกิดจากทำโลหะสองชนิดในด้านเดียวกัน

หลังทำการ Etching Al แล้ว จะทำการเปิดมาร์คต่อไปและหลังจากผ่านกระบวนการ Development และอบขึ้น Hardbake แล้ว เมื่อนำไปทำการกัด Etching SiO<sub>2</sub> หลังจาก 3 นาทีเมื่อนำไปดูใกล้องจะเห็นว่า Photoresist ทำการร่อนจากผิวหน้าในส่วนที่เป็น SiO<sub>2</sub> และในส่วนที่เป็น Al ที่ทำก่อนหน้า ทำให้เสียเวลาให้การสร้างใหม่มาก



รูปที่ 6.6 น้ำยา AZ 1350 ร่อน

## 6.3 แนวทางการแก้ไข

### 6.3.1 การแก้ปัญหาเกิดจากกระบวนการสร้าง

ในกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดชนิดรอยต่อแบบ Metal- Semiconductor จะไม่ทำการ Sintering โลหะชนิด Ni แต่จะมีการ Sintering โลหะชนิด Al ก่อนหน้านั้น หรือ ทำการแพร่สารเจือชนิด N<sup>+</sup> และเปลี่ยนจาก Ni เป็น Al เพื่อทำให้เกิดรอยต่อแบบ Ohmic แทนการสร้างรอยต่อ Ohmic ด้วยโลหะแบบเดิมคือ Ni

### 6.3.2 การแก้ปัญหาจากวงจรที่ใช้ทดสอบชิ้นงาน

เนื่องจากวงจรที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานมีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องจ่ายสนามแม่เหล็ก และการมีอัตราขยายที่สูง สายที่ใช้ต่อวงจรใน Photo board เป็นคั้น จึงต้องทำการสร้างวงจรในแผ่น PCB และทำการใส่กล่องโลหะ และทำการต่อวงจร Low Pass Filter เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้น หรือทำการต่อ Photo Board ให้มีความเรียบร้อยและเป็นระเบียบมากขึ้น และทำสายเชื่อมต่อให้ดีขึ้น โดยใช้สายที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวนให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



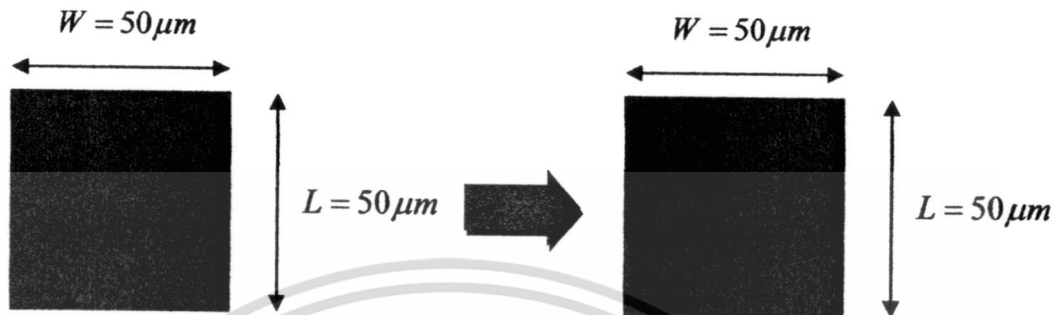
รูปที่ 6.8 การแสดงการต่อที่เรียบร้อย



รูปที่ 6.9 สายที่ใช้ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4.3 หลังจากการแก้ปัญหาเกิดจากร่มมืดที่ได้หลังจากการแก้ปัญหาจากร่ม มีขนาดที่คลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่ได้ออกแบบไว้และไม่พบจุดบกพร่องจากที่ออกแบบไว้ ทำให้ประหยัดเวลาในการทำงานได้



