

การศึกษาหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์แบบสองมิติและการประยุกต์ใช้

A STUDY OF TWO DIMENSIONS HALL MAGNETIC SENSOR AND ITS
APPLICATION



อริญชยา พันธุ์พำนัก
ARINCHAYA PHANPUMNAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KMITL-2015-EN-M-043-151

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF TWO DIMENSIONS HALL MAGNETIC SENSOR AND ITS
APPLICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2015
KMUTL-2015-EN-M-043-151



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในหน่วยงานนี้ ไม่สามารถไปใช้อื่นๆได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์แบบสองมิติและการประยุกต์ใช้
Thesis Title A Study of Two Dimensions Hall Magnetic Sensor and Its Application
นักศึกษา นางสาวอริญชยา พันธุ์พำนัก
รหัสประจำตัว 56601186
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-043-151

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 14.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-305

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาห้วงวัดสนามแม่เหล็กฮอลล์แบบสองมิติและการประยุกต์ใช้
นักศึกษา	นางสาวอริญญา พันธุ์พานัก
รหัสนักศึกษา	56601186
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงการศึกษาระบบปฏิบัติการตอบสนองของห้วงวัดฮอลล์แบบสองมิติ และนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้อย่างถูกต้อง โดยห้วงวัดฮอลล์เพลาสองมิติถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการทางซิลิกอนเทคโนโลยีด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนซึ่งมีชั้นการตอบสนองฮอลล์เพียงห้าชั้นสำหรับการตอบสนองสนามแม่เหล็กสองทิศทาง และสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ง่าย ซึ่งห้วงวัดที่สร้างขึ้นนี้ถูกนำมาทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับห้วงวัดฮอลล์ของโครงสร้างที่ 1 โครงสร้างที่ 2 และโครงสร้างที่ 3 ภายใต้ช่วงความเข้มสนามแม่เหล็ก $-5,000$ ถึง $5,000$ เกาส์ พบว่าความไวในการตอบสนองของห้วงวัดฮอลล์ในแนวตั้งฉากและแนวขนานของโครงสร้างที่ 1 เป็นเชิงเส้นซึ่งมีค่าประมาณ $0.085\mu\text{V}/\text{G}$ และ $0.030\mu\text{V}/\text{G}$ ตามลำดับ ส่วนความไวในการตอบสนองของห้วงวัดฮอลล์ในแนวตั้งฉากและแนวขนานของโครงสร้างที่ 2 พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ $0.097\mu\text{V}/\text{G}$ และ $0.015\mu\text{V}/\text{G}$ ตามลำดับ และโครงสร้างที่ 3 พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ $0.137\mu\text{V}/\text{G}$ และ $0.026\mu\text{V}/\text{G}$ ตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่ทำกรขยายสัญญาณด้วยชุดวงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ โดยมีค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นหลังผ่านวงจรขยายสัญญาณประมาณ $4,000$ เท่า โดยมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $555\mu\text{V}/\text{G}$ ในทิศตั้งฉากกับห้วงวัดฮอลล์ โดยมีสมการเชิงเส้น คือ $y=0.000555x-0.002837$ และสำหรับความไวในการตอบสนองภายหลังการผ่านวงจรขยายมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ $21,000$ เท่าในแนวขนาน โดยมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $552\mu\text{V}/\text{G}$ และมีความเป็นเชิงเส้นดังสมการ $y=0.000552x-0.009653$ ซึ่งสามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดในช่วง $-4,000$ ถึง $4,000$ เกาส์ หลังจากนั้นนำสมการที่ได้นี้มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในสองมิติด้วยการใช้โปรแกรมแลบวิวโดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำการทดสอบความแม่นยำของระบบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด $4,000$ เกาส์ ด้วยวิธีการสอบเทียบแบบ 5 จุด พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำมีค่าไม่เกิน 1.0200 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่า $R^2=1$ ในแนวตั้งฉากกับห้วงวัด และค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำมีค่าไม่เกิน 1.1660 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่า $R^2=0.9997$ ในแนวขนานกับห้วงวัด แสดงให้เห็นถึงค่าความถูกต้องที่พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ดังนั้นแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองมิติ และสามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กได้

Thesis Title	A Study of Two Dimensions Hall Magnetic Sensor and Its Application
Student	Ms. Arinchaya Phanpumnak
Student ID.	56601186
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis proposed the study of two dimensional Hall magnetic sensor and its application for the accurate magnetic flux density measurement. The two dimensional Hall magnetic sensor was constructed using the uncomplicated silicon technology process composed of only 5 poles responding to the bipolar magnetic field intensity. This constructed magnetic sensor was used to investigate the Hall voltage and the magnetic flux density in the perpendicular and parallel directions. The Hall magnetic sensor were constructed in three structures of No.1, No.2 and No.3 and is tested in the condition of the magnetic flux density from -5,000 to 5,000 Gauss. It was found in an experiment that the sensitivity of the Hall sensor responds in the two directions. The sensor sensitivities of No.1, No.2 and No.3 in the perpendicular direction are linearly around $0.085\mu\text{V/G}$, $0.097\mu\text{V/G}$ and $0.137\mu\text{V/G}$, respectively. The sensor sensitivities in the parallel direction are to be $0.030\mu\text{V/G}$, $0.015\mu\text{V/G}$ and $0.026\mu\text{V/G}$, respectively. In a case of signal amplification using an amplifier circuit, the responded sensitivity of Hall magnetic sensor as the amplifier of 4,000 times is increased by $555\mu\text{V/G}$ in the perpendicular direction. For the amplifier of 21,000 times, the responded sensitivity of the device in the parallel direction is increased by $552\mu\text{V/G}$ with the linearity equation of $y=0.000552x-0.009653$. The developed system can be used to investigate the maximum of the magnetic flux density of -4,000 to 4,000 Gauss. The LabVIEW software is developed and is used to investigate the magnetic flux density. The accuracy of measurement system then was calculated, which is compared to the commercial gauss meter device with the maximum of the magnetic field 4,000 Gauss by the five point calibration method. It is found that the percentage of accuracy was not over 1.0200% where $R^2 = 1$ in the perpendicular direction to the magnetic sensor. The percentage of accuracy was less than 1.11660% with $R^2=0.9997$ in the parallel direction. The R^2 shows the accuracy of the magnetic flux density measurement in both planes and accurate measurement. The result of experiment shows that the built Hall magnetic sensor can be applied to be an instrument for the magnetic flux density measurement.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติที่ได้มอบโอกาสและเสียสละเวลาในการทำงานให้ข้าพเจ้าได้รับสิทธิ์ในการลาศึกษาต่อแบบบางช่วงเวลา 50 เปอร์เซ็นต์ของเวลางานทั้งหมด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณถึงเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และเจ้าหน้าที่ของหน่วยงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่คอยให้ความสะดวกและช่วยเหลืองานทางด้านเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยให้ความสนับสนุนทางด้านเครื่องมือสำหรับการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์

