

รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เซนเซอร์สนามแม่เหล็กแบบไดโอดคู่

Dual diode Magnetic Sensor

โดย

รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

Assoc. Prof. Dr. Toempong Phetchakul

เสนอ

สภาวิจัยแห่งชาติ

(ได้รับเงินสนับสนุนจากเงินงบประมาณประจำปี 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์สนามแม่เหล็กแบบไดโอดคู่

บทคัดย่อ

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

RCH

TK

7871.86

๗๘๗15

เลขหมู่.....

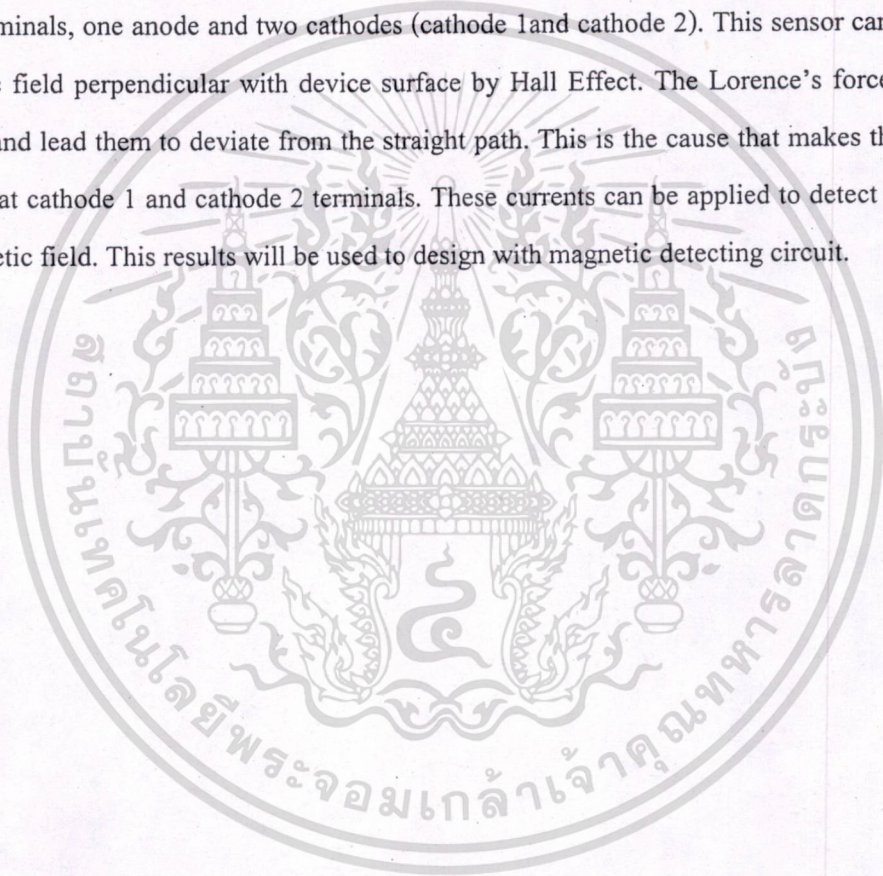
เลขทะเบียน.....79680

วัน,เดือน,ปี 10 เม.ย. 2557

Dual Diode Magnetic Sensor

Abstract

This project aims to study the magnetic field sensor with two diodes structure which has three terminals, one anode and two cathodes (cathode 1 and cathode 2). This sensor can detect the magnetic field perpendicular with device surface by Hall Effect. The Lorence's force charge to carriers and lead them to deviate from the straight path. This is the cause that makes the different currents at cathode 1 and cathode 2 terminals. These currents can be applied to detect the density of magnetic field. This results will be used to design with magnetic detecting circuit.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสภาวิจัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่จัดสรรเงินงบประมาณอุดหนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท นายรัฐพงษ์ นาคาไชย และ นายเจริญมิตร วรเดช และนักศึกษาปริญญาตรี นายนิวัฒน์ สรสวัสดิ์ และ นาย วรวุฒิ จงทวีสุข คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล



สารบัญ

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 เซนเซอร์(ชีวะ)เคมี	15
2.4.2.1 เซนเซอร์แก๊ส	16
2.4.3 เซนเซอร์แผ่รังสี	16
2.4.3.1 โฟโตทรานซิสเตอร์	16
2.4.3.2 โฟโตไดโอด	17
2.4.4 เซนเซอร์เชิงกล	17
2.4.4.1 เซนเซอร์สัมผัส	18
2.4.4.2 สวิทช์กลไก	18
2.4.4.3 รีดสวิตช์	18
2.4.4.4 เซนเซอร์เสียง	19
2.4.4.5 ไมโครโฟน	19
2.4.4.6 อัลตราโซนิกเซนเซอร์	19
2.4.5 เซนเซอร์แม่เหล็ก	20
2.4.5.1 แมกเนโตรซิสเตอร์ (Magnetoresistor)	20
2.4.5.2 แมกเนโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)	21
2.4.5.3 แมกเนโตไดโอด (Magnetodiode)	23
บทที่ 3 แมกเนโตไดโอดแบบคู่	25
3.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก	25
3.2 ปรัชญาการณซ์ฮอลล์	27
บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกเนโตไดโอด	33
4.1 กระบวนการทำความสะอาด	34
4.2 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation Process)	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น(Wet Oxidation)	34
4.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง(Dry Oxidation)	35
4.3 กระบวนการโฟโตลิโกราฟี	36
4.3.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์	38
4.3.2 การเคลือบสารไวแสง	38
4.3.3 การอบขึ้น Softbake	39
4.3.4 การปรับชั้นมาสค์	39
4.3.5 การฉายแสง	39
4.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง	40
4.3.7 การอบขึ้น Hardbake	40
4.3.8 การกัด(Etching)	40
4.3.9 การล่อน้ำยาไวแสง	40
4.3.10 กระบวนการแพร่สารเจือ(Deposition)	41
4.4 กระบวนการเมตลไลเซชัน(Metalzation Process)	43
4.5 การออกแบบแมกเนโตไดโอดแบบคู่	44
4.6 กระบวนการสร้างแมกเนโตไดโอด	47
บทที่ 5 ผลการทดลอง	61
5.1 คุณลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอด	62
5.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกเนโตไดโอด	67
5.3 หลักการทำงาน	70
บทที่ 6 สรุป	73
บรรณานุกรม	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงหน่วยมูลฐาน, หน่วยเสริม และที่มาของจำนวนไฟฟ้าบางตัว	2
4.1 แสดง CLASS ต่างๆของห้องสะอาด	37



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด	6
2.2 สัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงเปิด	7
2.3 พังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงปิด	8
2.4 บริเวณไร้การตอบสนอง(dead zone)	10
2.5 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเตอร์ซิส	11
2.6 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น	12
2.7 อุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์	14
2.8 เทมเพอเรเจอร์ เซนเซอร์โมดูลเบอร์ LM335ที่อ่านค่าอุณหภูมิเป็นระดับแรงดัน	15
2.9 เทมเพอเรเจอร์ เซนเซอร์โมดูลเบอร์ DS1820ที่อ่านค่าอุณหภูมิแล้วส่งสัญญาณดิจิทัล	15
2.10 อุปกรณ์เซนเซอร์แก๊สแบบต่างๆ	16
2.11 อุปกรณ์โฟโตทรานซิสเตอร์	17
2.12 อุปกรณ์โฟโตไดโอด ที่ใช้รับแสงอินฟราเรด	17
2.13 สวิตช์ที่รับแรงกระแทกหลายแบบ	18
2.14 รีดสวิตช์	18
2.15 อุปกรณ์คอนเดนเซอร์ไมโครโฟน	19
2.16 อุปกรณ์อัลตราโซนิกเซนเซอร์	19
2.17 โครงสร้างของแมกเนโตรซิสเตอร์แบบขนาน	20
2.18 โครงสร้างของแมกเนโตรซิสเตอร์แบบวงกลม	21
2.19 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกเนโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง	21
2.20 โครงสร้างของแมกเนโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวนอน	22
2.21 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ(โฮล) (ก) $B_z = 0$ (ข) $B_z > 0$	23
2.22 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกเนโตไดโอด	23
2.23 โครงสร้างของแมกเนโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ [15]	25
3.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	26
3.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	27
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการได้ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก	29
4.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	33
4.2 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชัน	35
4.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	35
4.4 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน	35
4.5 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process	37
4.6 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆ ในซิลิคอน	41
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโบรอนและ	42
ฟอสฟอรัส	42
4.9 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator	43
4.10 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่1 ที่ระยะ 50 μm	44
4.11 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่2 ที่ระยะ 50 μm	45
4.12 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่3 ที่ระยะ 50 μm	45
4.13 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่1 ที่ระยะ 100 μm	46
4.14 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่2 ที่ระยะ 100 μm	46
4.15 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่3 ที่ระยะ 100 μm	47
4.16 แผ่นซิลิคอน	47
4.17 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 1	48
4.18 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี	49
4.19 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์	49
4.20 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ	50
4.22 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in	51
4.23 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 2.	52
4.24 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี	52
4.25 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์	53
4.26 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	53
4.27 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ	54
4.28 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in	54
4.29 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 3	55
4.30 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี	56
4.31 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์	56
4.32 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	57
4.33 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม	57
4.34 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 4	58
4.35 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี	58
4.36 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นอลูมิเนียม	59
4.37 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	59
4.38 แมกเนโตไดโอดแบบคู่เสร็จสมบูรณ์	60
5.1 แมกเนโตไดโอดที่ได้จากการสร้าง	61
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 1	62
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 1	62
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 2	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 2	63
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 3	64
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 3	64
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=100 μm แบบที่ 2	65
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=100 μm แบบที่ 2	65
5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=100 μm แบบที่ 3	66
5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับ ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=100 μm แบบที่ 3	66
5.12 ภาพถ่ายอุปกรณ์จากด้านบน	67
5.13 ภาพถ่ายอุปกรณ์จากด้านข้าง	67
5.14 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกเนโตไดโอดแบบที่ 1 ที่ระยะ 50 μm	68
5.15 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกเนโตไดโอดแบบที่ 2 ที่ระยะ 50 μm	68
5.16 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกเนโตไดโอดแบบที่ 2 ที่ระยะ 100 μm	69
5.17 โครงสร้างของแมกเนโตไดโอดแบบคู่	71
5.18 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในสถานะสมดุล	72
5.19 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในสถานะไม่สมดุล	72
5.20 ประจุพาหะเคลื่อนที่ในมุมกว้างขึ้นตามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก	73

บทที่ 1

ระบบของงานเซนเซอร์

1.1 บทนำ

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

ความเป็นจริง ระบบของการและการควบคุมมีความสำคัญต่องานอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างมากเช่นในระบบการวัดและควบคุมในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า กระบวนการด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ระบบการผลิตเครื่องจักรกลสมัยใหม่ การควบคุมหรือปรับความปลอดภัยของอุปกรณ์ เป็นต้น ผลที่สืบเนื่องจากการใช้งานระบบการวัดและควบคุมที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้ประหยัดเวลา กำลังงานและกำลังคนลงเป็นจำนวนมาก เพราะเหตุนี้จึงเห็นได้ว่า วิทยาศาสตร์ทางด้านเครื่องมือวัดและควบคุมนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

ดังนั้นด้วยปัจจัยความสำคัญของเซนเซอร์ที่มีต่อการวัดค่าและควบคุมกระบวนการนี้เองจึงเป็นที่เรื่องที่ควรศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงภาพรวมทั้งหมดและหลักการพื้นฐานที่สำคัญอย่างละเอียดของระบบงานของเซนเซอร์เพื่อที่จะได้มีการพัฒนางานทางด้านการวัดและควบคุม (instrumentation) เพราะงานดังกล่าวได้เข้ามามีบทบาทแทบจะทุกพื้นที่เกี่ยวกับกระบวนการทางด้านเทคโนโลยี และอาจพบเห็นได้บ่อยในชีวิตประจำวันของเรา ตัวอย่างเช่น นาฬิกาบอกเวลา ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดเวลาที่มีใช้กันอยู่แทบทุกคน หรือในส่วนของรถยนต์ที่ต้องมีหน้าปัดบอกค่าต่างๆทางด้านหน้าของคนขับเพื่อแสดงค่าต่างๆจะเห็นได้ว่ามีบทบาทในการใช้ในชีวิตประจำวันของเราอย่างมาก

1.2 หน่วย(Unit)

โดยทั่วไปแล้วในระบบต่างๆจำเป็นต้องมีหน่วยเพื่อแสดงมาตรฐานและที่มาของระบบ จึงจำเป็นต้องรู้ถึงพื้นฐานของหน่วยเพื่อให้มีความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของระบบให้ดียิ่งขึ้น

1.2.1 หน่วยมูลฐานและหน่วยเสริม

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงหน่วยมูลฐาน,หน่วยเสริม และที่มาของจำนวนไฟฟ้าบางตัว

จำนวน	สัญลักษณ์	หน่วย	ตัวย่อ	มิติ
<u>หน่วยมูลฐาน</u>				
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	Ampare	A	I
จำนวนสาร	n	Mole	Mol	n
<u>หน่วยเสริม</u>				
มุมระนาบ		Radian	Rad	
มุมตัน		Steradian	Sr	
<u>ที่มาของหน่วยไฟฟ้า</u>				
Electromotive force	V	Volt	V	$l^2mt^{-3}i^{-1}$
Quantity of charge	Q	Coulomb	C	It
Electrical resistance	R	Ohm	Ω	$ml^2mt^{-2}i^{-2}$
Capacitance	C	Farad	F	$l^{-2}m^{-1}t^4i^2$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

1.2.2 หน่วยทางไฟฟ้า

ซึ่งในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าและจำนวนทางด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้นประกอบไปด้วยหน่วยทางไฟฟ้าซึ่งที่มาจากหน่วยทางวิทยาศาสตร์ ในตาราง 1 มีจำนวนไฟฟ้าเบื้องต้นจำนวน 6 ตัว ที่เกี่ยวข้องกับการวัดทางไฟฟ้า ได้แก่

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

1.3 ความสำคัญของการวัดและควบคุม

วัตถุประสงค์ของการวัดและการควบคุม มีความสำคัญดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การแบ่งหน้าที่การทำงานและระบบการวัดค่า

โดยทั่วไประบบการวัดจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

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

1.4.1 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่พื้นฐาน

เป็นอุปกรณ์หลักๆ ในระบบ ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์พื้นฐานของระบบการวัดค่าทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วย

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

1.4.2 อุปกรณ์เสริม

อยู่รวมกับระบบการวัดที่สร้างขึ้น โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของงาน ธรรมชาติของเทคนิคในการวัด เป็นต้น โดยหลักๆ จะประกอบไปด้วย

1. อุปกรณ์สอบเทียบ เพื่อทำการสอบเทียบอุปกรณ์ให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง
2. แหล่งจ่ายกำลังงานภายนอก เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ เช่น จ่ายให้กับทรานสดิวเซอร์ ตัวปรับสภาพสัญญาณ อุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณ
3. อุปกรณ์ป้องกันกลับ ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงจำนวนทางกายภาพที่วัดได้ เช่น วงจรวีทสโตนบริดจ์ เป็นต้น

บทที่ 2

เซนเซอร์

2.1 บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์เซนเซอร์ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญในทุกๆด้านไม่ว่าจะเป็นทางด้านงานอุตสาหกรรม งานก่อสร้าง หรือแม้กระทั่งภายในบ้านพักอาศัยของพวกเราจึงเห็นได้ว่ามันเป็นเรื่องที่ใกล้ตัวของพวกเรามากโดยที่พวกเราไม่รู้ตัว ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์เซนเซอร์อาจเป็นโครงสร้างทางกล หรือโครงสร้างทางไฟฟ้า หรือโครงสร้างที่มีการผสมกันระหว่างโครงสร้างทางกลกับโครงสร้างทางไฟฟ้าก็ได้ ทำให้อุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ จึงมักมีการทำงานของอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นหลัก

ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ แล้วทำหน้าที่เปลี่ยนปริมาณที่ได้จากการตรวจวัดให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งขึ้นมา ซึ่งเป็นสัญญาณที่เซนเซอร์จ่ายออกมาเพื่อที่จะนำไปใช้ประมวลผลต่อ

2.2 เซนเซอร์ในระบบต่างๆ

โดยทั่วไปสามารถจะจำแนกชนิดและคุณลักษณะของระบบได้มากมายหลายแบบ แต่ในที่นี้จะพิจารณาตามลักษณะของระบบเซนเซอร์ที่ให้ปริมาณทางเอาต์พุตของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนไปตามปริมาตรต่างๆ ที่ตรวจวัดทางอินพุต ซึ่งการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในกระบวนการสามารถจำแนกการใช้งานในระบบต่างๆ ได้เป็น 3 ระบบ ดังนี้คือ

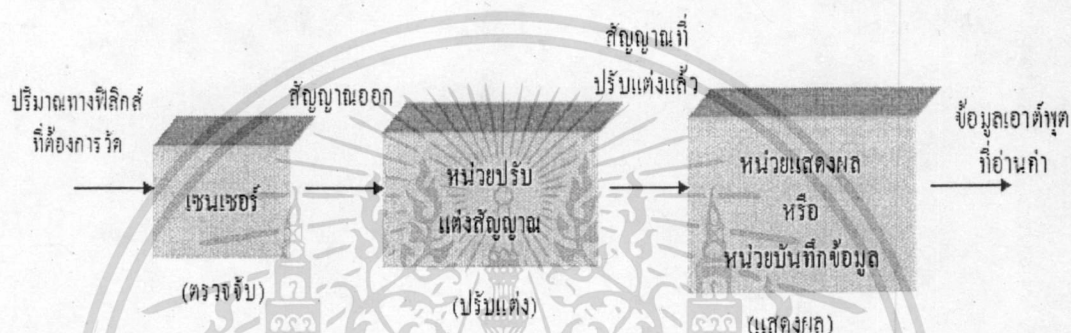
1. ระบบการวัด
2. ระบบควบคุมวงเปิด
3. ระบบควบคุมวงปิด

2.2.1 ระบบการวัด

ทำหน้าที่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลของปริมาณทางเอาต์พุตซึ่งได้จากปริมาณทางอินพุตที่ได้จากการวัดสามารถแสดงดังรูป หลักการทำงานสำคัญของระบบการวัด คือ ระบบการวัดจะทำหน้าที่เพียงแต่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลค่าที่ได้จากการวัดปริมาณจากอินพุตเท่านั้น ไม่สามารถปรับหรือควบคุมสภาพการทำงานของระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการได้เพียงอย่างเดียว

องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ส่วนตรวจจับสัญญาณ
2. ส่วนปรับแต่งสัญญาณ
3. ส่วนแสดงผล หรือส่วนบันทึกข้อมูล