รูปที่ 6.10 ผลของลายมาร์คที่อยู่บน Flim

6.4.4 หลังจากการแก้ปัญหาเกิดจากทำโลหะสองชนิดในค้ำนเดียวกัน ผลที่ได้ทำให้ Photoresist ติดแน่นกับผิวหน้าชิ้นงานมากยิ่งขึ้นให้มีผลทำให้ไม่เกิดการร่อนออกจากผิวหน้าชิ้นงานอีก ทำให้อัตราเสี่ยงจากการจะต้องเริ่มทำการสร้างชิ้นงานใหม่มากขึ้น



รูปที่ 6.11 หลังจากการแก้ปัญหาของน้ำยา AZ 1350 ร่อน (ZOOM)

## บรรณานุกรม

- [1] ชนะ สลักทรงศ์พันธ์ “ไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอน”  
วิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2549
- [2]รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ (SEMICONDUCTOR PHYSICS)” คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3]รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “เอกสารประกอบการสอนวิชา เซมิคอนดักเตอร์ และทรานซิสเตอร์ ”
- [4]Chana Leepattarapongpan, Naritchapan Penpondee , Toempong Phetchakul, Weera Phengan  
Eakalak Chaowicharat, Charndet Hruanun and Amporn Poyai, “Merged Three-terminal  
Magnetotransistor Based On The Carrier Recombination – Deflection Effect” Paper THE SEVENTH  
CONFERENCE ON SENSORS IEEE SENSORS 2008 October 26-29, 2008 Lecce – Italy
- [5] S.MIDDELHOEK, S.A. AUDET “Silicon Sensors” Department of Electrical Engineering Delft  
University of Technology Delft, The Netherlands
- [6] H. P. Baltes and R. S. Popovic, “Integrated semiconductor magnetic field sensors,  
”IEEE,vol. 74, p.1107, 1986.
- [7] 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.
- [8] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues and F. Rodrigues, “Merged lateral bipolar magnetotransistor, ”  
Sensors and Actuators A, 50 (1995) 177-181.
- [9] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**NANYANG  
TECHNOLOGICAL  
UNIVERSITY**



**IEEE**  
SINGAPORE SECTION

# ISIC-2009

**12<sup>th</sup> International  
Symposium on  
Integrated Circuits**

**14-16 December 2009**

**Suntec Singapore  
International Convention  
& Exhibition Centre**

**Proceedings**

**Front Matter**



Supported by:

Held in:



**UNIQUELY  
Singapore**  
[www.visitsingapore.com](http://www.visitsingapore.com)



**M.I.D.A.S.**  
Singapore's Semiconductor Community

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรใช้เพื่อการพาณิชย์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรใช้เพื่อการพาณิชย์

### III. RESULT AND DISCUSSION

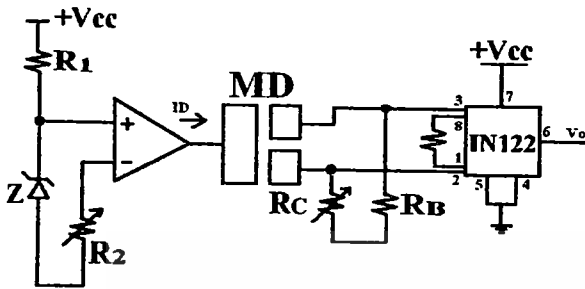


Figure3. Measurement circuit

The interface circuit for measuring is shown in figure 3. The constant current is forced to anode through cathodes. The resistor  $R_C$  and  $R_B$  are for balancing current for zero offset output voltage at zero magnetic field. The output current ( $\Delta I_D$ ) can be show in term of output voltage ( $\Delta V_o$ ). The output voltage is amplified by instrument amplifier for absolute output voltage.

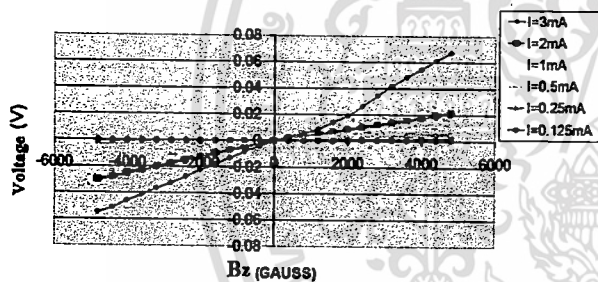


Figure4. Response of magnetic field as a function of diode current;  $W/L = 50/50 \mu m$ .