ขอขอบคุณ ดร.จิรวัดน์ ปราบเขต และทีมงานนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยสนับสนุนทางด้านความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างและเทคนิคการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์ รวมถึงคำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอขอบคุณ อธิโรจน์ มะโน ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือเกี่ยวกับการทำงานวิจัย อีกทั้งสนับสนุนหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์แบบสองมิติมาให้ข้าพเจ้าใช้ในการทดสอบสมบัติ รวมไปถึงเป็นกำลังใจสำคัญ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเอกสารอ้างอิงต่างๆที่ข้าพเจ้าได้หยิบยกมา ก่อให้เกิดองค์ความรู้ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งข้าพเจ้าคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจทางด้านการศึกษาสมบัติสนามแม่เหล็ก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบมีความแม่นยำสูงต่อไปอนาคตได้

ท้ายสุดคุณประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแก่บิดามารดา คือ นายธวัชชัย - นางพินยมล พันธุ์พำนัก พร้อมครอบครัว และนางสุรัตน์ ขจิตตานนท์ ที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

อริยชยา พันธุ์พำนัก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	5
2.1 ปრაกฏการณ์ฮอลล์.....	5
2.2 ปრაกฏการณ์ฮอลล์ในโลหะ.....	9
2.3 ปრაกฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก.....	10
2.3.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรีนซิก.....	11
2.4 ปრაกฏการณ์ฮอลล์ตามฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	15
2.5 วงจรรวมสำหรับหัววัดฮอลล์.....	16
2.6 วงจรขยายสัญญาณโดยใช้อปแอมป์.....	17
2.6.1 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง.....	18
2.6.2 วงจรปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์.....	20
2.7 วงจรขยายอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว.....	22
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดสอบหัววัดฮอลล์สองมอดต่อสำหรับเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	24
3.1 สมบัติทางกายภาพของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	24
3.1.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติแบบเพลต.....	24
3.1.2 ลักษณะการต่อใช้งานโครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติแบบเพลต.....	27
3.2 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	27
3.2.1 สมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัด.....	27
3.2.2 สมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม.....	29
3.3 การทดสอบระบบประมวลสัญญาณของการวัดค่าสนามแม่เหล็กสองมิติ.....	29
3.3.1 การทดสอบอัตราการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติ.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในห้องปฏิบัติการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารฉบับนี้มีความจำเป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตัดลอกอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การทดสอบระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	32
3.4 การทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดสนามแม่เหล็กสองมิติ.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	35
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหัววัดฮอลล์.....	35
4.1.1 ผลการทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	35
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติที่ขึ้นกับมุม.....	46
4.2 ผลการทดสอบสมบัติในส่วนประมวลผลสัญญาณของการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	47
4.2.1 การขยายสัญญาณสำหรับหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	47
4.2.2 ระบบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์.....	51
4.3 ผลการทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก. โปรแกรมอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51.....	63
ภาคผนวก ข. โปรแกรมแลบVIEWที่ใช้ในงานวิจัย.....	67
ภาคผนวก ค. วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	68
ภาคผนวก ง. ข้อมูลอุปกรณ์การขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์.....	69
ภาคผนวก จ. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของสองโครงสร้าง.....	27
4.1 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 1 ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆในทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์.....	35
4.2 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 1 ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆในทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์.....	36
4.3 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 2 ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆในทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์.....	38
4.4 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 2 ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆในทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์.....	39
4.5 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆในทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์.....	42
4.6 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆในทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์.....	42
4.7 การเปรียบเทียบค่าความไวการตอบสนองของฮอลล์สองโครงสร้าง.....	46
4.8 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆ ในทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์.....	48
4.9 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ที่ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆ ในทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์.....	49
4.10 ผลการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 1.....	51
4.11 ผลการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 2.....	53
4.12 ผลการหาค่าความแม่นยำของบอร์ดแปลงสัญญาณ.....	54
4.13 ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก.....	55
4.14 ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กแนวตั้งขนาน.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์.....2
1.2	ฮอลล์แนวตั้งแบบพลาแนรี.....3
2.1	(ก) แสดงถึงลักษณะของแผ่นโลหะบางๆที่มีลักษณะคล้ายกลีบดอกไม้.....5
	(ข) แสดงถึงอุปกรณ์และวิธีการทดลองการค้นพบปรากฏการณ์ฮอลล์.....5
2.2	ปรากฏการณ์ฮอลล์ในชิ้นสาร.....6
2.3	ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นตัวนำ.....8
2.4	การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ.....13
2.5	การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ.....16
2.6	ชิ้นสารฮอลล์ที่สร้างเป็นวงจรรวม.....16
2.7	วงจรรขยายสัญญาณผลต่าง.....18
2.8	ผลของการปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์.....20
2.9	(ก) วงจรปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์.....21
	(ข) กราฟคุณสมบัติของวงจรร.....21
2.10	วงจรรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว.....23
3.1	หัววัดสนามแม่เหล็กสองทิศทาง.....25
3.2	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....26
3.3	โครงสร้างของหัววัดฮอลล์เพดที่ระยะ $W = 100\mu\text{m}$ $S = 80\mu\text{m}$27
3.4	โครงสร้างของหัววัดฮอลล์เพดที่ระยะ $W = 200\mu\text{m}$ $S = 40\mu\text{m}$27
3.5	โครงสร้างของหัววัดฮอลล์เพดที่ระยะ $W = 300\mu\text{m}$ $S = 80\mu\text{m}$27
3.6	การใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....28
3.7	ทิศของสนามแม่เหล็กในการทดลอง.....29
3.8	แผนภาพการใช้งานของหัววัดฮอลล์แบบสองมิติ.....29
3.9	การวัดสมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม.....30
3.10	ระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....30
3.11	ไอซีอินสตรูเมนต์ในวงจรรขยาย (ก) INA125 และ (ข) INA128.....30
3.12	การต่อวงจรรขยายอินสตรูเมนต์จำนวน 3 ตัว.....31
3.13	การต่อวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์เข้ากับหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์.....31
3.14	วงจรรขยายอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของหัววัด.....31
3.15	ระบบการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล.....32
3.16	บอร์ดแปลงสัญญาณ.....32
3.17	วงจรรแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง.....33
3.18	บอร์ดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในการสอบเทียบแบบ 5 จุด.....33
3.19	การแสดงผลความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบ.....34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 1.....	38
4.2 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 1.....	38
4.3 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 2.....	41
4.4 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 2.....	41
4.5 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 3.....	44
4.6 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 3.....	44
4.7 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) ของฮอลล์โครงสร้าง 1 2 และ 3.....	45
4.8 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) ของฮอลล์โครงสร้าง 1 2 และ 3.....	45
4.9 การตอบสนองตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติที่ขึ้นกับมุม.....	47
4.10 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกขยายสัญญาณกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก ของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 3.....	49
4.11 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกขยายสัญญาณกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนาน ของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 3.....	50
4.12 เปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็กสองทิศทางหลังถูกขยาย สัญญาณด้วยวงขยายแบบอินสตรูเมนต์.....	51
4.13 การทดสอบคุณสมบัติบอร์ดแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 1.....	52
4.14 การทดสอบคุณสมบัติบอร์ดแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 2.....	53
4.15 การสอบเทียบคุณสมบัติบอร์ดแปลงสัญญาณ.....	54
4.16 โปรแกรมแลบVIEWสำหรับการคำนวณและการแสดงผล.....	55
4.17 การเปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กที่มุมต่างๆในแนวตั้งฉาก.....	56
4.18 การเปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กที่มุมต่างๆในแนวขนาน.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หัววัดสนามแม่เหล็กมีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่างๆ มากมายโดยเฉพาะทางด้านการศึกษาและงานวิจัยสำหรับการทดสอบสมบัติของวัสดุสารแม่เหล็กเช่น เครื่องวัดค่าความเข้มของ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Gauss Meter), Vibrating Sample Magnetometer (VSM) เป็นต้น หัววัดสนามแม่เหล็กโดยส่วนใหญ่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งสี่ ซึ่งหัววัดที่นิยมใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายได้แก่ แมกนีโตไดโอด (Magneto diode) , แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magneto transistor) และฮอลล์เพลต (Hall plate) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหัววัดแบบฮอลล์เพลตซึ่งเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ที่มีข้อดีหลายประการเช่น เป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน กระทบด้วยกระบวนการที่ง่าย ราคาถูก มีความเป็นเชิงเส้นสูง ด้วยคุณสมบัติที่ดีหลายประการนี้ จึงมีการนำฮอลล์มาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆอย่างหลากหลาย

สำหรับหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เพลตที่ใช้สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กนั้น เป็นการใช้ฮอลล์เพียงตัวเดียวสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดมากกว่าหนึ่งทิศทางนั้นเป็นไปได้ยาก และค่อนข้างมีความลำบากสำหรับการจัดวางหัววัดสำหรับการวัดให้มีตำแหน่งที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นหัววัดฮอลล์ที่สามารถตอบสนองต่อการกระทำของสนามแม่เหล็กได้มากกว่าหนึ่งทิศทางเพื่อทำให้เกิดความสะดวกในการวัดค่า และสามารถวัดค่าอย่างแม่นยำ นอกจากนี้การศึกษาสมบัติของหัววัดฮอลล์แบบเพลตสองแนวแกนรวมถึงการประยุกต์ใช้งานสำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจึงเป็นสิ่งที่สำคัญหลังจากการสร้างหัววัดสำเร็จแล้วเพื่อให้สามารถตอบสนองได้สองมิติ

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสองทิศทาง หลังจากที่มีการออกแบบหัววัดขึ้น เพื่อระบุถึงสมบัติเฉพาะในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก รวมถึงวิธีการใช้งานเพื่อการประยุกต์เป็นเครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้อย่างเหมาะสม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้หัววัดฮอลล์สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ เพื่อใช้ในการบ่งชี้ถึงปริมาณค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ปัจจัยสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้สร้างเป็นเครื่องมือวัดที่มีความน่าเชื่อถือนั่นคือ ความเข้าใจถึงสมบัติและหลักการทำงานของอุปกรณ์ รวมถึงการเชื่อมต่อกับระบบที่เกี่ยวข้องสำหรับการวัดค่าได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาการประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์สองมิติ โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของหัววัดฮอลล์ที่ถูกสร้างขึ้น เช่น ทิศทางในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ค่าความไวในการตอบสนอง เพื่อให้สามารถนำเอาสมบัติที่ทำการศึกษาเหล่านี้ไปวิเคราะห์และนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ตลอดจนการออกแบบระบบการวัดค่าความเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กทั้งในส่วนการประมวลผลเชิงอนาล็อกที่ได้จากฮอลล์สองมิติ และระบบประมวลผลเชิงดิจิทัลเพื่อการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้อย่างแม่นยำ