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบสำคัญในระบบการวัด

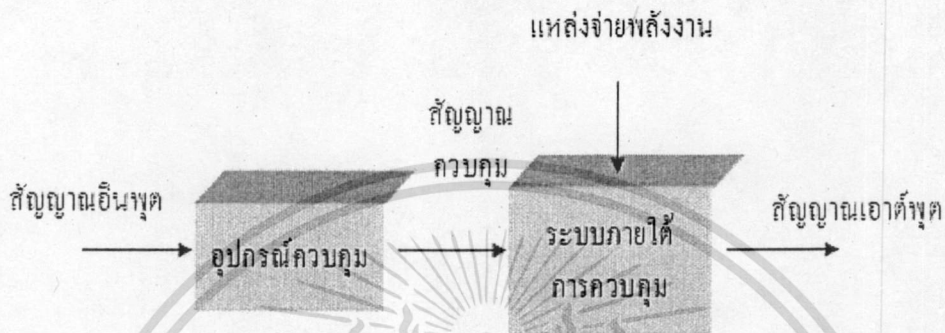
ดังแสดงในผังสัญญาณของระบบในรูป ซึ่งปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำกรวัดจะถูกเซนเซอร์เปลี่ยนให้สัญญาณออกที่สามารถนำไปปรับแต่งหรือแสดงผลต่อได้ จากนั้นหน่วยของการปรับแต่งสัญญาณจะทำหน้าที่ปรับแต่งสภาพของสัญญาณออกที่ได้จากสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อที่นำไปใช้งานได้กับหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล เช่น ถ้าสัญญาณที่ออกจากเซนเซอร์เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดของสัญญาณที่ต่ำมากก็ต้องมีหน่วยที่ปรับแต่งขนาดของสัญญาณให้มีความเหมาะสมในที่นี้อาจเป็นการขยายขนาดของสัญญาณให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นก่อนที่จะถูกนำไปแสดงผลให้กับผู้ใช้อ่านค่า หรืออาจมีการเก็บค่าที่วัดได้ลงในเครื่องบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในภายหลัง

2.2.2 ระบบควบคุมวงเปิด

ระบบควบคุม มีหลักการทำงานพื้นฐานต่างจากระบบการวัด กล่าวคือ ระบบควบคุมพยายามปรับสภาพกระบวนการหรือรักษาสภาพการทำงานของกระบวนการให้มีค่าเป็นไปตามค่าที่ตั้งไว้ทางอินพุต หรือเป็นไปตามที่ผู้ควบคุมกำหนดไว้ ผังสัญญาณแสดงหลักการการทำงานของระบบควบคุมวงจรเปิดแสดงได้ดังรูป สัญญาณอินพุตที่ตั้งไว้หรือมีการกำหนดจะถูกส่งให้กับ

เอกสารถูกปรับค่าเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปปรับสภาพการทำงานของระบบภายใต้การควบคุมค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการ แต่จะเห็นว่าในส่วนของสัญญาณทางเอาต์พุตไม่ได้มีการตรวจวัดเลยมีแต่การส่งสัญญาณอินพุตเป็นลำดับไปยังเอาต์พุต โดยไม่มีส่วนของระบบป้อนกลับของสัญญาณมายังอินพุตอีกเลย

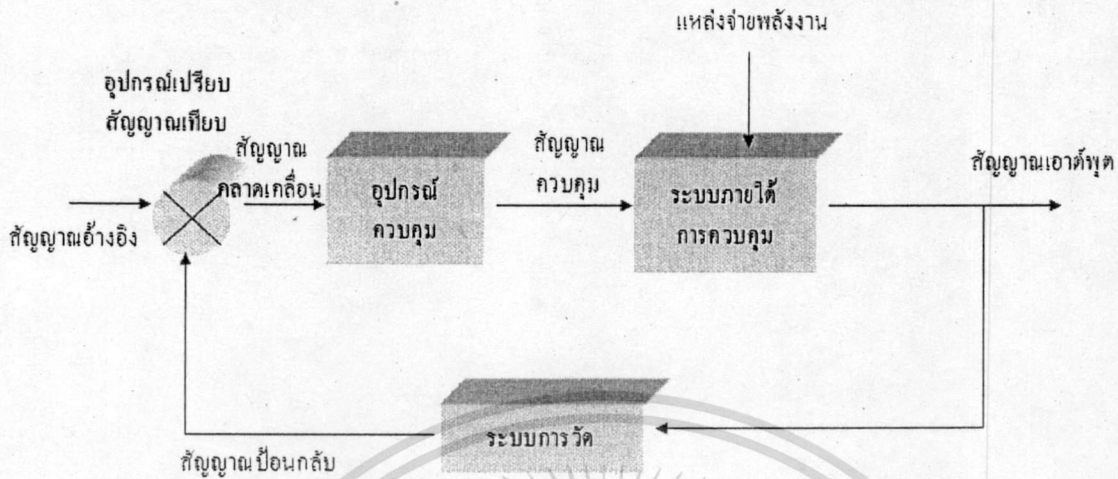


รูปที่ 2.2 ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงเปิด

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าระบบควบคุมวงเปิดเป็นระบบควบคุมพื้นฐานที่มีรูปแบบง่าย การออกแบบระบบไม่ซับซ้อนมีราคาไม่แพงมากนัก แต่ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ทั้งยังต้องมีผู้ควบคุมเข้ามาตรวจสอบหรือปรับแต่งระบบอยู่บ่อยครั้ง จึงไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ควบคุม

2.2.3 ระบบควบคุมวงปิด

สำหรับระบบควบคุมวงปิด ซึ่งมีแผนผังของระบบดังรูป จะมีส่วนประกอบที่แตกต่างจากระบบควบคุมวงเปิดโดยมีส่วนของระบบควบคุมการวัดเพื่อทำหน้าที่วัดและตรวจสอบการทำงานของกระบวนการทางเอาต์พุตของระบบและนำสัญญาณกลับมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้เป็นสัญญาณอ้างอิงทางอินพุตอีก จึงทำให้สภาพกระบวนการของระบบทางเอาต์พุตมีผลโดยตรงกับเงื่อนไขทางด้านอินพุต



รูปที่ 2.3 ผังสัญญาณแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมวงปิด

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

2.3 คุณสมบัติของเซนเซอร์

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

ความแม่นยำ (accuracy)

เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าทางเอาต์พุตว่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากน้อยเพียงใด ในทางปฏิบัติในการวัดย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนในตัวอุปกรณ์ แต่จะมีค่าเอนกสำเนาเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อผู้ใช้งานต้องการทราบค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากนักเพียงใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำของอุปกรณ์นั้น ซึ่งทั่วไปค่าความแม่นยำนี้อาจแสดงในเทอมของหน่วยในการวัด เช่น เทอร์โมมิเตอร์ตัวหนึ่งถูกกำหนดไว้ว่ามีค่าความแม่นยำเท่ากับ $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ นั้นหมายความว่าหากนำเทอร์โมมิเตอร์ตัวนี้ไปทำการวัดอุณหภูมิแล้วแสดงค่าเท่ากับ 20.1°C แสดงว่าขณะนี้อุณหภูมิจริงที่ทำการวัดมีค่าอยู่ระหว่าง 19.9°C กับ 20.3°C ในบางครั้งค่าความแม่นยำนี้อาจใช้บ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของย่านการวัดของอุปกรณ์วัดตัวนั้นๆอีกด้วย

ความแม่นยำ (precision)

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

ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (repeatability หรือ reproducibility)

เป็นข้อกำหนดของความแม่นยำซึ่งถูกระบุมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ โดนหมายถึงค่าความแม่นยำของเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของการวัดแบบเดิม ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการแสดงค่าเอาต์พุตให้มีค่าเหมือนเดิม

ความคลาดเคลื่อน (error)

ความคลาดเคลื่อน คือ ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริงโดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และยังเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแม่นยำของระบบการวัดนั้นอีกด้วย

ความคลาดเคลื่อนสถิต (static error)

ความคลาดเคลื่อนสถิต คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าคงที่ตลอดย่านการวัดของอุปกรณ์ ดังนั้น หากทราบค่าความคลาดเคลื่อนสถิตของอุปกรณ์นั้นแล้ว สามารถชดเชยให้มีค่าน้อยลงได้เพื่อลดผลกระทบต่อค่าความแม่นยำของอุปกรณ์

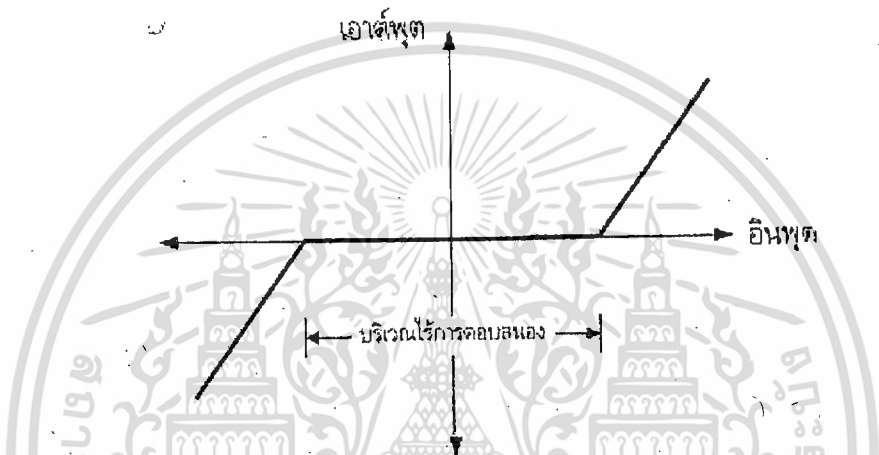
การปรับเทียบ (calibration)

การปรับเทียบ หมายถึง การเปรียบเทียบหน่วยของสเกลในการแสดงผลของเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์ตรวจสอบความเร็วรถยนต์บางชนิดที่ให้เอาต์พุตออกมาอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าแปรผันตรงกับความเร็วรถยนต์ จากนั้นเข็มชี้ของมิเตอร์วัดความเร็วก็จะแสดงผลโดยการเบี่ยงเบนเป็นสัดส่วนไปตามแรงดันไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการอ่านค่าที่ได้จากหน่วยของปริมาณหนึ่งมาเป็นอีกหน่วยของปริมาณหนึ่งโดยการเปรียบเทียบแบบนี้ จึงเรียกว่า การปรับเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone หรือ dead band)

บริเวณไร้การตอบสนอง เป็นข้อกำหนดที่แสดงถึงขนาดสูงสุดของปริมาณที่ทำการวัดทางอินพุต โดยไม่ทำให้สัญญาณทางเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง หรือขนาดอินพุตสูงสุดที่ยังคงทำให้เอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงได้ดังกราฟความสัมพันธ์ในรูป สาเหตุที่ทำให้เกิดบริเวณไร้การตอบสนองนี้มาจากผลของแรงเสียดทานสถิตหรือเนื่องจากคุณสมบัติฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 2.4 บริเวณไร้การตอบสนอง(dead zone)

ขนาด (dimension)

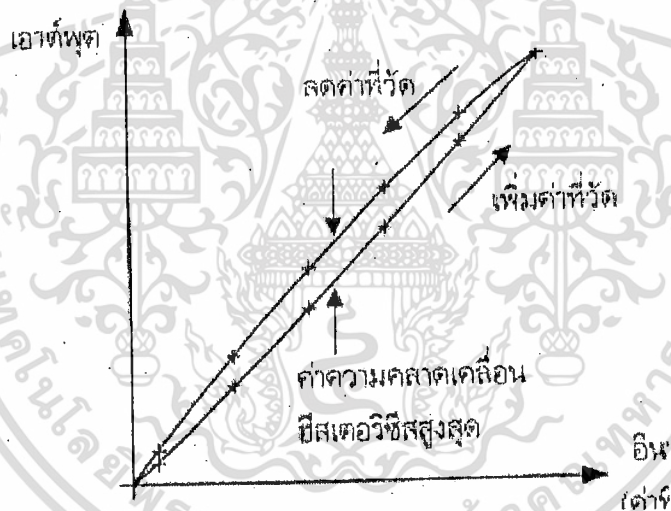
ขนาดของเซนเซอร์ เป็นขนาดของกายภาพของเซนเซอร์ หรือ(กว้าง×ยาว×สูง) ที่ระบบมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ

ดริฟต์ (drift)

แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซนเซอร์ วงจร หรือระบบ เมื่อเวลาในการใช้งาน หรือสิ่งแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ คุณสมบัติดริฟต์นี้ทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดมีการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าอินพุตของระบบจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของอุปกรณ์นั้นด้วย อุณหภูมิรอบข้างในการใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดผลของดริฟต์ขึ้นซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเซนเซอร์ ทำให้ระบบของการวัดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป

ฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

ฮิสเทอรีซิส เกิดขึ้นจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณฟิสิกส์ทางอินพุตโดยการปรับค่าจากน้อยไปมากและปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย คุณสมบัติฮิสเทอรีซิสนี้ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบอุปกรณ์ด้วย กราฟคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิสดังกล่าวแสดงได้ดังรูป ปริมาณอินพุตของเซนเซอร์ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดหรือต้องการตรวจสอบจะถูกปรับค่าให้มีมากขึ้นจนกระทั่งถึงย่านในการวัดสูงสุด ในทางกลับกันก็ทำการปรับค่าให้ลดลงจนกระทั่งถึงย่านในการวัดต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งพบว่าเกิดผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ โดยจะเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้ว่าฮิสเทอรีซิส



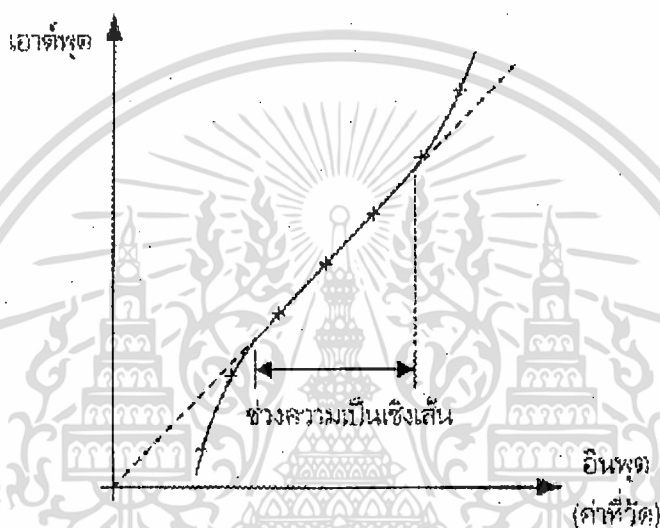
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิส

การหน่วงสัญญาณ (lag)

การหน่วงสัญญาณ คือ การล่าช้าของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตที่ทำการวัด ทัวไปมีหน่วยเป็นวินาที(seconds) หรือเศษส่วนของวินาที ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท เช่น ในงานระบบควบคุมกระบวนการ การหน่วงสัญญาณเป็นข้อกำหนดสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากมีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบเป็นอย่างมาก

ความเป็นเชิงเส้น (linearity)

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



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

อายุการใช้งาน (operating life หรือ reliability)

อายุการใช้งานของเซนเซอร์ เป็นค่าแสดงถึงอายุการใช้งานของเซนเซอร์ที่ยังคงให้คุณสมบัติในการทำงานเป็นไปตามข้อกำหนดประจำตัวต่างๆ ที่ระบุมาให้ โดยทั่วไปอาจจะกล่าวมาในเทอมของ ระยะเวลา หรือจำนวนครั้งในการใช้งาน เป็นต้น

ย่านปฏิบัติงาน (range)

ย่านปฏิบัติงานของอุปกรณ์ คือ ขอบเขตในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์นั้นซึ่งสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับย่านปฏิบัติงานของเซนเซอร์ มักกำหนดมาในรูปของค่าอินพุตต่ำสุดและสูงสุดที่ใช้งาน

อัตราการทำงาน (rating)

เป็นการแสดงถึงอัตราการทนต่อสัญญาณต่างๆ ในการทำงานของอุปกรณ์โดยสามารถที่จะทำงานได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดความเสียหาย ส่วนใหญ่จะระบบลายระเอียดอัตราการทนสัญญาณแต่ละชนิดมาด้วย เช่น อัตราของอุณหภูมิในการทำงานสูงสุด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนอง (response)

ผลตอบสนองของอุปกรณ์ คือ ช่วงเวลาที่อุปกรณ์ใช้ในการตอบสนองสัญญาณเอาต์พุตให้ มีค่าเท่ากับค่าเอาต์พุตสุดท้าย มีหน่วยเป็นวินาที หรือเศษส่วนของวินาที หรือบางครั้งอาจบอกมา ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าเอาต์พุตสุดท้ายก็ได้

ความละเอียด (resolution)

ความละเอียดของเซนเซอร์หรืออุปกรณ์การวัด คือ ขนาดปริมาณอินพุตต่ำสุดที่อุปกรณ์ สามารถวัดหรือตรวจสอบได้

ความไว (sensitivity)

ความไว คือ ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตของอุปกรณ์เกี่ยวกับการ เปลี่ยนแปลงของอินพุต สำหรับค่าความไวของเซนเซอร์ จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณเอาต์พุต ในย่านวัดที่กำหนดมาให้หารด้วยผลต่างของสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นปริมาณที่ทำการวัด หรือเขียน สมการได้เป็น

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

เสถียรภาพ (stability)

เสถียรภาพบ่งชี้ให้เห็นสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์หรือระบบว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลง ไปมากน้อยแค่ไหน เมื่อป้อนอินพุตที่มีค่าคงที่เป็นเวลานานๆภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลง หาก อุปกรณ์หรือระบบมีความเป็นเสถียรภาพแล้วสัญญาณเอาต์พุตควรมีคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลง มากนัก

ค่าเบี่ยงเบน (tolerance)

ค่าเบี่ยงเบน บอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด ในบางครั้งค่าความ เบี่ยงเบนอาจใช้ในแสดงถึงความแม่นยำของอุปกรณ์ได้อีกด้วย

2.4 ประเภทของเซนเซอร์

2.4.1 เซนเซอร์อุณหภูมิ

เซนเซอร์อุณหภูมิเป็นเซนเซอร์ที่ทำหน้าตรวจจับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นแล้วเปลี่ยนรูปของ พลังงานเหล่านั้นกลายมาเป็นระดับอุณหภูมิหรือปริมาณที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิความร้อน อุณหภูมิความเย็น มาเปลี่ยนเป็นค่าในระดับของรูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมนุษย์จะ

เอกสารเหมือนกับส่วนของประสาทที่รับรู้ความรู้สึกที่ส่งไปให้สมองรับรู้ได้แก่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 เทอร์มิสเตอร์

เทอร์มิสเตอร์มีหลักการของการทำงานคือเปลี่ยนระดับอุณหภูมิให้กลายเป็นระดับของความต้านทาน โดยเทอร์มิสเตอร์สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบคือ

เอ็นทีซี

มีการทำงาน คือ เมื่อตัวมันมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานภายในตัวมีค่าที่ต่ำลง และถ้าตัวมันมีอุณหภูมิต่ำลงจะทำให้มีค่าความต้านทานภายในที่สูงขึ้น

