

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

**THE APPLICATION OF MAGNETO TRANSISTOR AS
MAGNETICMETER**



๒๖๖.
๒/๕/๖๓
๑๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขว. เขียน..... 82454
วัน,เดือน,ปี..... 11 ก.ค. 2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

11๑๔๗๑๐ x
b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

**THE APPLICATION OF MAGNETO TRANSISTOR AS
MAGNETICMETER**

โดย

นายปองพงษ์ สร้อยเงิน 48015171

นายชุตินันท์ อนุตรโต 48015178

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แมกนีโตทรานซิสเตอร์และการประยุกต์ใช้งาน

ผู้จัดทำ

นายปองพงษ์ สร้อยเงิน รหัสประจำตัว 47015171

นายชุติพนธ์ อุนทรโค รหัสประจำตัว 47015178



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องวัด

สนามแม่เหล็ก

นายปองพงษ์ สร้อยเงิน รหัส 48015171

นายชุตินันท์ อนุตธโต รหัส 48015178

รศ.ดร.เดิมนพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาประยุกต์ใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ประดิษฐ์ซึ่งใช้เพื่อตรวจวัดสนามแม่เหล็กได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอนโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยแรงลอเรนซ์จะกระทำต่อประจุทำให้เบี่ยงเบนจึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสกับพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์เป็นกระแส คอลเลกเตอร์ ในส่วนของวงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็กจะทำการออกแบบและสร้างวงจรจะมีวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่และวงจรขยายสัญญาณซึ่งวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์ซึ่งสัญญาณที่ออกมาจะถูกส่งไปที่วงจรขยาย จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่ามาและประมวลผลตามโปรแกรมแล้วแสดงผลออกทางจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE APPLICATION OF MAGNETO TRANSISTOR AS MAGNETICMETER

Mr. Phongpong Soingoun ID.48015171

Mr. Chutipon Anutato ID.48015178

Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul Advisor

Educational Year 2007

Abstract

The purpose of this project is to apply the Bipolar Magneto transistor to measure both horizontal and vertical magnetic fields by using Hall Effect Theory. The Lorentz Force will change the change direction. Thus, there will be the differences between carrier compounded in base. These will be base current and collector current. The magnetic field measuring circuit will be designed and build. The circuit consists of current stabilizing supply and signal amplifier. The current stabilizing supply will supply the electronical power to magneto transistor. The signal will be sent to the signal amplifier. Then, the micro controller will process the result and display on LCD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เดิมีพงษ์ เพ็ชรกุล ในการวางแผนแนวทางการดำเนินงานวิจัยและช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนการให้ความรู้ในทุกๆด้านจนทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณ พี่เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบคุณ พี่ปริญญาโทวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจตลอดปีการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ จนสามารถทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ปองพงษ์ สร้อยเงิน
ชุตินันท์ อนุตธโต

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญรูป | VII |
| สารบัญตาราง | X |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 เซ็นเซอร์ | 3 |
| 2.1 นิยามอุปกรณ์รอปข้างและคุณลักษณะที่สำคัญของทรานสดิวเซอร์ | 3 |
| 2.1.1 เซ็นเซอร์ | 3 |
| 2.1.2 ทรานสดิวเซอร์ | 3 |
| 2.1.3 คุณลักษณะของทรานสดิวเซอร์ที่ต้องการ | 3 |
| 2.1.4 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ | 4 |
| 2.1.5 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ | 4 |
| 2.1.6 อุปกรณ์กรองสัญญาณ | 4 |
| 2.1.7 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณไฟฟ้า | 5 |
| 2.1.8 อุปกรณ์แสดงผล | 5 |
| 2.2 ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนของตัวแปรในการปฏิบัติงาน | 5 |
| 2.2.1 ชนิดของความผิดพลาด | 6 |
| 2.2.2 ชนิดของความไม่แน่นอน | 8 |
| 2.3 ปัจจัยของความไม่แน่นอนกับจำนวนที่มารวมด้วยกัน | 8 |
| 2.4 ตัวแปรสถิติในการปฏิบัติงานของระบบ | 9 |
| 2.4.1 ความแน่นอน | 9 |
| 2.4.2 ความเที่ยงตรง | 10 |
| 2.4.3 ความละเอียด | 13 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.4.4 เทรสโพล | 13 |
| 2.4.5 ความไวเชิงสถิติ | 14 |
| 2.4.6 ความเป็นเชิงเส้น | 15 |
| 2.4.7 ฮิสเตอร์รีซิส | 15 |
| 2.4.8 เคคเบนค์ | 16 |
| 2.4.9 แบคเลส | 16 |
| 2.4.10 คริปต์ | 16 |
| บทที่ 3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ | 18 |
| 3.1 ทฤษฎีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor) | 18 |
| 3.1.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ | 18 |
| 3.1.2 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ | 20 |
| 3.1.3 โหมดการทำงานและการไบอัสทรานซิสเตอร์ | 21 |
| 3.2 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก | 23 |
| 3.3 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates) | 25 |
| 3.3.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ | 25 |
| 3.3.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ | 30 |
| 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ | 34 |
| 3.4.1 แมกนีโตริซิสเตอร์ | 34 |
| 3.4.2 แมกนีโตไดโอด | 35 |
| 3.4.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ | 37 |
| 3.5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Magnet transistor) | 41 |
| 3.5.1 การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา | 43 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ | 47 |
| 4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กเหล็ก | 47 |
| 4.1.1 ภาคขยาย | 48 |
| 4.2 ส่วนแสดงผล | 49 |
| 4.3 วงจรวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงผลออกจอ LCD | 54 |
| 4.4 ชุดทดลองวัดค่าการตรวจจับสนามแม่เหล็ก | 55 |
| บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง | 56 |
| 5.1 การวัดคุณสมบัติแมกนีโตทรานซิสเตอร์ | 56 |
| 5.1.1 ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง | 57 |
| 5.1.2 ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน | 60 |
| 5.2 รูปการใช้เครื่องวัดและการปรับค่าก่อนใช้งาน | 62 |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง | 67 |
| บรรณานุกรม | 68 |

สารบัญรูป

หน้า

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ | | |
| รูปที่ 2.1 | แสดงคิกริชของความแน่นอน และความเที่ยงตรงในการยิงเป้า | 11 |
| รูปที่ 2.2 | ความไวเชิงสถิติของเครื่องมือวัดแบบเชิงเส้น และแบบไม่เป็นเชิงเส้น | 13 |
| รูปที่ 2.3 | ตัวอย่างของเส้นโค้งเอาต์พุต- อินพุตที่แสดงผลของค่าฮิสเตอร์รีซิส | 15 |
| รูปที่ 2.4 | ผลของคริปต์สัญญาณและคริปต์ความไวต่อคุณสมบัติของเครื่องมือวัด | 16 |
| รูปที่ 3.1 | โครงสร้างทรานซิสเตอร์และสัญลักษณ์มาตรฐานของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ | 17 |
| รูปที่ 3.2 | การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด pnp ซึ่ง $W \ll L_p$ | 19 |
| รูปที่ 3.3 | กรณีที่เบสกว้างๆซึ่ง $W \ll L_p$ พหุจากอิมิตเตอร์ไม่สามารถแพร่ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ได้ | 20 |
| รูปที่ 3.4 | ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ | 22 |
| รูปที่ 3.5 | การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก | 23 |
| รูปที่ 3.6 | การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี | 24 |
| รูปที่ 3.7 | ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก | 25 |
| รูปที่ 3.8 | ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ | 29 |
| รูปที่ 3.9 | โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง | 30 |
| รูปที่ 3.10 | โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง | 30 |
| รูปที่ 3.11 | โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง | 31 |
| รูปที่ 3.12 | เอาต์พุตของเจ็มทิสแม่เหล็ก | 32 |
| รูปที่ 3.13 | โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม | 33 |
| รูปที่ 3.14 | โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด | 34 |
| รูปที่ 3.15 | โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS | 35 |
| รูปที่ 3.16 | ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง | 36 |
| รูปที่ 3.17 | โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน | 37 |
| รูปที่ 3.18 | ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$ | 38 |
| รูปที่ 3.19 | โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา | 39 |
| รูปที่ 3.20 | พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเบี่ยงเบน θ_H | 40 |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| รูปที่ 3.21 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ(โฮล)ในภาวะปกติ | 41 |
| รูปที่ 3.22 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล) | 42 |
| รูปที่ 3.23 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่ในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก | 42 |
| รูปที่ 3.24 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง $-Z$ | 43 |
| รูปที่ 3.25 การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของโฮลตามทิศทาง $-Z$ | 44 |
| รูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก | 47 |
| รูปที่ 4.2 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา | 47 |
| รูปที่ 4.3 โครงสร้างและการต่อใช้งาน | 48 |
| รูปที่ 4.4 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง | 49 |
| รูปที่ 4.5 แสดงการจัดขั้วสัญญาณของ T89C51AC2 | 50 |
| รูปที่ 4.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ T89C51AC2 | 51 |
| รูปที่ 4.7 บอร์ดที่ใช้ในการทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ | 51 |
| รูปที่ 4.8 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับจอ LCD | 53 |
| รูปที่ 4.9 วงจรวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงผลออกหน้าจอ LCD | 54 |
| รูปที่ 4.10 ชุดทดลองวัดค่าการตรวจจับสนามแม่เหล็ก | 55 |
| รูปที่ 5.1 คุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา | 56 |
| รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง (ด้านหน้าของอุปกรณ์) | 57 |
| รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง (ด้านหลังของอุปกรณ์) | 58 |
| รูปที่ 5.4 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน (อุปกรณ์ตะแคงทางด้านขวา) | 60 |
| รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน (อุปกรณ์ตะแคงทางด้านซ้าย) | 60 |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 5.8 แสดงตำแหน่งของปุ่มเปิด/ปิด | 63 |
| รูปที่ 5.9 แสดงการปรับค่า R2 ในวงจร | 64 |
| รูปที่ 5.10 แสดงการปรับค่า R1 ในวงจร | 64 |
| รูปที่ 5.11 แสดงตัวเครื่องมือวัดก่อนนำแม่เหล็กมาวัดทดสอบ | 65 |
| รูปที่ 5.12 แสดงตัวเครื่องมือวัดต่อมีแม่เหล็กมาวัดทดสอบ | 65 |



IX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ | |
| ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนอง สนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา | 59 |
| ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนอง สนามแม่เหล็ก แนวตั้ง (ด้านหลังของอุปกรณ์) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา | 59 |
| ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก แนวนอน(ตะแคงด้านขวา)ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา | 61 |
| ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก แนวนอน(ตะแคงด้านซ้าย)ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา | 61 |
| ตารางที่ 5.5 แสดงการทดลองการวัดที่ระยะทางค่าต่างๆ | 65 |



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

เซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับ รับความรู้สึกตัวแปรทางกายภาพตัวใดตัวหนึ่ง แล้วแปลงเปลี่ยนค่าทางด้านเอาต์พุตให้เป็นตัวแปรทางกายภาพตัวอื่น อย่างโครงการนี้เป็นการ นำเอาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาทำเป็นอุปกรณ์ เซ็นเซอร์

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหนึ่งที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่าง กว้างขวางเนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาณรบกวนที่เอาท์พุทมีค่าต่ำ, สามารถใช้งานกับ วงจรรวมได้ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เพื่อนำประยุกต์ใช้ งานเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนซึ่งอาศัยหลักการของ ปรากฏ การณ์ฮอลล์ ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยแรงลอเรนซ์จะกระทำกับบนประจุพาหะ ทำให้ ประจุพาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบน ไปยังขั้วสารกึ่งตัวนำของเบสและคอลเลคเตอร์ต่างกัน เป็นผลทำให้ ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและคอลเลคเตอร์ซึ่งนำไปสู่กลไกการตรวจจับสนามแม่เหล็กใน ทิศทางการตรวจจับแนวตั้งและแนวนอน

วัตถุประสงค์

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

ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง และแนวนอนเพื่อนำมาวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กและค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้จะถูกส่งไปให้กับวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่และวงจรขยายที่มีส่วนควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแสดงค่าให้ทราบตามจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

Sensor

2.1 นิยามอุปกรณ์รอบข้างและคุณลักษณะที่สำคัญของทรานสดิวเซอร์(Definition and Specification of Transducer)

2.1.1 เซ็นเซอร์(sensor)

เป็นส่วนที่รับสัญญาณจากระบบการในครั้งแรก หรืออาจจะเรียกได้ว่า “อินพุตทรานสดิวเซอร์” ในตำราจะให้ความหมายว่าทั้งเซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์เหมือนกันเพื่อหลีกเลี่ยงความสับสน

2.1.2 ทรานสดิวเซอร์(Transducer)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับ รับความรู้สึกตัวแปรทางกายภาพตัวใดตัวหนึ่งแล้วเปลี่ยนค่าทางด้านเอาต์พุตให้เป็นตัวแปรทางกายภาพตัวอื่น

2.1.3 คุณลักษณะของทรานสดิวเซอร์ที่ต้องการ

หากอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับสัญญาณไม่มีคุณภาพที่ดีแล้วระบบก็จะไม่สามารถทำงานเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ออกมาดีได้ ดังนั้นจึงต้องมีขอบเขตของทรานสดิวเซอร์ที่ดีเพื่อใช้ในทางปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. มีความสามารถในการรับสัญญาณและตรวจจับพร้อมทั้งรับความรู้สึกค่าสัญญาณอินพุตที่ต้องการและต้องไม่มีความไวกับสัญญาณอื่น ๆ (ที่ไม่ต้องการ) ขณะที่ทำการวัด ตัวอย่างเช่น ทรานสดิวเซอร์ที่วัดความเร็วจะต้องรับความเร็วอย่างทันทีทันใดนั้น และต้องไม่รับเอาตัวแปร (ความรู้สึก) ของแรงเคลื่อนหรืออุณหภูมิที่อยู่ในบริเวณนั้น

2. ไม่ดัดแปลงหรือแก้ไขค่านัยสำคัญที่จะวัด

3. มีความสามารถต่อการดัดแปลงระบบ (amenable) นั่นคือให้ง่ายต่อการปรับปรุงระบบโดยใช้อุปกรณ์ที่อยู่ภายในกระบวนการเดิม ๆ เช่นรูปสัญญาณของทรานสดิวเซอร์ที่มักจะทำให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า เพราะจะทำให้ง่ายต่อการจัดการและได้เปรียบในการต่อเข้ากับอุปกรณ์คำนวณหรืออุปกรณ์แสดงค่าสมัยใหม่ เพื่อแสดงรายละเอียดของสัญญาณดังกล่าว

4. ต้องมีความแน่นอน (accuracy) ที่ดี

5. ต้องมีค่าความสามารถในการทำซ้ำ (reproducibility) ที่ดี (เช่น ความเที่ยงตรง)

6. ต้องมีขนาด (amplitude) ที่เป็นเชิงเส้น

7. ต้องมีผลตอบสนองต่อความถี่ที่เพียงพอ (เช่น มีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ต้องไม่สร้างหรือกำเนิดการรบกวนเฟสต่อกัน (เช่น ไม่มี time lag ระหว่างสัญญาณ อินพุตและเอาต์พุตของทรานสดิวเซอร์)

9. ต้องมีความสามารถในการต่อต้านสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อม โดยไม่ทำลายความถูกต้องของระบบ และรักษาความแน่นอนภายในขีดที่ยอมรับได้

10. ต้องมีผลตอบสนองและความน่าเชื่อถือที่ดี

2.1.4 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ

โดยปกติ สัญญาณทางเอาต์พุตของทรานสดิวเซอร์จะมีขนาดเล็กเกินไปที่จะบอกบันทึกหรือนำไปใช้งานได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสัญญาณให้มีค่าเหมาะสมต่ออุปกรณ์ที่จะมาต่อรวม

2.1.5 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ

อุปกรณ์ขยายสัญญาณหรืออุปกรณ์ที่เพิ่มขนาดของสัญญาณ แต่ในลักษณะที่กลับกันจะเรียกว่า “ การลดทอนสัญญาณ ” (attenuation) ปกติอุปกรณ์ขยายสัญญาณดังกล่าวนี้จะอยู่ร่วมกับอุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณจะเปลี่ยนไปตามชนิดของสัญญาณที่ทรานสดิวเซอร์ใช้ ซึ่งพอจะแยกออกได้ดังนี้

1. อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางกล
2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางไฮดรอลิกหรือนิวแมติก เช่น เวนจูรีมิเตอร์
3. อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง คือเลนส์ และกระจก
4. อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางไฟฟ้า ใช้วงจรทรานซิสเตอร์ ไอซี เป็นต้น

$$\begin{aligned} \text{การขยายแรงเคลื่อน} &= \text{แรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุต/แรงเคลื่อนทางด้านอินพุต} \\ & \quad \text{Vo/Vi} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \text{การขยายกระแส} &= \text{กระแสทางด้านเอาต์พุต/กระแสทางด้านอินพุต} \\ & \quad \text{Io/Ii} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยายกระแส} &= \text{กำลังทางด้านเอาต์พุต/กำลังทางด้านอินพุต} \\ & \quad \text{VoIo/ViIi} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.1.6 อุปกรณ์กรองสัญญาณ

อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำหน้าที่นำสัญญาณที่ไม่ต้องการออก การกรองสัญญาณจะแปรไปตามความเหมาะสมของชนิดสัญญาณ ธรรมชาติของสัญญาณ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อุปกรณ์กรองทางกลประกอบด้วยอุปกรณ์ทางกล ทำหน้าที่ป้องกันทรานสดิวเซอร์จากสัญญาณรบกวนภายนอก เช่น การรักษาจุดอ้างอิงของเทอร์โมคัปเปิล ที่ถูกรักษาไว้ในถังที่บรรจุ น้ำแข็ง เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอบๆ
2. อุปกรณ์กรองระบบนิวแมติก ประกอบด้วยออร์ฟิซขนาดเล็ก
3. อุปกรณ์กรองทางไฟฟ้า เพื่อกำจัดการค้างอยู่ของสัญญาณไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1.7 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณไฟฟ้า

1. อุปกรณ์ชดเชยสัญญาณ หรือ อุปกรณ์ทำให้สัญญาณเป็นเชิงเส้น
2. อุปกรณ์ดีฟเฟอร์เรนเชียล หรือ อินทิเกรชัน
3. อุปกรณ์แปลงสัญญาณ จากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล
4. อุปกรณ์เฉลี่ยสัญญาณ หรืออุปกรณ์สุ่มสัญญาณ เป็นต้น

2.1.8 อุปกรณ์แสดงผล

เป็นอุปกรณ์รักษาค่าทางเอาต์พุตและทำหน้าที่แสดงค่าที่มีขนาดเดียวกันนี้ให้สามารถเห็นได้อย่างแน่นอน ชัดเจน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีผลตอบสนองเร็วสุดเท่าที่จะเป็นไปได้
2. หากว่าเป็นไปได้ต้องให้ความผิดพลาดของระบบน้อยที่สุด
3. มีค่าความเฉื่อย ความผิด ความตึง หรือค่าอื่นๆ ในลักษณะเดียวกันนี้น้อย ๆ (ยกตัวอย่างเช่นคริปต์จากการใช้ลำแสง หรือลำอิเล็กตรอนแสดงผล)

2.2 ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนของตัวแปรในการปฏิบัติงาน (Errors and Uncertainties in Performanve Parameters)

ตัวแปรเชิงสถิติหลายตัวของเครื่องมือวัด พบได้จากการทดสอบคุณลักษณะที่แน่นอนของมัน แต่ตัวแปรเชิงสถิติบางตัวที่โผล่เข้ามาเป็นบางเวลาอาจต้องตรวจสอบโดยใช้ค่าเฉลี่ยของการสอบเทียบเชิงสถิติซึ่งทำได้โดยการป้อนอินพุตค่าคงที่ที่ทราบค่าเข้าไปแล้วสังเกตการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าทางด้านเอาต์พุต

สรุปได้ว่าไม่มีการวัดใดที่จะทำได้อย่างแน่นอนอย่างสมบูรณ์จึงจำเป็นที่จะต้องรู้โครงสร้างของความผิดพลาดแต่ละชนิด รวมไปถึงองค์ประกอบในการวัดและสาเหตุของการเกิดเพื่อจะกำจัดหรือไม่เกิดผลของความผิดพลาด

2.2.1 ชนิดของความผิดพลาด (Type of Errors)

ค่าความผิดพลาด คือความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดค่าจริง(ค่ามาตรฐาน)มีหลายชนิดและสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. ความผิดพลาดเนื่องจากระบบ หรือเนื่องจากการสะสม (Systematic or Cumulative Errors) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากค่าที่มีขนาดและทิศทางเดียวกัน จึงทำให้เกิดการสะสมค่า จึงถูกเรียกว่า “ค่าความผิดพลาดสะสม”ค่าผิดพลาดดังกล่าวนี้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าในการอ่านเป็นค่าตายตัวค่าหนึ่งความผิดพลาดในเทอมนี้อาจเรียกได้ว่าค่าความผิดพลาดแบบ instrument bias ได้ อีกด้วยความผิดพลาดชนิดนี้อาจเกิดได้เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

ก. ความผิดพลาดของเครื่องมือวัด (Instrument Errors) เป็นความผิดพลาดที่แน่นอนในระบบเครื่องมือวัด อาจเกิดจากการออกแบบหรือเครื่องมือวัดที่มีโครงสร้างไม่ดี แก้ไขได้โดย (1) เลือกระบบเครื่องมือวัดที่เหมาะสมในการใช้งาน (2) ทำค่าที่ได้ให้ถูกต้องหลังจากที่หาค่าความผิดพลาดที่แน่นอนได้แล้ว (3) สอบเทียบเครื่องมือวัดกับค่ามาตรฐานที่มีความเหมาะสมอีกครั้ง

ข. ความผิดพลาดเนื่องจากสภาวะแวดล้อม (Environmental Errors) ความผิดพลาดชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภายนอกที่เครื่องมือวัดตั้งอยู่เช่นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความดัน ความชื้นแรงลง สนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้า เป็นต้นตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ รอบๆ เทปวัดระยะเป็นเหตุให้เกิดการผิดพลาดเนื่องจากการขยายตัวของเทปที่ใช้วัดระยะ

ค. ความผิดพลาดเนื่องจากการใส่โหลด (Loading Errors) ตัวอย่างของความผิดพลาดแบบนี้ คือ (1) การเพิ่มค่าความต้านทานในวงจรที่ใช้มิลลิแอมป์มิเตอร์วัดกระแส ซึ่งจะ ไปทำให้เกิดการแปรผันของกระแสในวงจร (2) มิเตอร์วัดการไหลที่อยู่ในสภาพถูกกีดขวางหรือที่ที่มีการรบกวนสภาพการไหลของของไหล ทำให้ค่าที่อ่านได้จากมาตรวัด ไม่เหมือนกับค่าก่อนที่จะติดตั้ง และ (3) ความจุความร้อนของเทอร์โมมิเตอร์และการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาดไป เป็นต้น และพบว่าค่าความผิดพลาดของระบบสามารถทำให้ถูกต้องได้จากการสอบเทียบเครื่องมือวัดดังกล่าวนี้

2. ความผิดพลาดเนื่องจากอุบัติเหตุหรือค่าผิดพลาดแบบสุ่ม (Accidental or Random Errors) ความผิดพลาดแบบเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าที่สุ่มมาหรือที่เรียกว่า “การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (random)” ของตัวแปรหรือระบบในการวัดซึ่งเป็นไปได้ทั้งค่าบวกหรือลบโดยลำพังความผิดพลาดนี้มีอยู่ทั้งสองทาง จึงทำให้ค่าหนึ่งซดเซยอีกค่าหนึ่ง เราอาจเรียกค่าความผิดพลาดนี้มีอยู่ทั้งสองทิศทาง จึงทำให้ค่าหนึ่งซดเซยค่าหนึ่งเราอาจเรียกค่าความผิดพลาดแบบดังกล่าวนี้ว่า “ค่าความผิดพลาดแบบซดเซย” ตัวประกอบหรือสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดแบบสุ่มนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. การไม่รวมกลุ่มกันของค่าที่จะวัดความแน่นอนในการวัดปริมาณที่มีขนาดเล็ก (Inconsistencies Associated With Accurate Measurement of Small Quantities) เอาต์พุตของเครื่องมือวัดจะไม่ค่อยรวมกลุ่มกันหากว่าเราวัดปริมาณที่มีความแน่นอนสูงๆที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าเมื่อเครื่องมือวัดขึ้นนั้นถูกสร้างหรือสอบเทียบเพื่อให้ใช้กับการวัดปริมาณที่มีค่าน้อยกว่า ตัวอย่างเช่นหากวัดน้ำหนักถังน้ำให้ใกล้กิโลกรัมมากที่สุดโดยตาชั่งธรรมดา ก็จะไม่มีการสังเกตผิดไปจากอีกคนหนึ่งไม่ว่าจะวัดที่ครั้ง แต่ถ้าหากกำหนดให้หาน้ำหนักที่ใกล้มิลลิกรัมที่แน่นอนว่าผู้อ่านแต่ละคนจะได้ค่าที่แตกต่างกัน

ข. เกิดจากความบกพร่องที่แน่นอนของระบบ (Presence of Certain System Defect) มีสาเหตุมาจากส่วนของวัสดุและส่วนที่มีความผิดในจุดต่างๆแล้วก่อให้เกิดความผิดพลาดขึ้นอาจจะเป็นด้านบวกหรือด้านลบก็เป็นได้ค่านี้อาจจะแปรเปลี่ยนไปตามทิศทางเคลื่อนที่ตัวอย่าง เช่น ฟอเมอร์ (former) ของมิเตอร์เป็นแหล่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดที่เรียกว่า “backlash error” ซึ่งจะก่อให้เกิดความผิดในเบริงของมิเตอร์ตามมา ทางหนึ่งที่จะตรวจวัดและแก้ความผิดพลาดนี้ให้ถูกต้องได้คือ วัดค่าในครั้งแรกขณะที่มันเพิ่มค่าขึ้นและลดขนาดลง วิธีการดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานที่เรียกว่า “วิธีการสมมาตร” (method of symmetry)

ค. ผลของการไม่สามารถควบคุมได้และการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มของข้อมูล (Effect of Unrestrained and randomly Varying Parameters) สาเหตุหนึ่งอาจจะมาจากการรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้เกิดความไม่แน่นอนทางเอาต์พุตของเครื่องมือวัด เช่นสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในสายการสัมผัสเทื่อนของแท่นรองรับเครื่องมือวัด ดังนั้นผู้ใช้ต้องพยายามลดตัวแปรที่มีการผิดเพี้ยนหรือการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ให้มีค่าน้อยที่สุด