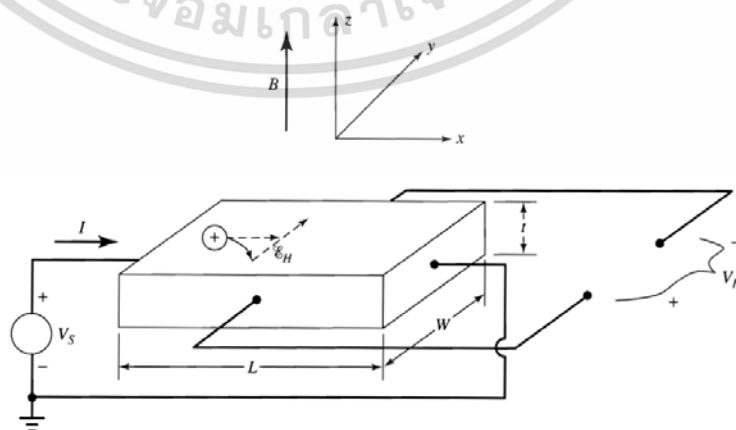
1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานสำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ อยู่บนพื้นฐานของหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง โดยหัววัดที่ถูกสร้างขึ้นเป็นหัววัดฮอลล์แบบสองมิติที่มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนทั้งในส่วนของโครงสร้างของหัววัดและกระบวนการสร้าง ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต อีกทั้งสามารถนำมาเชื่อมต่อเพื่อประยุกต์ใช้ได้ง่าย

ดังนั้นบนพื้นฐานของความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์ที่สร้างขึ้นนี้ จึงได้มีการตั้งเป้าประสงค์เพื่อนำหัววัดที่สร้างขึ้นนี้มาศึกษาสมบัติเฉพาะตัว ทำการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างและสมบัติการตอบสนองที่เหมาะสมในการออกแบบวงจร โดยทำการออกแบบวงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณอนาล็อก (Signal conditioner) ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองทิศทางในการตอบสนอง เพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองทิศทางที่มีความแม่นยำ

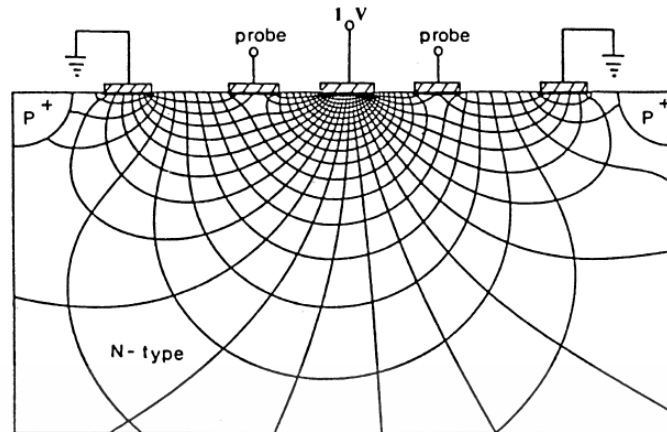
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

หัววัดสนามแม่เหล็กที่ใช้กันโดยทั่วไปส่วนใหญ่อาศัยพื้นฐานของปรากฏการณ์สำหรับการอธิบายกลไกการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกินในสารของแข็งกึ่งตัวนำจำพวกซิลิคอน ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเกิดได้ดังรูปที่ 1.1 ที่แสดงกลไกการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ โดยปรากฏการณ์สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กที่กระทำกับประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ เมื่อทำการสร้างศักย์ไฟฟ้า (V_S) ระหว่างขั้ว ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในชั้นสารตามแนวแกน x ทำให้เกิดกระแสขึ้น เมื่อทำการสร้างสนามแม่เหล็กตั้งฉากทิศพุ่งขึ้นมากระทำกับชั้นสารตามแนวแกน z สามารถวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วในแนวแกน y เรียกแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) ซึ่งในกรณีนี้สามารถที่จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากแนวแกน z ได้เพียงทิศทางเดียว



รูปที่ 1.1 กลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ฮอลล์แนวตั้งแบบพลาแนรี

ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นสำหรับหัววัดแบบพลาแนรีฮอลล์แนวตั้งแสดงดังรูปที่ 1.2 เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กนอกเหนือจากแนวแกน z แนวทฤษฎีเบื้องต้นของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งสองจึงมีแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างของหัววัดที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้หลายทิศทางขึ้น เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในสองมิติต่อไปได้

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

โดยทั่วไปเครื่องมือการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่อาศัยหัววัดฮอลล์เพียงตัวเดียวสำหรับตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กในหลายทิศทางนั้นเป็นไปได้ยาก จึงได้มีการสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติขึ้นเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง โดยทำการออกแบบวงจรที่ใช้ร่วมกับหัววัดฮอลล์สองมิติได้อย่างสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นหัววัดค่าความเข้มในสองมิติได้ โดยข้อได้เปรียบในการเปรียบเทียบกับการใช้หัววัดฮอลล์แบบธรรมดาคือ สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองแนวแกนทำให้สามารถอ่านค่าของสนามแม่เหล็กได้ในสองทิศทางด้วยหัววัดที่สร้างขึ้นนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติการตอบสนองตลอดจนถึงการสอบเทียบการอ่านค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ถูกต้องในสองทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตในการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เริ่มต้นจากการศึกษาโครงสร้างของหัววัด โดยทำการเลือกเพื่อทำการเปรียบเทียบทั้งหมดสองโครงสร้าง ทำการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในสองทิศทาง แล้วทำการเลือกโครงสร้างที่สามารถตอบสนองได้ดีทั้งสองแนวแกนมาหนึ่งโครงสร้าง ทำการออกแบบวงจรปรับปรุงสัญญาณ ตลอดจนออกแบบระบบประมวลสัญญาณเพื่อการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสองมิติได้อย่างแม่นยำในที่สุด

