

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แมกนีโตทรานซิสเตอร์และการประยุกต์ใช้งาน
MAGNETOTRANSISTOR AND APPLICATION



โดย
นางสาวอรุ้ง ปานแก้ว 47015169
นายบรรยง เขียวขุ้ม 47015179

สง.
๒๕๕๓
๒๕๕๓

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **72214**
วัน,เดือน,ปี..... **12 ส.ย. 2550**

b. ๑๗๕๒๕๓
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโตทรานซิสเตอร์และการประยุกต์ใช้งาน
MAGNETOTRANSISTOR AND APPLICATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แมกนีโตทรานซิสเตอร์และการประยุกต์ใช้งาน

ผู้จัดทำ

นางสาวทอรุ่ง ปานแก้ว รหัสประจำตัว 47015169

นายชรรยง เขียวขุ้ม รหัสประจำตัว 47015179

ลงชื่อ



(รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโททรานซิสเตอร์และการประยุกต์ใช้งาน

นางสาวทอรั้ง ปานแก้ว รหัส 47015169

นายขรรขง เขียวขุ้ม รหัส 47015179

รศ.ดร.เดิมนงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

โครงการนี้ เป็นการศึกษาตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยแรงลอเรนซ์จะกระทำกับประจุพาหะเบี่ยงเบนตั้งนั้นจึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเสปสและกระแสคอลเลกเตอร์ โดยเนื้อหาแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ส่วนที่ 2 ออกแบบและสร้างวงจรแหล่งจ่ายกระแสกึ่งที่ และวงจรขยายสัญญาณ ซึ่งวงจรแหล่งจ่ายกระแสกึ่งที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งสัญญาณที่ออกจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะถูกส่งไปยังวงจรขยาย ส่วนที่ 3 ส่วนแสดงผล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการแสดงผลให้ได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETO TRANSISTOR AND APPLICATION

Miss. Torung Pankeaw ID. 47015169

Mr. Yanyong Keawchaum ID. 47015179

Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul Advisor

Educational Year 2006

Abstract

This project was to study of the structure of bipolar transistor .Bipolar transistor uses sensing vertical and lateral of magnetic field by Hall Effect Theory. Lorentz forced action on carrier and made the difference between base and collector current .This project is divided in to 3 categories; First, to design and built magneto transistor in a type of bipolar transistor. Second, to design and built the circuit of the current source and amplifier. Current source was a source of power of magnetic sensors, and it would send a signal to the amplifier. And third, to use microcontroller- used for controlling and displaying monitor - for the correct out put of magnetic field.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เคิมพงษ์ เพ็ชรกุล ในการวางแผนแนวทางการดำเนินงานวิจัยและช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนการให้ความรู้ในทุกๆด้านจนทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณ พี่เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบคุณ พี่ปริญญาโทวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจตลอดปีการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ จนสามารถทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทอรั้ง ปานแก้ว
ยรรยง เขียวชอุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์	3
2.1 ทฤษฎีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor)	3
2.1.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์	3
2.1.2 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ ไบโพลาร์	5
2.1.3 โหมดการทำงานและการไบอัสทรานซิสเตอร์	6
2.2 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก	7
2.3 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)	9
2.3.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์	9
2.3.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	14
2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์	18
2.4.1 แมกนีโตริซิสเตอร์	18
2.4.2 แมกนีโตไดโอด	19
2.4.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์	21
2.5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Magneto transistor)	25
2.5.1 การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	27
2.6 คุณสมบัติต่างๆ ไปของอุปกรณ์เซนเซอร์	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์	34
3.1 กระบวนการทำความสะอาด	35
3.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)	35
3.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)	35
3.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)	36
3.3 กระบวนการ โฟโวลติโรกราฟฟี	38
3.3.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์	39
3.3.2 การเคลือบสารไวแสง	40
3.3.3 การอบชั้น Solfbake	40
3.3.4 การปรับซ็อนมาส์ค	41
3.3.5 การฉายแสง	41
3.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง	41
3.3.7 การอบชั้น Hardbake	42
3.3.8 การกัด (Etching)	42
3.3.9 การสอกรน้ำยาไวแสง	42
3.3.10 กระบวนการแพร่สารเจือ (Deposition)	42
3.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process)	45
3.5 การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	47
3.5.1 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	47
3.3.2 การเรียงแบนพาหะ	47
3.6 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์	66
4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กเหล็ก	66
4.1.1 ภาคขยาย	67
4.2 ส่วนแสดงผล	68
4.3 วงจรวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงผลออกจอ LCD	73
4.4 ชุดทดลองวัดค่าการตรวจจับสนามแม่เหล็ก	74
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	75
5.1 การวัดคุณสมบัติแมกนีโตทรานซิสเตอร์	75
5.2 การวัดผลตอบสนองของสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	77
5.2.1 ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง	78
5.2.2 ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน	81
บทที่ 6 สรุปผล	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	86

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่	
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทรานซิสเตอร์และสัญลักษณ์มาตรฐานของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์	3
รูปที่ 2.2 การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด pnp ซึ่ง $W \ll L_p$	5
รูปที่ 2.3 กรณีที่เบสกว้างๆซึ่ง $W \ll L_p$ พหุจากอิมิตเตอร์ไม่สามารถแพร่ข้ามเบสไปยังคอลเลกเตอร์ได้	6
รูปที่ 2.4 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ	8
รูปที่ 2.5 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	9
รูปที่ 2.6 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	10
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการได้ป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก	11
รูปที่ 2.8 ด้านตัดขวาง โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	15
รูปที่ 2.9 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง	16
รูปที่ 2.10 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง	16
รูปที่ 2.11 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง	17
รูปที่ 2.12 เอทท์พู่ของเข็มทิศแม่เหล็ก	18
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม	19
รูปที่ 2.14 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด	20
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS	21
รูปที่ 2.16 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง	22
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวอน	23
รูปที่ 2.18 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$	24
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	25
รูปที่ 2.20 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเบี่ยงเบน θ_H	26
รูปที่ 2.21 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ(โฮล)ในภาวะปกติ	27
รูปที่ 2.22 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)	28
รูปที่ 2.23 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่ในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก	28
รูปที่ 2.24 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง $-Z$	29

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของโฮลตามทิศทาง -Z	30
รูปที่ 2.26 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ	31
รูปที่ 2.27 ฮีสเตอร์รีซิสต์สัญญาณเอ๊าท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม	32
รูปที่ 3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	34
รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไดนามิก	36
รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	36
รูปที่ 3.4 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน	37
รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process	39
รูปที่ 3.7 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆ ในซิลิคอน	43
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค	44
รูปที่ 3.9 ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้ เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส	44
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator	46
รูปที่ 3.11 รูปโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	47
รูปที่ 3.12 (ก) เส้นศักระหว่างกันของอุปกรณ์ฮอลล์ และ (ข) แรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ	49
รูปที่ 3.13 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว L ของอุปกรณ์ฮอลล์	49
รูปที่ 3.14 แสดงการลดลงของความยาว L ซึ่งสามารถแสดงการเบี่ยงเบนได้ชัดเจนเนื่องจาก	50
รูปที่ 3.15 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น	51
รูปที่ 3.15 แผ่นซิลิคอนหลังการออกซิเดชัน	52
รูปที่ 3.17 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายภาพมาสก์ที่ 1	53
รูปที่ 3.18 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี	53
รูปที่ 3.19 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการสัคชั่นออกไซด์	54
รูปที่ 3.20 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	54
รูปที่ 3.21 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ	55
รูปที่ 3.22 แผ่นซิลิคอนหลังการ drive in	56
รูปที่ 3.23 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายภาพมาสก์ที่ 2	56
รูปที่ 3.24 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี	57

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.25 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการสกัดชั้นออกไซด์	57
รูปที่ 3.26 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	58
รูปที่ 3.27 แผ่นซิลิคอนขณะทำการแพร่สารเจือ	59
รูปที่ 3.28 แผ่นซิลิคอนหลังการ drive in	59
รูปที่ 3.29 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 3	60
รูปที่ 3.30 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี	60
รูปที่ 3.31 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการสกัดชั้นออกไซด์	61
รูปที่ 3.32 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	61
รูปที่ 3.33 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม	62
รูปที่ 3.34 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 4	63
รูปที่ 3.35 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟฟี	64
รูปที่ 3.36 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการสกัดชั้นอลูมิเนียม	64
รูปที่ 3.37 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง	64
รูปที่ 3.38 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์	65
รูปที่ 3.39 ลักษณะแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์	65
รูปที่ 4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	66
รูปที่ 4.2 โครงสร้างและการต่อใช้งาน	67
รูปที่ 4.3 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง	67
รูปที่ 4.4 แสดงการจัดขาสัญญาณของ T89C51AC2	69
รูปที่ 4.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ T89C51AC2	70
รูปที่ 4.6 บอร์ดที่ใช้ในการทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์	70
รูปที่ 4.7 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับจอ LCD	72
รูปที่ 4.8 วงจรวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงผลออกหน้าจอ LCD	73
รูปที่ 4.8 ชุดทดลองวัดค่าการตรวจจับสนามแม่เหล็ก	74

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.1 คุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของเมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	75
รูปที่ 5.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของเมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	76
รูปที่ 5.3 วงจรการวัด ทดลองเมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	77
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง (ด้านหน้าของอุปกรณ์)	78
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง (ด้านหลังของอุปกรณ์)	79
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน (อุปกรณ์ตะแคงทางด้านขวา)	81
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน (อุปกรณ์ตะแคงทางด้านซ้าย)	82

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่	
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ	33
ตารางที่ 3.1 แสดง Class ต่าง ๆ ของห้องสะอาด	38
ตารางที่ 4.1 แสดงไมโคร โปรเซสเซอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่าง ๆ	69
ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนอง สนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	80
ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนอง สนามแม่เหล็ก แนวตั้ง (ด้านหลังของอุปกรณ์) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	80
ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก แนวนอน(ตะแคงด้านขวา)ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	83
ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก แนวนอน(ตะแคงด้านซ้าย)ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	83

บทที่ 1

บทนำ

สนามแม่เหล็กเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่รอบๆตัวเรา ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ สองทางคือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเช่นที่ผิวของดวงอาทิตย์ซึ่งจะผลิตเส้นแรงแม่เหล็กประมาณ 600A/m หรือ อาจเกิดจากกระแสเล็กๆที่วิ่งในสมอง หัวใจและกล้ามเนื้อโดยจะผลิตเส้นแรงแม่เหล็กประมาณ 0.01A/m สองเกิดจากเครื่องมือเครื่องจักรที่มนุษย์สร้างขึ้นเช่น เกิดจากสายเคเบิลหม้อแปลงกำลังสูง เป็นต้น โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเราสามารถตรวจจับได้ด้วย เซ็นเซอร์แม่เหล็ก(Magnetic Sensor) โดยเซ็นเซอร์แม่เหล็ก(Magneto Sensor)สามารถสร้างได้จากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหลาย ชนิด เช่น ไดโอด(Diode), ตัวต้านทาน(Resistor), ตัวเก็บประจุ(Capacitor), มอสเฟต(Mos Fet), ทรานซิสเตอร์(Transistor) เป็นต้น

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหนึ่งที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาณรบกวนที่เอาต์พุตมีค่าต่ำ, สามารถใช้งานกับวงจรรวมได้ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เพื่อนำประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนซึ่งอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยแรงลอเรนซ์จะกระทำกับบนประจุพาหะ ทำให้ประจุพาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบน ไปยังชั้นสารกึ่งตัวนำของเบสและคอลเลคเตอร์ต่างกัน เป็นผลทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและคอลเลคเตอร์ซึ่งนำไปสู่กลไกการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ในทิศทางการตรวจจับแนวตั้งและแนวนอน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติและโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
3. ศึกษาและเข้าใจขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์
4. ศึกษาการออกแบบและสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเพื่อใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน
5. สามารถนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์มาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ตามความต้องการ

ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติ โครงสร้าง วิธีการออกแบบและขั้นตอนของกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา เพื่อนำความรู้และความเข้าใจนี้ นำไปสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมีส่วนแสดงผลที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแสดงค่าให้ทราบค่าจริงที่ตรวจจับได้

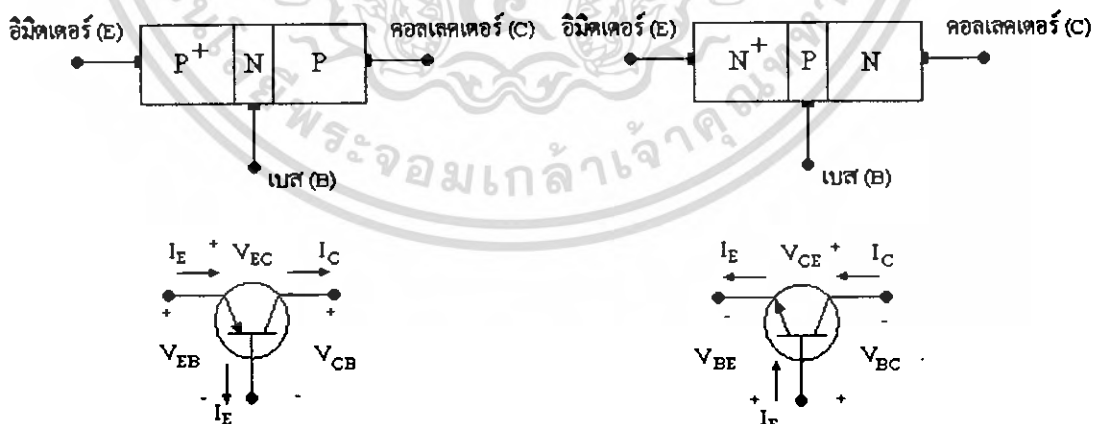
บทที่ 2

Magneto Transistor

2.1 ทฤษฎีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor)

2.1.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์

ทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อชนิดไบโพลาร์หรือ บี.จี.ที.(BJT)เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างจากผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ เช่น เซอร์มันเนียม ซิลิคอน หรือ แกลเลียมอาร์เซไนด์ ในปัจจุบันส่วนใหญ่สร้างจากซิลิคอน โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำเช่นชนิดเอ็นและชนิดพี จำนวน 3 ชั้น โดยวางสลับกัน หรืออาจพิจารณาได้ว่าประกอบด้วยรอยต่อพี-เอ็นจำนวน 2 รอยต่อทำให้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์สามารถมีได้ 2 ลักษณะหรือ 2 ชนิด 1.ชนิด PNP และชนิด NPN ดังแสดงในรูป(ก) ส่วนต่างๆของทรานซิสเตอร์ทั้ง 3 ส่วนจะทำหน้าที่ต่างกันและถูกเรียกว่า ส่วนอิมิตเตอร์(Emitter),ส่วนเบส(Base)และส่วนคอลเลกเตอร์(Collector) โดยส่วนเบสจะเป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ขนาดของส่วนเบสจะมีลักษณะที่บางมากเพื่อให้ทรานซิสเตอร์สามารถได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ส่วนอิมิตเตอร์จะเป็นส่วนที่มีความหนาแน่นของพาหะมากที่สุด(N^+ หรือ P^+)เพื่อทำหน้าที่ในส่วนอิมิตเตอร์ โดยสมบรูณ์ รอยต่อพี-เอ็นระหว่างส่วนอิมิตเตอร์และเบสถูกเรียกอ้อๆว่า"รอยต่ออิมิตเตอร์"(Emitter Junction)และรอยต่อระหว่างเบสและคอลเลกเตอร์ถูกเรียกอ้อๆว่า"รอยต่อคอลเลกเตอร์"(Collector Junction)แต่ละส่วนของทรานซิสเตอร์จะถูกสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกกับโลหะเพื่อการต่อเชื่อมกับเส้นลวดตัวนำออกไปยังภายนอกของตัวทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทรานซิสเตอร์และสัญลักษณ์มาตรฐานของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์

มาตรฐานของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ทั้งชนิด PNP และชนิด NPN แสดงได้ดังรูปที่ 2.1(ข)

โดยที่ศของลูกศรซึ่งกำหนดไว้ที่ขั้วต่างๆจะมีทิศทางกรไหลของกระแสไฟฟ้าเครื่องหมายบวกและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลบแสดงการเปรียบเทียบของระดับศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วต่างๆ ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ pnp ทำงาน โหลดจากส่วนของอิมิตเตอร์(P^+ -Emitter)จะถูกทำให้เคลื่อนที่ ข้ามรอยต่ออิมิตเตอร์เข้าไปยังเบส จากนั้น โหลดเหล่านี้(diffusion) ข้ามส่วนเบสไปยังคอลเลกเตอร์และไปออกที่ขั้วคอลเลกเตอร์ ดังนั้น จึงทำให้มีกระแสไหลในทิศทางของอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลกเตอร์ ลูกศรของอิมิตเตอร์ I_E จึงชี้เข้าที่ขั้วอิมิตเตอร์(E)และลูกศรของกระแสคอลเลกเตอร์ I_C ชี้ออกจากขั้วคอลเลกเตอร์(C)อย่างไรก็ดีการแพร่ของโฮลข้ามส่วนเบสไปยังคอลเลกเตอร์จะมีโฮลจำนวนหนึ่งถูกรวมตัวใหม่(Recombination) กับอิเล็กตรอนในส่วนเบสชนิดเอ็นทำให้เกิดมีกระแสเบส ซึ่งมีทิศทางชี้ออกจากขั้วเบส(B) สำหรับกรณีของทรานซิสเตอร์ชนิด npn ขณะทำงาน อิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์ชนิดเอ็น (n^+ -emitter)จะถูกทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่ออิมิตเตอร์เข้าไปในส่วนเบสชนิดพี และอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งจะถูกโฮลในเบสชนิดพีรวมตัวทำให้เกิดกระแสเบส(I_B) โดยมีทิศทางชี้เข้าที่ขั้วเบส(B)จากนั้น อิเล็กตรอนส่วนที่เหลือจะแพร่ข้ามเบสเข้าไปยังคอลเลกเตอร์และไปออกที่ขั้วคอลเลกเตอร์ทำให้เกิดมีกระแสคอลเลกเตอร์ไหลเข้าที่ขั้วคอลเลกเตอร์(C) กระแสคอลเลกเตอร์ I_C จึงชี้เข้าที่ขั้วคอลเลกเตอร์ เช่นเดียวกันก็จะมีกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) ไหลออกจากขั้วอิมิตเตอร์ด้วยดังแสดงในรูป 4.1 (ข) จากรูปสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ทั้งกรณี pnp และ npn เมื่อพิจารณาที่ขั้วทั้ง 3 ของทรานซิสเตอร์ จะเห็นว่าทั้งกระแสไหลเข้าและกระแสไหลออกจากตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งกระแส ทั้ง 2 ส่วนนี้จะต้องมีค่าเท่ากัน หรือผลรวมของกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_E = I_B + I_C \quad (2.1a)$$

ถ้าพิจารณาว่าผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วต่างๆของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์จะได้ว่า

$$V_{BE} + V_{CB} + V_{CE} = 0 \quad (2.1b)$$

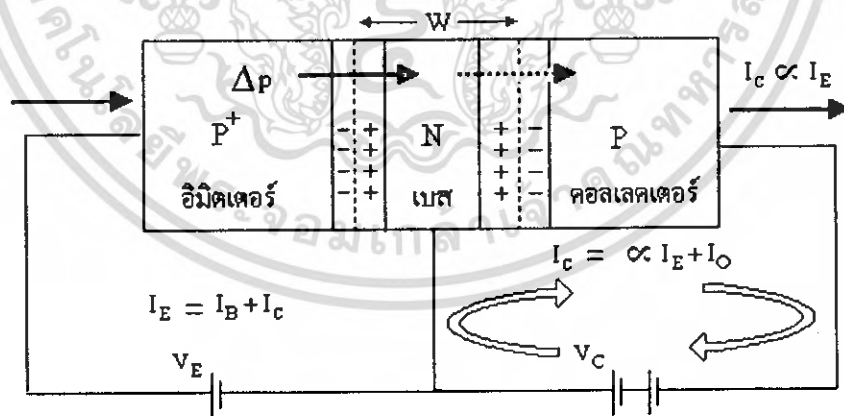
โดยที่ $V_{CE} = -V_{EC}$

จากสมการที่(2.1a)และ(2.1b)ถ้าหากรู้ค่ากระแสหรือค่าของแรงดัน สองค่าเราก็สามารถที่จะคำนวณหาค่าของกระแสหรือแรงดันที่เหลือได้ ดังที่สมการ(2.1a)และ(2.1b)จึงเป็นสมการกระแสและแรงดันที่สำคัญของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ สามารถนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์การทำงานของทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดี ในปัจจุบันนี้ทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อแบบไบโพลาร์ที่ผลิตออกมาใช้งานกันมักจะมีลักษณะเป็น โครงสร้างแบบพลาเนอร์(Plana structure) กล่าวคือขั้วโลหะของส่วนต่างๆของทรานซิสเตอร์จะถูกต่อออกมาจากผิวหน้า ด้านบนของตัวทรานซิสเตอร์

2.12 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

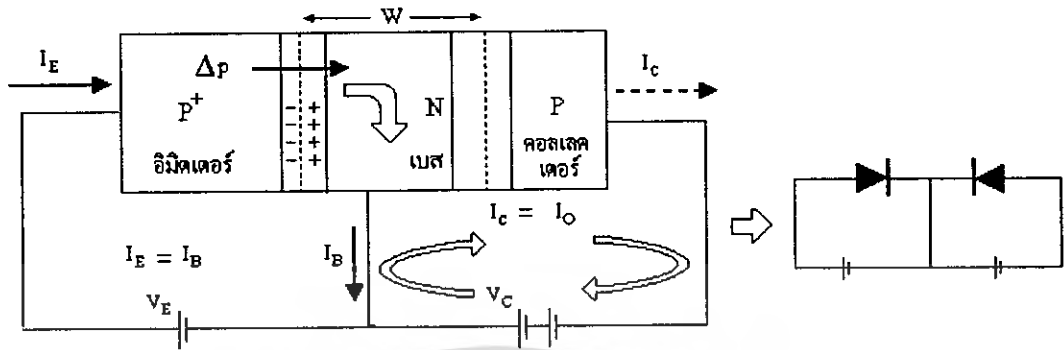
ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ทั้งแบบ pnp และ npn มีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน จะแตกต่างกันก็เพียงแต่ทิศทางการไหลของกระแส ระดับของศักย์ไฟฟ้า และค่าคงที่ต่างๆของพาหะแคร์ เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในเบื้องต้น เราจะใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด pnp เป็นกรณีตัวอย่างทั้งนี้เนื่องทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลเป็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ส่วนใหญ่จะเป็นการทำงานแบบ Normal operation หรือ Forward active operation ซึ่งรอยต่ออิมิตเตอร์จะถูกให้แรงดันไบอัสตรงและรอยต่อคอลเลกเตอร์จะถูกให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งในสถานะดังกล่าวนี้จะทำให้พาหะส่วนมาก (Majority carrier) จากส่วนอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสแล้วพาหะเหล่านี้จะเคลื่อนที่โดยแพร่ข้ามส่วนเบสตรงไปยังรอยต่อคอลเลกเตอร์ ในขณะที่พาหะข้ามเบส จะมีพาหะบางถูกรวมตัวใหม่ (Recombination) กับพาหะในส่วนเบส จึงทำให้ความหนาแน่นของพาหะน้อยในเบสลดลงเรื่อยๆกับระยะทางในส่วนเบสอย่างไรก็ดีโดยปรกติแล้วทรานซิสเตอร์จะถูกออกแบบให้ส่วนเบสมีขนาดบางมากๆ เช่นราว 1 ไมโครเมตร ซึ่งความกว้างของเบส (W) ในระดับนี้จะมีค่าน้อยกว่าขนาดความยาวของ "ระยะการแพร่" (diffusion length :L) ของพาหะส่วนน้อย ดังนั้น พาหะจากอิมิตเตอร์เกือบทั้งหมด จึงสามารถแพร่ข้ามส่วนเบสบางๆเข้าไปยังส่วนคอลเลกเตอร์ได้ ทำให้เกิดมีกระแสคอลเลกเตอร์การทำงานเช่นนี้ถือเป็นสถานะการทำงานปรกติของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์หรือการทำงาน "สถานะเปิด" (ON) ที่ปริมาณกระแสคอลเลกเตอร์ซึ่งเป็นกระแสทางด้านเอาต์พุต จะถูกควบคุมด้วยกระแสอิมิตเตอร์ซึ่งเป็นกระแสด้านอินพุตดังแสดงในรูปดังนี้



รูปที่ 2.2 การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด pnp ซึ่ง $W \ll L_p$

ในกรณีที่ส่วนเบสมีขนาดความกว้างมากๆ เช่นมากกว่าระยะการแพร่ของพาหะ ($W > L$) จะทำให้พาหะจากอิมิตเตอร์เกือบทั้งหมด ถูกรวมตัวใหม่กับพาหะในเบส จึงไม่มีพาหะเหลือไปถึงส่วนคอลเลกเตอร์ กระแสคอลเลกเตอร์จึงเป็นกระแสอิมิตตัวย้อนกลับ I_0 ของรอยต่อคอลเลกเตอร์ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงหรือเกี่ยวข้องกับกระแสด้านอินพุตการทำงานในลักษณะเช่นนี้ถือว่าทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสถานะปิด (OFF) โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่มีส่วนเบสกว้างๆ



รูปที่ 2.3 กรณีที่เบสกว้างๆซึ่ง $W \ll L_p$ พะหะจากอิมิตเตอร์ไม่สามารถแพร่ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ได้

เช่นนี้จึงมีสภาพคล้ายกับไดโอด ชนิดรอยต่อ พี-เอ็น 2 ตัวถูกนำมาต่อเข้าด้วยกันโดยหันขั้วเอ็นหรือพีเข้าด้วยกัน แสดงดังรูป 2.5 โครงสร้างดังกล่าวจึงไม่แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

ดังนั้นนอกจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะต้องมีโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้นเป็น pnp หรือ npn หรือมี 2 รอยต่อแล้ว ขนาดความกว้างของเบส (W) ของทรานซิสเตอร์จะต้องมีขนาดแคบๆโดยมีค่าน้อยกว่าระยะการแพร่ของโฮล (L_p) และอิเล็กตรอน (L_n) ตามลำดับ ยิ่งเบสมีความกว้างน้อยๆปริมาณที่จะข้ามเบสเข้าไปในส่วนคอลเลคเตอร์ยังมีค่ามากขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเบสยิ่งแคบกระแสคอลเลคเตอร์ยิ่งมากหรือเบสยิ่งแคบการทำงานของทรานซิสเตอร์ยิ่งมีประสิทธิภาพสูงนั่นเอง

2.13 โหมดการทำงานและการไบอัสทรานซิสเตอร์

การให้ไบอัสทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ประกอบด้วยรอยต่อแบบ พี-เอ็น จำนวน 2 รอยต่อคือรอยต่ออิมิตเตอร์และรอยต่อคอลเลคเตอร์ซึ่งการให้ไบอัสแก่รอยต่อ พี-เอ็น สามารถทำได้ 2 แบบคือการให้ไบอัสตรง (Forward bias) และการให้ไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) ดังนั้น การให้ไบอัสแก่ทรานซิสเตอร์จึงสามารถทำได้ 4 แบบ หรือ 4 โหมด การให้ไบอัสแก่ทรานซิสเตอร์ในแบบต่างๆถูกเรียกว่า biasing mode ซึ่งแต่ละโหมดของการให้ไบอัส จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในลักษณะที่ต่างกัน ซึ่งเราเรียกว่า "โหมดการทำงาน" (operation mode) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์มีรูปแบบการให้ไบอัส 4 รูปแบบหรือ 4 โหมดขึ้นอยู่กับกรให้ไบอัส หรือ "ไบอัสซิวคัลโหมด" ซึ่งมี 4 โหมดการทำงานคือ