3. ความผิดพลาดแบบเบ็ดเตล็ดอื่นๆ (Miscellaneous Type of Gross Errors) ความผิดพลาดแบบอื่นๆ ที่ไม่สามารถจัดเข้ากลุ่มได้ รวมเรียกว่าความผิดพลาดดังกล่าวว่าความผิดพลาดแบบเบ็ดเตล็ดซึ่งมีสาเหตุดังต่อไปนี้

ก. ความผิดพลาดเนื่องจากตัวบุคคล (Personal or Human Errors) มีสาเหตุมาจากความจำกัดในการรับรู้สติของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น บางครั้งเราอ่านค่าได้สูง บางครั้งอ่านค่าได้ต่ำทั้งๆที่เป็นค่าเดียวกัน

ข. ความผิดพลาดเนื่องจากความบกพร่องของส่วนประกอบ / การปรับ (Error due to Faulty Components / Adjustments) อาจเกิดเนื่องจากส่วนที่มีการเคลื่อนที่ การรั่วไหลของไฟฟ้าเป็นต้น ลักษณะดังกล่าวจะเกิดอย่างทันทีทันใดในเวลานั้น ๆ การหาความผิดพลาดแบบนี้ปกติทำได้โดยการวัดซ้ำให้มีจำนวนที่มากพอ โดยป้อนสัญญาณมาตรฐานเข้าไปยังเครื่องมือวัด แล้วหาความ

แตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสัญญาณและสัญญาณมาตรฐาน จะทำให้สามารถหาความผิดพลาดแบบสุ่มได้

ค. การใช้เครื่องมือวัดไม่เหมาะสม สาเหตุหนึ่งมาจากการใช้เครื่องมือวัดในสภาพที่ไม่เข้ากับการออกแบบหรือสภาพในการปฏิบัติ เช่น มี การสั่นสะเทือนมากเกินไป มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากเกินไป เป็นต้น

2.2.2 ชนิดของความไม่แน่นอน (Type of Uncertainties)

โดยทั่วไปค่าความไม่แน่นอนแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. ความไม่แน่นอนภายนอก (External Estimate of Uncertainty ; U_E)

เกิดจากขีดจำกัดทางความรู้ในการใช้เครื่องมือทดลอง การผลิตมาจากโรงงาน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ถ้าเราจ่ายแรงเคลื่อนอินพุตจริง 100 โวลต์ เข้าไปยังเครื่องสอบเทียบ โวลต์มิเตอร์อย่างดีเครื่องหนึ่ง ซึ่งมีความละเอียด 0.1 โวลต์ ค่าที่คาดว่าจะอ่านจาก โวลต์มิเตอร์จะต้องเหมือนกันกับที่จ่ายคือ 100 โวลต์ ในตอนนี้หากเพิ่มหรือลดแรงเคลื่อนอินพุตให้ย่าน ± 0.1 โวลต์ซึ่งความละเอียดเท่ากับ เครื่องมือวัด โวลต์มิเตอร์ก็ยังคงบอกค่าที่ 100 โวลต์ นั่นคือเครื่องมือวัดไม่สามารถจะเก็บค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นหรือลงค่าจากความละเอียดของเครื่องมือวัดได้ ดังนั้นจึงพูดว่าในกรณีนี้ค่าที่ 100 โวลต์ที่ทำการวัดนี้มีค่าความไม่แน่นอนภายนอก, U_E เท่ากับ ± 0.1 โวลต์

2. ความไม่แน่นอนภายใน (Internal Estimate of Uncertainty ; U_I)

เกิดจากข้อมูลและการประเมินปริมาณของมันเองซึ่งมีความไม่แน่นอน, U_I อยู่ค่าดังกล่าวนี้เกิดขึ้น เพราะว่าเครื่องมือวัดจะแสดงค่าแตกต่างเล็ก ๆ น้อย ๆ ทุกเวลาที่เราป้อนอินพุตเข้าสู่เครื่องมือวัด หรืออาจกล่าวได้ว่ากลุ่มของข้อมูลจะเข้ามามีส่วนต่อการกระจายนั่นเอง

จะเห็นว่าเครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงสูง พร้อมกับมีค่าความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ที่ดีนั้น โดยปกติจะอยู่ในกลุ่มที่มีค่าของ U_I น้อย ๆ แต่เครื่องมือวัดตัวนั้นจะมีราคาแพง

2.3 ปัจจัยของความไม่แน่นอนกับจำนวนที่มารวมด้วยกัน (Propagation of Uncertainties in Compound Quantities)

ในการทดลองใด ๆ ชนิดของตัวแปรในการวัดที่เป็นคนละตัวกันนั้น จะนำไปสู่การหาค่าความแน่นอนของตัวแปร เช่นเราต้องการคำนวณขนาดของแรง ก็ต้องทำการวัดขนาดและความเร่งของมวล ซึ่งค่าทั้งคู่ก็จะนำความไม่แน่นอนเข้ามา ทำให้ต้องหาความไม่แน่นอนในส่วนของแรง เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนทั้งของมวลและความเร่ง เพื่อคำนวณค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นพิจารณาสมการซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (2.4)$$

เมื่อ y คือตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรมาตรฐาน $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ โดยเขียนสมการที่ (2.4) ให้อยู่ในรูปของคิฟเฟอเรนเชียล จะได้

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_i} dx_i + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \quad (2.5)$$

เมื่อจำนวน $dy, dx_1, dx_2, \dots, dx_i, \dots, dx_n$ ถูกพิจารณาให้ค่าความไม่แน่นอนของ $U_y, U_{x_1}, U_{x_2}, \dots, U_{x_i}, \dots, U_{x_n}$ ในจำนวนของ $y, x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ตามลำดับ จากสมการที่ (2.5) เราจะได้ว่า

$$U_{y \max} = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} (U_{x_1}) \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} (U_{x_2}) \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} (U_{x_n}) \right| \quad (2.6)$$

ตอนนี้ ความไม่แน่นอนสูงสุดในค่า y คือ $U_{y \max}$ จะปรากฏเมื่อค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดเกิดขึ้นและมีขนาดเดียวกัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เป็นไปไม่ได้หรือเป็นไปได้น้อยมาก

$$U_{y \max} = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} (U_{x_1}) \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} (U_{x_2}) \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} (U_{x_n}) \right| \quad (2.7)$$

2.4 ตัวแปรสถิตในการปฏิบัติงานของระบบ(Static Performance Parameters)

เราสามารถจะแยกตัวแปรสถิตออกได้ดังนี้

2.4.1 ความแม่นยำ (Accuracy)

ความแม่นยำกำหนดเป็นการที่เครื่องมือวัดแสดงค่าเข้าใกล้ค่าทางด้านเอาต์พุตซึ่งเป็นค่าจริงของจำนวนที่วัดมากที่สุด หรือ เป็นค่าผิดพลาดสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์นั่นเอง และโดยความเป็นจริงความแม่นยำที่บอกจากเครื่องมือวัดจะเป็นตัวแสดงความไม่แน่นอน (inaccuracy) ของเครื่องมือวัดนั่นเอง ตัวอย่างเช่น เครื่องมือวัดตัวหนึ่งบอกความแม่นยำเท่ากับ 0.05 ย่อมวัดได้ใกล้เคียงกับค่าแท้จริงที่สุด(หรือค่าผิดพลาด (error) น้อยที่สุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแน่นอนสามารถแบ่งได้ตามลักษณะต่อไปนี้

1. แบ่งตามตัวแปรที่ถูกวัด (Measured Variable) : ความแน่นอนค่า $\pm 2' C$ ซึ่งปรากฏในการวัดอุณหภูมิบางตัวนั้นหมายความว่า จะมีความไม่แน่นอน (uncertainty) เป็น $\pm 2 C$ ในการวัดค่าอุณหภูมิใดๆ

2. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เต็มสเกลต่อการอ่านค่าของเครื่องมือวัด (Percentage of the Instrument Full-scale Reading) ดังนั้น ความแน่นอนของ $\pm 5\% FS$ ของย่านมิเตอร์ที่เป็น 5 โวลต์เต็มสเกล จะหมายถึงความไม่แน่นอน (inaccuracy หรือ uncertainty) ในการวัดค่าใด ๆ เป็น ± 0.025 โวลต์

3. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุด (Span) ของเครื่องมือวัด (Percentage of instrument span) เป็นเปอร์เซ็นต์ที่ได้ของย่านในการอ่านค่าจากการวัดที่สามารถวัดได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่วัดค่าได้ $\pm 3\%$ ของ span สำหรับแรงเคลื่อนที่อยู่ในย่าน 20-50 psi จะมีความแน่นอนเป็น $(\pm 0.3)(50-20) = \pm 0.9$ psi

4. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าที่อ่านได้จริง (Percentage of the Actual Reading) ดังนั้นสำหรับค่า $\pm 0.2\%$ ของการอ่านค่าจริงจากโวลต์มิเตอร์จะมีความไม่แน่นอนในการอ่านเป็น 2 โวลต์

2.4.2 ความเที่ยงตรง (Precision)

ความเที่ยงตรงกำหนดเป็นความสามารถของเครื่องมือวัดที่จะผลิตหรือสร้างชุดในการอ่านค่าที่แน่นอนภายใต้ค่าความแน่นอน (accuracy) ที่กำหนดให้ ตัวอย่างเช่น ถ้าทรานสดิวเซอร์ตัวหนึ่งกำหนดค่าความแน่นอน (accuracy) ทางด้านอินพุตที่ทราบค่ามาแล้วทำการอ่านค่าเครื่องมือวัดดังกล่าวที่อยู่ภายในค่า $\pm 1\%$ ซ้ำเราก็จะได้ค่าความเที่ยงตรง หรือกล่าวได้อีกว่าความผิดพลาดจากความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดดังกล่าวมีค่าเป็น $\pm 1\%$ ดังนั้น เครื่องมือวัดที่มีค่าความเที่ยงตรงสูงๆ ก็จะต้องมีรายละเอียดของค่าทางด้านเอาต์พุตที่เหมือนกันทุกครั้ง เมื่อป้อนอินพุตค่าเดียวกัน

ในความเป็นจริง ความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ซึ่งกำหนดความสามารถของเครื่องมือวัดที่จะสร้างกลุ่มการวัดที่มีค่าเหมือน ๆ กัน โดยใช้เครื่องมือวัดตัวเดียวกัน ภายใต้สภาวะเดียวกัน ค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด สามารถหาได้จากกราฟวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1. ค่าความแน่นอนกับความเที่ยงตรง

จะเห็นได้ว่าความแน่นอนเป็นตัวแสดงดีกรีความถูกต้องในการวัดซึ่งเทียบกับค่าที่แท้จริง ส่วนความเที่ยงตรงเป็นตัวแสดงดีกรีความสามารถในการทำซ้ำของการวัดหลาย ๆ ค่าที่เป็นอิสระต่อค่าทางด้านอินพุตที่ต้องการ โดยอ้างอิงจากสภาพเดียวกัน เพื่อแสดงสถานะของตัวอย่างดังกล่าว

สามารถจำลองได้จากการยิงเป้า ซึ่งความเป็นไปได้หลังจากที่ทำการยิงเป้าจะให้ผลดังรูปที่ (2.1) โดยพบว่า

(1) ความเป็นไปได้ที่จะยิงเข้าเป้าด้านนอกของวงกลมทั้งหมด และออกห่างจากดวงตาของ บัลทั้งหมด (Bull's eye) [รูปที่ 2.1 (ก)] ลักษณะดังกล่าว แสดงถึงค่าความเที่ยงตรงที่สูง แต่มีความแน่นอนที่ไม่ดี

(2) ความเป็นไปได้ของการยิงเป้า แสดงดังรูปที่ 2.1 (ข) ในกรณีนี้ กระสุนที่ยิงเข้าเป้าจะมีค่าค่อนข้างสมมาตรกันแต่ก็ไม่เข้าดวงตาของบัล ดังนั้นในกรณีนี้ จึงมีค่าความแน่นอนเฉลี่ยที่ดีแต่มีความเที่ยงตรงไม่ดี

(3) ความเป็นไปได้ของการยิงเป้าที่สามคือ กระสุนเข้าเป้าที่ดวงตาของบัลทั้งหมดดังรูปที่ 2.1 (ค) ในกรณีนี้ แสดงว่ามีค่าความเที่ยงตรงและความแน่นอนสูง

(4) สอดท้าย ถ้ากระสุนที่เข้าเป้าเป็นแบบแรนดอม ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.1 (ง) ในกรณีนี้ ทั้งค่าความเที่ยงตรง และค่าความแน่นอนไม่ดี



รูปที่ 2.1 แสดงตริกริชของความแน่นอน และความเที่ยงตรงในการยิงเป้า
(เปรียบเทียบกับความแน่นอนและเที่ยงตรงของการวัดเลือกค่าเป้าหมาย)

บ่อยครั้งเราไม่สามารถจะทราบค่าที่แท้จริง (true value หรือ actual value) จากการวัด เราจึงใช้ค่าความแน่นอน (accuracy) เป็นตัวอธิบายความผิดพลาดที่เป็นไปได้ และในความเป็นจริง ก็เป็นการยากที่จะจำกัดหรือบอกค่าจริงได้ เราจึงอาจจะต้องใช้ค่าใหม่ที่เรียกว่า ค่าที่คาดหวัง (expected value) แทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากความสามารถในการวัดนั้นยังยืนยันค่าที่คาดหวัง ก็จะเกิดค่าความผิดพลาดขึ้น ค่าความผิดพลาดสามารถแสดงได้ทั้ง ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (absolute error) และ ความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ (percentage of error)

ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์จะแสดงค่าเป็น

$$e = Y_n - X_n \quad (2.8)$$

เมื่อ e = ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์

Y_n = ค่าที่คาดหวังไว้

X_n = ค่าที่วัดได้

ถ้าเราแสดงความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ ก็สามารถเขียนได้เป็น

$$\text{Percent error} = \frac{\text{absolute error}}{\text{expected value}} (100)$$

หรือ

$$\text{Percent error} = \frac{e}{Y_n} (100)$$

โดยการแทน e จากสมการ () ลงในสมการด้านบน ดังนั้น

$$\text{Percent error} = \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| (100) \quad (2.9)$$

บ่อยครั้งที่เรามักจะแสดงค่าที่ได้จากการวัด ในเทอมของความแน่นอนสัมพัทธ์ (relative accuracy) มากกว่าค่าความผิดพลาด หรือจะได้ว่า

$$A = 1 - \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ A คือ ความแน่นอนสัมพัทธ์ (Relative Accuracy) ค่าความแน่นอนที่แสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ a แสดงได้เป็น

$$A = 100\% - \text{percent error} = A \times 100 \quad (2.11)$$

2.4.3 ความละเอียด (Resolution หรือ Discrimination)

ความละเอียดกำหนดเป็นการเพิ่มค่าเล็กที่สุดในการวัดตัวแปรใดๆ ซึ่งสามารถตรวจจับได้อย่างแน่นอน โดยเครื่องมือวัด ค่าการนับหรือการวัดซึ่งได้น้อยที่สุดของเครื่องมือวัดใด ๆ เป็นความละเอียดของเครื่องมือวัด ค่าการนับหรือการวัดซึ่งได้น้อยที่สุดของเครื่องมือวัดใด ๆ เป็นความละเอียดของเครื่องมือวัดนั้น ยกตัวอย่างเช่น ไม้มบรรทัดที่สามารถวัดค่าน้อยที่สุดที่ 1 มิลลิเมตร แต่มันก็ยังจะสามารถวัดค่า 0.5 มิลลิเมตรได้โดยแบ่งครึ่งระหว่างขีดของมันจึงอาจกล่าวได้ว่าความละเอียดของมันมีค่าเป็น 0.5 มิลลิเมตร ดังนั้นเครื่องมือวัดที่มีค่าความละเอียดสูงจึงสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอินพุตที่เล็กที่สุดเท่าที่เป็นได้

ในบางกรณี ค่าความละเอียดของระบบการวัดจะถูกจำกัดโดยความไวของตัวปรับสภาพสัญญาณดังนั้นในบางกรณีเช่นนี้ เราก็สามารถจะปรับปรุงความละเอียดของสัญญาณให้ดีขึ้นได้โดยใช้วงจรปรับสภาพสัญญาณที่ดีกว่าเดิม

ในระบบดิจิทัลความละเอียดกำหนดได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทางพลวัตต่อการเปลี่ยนแปลงค่าหนึ่งบิตของเลขฐานสองด้านเอาต์พุต ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแปลงความละเอียดของระบบให้ดีขึ้นได้โดยการทำให้โค้ด (code) รายละเอียดทางแอนะล็อกแตกต่างไปจากเดิมนั่นคือเพิ่มจำนวนของบิตให้มากขึ้นนั่นเอง

2.4.4 เธรสโฮลด์ (Threshold)

เธรสโฮลด์เป็นกรณีหนึ่งที่บ่งชี้ความละเอียด กำหนดให้เป็นค่าน้อยที่สุดอินพุตซึ่งไม่สามารถตรวจจับค่าทางด้านเอาต์พุตได้ ค่าดังกล่าวนี้เป็นส่วนที่นำเข้าสู่ค่าความละเอียด (resolution) ทั้งค่าเธรสโฮลด์และค่าความละเอียด กำหนดให้เป็นจำนวนสัมบูรณ์ในเทอมของหน่วยทางด้านอินพุต หรือเป็นเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนเต็มสเกลได้

เราพบว่าทั้งค่าเธรสโฮลด์และความละเอียดจะไม่มีโอกาสเป็นศูนย์ เหตุผลจากปัจจัยหลาย ๆ อย่างเช่นความผิดของส่วนที่การสูญเสียที่จุดต่อ (ที่ถูกต้องคือแบคแลช) ความเฉื่อยที่ความยาวของสเกลช่องว่างของขีด ขนาดของเข็มชี้ ผลจากพาราแลกซ์ เป็นต้น

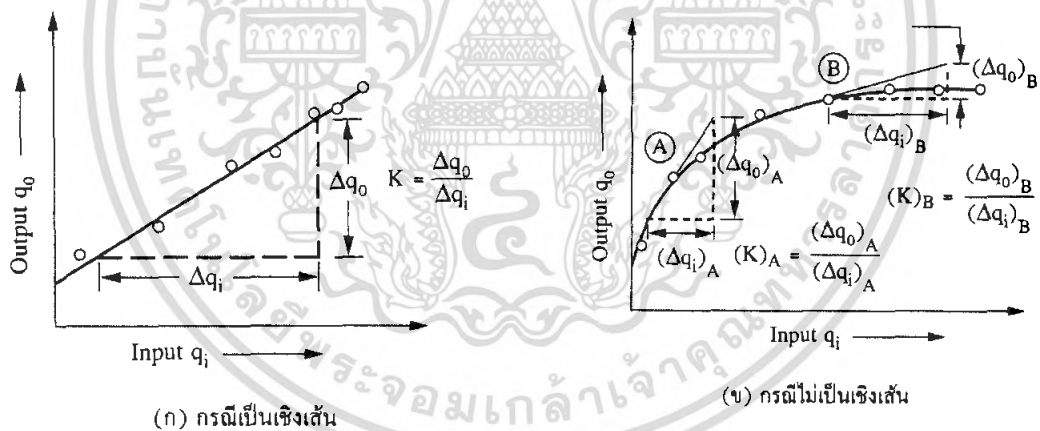
2.4.5 ความไวเชิงสถิต (Static Sensitivity)

ความไวเชิงสถิต (บางครั้งเรียกว่าสเกลแฟกเตอร์ หรืออัตราขยาย) ของเครื่องมือวัดกำหนดได้จากผลของการสอบเทียบในเชิงสถิต คุณสมบัติเชิงสถิตนี้จะเป็นสัดส่วนกับขนาดของผลตอบสนอง(ของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต) กับขนาดของจำนวนที่จะวัด (สัญญาณทางด้านอินพุต)กำหนดได้จาก

$$\text{Static sensitivity} = \frac{\text{change of output signal}}{\text{change in input signal}} \tag{2.12}$$

$$= \Delta q_o / \Delta q_i \tag{2.13}$$

เมื่อ q_o และ q_i เป็นค่าของสัญญาณเอาต์พุตและค่าของสัญญาณอินพุตตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ความไวเชิงสถิตของเครื่องมือวัดแบบเชิงเส้น และแบบไม่เป็นเชิงเส้น

โดยที่ $\text{Static sensitivity } \mathbf{K} = \left. \frac{\Delta q_o}{\Delta q_i} \right|_{q_i}$ (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวของสปริงจัดเป็นระบบเชิงเส้น เพราะว่ามันมีการขยายตัวที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่จ่ายในทางกลับกันความไวของอุปกรณ์ชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น เทอร์โมคัปเปิลแบบทองแดง/คอนสแตนแตน พบว่ามันจะมีค่าสูงสุดที่ $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีค่าเป็น $60\text{ }\mu\text{v/c}$ โดยทั่วไป ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะบอกในรูปของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ส่วนกลับ (reciprocal หรือ inverse sensitivity) ของความไวจะถูกระบุว่า “ตัวประกอบเบี่ยงเบน” (deflection factor)

2.4.6 ความเป็นเชิงเส้น (linearity)

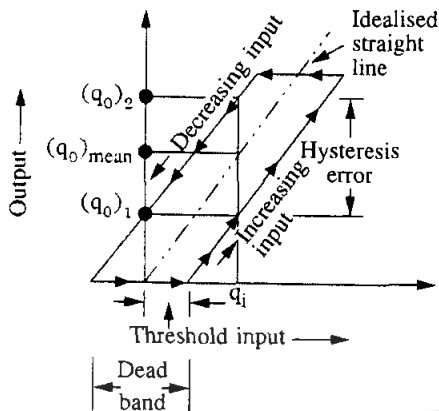
ความเป็นเชิงเส้น เป็นตัวบอกลักษณะสเกลเครื่องมือวัดดังนั้นผู้ผลิตเครื่องมือวัดจึงต้องผลิตเครื่องมือวัดที่ค่าทางด้านเอาต์พุตเป็นเชิงเส้นกับค่าทางด้านอินพุต ในความเป็นจริงเราไม่สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้อย่างสมบูรณ์ นั่นคือจะบ่าเบิน (ผิดพลาด) ไปจากค่าในทางอุดมคติ

ในอุปกรณ์สำหรับงานเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ มักจะมีค่าความเป็นเชิงเส้น (linearity) กำกับไว้โดยที่นั่นจะเป็นตัวบอกความแน่นอนสมมูลของเครื่องมือวัดนั่นเอง

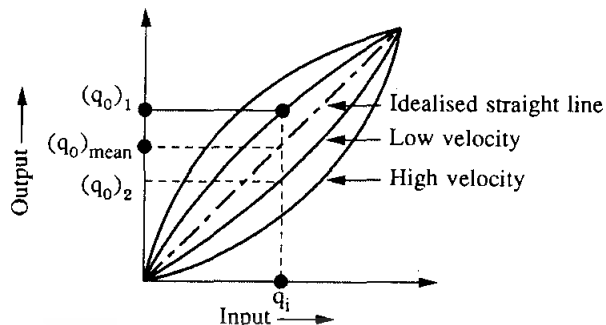
2.4.7 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) และความสามารถในการผลิตซ้ำ (Reproducibility)

ฮิสเทอรีซิสเป็นการกำหนดขนาดความผิดพลาด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าทางด้านเอาต์พุตภายในย่านอินพุตที่กำหนด ความผิดพลาดค่าดังกล่าวนี้จะปรากฏในด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน เช่น จากค่าที่เปลี่ยนแปลงทางขาขึ้นแล้วค่าดังกล่าวก็ย้อนกลับลงมายังตำแหน่งเดิม ค่าดังกล่าวอาจสูญเสียความยืดหยุ่น คุณสมบัติของแม่เหล็ก ความฝืด เช่น การสัมผัสกันระหว่างผิวของของแข็ง ความฝืด (เนื่องจากความฝืดของลูกอมป์) ปรากฏการณ์นี้เกิดเมื่อเราจ่ายแรงหรือแรงบิดที่จำเป็นในการการใช้งานครั้งแรกเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของเครื่องมือวัดหลังจากนั้นเมื่อความฝืดที่ฝังตัวมันผ่านไป แล้วค่าความผิดพลาดก็จะเข้ามา และทำให้คุณสมบัติทางด้านเอาต์พุต – อินพุต ของเครื่องมือวัดเป็นรูปของเส้นโค้งแบบปิดดังรูปที่ 2.3 (ก) และหากว่าค่าทางไฮโดรนามิกหรือค่าความหนืด – ฝืด (viscous – friction) ในรับเปลี่ยนไปและถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงทางด้านอินพุตมากขึ้นกว่าเดิม ค่าความฝืดในรูปฮิสเทอรีซิสก็จะมากขึ้นกว่าเดิม [ดูรูปที่ 2.3 (ข)] อย่างไรก็ตามหากอัตราการเปลี่ยนแปลงทางด้านอินพุตที่กำลังเข้าสู่ค่าคงที่นั่นคือไม่มีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความหนืด-ฝืดนั่นเอง

ถ้าจะกำจัดผลของฮิสเทอรีซิสให้ได้มากที่สุด ต้องศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางขาขึ้นและขาลงของค่าด้านอินพุตแล้วหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ ตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) สำหรับค่าทางด้านอินพุต q_1 ค่าทางด้านเอาต์พุต จะทำให้เกิดค่าทางด้านขาขึ้นเป็น $(q_o)_1$ และทำให้เกิดค่าขาลง $(q_o)_2$ ซึ่งก็ได้ค่าเฉลี่ยเป็น



(ก) ค่าฮิสเตอร์รีซิสเนื่องจากความผิดของจุดลอมป์



(ข) ค่าฮิสเตอร์รีซิสเนื่องจากความหนืด-ผิด

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของเส้น โคง์เอาต์พุต- อินพุตที่แสดงผลของค่าฮิสเตอร์รีซิส

เพื่อให้เห็นชัดเจนให้ดูรูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) ค่าดังกล่าวนี้อาจจะมีค่าที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่หาได้จากเส้นตรงอุดมคติ

2.4.8 เคคแบนด์ (Dead Band)

เคคแบนด์กำหนดได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าที่มากที่สุดในการวัดที่ซึ่งเครื่องมือวัดไม่สามารถตอบสนองได้ เช่น ในกราฟของเอาต์พุต-อินพุตที่มีผลของค่าฮิสเตอร์รีซิสอันเนื่องมาจากความผิดแบบจุดลอมป์รวมอยู่ด้วยทำให้ค่าของเคคแบนด์ขยายดังแสดงได้ดังรูป 2.3 (ก) ในกรณีนี้ก็จะประมาณเป็นสองเท่าของค่าเรสโไฮล