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาสมบัติการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติที่สร้างขึ้นบนเทคโนโลยีซิลิคอนมาประยุกต์ใช้ บนโครงสร้างฮอลล์เพลตที่มีขั้วไฟฟ้าในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสองทิศทางเพียงห้าขั้ว โดยในเบื้องต้นทำการศึกษาก่อนการตอบสนองต่อทิศของสนามแม่เหล็กสองแนวแกนที่กระทำกับหัววัด โดยทำการวิเคราะห์ถึงค่าความไวในการตอบสนอง แล้วทำการออกแบบวงจรเพื่อทำการปรับระดับสัญญาณให้เหมาะสมกับการอ่านค่า ตลอดจนการนำไปประมวลผลคำนวณเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยค่าที่ถูกต้องในที่สุด สามารถนำเอาหลักการจากการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์สร้างเป็นหัววัดค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กในสองทิศทางได้อย่างเหมาะสม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิด และทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของงานวิจัย และขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงสมบัติทางกายภาพสำหรับโครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติ การทำงานและการนำหัววัดมาใช้งานให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสองมิติได้ ตลอดจนการนำหัววัดมาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้สองมิติ

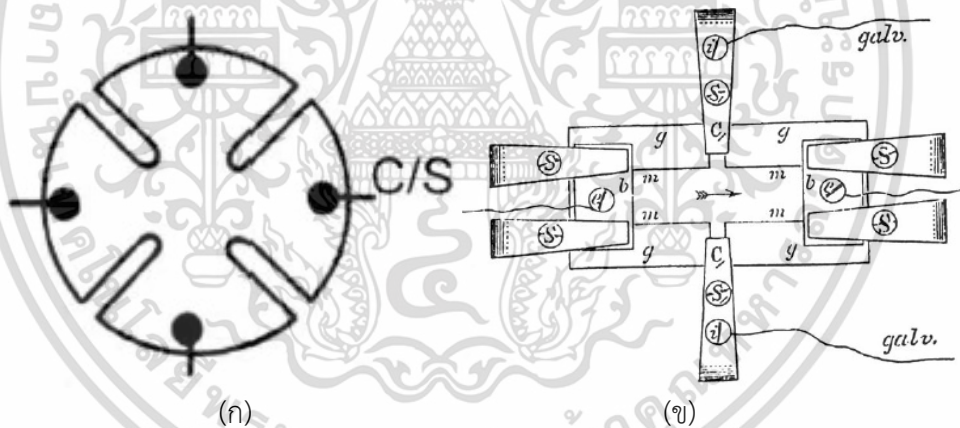
บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองรวมถึงการประยุกต์ใช้งาน

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

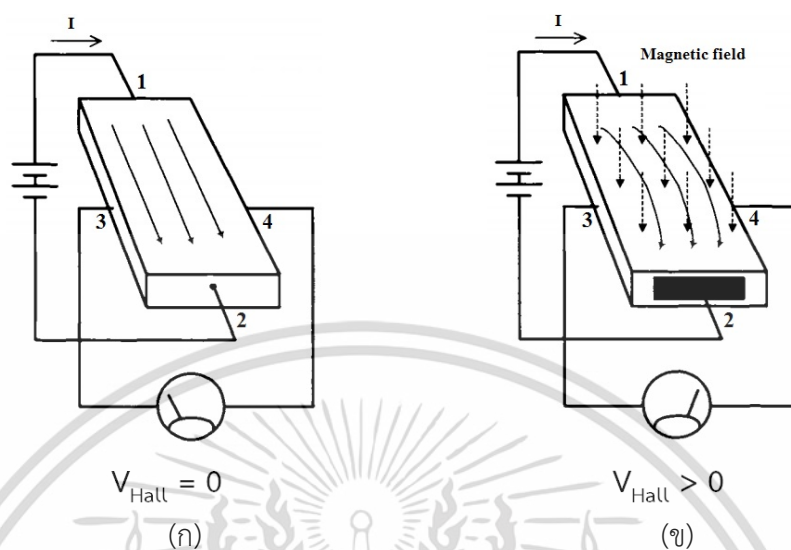
ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าภายใต้สนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ภายนอกที่กระทำกับชิ้นสารตัวนำขณะที่มีสนามไฟฟ้า (Electric field) มากระทำ ซึ่งผลของปรากฏการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความต่างศักย์ที่ตกคร่อมชิ้นสาร ซึ่งถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ในปี ค.ศ. 1879 โดยทำการทดลองด้วยอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นโลหะบางๆ [8] (ทอง, เงิน, เหล็ก) คล้ายกลีบดอกไม้ (Leaf) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1(ก) ที่ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นแก้ว (Glass plate) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทะลุผ่านแผ่นโลหะบางๆ จากนั้นทำการวัดค่าความไวในการตอบสนองด้วยกัลวานอ์มิเตอร์ (Galvanometer) ซึ่งขั้วทั้งสองของกัลวานอ์มิเตอร์ถูกต่อตรงกันข้ามกันที่อยู่ใกล้กับเส้นแรงไฟฟ้า แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1(ข) โดยที่แผ่นโลหะบางๆ จะอยู่ระหว่างขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) ซึ่งการทดลองดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์ใหม่ของการเกิดกระแสไฟฟ้าภายใต้สนามแม่เหล็ก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)” ดังนั้นจึงได้ให้เกียรติการตั้งชื่อปรากฏการณ์ดังกล่าวตามชื่อนักฟิสิกส์ที่เป็นผู้ค้นพบ



รูปที่ 2.1 (ก) ลักษณะของแผ่นโลหะบางๆ ที่มีลักษณะคล้ายกลีบดอกไม้
(ข) อุปกรณ์และวิธีการทดลองการค้นพบปรากฏการณ์ฮอลล์

โดยที่รูปที่ 2.2(ก) แสดงการไหลของกระแสผ่านชิ้นสารตัวนำจากขั้ว 1 ไปยังขั้ว 2 โดยทำการจ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply) แล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารที่ขั้ว 3 และ ขั้ว 4 ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามากระทำ พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อทำการสร้างสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับชิ้นสาร ทำให้ทิศการไหลของกระแสซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้ามีการเบี่ยงเบนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ข) จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้ว 3 และ ขั้ว 4 เรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า “แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)” ในกรณีที่มีการกลับขั้วหรือการเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็กที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำกับชิ้นสารส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสไปในทางตรงกันข้าม ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมจะกลับทิศกันกับกรณีที่กำลังมาข้างต้น