1. แอคทีฟโหมด (Active mode) หรือ Forward active mode

หมายถึงการให้ไบอัสแก่ทรานซิสเตอร์โดยรอยต่ออิมิตเตอร์เป็นไบอัสตรงและรอยต่อคอลเลคเตอร์เป็นไบอัสกลับโหมดการทำงานเช่นนี้จะถูกนำไปใช้งานมากที่สุดโดยใช้กับวงจรเชิงเส้น และ วงจรขยายสัญญาณลิเนียร์ต่างๆ ไปเช่น วงจรออปแอมป์ การทำงานในลักษณะนี้จะทำให้ ทรานซิสเตอร์มีอัตราขยายสูงโดยมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด

2. แซทจูเรชั่น โหมด (Saturation mode)

หมายถึงการให้ไบอัสแก่ทรานซิสเตอร์ โดย รอยต่ออิมิตเตอร์และรอยต่อคอลเลคเตอร์ไบอัสตรง เหมือนกัน ในขณะนี้จะตรงกับภาวะ”อิ่มตัว”จึงมีกระแสไหลเป็นจำนวนมาก และแรงดันตกคร่อม ตรงรอยต่อต่างๆจะมีค่าต่ำ เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกนำไปใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตช์และทำงานอยู่ใน โหมดนี้จะทำให้ได้ สถานะ ON ของอุปกรณ์สวิตช์

3. คัตออฟโหมด (Cut off mode)

หมายถึงการจ่ายไบอัสให้แก่ทรานซิสเตอร์โดยรอยต่อทั้ง 2 คือรอยต่ออิมิตเตอร์และรอยต่อ คอลเลคเตอร์ต่างก็เป็นไบอัสย้อนกลับด้วยกันทั้งคู่ ทำให้มีกระแสไหลน้อยมาก และแรงดันที่ รอยต่อต่างๆจะมีค่าสูง เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกนำไป ใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตช์และทำงานอยู่ในโหมด นี้จะตรงกับภาวะวงจรเปิด (open circuit) และจะทำให้สถานะ OFF ของอุปกรณ์สวิตช์การทำงาน ของทรานซิสเตอร์ใน

”แซทจูเรชั่น”และ”คัตออฟ” จะทำให้ทรานซิสเตอร์ คล้ายกับเป็น สวิตช์ ซึ่งในวงจรดิจิทัล สถานะการทำงานซึ่งแรงดันตกคร่อมตรงรอยต่อมีค่าต่ำ และค่าสูงจะถูกกำหนดให้เป็นสถานะทาง ลอจิกคือระดับ 0 และระดับ 1 ตามลำดับ

4. อินเวอร์ตัจโหมด หรือ (Inverted active mode)

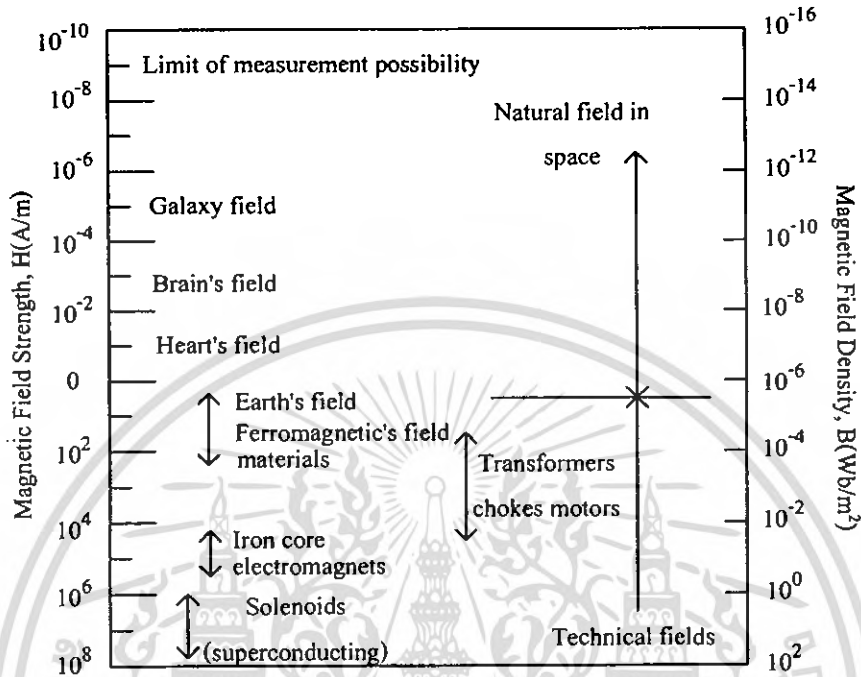
หมายถึงการจ่ายไบอัสให้แก่ทรานซิสเตอร์ในลักษณะตรงข้ามกับกรณีของแอคทีฟโหมด กล่าวคือ รอยต่ออิมิตเตอร์และรอยต่อคอลเลคเตอร์จะเป็นไบอัสย้อนกลับ และไบอัสตรงตามลำดับ การทำงานในโหมดนี้ มีการนำไปใช้น้อย เช่นในวงจรดิจิทัลบางวงจร ทั้งนี้เนื่องจากโร โหมดนี้ทาน ซิสเตอร์จะมีอัตราขยายสัญญาณต่ำมากเพราะอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์จะสลับหน้าที่การ ทำงานกัน

2.2 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก

โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติเช่น ร่างกายของมนุษย์ บริเวณกล้ามเนื้อซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 2×10^{-5} A/m หรือบริเวณพื้นผิวของดวง อาทิตย์ซึ่งมีสนามแม่เหล็กประมาณ 600 A/m [20] สนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบร่างกายของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น สมองของมนุษย์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเวียนในระดับไมโคร, หัวใจ และ เส้นเอ็น กล้ามเนื้อซึ่งจะมีสนามแม่เหล็กประมาณ 10^{-2} A/m อยู่ในร่างกายของมนุษย์ในรูปแบบที่ 2.4 แสดงระดับ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 10^0 A/m จนถึง 10^8 A/m โดยสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสามารถเกิดได้จาก กระบวนการเทคนิคการสร้าง, สายส่งสัญญาณ, หม้อแปลงไฟฟ้า (10^1 - 10^5 A/m), วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (1 - 10^6 A/m) และขดลวดสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด (10^6 - 10^7 A/m)



รูปที่ 2.4 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ [15]

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

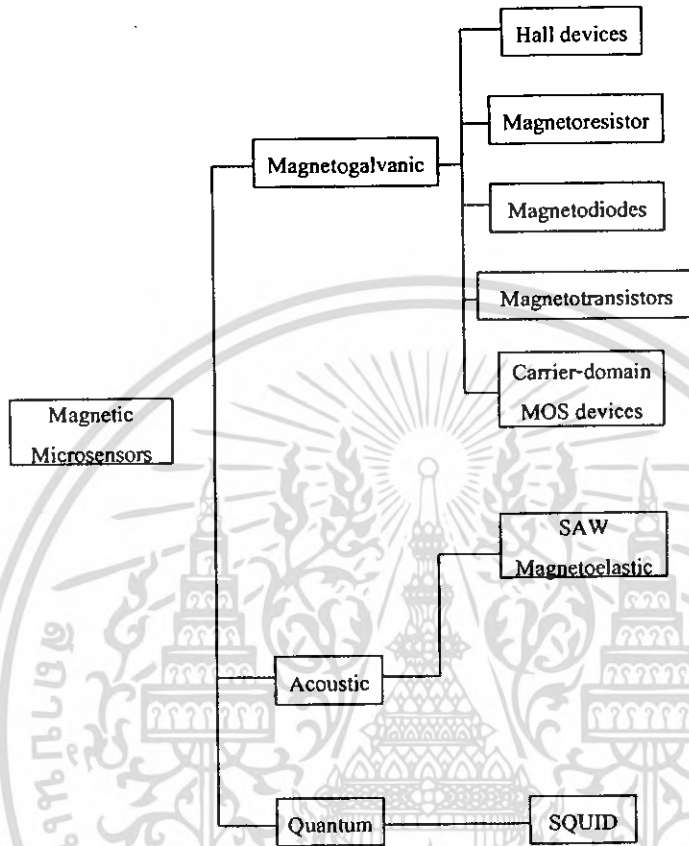
$$B = \mu^B H = \mu_0^B \mu_R^B H$$

โดย μ^B คือค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุซึ่งค่าซึมซาบแม่เหล็กในอวกาศ μ_0^B จะมีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ และค่าซึมซาบแบบสัมพัทธ์ μ_R^B จะมีค่าประมาณ $\mu_R^B \gg 1$ ในวัสดุที่ค่าซึมซาบระดับสูงแต่อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจะใช้ค่าซึมซาบระดับต่ำคือประมาณ $\mu_R^B \cong 1$

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจัดเป็นอุปกรณ์ชนิดไมโครเซนเซอร์โดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการเกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะที่เคลื่อนที่ขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน รูปที่ 2.5 แสดงการจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยจำแนกตามหลักการพื้นฐานของแต่ละอุปกรณ์, ชนิดของอุปกรณ์ และชนิดของสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งชนิดที่ใช้ฟิล์มที่บางและหนาของเซนเซอร์ SAW (Surface Acoustic Wave) นอกจากนี้แสดงถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีหลักการแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดอื่นและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กขนาดเล็กได้โดยมีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สูงมากคือ SQUID (Super Conducting Quantum Interference) [15]



รูปที่ 2.5 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

2.3 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)

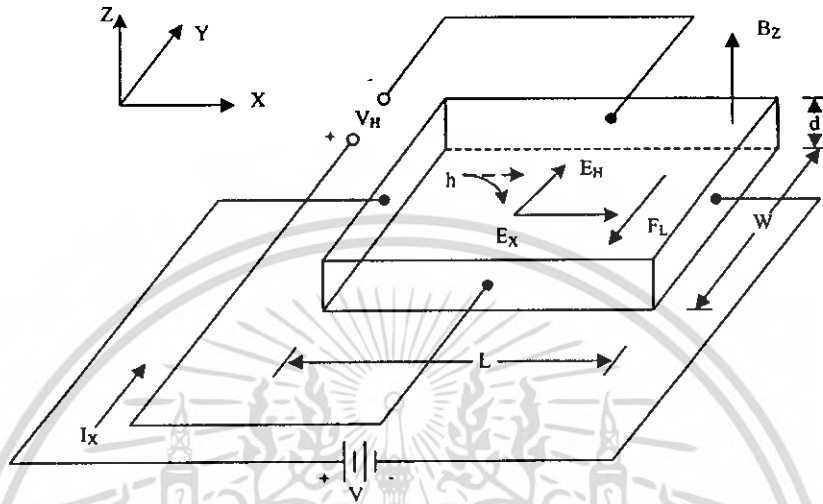
2.3.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถอธิบายการทำงานจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มีแรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็กปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (charge carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัด และคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ อื่นๆ ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูป 2.6 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความต่างศักย์ V โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density) J_x ไหลในทิศ $+x$ และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density) B_z ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ $+z$



รูปที่ 2.6 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี [21]

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง $+x$ จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟท์ (drift velocity) v_x ในทิศทาง $+x$ และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแสจะเกิดมีแรงลอเรนซ์ กระทำต่อโฮลด้วย ตามสมการ

$$\overline{F_L} = e\overline{v} \times \overline{B} \quad (2.2)$$

โดยที่ $\overline{F_L}$ คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\overline{F_L}| = F_L = e.v_x.B_z \quad (2.3)$$

และมีทิศทางในแกน $-y$ ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาแกน $-y$ และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน E_H ในทิศ $+y$ สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูก

กระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ +y ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ (F_L) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน (eE_H) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$eE_H = F_L = e.v_x.B_z \tag{2.4}$$

จาก $E_H = v_x.B_z \tag{2.5}$

$$J_x = p.e.v_x$$

หรือ $v_x = \frac{J_x}{p.e}$

แทนค่า v_x ลงในสมการ (2.5) จะได้

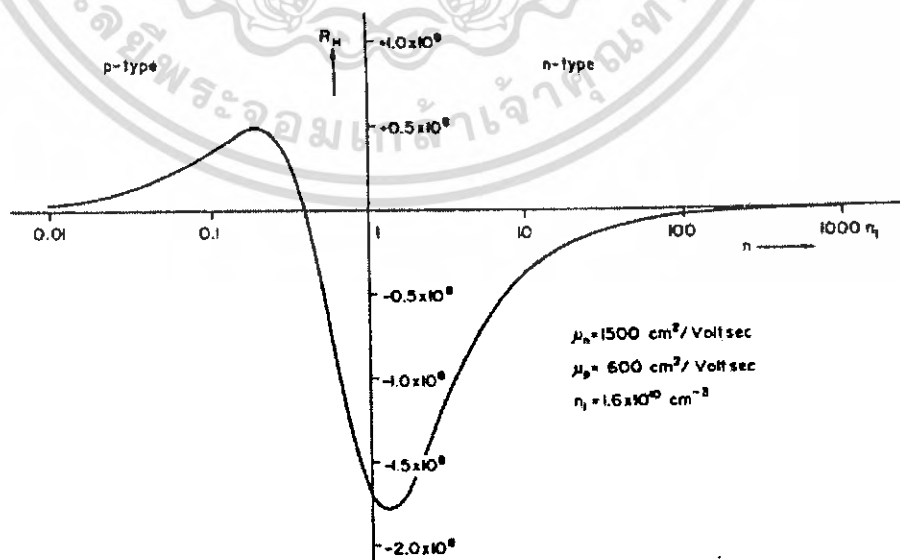
$$E_H = \frac{J_x.B_z}{p.e}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{E_H}{J_x.B_z} = \frac{1}{p.e} = R_H \tag{2.6}$$

โดย R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

ซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการได้ระดับค่าสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าแรงดันฮอลล์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการได้ระดับค่าสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.6 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ w จะได้

$$V_H = E_H \cdot w \quad (2.7)$$

โดย V_H คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่า $J_x = \frac{I}{w \cdot d}$ และ $E_H = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการ (2.6) จะได้

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

หรือ

$$R_H = \frac{d \cdot V_H}{I \cdot B_z} = \frac{1}{p \cdot e} \quad (2.8)$$

$$V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d} \quad (2.9)$$

ความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = \frac{1}{e \cdot R_H} = \frac{I \cdot B_z}{e \cdot d \cdot V_H} \quad (2.10)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \frac{w \cdot d}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{w \cdot d}{L} \quad (2.11)$$

จาก

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

ดังนั้นจะได้

$$\mu_p = \frac{1}{e \cdot \rho \cdot p} = \frac{1}{\rho} R_H \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.10), (2.11) และ (2.12) จะเห็นว่า การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$R_H = -\frac{1}{n.e} \quad (2.13)$$

ดังนั้น โดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็กจะเป็น

$$S = \frac{V_H}{I.B} = \frac{R_H.G}{d} = \frac{G.r_n}{q.n.d} \quad (2.14)$$

จะเห็นว่า ค่าความไว ที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำ และฮอลล์เพลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ E_H และ E_x ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม θ_H กับแกน +x ดังรูปซึ่งมุม θ_H ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

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

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

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

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

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

จะได้ $\mu_p = \sigma.R_H$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลทธิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลทธิซ R_{Hl} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{Hl} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (2.15)$$

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

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

$$\mu_{Hl} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (2.16)$$

โดย μ_H คือ สภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility) และ μ_{Hl} คือสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลทธิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ R_{Hi} แสดงได้ดังสมการที่ 2.16

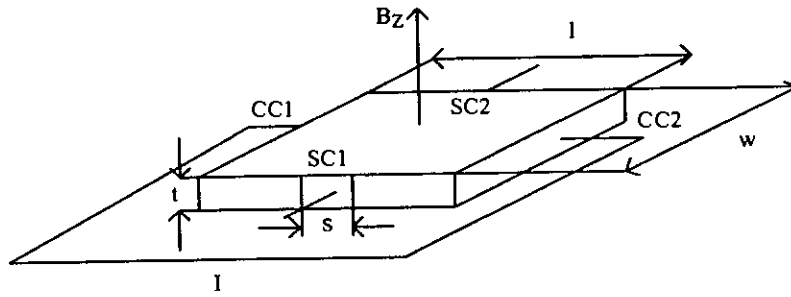
$$R_{Hi} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93 R_H \quad (2.17)$$

และ
$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p \quad (2.18)$$

โดย μ_{Hi} คือสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

2.3.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีฮอลล์ (Hall Effect) โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนาที่บาง โครงสร้างประกอบด้วย 4 ขั้วใช้งานคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 ซึ่งแรงดันฮอลล์ (V_H) ถูกวัดที่ขั้ว SC1 และ SC2 โดยที่การไบอัสกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC1 และ CC2 แรงดันฮอลล์สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.18



รูปที่ 2.8 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

$$V_H = \frac{R_H}{t} \cdot G \left(\frac{l}{w}, \frac{s}{w}, \frac{y}{l}, \theta_H \right) \cdot B_z \cdot I \quad (2.19)$$

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

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาพฤติกรรมของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ($n \gg p$) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot t} \cdot G \cdot B_z \cdot I \quad (2.20)$$

โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

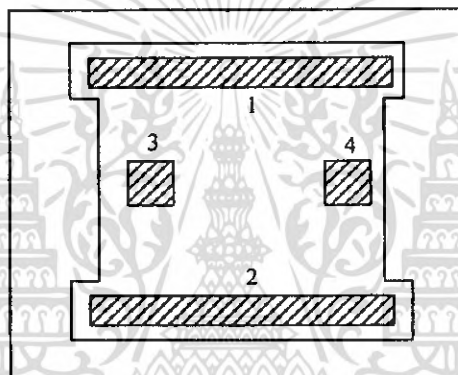
จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณดังสมการที่ 2.20

$$G = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.21)$$

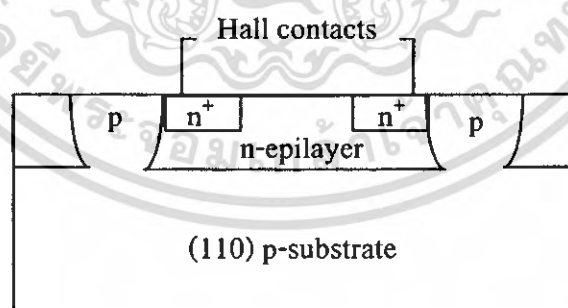
โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า $G=1$ ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้ $l/w = 3$ และ $s/w < 1$ โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์คอนแทคจะออกแบบที่ระยะ $l/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคืออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน [15] โดยรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงด้านบนบนและด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งชนิดเอ็น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียล 5 - 10 μm โดยที่ออกแบบมิติของเพลาประมาณ $200 \times 200 \mu\text{m}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการอิมพลานท์ (ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง



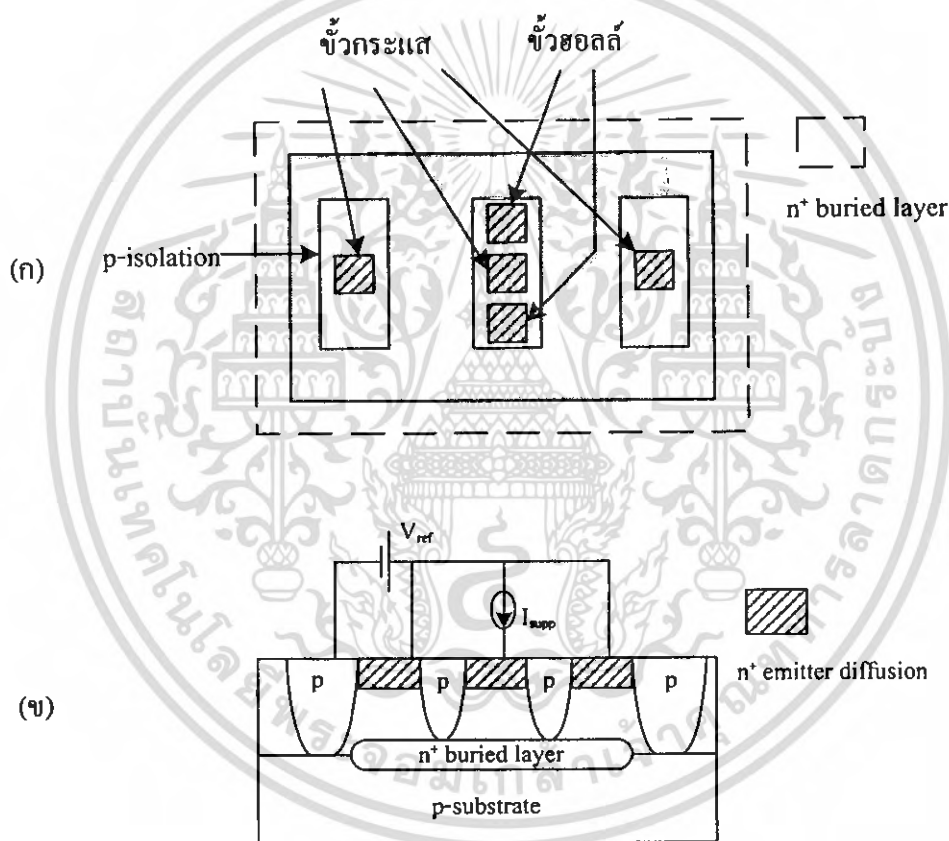
รูปที่ 2.10 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

อุปกรณ์ฮอลล์นี้ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเซ็นเซอร์แม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

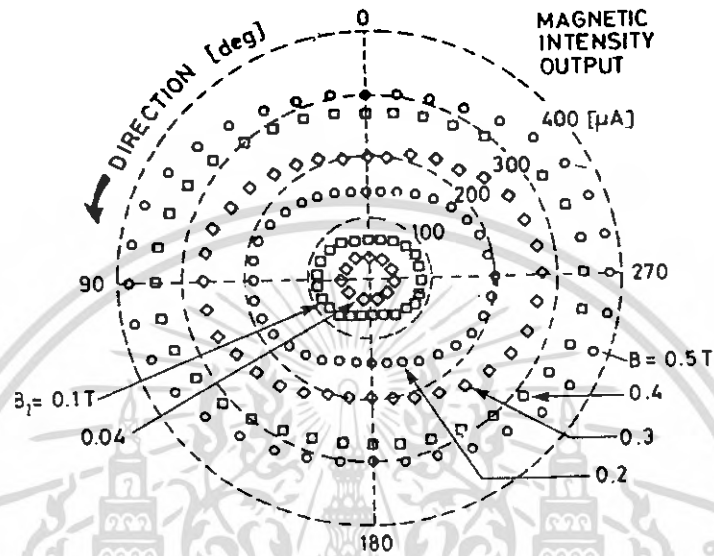
สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}$ ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กประมาณ 41 V/AT โดยมีระดับสัญญาณรบกวน $1 \times 10^{-5} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ ที่ 40 Hz

อุปกรณ์ฮอลล์ชนิดแนวตั้งและแนวนอนสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้าง CMOS เช่น อุปกรณ์ฮอลล์สามมิติแบบเข็มทิศแม่เหล็กสามารถสร้างได้ในระดับ $2 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 2.10 สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามทิศทาง (B_x, B_y, B_z) โดยการวัดอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะในมุมเบี่ยงเบนต่างๆซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ ข้อดีของอุปกรณ์ฮอลล์นี้คือมีชั้นเลขอร์ที่บางมากประมาณ 100 \AA ทำให้มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงประมาณ $500 - 1,000 \text{ V/AT}$ แต่มีข้อเสียคือจะมีค่าสภาพความคล่องที่ต่ำ



รูปที่ 2.11 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง

72214



รูปที่ 2.12 เอ้าท์พุทของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก[15]

2.4 อุปกรณ์ที่ใช้หลักการ ปรากฏการณ์ฮอลล์

2.41 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแมกนีโตรีซิสเตอร์ อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสเทนซ์ (magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม θ ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระนาบที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ 2.21 และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบน θ หาได้ดังสมการที่ 2.22

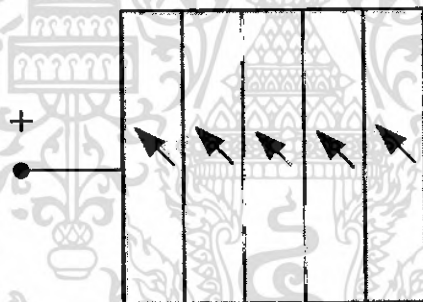
$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \tag{2.21}$$

$$R(\theta) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{ar} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \tag{2.22}$$

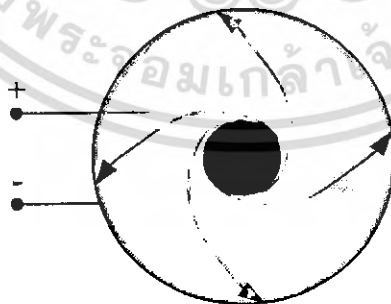
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ K_{dr} ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเพลทซึ่งในอุดมคติเพลทมีความกว้างมากกว่าความยาว

โดยปกติแล้วแมกนีโตริซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (parallel Hall plates) และแบบวงกลม (circular disc) ดังแสดงรูปที่ 2.10 โดยที่รูป 2.10(ก) แสดงโครงสร้างแมกนีโตริซิสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนานซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์คือในอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์แต่จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 2.10(ข) แสดงโครงสร้างแมกนีโตริซิสเตอร์แบบวงกลมซึ่งเป็นโครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วย โดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีสภาพความคล่องตัวต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะเลือกสารประกอบที่มีค่าสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 โครงสร้างของแมกนีโตริซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม

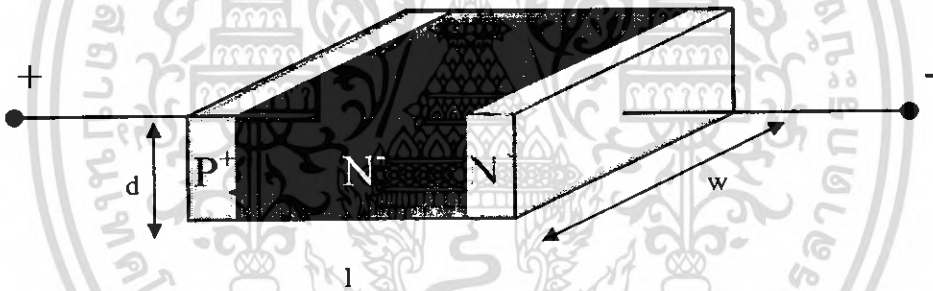
2.4.2 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่สามแสดงดังรูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดโดยมีมิติความยาว, ความกว้างและความสูง ($l \times w \times d$) อาศัยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะระหว่างสองรอยต่ออันเป็นผลเนื่องมาจากแมกนีโตคอนเซนเตรชัน (magneto concentration effect) โดยพาหะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ(recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของแมกนีโตไดโอดอีกด้วย โดยการใช้ Si-Al₂O₃ และ Si-SiO₂ ที่พื้นผิวเรียกว่า SOS (Silicon-On-Sapphire) ดังแสดงรูป 2.12(ก) ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่กระแสดังกล่าวสามารถหาได้โดยสมการที่ 2.23 [15]