พีทีซี

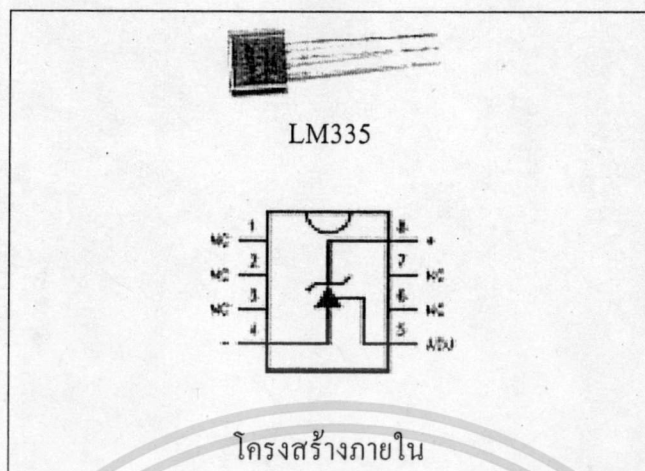
มีการทำงาน คือ เมื่อตัวมันมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานภายในตัวมีค่าที่สูงและถ้าตัวมันมีอุณหภูมิต่ำลงจะทำให้มีค่าความต้านทานภายในที่ต่ำลง



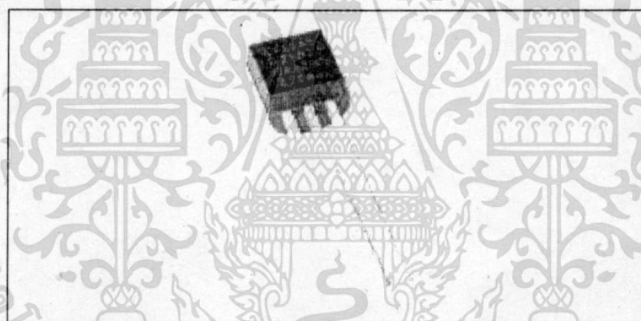
รูปที่ 2.7 อุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์

2.4.1.2 เทมเพอเรเจอร์เซนเซอร์โมดูล

เทมเพอเรเจอร์เซนเซอร์โมดูลเป็นอุปกรณ์ที่ทำการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความเที่ยงตรงสูง เซนเซอร์แบบนี้จะให้ความเที่ยงตรงของค่าที่อ่านจากเทอร์มิสเตอร์ เช่น ถ้าเรานำเทอร์มิสเตอร์มาใช้งาน ต้องประกอบเทอร์มิสเตอร์เข้ากับวงจรที่เปลี่ยนค่าความต้านทานเป็นระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งถ้าเราออกแบบวงจรไม่ดีทำให้ค่าที่อ่านได้เกิดความผิดพลาดจึงได้มีการสร้างเทมเพอเรเจอร์เซนเซอร์โมดูลเพื่อลดความผิดพลาดในจุดนี้



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์เทมเพอเรเจอร์ เซนเซอร์มอดูลเบอร์ LM335
ที่อ่านค่าอุณหภูมิเป็นระดับแรงดัน



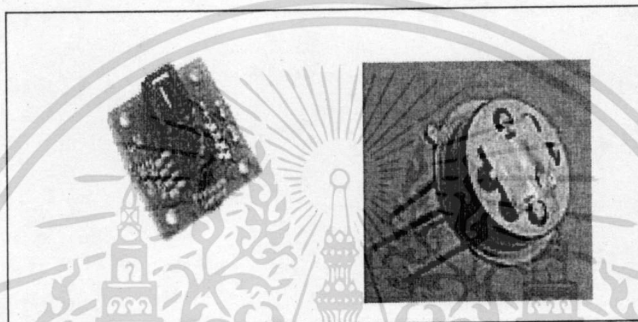
รูปที่ 2.9 อุปกรณ์เทมเพอเรเจอร์ เซนเซอร์มอดูลเบอร์ DS18B20
ที่อ่านค่าอุณหภูมิแล้วส่งข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัล

2.4.2 เซนเซอร์(ชีวะ)เคมี

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

2.4.2.1 เซนเซอร์แก๊ส

เซนเซอร์แก๊สจะทำหน้าที่คล้ายกับจมูกของมนุษย์ทำหน้าที่แยกความหนาแน่นของแก๊สที่อยู่ในอากาศ โดยโครงสร้างภายในของเซนเซอร์แก๊สจะมีลักษณะพิเศษที่สามารถเปลี่ยนความหนาแน่นของแก๊สเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันด้วย เช่น ตรวจจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น และส่วนมากจะนำไปใช้ในการตรวจจับอันตราย เช่น ตรวจจับแก๊สรั่ว เป็นต้น



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์เซนเซอร์แก๊สแบบต่างๆ

2.4.3 เซนเซอร์แผ่รังสี

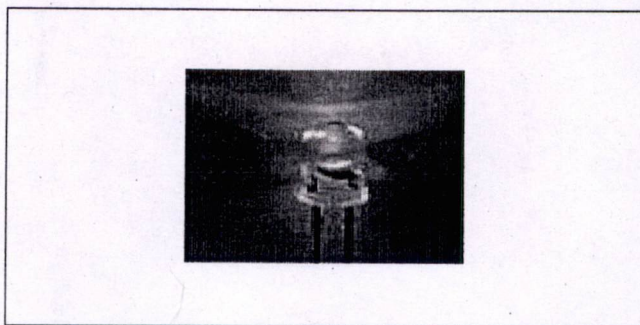
การแผ่รังสี หมายถึง การปลดปล่อยอนุภาคหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายอนุภาคที่ปลดปล่อยจากวัตถุปรกติแล้วจะเป็นกัมมันตภาพรังสี ซึ่งหมายถึง อนุภาคที่สามารถปลดปล่อยมาจากนิวเคลียส อาจเกิดจากสารกัมมันตภาพรังสีที่มีค่าเวลาชีวิตลดลง หรือโดยทำปฏิกิริยาภายในนิวเคลียสกับแหล่งพลังงานอย่างอื่น อนุภาคนิวเคลียสจะไม่เหมือนกับรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตรงที่มวลค่าหนึ่ง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

2.4.3.1 โฟโตทรานซิสเตอร์

โฟโตทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่มีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่ตัวเซนเซอร์จนมีความเข้มที่มีค่าสูงพอจะทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่นำกระแสเหมือนสวิตช์ แต่สามารถนำกระแสได้เพียงทิศทางเดียว เราจึงนิยมใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ไปใช้วัดแสงที่มีความแตกต่างของความเข้มไม่ต่างกันมากเพื่อลดความผิดพลาดในการตัดสินใจของตัวเซนเซอร์ นอกจากนี้ยังสามารถรับแสงที่ตาเปล่าของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ เช่น แสง

อินฟราเรด

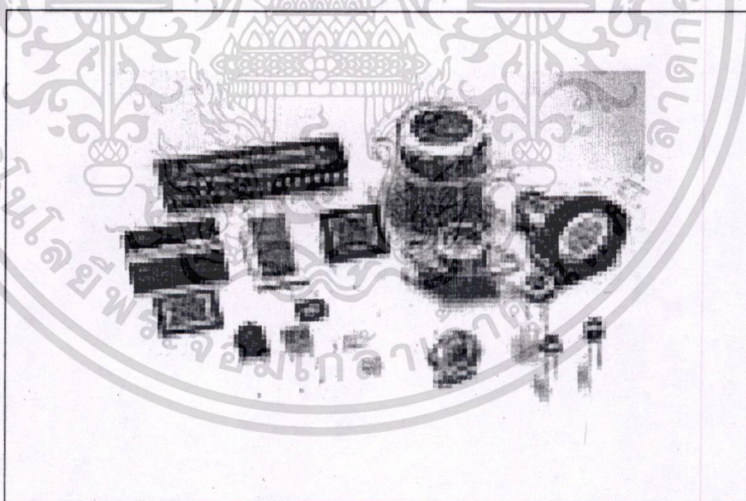
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์โฟโตทรานซิสเตอร์

2.4.3.2 โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอด (Photo Diode) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีหลักการทำงานเหมือนกับโฟโตทรานซิสเตอร์ แต่จะนำกระแสได้น้อยกว่าเท่านั้นเอง และตัวโฟโตไดโอดก็มีแบบที่สามารถรับแสงที่ตาเปล่ามองเห็น เช่น แสงอินฟราเรด ได้เหมือนกัน



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์โฟโตไดโอด ที่ใช้รับแสงอินฟราเรด

2.4.4 เซนเซอร์เชิงกล

เซนเซอร์เชิงกล อาจเป็นเซนเซอร์ตระกูลใหญ่ที่สุดในบรรดาเซนเซอร์ทั้งหมด เพราะว่าการใช้งานในด้านต่างๆ มีมาก ปริมาณเชิงกลมีอยู่มากมายตัวอย่างปริมาณเชิงกลต่างๆ

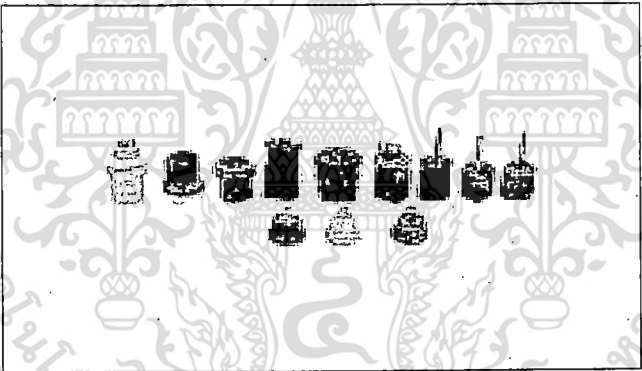
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.1 เซนเซอร์สัมผัส

เซนเซอร์สัมผัสเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนการสัมผัส เช่น การกด การกระแทก ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเปรียบเสมือนกับผิวหนังของมนุษย์ซึ่งทำหน้าที่รับรู้สิ่งที่สัมผัสจากภายนอกมากระทำ

2.4.4.2 สวิตช์กลไก

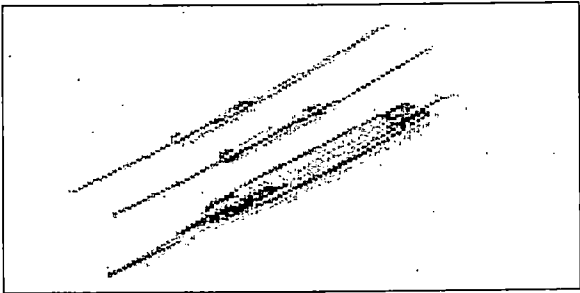
สวิตช์กลไก(mechanical Switch) เป็นอุปกรณ์กลไกที่ทำหน้าที่รับแรงกด แรงกระแทก โดยที่หน้าสัมผัสสวิตช์จะทำการนำกระแสทำให้เราสามารถนำหลักการนี้ไปใช้ในการตัดต่อให้เกิดสัญญาณทางไฟฟ้าได้ สวิตช์ที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมีด้วยกันหลายแบบแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น ในงานหุ่นยนต์ขนาดเล็ก เราจะเลือกใช้สวิตช์ที่มีขนาดเล็กหรือหุ่นยนต์ที่ต้องมีการกระแทกแรงๆ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



รูปที่ 2.13 สวิตช์ที่รับแรงกระแทกหลายแบบ

2.4.4.3 รีดสวิตช์

รีดสวิตช์(Reed Switch) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ แต่ไม่ได้ตรวจับการกดแต่เป็นการตรวจับแรงแม่เหล็ก เช่น เมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาใกล้จะทำให้รีดสวิตช์นำกระแส



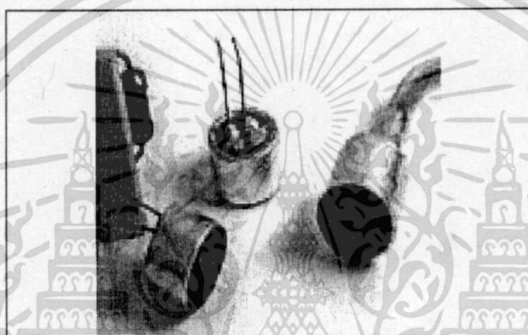
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 2.14 รีดสวิตช์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.4 เซนเซอร์เสียง

เซนเซอร์เสียงมีหลักการทำงานคือทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่เสียงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีหน้าที่คล้ายกับหูของมนุษย์ และนิยมนำไปใช้ในการควบคุมต่างๆ

2.4.4.5 ไมโครโฟน

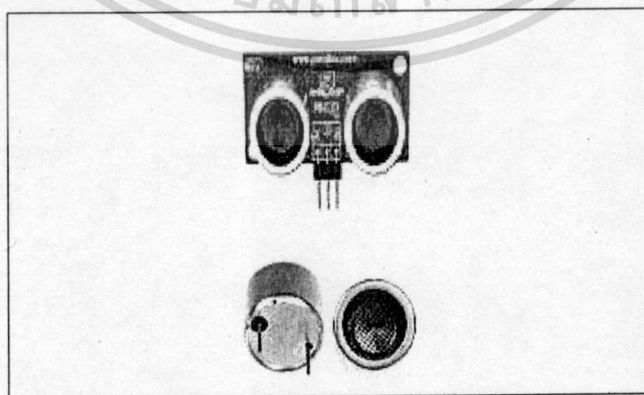
ไมโครโฟน เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เปลี่ยนระดับของเสียงให้กลายเป็นระดับของแรงดันไฟฟ้า ไมโครโฟนมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ โดยไมโครโฟนที่ใช้เป็นเซนเซอร์คือแบบคอนเดนเซอร์ไมโครโฟนซึ่งมีขนาดเล็ก ความไวสูง ซึ่งจะเหมาะต่อการนำไปใช้เป็นเซนเซอร์



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์คอนเดนเซอร์ไมโครโฟน

2.4.4.6 อัลตราโซนิกเซนเซอร์

อัลตราโซนิกเซนเซอร์มีหลักการคล้ายกับไมโครโฟนแต่จะรับเฉพาะที่ความถี่ที่สูงประมาณ 38-40 กิโลเฮิรตซ์ซึ่งสูงกว่าความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยิน ความถี่นี้มักนำไปใช้กับการวัดระยะทาง เช่น เซนเซอร์กันชนของรถที่ใช้เตือน



รูปที่ 2.16 อุปกรณ์อัลตราโซนิกเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 เซนเซอร์แม่เหล็ก

2.4.5.1 แมกเนโตรซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

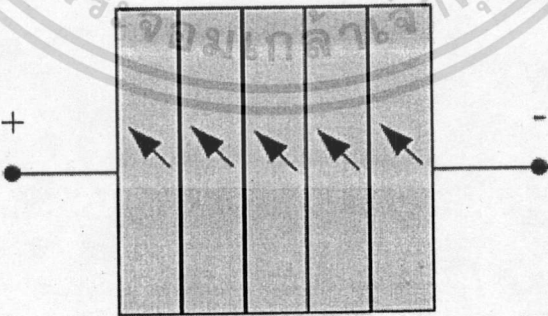
สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยมีโครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าเรียกว่า แมกเนโตรซิสเตอร์ จะอาศัยหลักการแมกเนโตรซิสเทนซ์ (Magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก คือ จะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำพาหะเกิดเป็นมุม θ ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระนาบที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ความต้านทานเบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ 2.1 และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบนมุมการเคลื่อนที่ θ หาได้สมการที่ 2.2

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

$$R(0) = R_0(1 + \tan^2) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{ar} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \tag{2.3}$$

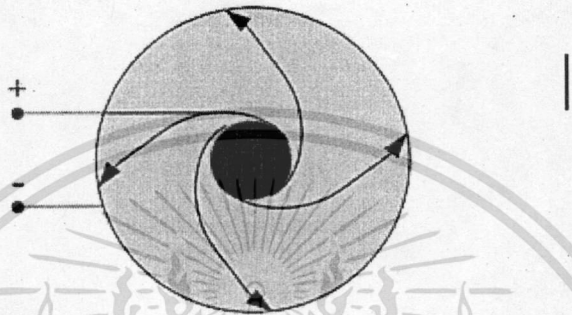
แมกเนโตรซิสเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. **ฮอลล์เอฟเฟกต์แบบขนาน** ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานต่อเรียงกันเป็นแผ่นขนาน ซึ่งในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแมกเนโตรซิสเตอร์แบบขนาน

2.ฮอลล์เฟลทแบบวงกลม จะมีหลักการทำงานคือสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านไฟฟ้า นอกจากนี้ความต้านทานจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุ ในการสร้างแมกเนโตริซิสเตอร์ควรจะเลือกความคล่องตัวสูง



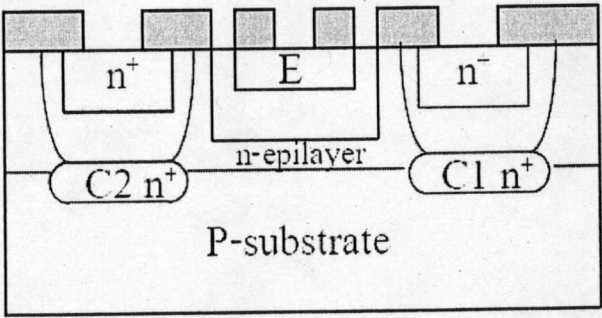
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของแมกเนโตริซิสเตอร์แบบวงกลม

2.4.5.2 แมกเนโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

แมกเนโตทรานซิสเตอร์จะอาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1.แมกเนโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่แนวตั้ง (Vertical magnetotransistor)

ดังรูป 2.19 แมกเนโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่แนวตั้ง จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (Buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลกเตอร์ทั้งสองตัวสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด n^+ เพื่อไม่ให้ข้อต่อเชอร์กิตจึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างชั้น (Buried layer) ทั้งสอง

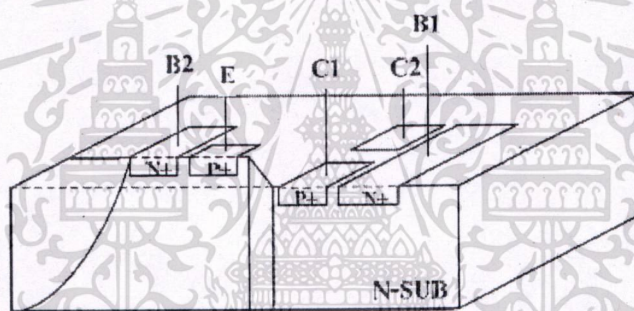


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.19 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกเนโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปถึงคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วนโดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้น (Buried layer) ทั้งสองขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลคเตอร์จะอยู่ในสภาวะสมดุล แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่อยู่ในสภาวะสมดุลจะเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขึ้น