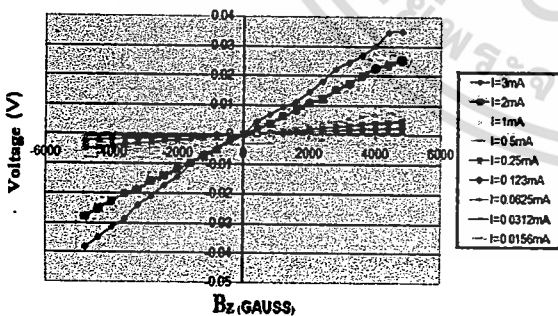


Figure5. Response of magnetic field as a function of diode current;  $W/L = 60/60 \mu m$ .

Figure 4 shows the output response of dual diode  $W/L = 50/50 \mu m$  at biased current  $I_D = 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2$  and  $3mA$ . The magnetic field density ( $+B_z$ ) is varied in the range of 0 to 500 mT and is applied perpendicular on device surface. The absolute output voltages are linearly dependence with magnetic field both in  $+Z$  and  $-Z$  direction

Figure 5 shown the output responses of dual diode  $W/L = 60/60 \mu m$  at difference diode current  $I_D$  during 0.0156 - 3 mA. The response are similar to the case of  $W/L = 50/50 \mu m$ , but the sensitivity is lower than the case of deflection range  $L = 50 \mu m$

From the experimental, when the magnetic field applies in  $-Z$  direction, Lorentz force is induced in  $-Y$  direction. It causes the unbalance of two diode current. The diode current  $I_D$  is increased with the amount of current ( $\Delta I_j$ ) from the Lorentz force which act at hole carrier in n-type region ( $L$ ). At the same time, the diode current  $I_{D2}$  is decrease with the same amount of current ( $-\Delta I_j$ ) by Lorentz force in  $-Y$  direction. At this condition, the output response is positive and diode current  $I_{D1}$  is larger then  $I_{D2}$ . The mechanism of carrier deflection is illustrated in figure 6.

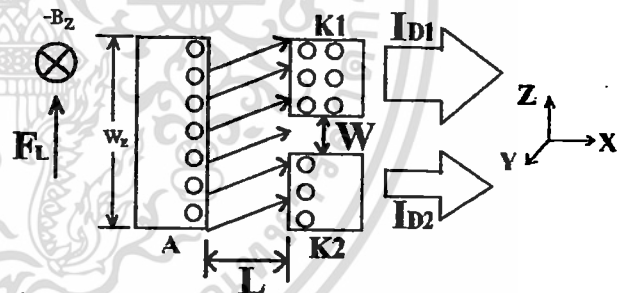


Figure6. Hall carrier deflection by Lorentz force

The sensitivity increases with diode current and the injected carriers are proportion to deflected carrier. Therefore, higher diode current  $I_D$  increase higher sensitivity. Even though the injected carriers are both electron and hole in forward biasing but only hole carrier is related to the output response. The ratio of electron and hole current can be controlled by the concentration of doping atoms of p-type and n-type. In this structure, the high concentration  $p^+$  larger than n-substrate so the magnetodiode is hole current

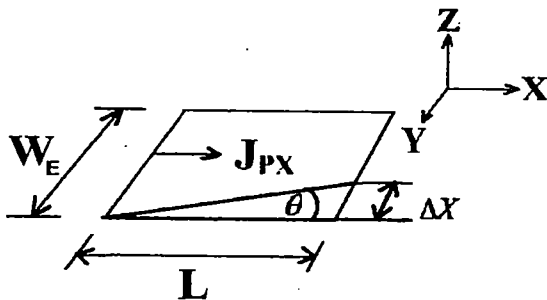


Figure 7 Area of carriers deflection (Hole)