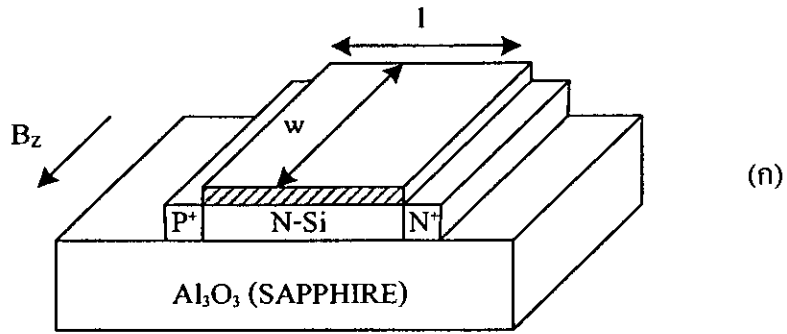
$$S_{\nu} = \frac{dV_f}{dB_z} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)\tau_{eff}(v_2 - v_1)}{8KTI} V_f^2 \quad (2.23)$$

โดยที่ l คือความยาวของซิลิคอนชนิดเอ็น, v_1 และ v_2 คืออัตราการรวมตัวของพาหะ, μ_p และ μ_n คือสภาพความคล่องตัวของพาหะ และ τ_{eff} คืออายุของพาหะ

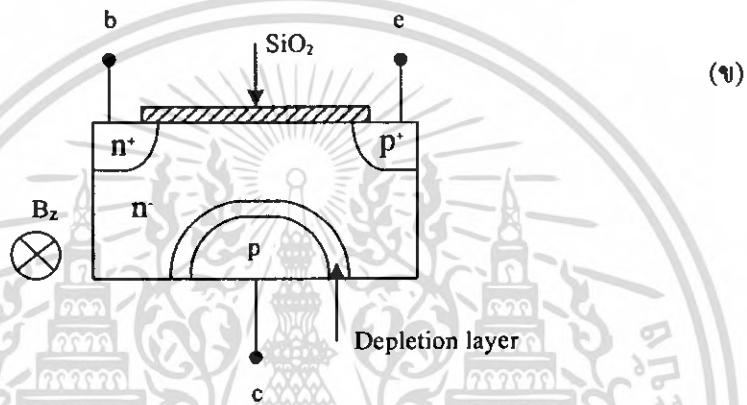


รูปที่ 2.14 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด

ข้อเสียของ SOS แมกนีโตไดโอด เช่น การสร้าง Si-Al₂O₃ จะเกิดขึ้นได้ยากในบริเวณผิวหน้า, ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ พื้นฐานของการใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS แสดงดังรูป 2.12(ข) โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตราการรวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS แมกนีโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปจากคอลเลกเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลกเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS

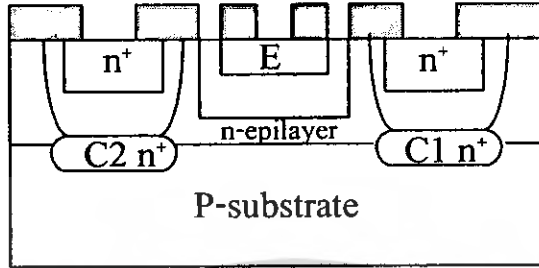
2.4.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magneto transistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้ง โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magneto transistor) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (lateral magneto transistor) ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง (Vertical magneto transistor)

รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้ง โดยสร้างจากกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลกเตอร์ทั้งสอง สร้างจากอะตอมสารเจือชนิด n^+ เพื่อไม่ให้ข้อต่อเซอร์กิตจึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่าง ชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง



รูปที่ 2.16 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านส่วนเบสไปยังชั้นอิมิตของคอลเลกเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วน โดยแต่ละส่วนจะ ไปถึงชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสองเท่ากันอยู่ในสภาวะสมดุล $I_{C1} = I_{C2} = I_{CO} / 2$ โดยที่ I_{CO} คือ ผลรวมกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสองขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลกเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$ ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสองหาได้โดยสมการที่ 2.23

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n^* (L / W_E) \cdot I_{CO} \cdot B \tag{2.23}$$

โดยที่ L คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์, W_E คือ ความกว้างอิมิตเตอร์ และ G คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดย

$$S = |\Delta I_C / I_{CO} B| \tag{2.24}$$

แทนสมการที่ 2.4.24 ลงในสมการที่ 2.25 จะได้

$$S = G \cdot \mu_n^* (L / W_E) \tag{2.25}$$

ในสภาวะปกติขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ 2.26 และ 2.27

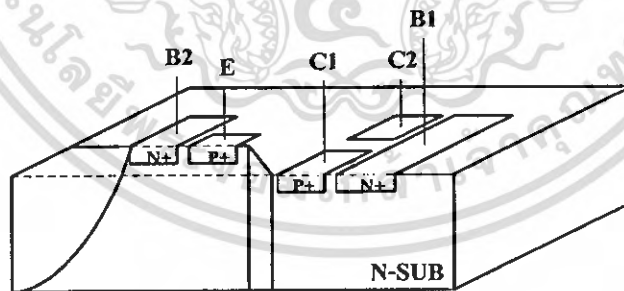
$$S_A = \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.26)$$

$$S = V_C^{-1} \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = I_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.27)$$

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

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor)

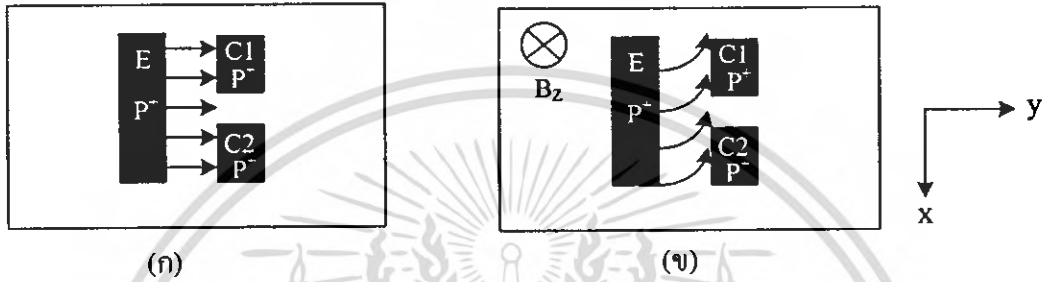
โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลกเตอร์ที่แยกกันอยู่สองข้างอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, สองคอลเลกเตอร์ C1, C2 และสองขั้วเบสคอนแทก B1, B2



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก (majority carriers) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลกเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลกเตอร์ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลกเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากัน ($\Delta I_C = 0$) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 2.15(ก) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลกเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ($\Delta I_C \neq 0$) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุลแสดงดังรูปที่ 2.15(ข)



รูปที่ 2.18 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ I_{C1} และ I_{C2} ได้ตั้งสมการที่ 2.29 เพราะฉะนั้นผลรวมของ I_{C1} และ I_{C2} คือกระแสคอลเลกเตอร์ที่ไหลในภาวะปกตินั้นเอง ตั้งสมการที่ 2.30 ส่วนสมการที่ 2.31 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔI_C กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง ΔI_C แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสมีดเตอร์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์และแบบสมบูรณ์แสดงได้ดังสมการที่ 2.28-2.32

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \tag{2.28}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \tag{2.29}$$

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_z \cdot I_E \tag{2.30}$$

ซึ่ง μ_p และ μ_n คือค่าความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮล K_g เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์(ก)

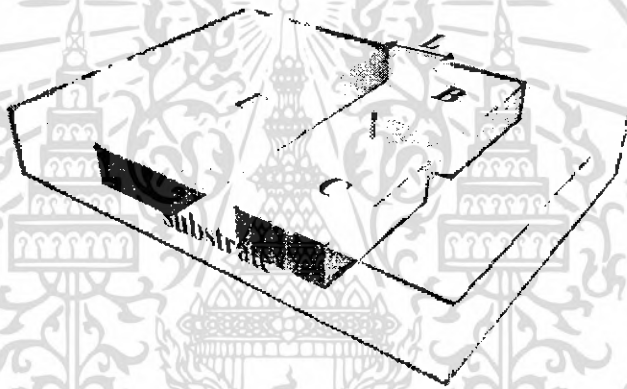
$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_O \cdot \Delta B_z} \tag{2.31}$$

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

ซึ่ง I_0 คือแหล่งจ่ายกระแสคงที่และ ΔB_z คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

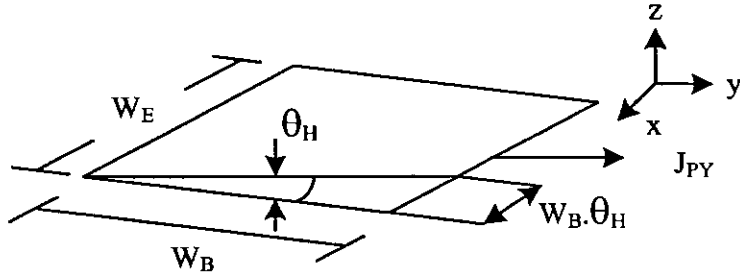
2.5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Three terminal magneto transistor)

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 2.16 เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และ คอลเลกเตอร์ C โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเป็นการพัฒนาจากโครงสร้างปกติห้าขา เพื่อสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวอน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลกเตอร์



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ โครงสร้างสามขาในภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กปริมาณพาหะโฮลเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ข้ามเบสไปยังคอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์เท่ากับปริมาณพาหะโฮลที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแสเบส แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากแนวตั้ง (ทิศทาง z) ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ พาหะถูกกระทำโดยแรงลอเรนซ์ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนและเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ การวิเคราะห์การทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.17 โดยกระแสอิมิตเตอร์คือการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ดังสมการที่ 2.33



รูปที่ 2.20 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โสไลต์) ทำมุมเบี่ยงเบน θ_H

$$I_E = I_B + I_C \quad (2.33)$$

กระแสมิตเตอร์สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโสลิต J_{PY} ดังสมการ 2.34

$$I_E = J_{PY} \cdot W_E \cdot d \quad (2.34)$$

โดยที่ W_E คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ d คือความถี่กรอยต่อ

การไม่สมดุลของกระแสนั้นมีความสัมพันธ์กับความกว้างกว้างเบส W_B , สภาพความคล่องตัวของโสลิต μ_p และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B_z ดังสมการที่ 2.36 กระแสไหลตามแนวอนเบี่ยงเบนในมุม θ_H ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 2.35

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z \quad (2.35)$$

$$(\Delta Y) = W_B \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (2.36)$$

$$\Delta I_{CB} = J_{PY} \cdot W_E \cdot W_B \cdot \tan \theta_H \quad (2.37)$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์สามารถหาได้โดยสมการที่ 2.37 สามารถคำนวณโดยความหนาแน่นกระแส J_{PY} ในระนาบ $L = W_B$, ความกว้างอิมิตเตอร์ W_E และมุมเบี่ยงเบน $\tan \theta_H$

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดยสมการที่ 2.38

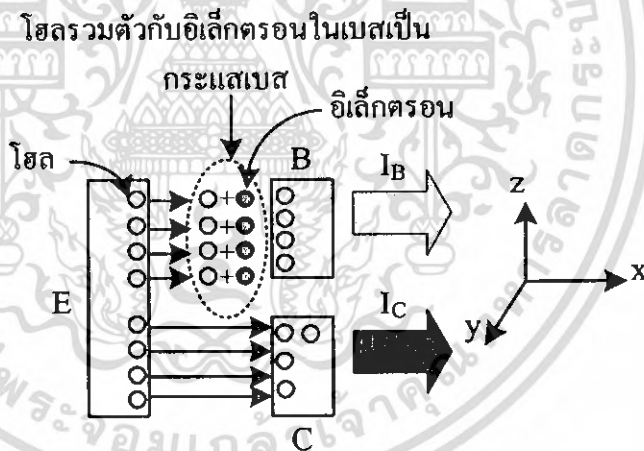
$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot B_Z} \quad (2.38)$$

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับความเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

2.5.1 การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

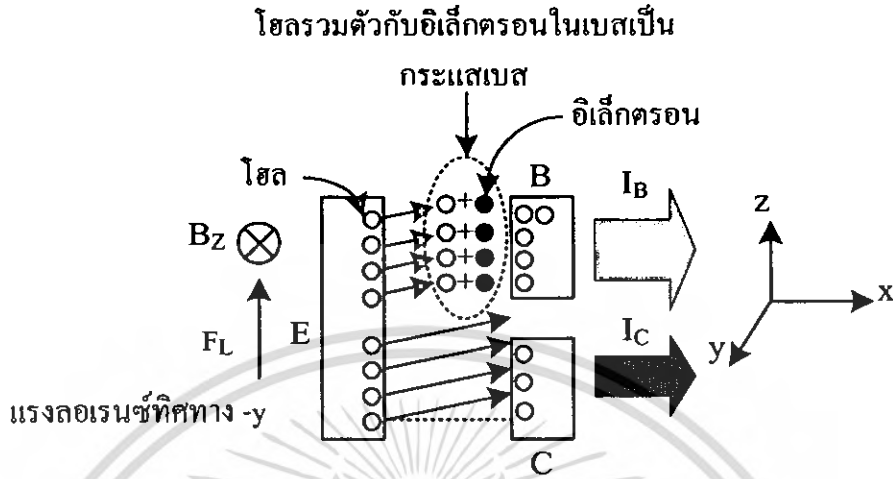
การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ ($B_z=0$) และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้รับการไบอัส พาหะ (โฮล) จะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปเบส โดยโฮลจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนภายในเบสกลายเป็นกระแสเบสและโฮลบางส่วนจะเคลื่อนที่ไปสะสมที่คอลเลกเตอร์กลายเป็นกระแสคอลเลกเตอร์ ทำให้พาหะที่รวมตัวในเบสและพาหะที่สะสมที่คอลเลกเตอร์มีปริมาณเท่าๆกันทำให้กระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์เท่ากัน ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าทั้งสอง ($\Delta I_{CB}=0$)



รูปที่ 2.21 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ(โฮล)ในภาวะปกติ

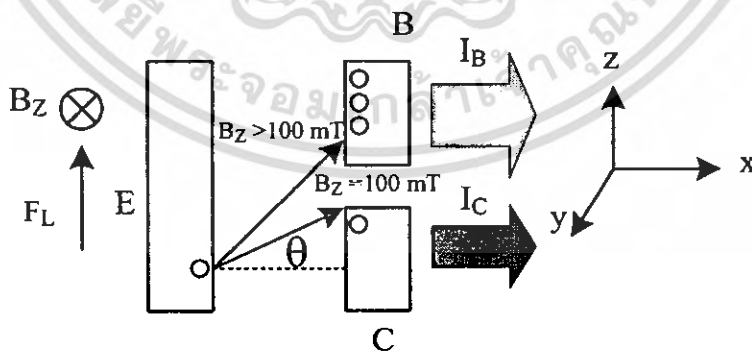
เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดมีแรงลอเรนซ์ทิศทาง $-y$ แรงลอเรนซ์กระทำกับโฮลซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง x เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ ($\Delta I_{CB} \neq 0$) สามารถวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาโดยโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขานั้นมีตำแหน่งของเบสและคอลเลกเตอร์ตรงข้ามกันและมีขนาดเท่ากัน โฮลถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์จะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ นั่นคือกระแสเบสเกิดจากโฮลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสและพาหะบางส่วนที่เบี่ยงเบนสะสมที่เบส โดยที่จะมีโฮลอีกบางส่วนเบี่ยงเบนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะที่คอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) มีค่าสูง



รูปที่ 2.22 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ (โฮล)

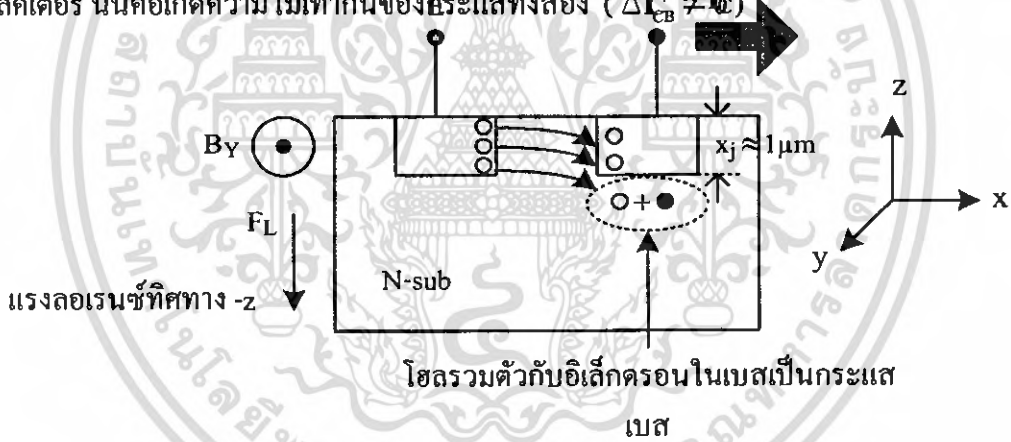
เมื่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงลอเรนซ์มีแรงกระทำกับพาหะมากขึ้นตามสมการ $|\vec{F}_L| = F_L = e \cdot v_{DX} \cdot B_z$ พาหะถูกแรงกระทำจากแรงลอเรนซ์มากขึ้นทำให้พาหะเคลื่อนที่เฉียงเบนในมุมที่กว้างขึ้น จาก $\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z$ วิเคราะห์การทำงานในรูปแบบโครงสร้างปกติ นั่นคือพาหะ (โฮล) บางส่วนที่เฉียงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์เคลื่อนที่เฉียงเบนในมุมที่กว้างขึ้นและไปสะสมที่ขั้วเบสดังแสดงรูป จึงทำให้กระแสเบส I_B เพิ่มขึ้นแต่กระแสคอลเลคเตอร์ I_C ลดลง ความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง (ΔI_{CB})



รูปที่ 2.23 พาหะ (โฮล) เคลื่อนที่ในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

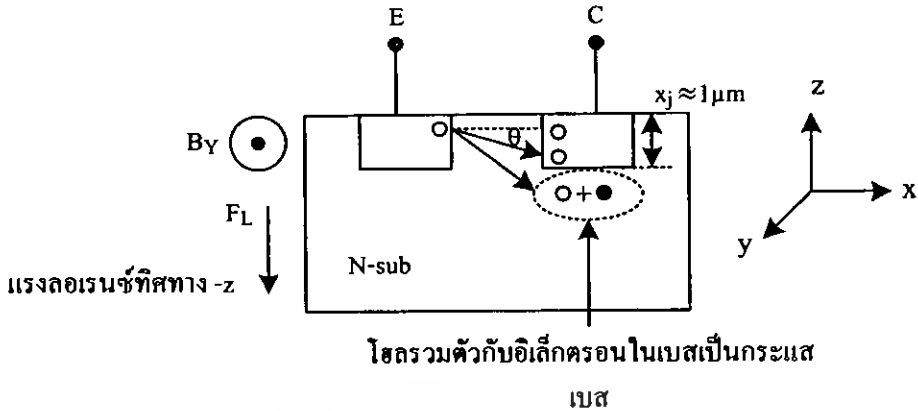
การตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอน

การตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ($B_y = 0$) โดยกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากันไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง ($\Delta I_{CB} = 0$) จากนั้นเมื่อมีสนามแม่เหล็กแวนอนตัดผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง $-z$ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ (โฮล) ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง x ทำให้พาหะ (โฮล) เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ($\Delta I_{CB} \neq 0$) โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากผลของการเบี่ยงเบนพาหะ(carrier deflection) โดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) สนามแม่เหล็กแวนอนทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง $-z$ ซึ่งแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่ในทิศทาง x โฮลจะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์และไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบสโดยที่มีโฮลบางส่วนเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์จะกลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ นั่นคือเกิดความไม่เท่ากันของกระแสทั้งสอง ($\Delta I_{CB} \neq 0$)



รูปที่ 2.24 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง -Z

เมื่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่า จะทำให้แรงลอเรนซ์มีแรงกระทำกับพาหะมากขึ้น ทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้น วิเคราะห์การทำงานในรูปแบบโครงสร้างปกติ นั่นคือพาหะ(โฮล)บางส่วนที่เบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นและไปสะสมที่ขั้วเบส จึงทำให้กระแสเบส I_B เพิ่มขึ้นแต่กระแสคอลเลคเตอร์ I_C ลดลง ความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง (ΔI_{CB}) จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของโฮลตามทิศทาง -Z

2.6 คุณสมบัติต่างๆ ทั่วไปของอุปกรณ์เซนเซอร์

การนำอุปกรณ์เซนเซอร์ไปใช้งาน โดยทั่วๆ ไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติเช่น ที่อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดัน เพื่อให้สามารถนำเซนเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซนเซอร์ทั่วๆ ไป ค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

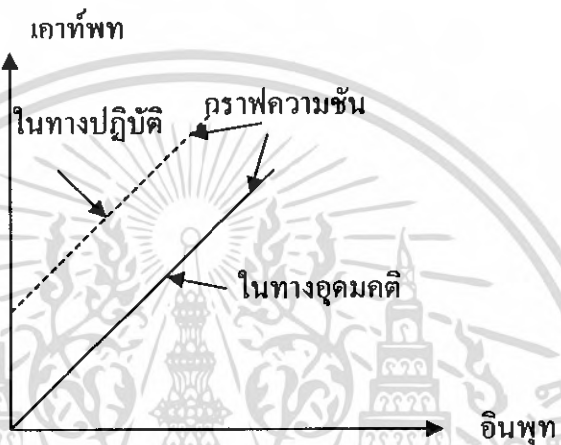
1. ย่านวัด (Range) เป็นการจำกัดค่าอินพุต และเอาต์พุตของเซนเซอร์ในการใช้งาน เช่น เซนเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้กับความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสด้านเอาต์พุตอยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

2. ความผิดพลาด (Error) เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (uncertainty) รวมอยู่ด้วยเสมอ

3. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ในการวัดค่า ความแม่นยำ และความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง จะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึง สามารถวัดได้ละเอียด (sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง สเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือค่าที่วัดได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึง ความคงเส้นคงวา (consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงค่า

4. ความไว (Sensitivity) หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต หรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น $0.5 \Omega/^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น

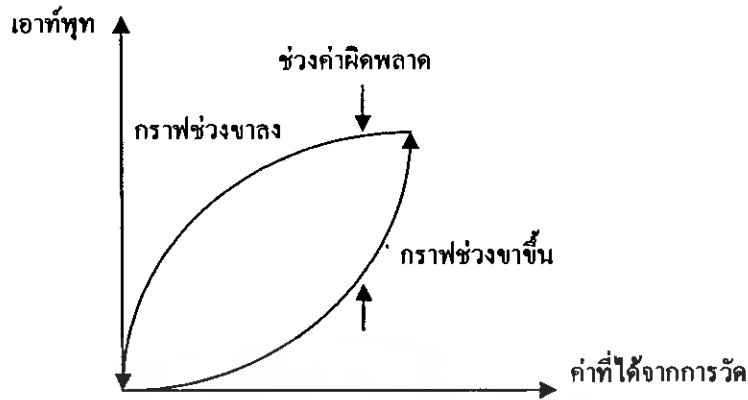
5. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือความแม่นยำ โดยความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่าจะมีการวางตัวอย่างไรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมาก แต่มีความเอียง, ความชัน หรือออฟเซต จากค่าที่ถูกกำหนด



รูปที่ 2.26 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ

6. ความมีเสถียรภาพ (Stability) ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การลื่นไหล (drift) มักถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การลื่นไหลอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มข่านวัดก็ได้ คำว่า การลื่นไหลเป็นศูนย์ (zero drift) ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุต เมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์

7. ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด



รูปที่ 2.27 ฮิสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

8. การแยกชัด (Resolution or Discrimination) บอกถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ถูกรวัด

9. ออฟเซ็ท (Offset) เป็นค่าเอาต์พุตของเซนเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่สัญญาณอินพุตเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ค่าออฟเซ็ท หมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

10. ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response) แสดงถึงเวลาที่เอาต์พุตมีค่าอยู่ใน 63 % ของค่าสุดท้ายที่ทำการการตอบสนองของอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดทดลอง

โดยปกติแล้วในการออกแบบกระบวนการสร้างและการทดสอบของอุปกรณ์เซนเซอร์ในความเป็นจริงจะมีคุณสมบัติไม่เป็นอุดมคติเพราะฉะนั้นจึงเป็นหน้าที่ของนักออกแบบและนักวิจัยที่จะพัฒนาอุปกรณ์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือเข้าใกล้ความเป็นอุดมคติมากที่สุด โดยรายละเอียดคุณสมบัติของเซนเซอร์ในทางอุดมคติสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

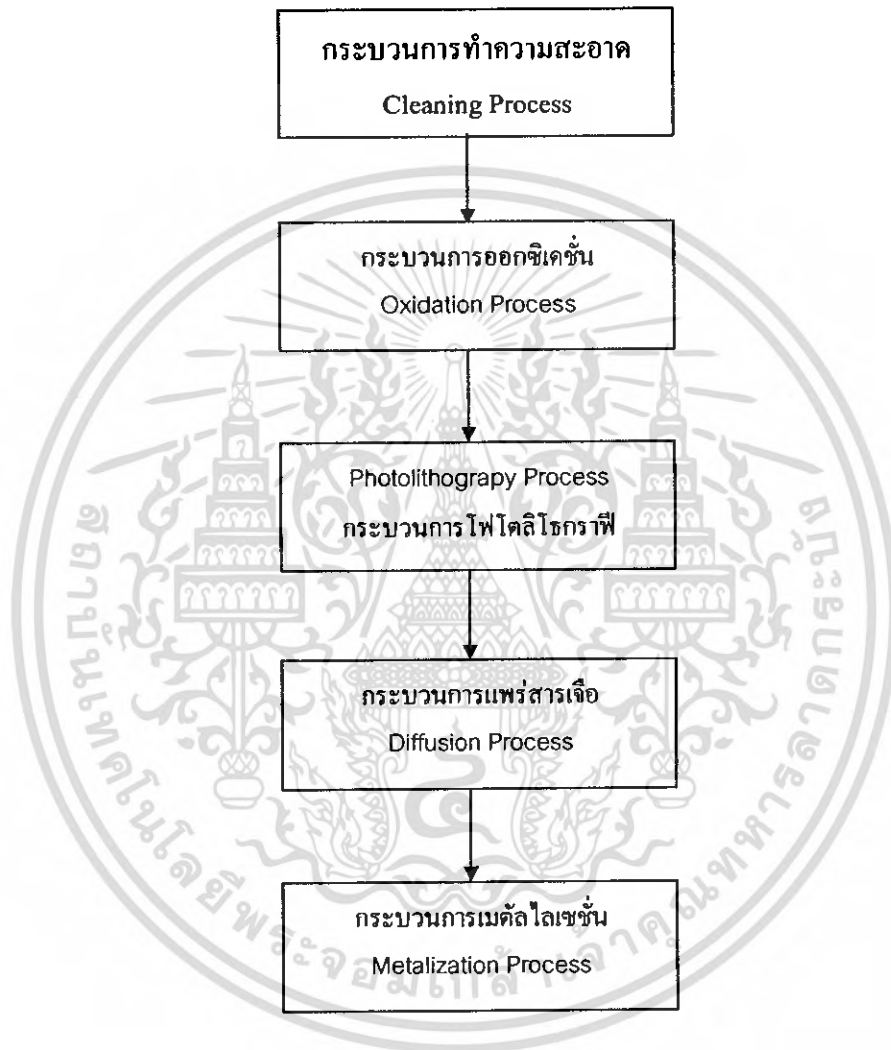
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ

คุณลักษณะ	ค่าในทางอุดมคติ
Response, Δy	มีความเป็นเชิงเส้นและไม่มีสัญญาณรบกวน
Baseline, y_0	เท่ากับศูนย์
Response time, T	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Frequency band-width	เท่ากับอนันต์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Time to reach 90% of final value, t_{90}	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Working range, $(y_{max} - y_{min})$	เท่ากับอนันต์
Sensitivity, S	มีค่าสูง และคงที่ตลอดช่วงการทำงาน
Resolution	เท่ากับอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