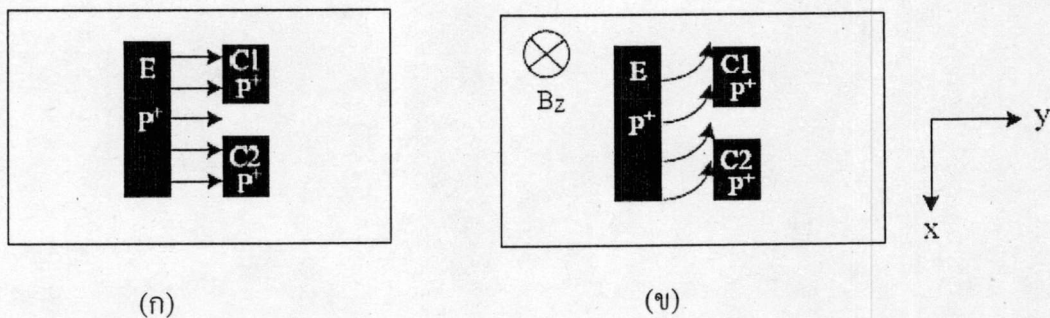
2.แมกเนโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่แนวนอน (Lateral magnetotransistor)

ดังรูป 2.20 แมกเนโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่แนวนอน จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วยอิมิตเตอร์ E,สองคอลเลคเตอร์ C1,C2 และ สองขั้วเบสคอนแทค B1,B2



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของแมกเนโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวนอน

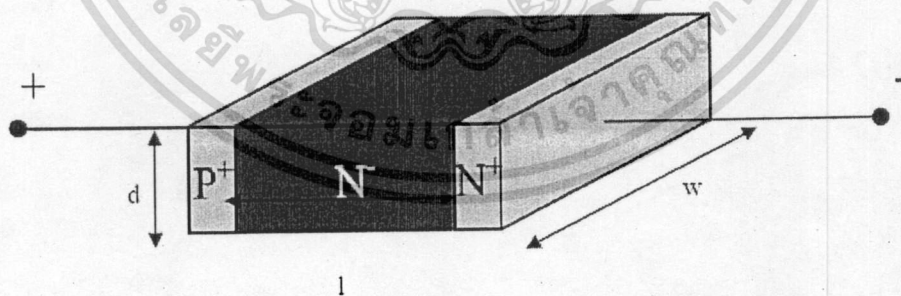
ในการทำงานอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสและไปยังคอลเลคเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปคอลเลคเตอร์ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลคเตอร์จะมีปริมาณเท่ากัน ดังรูป 2.21(ก) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้แรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะ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



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

2.4.5.3 แมกเนโตไดโอด (Magneto Diode)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสามแม่เหล็กโดยมีโครงสร้างเป็นไดโอด โดยมีมิติความยาว,ความกว้างและความสูง ($l \times w \times d$) จะอาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะระหว่างสองรอยต่ออันเป็นผลเนื่องมาจากแมกเนโตคอนเซนเตรชัน (Magneto concentration effect) โดยพาหะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของแมกเนโตไดโอดอีกด้วย โดยการใช้ $\text{Si-Al}_2\text{-O}_2$ และ Si-SiO_2 ที่พื้นผิวเรียกว่า SOS (Silicon-On-Sapphire) ดังรูป 2.22

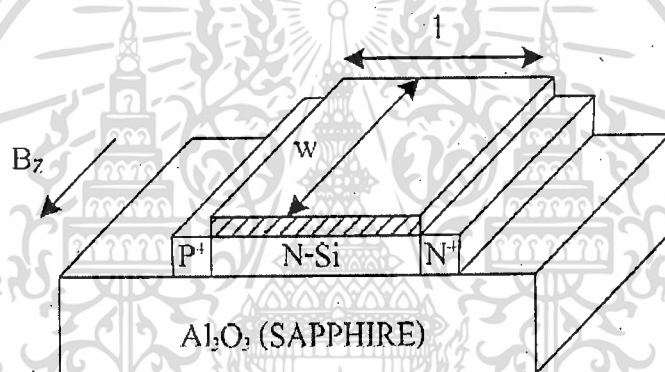


รูปที่ 2.22 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกเนโตไดโอด

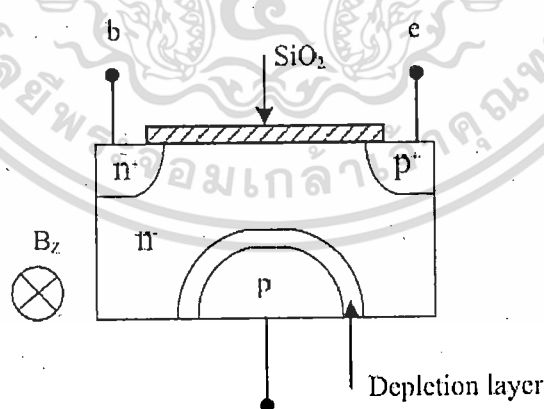
ข้อเสียของ SOS

1. การสร้าง $\text{Si-Al}_2\text{O}_3$ จะเกิดขึ้นได้ยากบริเวณผิวหน้า
2. การตรวจจับสนามแม่เหล็กจะไม่เป็นเชิงเส้น
3. อุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ

พื้นฐานการใช้แมกเนโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS ดังรูป 2.23 โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตรการรวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS แมกเนโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปทางคอลเลกเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลกเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น



(ก)



(ข)

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

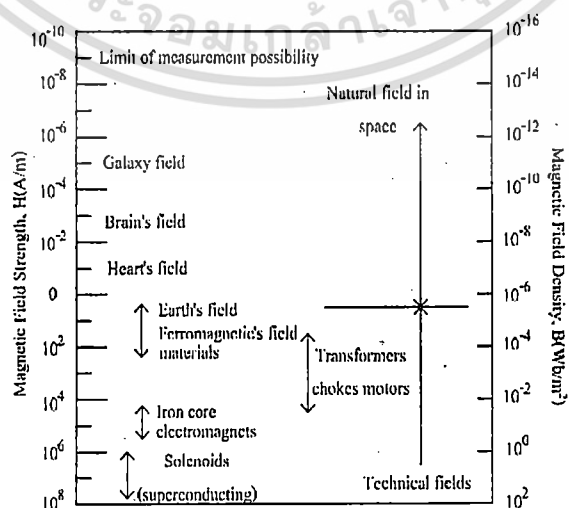
บทที่ 3

แมกเนโตไดโอดแบบคู่

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

3.1 ทฤษฎีสานแม่เหล็ก

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



รูปที่ 3.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ [15]

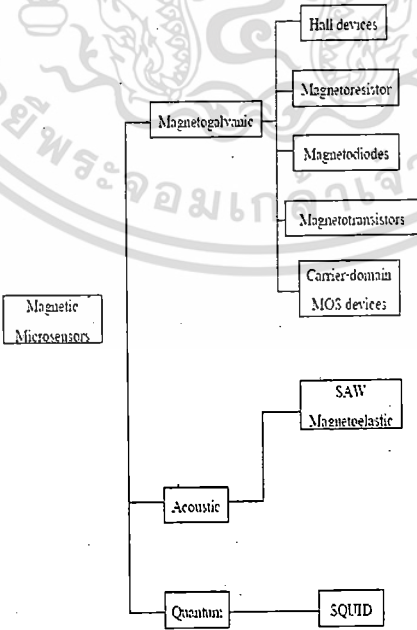
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$B = \mu^B H = \mu_0^B \mu_R^B H \tag{3.1}$$

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

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



รูปที่ 3.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

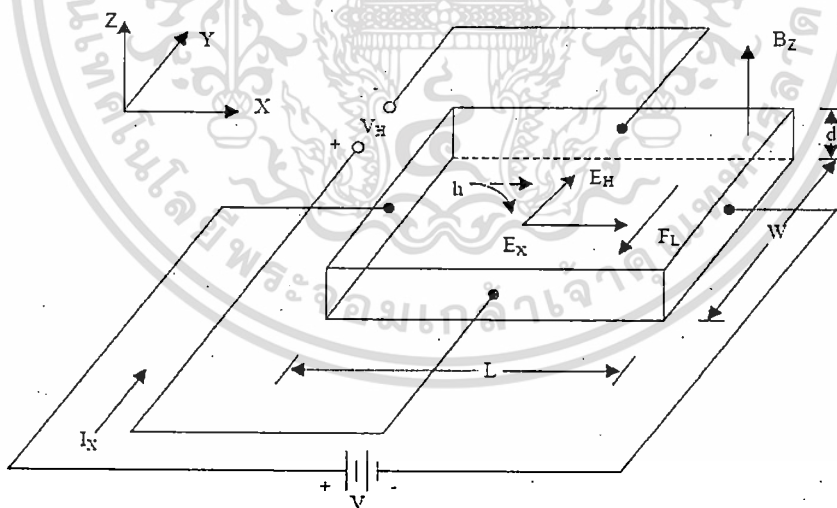
3.2 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

เป็นการทดลองที่มีความสำคัญ เพราะการทดลองนี้ทำให้เราทราบค่าต่างๆ หลายค่าที่สำคัญ ที่อยู่ภายในสารกึ่งตัวนำ เช่น ความหนาแน่นของพาหะ ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ เลยเป็นที่นิยมในการวัด

หลักการ

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

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



รูปที่ 3.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก และมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกอยู่ภายในแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า E_x จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_x ในทิศทาง $+x$ และเมื่อมีสนามไฟฟ้า B_z ตัดผ่าน โดยมีทิศทางตั้งฉากกับกระแส จะเกิดมีแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำต่อโฮลโดยในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\overline{F}_L = e\overline{v} \times \overline{B} \tag{3.2}$$

โดยที่ $\overline{F}_L$ คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\overline{F}_L| = F_L = e.v_x.B_z \tag{3.3}$$

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

$$eE_H = F_L = e.v_x.B_z \tag{3.4}$$

จาก $E_H = v_x.B_z \tag{3.5}$

$$J_x = p.e.v_x \tag{3.6}$$

หรือ $v_x = \frac{J_x}{p.e}$

แทนค่า v_x ลงในสมการ จะได้

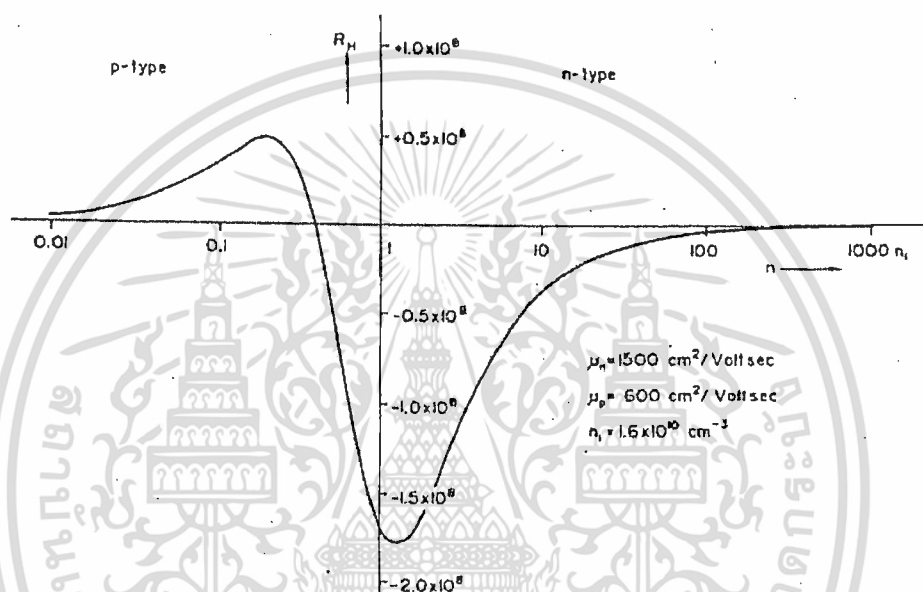
$$E_H = \frac{J_x.B_z}{p.e} \tag{3.7}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{E_H}{J_x.B_z} = \frac{1}{p.e} = R_H \tag{3.8}$$

โดย R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์(Hall coefficient)

ซิลิคอนชนิดอินทรินซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการได้ระดับต่ำ สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าแรงดันฮอลล์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการได้ระดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการได้ไปในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการได้ไปในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

จากรูป 3.3 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ w จะได้

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

โดยที่ V_H คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำโดยการแทนค่า

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

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

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

ความหนาแน่นของโฮล คือ

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

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

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

จาก

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

ดังนั้นจะได้

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

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

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

ดังนั้นโดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็กจะเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

หรือ

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

จะได้

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

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

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ R_{Hl} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

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

และ

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

หรือ

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

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

โดย μ_H คือ สภาพความคล่องตัวของโฮล (Hall mobility) และ μ_{HI} คือสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

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

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

และ

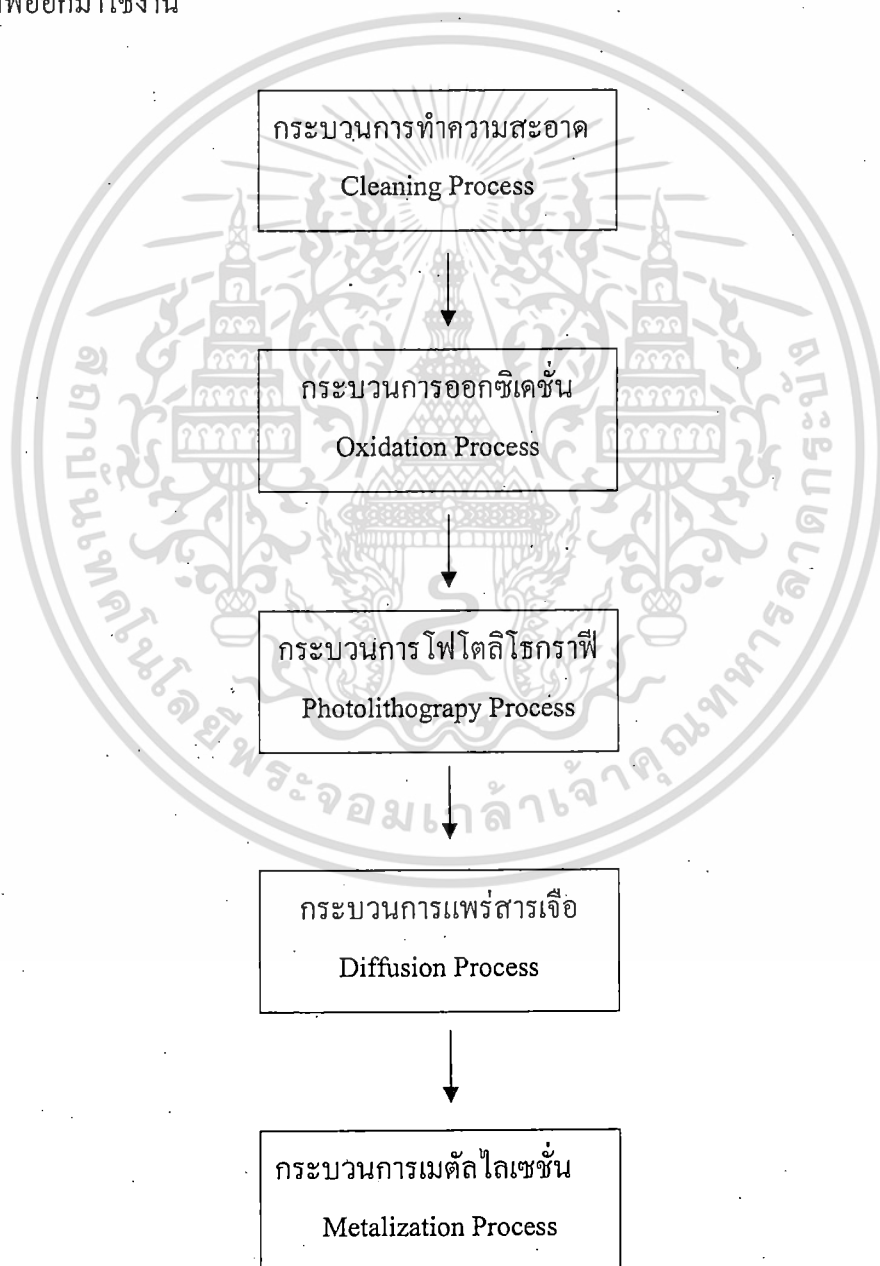
$$\mu_{HI} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93\mu_p \quad (3.21)$$



บทที่ 4

เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกเนโตไดโอด

เป็นขั้นตอนหรือกระบวนการที่ถือว่ามีความสำคัญที่สุดก็ได้ เพราะอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติหรือการทำงานที่จะไปไปตามหลักการและทฤษฎีต่างๆ ได้อย่างถูกต้องนั้นก็ต้องขึ้นอยู่กับกระบวนการนี้ จึงควรมีการศึกษาให้มีความรู้ความเข้าใจถึงกระบวนการวิธีสร้างเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพออกมาใช้งาน



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.1 ที่แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ตัวนำกึ่งตัวนำในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

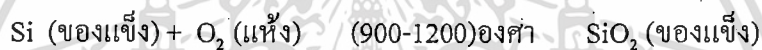
4.1 กระบวนการทำความสะอาด(Cleaning Process)

กระบวนการทำความสะอาดมีเป้าหมายหลักคือ กำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอน เช่น กำจัดฝุ่น กำจัดไขมัน กำจัดเศษโลหะ เพื่อความสะอาดของแผ่นซิลิคอนก่อนลงมือทำการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

4.2 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation Process)

คือการก่อตัวของซิลิคอนไดออกไซด์บนพื้นผิวซิลิคอนโดยที่ซิลิคอนออกในบรรยากาศของออกซิเจน :O₂ และน้ำ:H₂O ที่อุณหภูมิสูงประกอบด้วย

1. Wet Oxidation



2. Dry Oxidation

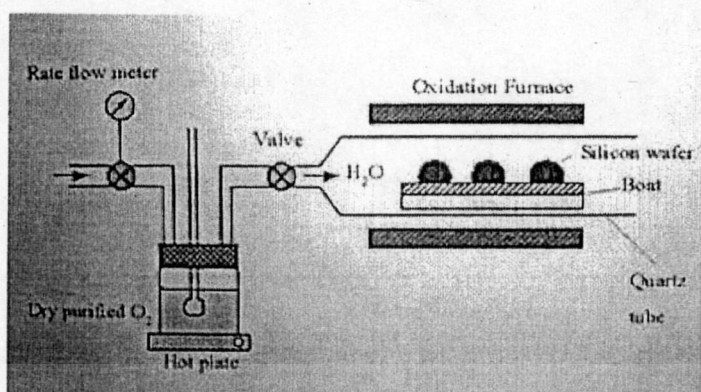


ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีและยังช่วยควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น

จากสมการทางเคมีข้างต้นกระบวนการออกซิเดชัน มีอยู่ 2 แบบคือ

4.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น(Wet Oxidation)