รูปที่ 2.2 ปรัชการณฮอลล์ที่เกิดขึ้นในชิ้นสาร

- (ก) กรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ
 (ข) กรณีที่มีสนามแม่เหล็กเข้ามากระทำในทิศตั้งฉากกับชิ้นสาร

การศึกษาถึงหัววัดเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบค่าสนามแม่เหล็กหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย ทฤษฎีของสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ ลำดับแรกจะกล่าวถึงสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในสารของแข็งก่อน ดังนั้นเมื่อสร้างความต่างศักย์ระหว่างสองตำแหน่งบนชิ้นสารของแข็ง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศจากศักย์มากพุ่งไปหาศักย์น้อย โดยแรงที่กระทำกับจุดประจุ [6] เป็นผลเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1)

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.1)$$

ซึ่งในการเคลื่อนที่ของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า “การดริฟท์ (Drift)” โดยมีความเร็วของพาหะจะถูกจำกัดโดยการชนที่เกิดขึ้นกับพาหะนั้นๆ เรียกความเร็วนี้ว่า “ความเร็วดริฟท์ (Drift Velocity)” ดังนั้นความเร็วดริฟท์เฉลี่ยหรือความเร็วเฉลี่ยของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้าในสารของแข็งมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.2)

$$v_d = \mu E \quad (2.2)$$

ในกรณีของสนามแม่เหล็กจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของจุดประจุที่หยุดนิ่ง เว้นแต่จะมีการเคลื่อนที่ด้วยแรงอื่น ๆ มากระทำ เช่น แรงจากสนามไฟฟ้า เป็นต้น โดยแรงเนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของประจุ และสำหรับแรงของสนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุ โดยจะขึ้นกับฟังก์ชันความเร็วของประจุพาหะ ความเข้มสนามแม่เหล็กและทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับประจุ สามารถหาได้ตามสมการ (2.3)

$$F = qvB \sin \theta \quad (2.3)$$

อิเล็กตรอนที่มีการเคลื่อนที่ ภายใต้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้านี้ส่งผลต่อจุดประจุสามารถอธิบายได้จากสมการ (2.4)

$$F = qE + qvB \sin \theta \quad (2.4)$$

โดยที่	F	คือ	ฟังก์ชันของแรง
	E	คือ	สนามไฟฟ้า
	v	คือ	ความเร็วของประจุ
	B	คือ	สนามแม่เหล็ก
	q	คือ	ประจุไฟฟ้า
	θ	คือ	มุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุ

ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า “แรงลอเรนซ์ (Lorentz force)” ซึ่งในสมการของลอเรนซ์นี้ ค่าประจุไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งบนระนาบ x, y, z โดยในสมการของลอเรนซ์จะแบ่งปรากฏการณ์ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ประจุตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า และการตอบสนองของการเคลื่อนที่ของประจุต่อสนามแม่เหล็ก ในกรณีของสนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดแรงทางไฟฟ้ากระทำกับจุดประจุ เกิดการเคลื่อนที่ของประจุพาหะและเกิดกระแสภายในชิ้นสารขึ้น ซึ่งแรงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดของประจุไฟฟ้าและปริมาณความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า สำหรับในส่วนที่สองเป็นการแสดงการตอบสนองของประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้การเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงเป็นแนวโค้งหรือหมุนเป็นเกลียวซึ่งขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับสนามแม่เหล็ก

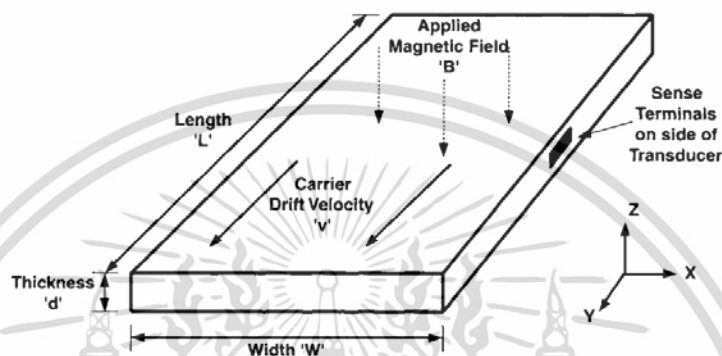
ในกรณีของประจุพาหะที่เคลื่อนที่ในชิ้นสารฮอลล์ ความเร็วของประจุพาหะจะมีความหนาแน่นไปในทิศทางหนึ่งของวัสดุตั้งรูป 2.3 โดยข้อที่ใช้ต่อออกมาเพื่อวัดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กถูกต่อคร่อมชิ้นสารโดยกำหนดให้พาหะมีความเร็วเคลื่อนที่ไปในระนาบแกน x ($V_y=0$ m/s, $V_z=0$ m/s) และผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เกิดขึ้นในแกน x แสดงถึงแรงสนามแม่เหล็กที่กระทำกับจุดประจุในแนวแกน x ดังสมการ (2.5)

$$F_x = q_0 v_y B_z \quad (2.5)$$

โดยที่	q_0	คือ	ประจุไฟฟ้า
	v_y	คือ	ความเร็วของจุดประจุแนวแกน y
	B_z	คือ	สนามแม่เหล็กแนวแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวแกน z (B_z) นั่นคือเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำกับวัสดุฮอลล์ ส่งผลทำให้เกิดแรงแม่เหล็กค่าหนึ่งทีกระทำกับประจุ เปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของประจุจากทางเดิมที่เคลื่อนที่ในแนวแกน y เปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน x ทำให้ความหนาแน่นของประจุบริเวณด้านทั้งสองของวัสดุแนวแกน x ต่างกัน ซึ่งมีระยะเท่ากับ ความกว้างของชิ้นสารกรณีนี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในชิ้นสารขึ้น จึงเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างด้านทั้งสองของวัสดุ