3.1 กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process)

กระบวนการทำความสะอาด (Cleaning Process) มีเป้าหมายหลักคือ กำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอนเช่น กำจัดฝุ่น กำจัดไขมัน กำจัดเศษโลหะ เพื่อความสะอาดของแผ่นซิลิคอนก่อนลงมือทำการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

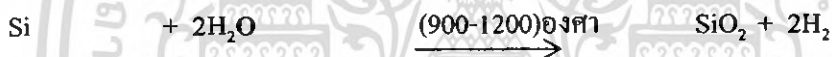
3.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

คือการการก่อตัวของซิลิคอนไดออกไซด์บนพื้นผิวซิลิคอนโดยที่ซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของออกซิเจน : O_2 และน้ำ : H_2O ที่อุณหภูมิสูงประกอบด้วย

Wet Oxidation



Dry Oxidation

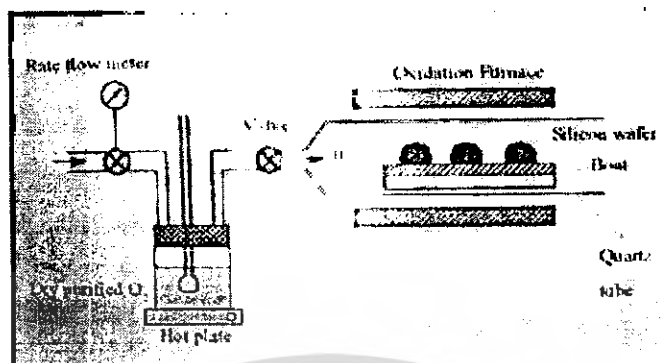


ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีและยังช่วยควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น

จากสมการทางเคมีข้างต้นกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process) มีอยู่ 2 แบบคือ

3.2.1 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

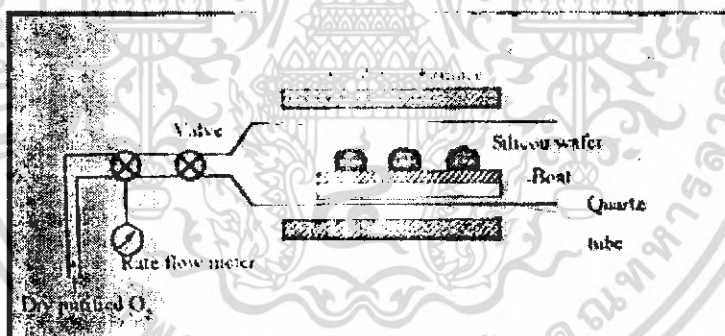
เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ การเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า Dry Oxidation เนื่องจากโมเลกุลเองคั้งที่ได้กล่าว แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ Wet Oxidation คือคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ไม่ดี ประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมของสารเจือ น้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ได้ไม่สมบูรณ์ และมีรูพรุน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ



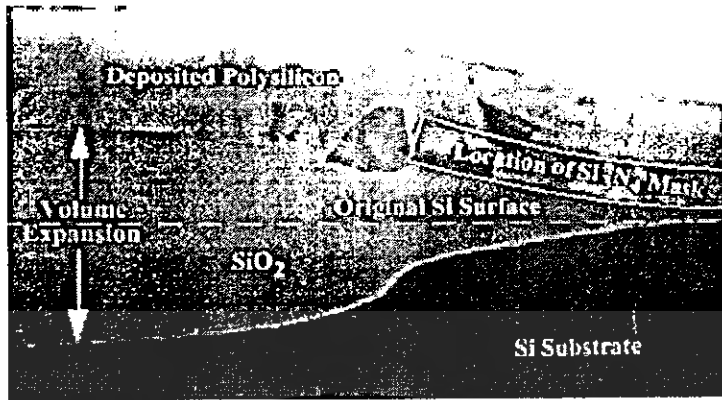
รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไฮดรอกไซด์

3.2.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูง พื้นผิวที่ได้ค่อนข้างเรียบกว่า ฟิล์มของ Wet Oxidation แต่ ปฏิกิริยาการเกิดซ้ำ และอัตราการเกิดต่ำกว่า



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง



รูปที่ 3.4 การเกิดซิลิคอน ไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน

ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการออกซิเดชัน

1. ระยะเวลาของผลึกผลเนื่องจากระยะเวลาผลึกพิจารณาจาก
 - จำนวนพันธะของซิลิคอนที่มีต่อพื้นที่บนผิวหน้าของซิลิคอนที่แต่ละนาบ
 - ทิศทางของผลึกมีผลกับค่าพลังงานกระตุ้นที่ใช้เริ่มปฏิกิริยา
2. ผลเนื่องจากสารเจือ

สารเจือที่ใช้โดยปกติคือธาตุหมู่ 3 และหมู่ 5 คือ โบรอน ฟอสฟอรัส อาร์เซนิก ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มอัตราการออกซิเดชันเมื่อมีความเข้มข้นปริมาณสูง ทำให้โครงสร้างพันธะของ SiO₂ อ่อนลง ซึ่งทำให้ H₂O และ O₂ เข้าสู่ SiO₂ ได้โดยง่าย และแพร่ผ่านอย่างรวดเร็ว

3. ผลเนื่องจาก H₂O
4. ผลเนื่องจากคลอริน

Cl เป็นตัวที่ช่วยแก้ไขคุณสมบัติของอุปกรณ์ให้ดีขึ้น ซึ่งได้มาจากการเป่าก๊าซ HCl, TCE, TCA ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชันด้วยเช่นกัน

5. ผลเนื่องจากความดัน

3.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

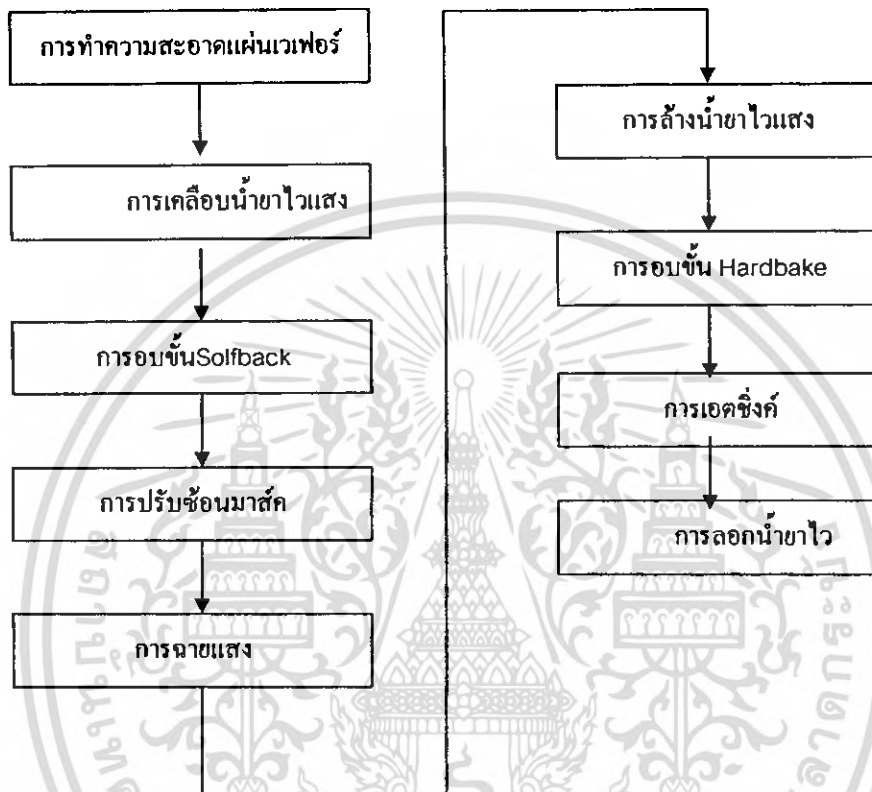
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) คือกระบวนการเกี่ยวกับการส่งผ่านลวดลาย(pattern)จากมาสก์กลงไปยังบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

กระบวนการ Photolithography ต้องการห้องสะอาดสำหรับปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในชั้นคอนนำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียหายที่เกิดขึ้นควรควบคุมให้ไม่เกิน 10 % ไม่เช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะใช้มาสก์ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50 % ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับขบวนการ Photolithography การสร้างห้องสะอาดส่วนมากจะเป็นแบบ Vertical Lamminar Flow ที่มีการกรองฝุ่นออกจากอากาศ เพื่อให้เป็นห้องสะอาดในระดับตั้งแต่ Class 10K – Class 1 ดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 3.1 แสดง Class ต่าง ๆ ของห้องสะอาด

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

กระบวนการ Photolithography Process โดยมีขั้นตอนพื้นฐานต่างดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process

3.3.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์(Wafer Cleaning)

ขั้นตอนแรกของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีคือการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆที่ติดอยู่บนผิวเวเฟอร์ เช่น โลหะ ฟุ้งละออง สารอินทรีย์หรืออิมอนต่างๆ สิ่งสำคัญของขบวนการ Photolithography สารละลายที่สำคัญมากและใช้บ่อยที่สุดคือน้ำ DI(deionized)ซึ่งเป็นน้ำที่ทำให้บริสุทธิ์และผ่านตัวกรองหรือฟิลเตอร์เพื่อกรองฟุ้งละออง อนุภาคและสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำ DI ซึ่งน้ำ DI เป็นน้ำที่มีความต้านทานสูงมาก

3.3.2 การเคลือบสารไวแสง (Photoresist coating)

สารไวแสง แบ่งออกออกเป็น 2 ชนิด คือ

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

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

สิ่งสำคัญก่อนการเคลือบสารไวแสงคือแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้า และสร้างชั้นออกไซด์แล้ว อบในตู้อบประมาณ 30-60 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดลอกได้ง่าย ซึ่งการเคลือบสารไวแสงสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

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

แบบที่ 2 การเคลือบด้วยสเปรย์ (Spray Coating) มีหลายแบบส่วนมาใช้ภายในโรงงาน

แบบที่ 3 วิธีใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating) ซึ่งวิธีนี้จะใช้เคลือบเฉพาะตอนที่ตัดแยกชิพโดยเคลือบหมดทั้งแผ่น 2 ด้าน แล้วนำไปทำการถ้ำลายเส้นที่จะทำการตัด ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวสำหรับใบมีเพชรตัด และยังเป็นการป้องกันฝุ่นและรอยเปื้อนต่างๆ จากการตัด ซึ่งส่วนมากจะใช้สารไวแสงแบบบวกเพราะถ้าใช้สารไวแสงแบบลบ ฝุ่นและจุดที่บวมอาจทำให้เกิด Pinholeบนฟิล์มได้หลังจาก develop แล้ว

3.3.3 การอบชั้นSoftbake

การอบชั้น Softbake จะช่วยในการยึดติดกับแผ่นซิลิคอนและช่วยในการลอกออกชั้นตอนนี้ จะใช้เวลาอบประมาณ 10 ถึง 30 นาที ในเตาที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศา ในอากาศหรือบรรยากาศไนโตรเจน

3.3.4 การปรับชั้นหน้ากาก (Mask Alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์ค โดยการนำกระจกโฟโตมาส์ค วางทับบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโตมาส์คชิ้นแรกสามารถทำได้โดยไม่มีการปรับชั้นหน้ากากทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวมบนแผ่นผลึกเลยแต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้นได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ถูกต้อง

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาส์คตั้งแต่มาส์ค 2 เป็นต้นไปก่อนการฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับชั้นหน้ากาก เพื่อให้ลวดลายบนกระจกมาส์คซ้อนทับกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ซึ่งจะทำให้ขบวนการโฟโตกราฟิสามารถเปิดชั้นของออกไซด์ได้ตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง และเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมากดังนั้นการปรับชั้นจึงใช้อุปกรณ์ช่วยเรียกว่า ตัวปรับชั้นหน้ากาก ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆคือ นำแผ่นผลึกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนได้ในแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงนอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาส์คจะถูกยึดให้อยู่เหนือน้ำยาไวแสงเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาส์คพร้อมกับทำการปรับแผ่นเลื่อนแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงจนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกแลบนโฟโตมาส์คซ้อนกันลงตรงตำแหน่งที่ถูกต้องจากนั้นปรับแผ่นผลึกเลื่อนขึ้นในแนวสูงจนแนบสนิทกับกระจกมาส์ค ดังนั้นเราก็จะได้ตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อเตรียมสู่ขั้นตอนการฉายแสงต่อไป

3.3.5 การฉายแสง (Exposure)

การฉายแสง (Exposure)คือขั้นตอนที่ต่อจากการปรับชั้นหน้ากาก (Alignment) วิธีการก็คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงย่านอัลตราไวโอเลตเอ็กโพสหรือฉายผ่านลวดลายฟิล์มโลหะบนกระจกมาส์คที่ทำการอัลไลน์กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ด้านบนมีน้ำยาไวแสงติดอยู่ แสงจะผ่านลวดลายหรือไม่ผ่านลวดลายฟิล์มโลหะด้านบนจะเป็นตัวบังแสงไว้ส่วนที่ผ่านได้จะมาทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสงหรือโฟโตรีซิสบนผิวซิลิคอน การเอ็กโพสหรือการฉายแสงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งเพื่อให้แสงทำปฏิกิริยากับโฟโตรีซิสอย่างสมบูรณ์

3.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

Development เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงแล้วด้วยน้ำยา Developer โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการ Develop ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบ ส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่

จากนั้นจะทำการ Postbake เพื่อให้ส่วนที่เป็นฟิล์มแห้งและยึดเกาะติดกับแผ่นสลิคแน่นยิ่งขึ้นและเมื่อนำออกจากเตาอบแล้วควรนำไป Etching หันที่ไม่ควรปล่อยชั้นฟิล์มทิ้งไว้นานเกินไป

3.3.7 การอบขั้น Hardbake

หลังผ่านการฉายแสงและเคลวลอพอเมนท์ ขั้นตอน Hardbaking จะช่วยทำให้โฟโตริซิสติดกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดีขึ้น ขั้นตอนนี้จะอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศา ถึง 180 องศา เป็นเวลา 20 ถึง 30 นาที

3.3.8 การกัด(Etching)

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

การกัดคือการกัดชั้นป้องกันหรือซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องหรือพื้นที่ตามต้องการ สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีส่วนผสมหลักคือกรดไฮโดรฟลูออริกหรือ HF จะเป็นสารละลายที่กัดซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีอัตราการกัดอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 nm/mic ที่ 25 องศา เราต้องคำนวณความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ให้เหมาะสมเพราะสารละลายทางเคมีจะกัดทุกทิศทุกทางเท่ากันหมดถ้าเราปล่อยให้กัดในเวลาที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดที่ด้านข้างทำให้ลวดลายเสียหายได้

หลังจากกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เราจะได้ช่องหรือลวดลายที่มีช่องหรือลวดลายตามมาส์คบนผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว

3.3.9 การล่อน้ำยาไวแสง

การล่อน้ำยาไวแสงออกจากแผ่นสลิคเป็นขั้นตอนต่อจากการ Etching โดยการจุ่มแผ่นสลิกลงในน้ำยาลอกฟิล์ม อาจเป็นสารเคมีหรือใช้พวกพลาสติกเพื่อทำให้ผิวของแผ่นสลิคสะอาดเตรียมนำไปแพร์สารเจือได้ ซึ่งถ้าผิวหน้าของซิลิคอนมีสิ่งสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพร์สารเจือ

เมื่อลอกชั้นสาร ไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์(microscope) เพื่อดูว่าเกิดการกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่ติดไม่แน่นหรือเกิดการกัดมากเกินไปถ้าเสียหายมากอาจจะต้องกลับไปเริ่มทำใหม่

3.3.10กระบวนการแพร์สารเจือ(Deposition)

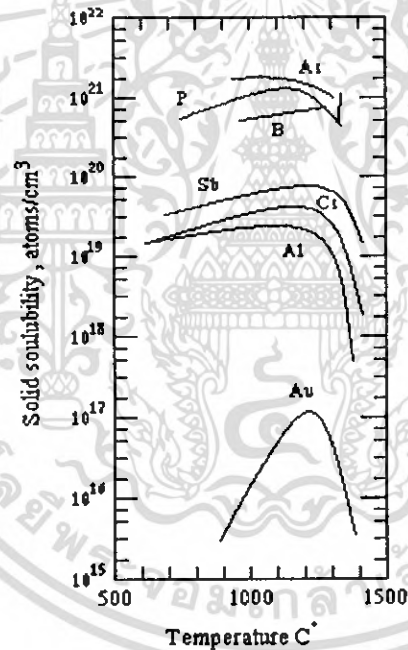
กระบวนการแพร์สารเจือเป็นกระบวนการเป็นกระบวนการแพร์สารเจือลงในแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการแพร์ที่อุณหภูมิสูงทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ(Source)เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรองและถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็น ขึ้น

ขั้นตอนการแพร์สารเจือทำได้โดยกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งแหล่งสารเจือ โบรอน(Boron source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด พี และใช้ฟอสฟอรัสในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปในบรรยากาศของสารเจืออะตอมสารเจือ

จะเคลื่อนที่เข้าไปยังแผ่นฐานรองความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการแพร่มีอิทธิพลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพร่ ในกระบวนการแพร่สารเจือปนได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ การแพร่สารเจือปนขั้นต้น(Pre-deposition) และการขับลึก(Drive-in)

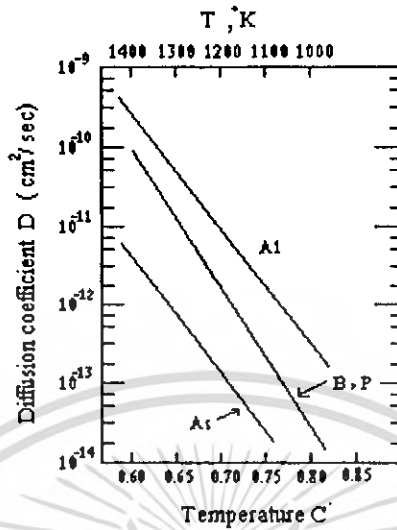
1. การแพร่สารเจือปนขั้นต้น(Pre-deposition)

การแพร่สารเจือปนขั้นต้น ในอุณหภูมิสูงเป็นการควบคุมปริมาณสารเจือปน โดยการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแพร่สารเจือปน โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆจะมีปริมาณสารเจือปนสูงสุดในการแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรอง ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการแพร่เข้าไปในของแข็ง(Solid solubility)และปริมาณสารเจือปนที่ผลึกฐานรองจะเรียกว่าความเข้มข้นผิว(Surface concentration) โดยความสัมพันธ์ของค่า Solid solubility กับอุณหภูมิในการแพร่สามารถแสดงดังรูปต่อไปนี้



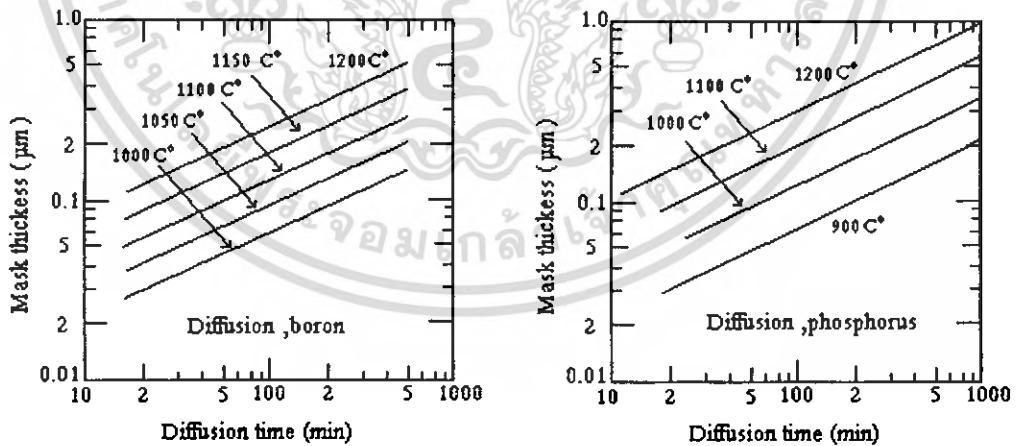
รูปที่ 3.7 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอุณหภูมิต่อ

สำหรับการแพร่ของสารเจือ เช่น As, P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิคอน ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นหน้ากากเพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของฐานรองโดยความหนาของชั้นซิลิคอนที่ใช้พิจารณาจาก อุณหภูมิ เวลาและสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปต่อไป



รูปที่ 3.9 ความหนาของชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของ โบรอนและฟอสฟอรัส

2. การขัปลึ้ก

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารเจือบริเวณผิวที่ได้จากขั้นตอนการแพร่ชั้นต้น แพร่ลงไปเนื้อสารมากขึ้น ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นซิลิคอน

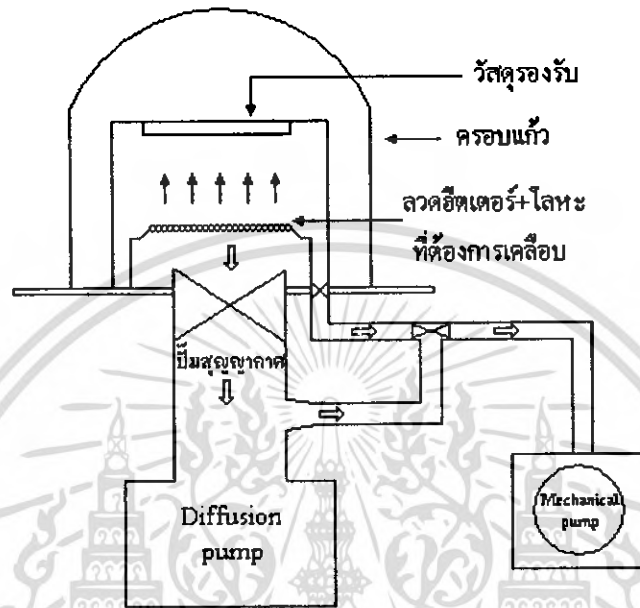
3.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Meltalztion Process)

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวด้วยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ตามลำดับขั้นตอนต่างๆจนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้จะยังคงแยกกันอยู่ในสภาพยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้จำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Meltalztion Process)ก่อน

กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Meltalztion Process) คือกระบวนการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายใน สำหรับการเลือกโลหะเพื่อใช้เคลือบบนแผ่นซิลิคอนเพื่อให้เป็นรอยต่อโอห์มมิกรอยต่อโอห์มมิก(Ohmic contact) หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายในของวงจรรวมควรมีคุณสมบัติเช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับผิวซิลิคอนไดออกไซด์และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ได้แก่ อะลูมิเนียม(AL), ทอง(Au) และเงิน Ag เป็นต้น

เทคนิคในกระบวนการเมทัลไลเซชันใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศ โดยใช้เทคนิคกระบวนการระเหยในสุญญากาศ(Evaporation) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลของการแพร่กระจายไอออนแต่มีข้อเสียที่อายุการใช้งานของไส้หลอดจะสั้น สำหรับการเคลือบโลหะทำได้โดยทำให้สารนั้น ได้รับความร้อนจากไส้ที่ทำจากทังสเตน(Tungstan)หรือ(Molynum)

เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

เมื่อใส่หลอดถูกทำให้ร้อน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก ไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไหลผ่านได้ เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่ง โลหะที่วางอยู่ที่ใส่หลอดตั้งเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอพุ่งกระจาย เคลือบแผ่นลิกซิลิคอนที่วางใน Chamber

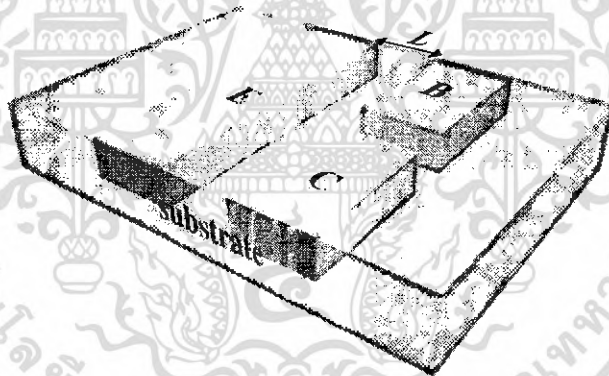
สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า ระเหยเป็นไอก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ไส้ต้องพิจารณาให้มีขนาดพอเหมาะ สัมกับสารที่จะใช้ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลือง โลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการและพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร AL,Au,Ag,Pd เป็นต้น

3.5 การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

3.5.1 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 3.11 แมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างสามขานี้เป็นการพัฒนารูปแบบโครงสร้างเพื่อลดความยุ่งยากการไบอัสและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอนเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และคอลเลกเตอร์ C

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบส (recombination) เป็นกระแสเบสและพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์ (ΔI_{CB}) กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection) โดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) พิจารณาจากรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 รูปโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

3.5.2 การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอนโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์และกระแสเบส กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) ในสถานะที่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่ระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ในระยะความยาว L แรงลอเรนซ์จะกระทำกับพาหะทำให้เคลื่อนที่เบี่ยงเบน

ในมุม θ เทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะขณะที่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านในระยะความยาว L โดย θ คือมุมเบี่ยงเบนของพาหะ

รอยต่ออิมิตเตอร์-เบส ได้รับแรงดันไปข้างหน้าทำให้พาหะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปสู่เบส กลายเป็นกระแสอิมิตเตอร์โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถแสดงกระแสอิมิตเตอร์โดยรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์

$$I_E = I_B + I_C$$

สมการความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ (ΔI_{CB}) กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังสมการที่

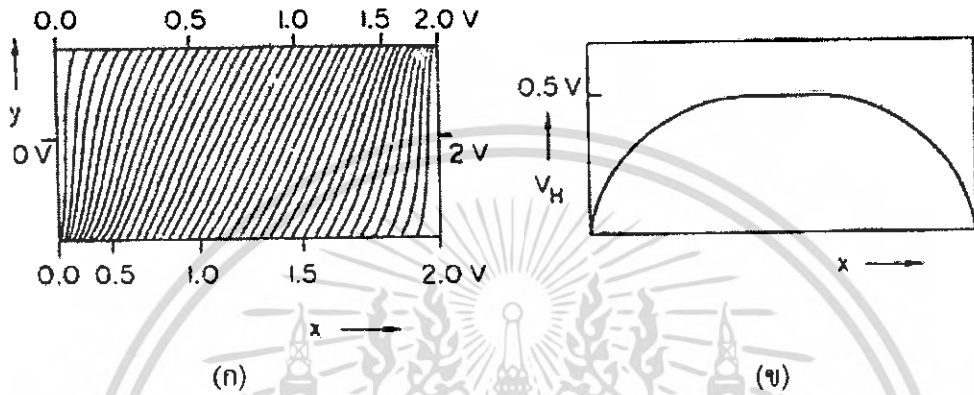
$$S = \frac{\Delta I_{CB}}{\Delta B}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กกับพารามิเตอร์โครงสร้างสมการที่ $S = \frac{\Delta I_C \cdot L \cdot \mu_p}{W}$ สามารถแสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาได้ดังสมการ

$$S \propto \Delta I_{CB} \cdot L \cdot \mu_p$$

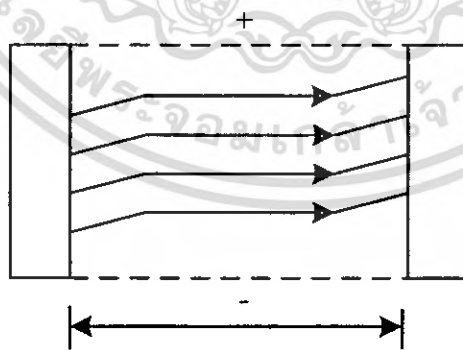
จากสมการที่ 3.8 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์กับระยะความกว้างเบส L โดยที่ไม่มีผลของระยะ W เนื่องจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาอาศัยพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสระยะการเบี่ยงเบนจึงไม่มีผลต่อเอ้าท์พุทของอุปกรณ์เสมือนระยะ W เท่ากับศูนย์ โดยในการพิจารณาการกำหนดระยะความยาว L สามารถทำการศึกษาจากทฤษฎีฮอลล์โดยที่รูปที่ 3.12(ก) แสดงเส้นศักย์เท่ากัน (equipotential lines) ของอุปกรณ์ฮอลล์ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทำให้พาหะเคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่คงที่ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ได้สมบูรณ์ ซึ่งจะแตกต่างกับบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์โดยสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้ค่า

แรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถมีค่าได้สูงสุด รูปที่ 3.12(ข) แสดงค่าแรงดันฮอลล์ (V_H) ที่ตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ฮอลล์ แรงดันฮอลล์มีค่าสูงที่สุดในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์และบริเวณใกล้หัวของอุปกรณ์จะมีค่าแรงดันฮอลล์ที่น้อย เพราะฉะนั้นการออกแบบเพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้ววัดแรงดันฮอลล์โดยส่วนใหญ่แล้วจะออกแบบให้อยู่ตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์

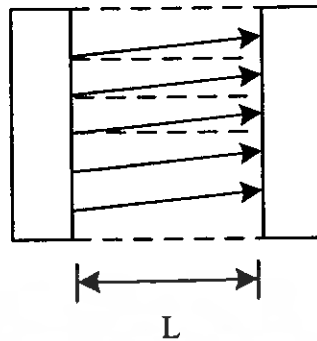


รูปที่ 3.12 (ก) เส้นศักย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์ และ (ข) แรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ

จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 3.12 สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้ โดยในการออกแบบจะกำหนดระยะความยาว L เป็นระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีความยาว L รูปที่ 3.13 แสดงการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็กได้สมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ นั่นคือกระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางเคลื่อนที่ในแนวตรง ซึ่งทิศทางกระแสไฟฟ้าในบริเวณใกล้หัวของอุปกรณ์จะมีการเบี่ยงเบนเพราะสนามไฟฟ้าไม่สามารถเหนี่ยวนำได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.13 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว L ของอุปกรณ์ฮอลล์



รูปที่ 3.14 แสดงการลดลงของความยาว L ซึ่งสามารถแสดงการเบี่ยงเบนได้ชัดเจนเนื่องจาก

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้กระแสเกิดการเบี่ยงเบนได้อย่างชัดเจน (ΔI_{CB}) ซึ่งลักษณะของกระแสที่เบี่ยงเบนจะเป็นพื้นฐานในการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์นั่นคือแสดงให้เห็นว่าระยะความยาว L ไม่สามารถที่จะออกแบบให้มีความยาวที่ยาวมากได้ การออกแบบจึงกำหนดระยะความยาวเบส L ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ระยะ $20\mu\text{m}$ ซึ่งเป็นระยะที่คาดว่าจะได้เอาที่ทุกที่ที่ดีที่สุดออกแบบความยาวอิมิตเตอร์ให้มีขนาดครอบคลุมส่วนเบสและส่วนคอลเลกเตอร์ โดยขนาดของเบสและคอลเลกเตอร์มีขนาดเท่ากัน การออกแบบทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 4 มาส์ค ซึ่งประกอบด้วย

มาส์คที่ 1 : Emitter, Collector Mask โดยการเปิดช่องออกไซด์ และแพร่อะตอมสารเจือ โบรอน (P^+)

มาส์คที่ 2 : Base Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับเพื่อสร้างส่วน Base โดยการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (N^+)

มาส์คที่ 3 : Contact Windows Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม กับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม

มาส์คที่ 4 : Aluminum Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน เพื่อสะกัดชั้นอะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า

3.6 กระบวนการสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์

1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอน
 - แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ (100)
 - พิกัดความต้านทาน 9-11 \square -cm
 - ความหนา 400 μ m



รูปที่ 3.15 แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น

2. ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนครั้งแรก

- ต้มในกรด HNO_3 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

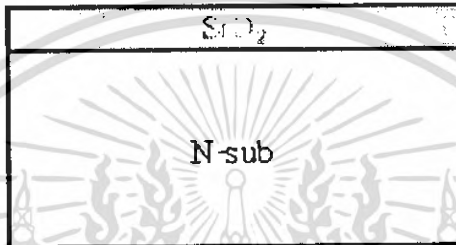
3. ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนครั้งที่ 2

- ต้มใน Trichloethylenc 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง

4. กระบวนการออกซิเดชัน

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแผ่นแล้ว วางลงบน โป๊ต (Boat) แล้วใส่เข้าไปในท่อควอตซ์คันโบ๊ตอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้แผ่นซิลิคอนแตกเพราะจะเจอกับอุณหภูมิที่สูงเกินไป

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 120 นาที
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc/min 90 นาที
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 30 นาที

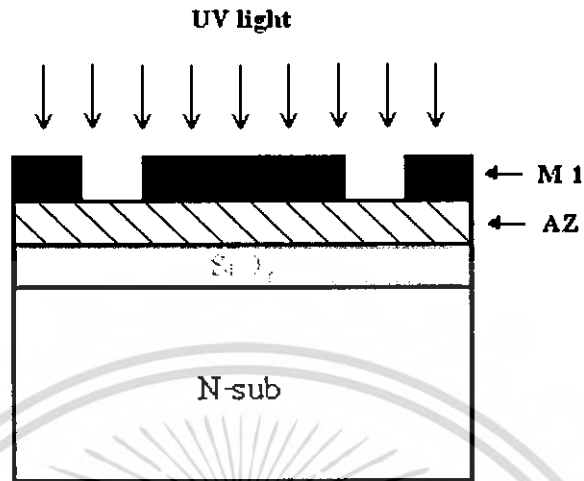


รูปที่ 3.16 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการออกซิเดชัน

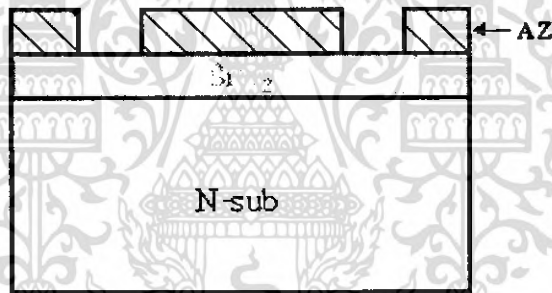
5. กระบวนการ ฟิล์มไดอิเล็กทริกที่ มาส์คที่ 1

ทำการถ่ายมาส์คไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน

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



รูปที่ 3.17 แผ่นซิลิกอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 1

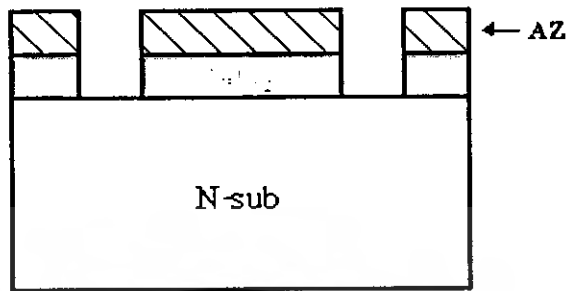


รูปที่ 3.18 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี

6. กระบวนการ Etching

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

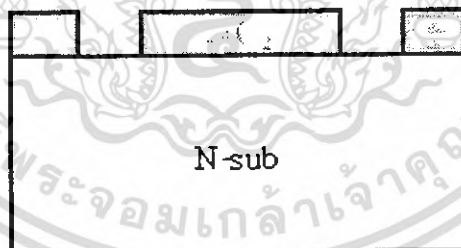
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการสกัดชั้นออกไซด์

7. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

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



รูปที่ 3.20 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

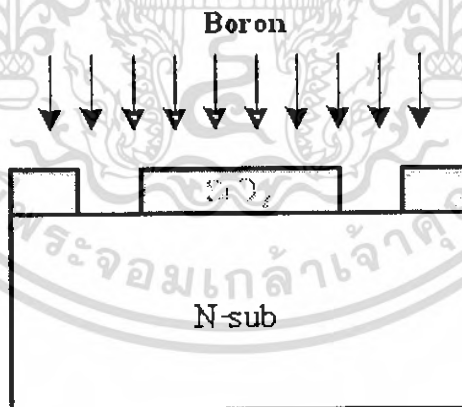
8. กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน (Diffusion)

8.1 Pre-deposition

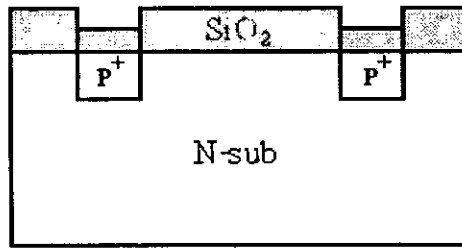
- เคลือบแผ่นด้วยโบรอนชนิดเหลว
- อบแผ่น 10 นาที ที่ 95°C
- deposit ด้วย N_2 1000 cc/min 30 นาที
- ลอกชั้น โบรอน glass
- จุ่มในสารละลาย HF 5%
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

8.2 กระบวนการ drive in (Temp 1100°C)

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



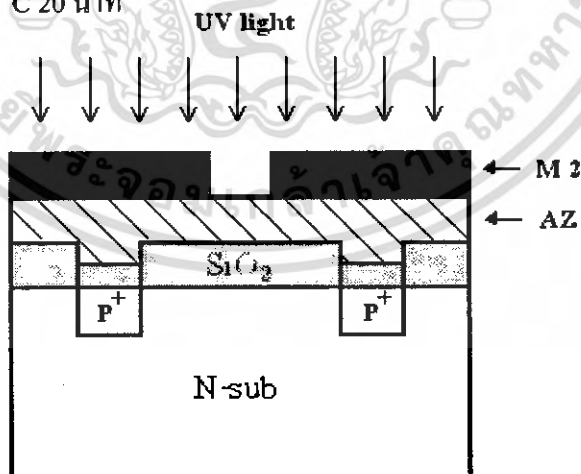
รูปที่ 3.21 แผ่นซิลิกอนขณะทำการแพร่สารเจือ



รูปที่ 3.22 แผ่นซิลิคอนหลังการ drive in

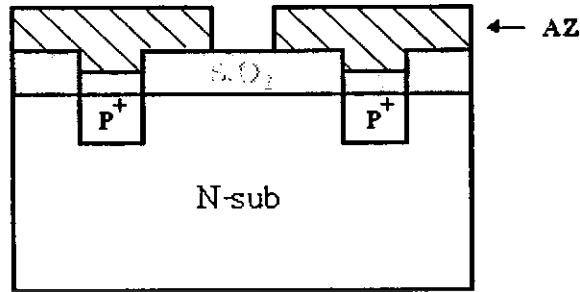
9. กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2

- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ) Spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที
- การปรับชั้นมาสค์ (Alignment (M II))
- การฉายแสง (UV Expose)
- Development
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂
- อบฟิล์มที่ 95°C 20 นาที



รูปที่ 3.23 แผ่นซิลิคอนขณะถ่ายมาสค์ที่ 2

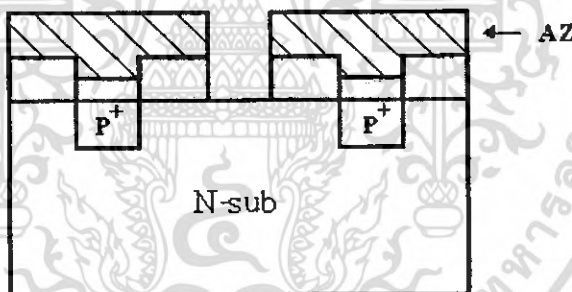
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี

10. กระบวนการ Etching

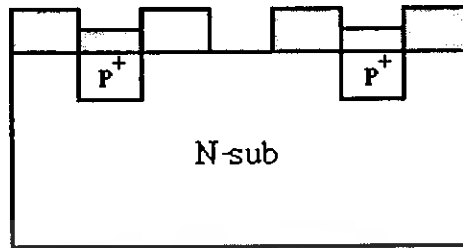
- จุ่มในน้ำสารละลาย buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 3.25 แผ่นซิลิกอนหลังกระบวนการสกัดชั้นออกไซด์

11. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

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



รูปที่ 3.26 แผ่นซิลิกอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

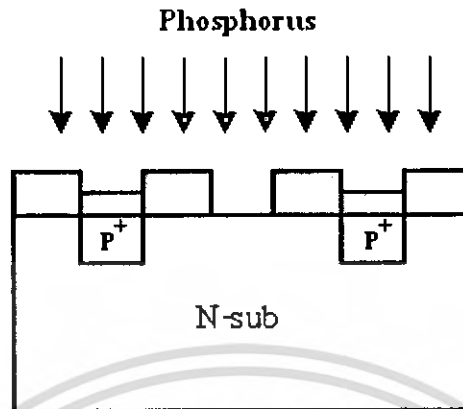
12. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (Diffusion)

12.1 Pre-deposition

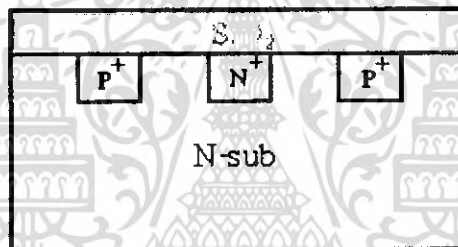
- เคลือบแผ่นด้วยฟอสฟอรัสชนิดเหลว
- อบแผ่น 10 นาที ที่ 95°C
- deposit ด้วย N_2 700 cc/min 15 นาที
- ลอกชั้น ฟอสฟอรัส glass
- จุ่มในสารละลาย HF 5%
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

12.2 กระบวนการ drive in (Temp 1100°C)

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



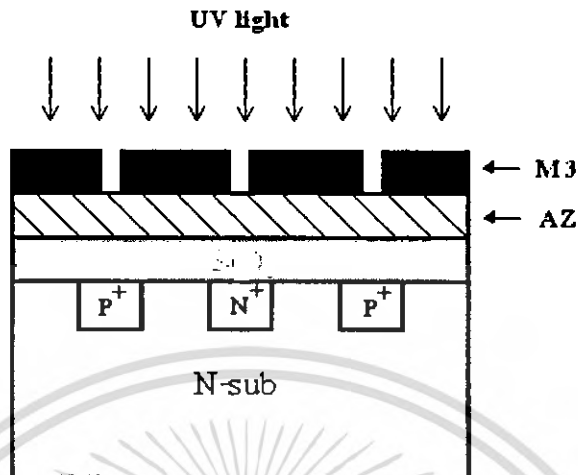
รูปที่ 3.27 แผ่นซิลิกอนขณะทำการแพร่สารเจือ



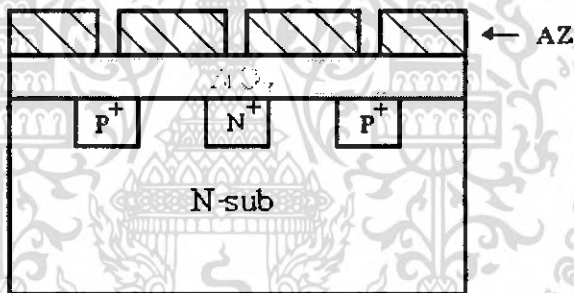
รูปที่ 3.28 แผ่นซิลิกอนหลังการ drive in

13. กระบวนการ โฟโวลติโทกราฟี มาส์คที่ 3 (contact)

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



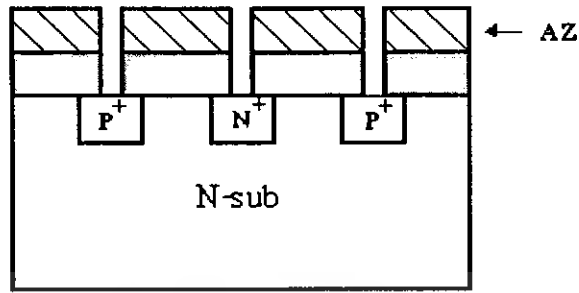
รูปที่ 3.29 แผ่นซิลิกอนขณะถ่ายมาสก์ที่ 3



รูปที่ 3.30 แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี

14. กระบวนการ Etching

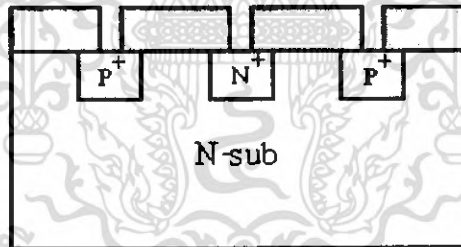
- จุ่มในน้ำสารละลาย buffer 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂



รูปที่ 3.31 แผ่นซิลิกอนหลังกระบวนการสกัดชั้นออกไซด์

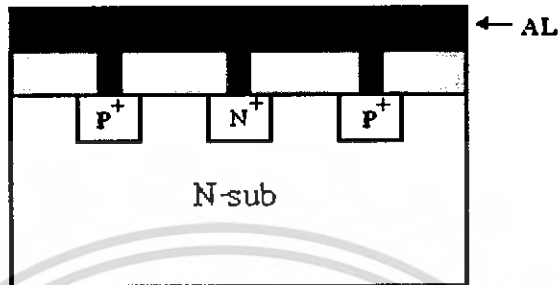
15. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

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



รูปที่ 3.32 แผ่นซิลิกอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

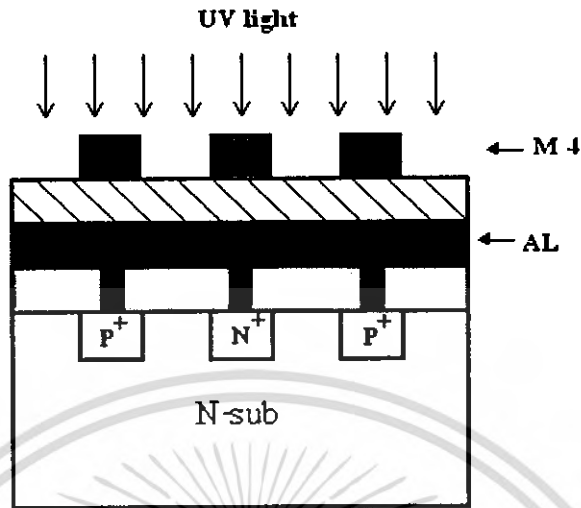
16. การเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator



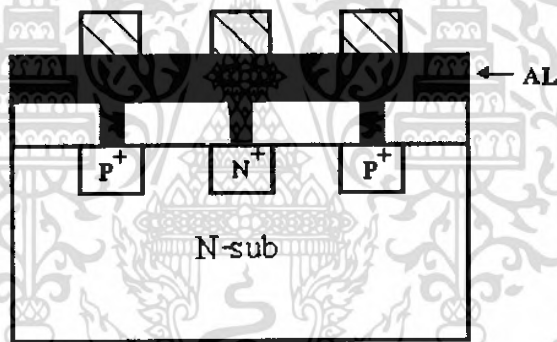
รูปที่ 3.33 แผ่นซิลิคอนหลังเคลือบอลูมิเนียม

17. กระบวนการ โฟโวลติโทกราฟี มาส์กที่ 4 (A1)

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



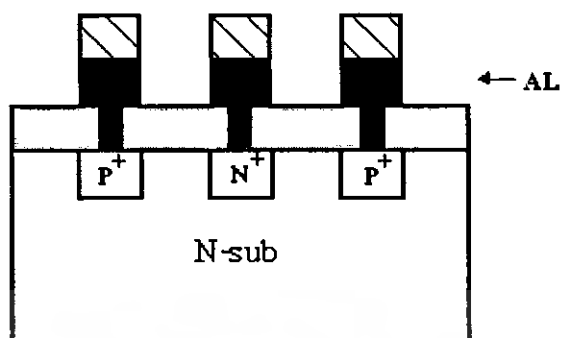
รูปที่ 3.34 แผ่นซิลิคอนขณะฉายมาสักที่ 4



รูปที่ 3.35 แผ่นซิลิคอนหลังผ่านการโฟโตลิโทกราฟี

18. กระบวนการ Etching (Al)

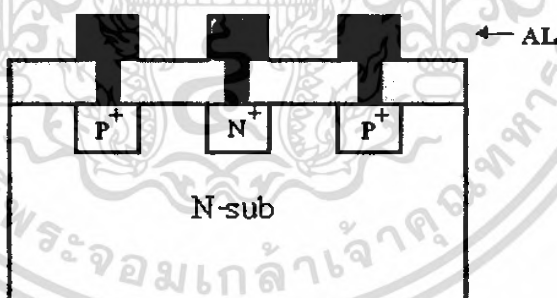
- จุ่มในน้ำสารละลาย Phosphoric Aid
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂



รูปที่ 3.36 แผ่นซิลิคอนหลังกระบวนการสกัดชั้นอลูมิเนียม

19. กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

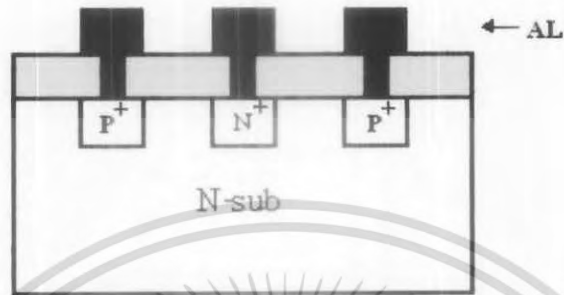
- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Asetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 3.37 แผ่นซิลิคอนหลังล้างน้ำยาไวแสง

20. Sintering

- ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 °C ในเวลา 10 นาที



รูปที่ 3.38 ขั้นตอนการสร้างแมกนีโดทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 3.39 ลักษณะของ แมกนีโดทรานซิสเตอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

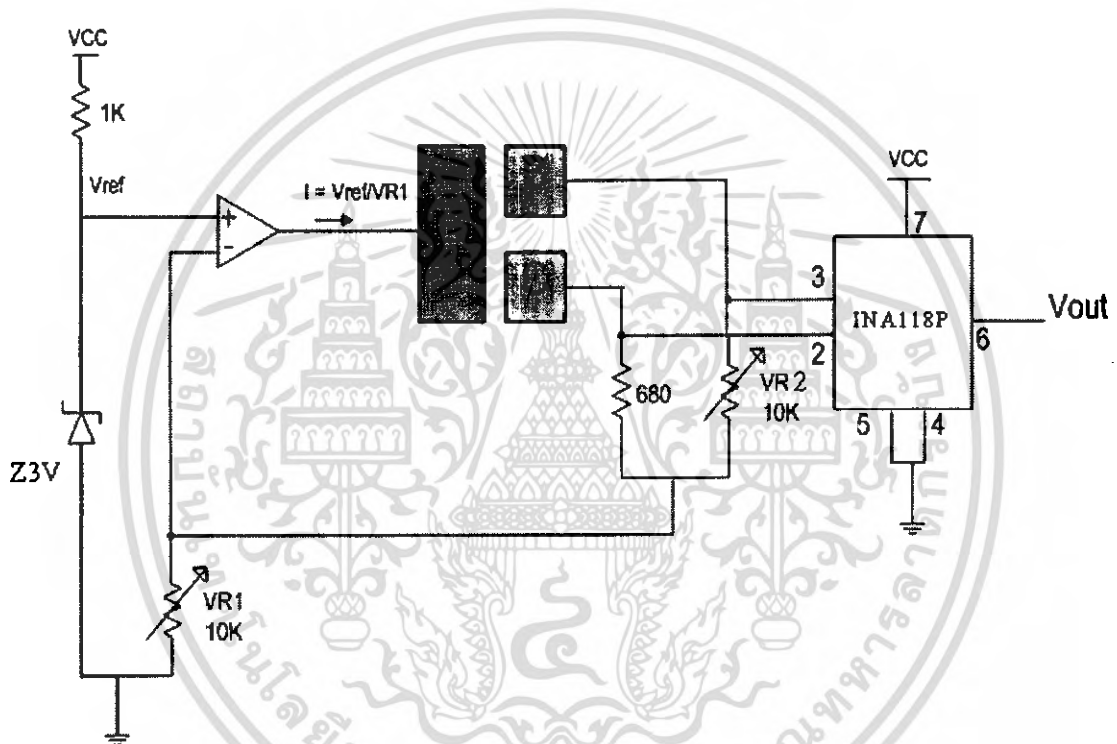
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ร่วมกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการวัดค่าของสนามแม่เหล็ก โดยแบ่งเป็นสองส่วนวงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กและส่วนแสดงผล

4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กหลัก



รูปที่ 4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

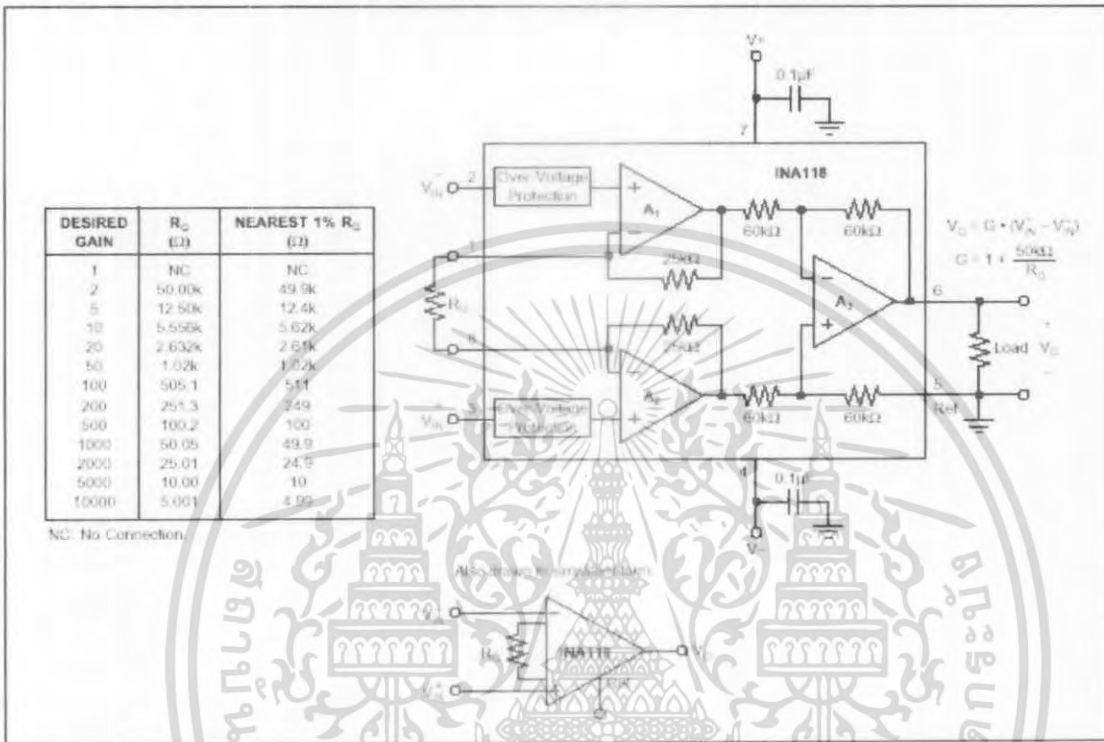
การทำงานของวงจร

จากรูปจะประกอบไปด้วยวงจรจ่ายกระแสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ และส่วนของวงจรขยายความแตกต่าง โดยออปแอมป์จะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ขา E โดยสามารถปรับค่ากระแสได้ที่ VR1 เมื่อแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำงานจะทำให้มีกระแสเบส และกระแสคอลเลกเตอร์ไหลในปริมาณที่ใกล้เคียงกันแต่สามารถปรับให้กระแสทั้งสองมีค่าเท่ากัน โดยการปรับค่า VR2 เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะทำให้กระแสที่ไหลเกิดความเปลี่ยนแปลง โดย IC INA188 จะทำหน้าที่ขยายความแตกต่างออกมาที่ Output แสดงค่าออกมาเป็นแรงดัน