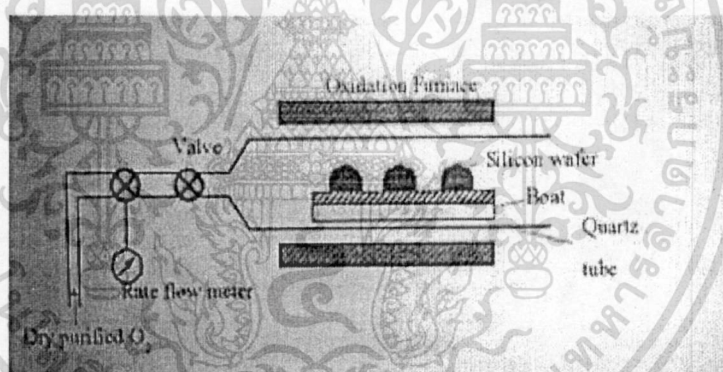
เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ การเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า **Dry Oxidation** เนื่องจากโมเลกุลเองดังที่ได้กล่าว แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ **Wet Oxidation** คือคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ไม่ดี ประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ของอะตอมของสารเจือน้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ไม่สมบูรณ์ และมีรูพรุน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ



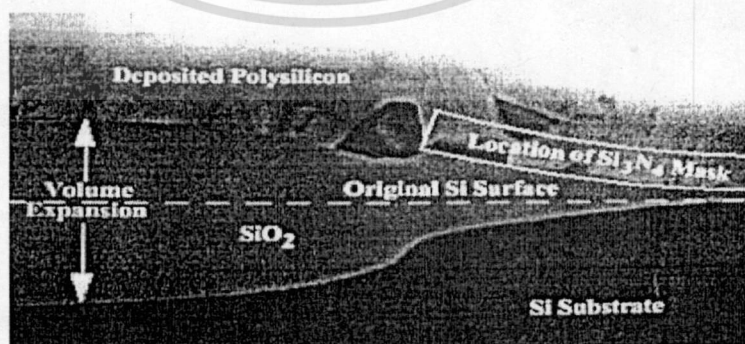
รูปที่ 4.2 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชัน

4.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง(Dry Oxidation)

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



รูปที่ 4.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง



รูปที่ 4.4 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการออกซิเดชัน

1. ระยะเวลาของผลึกผลเนื่องจากระยะเวลาผลึกพิจารณาจาก

- จำนวนพันธะของซิลิคอนที่มีต่อพื้นที่บนผิวหน้าของซิลิคอนที่แต่ละนาบ
- ทิศทางของผลึกมีผลกับค่าพลังงานกระตุ้นที่เริ่มปฏิกิริยา

2. ผลเนื่องจากสารเจือ

- สารเจือที่ใช้โดยปกติคือธาตุหมู่ 3 และหมู่ 5 คือ โบรอน ฟอสฟอรัส อาร์เซนิก ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มอัตราการออกซิเดชันเมื่อมีความเข้มข้นปริมาณสูง ทำให้โครงสร้างพันธะของ SiO_2 อ่อนลง ซึ่งทำให้ H_2O และ O_2 เข้าสู่ SiO_2 ได้โดยง่าย และแพร่ผ่านอย่างรวดเร็ว

3. ผลเนื่องจาก H_2O

4. ผลเนื่องจากคลอรีน

Cl เป็นตัวช่วยแก้ไขคุณลักษณะของอุปกรณ์ให้ดีขึ้น ซึ่งได้มาจากการเป่าแก๊ส HCl , TCE , TCA ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชันด้วยเช่นกัน

5. ผลเนื่องจากความดัน

4.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography Process)

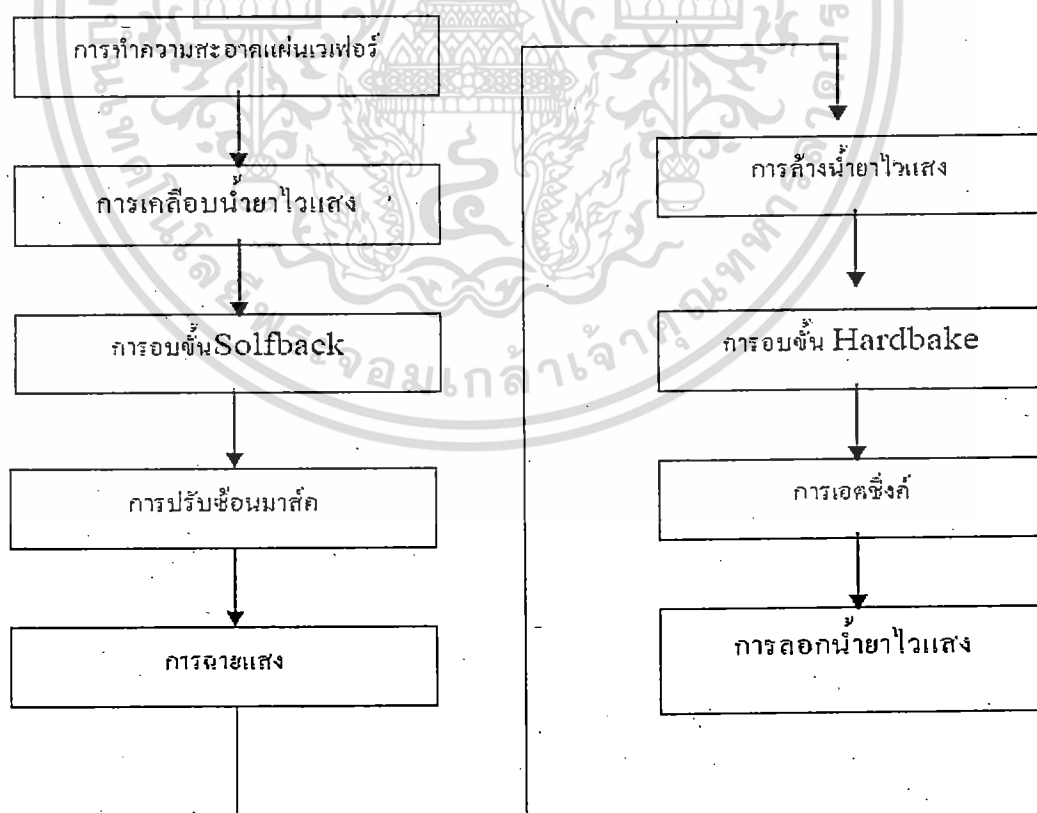
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography Process) คือกระบวนการเกี่ยวกับการส่งผ่านลวดลาย(pattern) จากมาร์คลงไปยังบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

กระบวนการPhotolithography ต้องการห้องที่สะอาดสำหรับการปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในขั้นตอนน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียที่เกิดขึ้นควรควบคุมไม่ให้เกิน 10% ไม่งั้นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะมีการมาส์คที่ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50% ดังนั้นการที่ห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับกระบวนการ Photolithography การสร้างห้องสะอาดส่วนมากจะเป็นแบบ Vertical Laminar Flow ที่มีการกรองฝุ่นออกจากอากาศ เพื่อให้เป็นห้องสะอาดในระดับตั้งแต่ Class10K-Class1 ดังแสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดง CLASS ต่างๆของห้องสะอาด

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

กระบวนการPhotolithography Process โดยขั้นตอนพื้นฐานต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนกระบวนการPhotolithography Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์(Wafer Cleaning)

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

4.3.2 การเคลือบสารไวแสง(Photoresist coating)

สารไวแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

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

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

สิ่งสำคัญก่อนเคลือบสารไวแสงคือแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าและสร้างชั้นออกไซด์แล้ว อบอุ่นในตู้ประมาณ 30-60 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดออกได้ง่าย ซึ่งการเคลือบสารไวแสงสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

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

แบบที่ 2 การเคลือบด้วยสเปรย์(Spray Coating) มีหลายแบบ ส่วนมากใช้ในโรงงาน

แบบที่ 3 วิธีใช้ลูกกลิ้ง(Roller Coating) ซึ่งวิธีนี้จะใช้เคลือบเฉพาะตอนที่ตัดแยกชิพโดยเคลือบหมดทั้งแผ่น 2 ด้าน และนำไปทำการถ่วงละลายเส้นที่จะทำการตัด ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวสำหรับใบเพชรตัด และยังเป็นการป้องกันผุ่นและรอยเปื้อนต่างๆ จากการตัด ซึ่งส่วนมากจะใช้สารไวแสงแบบบวกเพราะถ้าใช้สารไวแสงแบบลบ ผุ่นและจุลินทรีย์แสงอาจทำให้เกิด Pinhole บนฟิล์มได้ หลังจาก develop แล้ว

4.3.3 การอบขึ้น Softback

การอบขึ้น Softback จะช่วยในการยึดติดกับแผ่นซีลิกอนและช่วยในการลอกออกขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 10 ถึง 30 นาที ในเตาที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศา ในอากาศหรือบรรยากาศในโตรเจน

4.3.4 การปรับซ้อนมาสก์(Mask Alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาสก์ โดยการนำกระจกโฟโตมาสก์วางทับบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่กระจกโฟโตมาสก์ชั้นแรกสามารถทำได้โดยไม่มีการปรับซ้อนมาสก์ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งของวงจรรวมบนแผ่นผลึกเลยแต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้นได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

ดังนั้นการใช้กระจกมาสก์ตั้งแต่มาสก์ 2 เป็นต้นไปก่อนที่จะฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับซ้อนมาสก์ เพื่อให้ลวดลายบนกระจกมาสก์ซ้อนทับกับลวดลายที่อยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ซึ่งทำให้ขบวนการโฟโตกราฟิสามารถเปิดชั้นออกไซด์ได้อย่างถูกต้อง และเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมากดังนั้นการปรับซ้อนจึงใช้อุปกรณ์ช่วยเรียกว่า ตัวปรับซ้อนมาสก์ ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือ นำแผ่นผลึกวางและติดกับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับเลื่อนได้ในแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงนอกจากนี้ยังปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาสก์จะถูกยึดให้อยู่เหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนแผ่นโฟโตมาสก์พร้อมกับการปรับแผ่นเลื่อนแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงจนกระทั่งภาพลวดลายที่บนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาสก์ซ้อนทับกันตรงตำแหน่งที่ถูกต้องจากนั้นทำการปรับแผ่นผลึกเลื่อนขึ้นในแนวสูงจนแนบสนิทกับกระจกมาสก์ดังนั้นเราก็จะได้ตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อเตรียมขั้นตอนการฉายแสงต่อไป

4.3.5 การฉายแสง(Exposure)

การฉายแสง(Exposure) คือขั้นตอนที่ต่อจากการปรับซ้อนมาสก์(Alignment) วิธีการก็คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงย่านอุลตราไวโอเลตเอ็กโพสหรือฉายผ่านลวดลายฟิล์มโลหะบนกระจกมาสก์ที่ทำการอัลไลน์กับแผ่นซีลิกอนเวเฟอร์ที่ด้านบนมีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่แสงจะผ่านลวดลายหรือไม่ผ่านลวดลายฟิล์มโลหะด้านบนจะเป็นตัวบ่งแสงไว้ส่วนที่ผ่านได้จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสงหรือโฟโตริซิสบนผิวซีลิกอน การเอ็กโพสหรือฉายแสงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งพอให้แสงทำปฏิกิริยากับโฟโตริซิสอย่างสมบูรณ์

4.3.6 การลี้ยงน้ำยาไวแสง(Development)

Development เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงด้วยน้ำยาDeveloper โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการDevelop ส่วนที่ถูกแสงจะละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่

4.3.7 การอบขึ้น Hardbake

หลังจากการฉายแสงและทำการ Development ขึ้นตอน Hardbakeing จะช่วยทำให้โฟโตรีซิส ติดกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดีขึ้น ขึ้นตอนนี้จะอบในเตาที่อุณหภูมิ 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)

การกัดคือการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องหรือพื้นที่ให้ได้ตามต้องการ สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีส่วนผสมหลักคือกรดไฮโดรฟลูอริกหรือ HF จะเป็นสารละลายที่ใช้กัดซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีอัตราการกัดอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ ที่ 25 องศา เราต้องคำนวณหาความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ให้เหมาะสมเพราะสารละลายทางเคมีจะกัดทุกทิศทุกทางเท่ากันหมดถ้าเราปล่อยให้กัดในเวลาที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดที่ด้านข้างทำให้ลวดลายเสียหายได้ หลังจากกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เราจะได้ช่องหรือลวดลายตามมาส์คบนผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว

4.3.9 การล่อน้ำยาไวแสง

การล่อน้ำยาไวแสงออกจากแผ่นผลึกเป็นขั้นตอนต่อจากการEtching โดยการจุ่มแผ่นผลึกลงไปในน้ำยาลอกฟิล์ม อาจเป็นสารเคมีหรือใช้พลาสมาเพื่อทำให้ผิวผลึกสะอาดเตรียมนำไปแพะสารเจือได้ ซึ่งถ้าบนผิวหน้าของซิลิคอนมีความสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพะสารเจือ

เมื่อลอกชั้นไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์(microscope)เพื่อดูว่ามีการกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่ติดไม่แน่นหรือเกิดการกัดที่มากเกินไปถ้าเสียหายมากอาจต้องกลับไปเริ่มทำใหม่

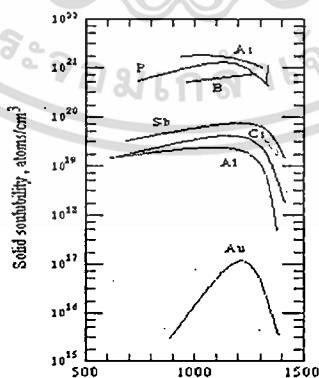
4.3.10 กระบวนการแพร่สารเจือ(Deposition)

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการแพร่สารเจือลงในแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการแพร่ด้วยอุณหภูมิสูงทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ(Source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรองและถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็นขึ้น

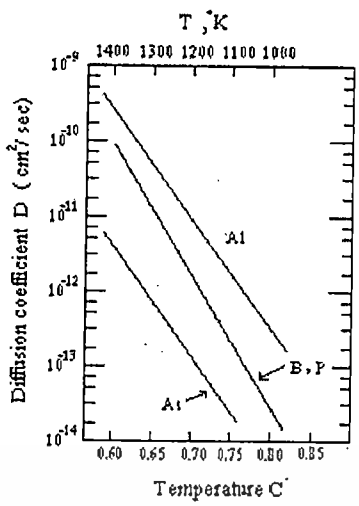
ขั้นตอนการแพร่สารเจือทำได้โดยกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งเป็นแหล่งเจือโบรอน(Boron Source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และฟอสฟอรัสใช้สร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปในบรรยากาศของสารเจือ ทำให้อะตอมของสารเจือเคลื่อนที่เข้าไปยังฐานรองความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม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

1. การแพร่สารเจือขั้นต้น(Pre-deposition)

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

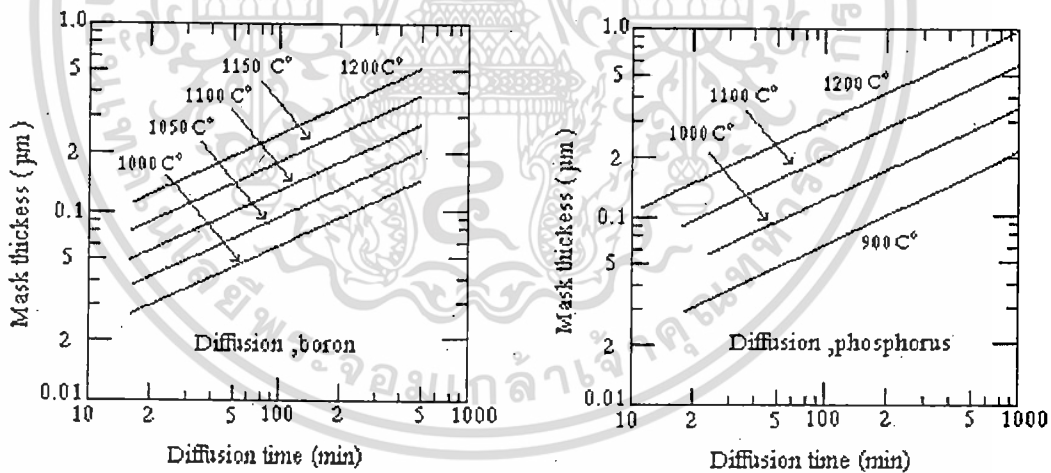


รูปที่ 4.6 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะลูมิเนียม

ถ้าความสามารถในการแพร่ของสารเจือ เช่น As,P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิคอนได้ออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิคอน ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นหน้ากากเพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของฐานรองโดยความหนาของชั้นซิลิคอนที่พิจารณาจาก อุณหภูมิ เวลาและสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส

2. การขัปลึก

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารเจือบริเวณผิวที่ได้จากขั้นตอนการแพร่ชั้นต้น แพร่ลงไปในเนื้อสารมากขึ้นความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นซิลิคอน

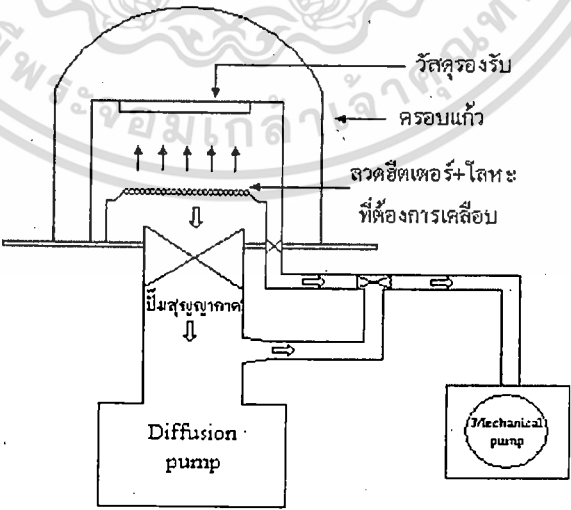
4.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Meltalztation Process)

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ตามลำดับขั้นตอนต่างๆจนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ละส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงแยกกันอยู่ในสภาพยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้จึงจำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Meltalztation Process)ก่อน

กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Meltalztation Process) คือขบวนการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายใน สำหรับการเลือกโลหะเพื่อใช้เคลือบแผ่นซิลิคอนเพื่อให้เป็นรอยต่อแบบโอห์มมีครอยต่อโอห์มมิก(Ohmic contact) หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายในของวงจรรวมซึ่งมีคุณสมบัติเช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูงติดแน่นกับผิวซิลิคอนได้ออกไซด์และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ได้แก่ อะลูมิเนียม(AL),ทอง(Au)และเงิน Ag เป็นต้น