The mechanism of carrier deflection of dual magnetodiode can be analyzed in figure 7. The hole carrier injected from anode  $p^+$  to cathode n-substrate are deflected with the angle  $\theta$  by Lorentz force due to magnetic field  $B_z$ . Total diode current is composed of two symmetry diode current,  $I_{D1}$  and  $I_{D2}$ , and can be written as

$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (1)$$

It can be shown in term of hole carrier density as shown in equation (2)

$$I_D = J_{PX} W_E d \quad (2)$$

where  $d$  is the junction depth of anode  $p^+$  diffusion region,  $W_E$  is width of emitter. The deflection angle can be written by using the Hall angle as

$$\tan \theta = \mu_p B_z \quad (3)$$

where  $\mu_p$  is hole mobility and  $B_z$  is magnetic field density.

The displacement  $\Delta x$  can be written as

$$\Delta x = L \mu_p B_z \quad (4)$$

where  $L$  is the length between anode and cathode. The output is the difference current ( $\Delta I_D$ ). By using equation (3) and (4), deflection current can be written as

$$\Delta I_D = J_{PX} W_E L \tan \theta \quad (5)$$

The equation of relative sensitivity and absolute sensitivity are shown in equation (6) and (7) respectively

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D B_z} \quad (6)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B} \quad (7)$$

where  $\Delta V$  is the absolute output voltage from the difference current  $\Delta I_D$  due to carrier deflection.

#### IV. CONCLUSION

The dual magnetodiode is proposed. The structure composes of two  $pn$  junction diodes which anodes are common together and cathodes are separated. At first the device operation can be explained in term of carrier deflection effect. The sensitivity is depend on deflection range, the distance between anode and cathode, and biased current. It can be fabricated by CMOS and bipolar technology.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank to Thailand Research Fund for financial support. We thank Mr. Weera Pengchan and Mr. Chana Leepattarapongpan for contribution to the fabrication process and measurement.

#### REFERENCES

- [1] R.S. Popovic, H. P. Baltes and F. Rudolf, "An Integrated Silicon Magnetic Field Sensor Using the Magnetodiode Principle", IEEE Trans. Electron Devices, vol.31, pp.286-291, 1984.
- [2] H. Pfeleiderer, "Magnetodiode model", Solid-State Electron., vol.15, p. 335, 1972.
- [3] O.S. Lutes, P.S. Nussbaum, and O.S. Aadland, "Sensitivity limit in SOS magnetodiodes", IEEE Trans, Electron Devices, vol. Ed-27, p.68, 1979.
- [4] A. Mohaghaegh, S. Crjistoloveanu, and J. De Poncharra, "Double-injection phenomena under magnetic field in SOS films: A new generation of magnetosensitive microdevices", IEEE Trans. Electron Devices., vol. ED-28. p. 237,1981.
- [5] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35,pp.21-23, 1990.
- [6] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device." IEEE Electron Devices Lett, vol. EDL-5,pp,357-358.1984.
- [7] Henry p. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Trans. Electron Device, vol.74,pp.315-317, no8, 1986.
- [8] S. Middelhoek, S.A.Audet, "Silicon Sensors", Academic Press, San Diago, 1998.
- [9] J.W.Gardner, "Microsensors Principles and Application", John Wiley & Sons, West Sussex, 1994.
- [10] V. Schmitz, J. Schelten, "Split-electrode drift device as magnetic-field sensor", Sensors and Actuators A, 109, pp. 25-33, 2003.
- [11] C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, T. Phetchakul, W. Pengchan, E. Chaowicharat, C. Hruanan and A. Poyai, "Merged Three-terminal Magnetotransistor Based on The Carrier Recombination-Deflection Effect", The proceeding of IEEE SENSORS 2008 Conference, October 26-29, Lecce, Italy, pp.399-402.