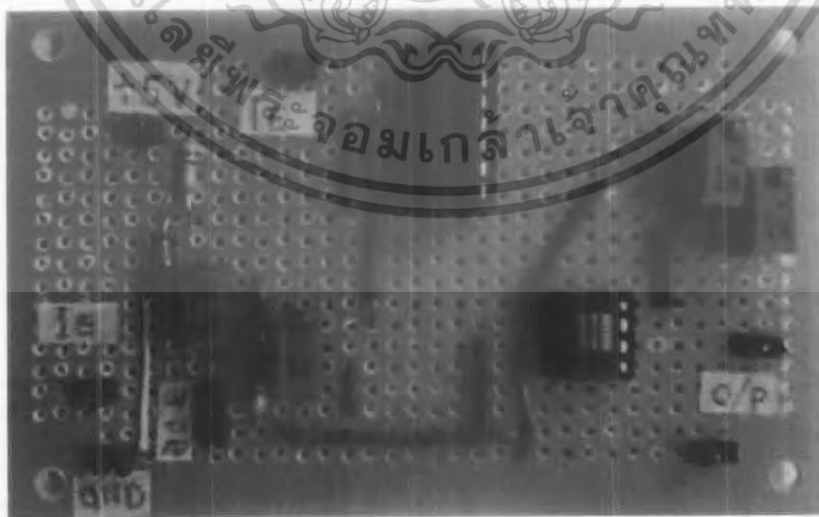
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ภาคขยาย

โดย IC INA118 ทำหน้าที่ขยายความแตกต่างระหว่าง กระแส I_b และกระแส I_c โดยต่อเข้ากับขา 3 และขา 2 ตามลำดับ และจะสามารถปรับค่าอัตราขยายของ IC ได้โดยการปรับค่าความต้านที่ต่อคร่อมระหว่างขา 1 และขา 8 ได้ตามตาราง



รูปที่ 4.2 โครงสร้างและการต่อใช้งาน



รูปที่ 4.3 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ส่วนแสดงผล

4.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งซึ่งรวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณเอาต์พุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบ ในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้น

โครงสร้างของ MCS- 51

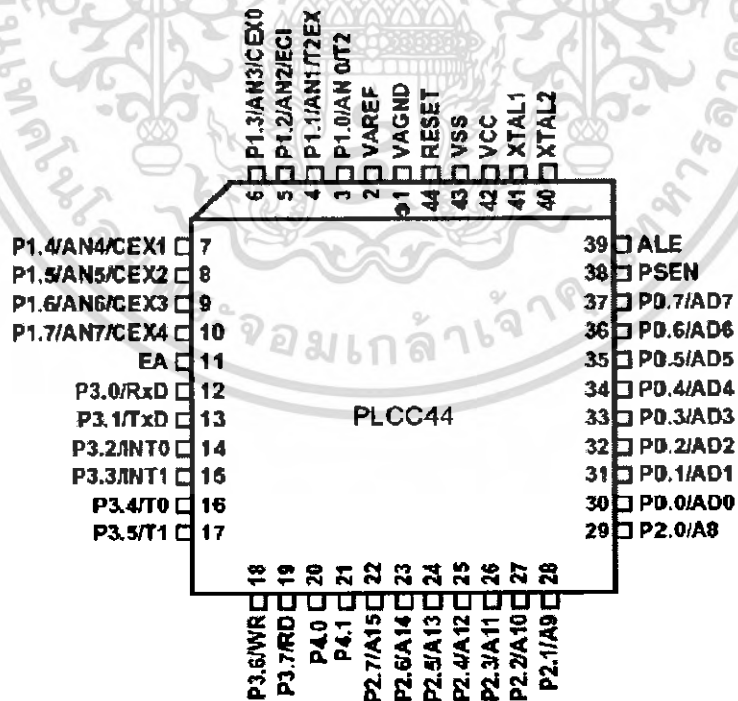
ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีด้วยกันหลายเบอร์ขึ้นกับโครงสร้างภายในของมัน บางเบอร์จะมีหน่วยความจำภายในเป็นแบบ ROM บางเบอร์เป็นแบบ EPROM บางเบอร์ RAM ภายใน 128 ไบต์ บางเบอร์มี 256 ไบต์ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดจะศึกษาได้จากคู่มือของมันโดยตรง และลักษณะของขาต่าง ๆ จะเหมือนกัน คุณสมบัติที่สำคัญของ MCS-51 มีดังนี้

- มีหน่วยความจำ ROM 4 k bytes
- มีหน่วยความจำ RAM 128 bytes
- มีพอร์ต I/O ขนาด 8 บิต 4 พอร์ต เป็นแบบสองทิศทาง สามารถใช้งานได้ทั้งอินพุตเอาต์พุต
- มี Time 16 บิต 2 ตัว
- สามารถอินเตอร์รัพท์ได้ 5 แหล่ง
- มีวงจรออสซิลเลเตอร์และวงจรรนาฬิกาบนชิพ
- สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
- มีพอร์ตอนุกรมที่สามารถรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex ความเร็วสูง
- สามารถประมวลผลทีละบิตได้
- สามารถอ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ 64 k

ตัวอย่างไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 และลักษณะต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในตารางที่ ตารางที่ 4.1 แสดงไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่าง ๆ

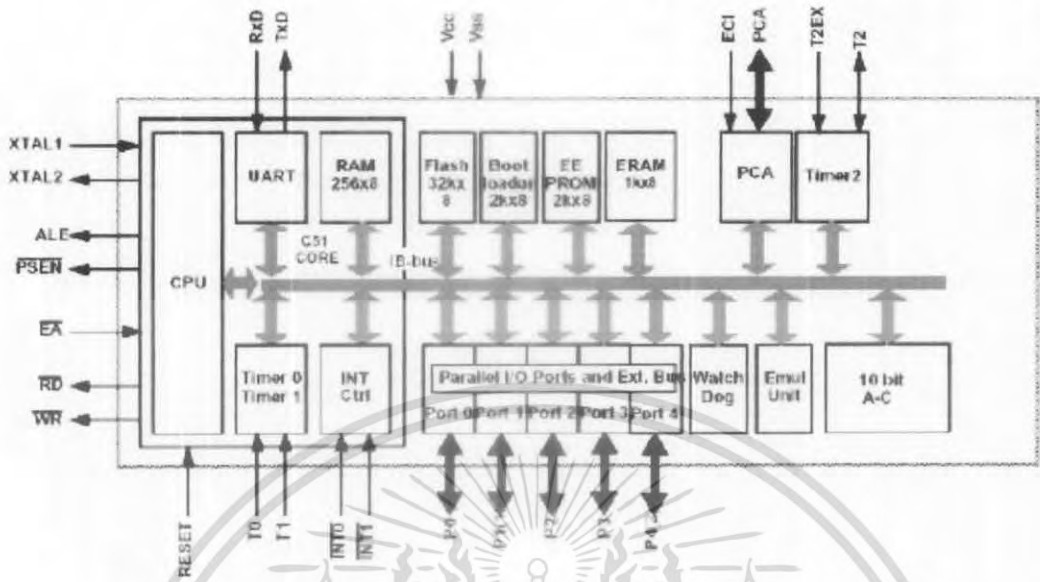
เบอร์	หน่วยความจำ โปรแกรมบนชิพ	หน่วยความจำข้อมูล บนชิพ	TIMERS
8051	4k ROM	128 bytes	2
3031	-	128 bytes	2
8751	4k EPROM	128 bytes	2
8052	8k ROM	256 bytes	3
8032	-	256 bytes	3
8752	8k EPROM	256 bytes	3
AT89C51	4K FLASH	128 bytes	2
AT89C52	8k FLASH	256 bytes	3
AT89C2051	2k FLASH	128 bytes	2

โดยในโครงการนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ T89C51AC2 ซึ่งมีขาต่อใช้งานดังนี้

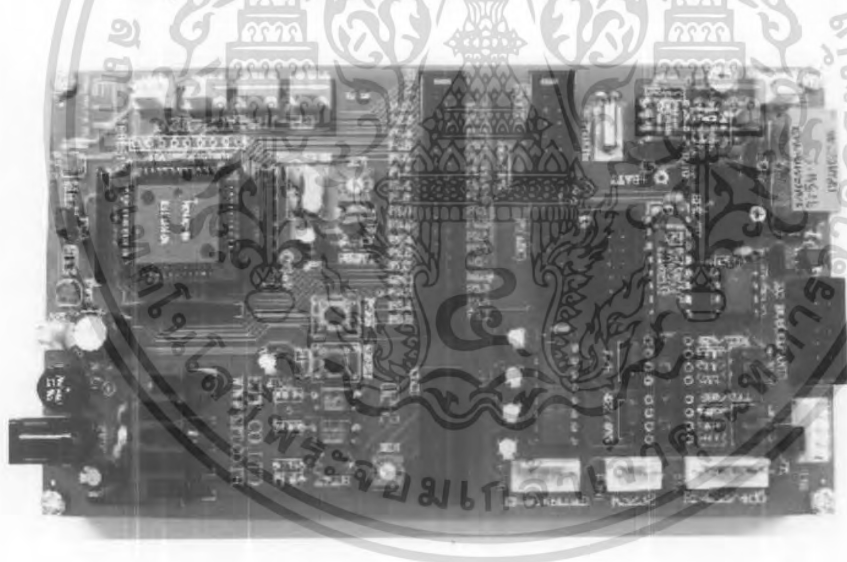


รูปที่ 4.4 แสดงการจัดขาสัญญาณของ T89C51AC2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงบล็อก โค้สแกรมของ T89C51AC2



รูปที่ 4.6 บอร์ดที่ใช้ในการทดลองไมโครคอนโทรเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดสรร I/O ของพอร์ตต่าง ๆ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชมีพอร์ตใช้งานทั้งหมด 4 พอร์ตคือ พอร์ต 0 ถึง พอร์ต 3 แต่ละพอร์ตมีขนาด 8 บิตเป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง กล่าวคือ สามารถเป็นได้ทั้งอินพุต สำหรับรับสัญญาณข้อมูลเข้า และเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณข้อมูลออก

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ T89C51AC2 จะมีขาที่สามารถนำมาใช้งานเป็น I/O พอร์ต ได้ทั้งหมด 34 เส้นประกอบด้วย

- P0 (0...7) จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- P1 (0...7) จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- P2 (0...7) จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- P3 (0...7) จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
- P4 (0...7) จำนวน 2 เส้นสัญญาณ

โดยมีการจัดสรรพอร์ตต่างให้นำไปใช้งานต่าง ได้ดังนี้

P0.0-P0.7 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้สามารถใช้งานเป็น input หรือ Output ได้ตามต้องการ โดยในบอร์ดนั้นขาสัญญาณของ P0 ทั้งหมด จะถูกเชื่อมต่อ ไปยังขั้วต่อ 34 PIN และขั้วต่อ P0 ไว้ด้วย โดยที่ P0.0-P0.6 จะต่อตรงไปยังขั้ว P0(kbi)ทั้งหมด สัญญาณ P0.7 0จะต่อไปควบคุม ลำโพง

P1.0-P1.7 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้จะสามารถใช้งานได้หลายหน้าที่ เช่น ใช้งานเป็น ADC ใช้งานเป็น Input หรือ Output และบางขายังสามารถใช้งานในหน้าที่พิเศษของระบบ Timer และ PCA ได้อีกด้วย โดยขาสัญญาณทั้งหมดจะถูกเชื่อมต่อ ไปยังขั้วต่อ 34 PIN และขั้วต่อ P1(ADC)

P2.0-P2.7 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้จะสามารถ ใช้งานได้ทั้งเป็น Input และ Output โดยขาสัญญาณทั้งหมดของ P2 จะถูกต่อไปยังขั้วต่อ 34 PIN ส่วน P2.0-P2.5 แล้วต่อไปยังขั้วต่อ CLCD เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของ LCD

P3.0 ทำหน้าที่เป็น RXD ของวงจรสื่อสารอนุกรม RS232/422/486

P3.1 ทำหน้าที่เป็น TXD ของวงจรสื่อสารอนุกรม RS232/422/485

P3.2 ใช้งานเป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา INT0

P3.3 ใช้งานเป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา INT1

P3.4 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0

P3.5 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1

P3.6 ใช้เป็นขาสัญญาณ WR ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P3.7 ใช้เป็นขาสัญญาณ RD ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P4.0 จะใช้ทำหน้าที่ติดต่อกับอุปกรณ์ I2C BUS โดยทำหน้าที่เป็น SCL

P4.1 จะใช้ทำหน้าที่ติดต่อกับอุปกรณ์ I2C BUS โดยทำหน้าที่เป็น SDA

ขา รีเซต(Reset) ใช้ในการรีเซตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซตสถานะที่ขานี้

ขา ALE เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมการแลซ์ของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำ

ขา PSEN ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก

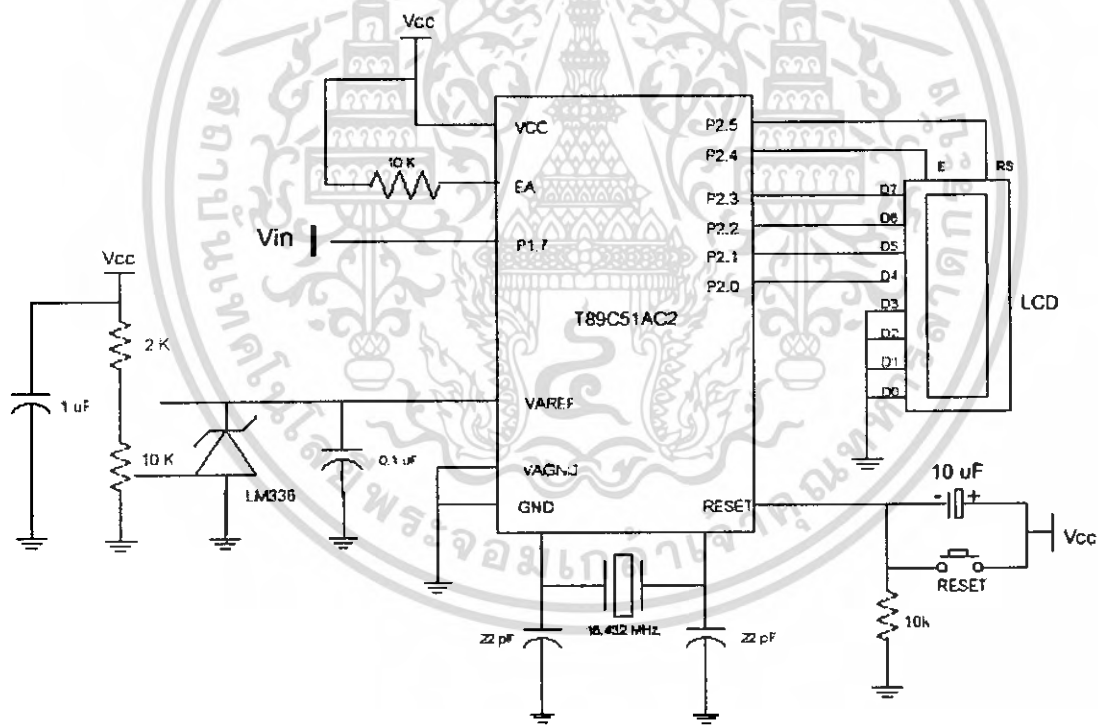
ขา EA ใช้สำหรับเลือกการติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมจากภายนอกหรือภายในตัว

ไมโครคอนโทรลเลอร์

ขา XTAL1 และขา XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตัลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการว่า

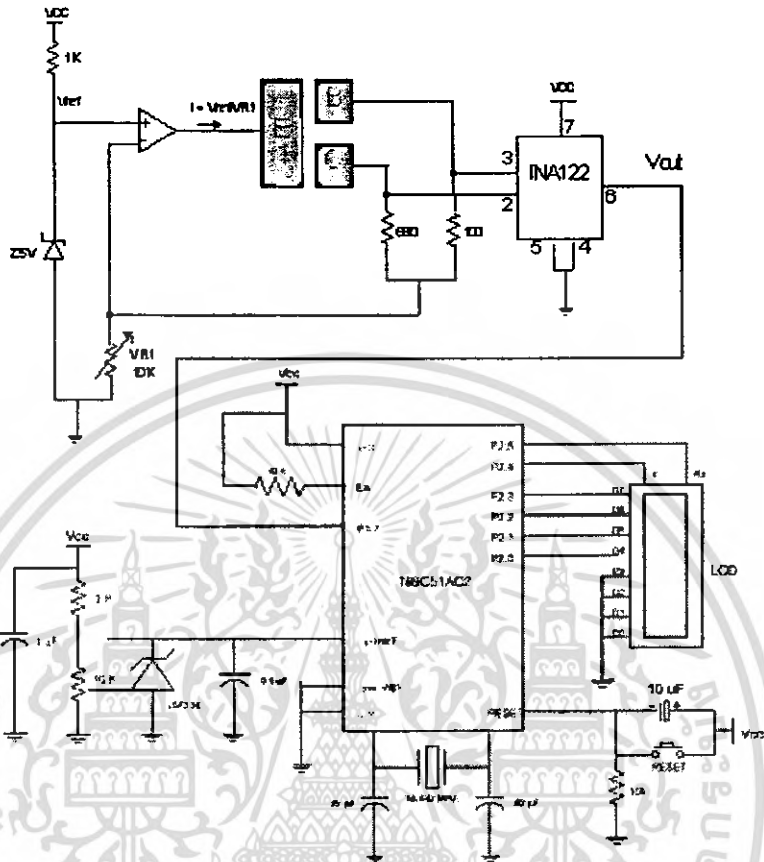
หนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับส่วนแสดงผล LCD



รูปที่ 4.7 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับจอ LCD

4.3 วงจรวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงผลออกจอ LCD



รูปที่ 4.8 วงจรวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงผลออกหน้าจอ LCD

จากรูปแสดงการเชื่อมต่อวงจรส่วนของวงจรวัดและส่วนแสดงผล โดย Output ของวงจรภาคขยายในวงจรวัดจะต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พอร์ต P1.7 ซึ่งเป็นพอร์ตใช้งาน ADC จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นดิจิทัลเพื่อส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลแล้วแสดงค่าออกมาที่หน้าจอ LCD

4.4 ชุดทดลองวัดค่าการตรวจจับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.8 ชุดทดลองวัดค่าการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้เป็นการทดลองและผลการทดลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โดยแสดงการวัดคุณสมบัติรอยต่อและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ และแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยทำการทดลองเปลี่ยนแปลงกระแสการทำงานอิมิตเตอร์และทำการเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนอีกด้วย

5.1 การวัดคุณสมบัติแมกนีโตทรานซิสเตอร์

การวัดรอยต่อพี-เอ็น

การวัดคุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นการวัดทดสอบเบื้องต้นแสดงคุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ซึ่งจากกราฟการทดลองรูปที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของรอยต่อที่ขั้วใช้งานต่างๆ



(ก) รอยต่อ B-C

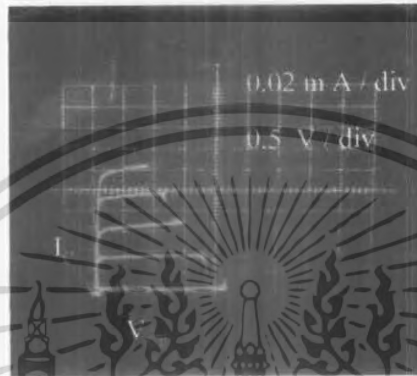
(ข) รอยต่อ B-E

รูปที่ 5.1 คุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

การวัดคุณสมบัติแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยเครื่องวัด Curve Tracer ซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ จากรูปแสดงกราฟคุณสมบัติของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ณ รอยต่อสองรอยต่อซึ่งมีอัตราขยายที่ต่ำ



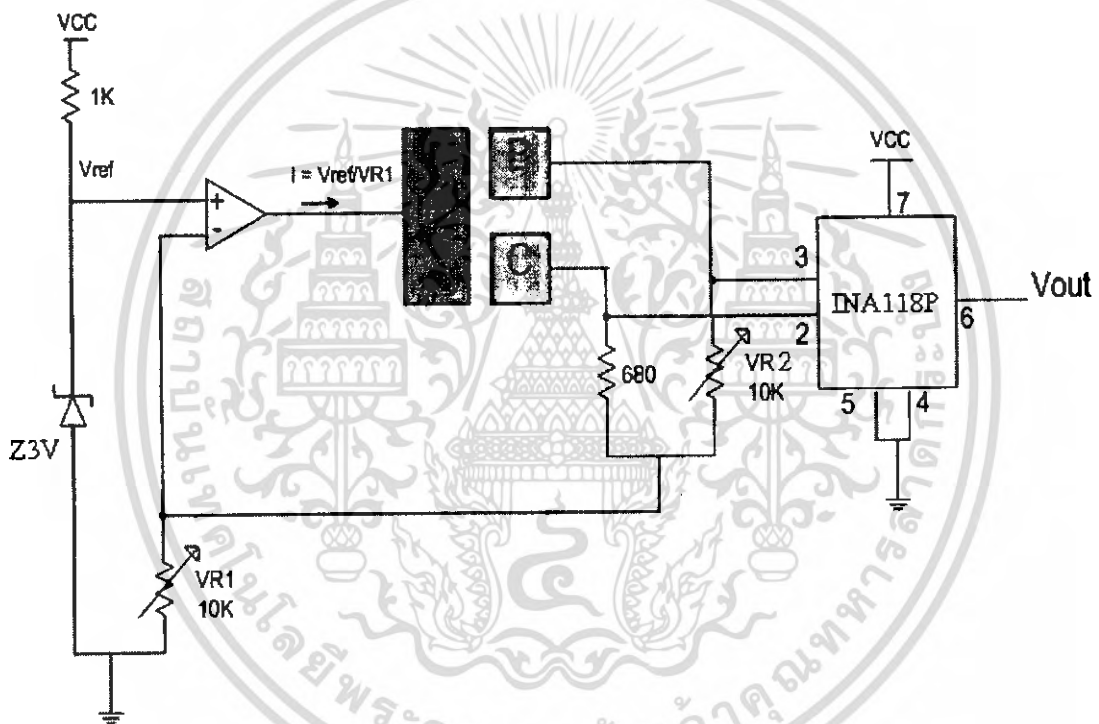
รูปที่ 5.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะสะสมคอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์ (ΔI_{cb}) กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) การทดลองจะแสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนทำการเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานต่างๆ

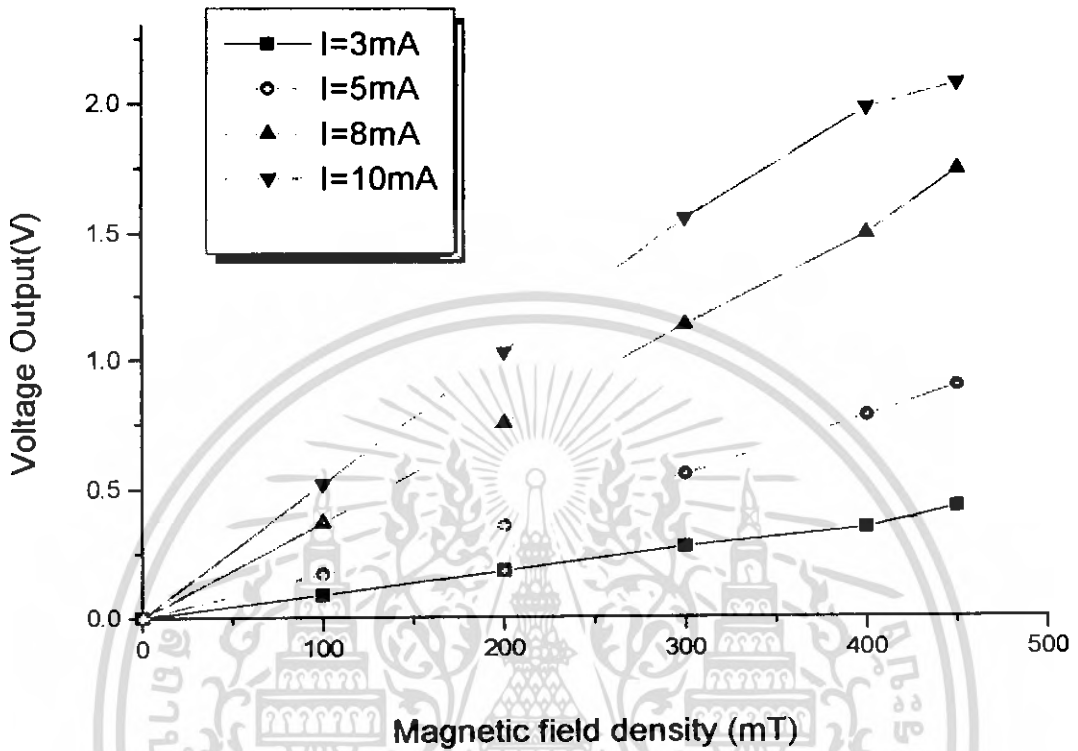
วงจรวัดการตรวจจับสนามแม่เหล็ก



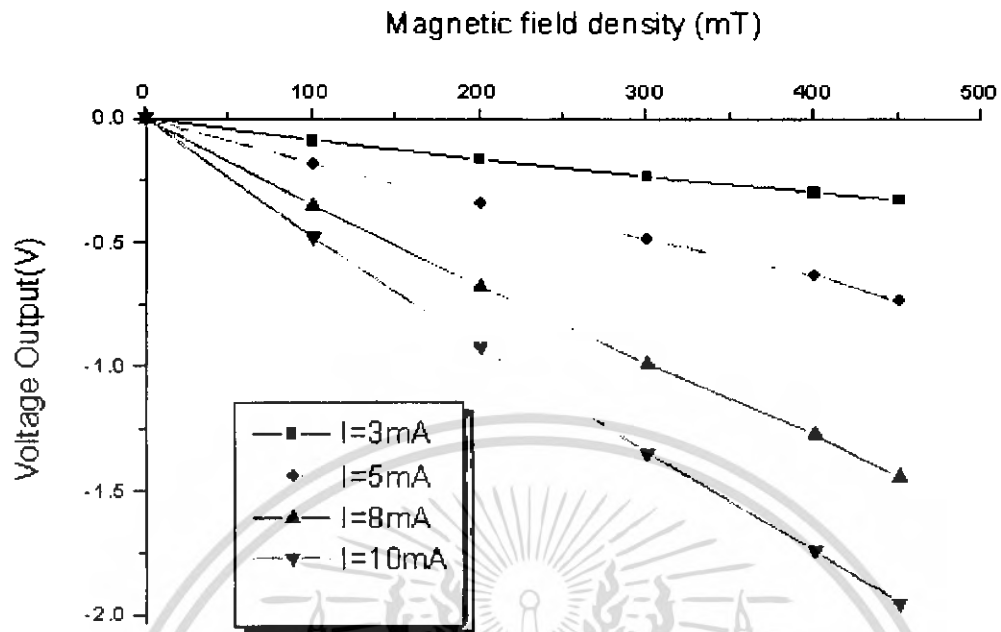
รูปที่ 5.3 วงจรการวัด ทดลองแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