2.4.9 แบคแลช (Backlash)

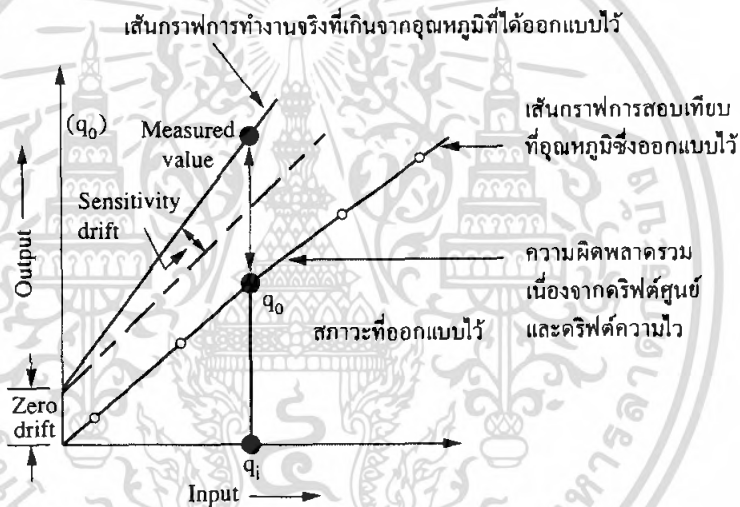
แบคแลชกำหนดได้จากระยะห่างสูงสุดหรือขนาดมุมสูงสุดซึ่งเป็นส่วนใด ๆ ของระบบทางกล ที่จะมีการเคลื่อนไหวในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง โดยไม่ทำให้ส่วนใดของอุปกรณ์ที่อยู่ถัดไปเกิดการเคลื่อนที่ค่าความผิดพลาดของแบคแลช จะเกิดขึ้นน้อยที่สุดหากว่าส่วนประกอบทุกส่วนถูกทำให้มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด คุณสมบัติข้อนี้ใช้อธิบายเกี่ยวกับการหมุนของเฟือง กล่าวคือเมื่อเฟืองขับเคลื่อนที่จะมีระยะฟรีช่วงหนึ่งที่เฟืองตามยังไม่เคลื่อนที่ต่อเมื่อเฟืองขับหมุนไปเป็นมุม ๆ หนึ่งแล้วเฟืองตามจึงเริ่มจะมีการเคลื่อนที่

2.4.10 คริปต์ (Drift)

คริปต์เป็นการกำหนด การเปลี่ยนแปลงค่าทางด้านเอาต์พุตที่ป้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความไวของเครื่องมือวัด ที่เข้ามามีผลจากค่าทางด้านอินพุตที่แน่นอน เช่นการเปลี่ยนแปลงของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อำนาจของสมมุติฐาน พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุณหภูมิ ความไม่มีเสถียรภาพของส่วนประกอบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น เอาต์พุตของวงจรสเตรนเกจเนื่องจากวงจรบริดจ์ที่ปราศจากการชดเชยจากคัมมีสเตรนเกจ (เกจชดเชยอุณหภูมิ) โดยสามารถแสดงคุณสมบัติของเอาต์พุต-อินพุต ดังรูปที่ 2.4 ถ้าอุณหภูมิรอบ ๆ มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่มีการสอบเทียบเครื่องมือวัดแล้ว การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรอบ ๆ ก็เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของสเตรนเกจ ผลอันนี้ทำให้วงจรบริดจ์เกิดการไม่สมดุลในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานนี้จะทำให้ความไวหรือสเกลแฟกเตอร์ของเครื่องมือวัดเปลี่ยนแปลงไป อันจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นโค้งเอาต์พุต-อินพุตด้วย (จากรูปที่ 2.4) ดังนั้นผลรวมของความผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับคริปต์จะเกิดจากของคริปต์ศูนย์ (zero drift) และคริปต์ความไว (sensitivity drift)



รูปที่ 2.4 ผลของคริปต์ศูนย์และคริปต์ความไวต่อคุณสมบัติของเครื่องมือวัด

จากที่สังเกตมา พบว่าเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับหลอดอิเล็กตรอน (electro tube) จะต้องมีการเตรียมพร้อมสำหรับการคริปต์ (อุ่นเครื่อง) เป็นระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นเครื่องมือวัดตัวนั้นก็จะมีสวิทช์ตัวเองขึ้นมา ดังนั้นจึงสมควรที่จะทำการเปิดสวิทช์เครื่องมือวัดซึ่งต้องการอุ่นเครื่องไว้ก่อนที่จะทำการทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ได้เข้าสู่สภาวะที่คงที่ทางอุณหภูมิ ซึ่งในลักษณะนี้ ค่าความผิดพลาดเนื่องจากคริปต์ที่เกิดจะมีค่าน้อยลง

82454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

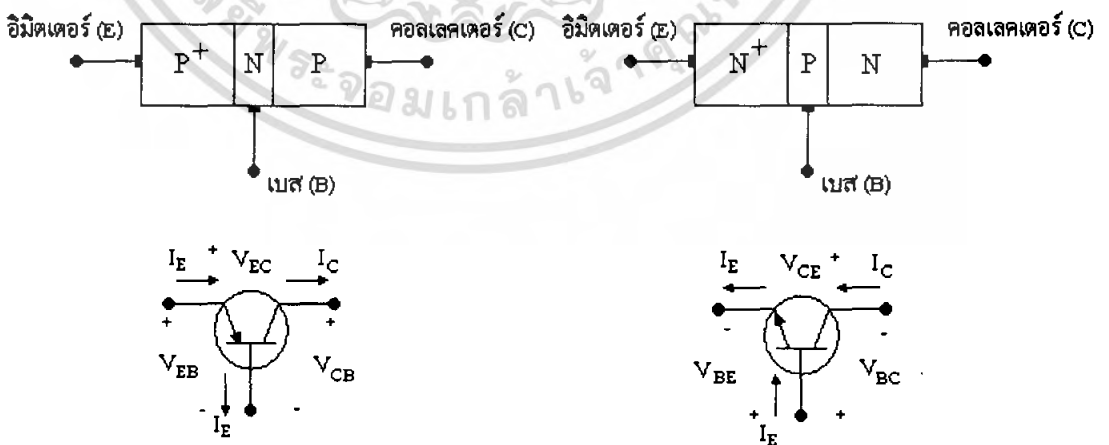
บทที่ 3

Magneto Transistor

3.1 ทฤษฎีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor)

3.1.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์

ทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อชนิดไบโพลาร์หรือ บี.จี.ที.(BJT)เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างจากผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ เช่น เซอร์มันเนียม ซิลิคอน หรือ แกลเลียมอาเซไนด์ ในปัจจุบันส่วนใหญ่สร้างจากซิลิคอน โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำเช่นชนิดเอ็นและชนิดพี จำนวน3ชั้น โดยวางสลับกัน หรืออาจพิจารณาได้ว่าประกอบด้วยรอยต่อพี-เอ็นจำนวน 2 รอยต่อทำให้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์สามารถมีได้ 2 ลักษณะหรือ2ชนิด 1.ชนิด PNP และชนิด NPN ดังแสดงในรูป(ก) ส่วนต่างๆของทรานซิสเตอร์ทั้ง3ส่วนจะทำหน้าที่ต่างกันและถูกเรียกว่า ส่วนอิมิตเตอร์(Emitter),ส่วนเบส(Base)และส่วนคอลเลกเตอร์(Collector)โดยส่วนเบสจะเป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ขนาดของส่วนเบสจะมีลักษณะที่บางมากเพื่อให้ทรานซิสเตอร์สามารถได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ส่วนอิมิตเตอร์จะเป็นส่วนที่มีความหนาแน่นของพาหะมากที่สุด(N^+ หรือ P^+)เพื่อทำหน้าที่ในส่วนอิมิตเตอร์โดยสมบูรณ์ รอยต่อพี-เอ็นระหว่างส่วนอิมิตเตอร์และเบสถูกเรียกขานว่า"รอยต่ออิมิตเตอร์"(Emitter Junction)และรอยต่อระหว่างเบสและคอลเลกเตอร์ถูกเรียกขานว่า"รอยต่อคอลเลกเตอร์"(Collector Junction)แต่ละส่วนของทรานซิสเตอร์จะถูกสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกกับโลหะเพื่อการเชื่อมกับเส้นลวดตัวนำออกไปยังภายนอกของตัวทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทรานซิสเตอร์และสัญลักษณ์มาตรฐานของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ทั้งชนิด PNP และชนิด NPN แสดงได้ดังรูปที่ 3.1(ข) โดยทิศของลูกศรซึ่งกำหนดไว้ที่ขั้วต่างๆจะมีทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเครื่องหมายบวกและลบแสดงการเปรียบเทียบของระดับศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วต่างๆ ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ pnp ทำงาน โสไลต์จากส่วนของอิมิตเตอร์ (P^+ -Emitter) จะถูกทำให้เคลื่อนที่ ข้ามรอยต่ออิมิตเตอร์เข้าไปยังเบส จากนั้น โสไลต์เหล่านี้ (diffusion) ข้ามส่วนเบสไปยังคอลเลกเตอร์และไปออกที่ขั้วคอลเลกเตอร์ ดังนั้นจึงทำให้มีกระแสไหลในทิศทางของอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลกเตอร์ ลูกศรของอิมิตเตอร์ I_E จึงชี้เข้าที่ขั้วอิมิตเตอร์ (E) และลูกศรของกระแสคอลเลกเตอร์ I_C ชี้ออกจากขั้วคอลเลกเตอร์ (C) อย่างไรก็ตามการแพร่ของโซลิตข้ามส่วนเบสไปยังคอลเลกเตอร์จะมีโซลิตจำนวนหนึ่งถูกรวมตัวใหม่ (Recombination) กับอิเล็กตรอนในส่วนเบสชนิดเอ็นทำให้เกิดมีกระแสเบส ซึ่งมีทิศทางชี้ออกจากขั้วเบส (B) สำหรับกรณีของทรานซิสเตอร์ชนิด npn ขณะทำงาน อิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์ชนิดเอ็น (n^+ -emitter) จะถูกทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่ออิมิตเตอร์เข้าไปในส่วนเบสชนิดพี และอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งจะถูก โสไลต์ในเบสชนิดพีรวมตัวทำให้เกิดกระแสเบส (I_B) โดยมีทิศทางชี้เข้าที่ขั้วเบส (B) จากนั้นอิเล็กตรอนส่วนที่เหลือจะแพร่ข้ามเบสเข้าไปยังคอลเลกเตอร์และไปออกที่ขั้วคอลเลกเตอร์ทำให้เกิดมีกระแสคอลเลกเตอร์ไหลเข้าที่ขั้วคอลเลกเตอร์ (C) กระแสคอลเลกเตอร์ I_C จึงชี้เข้าที่ขั้วคอลเลกเตอร์ เช่นเดียวกันก็จะมีกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) ไหลออกจากขั้วอิมิตเตอร์ด้วยดังแสดงในรูป 4.1 (ข) จากรูปสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ทั้งกรณี pnp และ npn เมื่อพิจารณาที่ขั้วทั้ง 3 ของทรานซิสเตอร์ จะเห็นว่ามีทั้งกระแสไหลเข้าและกระแสไหลออกจากตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งกระแส ทั้ง 2 ส่วนนี้จะต้องมีค่าเท่ากัน หรือผลรวมของกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_E = I_B + I_C \quad (3.1a)$$

ถ้าพิจารณาว่าผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมขั้วต่างๆของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์จะได้ว่า

$$V_{BE} + V_{CB} + V_{CE} = 0 \quad (3.1b)$$

โดยที่ $V_{CE} = -V_{EC}$

จากสมการที่ (2.1a) และ (2.1b) ถ้าหากรู้ค่ากระแสหรือค่าของแรงดันสองค่าเราก็สามารถที่จะคำนวณหาค่าของกระแสหรือแรงดันที่เหลือได้ ดังที่สมการ (2.1a) และ (2.1b) จึงเป็นสมการกระแสและแรงดันที่สำคัญของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ สามารถนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์การทำงานของทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดี ในปัจจุบันนี้ทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อแบบไบโพลาร์ที่ผลิต

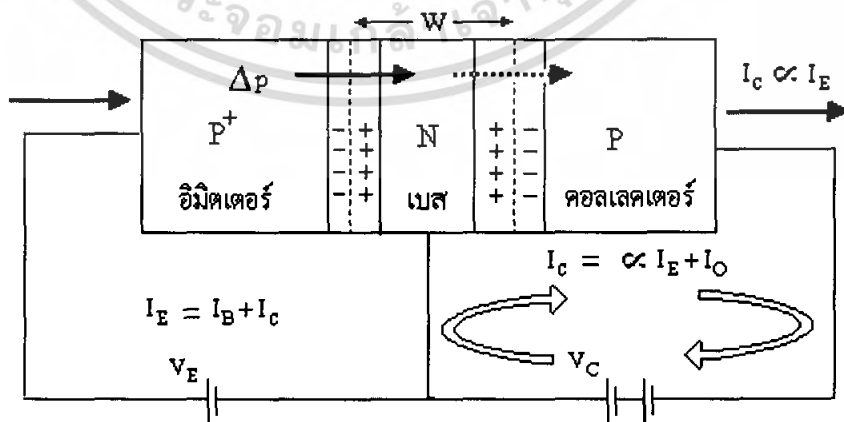
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาใช้งานกันมักจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบพลาเนียร์(Plana structure) กล่าวคือขั้วโลหะของส่วนต่างๆของทรานซิสเตอร์จะถูกต่อออกมาจากผิวหน้า ด้านบนของตัวทรานซิสเตอร์

3.12 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ทั้งแบบ pnp และ npn มีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน จแตกต่างกันก็เพียงแต่ทิศทางการไหลของกระแส ระดับของศักย์ไฟฟ้า และค่าคงที่ต่างๆของพาหะแต่เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในเบื้องต้น เราจะใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด pnp เป็นกรณีตัวอย่างทั้งนี้เนื่องทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลเป็นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

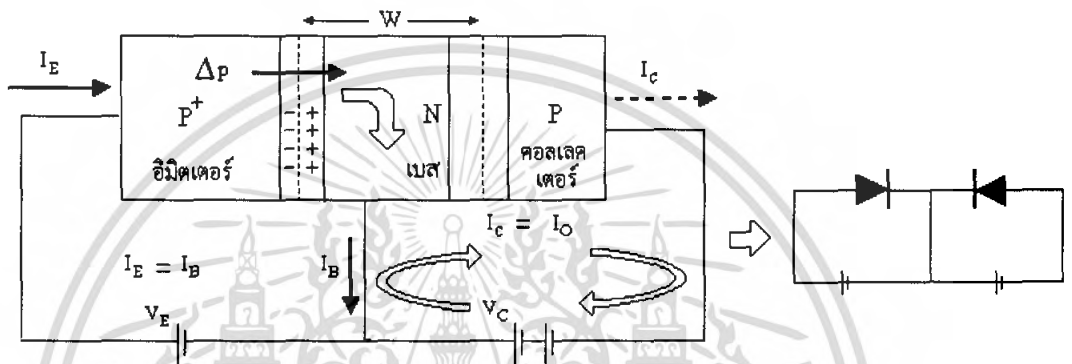
หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ส่วนใหญ่จะเป็นการทำงานแบบ Normal operation หรือ Forward active operation ซึ่งรอยต่ออิมิตเตอร์จะถูกให้แรงดันไบอัสตรงและรอยต่อคอลเลคเตอร์จะถูกให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งในสถานะดังกล่าวนี้จะทำให้พาหะส่วนมาก (Majority carrier) จากส่วนอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสแล้วพาหะเหล่านี้จะเคลื่อนที่โดยแพร่ข้ามส่วนเบสตรงไปยังรอยต่อคอลเลคเตอร์ ในขณะที่พาหะข้ามเบส จะมีพาหะบางถูกรวมตัวใหม่ (Recombination) กับพาหะในส่วนเบส จึงทำให้ความหนาแน่นของพาหะน้อยไปเบสลดลงเรื่อยๆกับระยะทางในส่วนเบสอย่างไรก็ดีโดยปรกติแล้วทรานซิสเตอร์จะถูกออกแบบให้ส่วนเบสมีขนาดบางมากๆเช่นราว 1 ไมโครเมตรซึ่งความกว้างของเบส(w) ในระดับนี้จะมีค่าน้อยกว่าขนาดความยาวของ “ระยะการแพร่”(diffusion length :L) ของพาหะส่วนน้อย ดังนั้น พาหะจากอิมิตเตอร์เกือบทั้งหมด จึงสามารถแพร่ข้ามส่วนเบสบางๆเข้าไปยังส่วนคอลเลคเตอร์ได้ ทำให้เกิดมีกระแสคอลเลคเตอร์การทำงานเช่นนี้ถือเป็นสถานะการทำงานปรกติของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์หรือการทำงาน”สถานะเปิด”(ON)ที่ปริมาณกระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งเป็นกระแสทางด้านเอาต์พุต จะถูกควบคุมด้วยกระแสอิมิตเตอร์ซึ่งเป็นกระแสด้านอินพุตดังแสดงในรูปดังนี้



รูปที่ 3.2 การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด pnp ซึ่ง $W \ll L_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ส่วนเบสมีขนาดความกว้างมากๆ เช่นมากกว่าระยะการแพร่ของพาหะ($W > L$) จะทำให้พาหะจากอิมิตเตอร์เกือบทั้งหมด ถูกรวมตัวใหม่กับพาหะในเบส จึงไม่มีพาหะเหลือไปถึงส่วนคอลเลคเตอร์ กระแสคอลเลคเตอร์จึงเป็นกระแสอิมิตเตอร์ย้อนกลับ I_0 ของรอยต่อคอลเลคเตอร์ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงหรือเกี่ยวข้องกับกระแสด้านอินพุตการทำงานในลักษณะเช่นนี้ถือว่าทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสถานะปิด (OFF) โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่มีส่วนเบสกว้างๆ



รูปที่ 3.3 กรณีที่เบสกว้างๆซึ่ง $W \ll L_p$ พาหะจากอิมิตเตอร์ไม่สามารถแพร่ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ได้

เช่นนี้จึงมีสภาพคล้ายกับไดโอด ชนิดรอยต่อ พี-เอ็น 2 ตัวถูกนำมาต่อเข้าด้วยกัน โดยหันขั้วเอ็นหรือพีเข้าด้วยกัน แสดงดังรูป 3.5 โครงสร้างดังกล่าวจึงไม่แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

ดังนั้นนอกจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะต้องมีโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้นเป็น pnp หรือ npn หรือมี 2 รอยต่อแล้ว ขนาดความกว้างของเบส (W) ของทรานซิสเตอร์จะต้องมีขนาดแคบๆ โดยมีค่าน้อยกว่าระยะการแพร่ของโฮล (L_p) และอิเล็กตรอน (L_n) ตามลำดับ ซึ่งเบสมีความกว้างน้อยๆปริมาณที่จะข้ามเบสเข้าไปในส่วนคอลเลคเตอร์ยังมีค่ามากขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเบสยิ่งแคบกระแสคอลเลคเตอร์ยิ่งมากหรือเบสยิ่งแคบการทำงานของทรานซิสเตอร์ยิ่งมีประสิทธิภาพสูงนั่นเอง

3.13 โหมดการทำงานและการไบอัสทรานซิสเตอร์

การให้ไบอัสทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ประกอบด้วยรอยต่อแบบ พี-เอ็น จำนวน 2 รอยต่อคือรอยต่ออิมิตเตอร์และรอยต่อคอลเลคเตอร์ซึ่งการให้ไบอัสแก่รอยต่อ พี-เอ็น สามารถทำได้ 2 แบบคือการให้ไบอัสตรง(Forward bias)และการให้ไบอัสย้อนกลับ(Reverse Bias) ดังนั้น การให้ไบอัสแก่ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงสามารถทำได้ 4 แบบ หรือ 4 โหมด การให้ไบอัสแก่ทรานซิสเตอร์ในแบบต่างๆถูกเรียกว่า biasing mode ซึ่งแต่ละโหมดของการให้ไบอัส จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในลักษณะที่ต่างกัน ซึ่งเราเรียกว่า”โหมดการทำงาน”(operation mode) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์มีรูปแบบการให้ไบอัส 4 รูปแบบหรือ 4 โหมดขึ้นอยู่กับกรให้ไบอัส หรือ “ไบอัสซิวต์ โหมด”ซึ่งมี 4 โหมดการทำงานคือ

1. แอคทีฟโหมด (Active mode) หรือ Forward active mode

หมายถึงการให้ไบอัสแก่ทรานซิสเตอร์โดยรอยต่ออิมิตเตอร์เป็นไบอัสตรงและรอยต่อคอลเลกเตอร์เป็นไบอัสกลับ โหมดการทำงานเช่นนี้จะถูกนำไปใช้งานมากที่สุดโดยใช้กับวงจรเชิงเส้น และวงจรขยายสัญญาณลิเนียร์ต่างๆไปเช่น วงจรออปแอมป์ การทำงานในลักษณะนี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์มีอัตราขยายสูงโดยมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด

2. แซทจูเรชั่น โหมด (Saturation mode)

หมายถึงการให้ไบอัสแก่ทรานซิสเตอร์ โดย รอยต่ออิมิตเตอร์และรอยต่อคอลเลกเตอร์ไบอัสตรงเหมือนกัน ในขณะนี้จะตรงกับภาวะ”อิ่มตัว”จึงมีกระแสไหลเป็นจำนวนมาก และแรงดันตกคร่อมตรงรอยต่อต่างๆจะมีค่าต่ำ เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกนำไปใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตซ์และทำงานอยู่ในโหมดนี้จะทำให้ได้ สถานะ ON ของอุปกรณ์สวิตซ์

3. คัตออฟโหมด (Cut off mode)

หมายถึงการจ่ายไบอัสให้ปแก่ทรานซิสเตอร์โดยรอยต่อทั้ง 2 คือรอยต่ออิมิตเตอร์และรอยต่อคอลเลกเตอร์ต่างก็เป็นไบอัสย้อนกลับด้วยกันทั้งคู่ ทำให้มีกระแสไหลน้อยมาก และแรงดันที่รอยต่อต่างๆจะมีค่าสูง เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกนำไป ใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตซ์และทำงานอยู่ในโหมดนี้จะตรงกับภาวะวงจรเปิด (open circuit) และจะทำให้สถานะ OFF ของอุปกรณ์สวิตซ์การทำงานของทรานซิสเตอร์ใน

”แซทจูเรชั่น”และ”คัตออฟ” จะทำให้ทรานซิสเตอร์ คล้ายกับเป็น สวิตซ์ ซึ่งในวงจรดิจิทัล สถานะการทำงานซึ่งแรงดันตกคร่อมตรงรอยต่อมีค่าต่ำ และค่าสูงจะถูกกำหนดให้เป็นสถานะทางลอจิกคือระดับ 0 และระดับ 1 ตามลำดับ

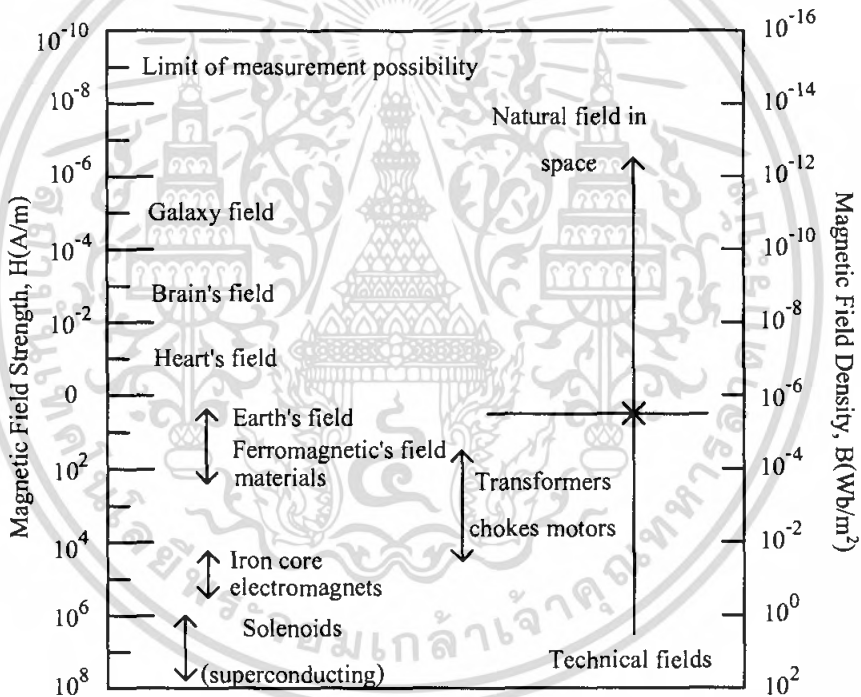
4. อินเวอร์เตจ โหมด หรือ (Inverted active mode)

หมายถึงการจ่ายไบอัสให้ปแก่ทรานซิสเตอร์ในลักษณะตรงข้ามกับกรณีของแอคทีฟโหมด กล่าวคือ รอยต่ออิมิตเตอร์และรอยต่อคอลเลกเตอร์จะเป็นไบอัสย้อนกลับ และไบอัสตรงตามลำดับ การทำงานในโหมดนี้ มีการนำไปใช้น้อย เช่นในวงจรดิจิทัลบางวงจร ทั้งนี้เนื่องจากโร โหมดนี้ทรานซิสเตอร์จะมีอัตราขยายสัญญาณต่ำมากเพราะอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์จะสลับหน้าที่การทำงานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ทฤษฎีสสนามแม่เหล็ก

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



รูปที่ 3.4 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ [15]