รูปที่ 2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นตัวนำ

จากรูปที่ 2.3 สามารถหาสนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field) จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กดังสมการ (2.6)

$$q_0 E_H + q_0 v \times B_{\perp} = 0 \quad (2.6)$$

โดยที่ E_H คือ สนามไฟฟ้าฮอลล์ ที่เกิดในชิ้นสาร E_H จะมีค่าตามสมการ

$$E_H = -v \times B_{\perp} \quad (2.7)$$

โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของความเร็วประจุพาหะและความเข้มของสนามแม่เหล็ก สำหรับชิ้นสารที่มีความกว้างเป็น w ระหว่างขั้วทั้งสอง สามารถหาศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมได้จากการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นความกว้าง w ได้ตามสมการ (2.8)

$$V_H = -wvB_{\perp} \quad (2.8)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นกับฟังก์ชันทั้ง 3 ประกอบด้วย ความเร็วของจุดประจุสำหรับชิ้นสารใดๆ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้กับชิ้นสาร และระยะของขั้วต่อที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีความเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในโลหะ

ค่าความไว (Sensitivity) ของวัสดุฮอลล์ เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้รู้ถึงความเร็วเฉลี่ยของพาหะสถานะของอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ เป็นผลมาจากพลังงานความร้อน (Thermal Velocity) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) เป็นความเร็วอันเนื่องมาจากความร้อนมีผลเป็นอย่างมากต่ออิเล็กตรอน การเคลื่อนที่แบบสุ่มนี้จะนำไปเฉลี่ยเป็นความเร็วสุทธิ ค่าความเร็วรวมที่ได้จึงเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จะทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน เมื่อมีค่าสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นให้กับวัสดุฮอลล์ที่เป็นโลหะ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งไปในแนวทิศของสนามไฟฟ้า ที่มีค่ามากกว่าการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากพลังงานความร้อน ดังนั้นอัตราการเคลื่อนที่ของพาหะที่เกิดจากสนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า “ความเร็วดริฟท์”

ในกรณีที่เป็นโลหะนำไฟฟ้าอย่างดีสามารถที่จะประมาณค่าได้ ในขั้นแรกจะทำการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับกรณีของโลหะ เช่น ทองแดง สามารถประมาณได้ว่าอะตอมของทองแดงมีอิเล็กตรอนชั้นวงนอกสุดที่ทำให้เกิดการไหลของกระแส ซึ่งความหนาแน่นของประจุพาหะมาจากผลของปริมาณอะตอมของทองแดงต่อหนึ่งน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จาก

$$N = \frac{N_A}{M_m} D \quad (2.9)$$

โดยที่ N คือ จำนวนของพาหะต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 N_A คือ ค่าคงที่อะโวกาโดร ($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
 M_m คือ มวลโมเลกุล ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)
 D คือ ความถ่วงจำเพาะของทองแดง (g / cm^3)

ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ สามารถประมาณค่าความเร็วดริฟท์ของพาหะได้จากกระแสที่อยู่ในหน่วยแอมแปร์ สมมุติให้ค่าความหนาแน่นของพาหะเป็นค่าคงที่ และเพิ่มปริมาณพาหะในระบบได้ ความเร็วของพาหะจะแปรผันกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ยิ่งพื้นที่หน้าตัดมีค่ามาก ค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะลดลง ดังนั้นความเร็วดริฟท์ของพาหะสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.10)

$$v = \frac{I}{q_0 N A} \quad (2.10)$$

โดยที่ I คือ กระแส
 q_0 คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน ($1.66 \times 10^{-19} \text{ C}$)
 N คือ ความหนาแน่นของพาหะต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 A คือ พื้นที่หน้าตัด

เมื่อพิจารณาถึงความเร็วของพาหะดังกล่าวอย่างพบว่าจะมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วแสง เมื่อทำการรวมสมการ (2.8) และ (2.10) สามารถที่จะพิสูจน์เพื่อใช้ในการอธิบาย ค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับพื้นที่หน้าตัด กระแสและความหนาแน่นของพาหะหาได้ตามสมการ (2.11)

$$V_H = \frac{IB}{q_0Nd} \quad (2.11)$$

โดยที่ d คือ ความหนาของชั้นสารตัวนำ

ซึ่งในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้ โลหะเพื่อสร้างเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่อยู่บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

สำหรับวัสดุศาสตร์ที่จำแนกประเภทตามคุณสมบัติทางไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็นสามประเภท คือ ตัวนำ ฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในกรณีที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นิยมใช้สารกึ่งตัวนำเป็นหลัก วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ เช่น ซิลิคอน (Si), เยอรมันเนียม(Ge), แกลเลียม(Ga) เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวนำและฉนวนอย่างชัดเจน กล่าวคือ ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าขึ้นกับอุณหภูมิและแสงจากภายนอกที่มากระทำในวัสดุ โดยวัสดุชนิดนี้เมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือที่เหมาะสมคุณสมบัติการนำไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คุณสมบัติดังกล่าวที่มีความเหมาะสมสำหรับทำการสร้างเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางฟิสิกส์ในธรรมชาติ เช่น แสง อุณหภูมิ เป็นต้น รวมถึงการวัดปริมาณความเข้มข้นของพลาสมาแม่เหล็ก ที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์มาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดสนามแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก (Intrinsic semiconductor) และสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic Semiconductor) ด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันนี้ เมื่อนำมาประดิษฐ์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กการตอบสนองของวัสดุทั้งสองชนิดจึงแตกต่างกัน โดยจะทำการวิเคราะห์ในเรื่องของความหนาแน่นของพาหะที่มีผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเป็นหลัก