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

เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

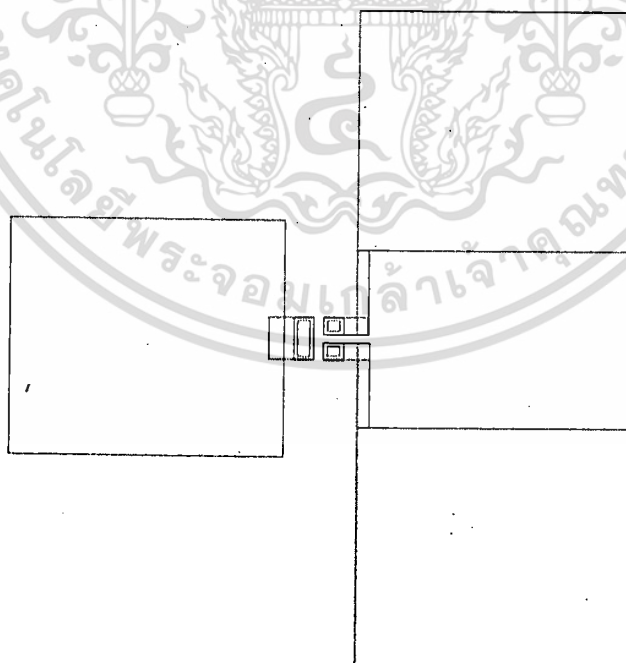
เมื่อใส่หลอดทำให้ร้อนโดยผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลื่อนโลหะจะถูกควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไส้เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้จนเป็นของเหลวที่ติดกับไส้ก็จะระเหยเป็นไอพุ่งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางไว้ใน Chamber

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าระเหยกลายเป็นไวก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ไส้ต้องเลือกให้มีขนาดที่เหมาะสมกับสารที่ใช้ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการและพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร AL,Au,Ag,Pd เป็นต้น

4.5 การออกแบบแมกเนโตไดโอดแบบคู่

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

- ที่ระยะ $50\ \mu\text{m}$



รูปที่ 4.10 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่ 1 ที่ระยะ $50\ \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 โครงสร้างแมกเนตรอนแบบคู่แบบที่ 2 ที่ระยะ $50 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.12 โครงสร้างแมกเนตรอนแบบคู่แบบที่ 3 ที่ระยะ $50 \mu\text{m}$ ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

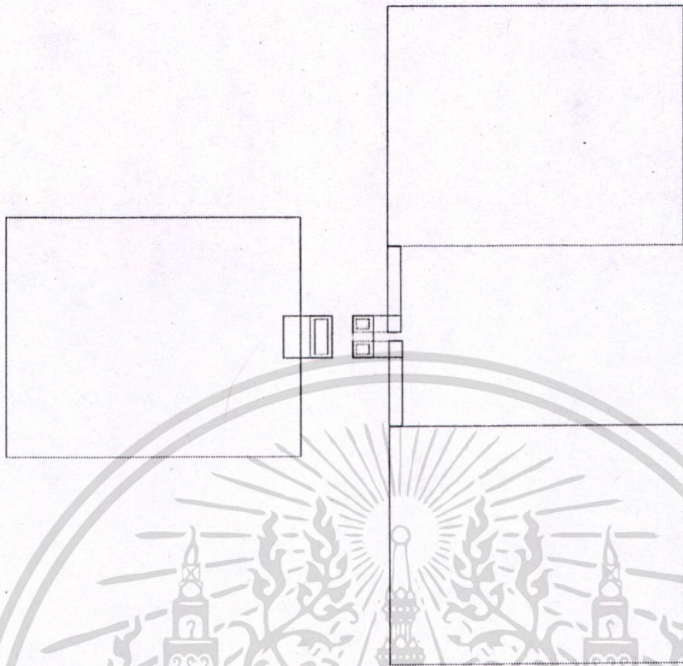
- ที่ระยะ 100 μm



รูปที่ 4.13 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่1 ที่ระยะ 100 μm

รูปที่ 4.14 โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบคู่แบบที่2 ที่ระยะ 100 μm

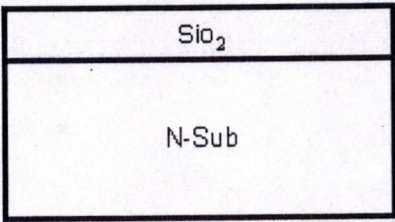
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 โครงสร้างเมกนโตไดโอดแบบคู่แบบที่3 ที่ระยะ 100 μm

4.6 กระบวนการสร้างเมกนโตไดโอดแบบคู่

- 1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน
 - ดั้มใน Trichloroethylene 5 นาที
 - Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
 - ล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง ประมาณ 4 วินาที
 - ล้างในน้ำ DI แก้วที่สอง ประมาณ 4 วินาที
 - เป่าให้แห้งด้วย N_2



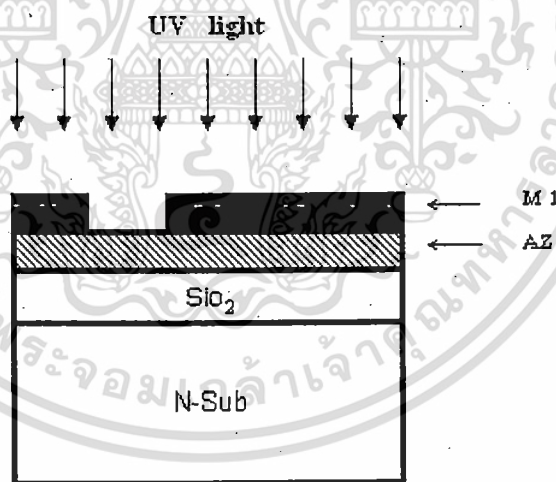
รูปที่ 4.16 แผ่นซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

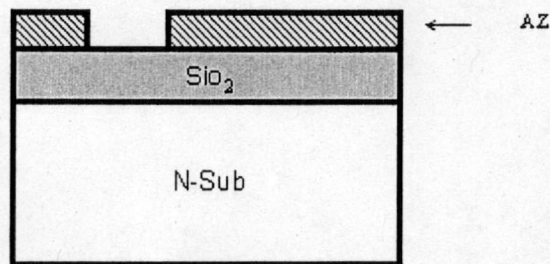
2. กระบวนการ โฟโวลติโทกราฟฟี มาส์คที่ 1

ทำการถ่ายมาส์คไปยังผิวงหน้าของแผ่นซิลิคอน

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ,1350) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°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°C 20 นาที



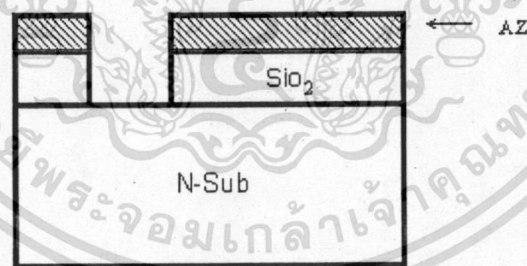
รูปที่ 4.17 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาส์คที่ 1



รูปที่ 4.18 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโต้ลิโทกราฟี

3. กระบวนการ Etching

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

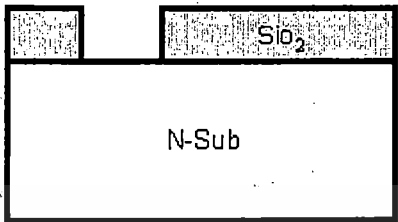


รูปที่ 4.19 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

4. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

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

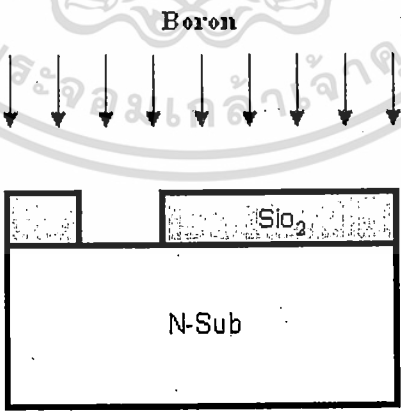
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

5. กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน (Diffusion)

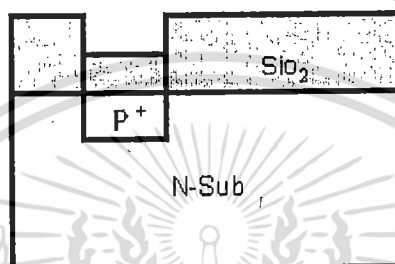
- Activate แผ่น B_2O_3 ด้วย O_2 1200 cc/min
- Diffusion 25 นาที
- O_2 1200 cc/min 10 นาที
- จุ่มในสารละลาย HF 5 % 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 4.21 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ

6. กระบวนการ drive in (Temp 1100°C)

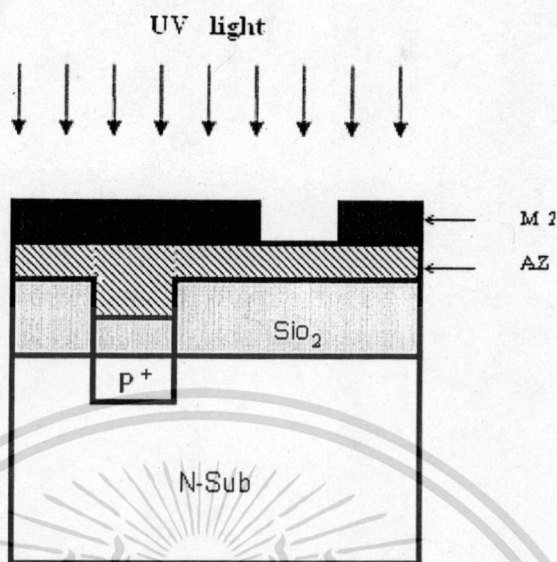
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 30 นาที
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc/min 30 นาที
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 30 นาที



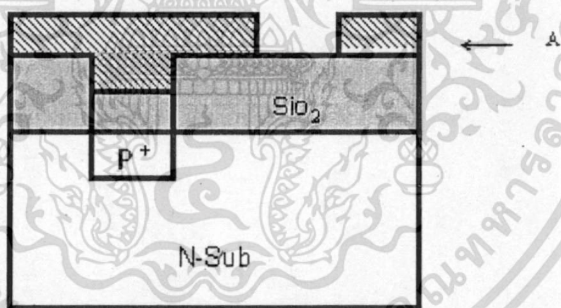
รูปที่ 4.22 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in

7. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับชั้นมาส์ค (Alignment (M 2))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development1 15วินาที
- Development2 15วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที



รูปที่ 4.23 แผ่นซิลิกอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 2

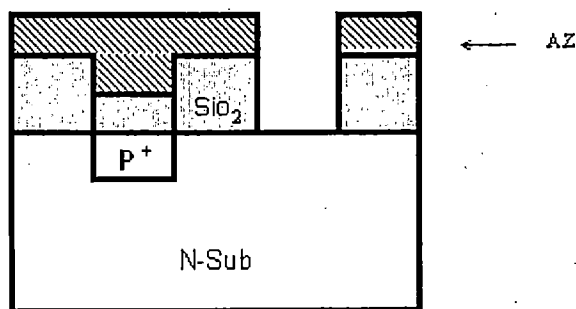


รูปที่ 4.24 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการโฟโต้ลิโทกราฟี

8. กระบวนการ Etching

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

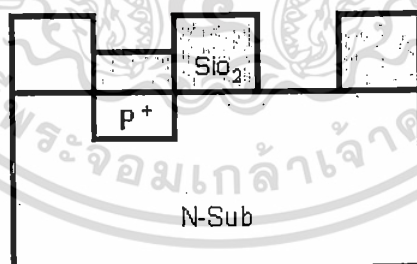
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

9. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

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



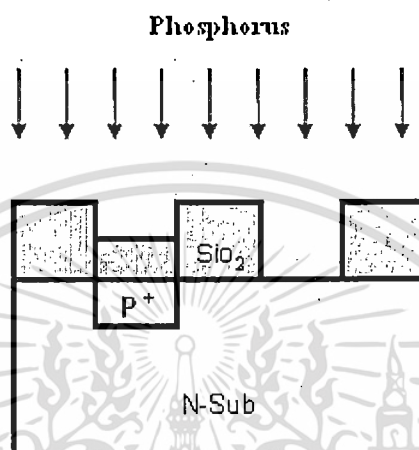
รูปที่ 4.26 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

10. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (Diffusion)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

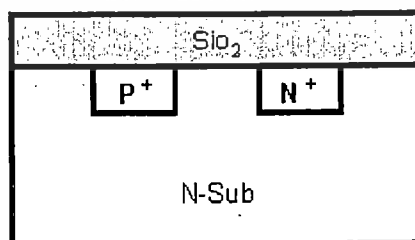
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 4.27 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ

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

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

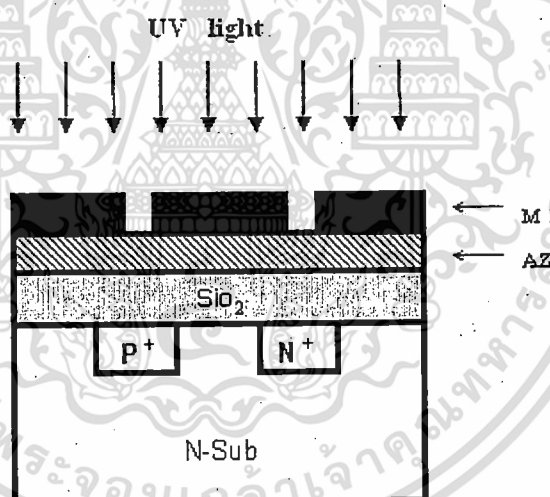


รูปที่ 4.28 แผ่นซิลิคอนหลังการ Drive in

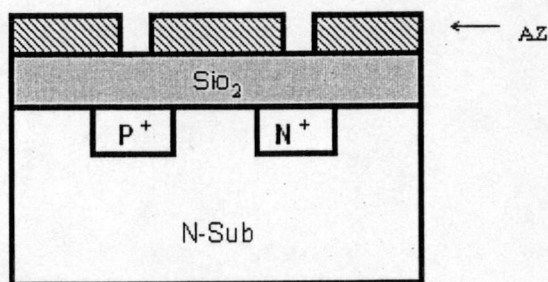
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3 (Contact)

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับชั้นมาสค์ (Alignment (M 3))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development1 15วินาที
- Development2 15วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที



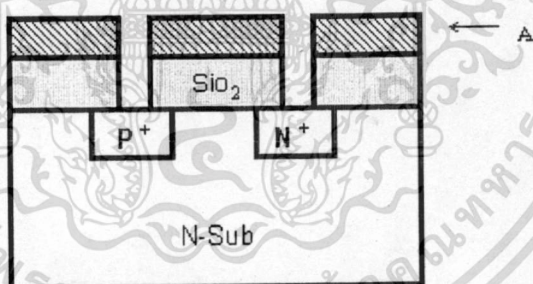
รูปที่ 4.29 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 3



รูปที่ 4.30 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี

13. กระบวนการ Etching

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

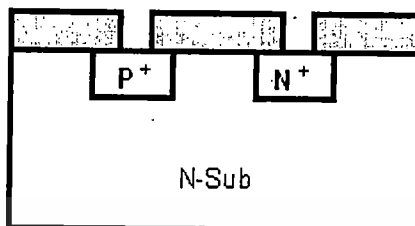


รูปที่ 4.31 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นออกไซด์

14. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

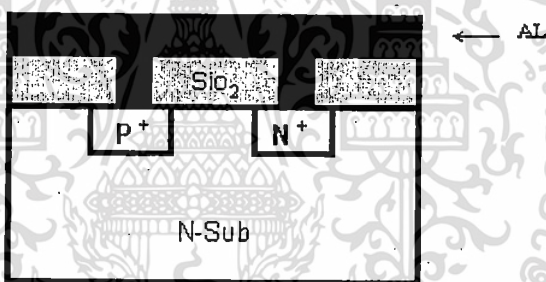
- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

15. การเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator

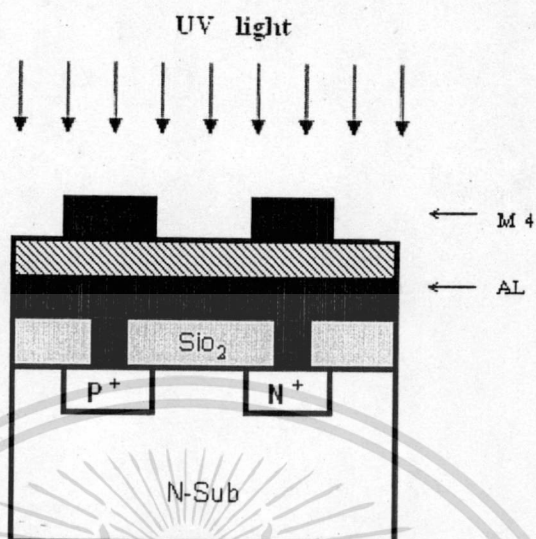


รูปที่ 4.33 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม

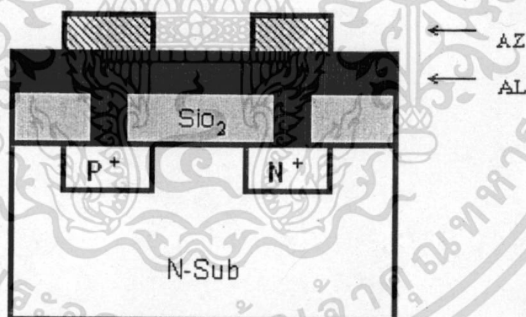
16. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 4 (AL)

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับชั้นมาสค์ (Alignment (M 4))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 95°C 20 นาที การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายภาพมาส์คที่ 4

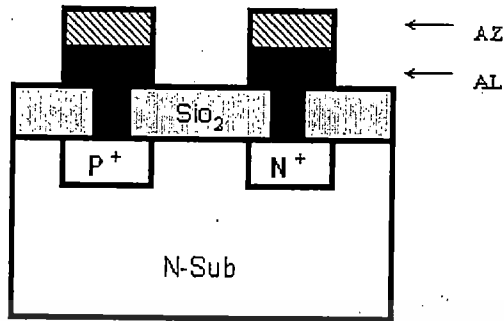


รูปที่ 4.35 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี

17. กระบวนการ Etching (Al)

- จุ่มในน้ำสารละลาย Phosphoric Aid
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

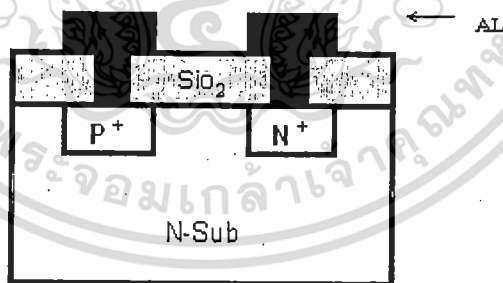
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการกัดชั้นอลูมิเนียม

18. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

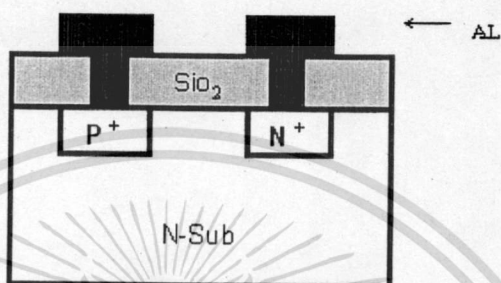
- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 4.37 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