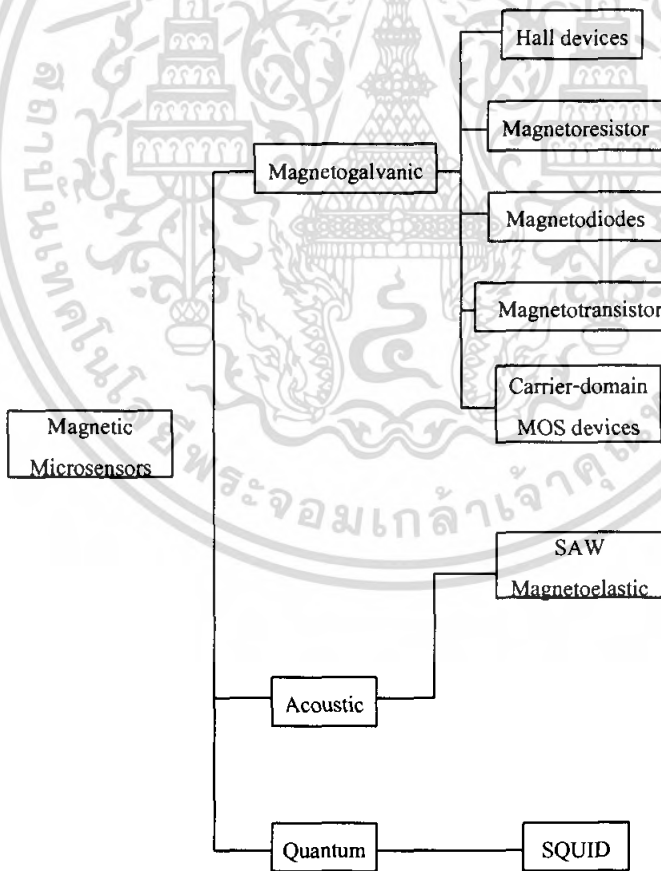
ความเข้มสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (H) แสดงหน่วยเป็น แอมแปร์/เมตร (A/m) โดยที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) มีหน่วยเป็น เทสลา (T) ซึ่งนิยามของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B คือเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) 1 เวเบอร์ ตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ 1 ตารางเมตร ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 3.5 แสดงการจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยจำแนกตามหลักการพื้นฐานของแต่ละอุปกรณ์, ชนิดของอุปกรณ์ และชนิดของสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งชนิดที่ใช้ฟิล์มที่บางและหนาของเซนเซอร์ SAW (Surface Acoustic Wave) นอกจากนี้แสดงถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีหลักการแตกต่างชนิดอื่นและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กขนาดเล็กได้โดยมีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สูงมากคือ SQUID (Super Conducting Quantum Interference) [15]



รูปที่ 3.5 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

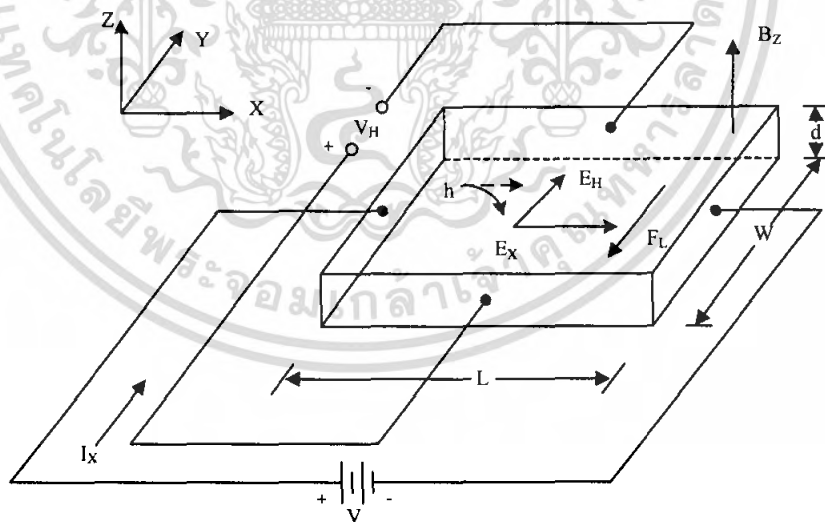
3.3 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)

3.3.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิด โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถอธิบายการทำงานจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มีแรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

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

แท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูป 3.6 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความต่างศักย์ V โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density) J_x ไหลในทิศ $+x$ และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density) B_z ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ $+z$



รูปที่ 3.6 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\overline{F_L} = e\overline{v} \times \overline{B} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\overline{F_L}$ คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|\overline{F_L}| = F_L = e.v_x.B_z \quad (3.3)$$

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

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

จาก

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

$$J_x = p.e.v_x$$

หรือ

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

แทนค่า v_x ลงในสมการ (3.5) จะได้

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

ดังนั้นจะได้

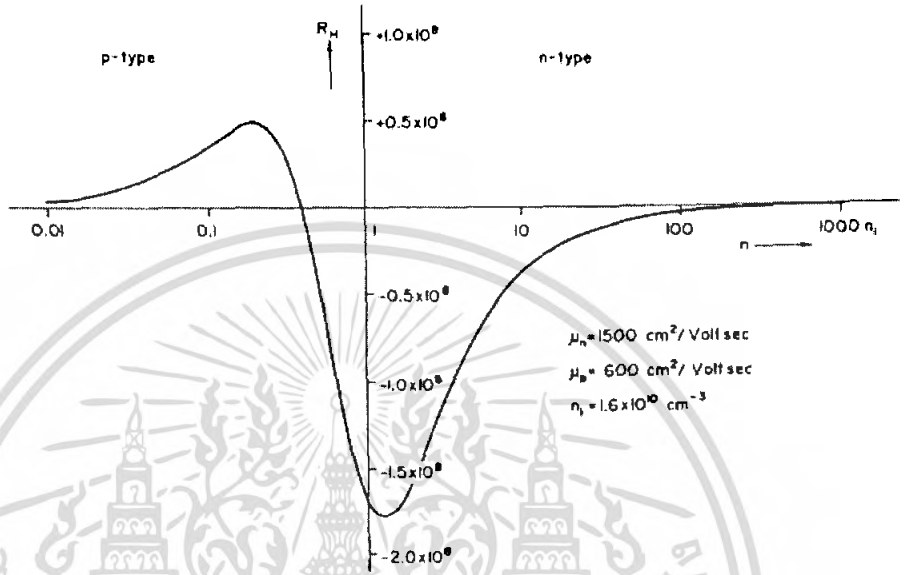
$$\frac{E_H}{J_x.B_z} = \frac{1}{p.e} = R_H \quad (3.6)$$

โดย R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

ชนิดคอนดักชันทรินซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่ง

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการได้ระดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ซึ่งจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลให้ค่าแรงดันฮอลล์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยคงจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการวัดระดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการไหลในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการไหลในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค

จากรูป 3.6 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ w จะได้

$$V_H = E_H \cdot w \tag{3.7}$$

โดย V_H คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่า $J_x = \frac{I}{w \cdot d}$ และ $E_H = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการ (3.6) จะได้

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

หรือ

$$R_H = \frac{d \cdot V_H}{I \cdot B_z \cdot p \cdot e} \tag{3.8}$$

$$V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d} \tag{3.9}$$

ความหนาแน่นของโฮล คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = \frac{1}{e \cdot R_H} = \frac{I \cdot B_z}{e \cdot d \cdot V_H} \quad (3.10)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \frac{w \cdot d}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{w \cdot d}{L} \quad (3.11)$$

จาก

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

ดังนั้นจะได้

$$\mu_p = \frac{1}{e \cdot \rho \cdot p} = \frac{1}{\rho} R_H \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.10), (3.11) และ (3.12) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

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

$$R_H = -\frac{1}{n \cdot e} \quad (3.13)$$

ดังนั้น โดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็กจะเป็น

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H \cdot G}{d} = \frac{G \cdot r_n}{q \cdot n \cdot d} \quad (3.14)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

หรือ

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

จะได้

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

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

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีนี้ที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ R_{Hl} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{Hl} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (3.15)$$

และ

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

หรือ

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

$$\mu_{Hl} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (3.16)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ R_{Hi} แสดงได้ดังสมการที่ 3.16

$$R_{Hi} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93R_H \quad (3.17)$$

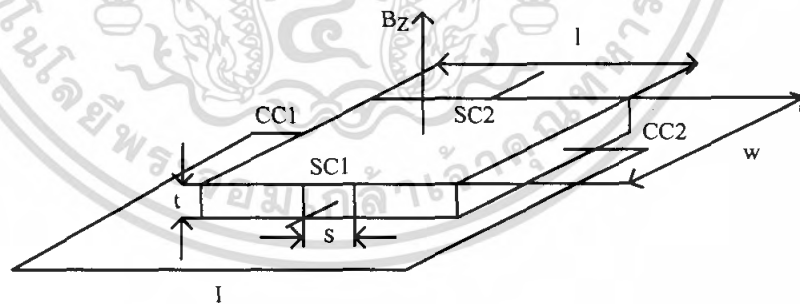
และ

$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93\mu_p \quad (3.18)$$

โดย μ_{Hi} คือสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

3.3.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีฮอลล์ (Hall Effect) โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนาที่บาง โครงสร้างประกอบด้วย 4 ขั้วใช้งานคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 ซึ่งแรงดันฮอลล์ (V_H) ถูกวัดที่ขั้ว SC1 และ SC2 โดยที่การไบอัสกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC1 และ CC2 แรงดันฮอลล์สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.18



รูปที่ 3.8 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

$$V_H = \frac{R_H}{t} \cdot G\left(\frac{l}{w}, \frac{s}{w}, \frac{y}{l}, \theta_H\right) \cdot B_z \cdot I \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot l} \cdot G \cdot B_z \cdot I \quad (3.20)$$

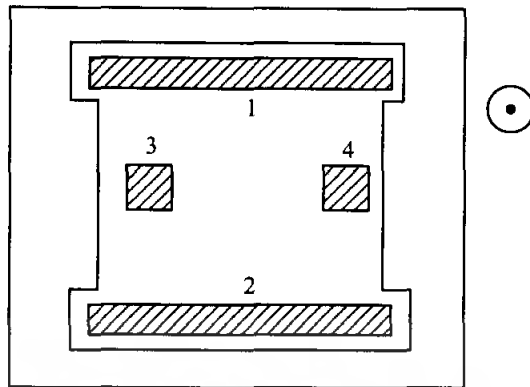
โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

จากสมการที่ 3.19 และ 3.20 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณดังสมการที่ 3.20

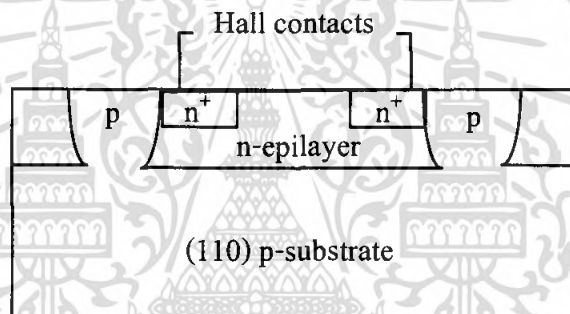
$$G = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (3.21)$$

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

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคืออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน [15] โดยรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 แสดงด้านบนและด้านดัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งชนิดเอ็น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียล 5 - 10 μm โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ $200 \times 200 \mu\text{m}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิทาเซียลสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการอิมพลานท์ (ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้



รูปที่ 3.9 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

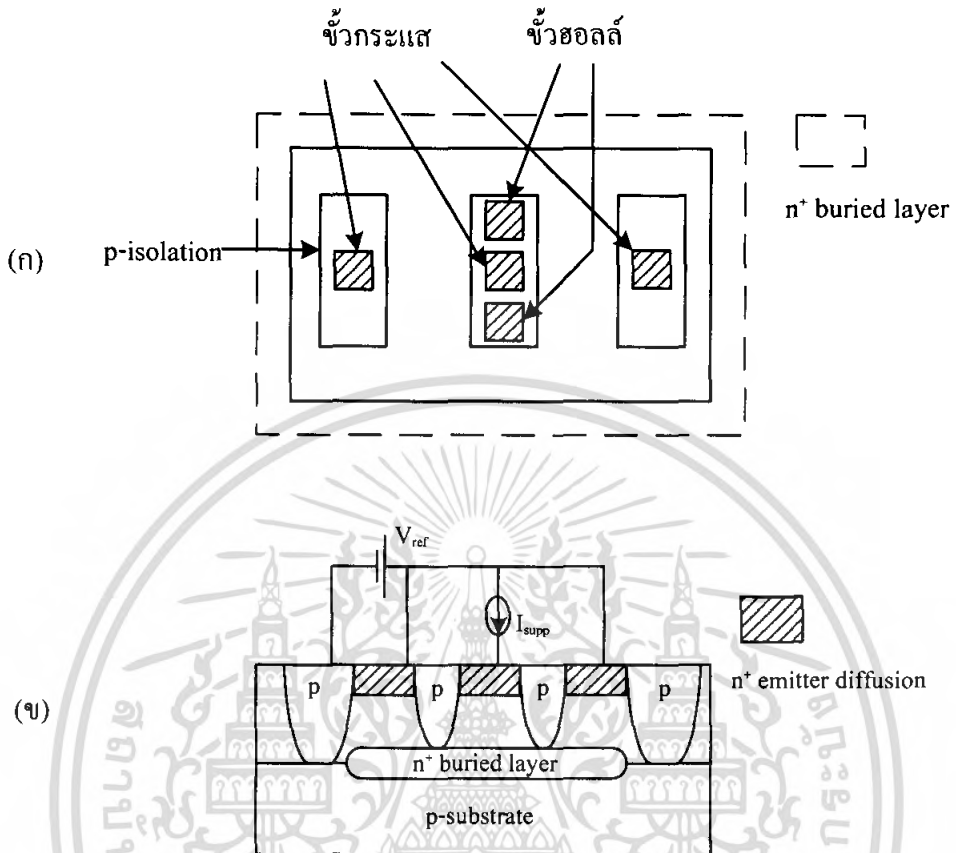


รูปที่ 3.10 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

อุปกรณ์ฮอลล์นี้ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}$ ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กประมาณ 41 V/AT โดยมีระดับสัญญาณรบกวน $1 \times 10^{-5} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ ที่ 40 Hz

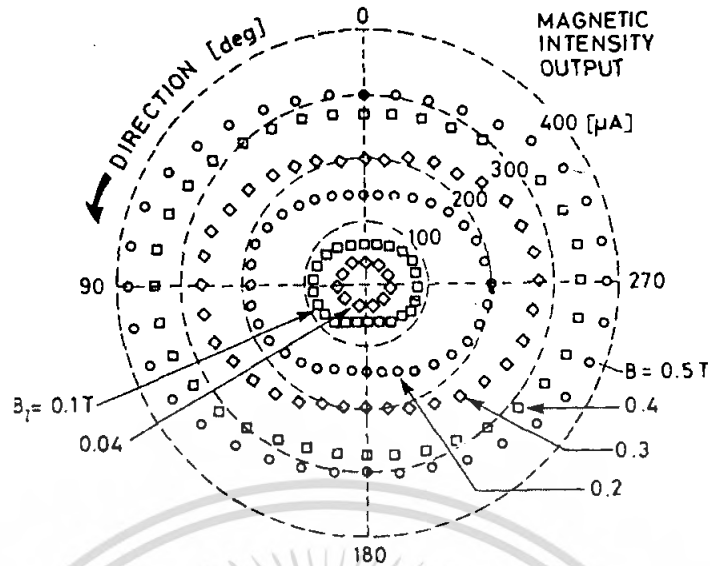
อุปกรณ์ฮอลล์ชนิดแนวตั้งและแนวนอนสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้าง CMOS เช่น อุปกรณ์ฮอลล์สามมิติแบบเข็มทิศแม่เหล็กสามารถสร้างได้ในระดับ $2 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 3.10 สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามทิศทาง (B_x , B_y , B_z) โดยการวัดอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะในมุมเบี่ยงเบนต่างๆซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ ข้อดีของอุปกรณ์ฮอลล์นี้คือมีชั้นเลเซอร์ที่บางมากประมาณ 100 \AA ทำให้มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงประมาณ $500 - 1,000 \text{ V/AT}$ แต่มีข้อเสียคือจะมีค่าสภาพความคล่องที่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แรงดัน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 เอ้าท์พุทของเข็มทิศแม่เหล็ก[15]

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้หลักการ ปรากฏการณ์ฮอลล์

3.4.1 แมกนีโตรซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแมกนีโตรซิสเตอร์ อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแทนซ์ (magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม θ ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ 3.21 และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบน θ หาได้ดังสมการที่ 3.22

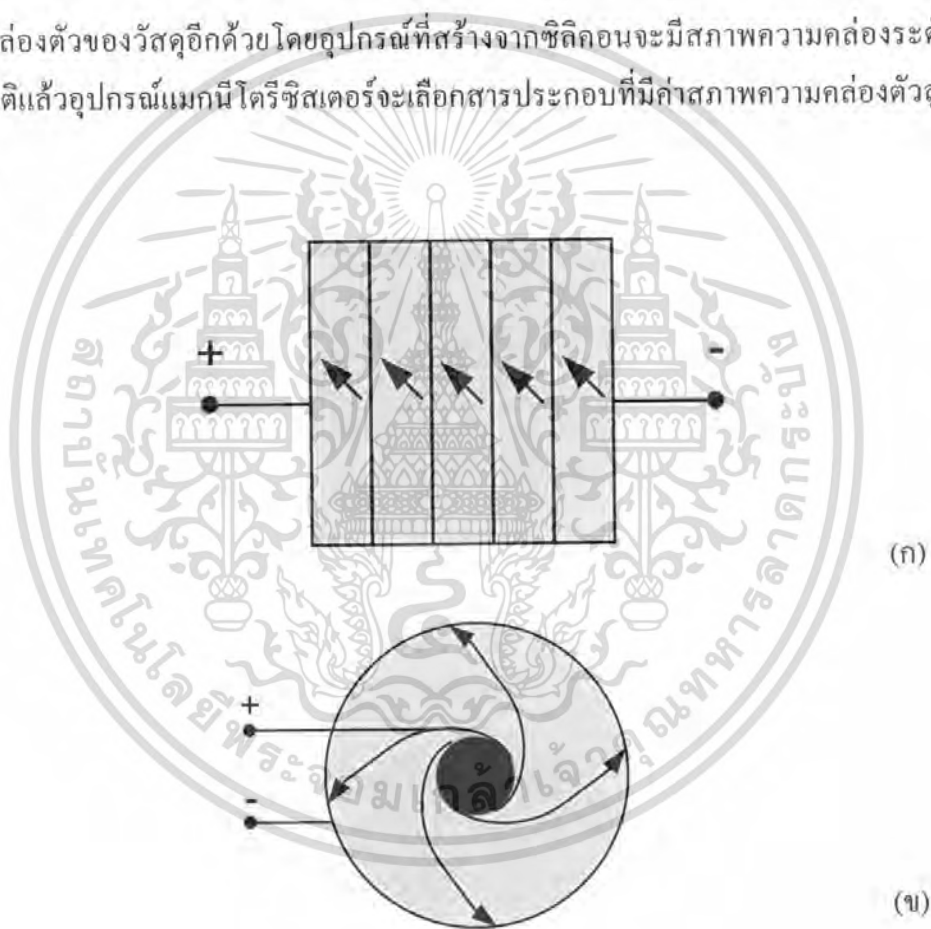
$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \quad (3.21)$$

$$R(\theta) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{ar} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \quad (3.22)$$

โดยที่ K_{ar} ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเพลทซึ่งในอุดมคติเพลทมีความกว้างมากกว่าความยาว

โดยปกติแล้วแมกนีโตรซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (parallel Hall plates) และแบบวงกลม (caibino disc) ดังแสดงรูปที่ 3.10 โดยที่รูป 3.10(ก) แสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเมกนีโตริซีสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนานซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์คือในอุปกรณ์เมกนีโตริซีสเตอร์จะไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์แต่จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 3.10(ข) แสดงโครงสร้างเมกนีโตริซีสเตอร์แบบวงกลมซึ่งเป็นโครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วยโดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีสภาพความคล่องตัวต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วอุปกรณ์เมกนีโตริซีสเตอร์จะเลือกสารประกอบที่มีค่าสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของเมกนีโตริซีสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม

3.4.2 เมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่สามแสดงดังรูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเมกนีโตไดโอดโดยมีมิติความยาว, ความกว้างและความสูง ($l \times w \times d$) อาศัยความแตกต่างของอัตราความเร็วพาหะระหว่างสองรอยต่ออันเป็นผลเนื่องมาจากเมกนีโตคอนเซนเตรชัน (magneto-concentration effect) โดยพาหะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ(recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของเมกนีโตไดโอดอีกด้วย โดยการใช้ $\text{Si-Al}_2\text{-O}_2$ และ Si-SiO_2 ที่พื้นผิวเรียกว่า SOS (Silicon-On-Sapphire) ดังแสดงรูป 3.12(ก) ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ สามารถหาได้โดยสมการที่ 3.23 [15]

$$S_{vf} = \frac{dV_f}{dB_z} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)\tau_{eff}(v_2 - v_1)}{8KTI} V_f^2 \quad (3.23)$$

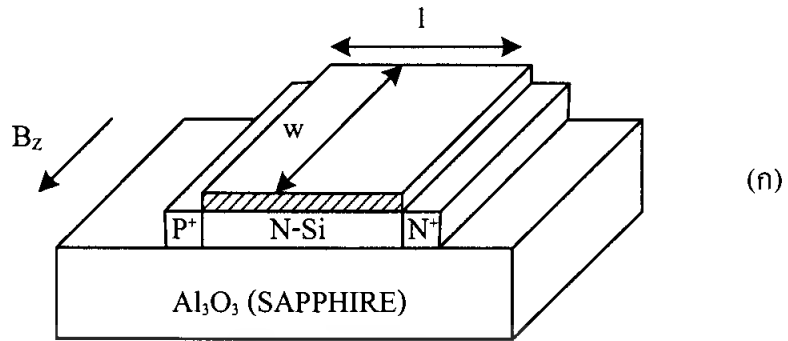
โดยที่ l คือความยาวของซิลิคอนชนิดเอ็น, v_1 และ v_2 คืออัตราการรวมตัวของพาหะ, μ_p และ μ_n คือสภาพความคล่องตัวของพาหะ และ τ_{eff} คืออายุของพาหะ



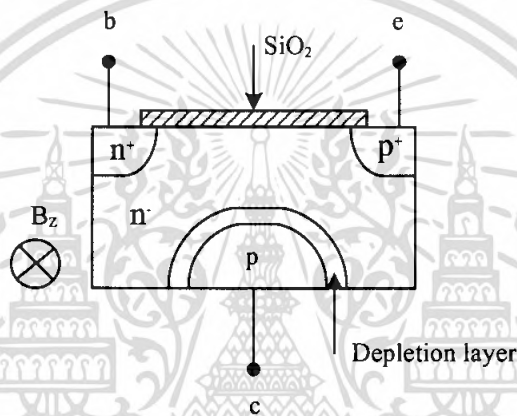
รูปที่ 3.14 โครงสร้างด้านตัดขวางของเมกนีโตไดโอด

ข้อเสียของ SOS เมกนีโตไดโอด เช่น การสร้าง $\text{Si-Al}_2\text{-O}_2$ จะเกิดขึ้นได้ยากในบริเวณผิวหน้า, ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ พื้นฐานของการใช้โครงสร้างเมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS แสดงดังรูป 3.12(ข) โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตราการรวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS เมกนีโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปจากคอลเลคเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS

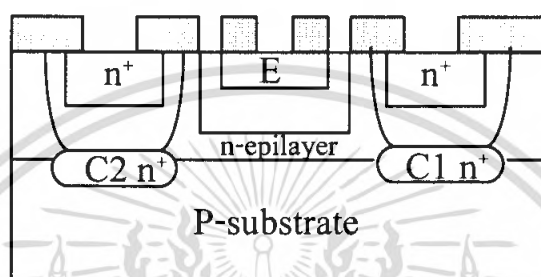
3.4.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magneto transistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งโดยสามารถแบ่งได้เป็น 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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง (Vertical magneto transistor)

รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้งโดยสร้างจากกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลคเตอร์ทั้งสองสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด n^+ เพื่อไม่ให้ข้อเซอร์กิตจึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่าง ชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง



รูปที่ 3.16 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านส่วนเบสไปยังชั้นอิมิตของคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วน โดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันอยู่ในสภาวะสมดุล $I_{C1} = I_{C2} = I_{CO} / 2$ โดยที่ I_{CO} คือผลรวมกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$ ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองหาได้โดยสมการที่ 3.23

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n^* (L / W_E) \cdot I_{CO} \cdot B \quad (3.23)$$

โดยที่ L คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์, W_E คือ ความกว้างอิมิตเตอร์ และ G คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดย

$$S = |\Delta I_C / I_{CO} B| \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ 2.4.24 ลงในสมการที่ 2.25 จะได้

$$S = G \cdot \mu_n^* (L/W_E) \tag{3.25}$$

ในสภาวะปกติขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ 3.26 และ 3.27

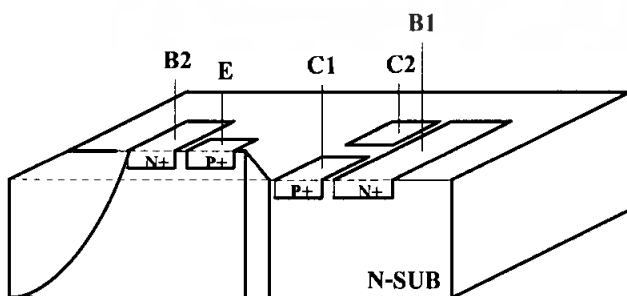
$$S_A = \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \tag{3.26}$$

$$S = V_C^{-1} \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = I_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \tag{3.27}$$

ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์นี้มีค่าประมาณ 0.03/T – 0.05/T ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์ MAGFET

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน(Lateral magnetotransistor)

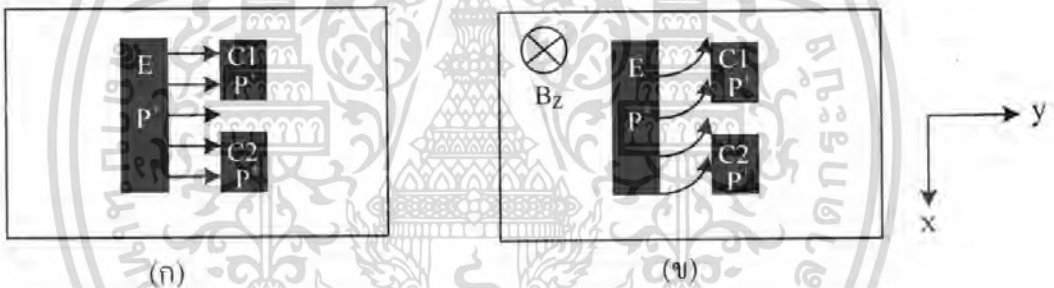
โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนแสดงดังรูปที่ 3.14 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองข้างอย่างสมมาตรโดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, สองคอลเลคเตอร์ C1, C2 และสองขั้วเบสคอนแทค B1, B2



รูปที่ 3.17 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปยังหน้าพาหะส่วนมาก (majority carriers) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลกเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลกเตอร์ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลกเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ($\Delta I_C = 0$) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 3.15(ก) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลกเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ($\Delta I_C \neq 0$) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุลแสดงดังรูปที่ 2.15(ข)