จากรูปจะประกอบไปด้วยวงจรจ่ายกระแสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ และส่วนของวงจรขยายความแตกต่าง โดยออปแอมป์จะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ขา E โดยสามารถปรับค่ากระแสได้ที่ VR1 เมื่อแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำงานจะทำให้มีกระแสเบส และกระแสคอลเลกเตอร์ไหลในปริมาณที่ใกล้เคียงกันแต่สามารถปรับให้กระแสทั้งสองมีค่าเท่ากัน โดยการปรับค่า VR2 เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะทำให้กระแสที่ไหลเกิดความเปลี่ยนแปลง โดย IC INA188 จะทำหน้าที่ขยายความแตกต่างออกมาที่ Output แสดงค่าออกมาเป็นแรงดัน

5.2.1 ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง
(ด้านหน้าของอุปกรณ์)



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง (ด้านหลังของอุปกรณ์)

จากรูปที่ 5.4 แสดงกราฟการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ผลปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่กระแสคงที่ค่าหนึ่งโดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจาก (0-450)mT ผลปรากฏว่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตแปรผันตรงกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและเมื่อทำการเปรียบเทียบ ณ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกันพบว่าเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับอิมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเอาต์พุตก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากรูปค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกและลบเนื่องจากลักษณะการวางอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ต่างกัน

รูปที่ 5.5 แสดงกราฟการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ผลปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่กระแสคงที่ค่าหนึ่งโดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจาก (0-450)mT ผลปรากฏว่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตแปรผกผันกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและเมื่อทำการเปรียบเทียบ ณ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกันพบว่าเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับอิมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลง

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ในทิศทางแนวตั้ง

ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 3 \text{ mA}, 5 \text{ mA}, 8 \text{ mA}$ และ 10 mA สามารถคำนวณค่าความไวตามสมการ $S_A = \Delta V / \Delta B_z$ จากผลการทดลองรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นได้ แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้โดยอาศัยกลไกความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection)

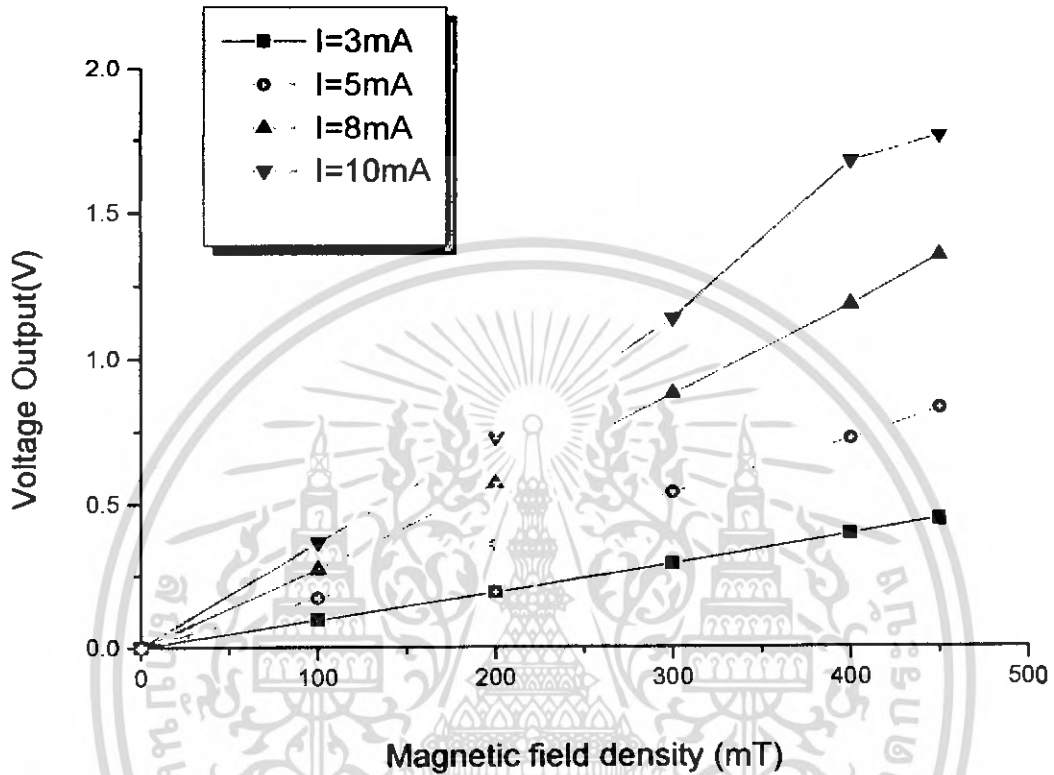
ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (ด้านหน้าของอุปกรณ์) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

I_E (mA)	$I_E = 3 \text{ mA}$	$I_E = 5 \text{ mA}$	$I_E = 8 \text{ mA}$	$I_E = 10 \text{ mA}$
S (V/T)	0.87	1.95	3.74	4.97

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (ด้านหลังของอุปกรณ์) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

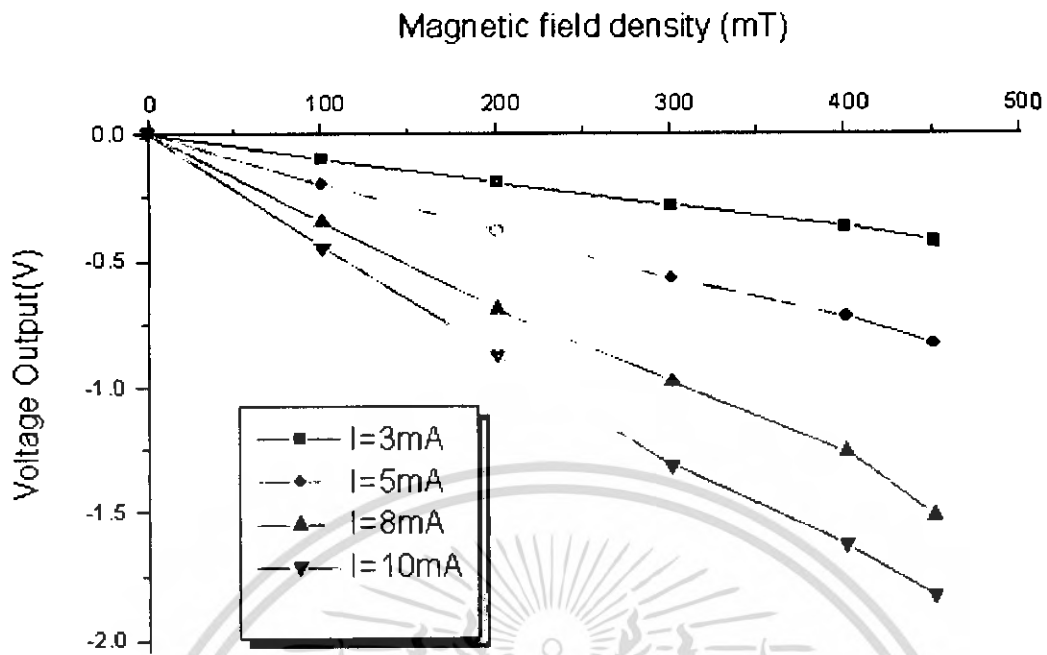
I_E (mA)	$I_E = 3 \text{ mA}$	$I_E = 5 \text{ mA}$	$I_E = 8 \text{ mA}$	$I_E = 10 \text{ mA}$
S (V/T)	0.75	1.60	3.21	4.38

5.2.2 ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน
(อุปกรณ์ตะแคงทางด้านขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน (อุปกรณ์ตะแคงทางด้านซ้าย)

จากรูปที่ 5.6 แสดงกราฟการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ผลปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่กระแสคงที่ค่าหนึ่ง โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจาก (0-450)mT ผลปรากฏว่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตแปรผันตรงกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและเมื่อทำการเปรียบเทียบ ณ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกันพบว่าเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับอิมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเอาต์พุตก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

รูปที่ 5.7 แสดงกราฟการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาผลปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่กระแสคงที่ค่าหนึ่ง โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจาก (0-450)mT ผลปรากฏว่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตแปรผันกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและเมื่อทำการเปรียบเทียบ ณ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกันพบว่าเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับอิมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเอาต์พุตก็จะมีค่าลดลง

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ในทิศทางแนวนอน

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 3 \text{ mA}$, $I_E = 5 \text{ mA}$, 8 mA และ 10 mA โดยสามารถคำนวณค่าความไวจากสมการ $S \text{ (V/T)}$ การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนอาศัยความแตกต่างระหว่างพาะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์ (ΔI_{cb}) แรงลอเรนซ์เกิดในทิศทาง $-z$ ทำให้พาะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์สามารถวิเคราะห์จากการทำงานตามสมการเดียวกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอน(ตะแคงด้านขวา)ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

$I_E \text{ (mA)}$	$I_E = 3 \text{ mA}$	$I_E = 5 \text{ mA}$	$I_E = 8 \text{ mA}$	$I_E = 10 \text{ mA}$
$S \text{ (V/T)}$	0.985	1.82	2.97	4.2

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอน(ตะแคงด้านซ้าย)ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

$I_E \text{ (mA)}$	$I_E = 3 \text{ mA}$	$I_E = 5 \text{ mA}$	$I_E = 8 \text{ mA}$	$I_E = 10 \text{ mA}$
$S \text{ (V/T)}$	0.92	1.82	3.17	4.1

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงสามารถสรุปได้แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่มีทิศทางการตรวจจับในทิศทางแนวนอนมีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กดีกว่าการตรวจจับในทิศทางแนวตั้ง

บทที่ 6

สรุปผล

โครงการนี้เป็นการศึกษาหลักการของ ปรากฎการณ์ฮอล์ล ซึ่งเป็นหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์หลักการดังกล่าวทำให้ทราบว่าตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ที่เกิดจากการกระทำของแรงลอเรนซ์อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก โดยมีทิศทางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของกระแสโดยแรงลอเรนซ์จะกระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเบี่ยงเบนซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสองนั่นเอง

นอกจากนี้ได้ศึกษาขบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนรวมถึงการออกแบบวงจรเพื่อสร้างเป็นชุดทดลองและนำไปใช้ร่วมกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยวงจรที่ออกแบบประกอบด้วยส่วนของวงจรจ่ายกระแสคงที่ ส่วนของวงจรขยายสัญญาณ และส่วนแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม

โครงการนี้ทำให้ทราบว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้จริงโดยผลการทดลองพบว่าลักษณะการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง ณ ค่าความเข้มและกระแสที่เท่ากันกับการตรวจจับทางแนวนอนจะให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตที่มากกว่าหรือตรวจจับได้ดีกว่านั่นเอง นอกจากนี้ค่ากระแสที่จ่ายให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ยังส่งผลต่อค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตอีกด้วยกล่าวคือแรงดันทางด้านเอาต์พุตแปรผันตรงกับกระแสที่จ่ายให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์นอกจากนี้สามารถนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์ไปวัดหาขั้วของสนามแม่เหล็กได้อีกด้วยซึ่งขั้วได้จะให้ค่าแรงดันที่วัดได้มากกว่าขั้วเหนือ



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน

Properties of Si at 300 K	
Properties	Si
Atoms/cm ³	5.0×10^{22}
Atomic weight	28.09
Breakdown field, V/cm	$\sim 3 \times 10^5$
Crystal Structure	Diamond
Density, g/cm ³	2.328
Distance between neighboring atoms, nm	0.2328
Effective density of states	
Valence band, cm ⁻³	1.04×10^{19}
Conduction band, cm ⁻³	2.8×10^{19}
Effective mass, m /m ₀	
Electron	$m_e^* = 0.98$
	$m_e^* = 0.19$
Holes	$m_h^* = 0.16$
	$m_h^* = 0.49$
Electron affinity, V	4.05
Energy gap, eV	1.12
Index of refraction	3.42
Intrinsic carrier concentration, cm ⁻³	1.45×10^{10}
Intrinsic Debye length, μm	24
Intrinsic resistivity, W-cm	2.3×10^5
Lattice constant, nm	0.5431
Linear coefficient of thermal expansion, cm/(cm-K)	2.6×10^{-6}
Melting point, °C	1415
Minority-carrier lifetime, s	2.5×10^{-3}
Mobility, cm ² /(V.s)	
Properties	Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electron	1500
Holes	475
Optical phonon energy, eV	0.063
Phonon mean free path, nm	7.6 (electron) 5.5 (hole)
Poisson's ratio	0.42
Relative permittivity	11.9
Specific heat, J/(g.K)	0.7
Thermal conductivity, W/(cm.K)	1.5
Thermal diffusivity, cm ² /s	0.9
vapor pressure, Pa	1 at 1659 °C 10 ⁻⁶ at 900°C
Young's modulus, g/cm	1.089×10 ⁹

2. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอนไดออกไซด์

Properties of SiO ₂ at 300 K	
Properties	SiO ₂
Density, g/cm ³	2.2
DC resistivity, μm.cm	10 ¹⁴ -10 ¹⁶
Dielectric strength, V/cm	~10 ⁷
Energy gap, eV	9
Infrared absorption band, μm	9.3
Melting point, °C	~1600
Refraction index	1.46
Relative permittivity (dielectric constant)	3.9
Structure	Amorphous
Thermal expansion coefficient, K ⁻¹	5×10 ⁻⁷
Thermal conductivity, W/(cm.K)	0.014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมใช้งาน

```
// LCD 4 BIT : Show MT in disply
#pragma code
#include <reg51.h>
#include <string.h>

unsigned int value__converted=0x00;
unsigned int value_AN7=0x00; /* converted AN7 value */
bit end_of_conversion=0;
unsigned int output=0x00;

sfr ADCON = 0xF3;
sfr ADDH = 0xF5;
sfr ADDL = 0xF4;

sbit zero = P2^6;
sbit en_lcd = P2^4;
sbit rs_lcd = P2^5;
sbit d4_lcd = P2^0;
sbit d5_lcd = P2^1;
sbit d6_lcd = P2^2;
sbit d7_lcd = P2^3;

void Delay_lcd (int time);
void enable_lcd (void);
void initial (void);
void address (unsigned char ad);
void write_cmd (unsigned char cmd);
void write_data (unsigned char dat);
void write_str (unsigned char *str);
void refresh (void);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void write_int (int value1);
void fre_count();
unsigned int time = 0;
unsigned int value,i,value1;

void main (void)
{
Delay_lcd(2);
initial ();
address (0x00);
write_str ("Output=");
address (0x40);
write_str ("  mT");
address (0x41);
write_int(output);
Delay_lcd (2);

/* configure channel P1.7(AN7)*/

ADCON = 0xC0;
ADCON = 0x20;

while (1)
{
{
ADCON &= 0xF8;           // Select channel
ADCON |= 0x07;           // Start conversion in standard mode
ADCON |= 0x08;           // Wait flag End of conversion
while((ADCON & 0x01)!= 0x01) // Clear the End of conversion flag
ADCON &= 0xEF;           // read the value

ADCON &= ~0x10;         /* Clear the End of conversion flag */
}
}

```

```

value_converted = ADDH<<2;      /* save 8 msb bits */
value_converted |= (ADDL & 0x03); /* save 2 lsb bits */
end_of_conversion=1;           /* set flag */
while(!end_of_conversion);     /* wait end of conversion */
end_of_conversion=0;          /* clear software flag */

value_AN7 = value_converted;    /* save converted value */

```

```

////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// output show on LCD //////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

```

```

output = value_AN7;
if (output<=503)
{
address (0x41);
output = 0x00;
write_int (output);
Delay_lcd (2);
}

else
{
output = 1.173*output;
output = output - 591.192;
address (0x41);
write_int (output);
Delay_lcd (2);
}

```

TH0 = -value_AN7 ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
TL0 = -value_AN7;
```

```
TR0=1;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
// Sub Program of LCD module //
```

```
void write_int (int value1)
```

```
{
```

```
write_data ((value1%10000)/1000+0x30);
```

```
write_data ((value1%1000)/100+0x30);
```

```
write_data ((value1%100)/10+0x30);
```

```
write_data ((value1%10)+0x30);
```

```
}
```

```
void address (unsigned char ad)
```

```
{
```

```
ad = ad | 0x80;
```

```
write_cmd (ad);
```

```
}
```

```
void initial (void)
```

```
{
```

```
en_lcd = 1; //set bit P2.4
```

```
rs_lcd = 0; //clear bit P2.5
```

```
write_cmd (0x33);
```

```
write_cmd (0x32);
```

```
write_cmd (0x28);
```

```
write_cmd (0x0c);
```

```
write_cmd (0x06);
```

```

write_cmd (0x01);
}

void write_str (unsigned char dat[])
{
char i,count;
count = 16;
for (i=0; i<count; i++)
{
write_data (dat[i]);
}
}

void write_data (unsigned char dat)
{
rs_lcd = 1;           //set bit P2.5

P2 = (P2 & 0xf0)|((dat & 0xf0)>>4); /* Send Hi-nibble */
enable_lcd();

P2 = (P2 & 0xf0)|(dat & 0x0f); /* Send Lo-nibble */
enable_lcd();
Delay_lcd (10);
}

void write_cmd (unsigned char cmd)
{
rs_lcd = 0;          // clear bit P2.5

P2 = (P2 & 0xf0)|((cmd & 0xf0)>>4); /* Send Hi-nibble */
enable_lcd();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
P2 = (P2 & 0xf0)|(cmd & 0x0f); /* Send Lo-nibble */
```

```
enable_lcd();
```

```
Delay_lcd (10);
```

```
}
```

```
void refresh (void)
```

```
{
```

```
write_cmd (0x0c);
```

```
}
```

```
void enable_lcd (void)
```

```
{
```

```
en_lcd = 0; /* (P2.4=0 E) */
```

```
Delay_lcd (2);
```

```
en_lcd = 1; /* (P2.4=1 E) */
```

```
}
```

```
void Delay_lcd (int time)
```

```
{
```

```
unsigned int loops,inloops;
```

```
for (loops = 0; loops<time; loops++)
```

```
{
```

```
for (inloops = 0; inloops <100; inloops++);
```

```
}
```

```
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



INA118

Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

- LOW OFFSET VOLTAGE: 50 μ V max
- LOW DRIFT: 0.5 μ V/ $^{\circ}$ C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 5nA max
- HIGH CMR: 110dB min
- INPUTS PROTECTED TO \pm 40V
- WIDE SUPPLY RANGE: \pm 1.35 to \pm 18V
- LOW QUIESCENT CURRENT: 350 μ A
- 8-PIN PLASTIC DIP, SO-8

APPLICATIONS

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

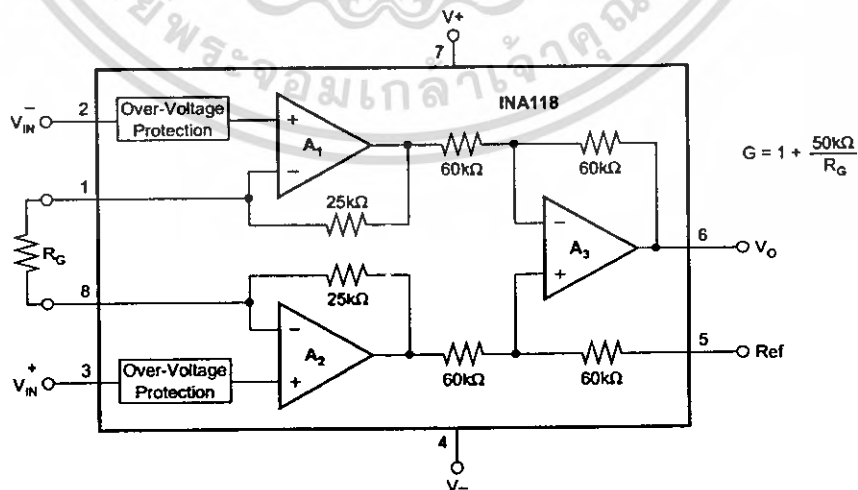
DESCRIPTION

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

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

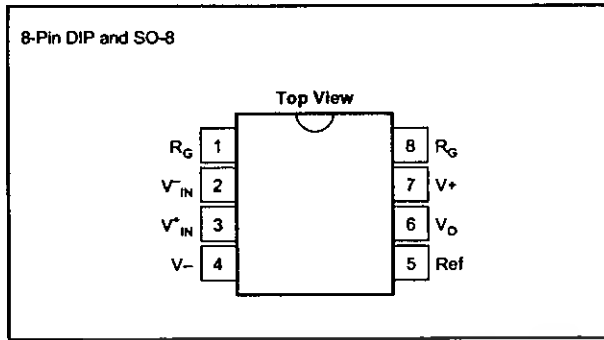
The INA118 is laser trimmed for very low offset voltage (50 μ V), drift (0.5 μ V/ $^{\circ}$ C) and high common-mode rejection (110dB at $G = 1000$). It operates with power supplies as low as \pm 1.35V, and quiescent current is only 350 μ A—ideal for battery operated systems.

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



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

PIN CONFIGURATION



ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

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

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

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

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

ORDERING INFORMATION

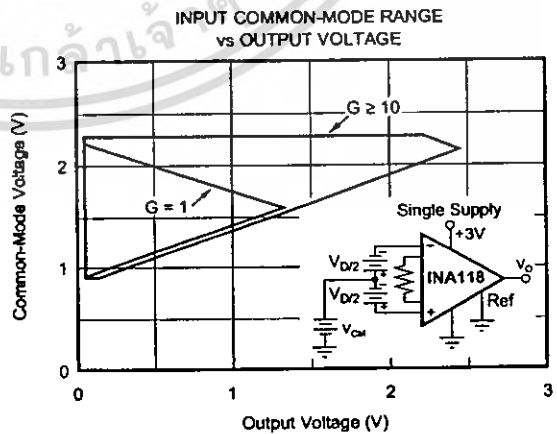
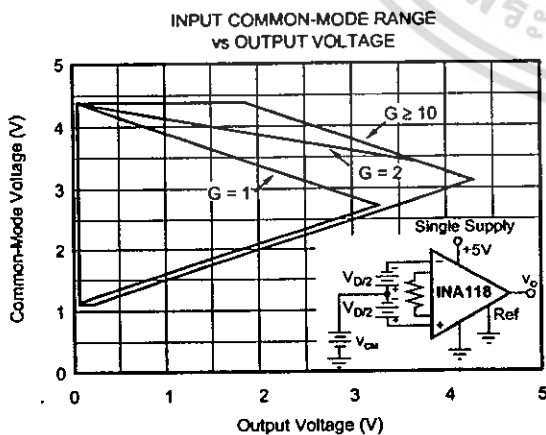
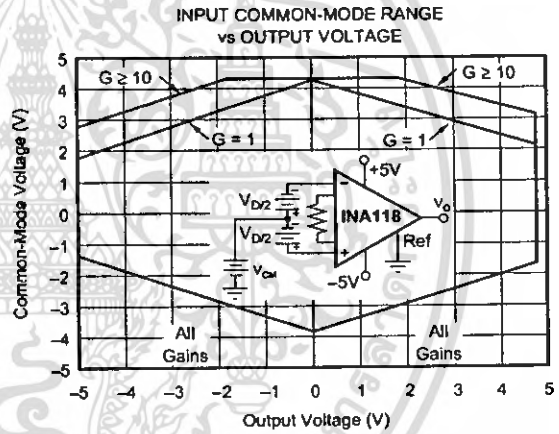
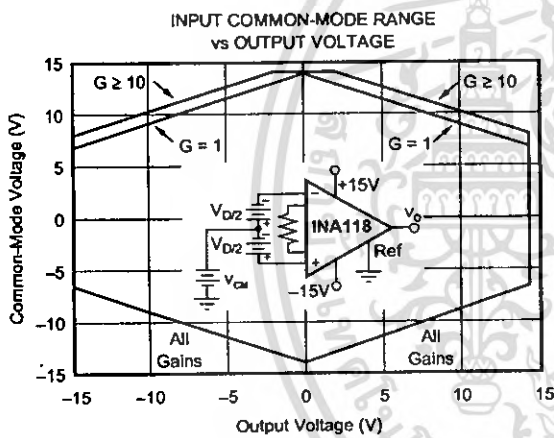
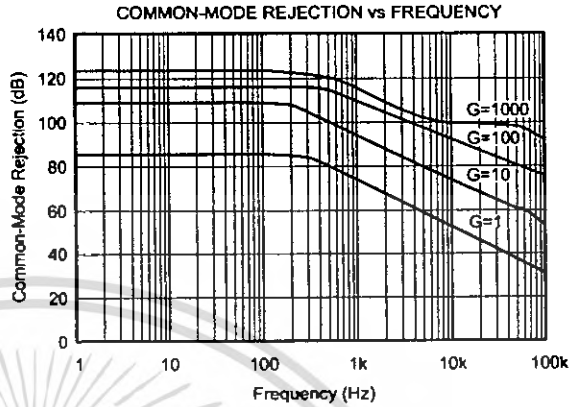
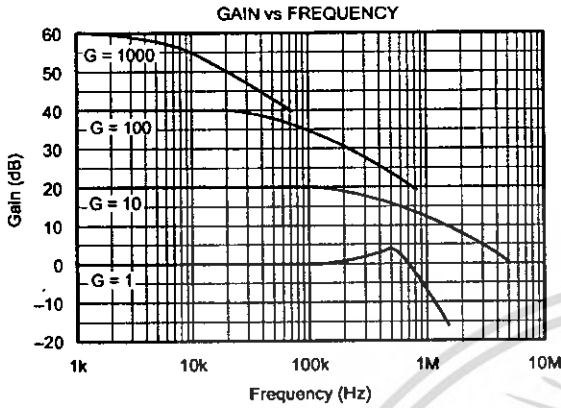
PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER ⁽¹⁾	TEMPERATURE RANGE
INA118P	8-Pin Plastic DIP	006	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA118PB	8-Pin Plastic DIP	006	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA118U	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA118UB	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^{\circ}C$ to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