19. Sintering

ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000°C ในเวลา 10 นาที



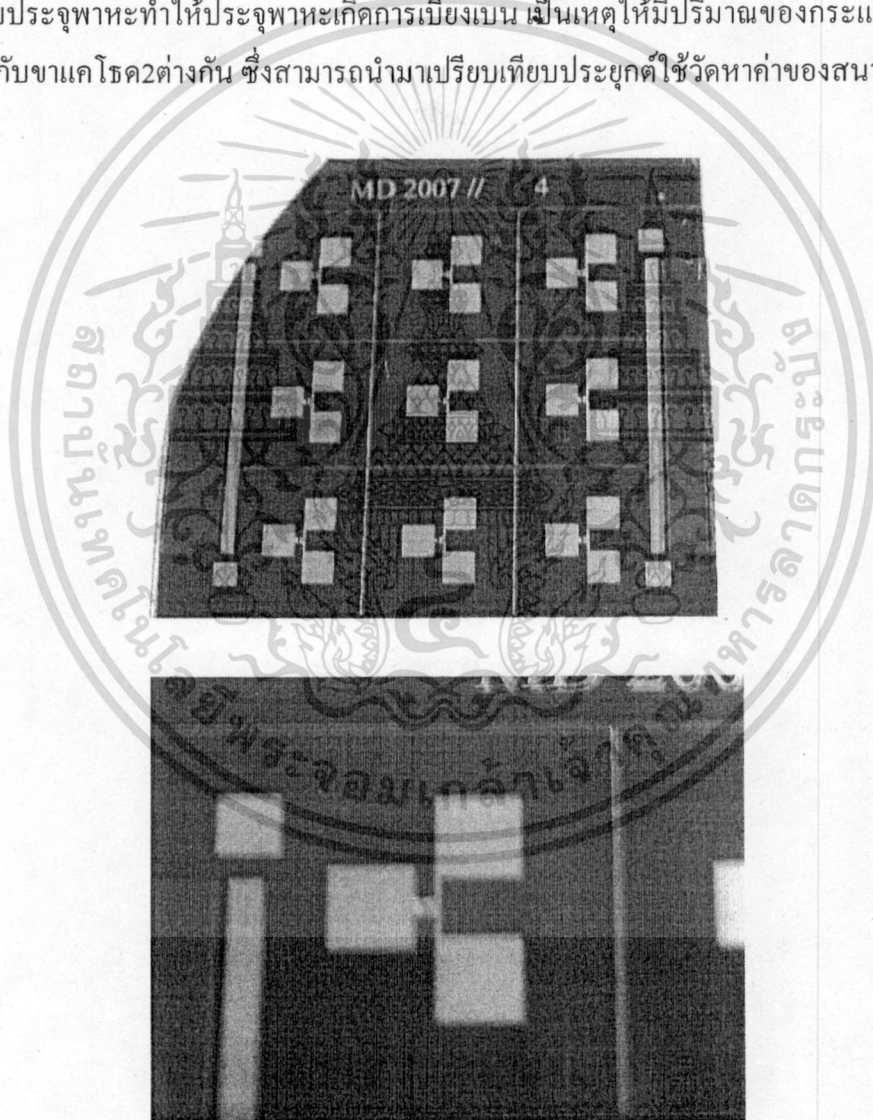
รูปที่ 4.38 แมกเนโตไดโอดแบบคู่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

โครงการในเทอมนี้เป็นการศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งเป็นการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับผิวของแมกเนโตไดโอดแบบคู่ จากหลักการดังกล่าวทำให้ทราบว่าตัวแมกเนโตไดโอดแบบคู่สามารถอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้มีแรงลอเรนซ์มากระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเกิดการเบี่ยงเบน เป็นเหตุให้มีปริมาณของกระแสไหลที่ขาแคโรด 1 กับขาแคโรด 2 ต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบประยุกต์ใช้วัดค่าของสนามแม่เหล็ก



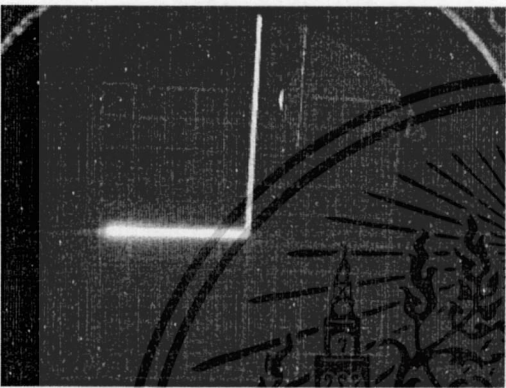
รูปที่ 5.1 แมกเนโตไดโอดที่ได้จากการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 คุณสมบัติความต้านทานของกระแสและแรงดันของไดโอด

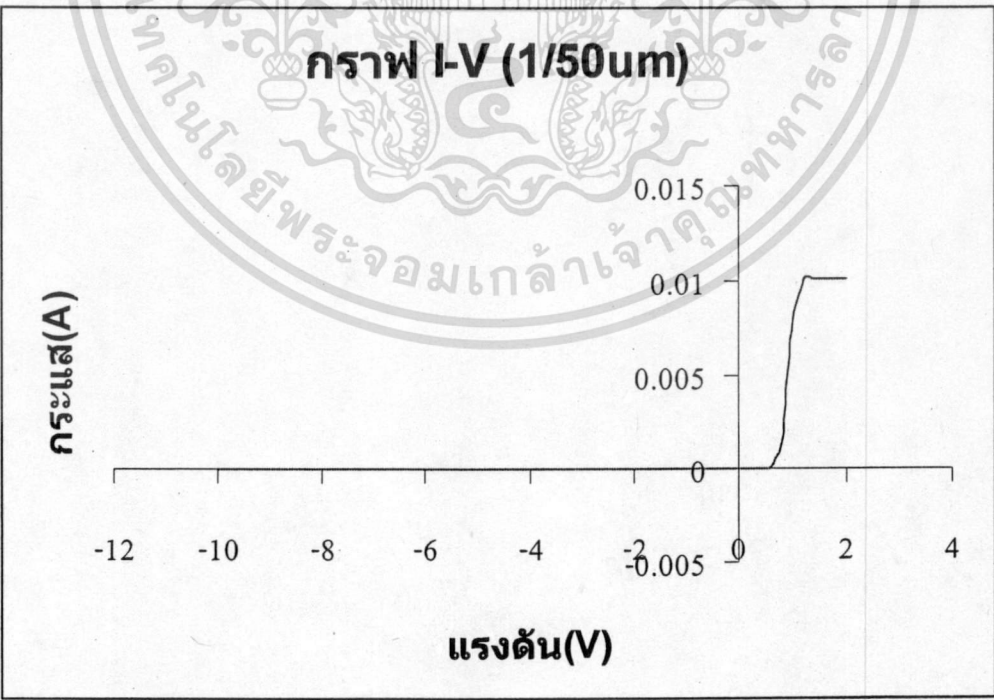
5.1.1 ที่ระยะห่าง(L)=50 μm

แบบที่ 1



V/D = 5 V
I/D = 0.1 mA
Breakdown voltage > 25 V

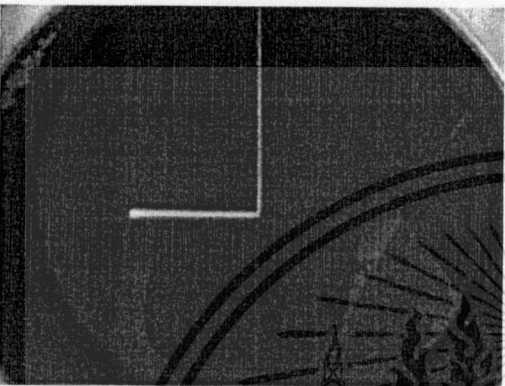
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50 μm . แบบที่ 1



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 μm . แบบที่ 1

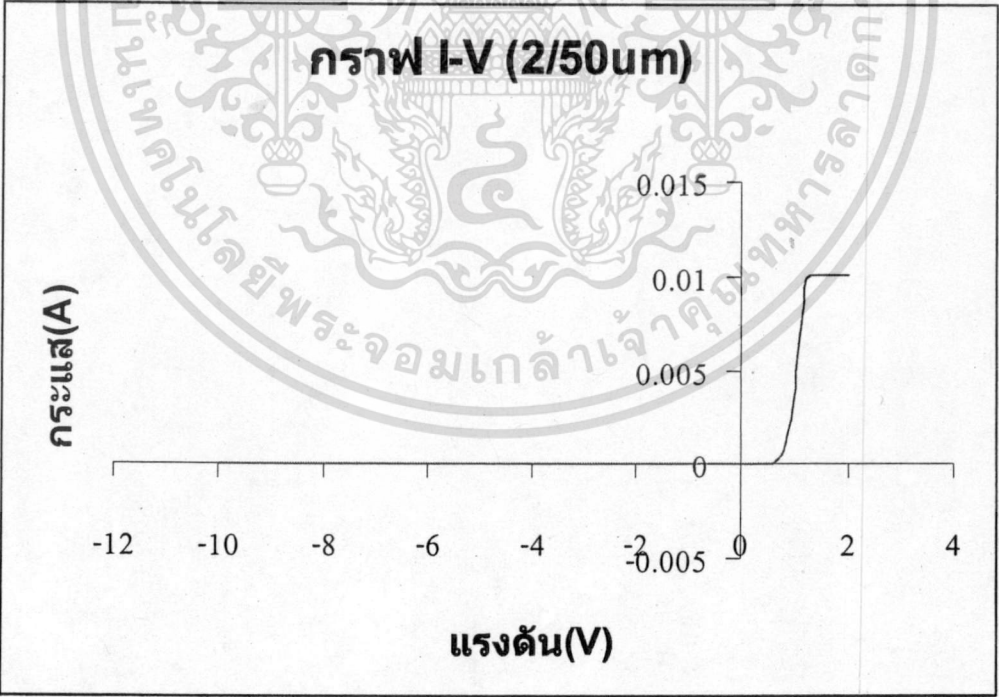
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 2



$V/D = 5\text{ V}$
 $I/D = 0.1\text{ mA}$
Breakdown voltage $> 25\text{ V}$

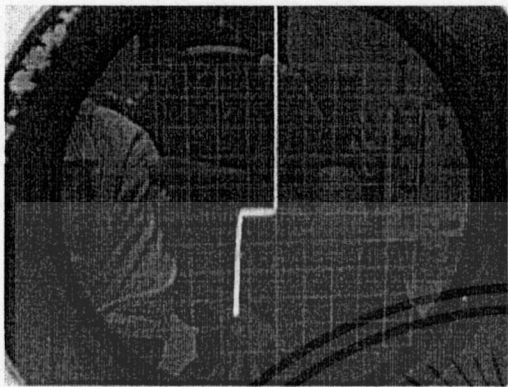
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 2



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 2

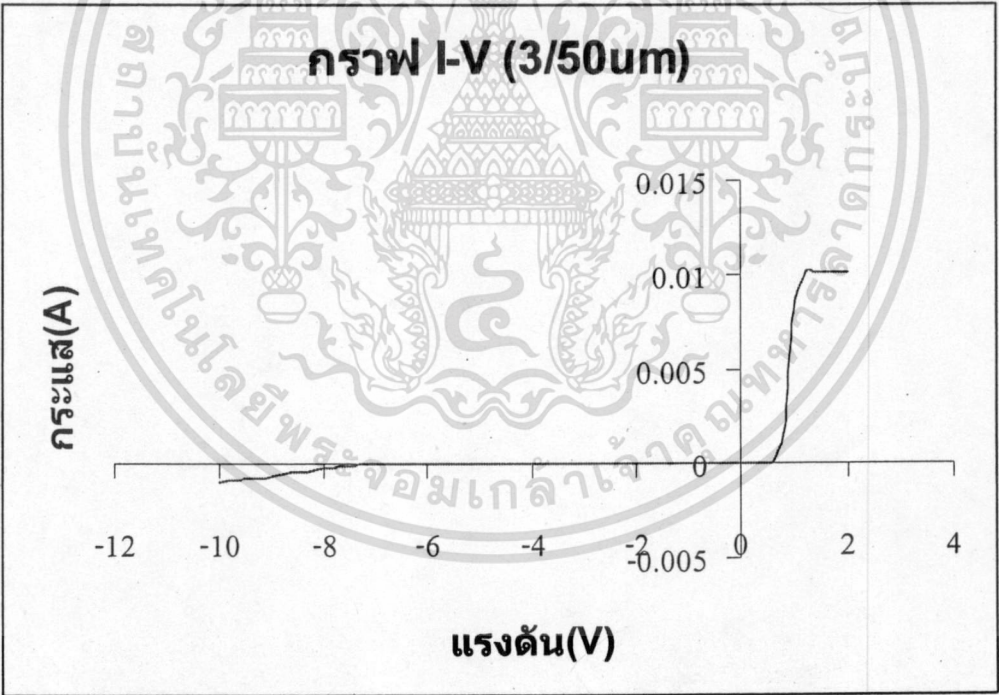
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 3



$V/D = 5 \text{ V}$
 $I/D = 0.1 \text{ mA}$
Breakdown voltage $\cong 6 \text{ V}$

รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 3



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=50 μm แบบที่ 3

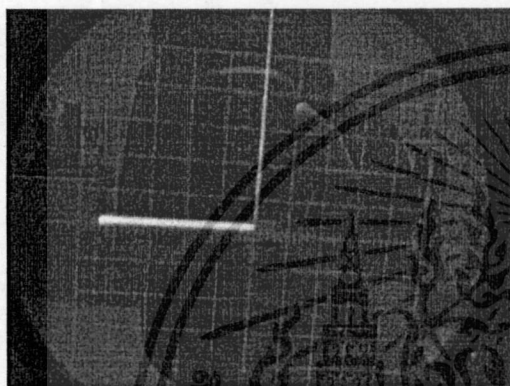
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ที่ระยะห่าง(L)=100 μm

แบบที่ 1

เนื่องจากอุปกรณ์เกิดความเสียหายจากกระบวนการผลิต

แบบที่ 2

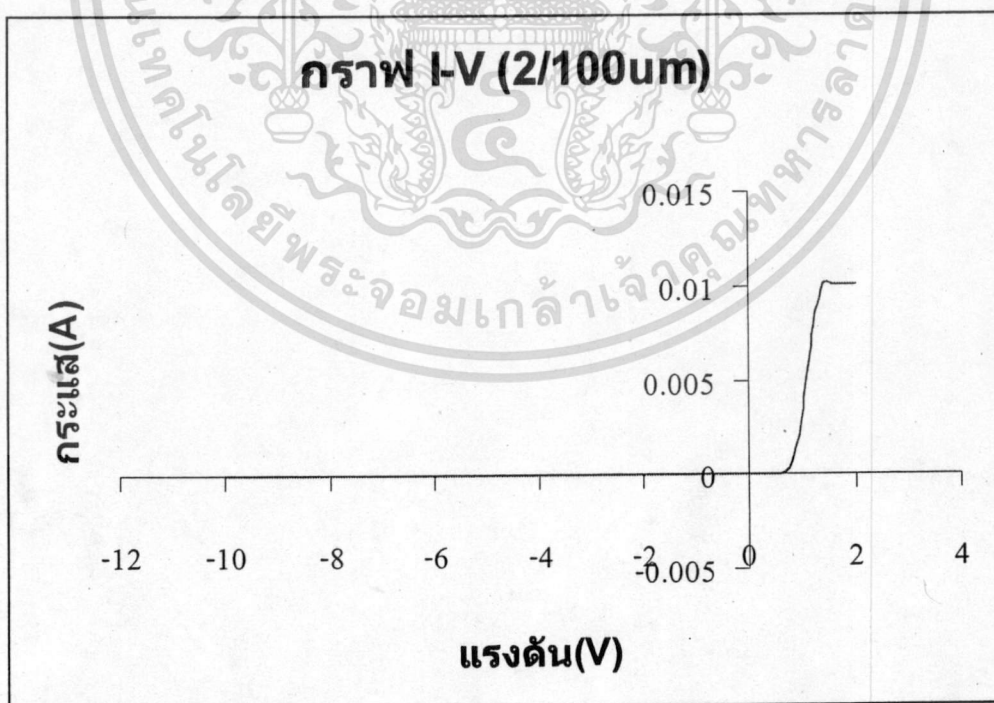


$$V/D = 5 \text{ V}$$

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

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

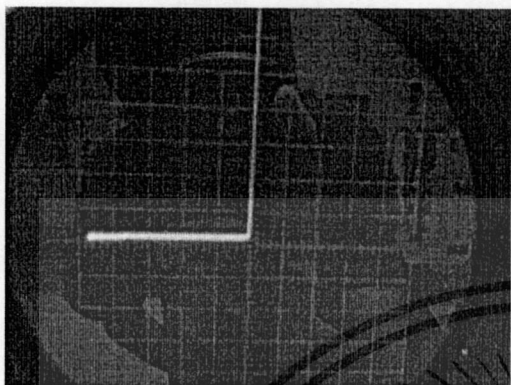
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=100 μm แบบที่ 2



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะที่ได้รับไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารและไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=100 μm แบบที่ 2 โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 3

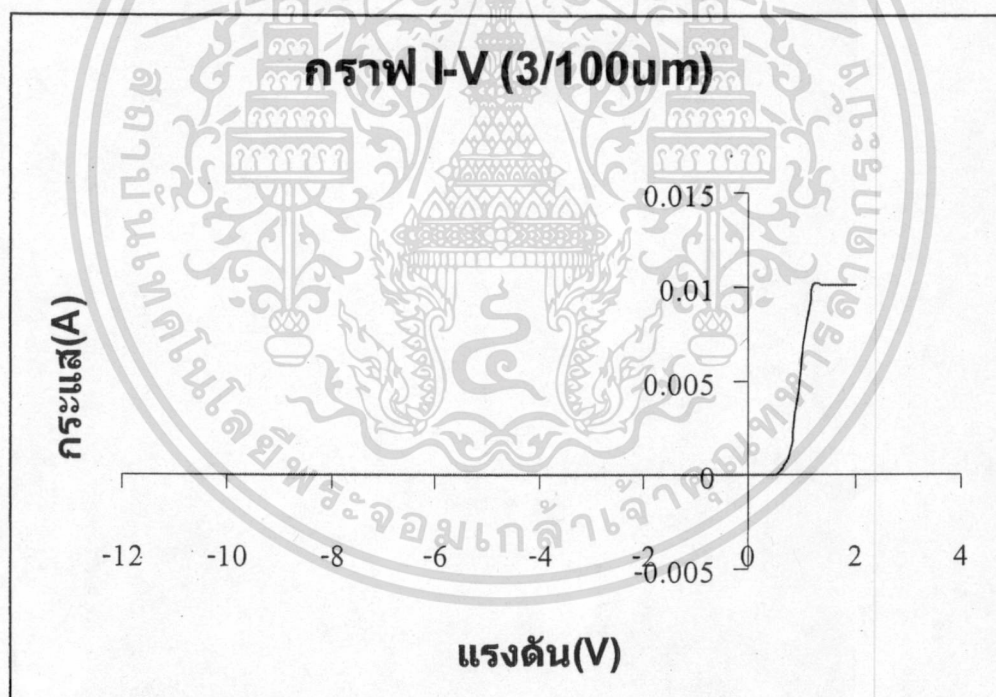


$$V/D = 5 \text{ V}$$

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

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

รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ ที่ระยะห่าง(L)=100 μm แบบที่ 3