รูปที่ 3.18 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ I_{C1} และ I_{C2} ได้ดังสมการที่ 3.29 เพราะฉะนั้นผลรวมของ I_{C1} และ I_{C2} คือกระแสคอลเลกเตอร์ที่โฮลในภาวะปกตินั่นเอง ดังสมการที่ 3.30 ส่วนสมการที่ 3.31 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔI_C กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง ΔI_C แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์และแบบสมบูรณ์แสดงได้ดังสมการที่ 3.28-3.32

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \quad (3.28)$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_z \cdot I_E \quad (3.30)$$

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

$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_O \cdot \Delta B_z} \quad (3.31)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \quad (3.32)$$

ซึ่ง I_O คือแหล่งจ่ายกระแสตรงที่และ ΔB_z คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

3.5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Three terminal magneto transistor)

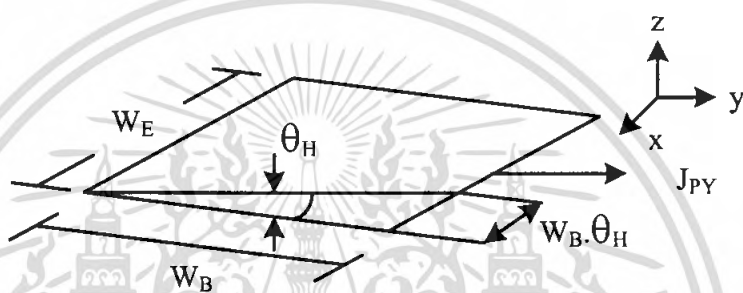
โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 3.16 เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และ คอลเลกเตอร์ C โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเป็นการพัฒนาจากโครงสร้างปกติห้าขา เพื่อสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวอน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลกเตอร์



รูปที่ 3.19 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบโครงสร้างสามขาในภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กปริมาณพาหะโฮลเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ข้ามเบสไปยังคอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์เท่ากับปริมาณพาหะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาทให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฮลที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแสเบส แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากแนวตั้ง (ทิศทาง z) ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ พาหะถูกกระทำโดยแรงลอเรนซ์ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนและเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ การวิเคราะห์การทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.17 โดยกระแสฮอลล์คือการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ดังสมการที่ 3.33



รูปที่ 3.20 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเบี่ยงเบน θ_H

$$I_E = I_B + I_C \quad (3.33)$$

กระแสฮอลล์สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮล J_{PY} ดังสมการ 2.34

$$I_E = J_{PY} \cdot W_E \cdot d \quad (3.34)$$

โดยที่ W_E คือความกว้างฮอลล์ และ d คือความลึกรอยต่อ

การไม่สมดุลของกระแสที่มีความสัมพันธ์กับความกว้างเบส W_B , สภาพคล่องตัวของโฮล μ_p และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B_z ดังสมการที่ 3.36 กระแสไหลตามแนวอนเบี่ยงเบนในมุม θ_H ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 3.35

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z \quad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\Delta Y) = W_B \cdot \mu_p \cdot B_Z \quad (3.36)$$

$$\Delta I_{CB} = J_{pY} \cdot W_E \cdot W_B \cdot \tan \theta_H \quad (3.37)$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์สามารถหาได้โดยสมการที่ 3.37 สามารถคำนวณโดยความหนาแน่นกระแส J_{pY} ในระนาบ $L = W_B$, ความกว้างอิมิตเตอร์ W_E และมุมเบี่ยงเบน $\tan \theta_H$ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดยสมการที่ 2.38

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot B_Z} \quad (3.38)$$

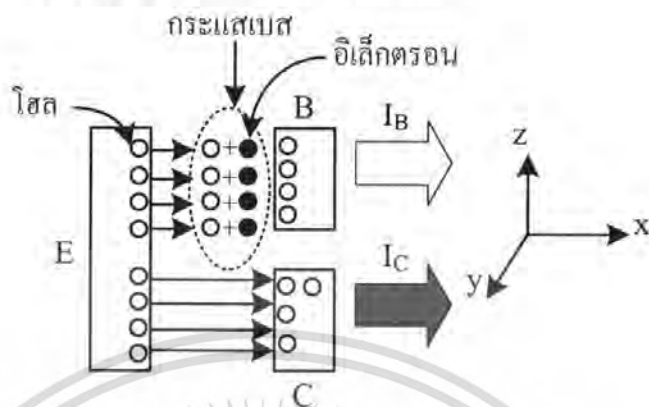
เมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับกระเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

3.5.1 การตรวจจับสนามแม่เหล็กของเมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของเมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ ($B_Z=0$) และเมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้รับการไบอัส พาหะ (โฮล) จะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปเบสโดยโฮลจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนภายในเบสกลายเป็นกระแสเบสและโฮลบางส่วนจะเคลื่อนที่ไปสะสมที่คอลเลกเตอร์กลายเป็นกระแสคอลเลกเตอร์ ทำให้พาหะที่รวมตัวในเบสและพาหะที่สะสมคอลเลกเตอร์มีปริมาณเท่าๆกันทำให้กระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์เท่ากัน ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าทั้งสอง ($\Delta I_{CB}=0$)

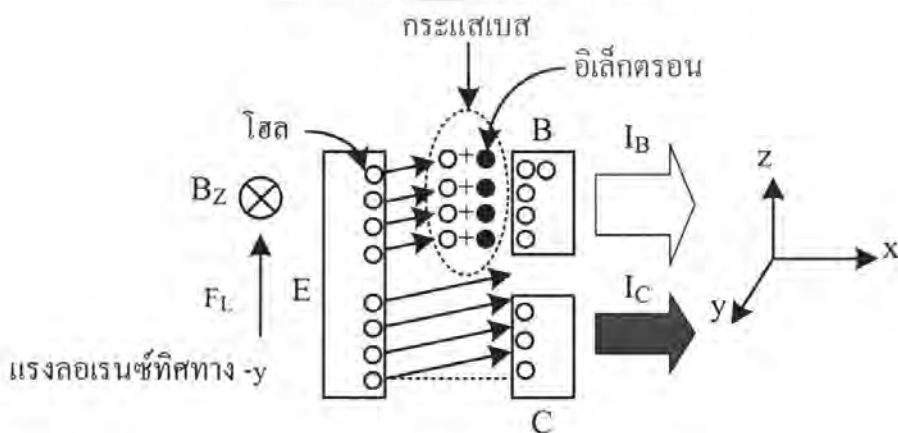
โซลรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสเป็น



รูปที่ 3.21 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ(โซล)ในภาวะปกติ

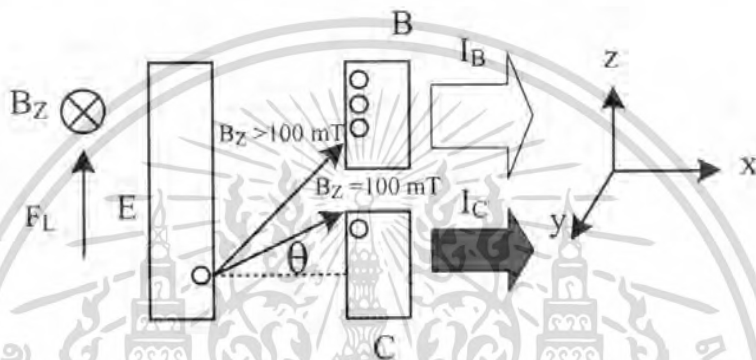
เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดมีแรงลอเรนซ์ทิศทาง $-y$ แรงลอเรนซ์กระทำกับ โซลซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง x เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ ($\Delta I_{CB} \neq 0$) สามารถวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาโดยโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขานั้นมีตำแหน่งของเบสและคอลเลกเตอร์ตรงข้ามกันและมีขนาดเท่ากัน โซลถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์จะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ นั่นคือกระแสเบสเกิดจากโซลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสและพาหะบางส่วนที่เบี่ยงเบนสะสมที่เบส โดยที่จะมีโซลอีกบางส่วนเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์ทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ (ΔI_{CB}) มีค่าสูง

โซลรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสเป็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.22 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โซล)ที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



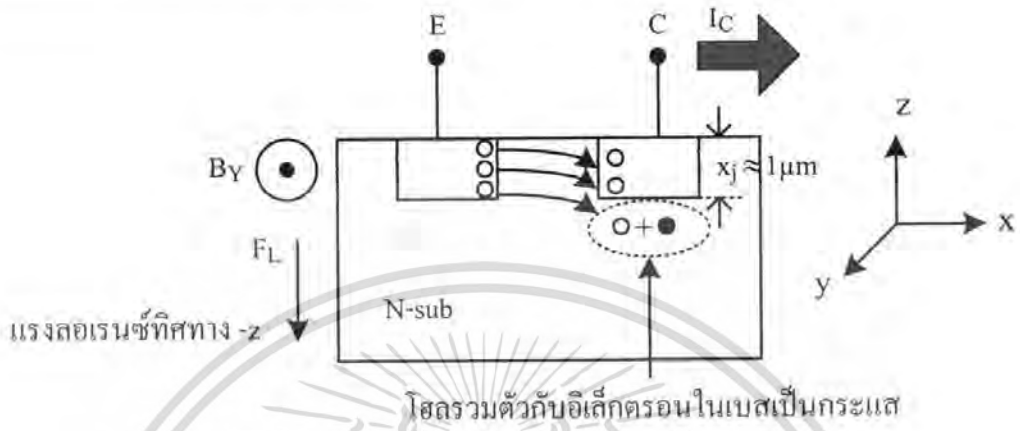
รูปที่ 3.23 พาหะ (โฮล)เคลื่อนที่ในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

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 $-z$ ซึ่งแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะโฮลที่เคลื่อนที่ในทิศทาง x โฮลจะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์และไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบส

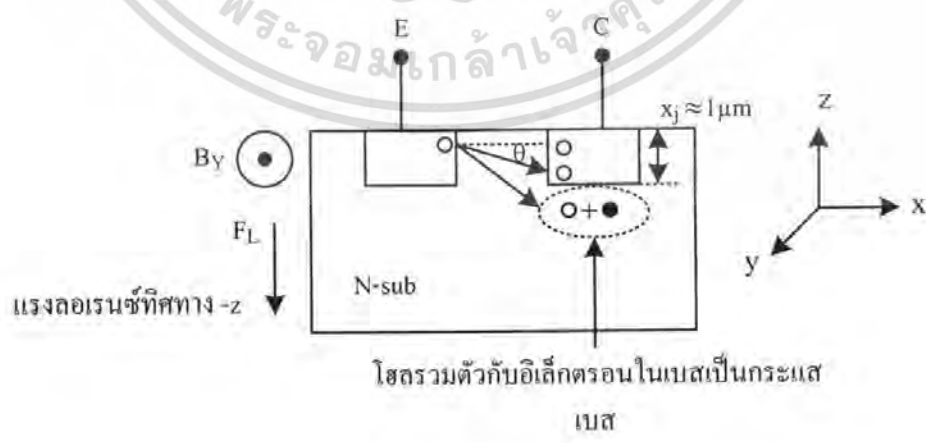
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลายเป็นกระแสเบส โดยที่มี โหลดบางส่วนเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์จะกลายเป็นกระแสคอลเลกเตอร์ นั่นคือเกิดความไม่เท่ากันของกระแสทั้งสอง ($\Delta I_{CB} \neq 0$)



รูปที่ 3.24 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง -Z

เมื่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีค่า จะทำให้แรงลอเรนซ์มีแรงกระทำกับพาหะมากขึ้น ทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบน ในมุมที่กว้างขึ้น วิเคราะห์การทำงานในรูปแบบโครงสร้างปกติ นั่นคือพาหะ(โฮล)บางส่วนที่เบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์เคลื่อนที่เบี่ยงเบน ในมุมที่กว้างขึ้นและไปสะสมที่ขั้วเบส จึงทำให้กระแสเบส I_b เพิ่มขึ้นแต่กระแสคอลเลกเตอร์ I_c ลดลง ความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง (ΔI_{CB}) จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของสนามแม่เหล็ก

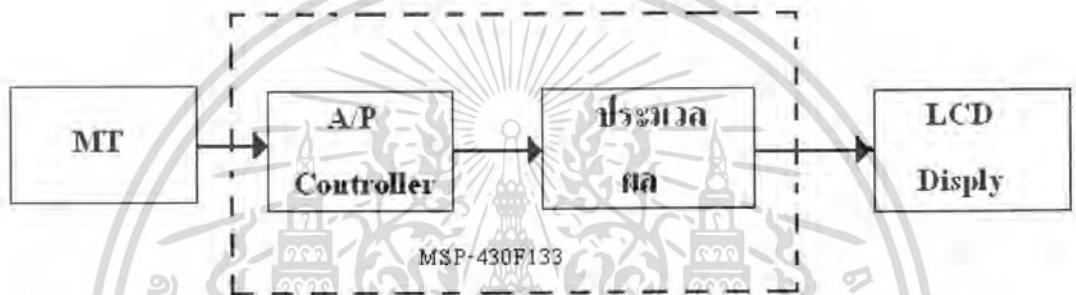


รูปที่ 3.25 การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของโฮลตามทิศทาง -Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

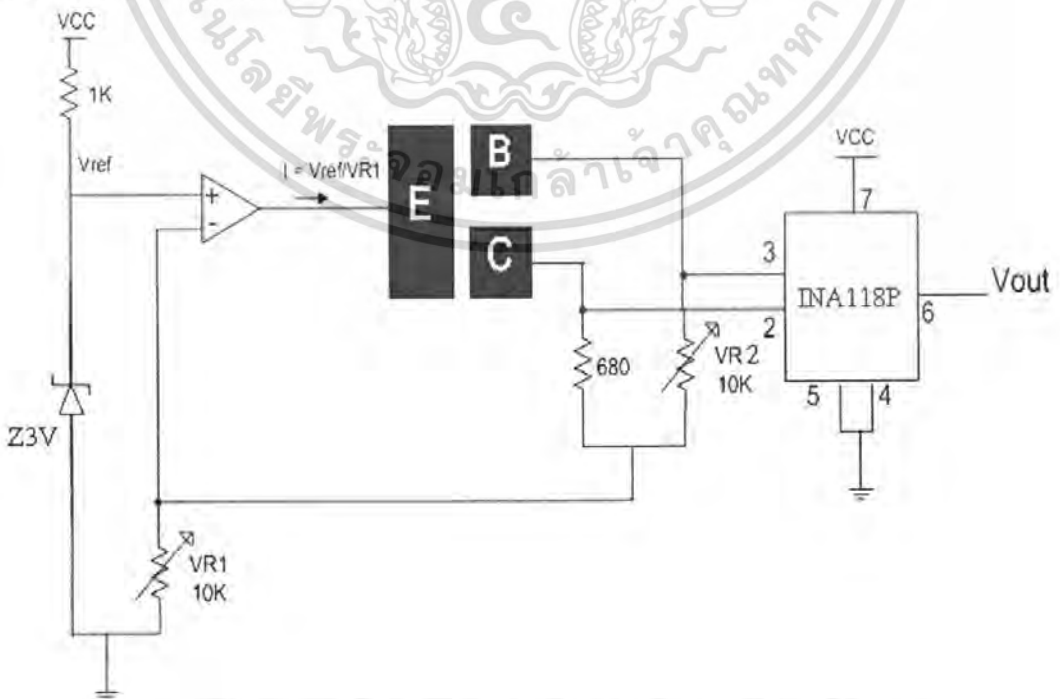
บทที่ 4 วงจรวัดค่า

ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรวัดค่าที่ใช้คู่ร่วมกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการวัดค่าของสนามแม่เหล็ก โดยแบ่งเป็นสองส่วนวงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กและส่วนแสดงผล



รูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

4.1 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กเหล็ก



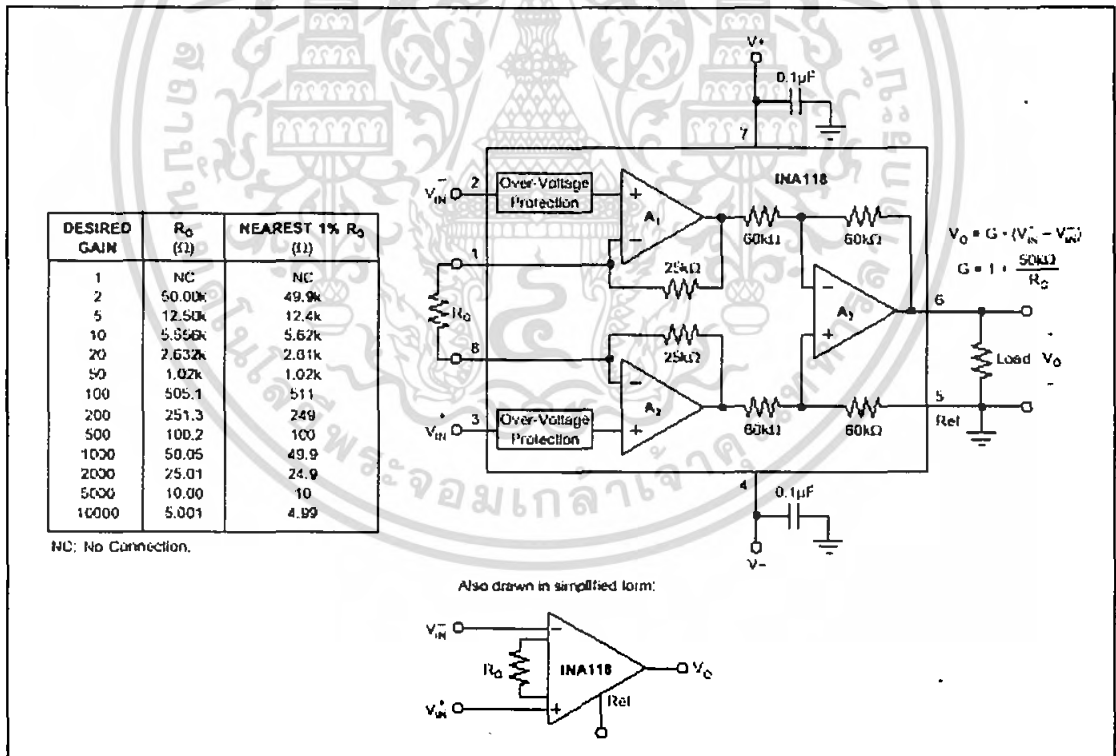
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

การทำงานของวงจร

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

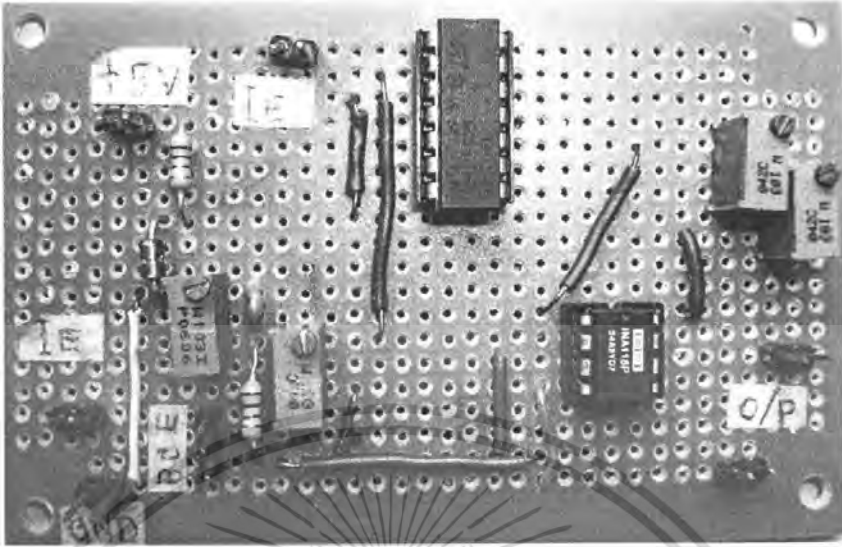
4.1.1 ภาคขยาย

โดย IC INA188 ทำหน้าที่ขยายความแตกต่างระหว่าง กระแส I_B และกระแส I_C โดยต่อเข้ากับขา 3 และขา 2 ตามลำดับ และจะสามารถปรับค่าอัตราขยายของ IC ได้โดยการปรับค่าความต้านที่ต่อคร่อมระหว่างขา 1 และขา 8 ได้ตามตาราง



รูปที่ 4.3 โครงสร้างและการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

4.2 ส่วนแสดงผล

โครงสร้างของ MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีด้วยกันหลายเบอร์ขึ้นกับโครงสร้างภายในของมัน บางเบอร์จะมีหน่วยความจำภายในเป็นแบบ ROM บางเบอร์เป็นแบบ EPROM บางเบอร์ RAM ภายใน 128 ไบต์ บางเบอร์มี 256 ไบต์ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดจะศึกษาได้จากคู่มือของมัน โดยตรง 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 สามารถใช้งานได้ทั้งอินพุต เอาต์พุต
- มี Time 16 บิต 2 ตัว
- สามารถอินเตอร์รัพท์ได้ 5 แหล่ง
- มีวงจรรอสซิงเกิลเตอร์และวงจรมอดูเลชัน
- สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
- มีพอร์ตอนุกรมที่สามารถรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex ความเร็วสูง
- สามารถประมวลผลทีละบิตได้
- สามารถอ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ 64 k

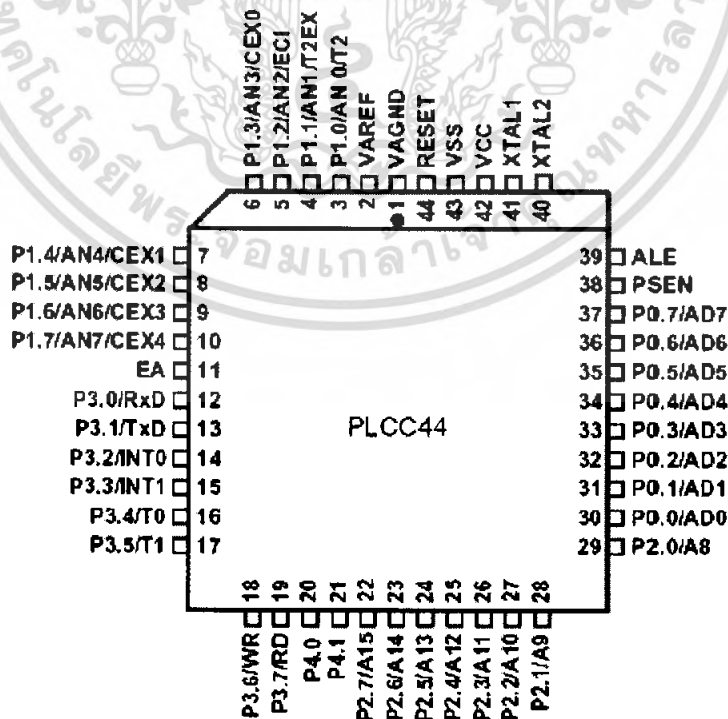
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 และลักษณะต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในตารางที่

ตารางที่ 4.1 แสดงไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่าง ๆ

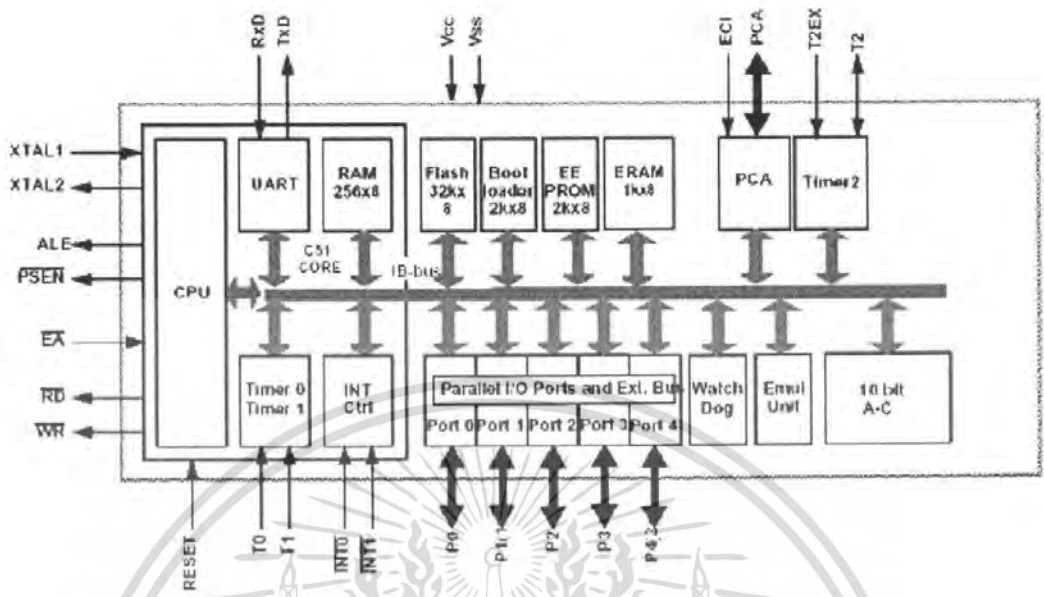
| เบอร์ | หน่วยความจำ โปรแกรมบนชิพ | หน่วยความจำข้อมูล บนชิพ | TIMERS |
|-----------|-----------------------------|----------------------------|--------|
| 8051 | 4k ROM | 128 bytes | 2 |
| 3031 | - | 128 bytes | 2 |
| 8751 | 4k EPROM | 128 bytes | 2 |
| 8052 | 8k ROM | 256 bytes | 3 |
| 8032 | - | 256 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

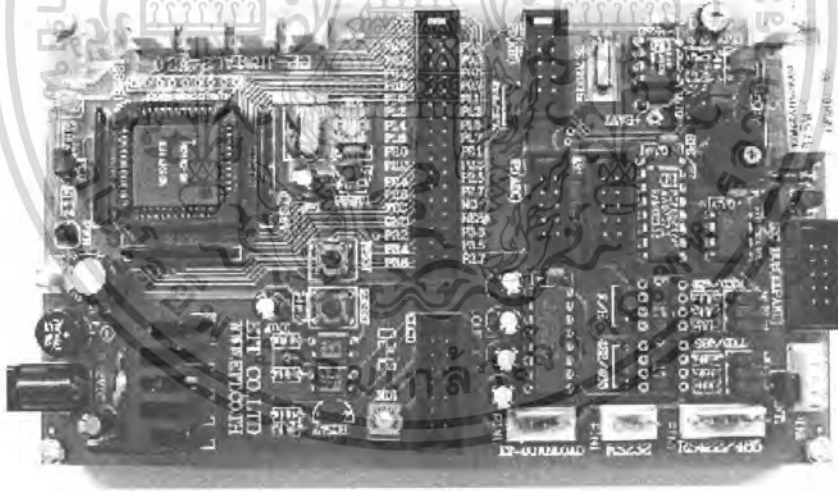


รูปที่ 4.5 แสดงการจัดขาสัญญาณของ T89C51AC2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงบล็อกโคจรแตรนของ T89C51AC2