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

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

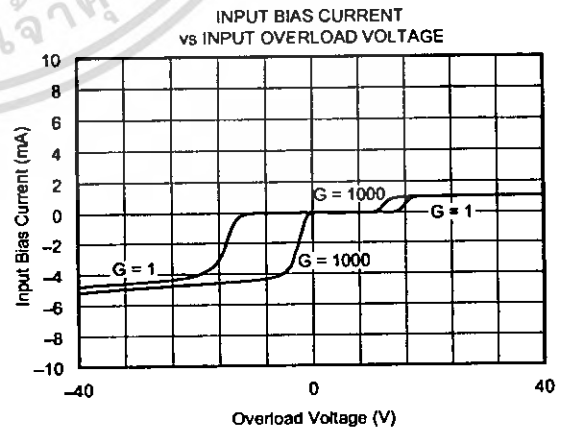
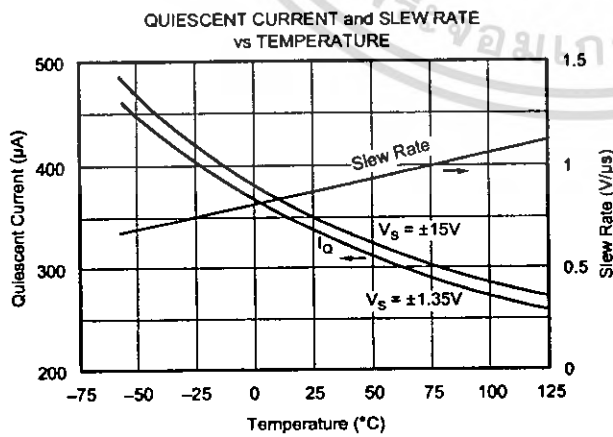
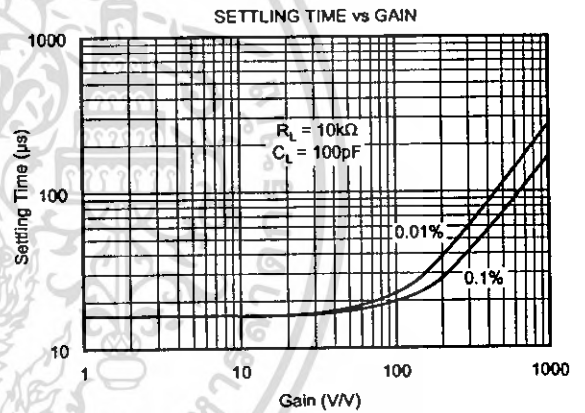
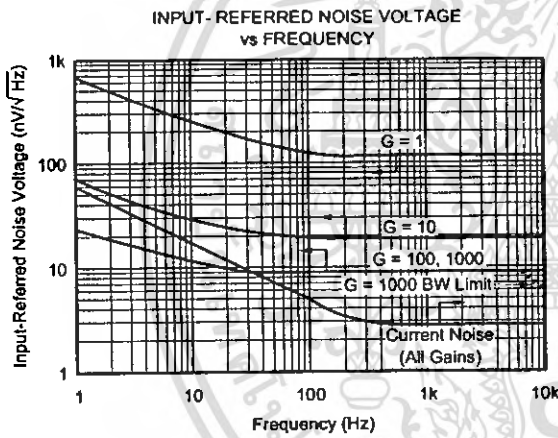
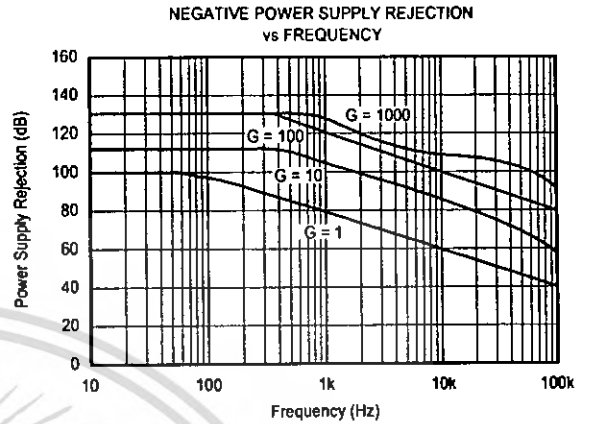
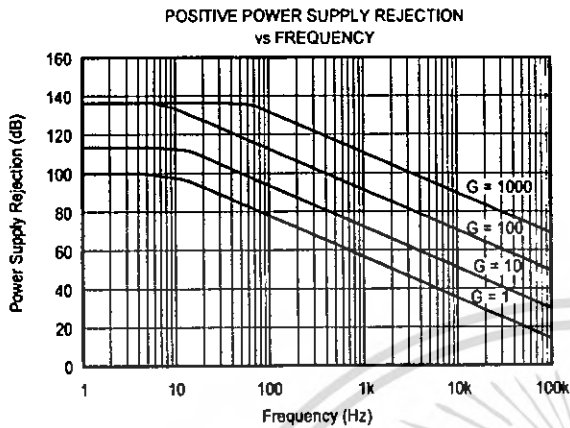
TYPICAL PERFORMANCE CURVES

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



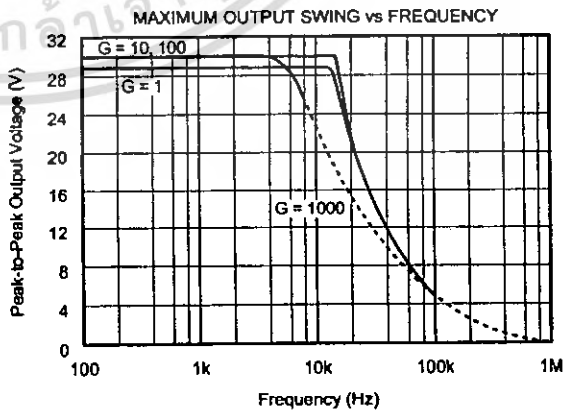
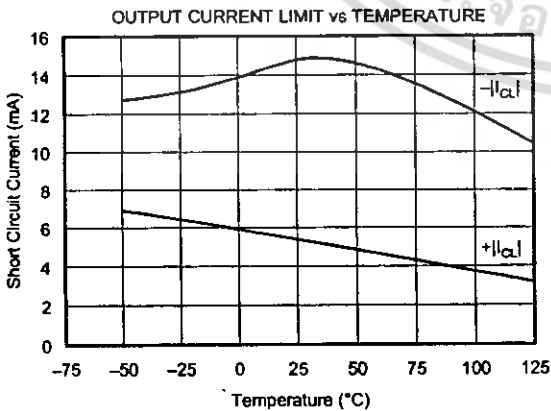
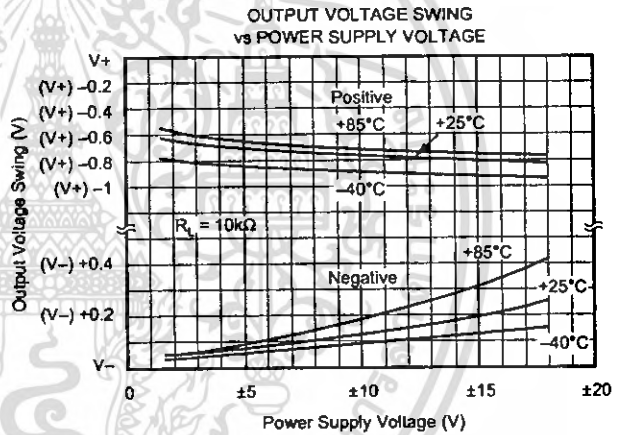
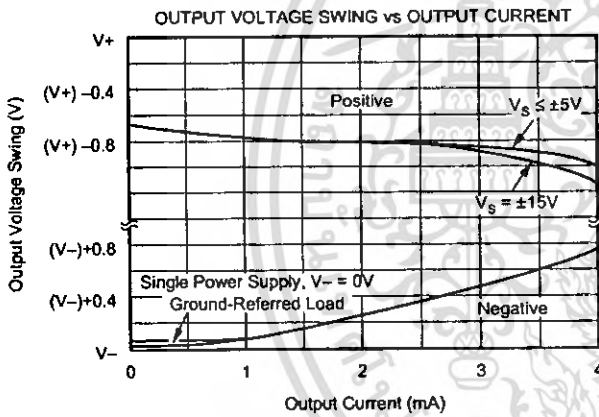
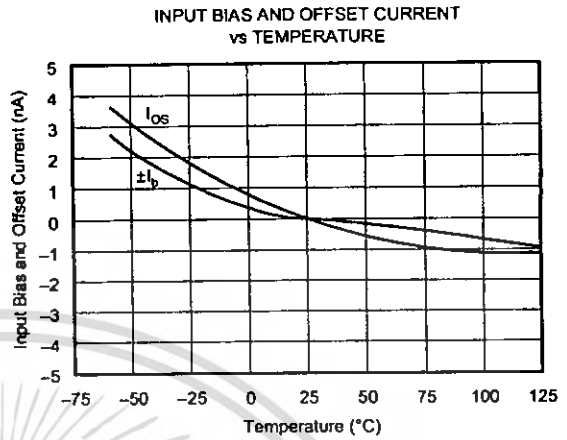
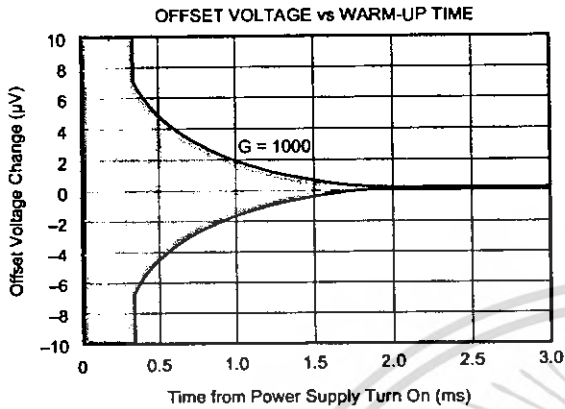
TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

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



TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

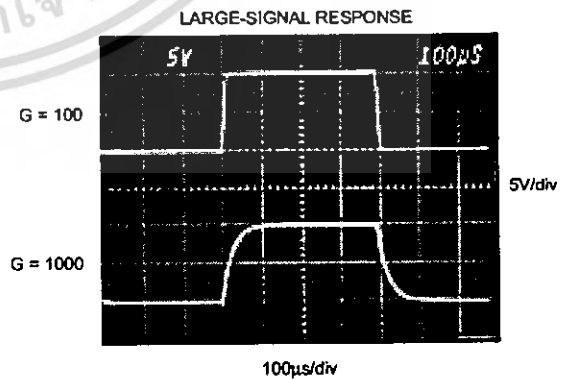
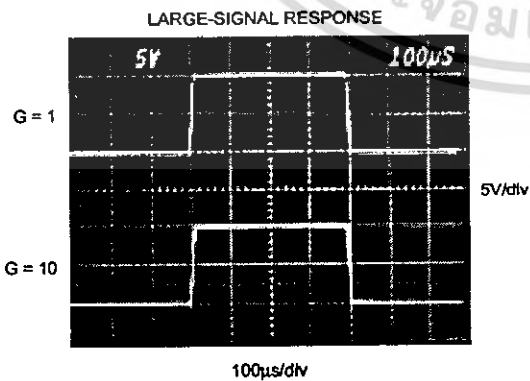
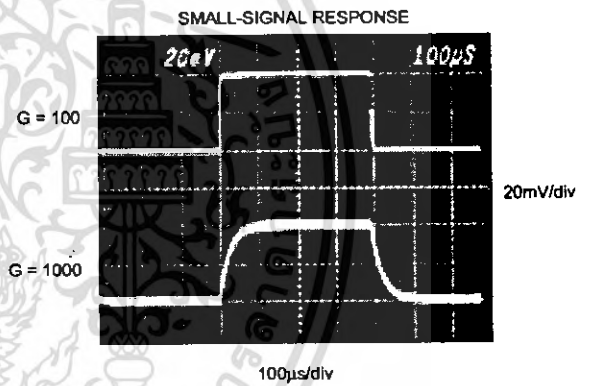
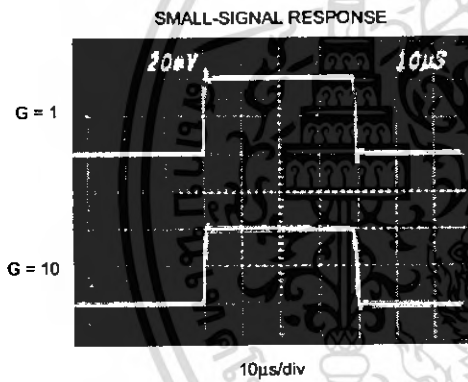
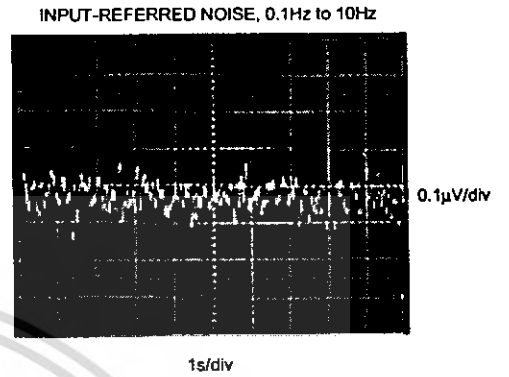
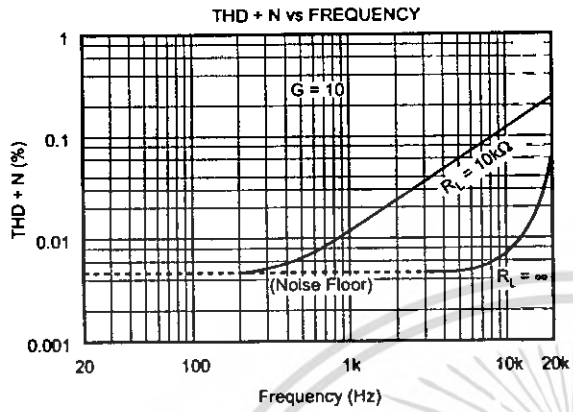
At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.



INA118

TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

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



APPLICATION INFORMATION

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

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

SETTING THE GAIN

Gain of the INA118 is set by connecting a single external resistor, R_G , connected between pins 1 and 8:

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

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

The 50kΩ term in Equation 1 comes from the sum of the two internal feedback resistors of A_1 and A_2 . These on-chip metal film resistors are laser trimmed to accurate absolute values. The accuracy and temperature coefficient of these resistors are included in the gain accuracy and drift specifications of the INA118.

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

DYNAMIC PERFORMANCE

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

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

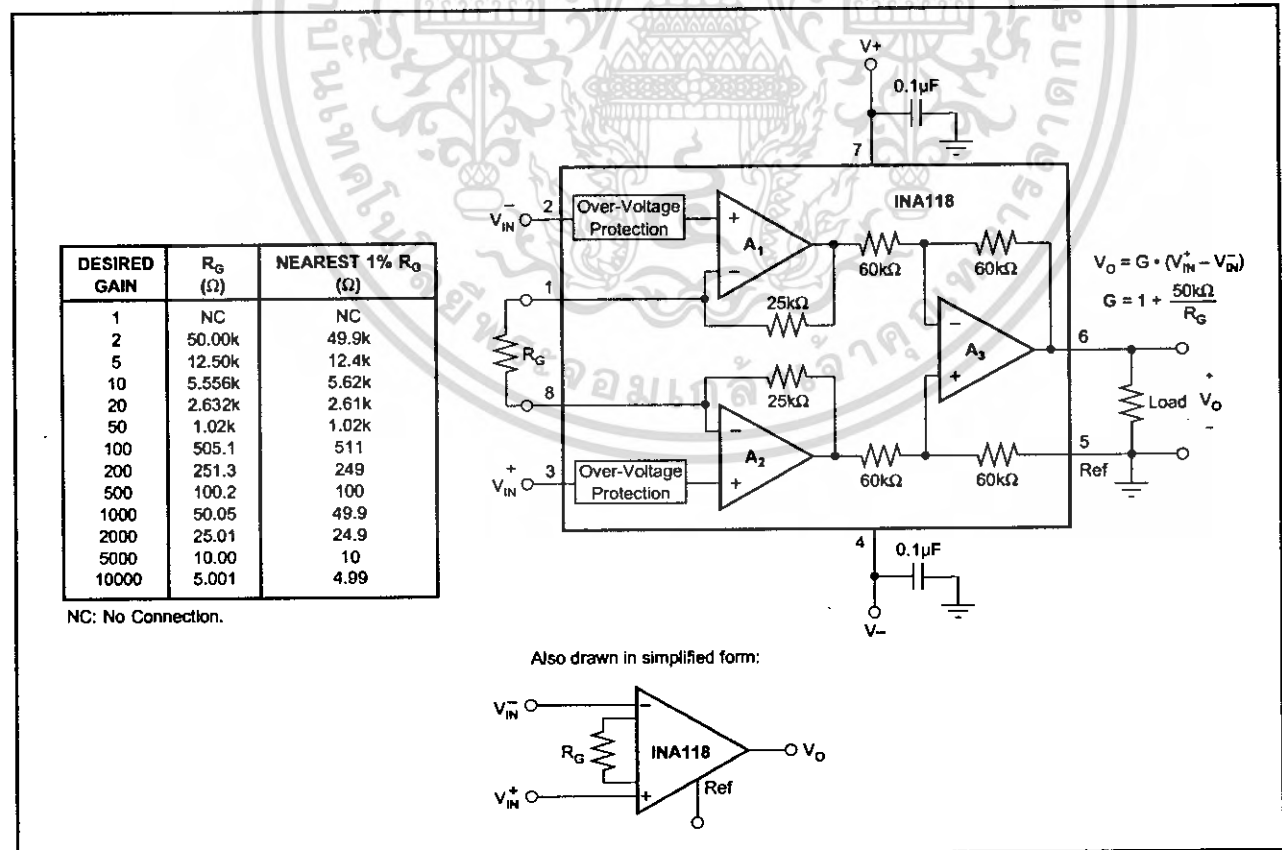


FIGURE 1. Basic Connections.

NOISE PERFORMANCE

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

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

OFFSET TRIMMING

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

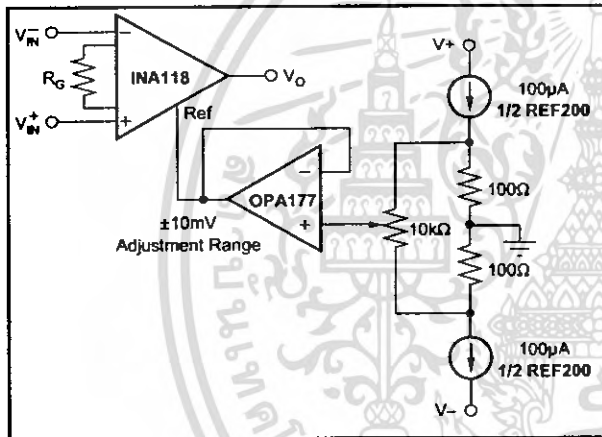


FIGURE 2. Optional Trimming of Output Offset Voltage.

INPUT BIAS CURRENT RETURN PATH

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

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

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

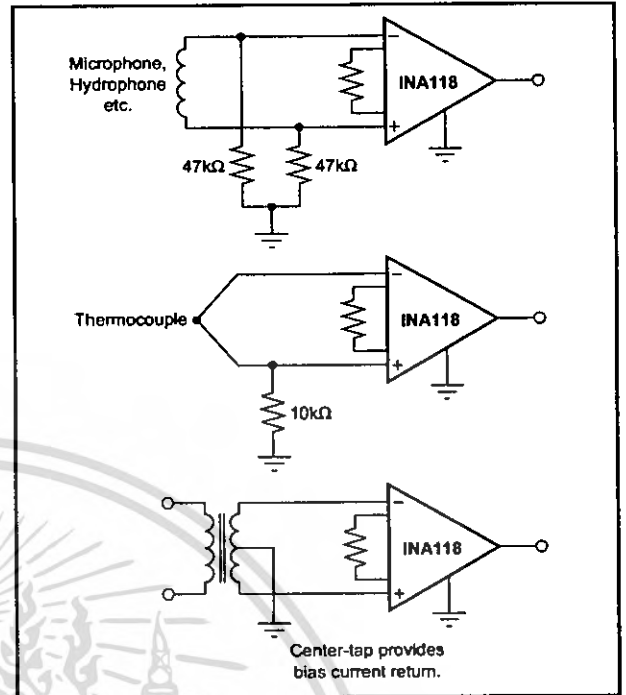


FIGURE 3. Providing an Input Common-Mode Current Path.

INPUT COMMON-MODE RANGE

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

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

LOW VOLTAGE OPERATION

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

SINGLE SUPPLY OPERATION

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

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

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

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

INPUT PROTECTION

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

INSIDE THE INA118

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

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

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

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

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

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

$$\text{Output Swing Range } A_1, A_2: (V^+) - 0.65V \text{ to } (V^-) + 0.05V$$

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

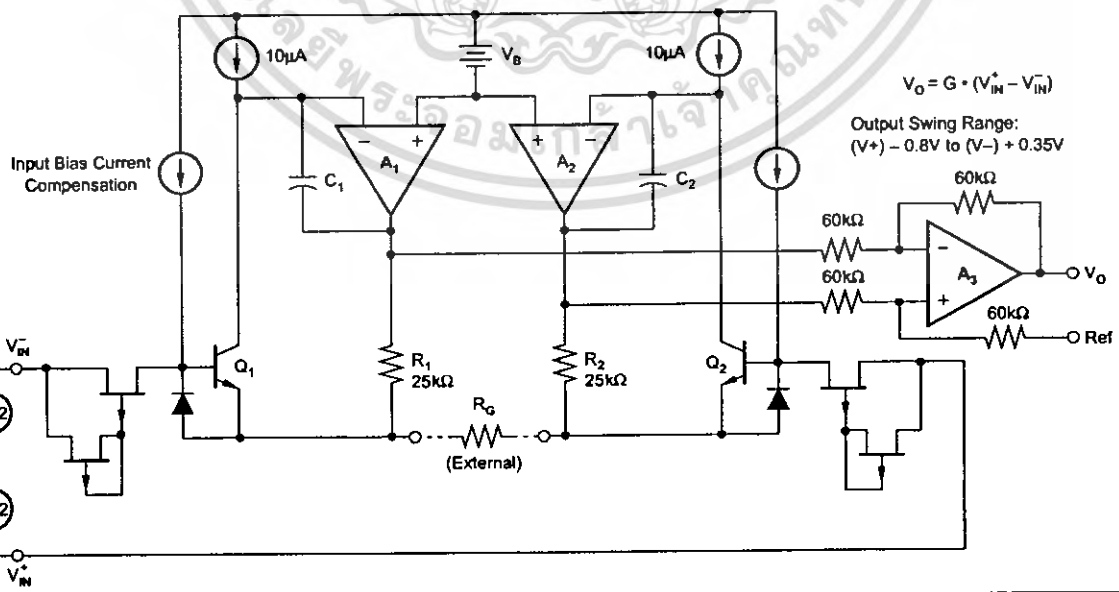


FIGURE 4. INA118 Simplified Circuit Diagram.



INA118

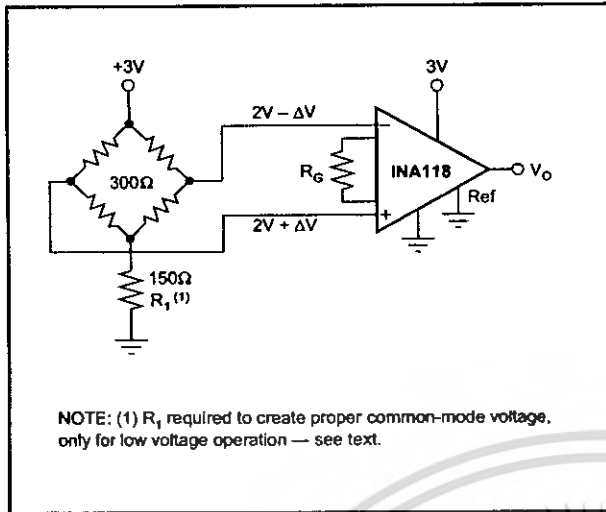


FIGURE 5. Single-Supply Bridge Amplifier.

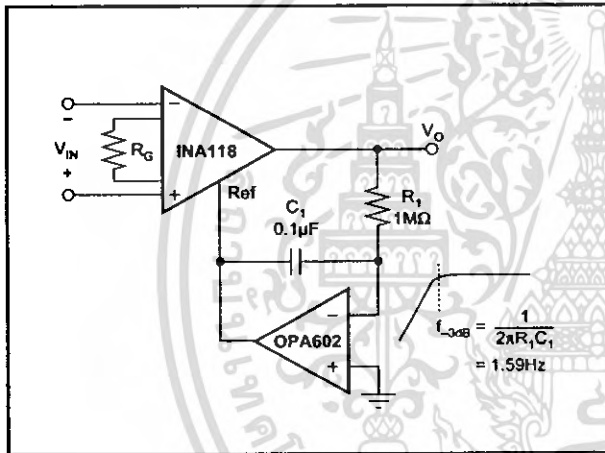


FIGURE 6. AC-Coupled Instrumentation Amplifier.

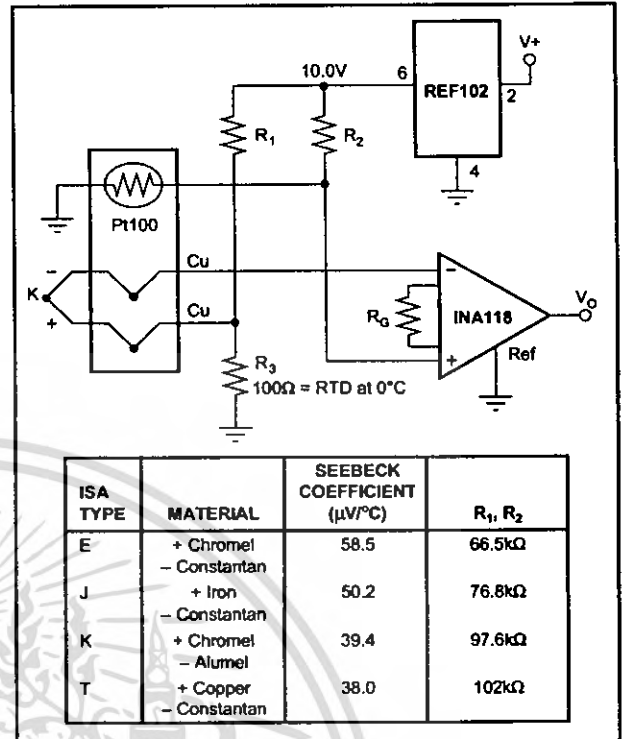


FIGURE 7. Thermocouple Amplifier With Cold Junction Compensation.

ISA TYPE	MATERIAL	SEEBECK COEFFICIENT ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	R_1, R_2
E	+ Chromel	58.5	66.5k Ω
	- Constantan		
J	+ Iron	50.2	76.8k Ω
	- Constantan		
K	+ Chromel	39.4	97.6k Ω
	- Alumel		
T	+ Copper	38.0	102k Ω
	- Constantan		

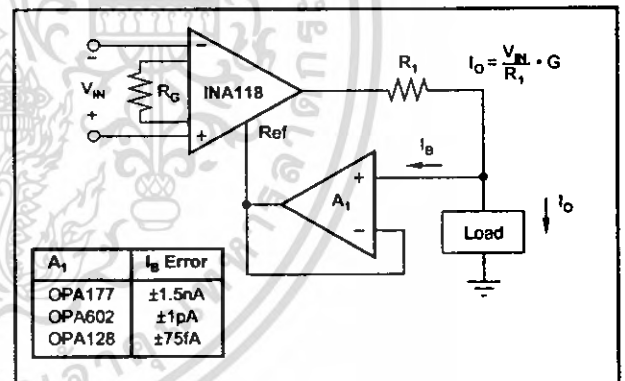


FIGURE 8. Differential Voltage to Current Converter.

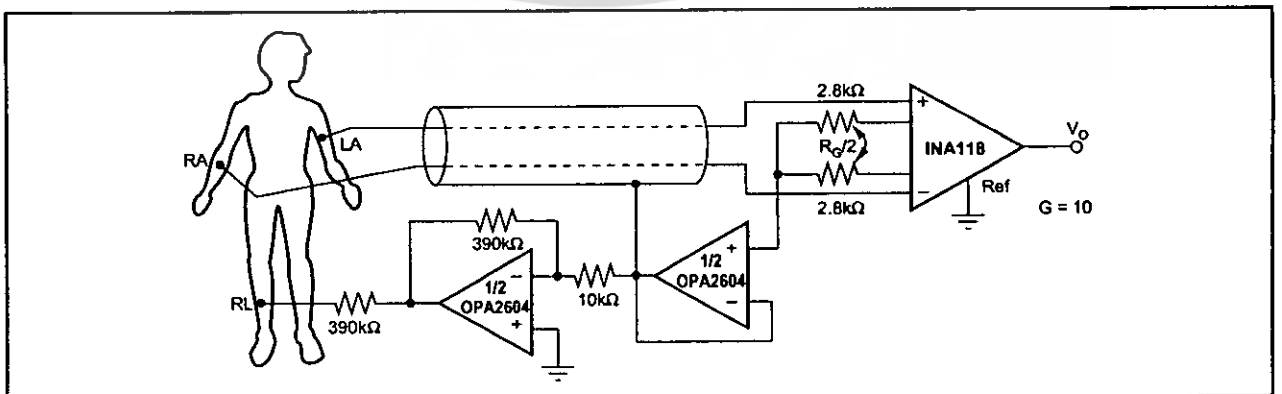


FIGURE 9. ECG Amplifier With Right-Leg Drive.