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรง และไบอัสกลับที่ได้จากเครื่องบันทึกผล ที่ระยะห่าง(L)=100 μm แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกเนโตไดโอด



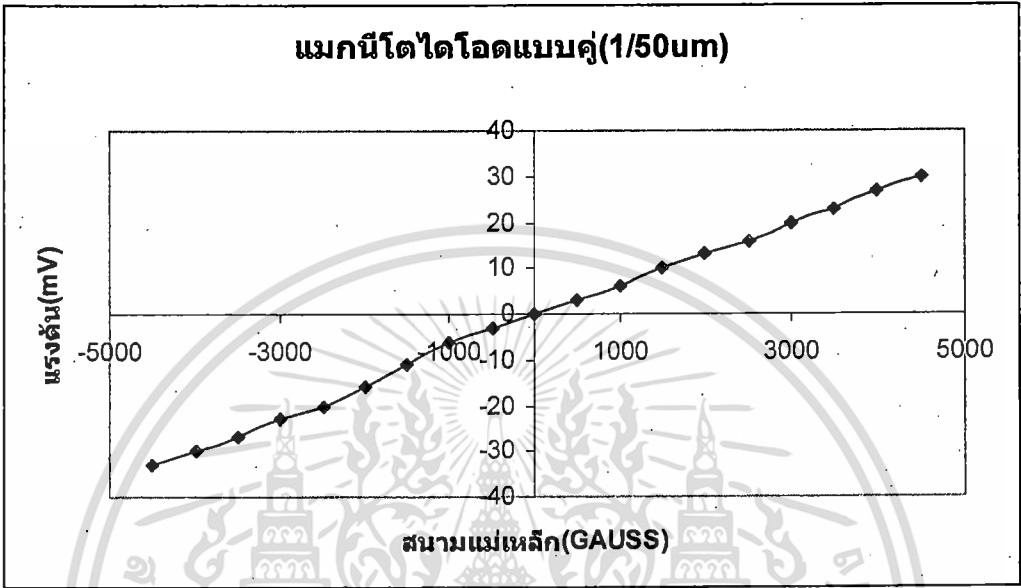
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายอุปกรณ์จากด้านบน

รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายอุปกรณ์จากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

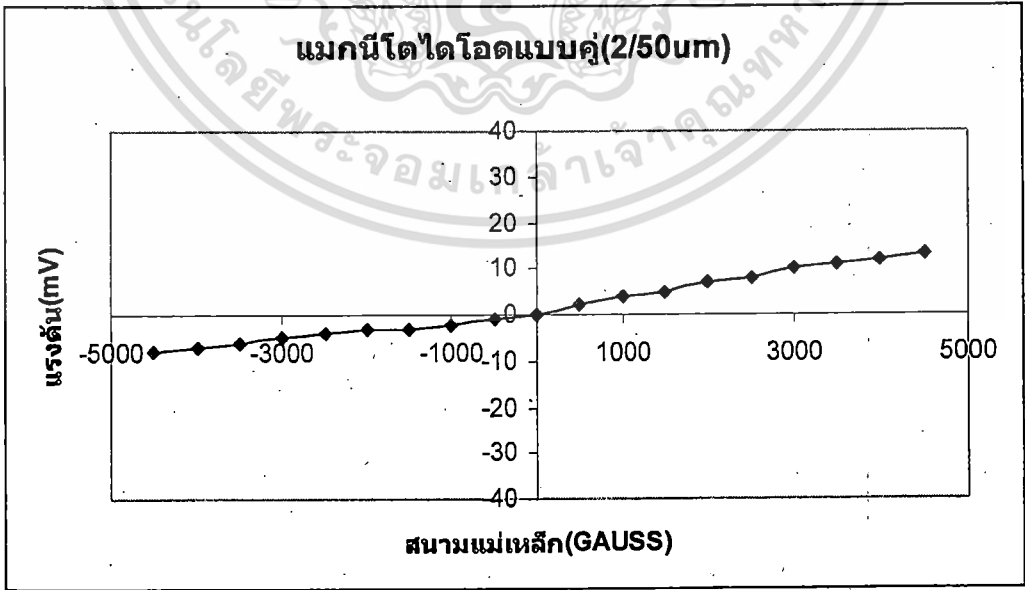
5.2.1 ที่ระยะห่าง(L)=50 μm

แบบที่ 1



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบที่ 1 ที่ระยะ50 μm

แบบที่ 2



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบที่ 2 ที่ระยะ50 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 3

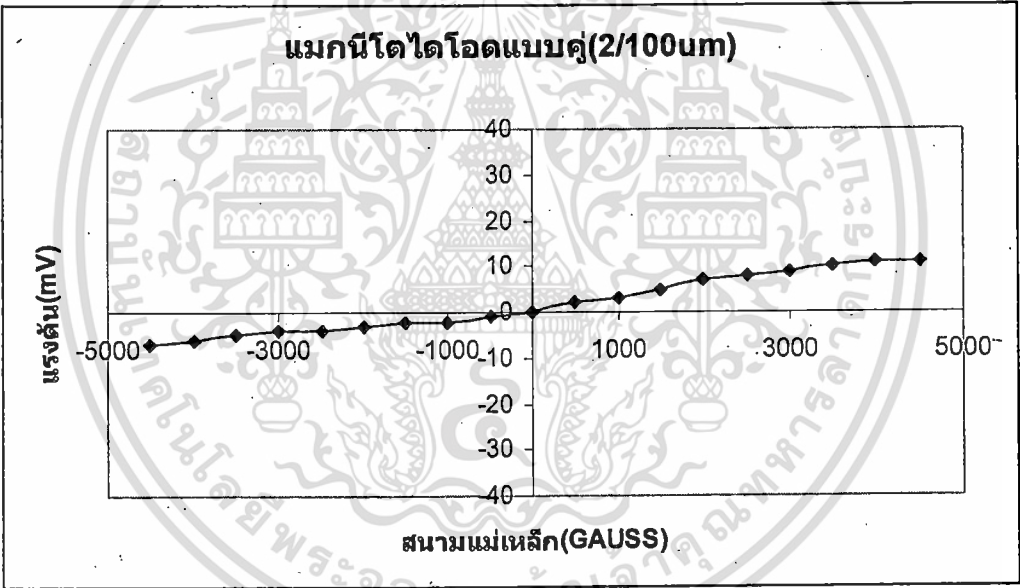
ผลของการตอบสนองที่ได้มีค่าเปลี่ยนตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก สักพักหนึ่งค่าจะกลับมายังค่าเริ่มต้น หรือกลับมามาอยู่ในสภาวะที่สมดุล

5.2.2 ที่ระยะห่าง(L)=100 μm

แบบที่ 1

เนื่องจากอุปกรณ์เกิดความเสียหายจากกระบวนการผลิต

แบบที่ 2



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบที่ 2 ที่ระยะ 100 μm

แบบที่ 3

ผลของการตอบสนองที่ได้มีค่าเปลี่ยนตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก สักพักหนึ่งค่าจะกลับมายังค่าเริ่มต้น หรือกลับมามาอยู่ในสภาวะที่สมดุล

5.3 วิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่

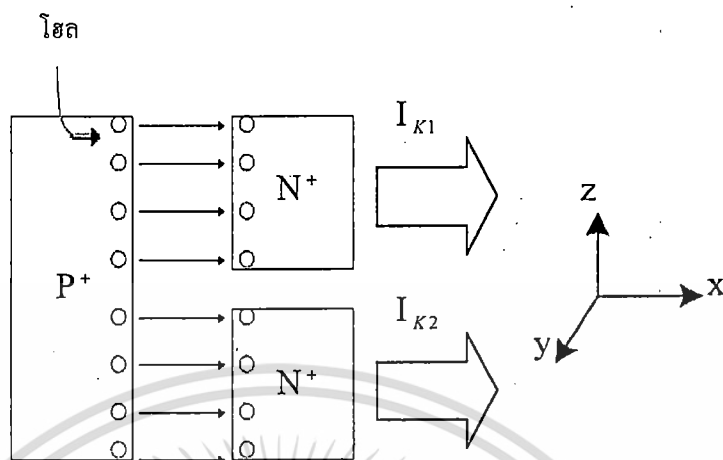
โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบคู่แสดงดังรูป 5.17 ประกอบด้วยขาทั้ง 3 คือ ขาอาโนด 1 ขา และขาแคโทด 2 ขา(แคโทด 1 กับ แคโทด 2) สามารถใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอุปกรณ์ โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้มีแรงลอเรนซ์มากระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเกิดการเบี่ยงเบน เป็นเหตุให้มีปริมาณของกระแสไหลที่ ขา แคโทด 1 กับขาแคโทด 2 ต่างกันหรืออยู่ในสถานะที่ไม่สมดุล



รูปที่ 5.17 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบคู่

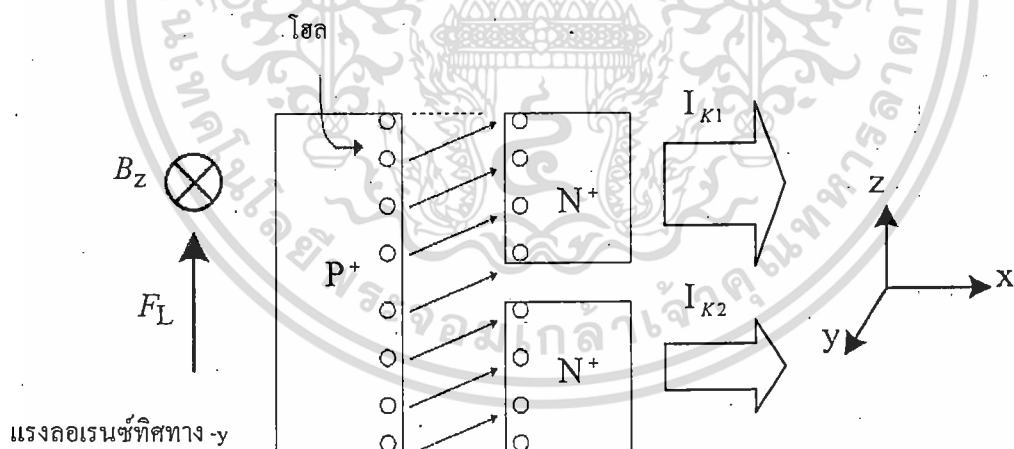
แมกนีโตไดโอดแบบคู่ขณะที่ไม่มีความหนาแน่นแม่เหล็กตัดผ่าน ($BZ=0$) และได้รับไบอัสตรง มีการทำงานภายในหรือการเดินทางของประจุพาหะอยู่ในสถานะที่สมดุลกล่าวคือ ประจุพาหะจากสาร P^+ (ขาอาโนด) จะมีการเคลื่อนที่ตามทิศทางของกระแส ซึ่งทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปยังสาร N^+ ทั้งสอง(แคโทด 1 กับ แคโทด 2) เป็นแนวเส้นตรง และมีปริมาณของกระแสที่ขั้วของแคโทด 1 กับแคโทด 2 เท่ากันจึงทำให้มีผลต่างของกระแสเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 5.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในสถานะสมดุล

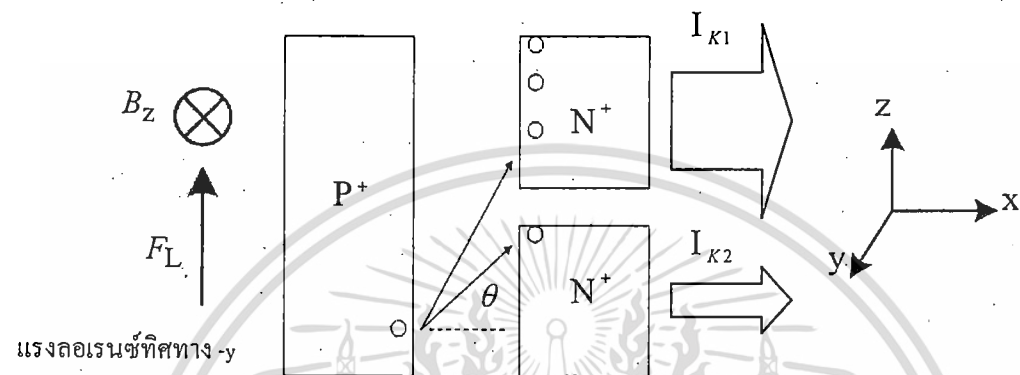
แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวอุปกรณ์ (ทิศทาง z) พาหะจึงถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทิศทาง $-y$ ทำให้พาหะซึ่งเคลื่อนที่อยู่ในทิศทาง x ถูกเบี่ยงเบนไปในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสแคโทด 1 กับกระแสแคโทด 2 จึงทำให้มีผลต่างของกระแสไม่เท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังรูป 5.19



รูปที่ 5.19 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในสถานะไม่สมดุล

เมื่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงลอเรนซ์มีแรงกระทำกับประจุพาหะมากขึ้น ตามสมการ $|\vec{F}_L| = F_L = eV_{DX} \cdot B_z$ พาหะถูกแรงกระทำจากแรงลอเรนซ์มากขึ้นทำให้ประจุพาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้น จาก $\theta_H = \mu_p \cdot B_z$ ซึ่งประจุพาหะบางส่วนที่เบี่ยงเบนที่แคโทด 2 เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นไปยังแคโทด ดังรูป 5.20 จึงทำให้

กระแสแคโรต 1 เพิ่มขึ้นแต่ในทางกลับกันแคโรต 2 ลดลง จึงเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง



รูปที่ 5.20 ประจุพาหะเคลื่อนที่ในมุมกว้างขึ้นตามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

บทที่ 6

สรุป

จากงานวิจัยและผลการทดลองปรากฏว่า โครงสร้างแมกเนโตไดโอดโครงสร้างใหม่แบบ ไดโอดแบบคู่ที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถที่จะทำงานตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี ผลการทดลองสามารถยืนยันในหลักการที่ได้นำเสนอไว้ว่าเป็นจริง ช่วงการวัดที่ 0-5000 เกาส์ ที่ใช้งานปกติทั่วไปให้ผลลัพธ์อย่างเป็นเชิงเส้น สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับผิวหน้าอุปกรณ์ได้ทั้งในทิศทางสนามแม่เหล็กพุ่งลงและพุ่งขึ้น การทำงานสามารถใช้ทั้งแหล่งจ่ายกระแสหรือแหล่งจ่ายแรงดันคงที่

หลักการทำงานมีความแตกต่างอย่างมาก หรือโดยสิ้นเชิงกับหลักการเดิมทั่วไป คือ หลักการเดิมอาศัยการไบอัสไดโอดไปข้างหน้าและเมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะทำให้เกิดพาหะไปรวมตัวกับพื้นผิวด้านข้างของรอยต่อที่มีอัตราการรวมตัวของพาหะที่แตกต่างกัน ทำให้ปริมาณกระแสมีค่าการเปลี่ยนแปลงและมีผลทำให้แรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าลดลงแปรตามค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก แต่หลักการใหม่อาศัยการทำงานของไดโอดธรรมดาที่สมมาตรกันเพียงสองตัว อาศัยการทำงานในช่วงไบอัสไปข้างหน้าเช่นเดียวกัน เพียงแต่อาศัยแรงลอเรนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กตัดผ่านตั้งฉากกับผิวหน้าอุปกรณ์ทำให้เกิดการเสียสมดุลของกระแสไดโอดทั้งสอง ค่าความแตกต่างของกระแสจะแปรตามแรงลอเรนซ์ที่แปรค่าตามความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปแบบของค่าแรงดัน และอุปกรณ์นี้สามารถที่จะแยกความแตกต่างของทิศทางสนามแม่เหล็กว่ามีทิศพุ่งขึ้นหรือพุ่งลงได้จากทิศทางศักดาเอาท์พุท

โครงสร้างแมกเนโตไดโอดแบบใหม่ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้มีข้อดีที่เหนือกว่าแบบเดิมอยู่มาก โครงสร้างแบบเดิมอาศัยพื้นผิวการรวมตัวของพาหะที่แตกต่างกันสองพื้นผิว และอาศัยการกระเจิง (scattering) ของพาหะมากระทบพื้นผิวทั้งสองซึ่งอุปกรณ์จะต้องมีความบางมาก และการสร้างพื้นผิวการรวมตัวที่แตกต่างกันสองพื้นผิวจะต้องใช้วัสดุที่มีความต่างชนิดกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างรอยต่อแบบแบบเฮเทอโรซึ่งมีผลของสถานะพื้นผิวตรงรอยต่อเข้ามาเกี่ยวข้องสูงในกระบวนการสร้างแต่ละครั้ง ทำให้อาจได้คุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันทุกครั้ง แตกต่างจากโครงสร้างใหม่ที่ใช้ไดโอดธรรมดาทำงานร่วมกันเพียงสองตัว การสร้างมีความง่ายมากและโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อ

แบบโฮโมไม่มีปัญหาสถานะพื้นผิวในการสร้างในแต่ละครั้ง นอกจากนี้โครงสร้างเก่ามักจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้าง p-i-n ซึ่งจะต้องมีชั้นอินทรีนซิก i ทำให้มีความยุ่งยากและราคาในการผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับโครงสร้างใหม่ที่ยากและสร้างได้กับทุกเทคโนโลยีโดยไม่ต้องมีชั้นตอนพิเศษใดๆ เพิ่มขึ้นเลย มีความคงทนสูงและผลิตซ้ำ ออกแบบง่ายได้โดยมีคุณสมบัติเหมือนเดิม การทำงานไม่ซับซ้อนและให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ

จากผลที่ได้ ผู้วิจัยมีความเชื่อมั่นเป็นอย่างยิ่งว่า แมกเนโตไดโอดแบบไดโอดคู่นี้ มีข้อดีกว่าแบบเดิมมาก และเนื่องจากผลที่ได้จากโครงการเป็นเพียงการครีมนั้นเพื่อยืนยันหลักการการทำงาน ผู้วิจัยจะนำผลที่ได้ไปปรับปรุงไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างอุปกรณ์ หรือการประยุกต์ใช้งาน รวมถึงการเผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ รวมถึงการจดสิทธิบัตรในอนาคต นอกจากผลดังกล่าวข้างต้น โครงการนี้ยังสามารถผลิตบุคลากรทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทั้งในระดับปริญญาตรีและปริญญาโท สร้างทักษะแก่นักวิจัยในสาขาวิชาภายในประเทศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รัฐบาลไทยผ่านทางสภาวิจัยแห่งชาติที่ได้จัดสรรเงินงบประมาณแผ่นดิน สนับสนุนงานวิจัยนี้จนประสบผลสำเร็จทุกประการ และผู้วิจัยหวังว่าคงจะได้รับการสนับสนุนในโอกาสต่อไปอนาคต