รูปที่ 4.7 บอร์ดที่ใช้ในการทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์

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 พอร์ตได้ ทั้งหมด 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 ได้ตาม ต้องการ โดยในบอร์ดนั้นขาสัญญาณของ P0 ทั้งหมด จะถูกเชื่อมต่อไปยังขั้วต่อ 34 PIN และขั้วต่อ P0 ไว้ด้วย โดยที่ P0.0-P0.6 จะต่อตรงไปยังขั้ว P0(kbi)ทั้งหมด สัญญาณ P0.7 จะต่อไปควบคุม ลำโพง

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

P2.0-P2.7 สำหรับขาสัญญาณเหล่านี้จะสามารถใช้งานได้ทั้งเป็น Input และ Output โดย ขาสัญญาณทั้งหมดของ P2 จะถูกต่อไปยังขั้วต่อ 34 PIN ส่วน P2.0-P2.5 แล้วต่อไปยังขั้วต่อ CLCD เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของ LCD

P3.0 ทำหน้าที่เป็น RXD ของวงจรถ่ายโอนข้อมูล RS232/422/486

P3.1 ทำหน้าที่เป็น TXD ของวงจรถ่ายโอนข้อมูล RS232/422/485

P3.2 ใช้งานเป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา INTO

P3.3 ใช้งานเป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา INTO

P3.4 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0

P3.5 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1

P3.6 ใช้เป็นขาสัญญาณ WR ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

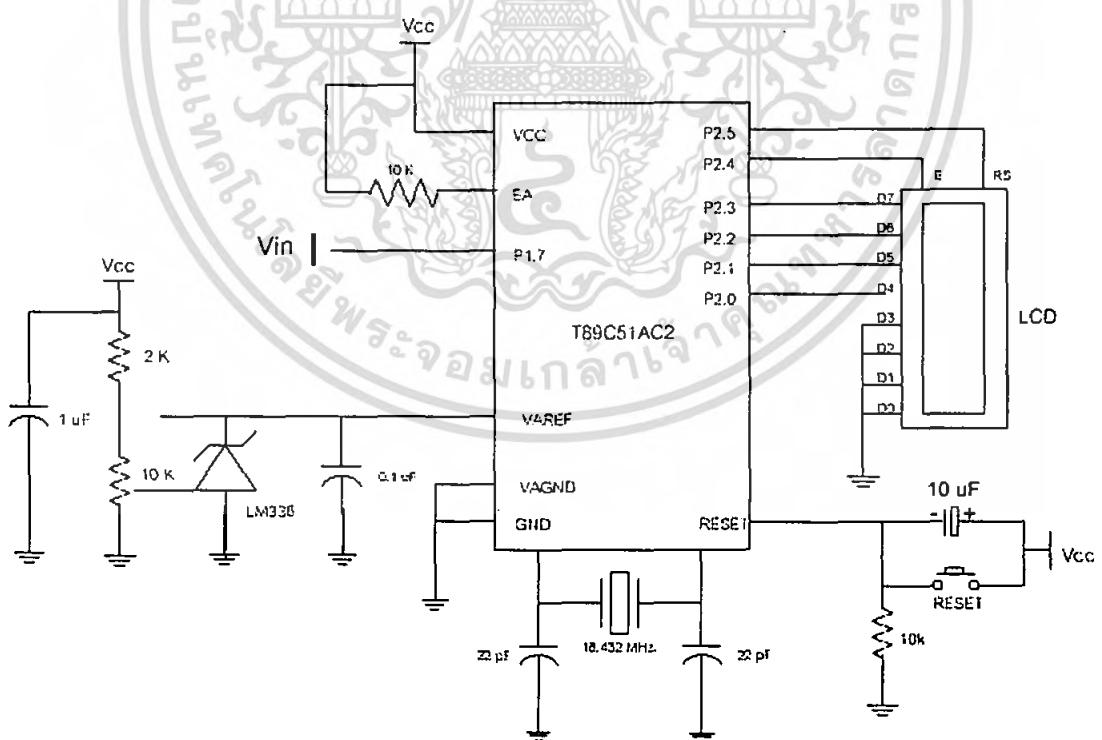
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ใช้สำหรับเลือกการติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมจากภายนอกหรือภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

ขา XTAL1 และขา XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตัลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการนัดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

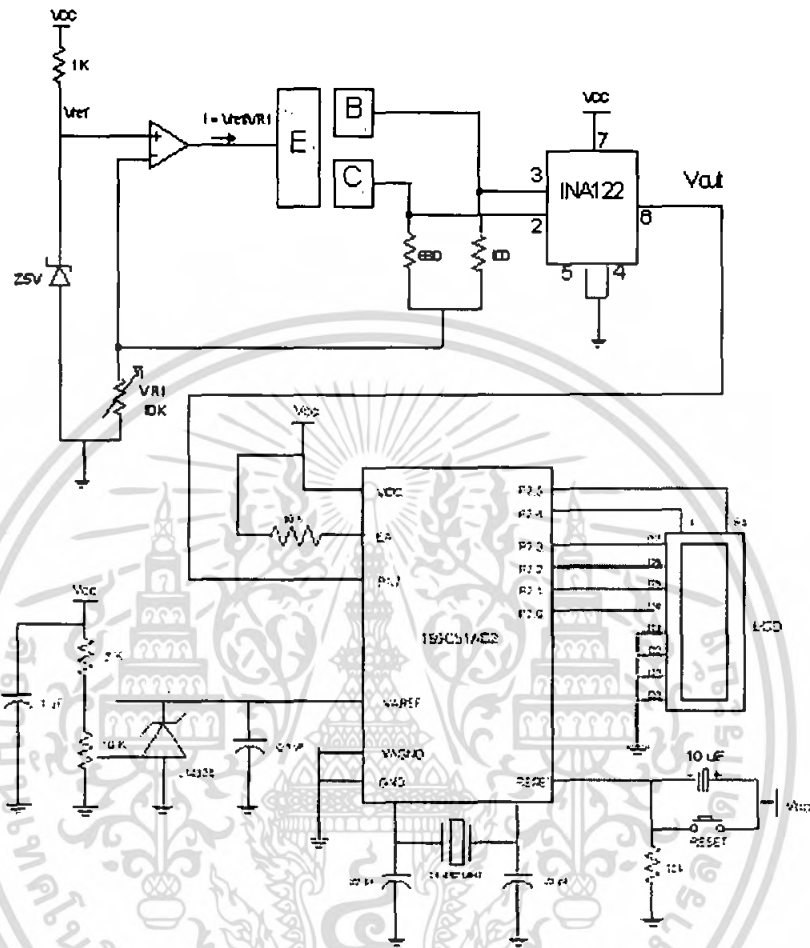
การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับส่วนแสดงผล LCD



รูปที่ 4.8 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วงจรวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กแสดงผลออกจอ LCD

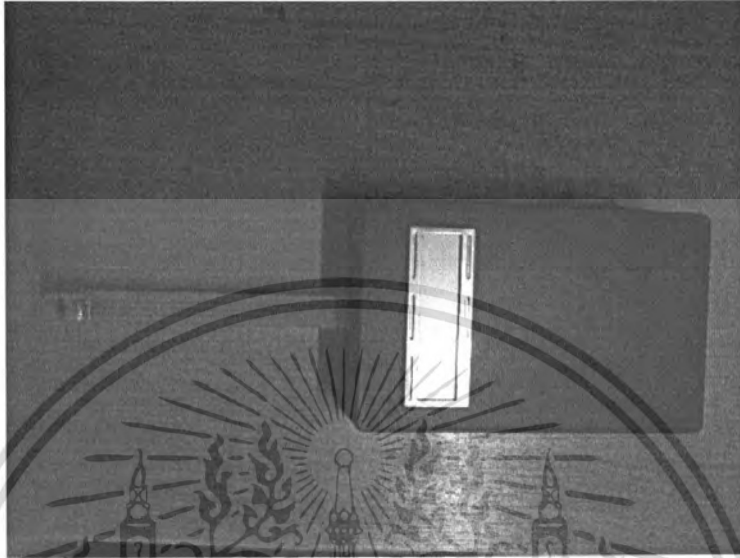


รูปที่ 4.9 วงจรวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กแสดงผลออกหน้าจอ LCD

จากรูปแสดงการเชื่อมต่อวงจรส่วนของวงจรวัดและส่วนแสดงผล โดย Output ของวงจรมหาขยายในวงจรวัดจะต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พอร์ต P1.7 ซึ่งเป็นพอร์ตใช้งาน ADC จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นดิจิตอลเพื่อส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลแล้วแสดงค่าออกมาที่หน้าจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ชุดทดลองวัดค่าการตรวจจับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.10 ชุดทดลองวัดค่าการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

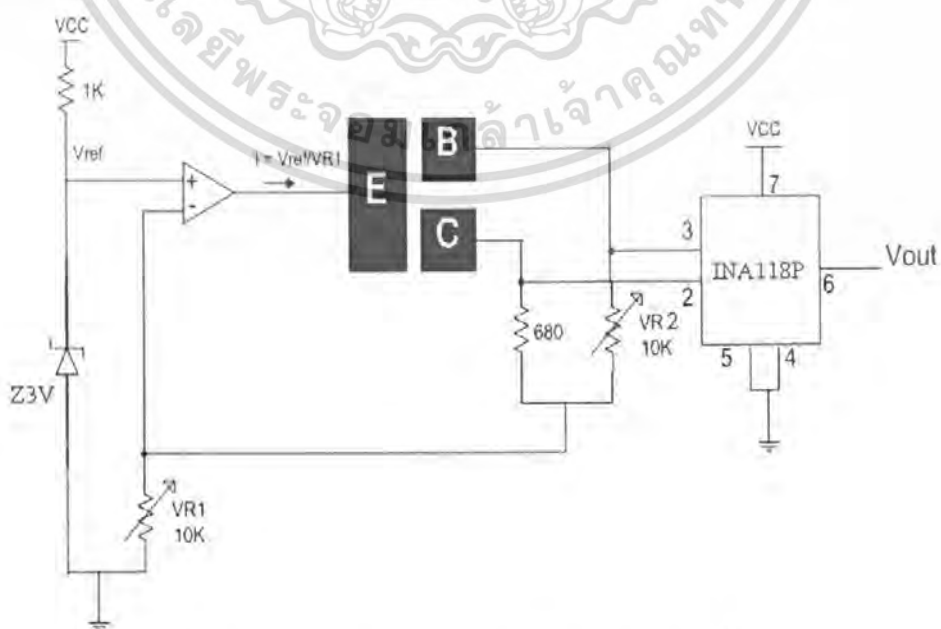
การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้เป็นการทดลองและผลการทดลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โดยแสดงการวัดคุณสมบัติรอยต่อและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ และแสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยทำการทดลองเปลี่ยนแปลงกระแสการทำงานอิมิตเตอร์และทำการเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนอีกด้วย

5.1 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

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

วงจรวัดการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

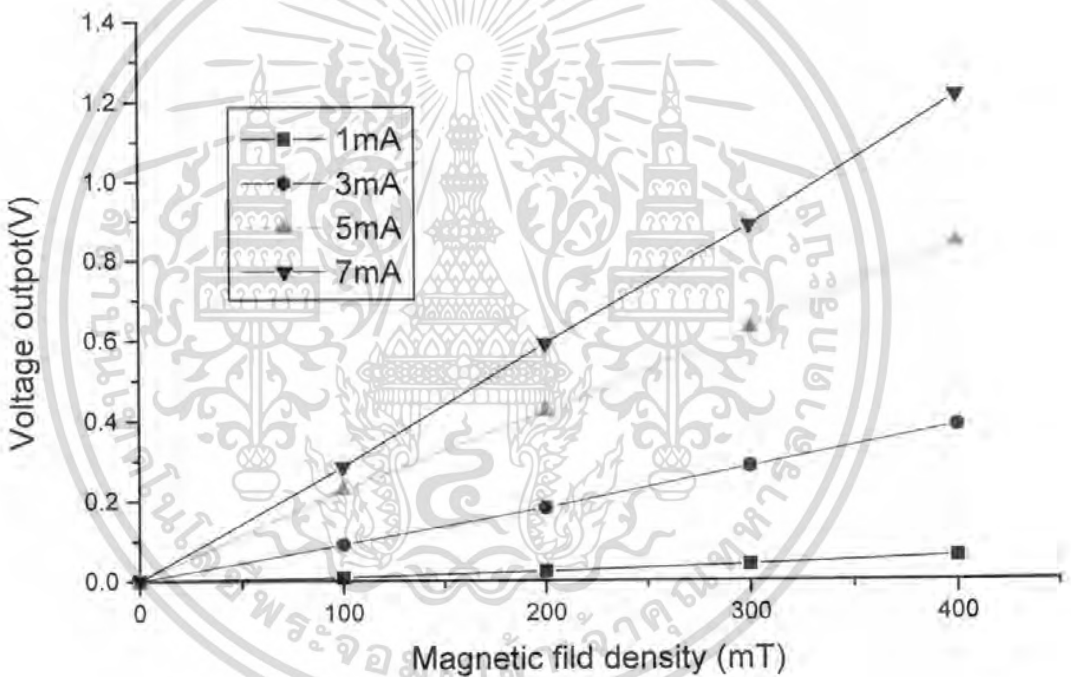


รูปที่ 5.1 วงจรการวัดทดลองแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

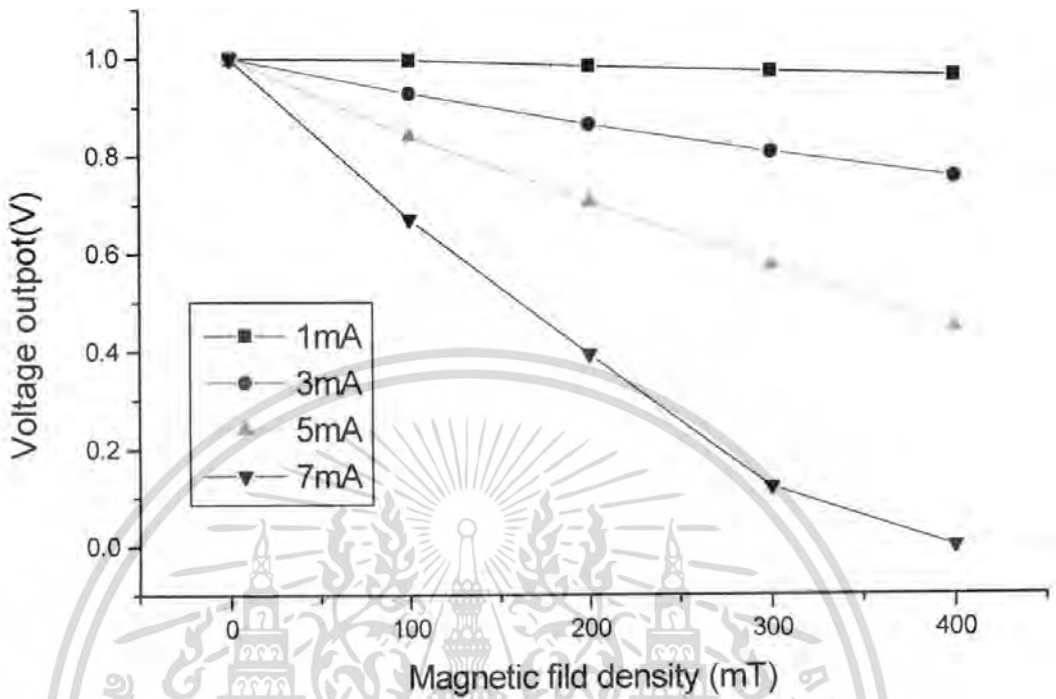
จากรูปจะประกอบไปด้วยวงจรจ่ายกระแสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ และส่วนของ วงจรขยายความแตกต่าง โดยออปแอมป์จะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ขาE โดยสามารถปรับค่ากระแสได้ที่ VR1 เมื่อแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำงานจะทำให้มีกระแสเบส และ กระแสคอลเลคเตอร์ไหลในปริมาณที่ใกล้เคียงกันแต่สามารถปรับให้กระแสทั้งสองมีค่าเท่ากัน โดย การปรับค่าVR2 เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะทำให้กระแสที่ไหลเกิดความเปลี่ยนแปลง โดย IC INA188 จะทำหน้าที่ขยายความแตกต่างออกมาที่ Output แสดงค่าออกมาเป็นแรงดัน

5.1.1 ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง (ด้านหน้าของอุปกรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง
(ด้านหลังของอุปกรณ์)

จากรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 แสดงกราฟการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่กระแสที่ค่าหนึ่งโดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจาก (0-400)mT ผลปรากฏว่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตแปรผันตรงกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและเมื่อทำการเปรียบเทียบ ณ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกันพบว่าเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับอิมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเอาต์พุตก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากรูปค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกและลบเนื่องจากลักษณะการวางอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ในทิศทางแนวตั้ง

ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 1 \text{ mA}, 3 \text{ mA}, 5 \text{ mA}$ และ 7 mA สามารถคำนวณค่าความไวตามสมการ $S_A = \Delta V / \Delta B_z$ จากผลการทดลองรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นได้ แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้โดยอาศัยกลไกความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection)

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (ด้านหน้าของอุปกรณ์) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

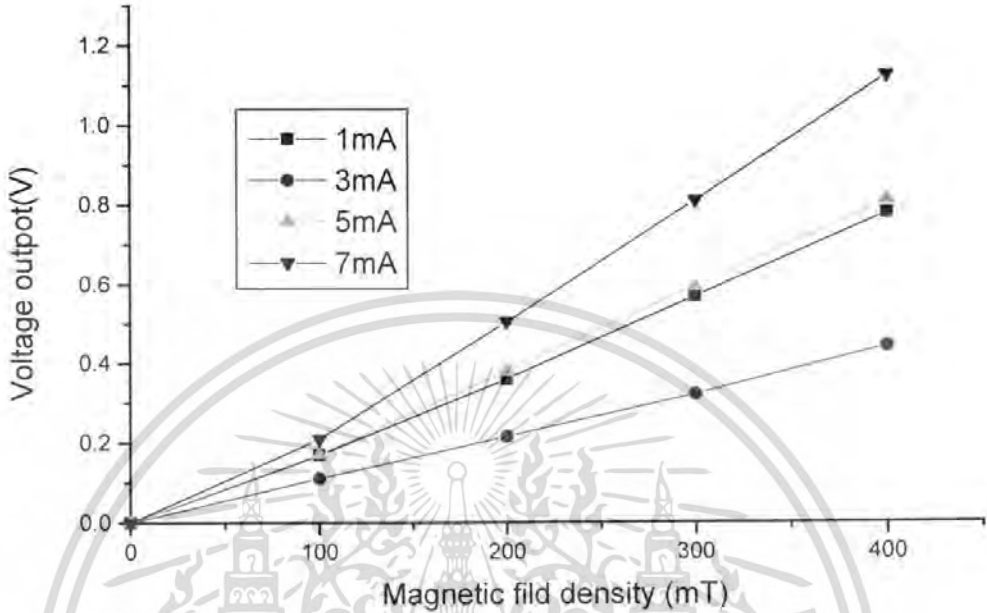
| I_E (mA) | $I_E = 1 \text{ mA}$ | $I_E = 3 \text{ mA}$ | $I_E = 5 \text{ mA}$ | $I_E = 7 \text{ mA}$ |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| S (V/T) | 0.015 | 0.962 | 2.1 | 3.03 |

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (ด้านหลังของอุปกรณ์) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

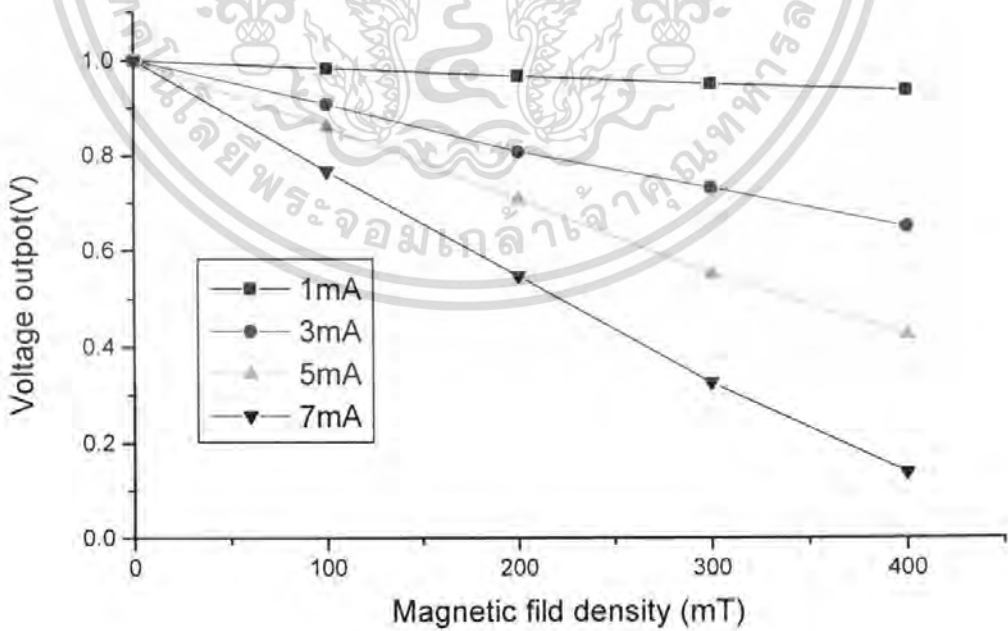
| I_E (mA) | $I_E = 1 \text{ mA}$ | $I_E = 3 \text{ mA}$ | $I_E = 5 \text{ mA}$ | $I_E = 7 \text{ mA}$ |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| S (V/T) | 0.087 | 0.615 | 1.38 | 2.60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน (อุปกรณ์ตะแกรงทางค้ำขา)



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 แสดงกราฟการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่กระแสที่ค่าหนึ่งโดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจาก (0-400)mT ผลปรากฏว่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตแปรผันตรงกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและเมื่อทำการเปรียบเทียบ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกันพบว่าเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับอิมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเอาต์พุตก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากรูปค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกและลบเนื่องจากลักษณะการวางอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ต่างกัน

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ในทิศทางแวนอน

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 3 \text{ mA}$, $I_E = 5 \text{ mA}$, 8 mA และ 10 mA โดยสามารถคำนวณค่าความไวจากสมการ $S \text{ (V/T)}$ การตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์ (ΔI_{CB}) แรงลอเรนซ์เกิดในทิศทาง $-z$ ทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์สามารถวิเคราะห์จากการทำงานตามสมการเดียวกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอน (ตะแคงด้านขวา)ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

| $I_E \text{ (mA)}$ | $I_E = 1 \text{ mA}$ | $I_E = 3 \text{ mA}$ | $I_E = 5 \text{ mA}$ | $I_E = 7 \text{ mA}$ |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $S \text{ (V/T)}$ | 0.195 | 1.11 | 2.03 | 2.81 |

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอน (ตะแคงด้านซ้าย)ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

| $I_E \text{ (mA)}$ | $I_E = 1 \text{ mA}$ | $I_E = 3 \text{ mA}$ | $I_E = 5 \text{ mA}$ | $I_E = 7 \text{ mA}$ |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $S \text{ (V/T)}$ | 0.165 | 0.88 | 1.44 | 2.15 |

จากการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแวนอน รวมถึงค่าความไวของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาพบว่าการตอบสนองของแรงดันทางด้าน

เอาที่พูดและค่าความไวในทิศทางการตรวจจับแนวโค้งให้ค่าการตอบสนองแรงดันทางด้านเอาท์พุท และค่าความไวที่ดีกว่าการตรวจจับในทิศทางแนวนอน

ค่าที่ใช้ในการไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

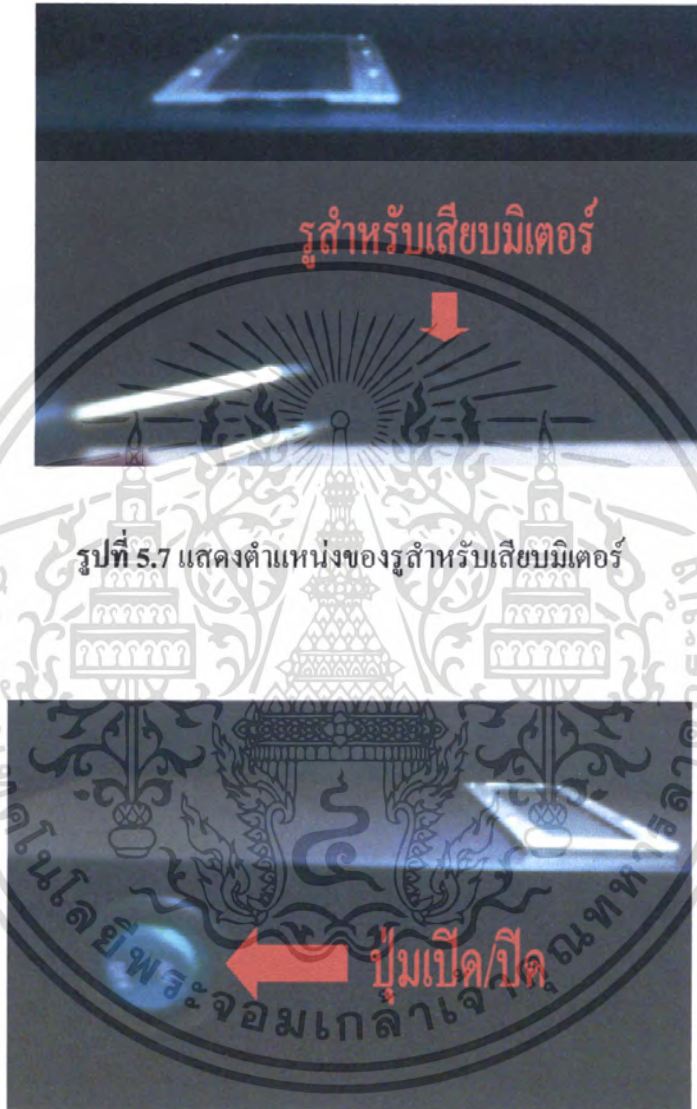
จากการที่นำแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขามาประยุกต์การใช้งานเป็นเครื่องมือวัด ในการไบอัสให้กับตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาจะใช้ค่ากระแส 3 mA ซึ่งแสดงให้ดูจากกราฟก่อนหน้านี้นี้โดยจากวงจรเราจะทำการปรับค่า VR 1 เพื่อที่จะให้ได้ค่ากระแสไบอัสให้กับตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาซึ่งจากการทดลองพบว่ากระแส 3 mA เป็นช่วงกระแสที่ดีที่สุดที่วงจรการทดลองสามารถปรับค่า VR 2 ได้ง่ายกว่ากระแสที่มีค่าสูงๆและค่ากระแส 3 mA ยังมีความต่อเนื่องของสัญญาณนั้นก็คือค่าที่ได้จากกราฟมีความ linear ของสัญญาณทำให้เราสามารถหาความชันซึ่งนำมาเขียน โปรแกรม

5.2 รูปการใช้เครื่องวัดและการปรับค่าก่อนใช้งาน



รูปที่ 5.6 แสดงตำแหน่งของปุ่ม Reset และปุ่มปรับค่า R

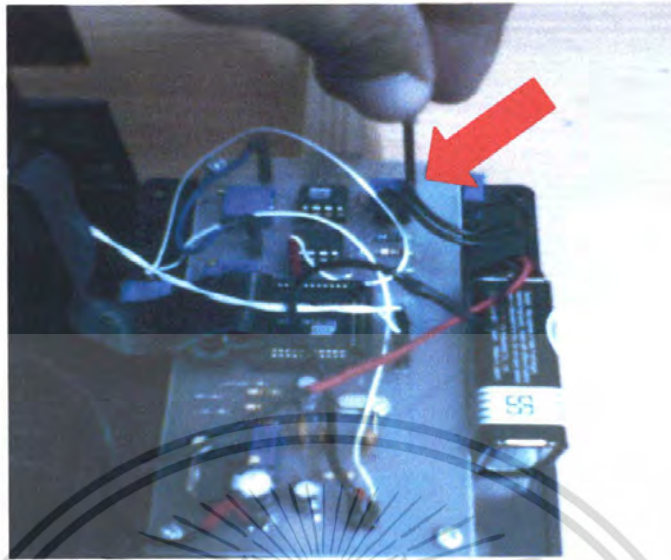
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงตำแหน่งของรูสำหรับเลียบเมตร

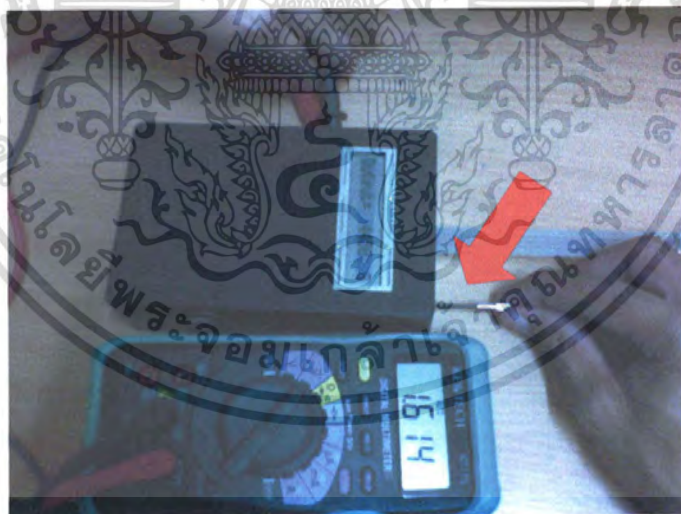
รูปที่ 5.8 แสดงตำแหน่งของปุ่มเปิด/ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 แสดงการปรับค่า R2 ในวงจร

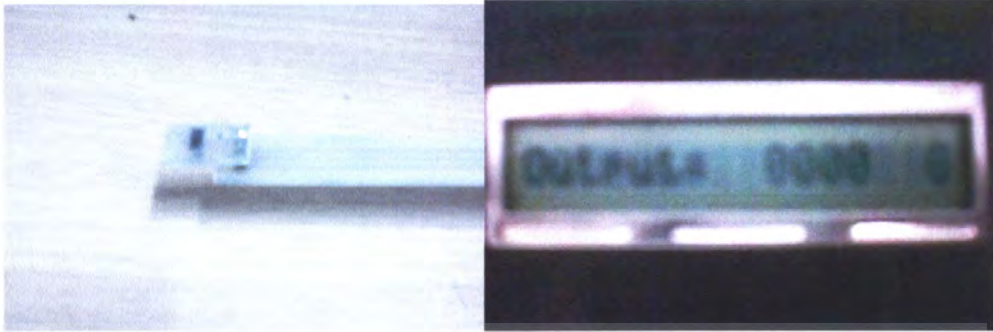
เมื่อเรานำเครื่องมือวัดไปใช้งานอย่างแรกคือเราควรกำหนดค่าไบอัสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์จากรูปเราทำการปรับค่า R2 ในวงจรให้ได้ค่าที่กำหนดไว้คือ 3 mA



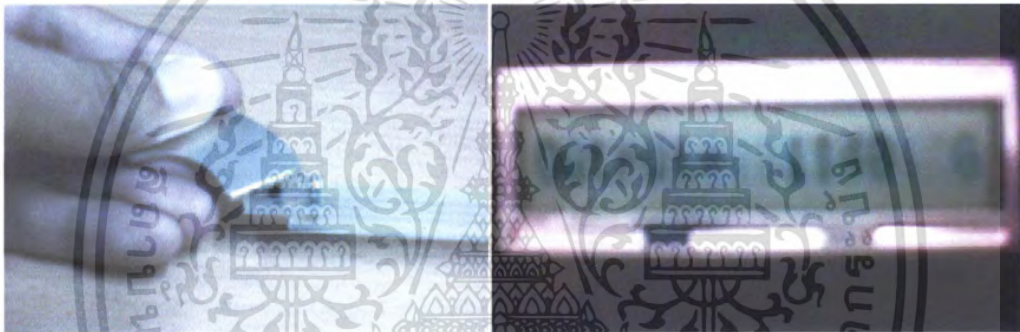
รูปที่ 5.10 แสดงการปรับค่า R1 ในวงจร

จากรูปก่อนทำการวัดค่าทุกครั้งเราควรปรับค่า R1 โดยการใช้นิเมตรไปวัดที่ตัวเครื่องมือวัด จากนั้นทำการปรับค่า R1 ให้แรงดันที่มิเตอร์วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.950 V เพื่อให้ตัวเครื่องวัดแสดงค่าที่ 0 จากนั้นถึงนำมาวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงตัวเครื่องมือวัดก่อนนำแม่เหล็กมาวัดทดสอบ



รูปที่ 5.12 แสดงตัวเครื่องมือวัดต่อมีแม่เหล็กมาวัดทดสอบ

การทดลองระยะห่างระหว่างหัวเซ็นเซอร์กับแม่เหล็ก

| แม่เหล็ก 1000 G ครึ่งที่ | ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กถึงหัววัด | | |
|-----------------------------|----------------------------------|--------|-------|
| | 0.25 cm | 0.5 cm | 1 cm |
| ครึ่งที่ 1 | 995 G | 875 G | 320 G |
| ครึ่งที่ 2 | 1025 G | 890 G | 330 G |

ตารางที่ 5.5 แสดงการทดลองการวัดที่ระยะทางค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองที่ระยะทาง 0.25 cm ,0.5 cm ,1 cm ระยะที่ได้ค่าที่ใกล้เคียงที่สุดคือ ระยะทาง 0.25 cm เนื่องจากยิ่งเรานำแม่เหล็กเข้าใกล้หัววัดเท่าไรแรงแม่เหล็กก็จะไปผ่านหัว เซ็นเซอร์ได้มากกว่าระยะทางที่ไกลกว่า แต่ห้ามนำมาติดกับหัวเซ็นเซอร์เพราะอาจจะทำให้หัว เซ็นเซอร์เกิดการลัดวงจรได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผล

โครงการนี้เป็นการศึกษาหลักการของ ปรากฎการณ์ฮอลล์ ซึ่งเป็นหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์หลักการดังกล่าวทำให้ทราบว่าตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาอาศัยความแตกต่างระหว่างของกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ที่เกิดจากการกระทำของแรงลอเรนซ์อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก โดยมีทิศทางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของกระแส โดยแรงลอเรนซ์จะกระทำกับประจุพาหะทำให้ประจุพาหะเบี่ยงเบนซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสองนั่นเอง

นอกจากนี้ได้นำเอาแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขามาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนรวมถึงการออกแบบวงจรเพื่อสร้างเป็นชุดทดลองและนำไปใช้ร่วมกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยวงจรที่ออกแบบประกอบด้วยส่วนของวงจรจ่ายกระแสคงที่ ส่วนของวงจรรขยายสัญญาณ และส่วนแสดงผล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นควบคุม

โครงการนี้ทำให้ทราบว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้จริง โดยผลการทดลองพบว่าลักษณะการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง ณ ค่าความเข้มและกระแสที่เท่ากันกับการตรวจจับทางแนวนอนจะให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตที่มากกว่าหรือตรวจจับได้ดีกว่านั่นเอง นอกจากนี้ค่ากระแสที่จ่ายให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ยังส่งผลต่อค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตอีกด้วยกล่าวคือแรงดันทางด้านเอาต์พุตแปรผันตรงกับกระแสที่จ่ายให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์นอกจากนี้สามารถนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์ไปวัดหาขั้วของสนามแม่เหล็กได้อีกด้วยซึ่งขั้วได้จะให้ค่าแรงดันที่วัดได้มากกว่าขั้วเหนือ

บรรณานุกรม

- [1] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, "Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor," Sensors and Actuators A, 45 (1994) 179-182.
- [2] H. P. Baltes and R. S. Popovic, "Integrated semiconductor magnetic field sensors," IEEE, vol. 74, p.1107, 1986.
- [3] L. Ristic, T. Smy and Henry P. Baltes, "A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic field," IEEE Trans Electron Devices, vol.36, NO 6, 1989.
- [4] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [5] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues and F. Rodrigues, "Merged lateral bipolar magnetotransistor," Sensors and Actuators A, 50 (1995) 177-181.
- [6] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Trenton Electron Devices, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986.
- [7] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ ไบ โพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวคิ่งและแนวนอน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2549
- [8] รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช "เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์" แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542
- [9] พงนาฏ สุวรรณมณี เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น.กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545



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) | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Properties | SI |
|---|---|
| Electron | 1500 |
| Holes | 475 |
| Optical phonon energy, eV | 0.063 |
| Phonon mean free path, nm | 7.6 (electron) 5.5 (hole) |
| Poission'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. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิกอนไดออกไซด์

| 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 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมใช้งาน

```
// LCD 4 BIT : Show MT in displly

#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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Delay_lcd (2);
}

TH0 = -value_AN7 ;
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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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);
```

```
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

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

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++)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

```
}
```

```
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



INA118

Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

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

APPLICATIONS

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

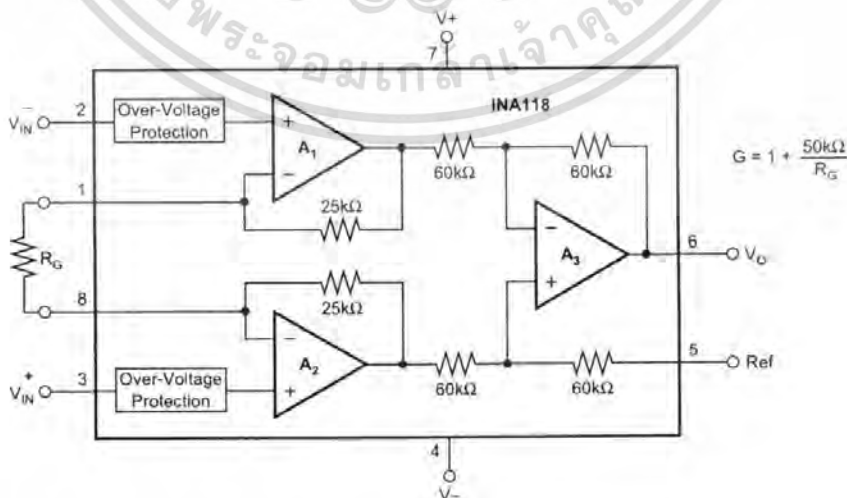
DESCRIPTION

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

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

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

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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ©1994 Burr-Brown Corporation PDS-1199D Printed in U.S.A. April, 1998
 ไม่รับประกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 10\text{k}\Omega$ unless otherwise noted.

| PARAMETER | CONDITIONS | INA118PB, UB | | | INA118P, U | | | UNITS |
|---|---|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | MIN | TYP | MAX | MIN | TYP | MAX | |
| INPUT | | | | | | | | |
| Offset Voltage, RTI Initial | $T_A = +25^\circ\text{C}$ | | $\pm 10 \pm 50/\text{G}$ | $\pm 50 \pm 500/\text{G}$ | | $\pm 25 \pm 100/\text{G}$ | $\pm 125 \pm 1000/\text{G}$ | μV |
| vs Temperature | $T_A = T_{\text{MIN}}$ to T_{MAX} | | $\pm 0.2 \pm 2/\text{G}$ | $\pm 0.5 \pm 20/\text{G}$ | | $\pm 0.2 \pm 5/\text{G}$ | $\pm 1 \pm 20/\text{G}$ | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| vs Power Supply | $V_S = \pm 1.35\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$ | | $\pm 1 \pm 10/\text{G}$ | $\pm 5 \pm 100/\text{G}$ | | * | $\pm 10 \pm 100/\text{G}$ | $\mu\text{V}/\text{V}$ |
| Long-Term Stability | | | $\pm 0.4 \pm 5/\text{G}$ | | | * | | $\mu\text{V}/\text{mo}$ |
| Impedance, Differential | | | $10^{10} \parallel 1$ | | | * | | $\Omega \parallel \text{pF}$ |
| Common-Mode | | | $10^{10} \parallel 4$ | | | * | | $\Omega \parallel \text{pF}$ |
| Linear Input Voltage Range | | $(V+) - 1$ $(V-) + 1.1$ | $(V+) - 0.65$ $(V-) + 0.95$ | | * | * | | V |
| Safe Input Voltage | | | | ± 40 | * | * | | V |
| Common-Mode Rejection | $V_{\text{CM}} = \pm 10\text{V}$, $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$ | | | | | | * | |
| | G = 1 | 80 | 90 | | 73 | * | | dB |
| | G = 10 | 97 | 110 | | 89 | * | | dB |
| | G = 100 | 107 | 120 | | 98 | * | | dB |
| | G = 1000 | 110 | 125 | | 100 | * | | dB |
| BIAS CURRENT vs Temperature | | | ± 1 ± 40 | ± 5 | | * | ± 10 | nA pA/ $^\circ\text{C}$ |
| OFFSET CURRENT vs Temperature | | | ± 1 ± 40 | ± 5 | | * | ± 10 | nA pA/ $^\circ\text{C}$ |
| NOISE VOLTAGE, RTI | G = 1000, $R_S = 0\Omega$ | | | | | | | |
| f = 10Hz | | | 11 | | | * | | nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| f = 100Hz | | | 10 | | | * | | nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| f = 1kHz | | | 10 | | | * | | nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| $f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz | | | 0.28 | | | * | | $\mu\text{Vp-p}$ |
| Noise Current | | | | | | | | |
| f = 10Hz | | | 2.0 | | | * | | pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| f = 1kHz | | | 0.3 | | | * | | pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| $f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz | | | 80 | | | * | | pAp-p |
| GAIN | | | | | | | | |
| Gain Equation | | | $1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$ | 10000 | * | * | * | V/V |
| Range of Gain | | | | | | | | V/V |
| Gain Error | G = 1 | | ± 0.01 | ± 0.024 | | * | ± 0.1 | % |
| | G = 10 | | ± 0.02 | ± 0.4 | | * | ± 0.5 | % |
| | G = 100 | | ± 0.05 | ± 0.5 | | * | ± 0.7 | % |
| | G = 1000 | | ± 0.5 | ± 1 | | * | ± 2 | % |
| Gain vs Temperature | G = 1 | | ± 1 | ± 10 | | * | ± 10 | ppm/ $^\circ\text{C}$ |
| 50k Ω Resistance ⁽¹⁾ | | | ± 25 | ± 100 | | * | * | ppm/ $^\circ\text{C}$ |
| Nonlinearity | G = 1 | | ± 0.0003 | ± 0.001 | | * | ± 0.002 | % of FSR |
| | G = 10 | | ± 0.0005 | ± 0.002 | | * | ± 0.004 | % of FSR |
| | G = 100 | | ± 0.0005 | ± 0.002 | | * | ± 0.004 | % of FSR |
| | G = 1000 | | ± 0.002 | ± 0.01 | | * | ± 0.02 | % of FSR |
| OUTPUT | | | | | | | | |
| Voltage: Positive | $R_L = 10\text{k}\Omega$ | $(V+) - 1$ | $(V+) - 0.8$ | | * | * | | V |
| Negative | $R_L = 10\text{k}\Omega$ | $(V-) + 0.35$ | $(V-) + 0.2$ | | * | * | | V |
| Single Supply High | $V_S = +2.7\text{V}/(0\text{V}^2)$, $R_L = 10\text{k}\Omega$ | 1.8 | 2.0 | | * | * | | V |
| Single Supply Low | $V_S = +2.7\text{V}/(0\text{V}^2)$, $R_L = 10\text{k}\Omega$ | 60 | 35 | | * | * | | mV |
| Load Capacitance Stability | | | 1000 | | | * | | pF |
| Short Circuit Current | | | +5/-12 | | | * | | mA |
| FREQUENCY RESPONSE | | | | | | | | |
| Bandwidth, -3dB | G = 1 | | 800 | | | * | | kHz |
| | G = 10 | | 500 | | | * | | kHz |
| | G = 100 | | 70 | | | * | | kHz |
| | G = 1000 | | 7 | | | * | | kHz |
| Slew Rate | $V_O = \pm 10\text{V}$, G = 10 | | 0.9 | | | * | | V/ μs |
| Settling Time, 0.01% | G = 1 | | 15 | | | * | | μs |
| | G = 10 | | 15 | | | * | | μs |
| | G = 100 | | 21 | | | * | | μs |
| | G = 1000 | | 210 | | | * | | μs |
| Overload Recovery | 50% Overdrive | | 20 | | | * | | μs |
| POWER SUPPLY | | | | | | | | |
| Voltage Range | | ± 1.35 | ± 15 | ± 18 | * | * | * | V |
| Current | $V_{\text{IN}} = 0\text{V}$ | | ± 350 | ± 385 | | * | * | μA |
| TEMPERATURE RANGE | | | | | | | | |
| Specification | | -40 | | 85 | * | * | * | $^\circ\text{C}$ |
| Operating | | -40 | 80 | 125 | * | * | * | $^\circ\text{C}$ |
| θ_{JA} | | | 80 | | | * | | $^\circ\text{C}/\text{W}$ |

* Specification same as INA118PB, UB.

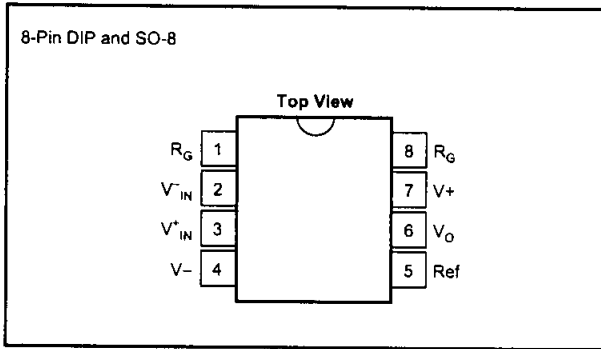
NOTE: (1) Temperature coefficient of the "50k Ω " term in the gain equation. (2) Common-mode input voltage range is limited. See text for discussion of low power supply and single power supply operation.



INA118 สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.

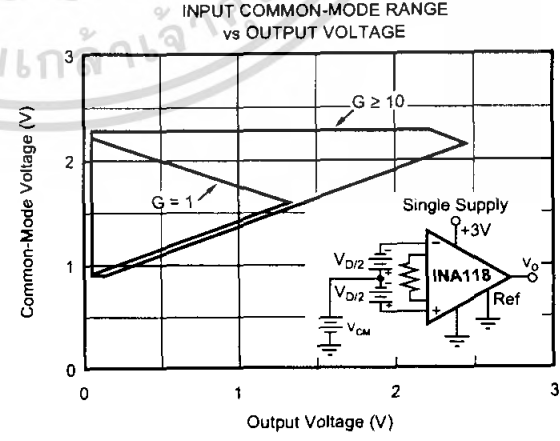
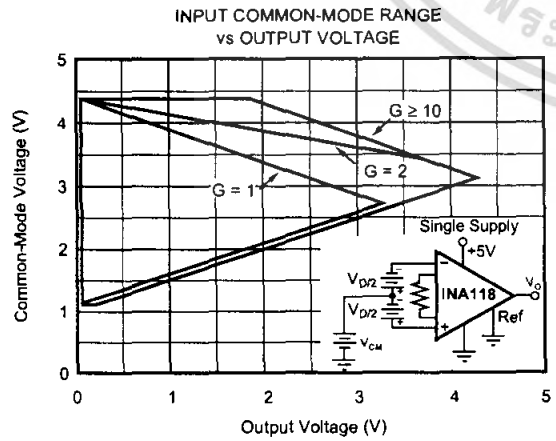
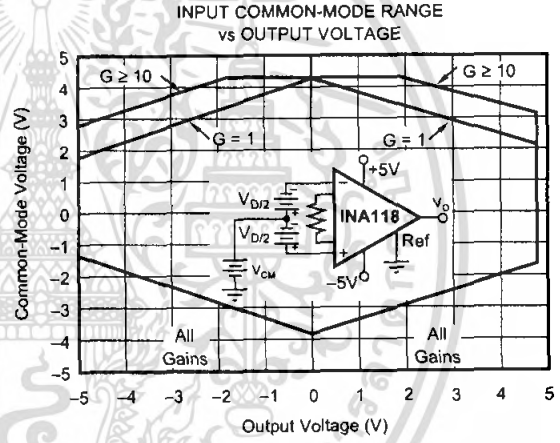
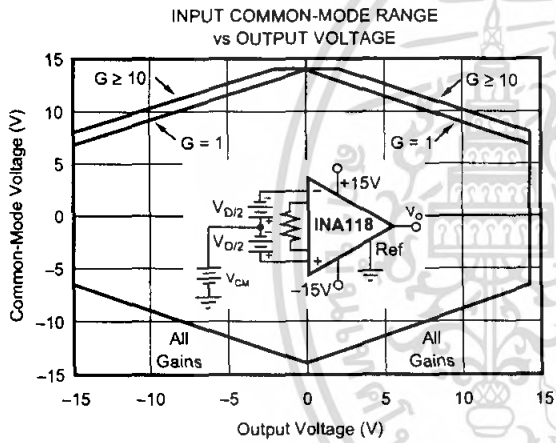
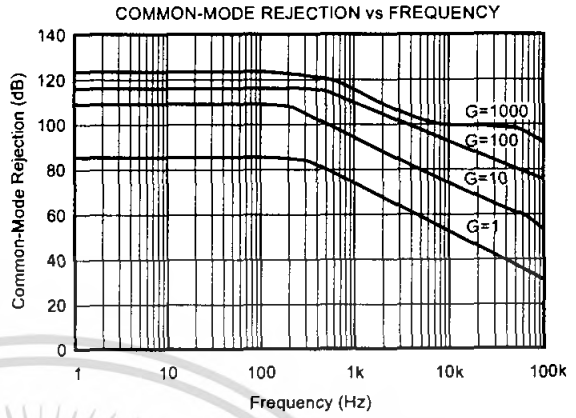
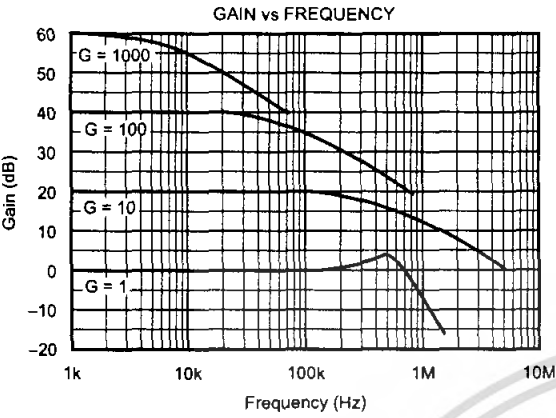


The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ **INA118** 
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CURVES

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



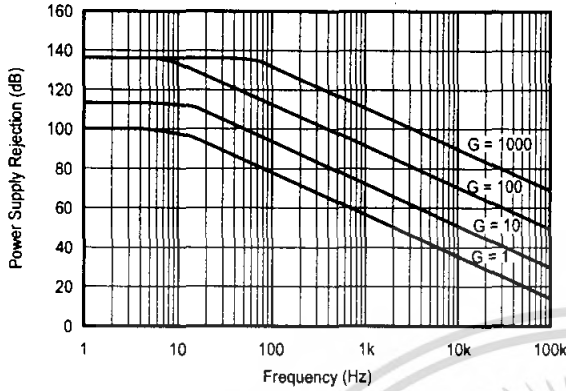
รีเลย์ INA118 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

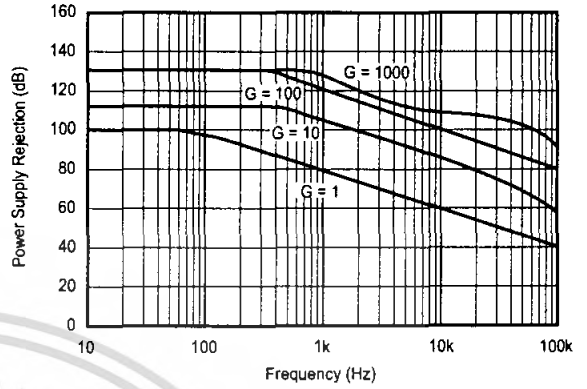
TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

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

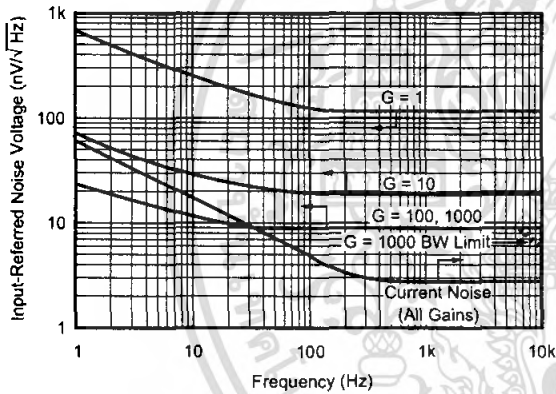
POSITIVE POWER SUPPLY REJECTION vs FREQUENCY



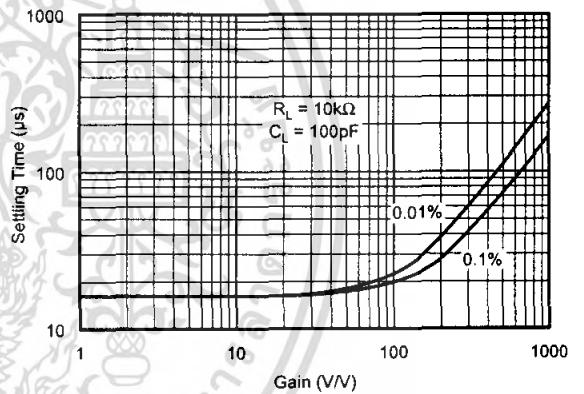
NEGATIVE POWER SUPPLY REJECTION vs FREQUENCY



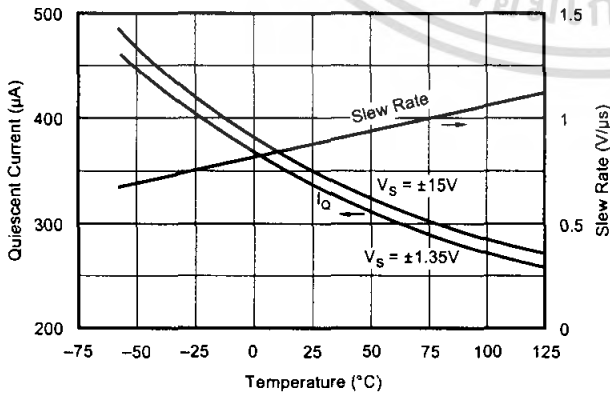
INPUT-REFERRED NOISE VOLTAGE vs FREQUENCY



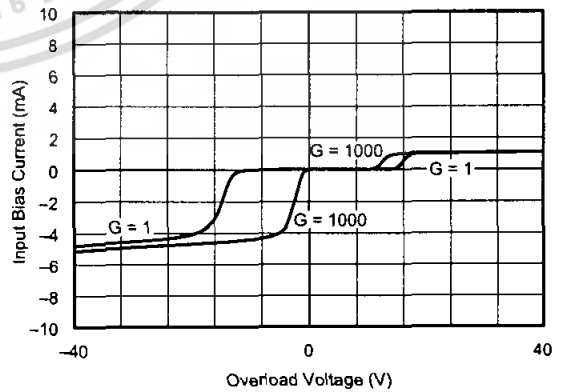
SETTLING TIME vs GAIN



QUIESCENT CURRENT and SLEW RATE vs TEMPERATURE



INPUT BIAS CURRENT vs INPUT OVERLOAD VOLTAGE

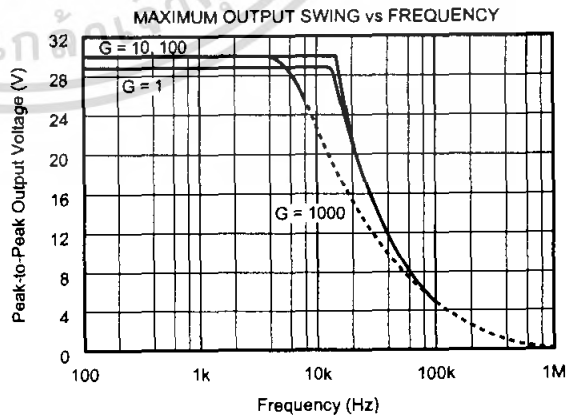
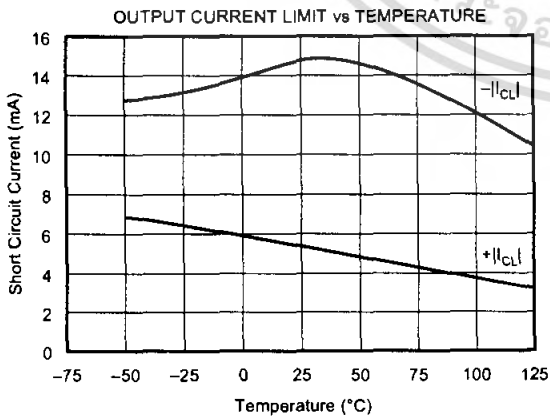
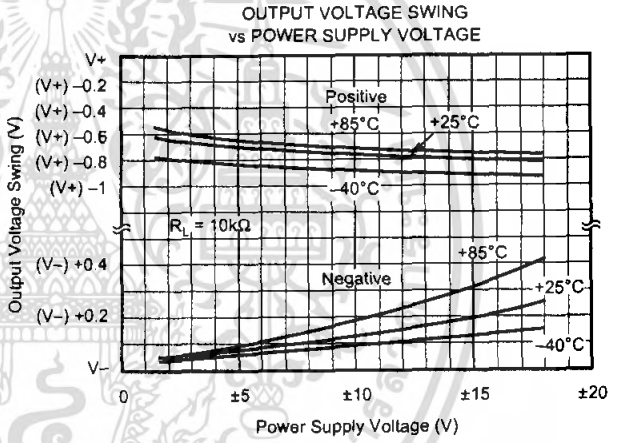
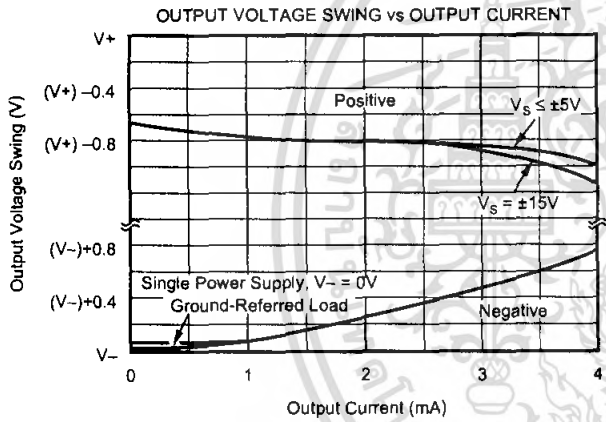
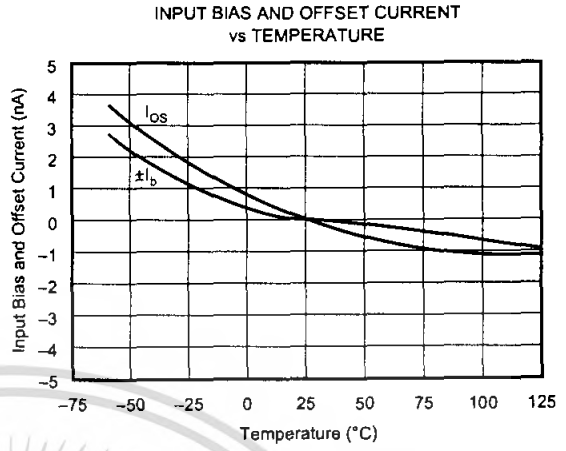
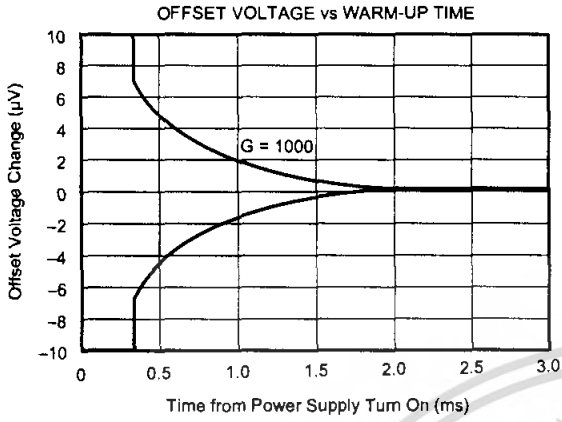


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ INA118 

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

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

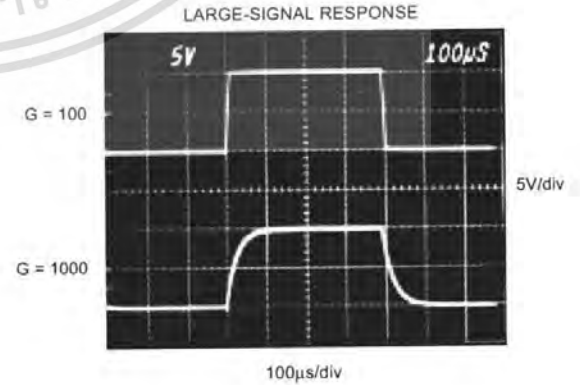
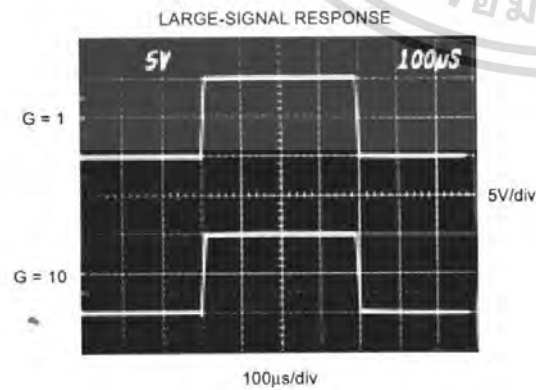
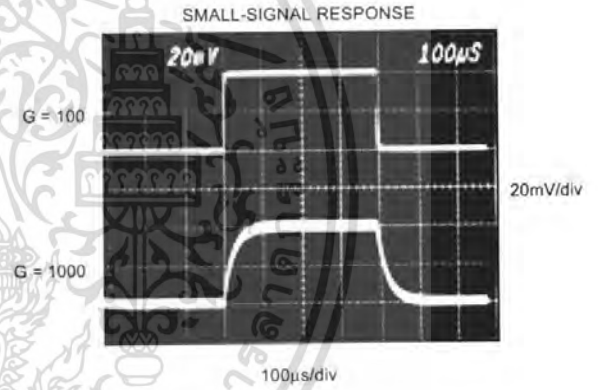
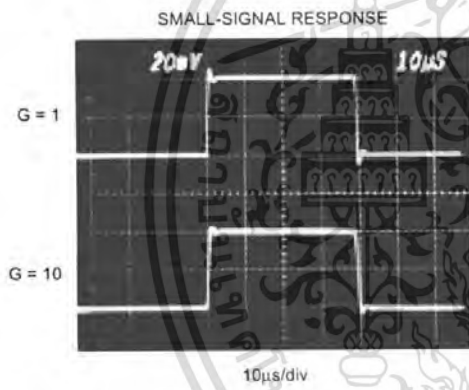
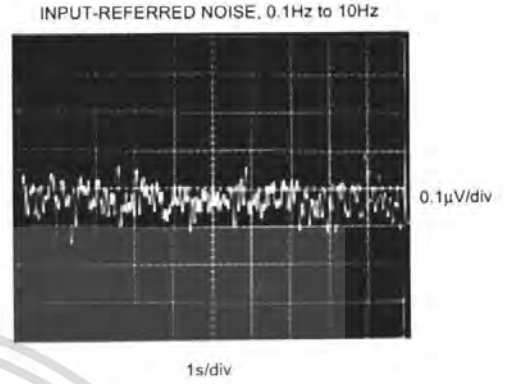
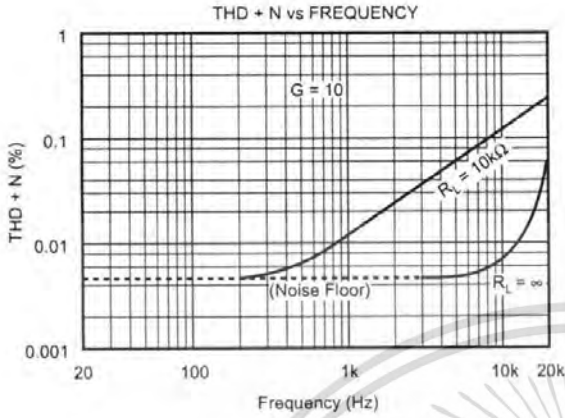


INA118 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 A₁ and A₂. 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.

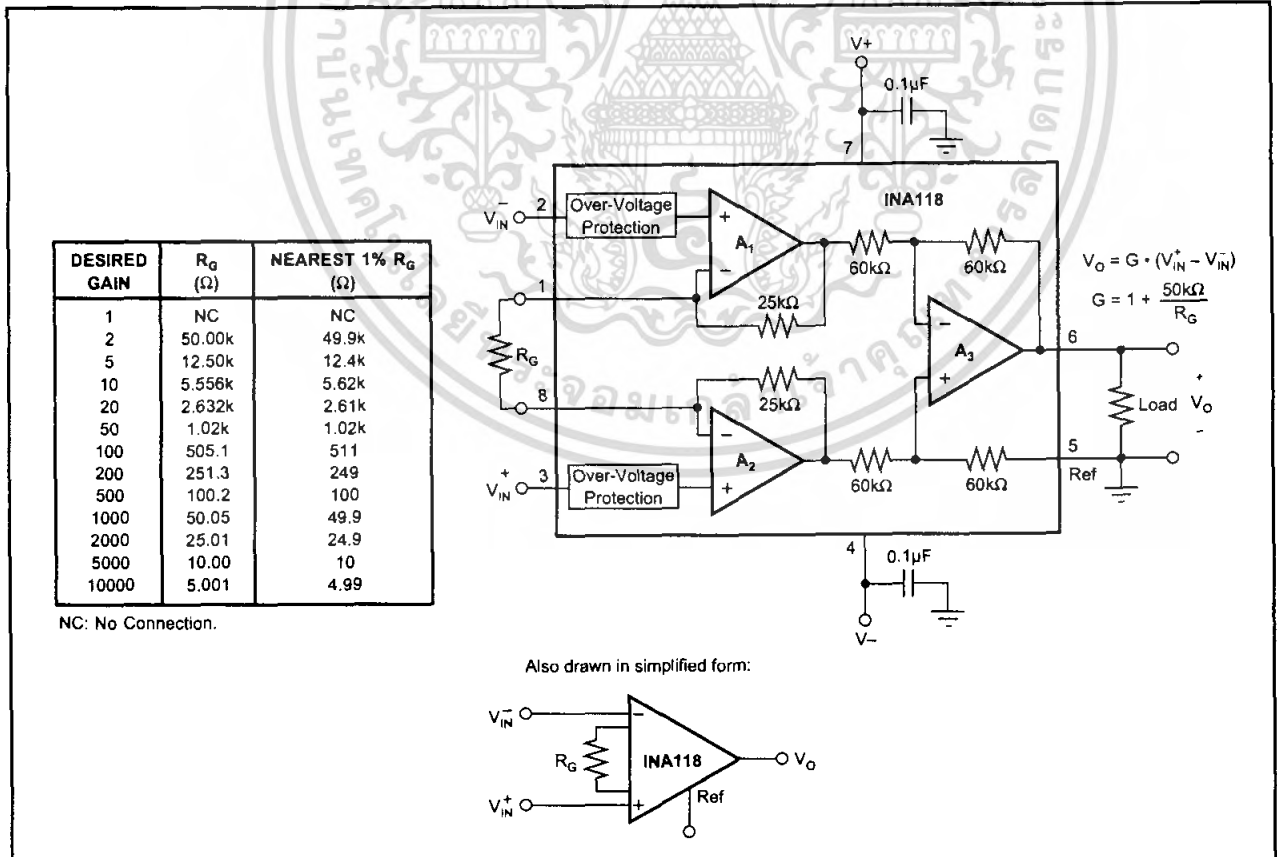


FIGURE 1. Basic Connections.



บริษัท INA118 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOISE PERFORMANCE

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

Low frequency noise of the INA118 is approximately $0.28\mu\text{Vp-p}$ 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.

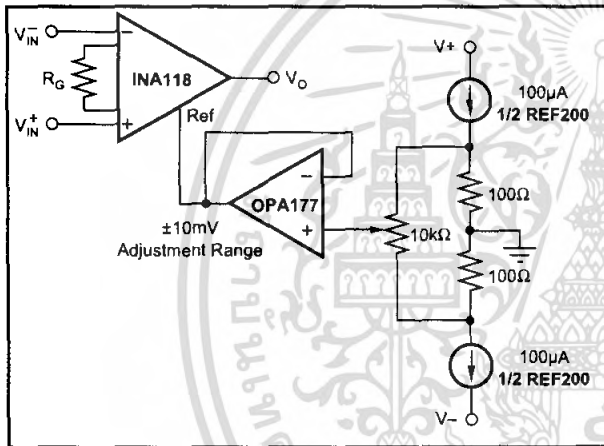


FIGURE 2. Optional Trimming of Output Offset Voltage.

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 $\pm 5\text{nA}$. High input impedance means that this input bias current changes very little with varying input voltage.

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

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

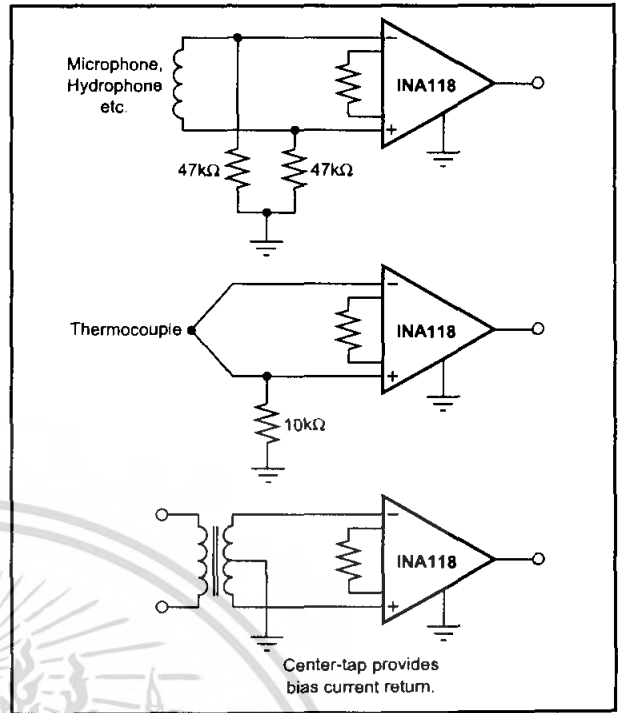


FIGURE 3. Providing an Input Common-Mode Current Path.

INPUT COMMON-MODE RANGE

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

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

LOW VOLTAGE OPERATION

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

SINGLE SUPPLY OPERATION

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

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

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

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

INPUT PROTECTION

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

INSIDE THE INA118

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

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

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

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

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

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

Output Swing Range A_1, A_2 : $(V+) - 0.65V$ to $(V-) + 0.06V$
 Amplifier Linear Input Range: $(V+) - 0.65V$ to $(V-) + 0.98V$

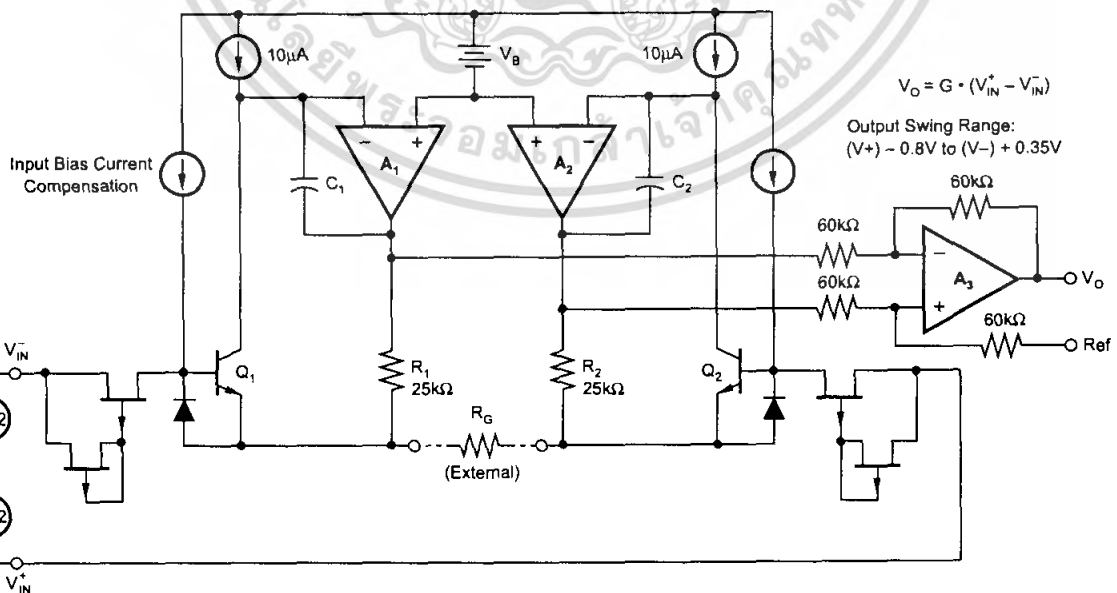


FIGURE 4. INA118 Simplified Circuit Diagram.



รี INA118 การที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 10 การศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

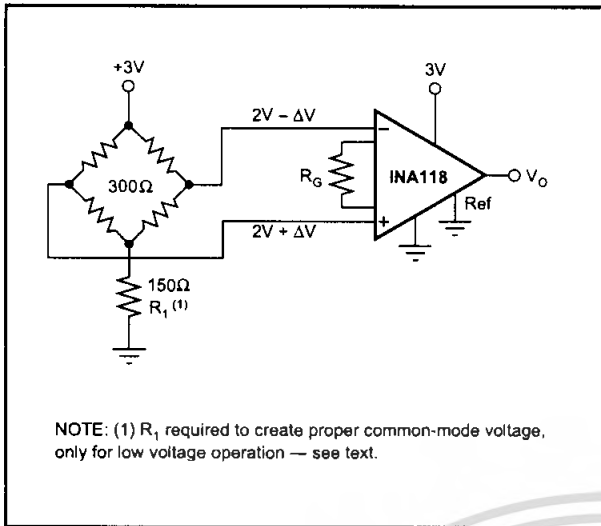


FIGURE 5. Single-Supply Bridge Amplifier.

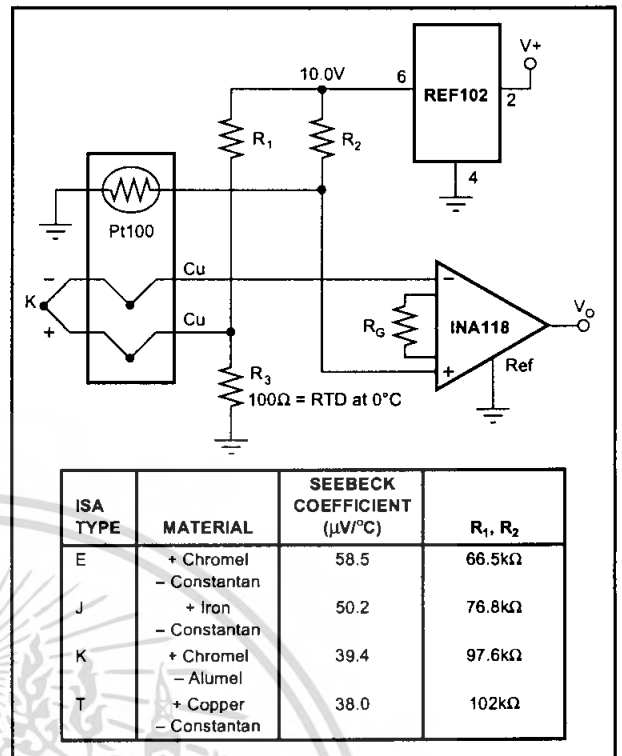


FIGURE 7. Thermocouple Amplifier With Cold Junction Compensation.

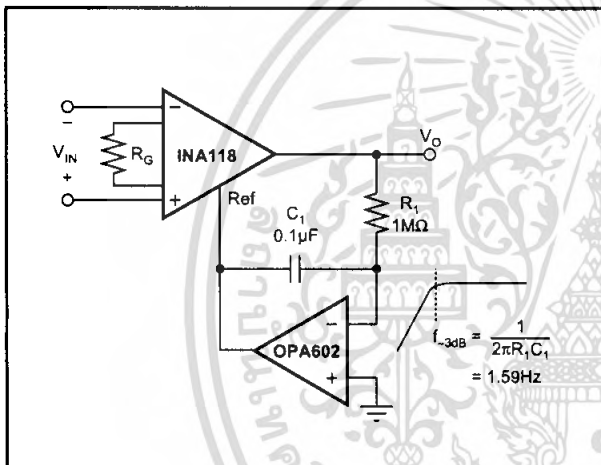


FIGURE 6. AC-Coupled Instrumentation Amplifier.

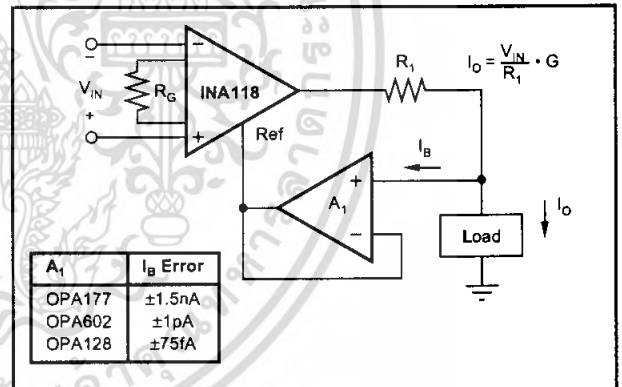


FIGURE 8. Differential Voltage to Current Converter.

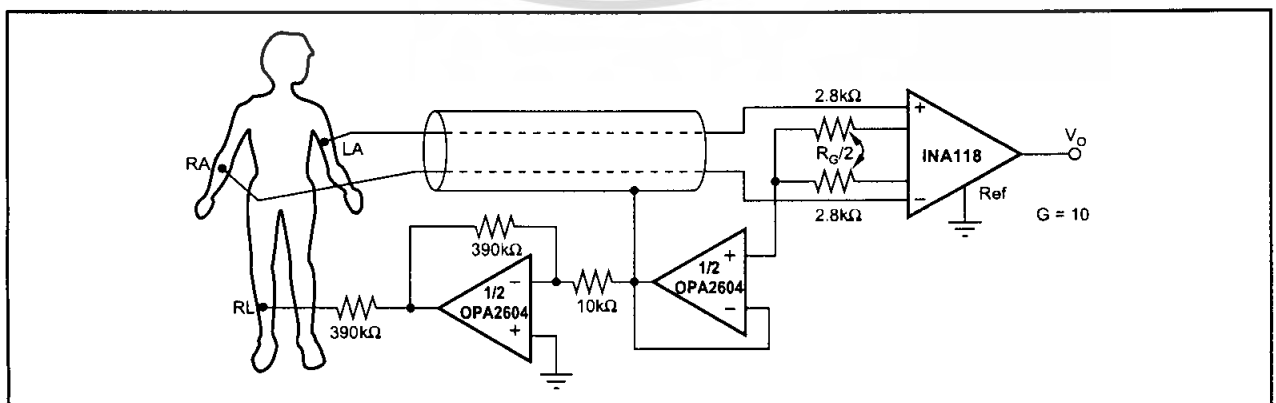


FIGURE 9. ECG Amplifier With Right-Leg Drive.