2.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก [3],[4] หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ปราศจากการเจือปนจากอะตอมแปลกปลอมอื่น ๆ เช่น สารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์ เป็นต้น เมื่อก้าวโดยสรุปของคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ ที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์เคลวินพลังงานความร้อน (Thermal Energy) ทำให้บางอะตอมเกิดไอออนอิสระเป็นคู่พาหะอิเล็กตรอนโฮล (Electron hole pair) อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้า ทั้งโฮลอยู่ที่แถบวาเลนซ์ทำให้เกิดความหนาแน่นของพาหะ คือ อิเล็กตรอน และโฮล มีค่าต่างกัน ความหนาแน่นของพาหะจะเป็นค่าคงที่ในสภาวะสมดุลความร้อนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ความหนาแน่นอินทรินทริกซิค (n_i) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและความกว้างของช่องว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิคแล้ว อิเล็กตรอนวาเลนซ์ (Valence electron) จะถูกยึดเหนี่ยวไว้ที่แถบวาเลนซ์จำเป็นต้องใช้พลังงานภายนอกที่สูงมากเพื่อจะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนขึ้นระดับพลังงานสู่แถบนำไฟฟ้าได้ แสดงถึงคุณสมบัติคล้ายกับฉนวนคือมีค่าความนำไฟฟ้าน้อยมาก จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

2.3.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทริซิค

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทริซิค ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทำให้คุณสมบัติทางการนำไฟฟ้าดีขึ้น โดยการเติมอะตอมสารเจือ (Impurity atoms) ลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ และสามารถเลือกชนิดของอะตอมสารเจือ เพื่อกำหนดชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ โดยสามารถแบ่งประเภทของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทริซิคได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) และ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type Semiconductor) ตามชนิดของพาหะในการนำไฟฟ้า

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) เป็นสารกึ่งตัวนำอินทรินซิคที่ถูกเติมสารเจือชนิดเอ็น เช่น การเติมอะตอมฟอสฟอรัสในซิลิคอนบริสุทธิ์ เป็นต้น คือเติมอะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor atom) ทำให้มีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่า โฮล ($n_0 \gg p_0$) อิเล็กตรอนจึงเป็นพาหะส่วนมากที่มีหน้าที่หลักในการนำไฟฟ้า ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี เป็นการเติมอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor atom) ซึ่งเป็นอะตอมธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ 3 ของตารางธาตุ เป็นการเติมอะตอมโบรอนในซิลิคอนบริสุทธิ์ ทำให้ปริมาณโฮลมีมากกว่าอิเล็กตรอน ($p_0 \gg n_0$) ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะนำไฟฟ้าโดยโฮล ซึ่งแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก สำหรับการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของพาหะของสารเอ็กทริซิคจะเริ่มจากสมการ (2.12)

$$n_0 = p_0 = n_i = 2 \left(\frac{2KT\pi}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot (m_n^* \cdot m_p^*)^{\frac{3}{4}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (2.12)$$

$$p_0 + N_D^+ = n_0 + N_A^- \quad (2.13)$$

ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ($N_A = 0$) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากหาได้จากสมการ (2.14)

$$n_0 = \frac{N_D}{2} + \left[\left(\frac{N_D}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

โดยที่ $n_0 \approx N_D$ เมื่อ $N_D \gg n_i$

ในการกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($N_D = 0$) ความหนาแน่นของโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากหาได้จากสมการ (2.15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_0 = \frac{N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_A}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

โดยที่ $p_0 \approx N_A$ เมื่อ $N_A \gg n_i$

ดังนั้นสำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิคในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กมีข้อดีหลายประการ ข้อดีหนึ่งที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิค คือ สามารถควบคุมความหนาแน่นของพาหะที่มีผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำ อีกทั้งยังสามารถเลือกพาหะในการนำไฟฟ้า ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจากการเติมสารเจือได้ โดยปกติแล้วพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าพาหะที่เป็นโฮล ดังนั้นในทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์จึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีพาหะข้างมาก (majority carriers) เป็นอิเล็กตรอนมากกว่าการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีพาหะเป็นโฮล ซึ่งเคลื่อนที่ภายในชิ้นสารได้ช้ากว่า และสำหรับสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิคยังมีจุดเด่นที่เหนือกว่าสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ คือ ความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะแปรผันกับฟังก์ชันอุณหภูมิอย่างมาก ซึ่งต่างจากกับสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิคที่มีการเติมอะตอมสารเจือเข้าไปมากพอจนทำให้มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งกรณีที่น่าไปประดิษฐ์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณความหนาแน่นของพาหะ เมื่อมีการเจือสารปริมาณมากเพียงพอที่มีเสถียรภาพโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นเหตุผลเหล่านี้จึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค ในการประดิษฐ์เป็นวงจรรวมสำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็ก ถึงแม้รูปร่างลักษณะของชิ้นสาร ปริมาณสารเจือและกระแสที่ไบอัสให้กับชิ้นสารมีผลต่อการตอบสนองของหัววัดก็ตาม ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ ค่าความต้านทานของชิ้นสารที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และพารามิเตอร์อื่นโดยตรง สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารปริมาณน้อยๆ ทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น นั่นคือจำเป็นต้องใช้ปริมาณกระแสที่ไบอัสเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการไบอัสกระแสระดับมิลลิแอมป์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนความต่างศักย์ในระดับร้อยโวลต์ และค่าความต้านทานของชิ้นสารเป็นไปตามสมการ (2.16)

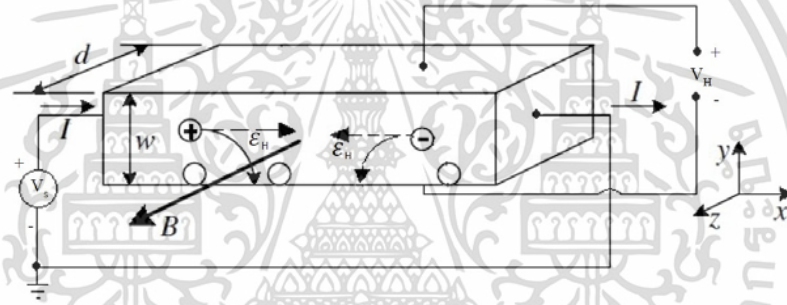
$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.16)$$

โดยที่ R คือ ความต้านทาน
 ρ คือ สภาพความต้านทาน
 l คือ ความยาว
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารที่กระแสไหลผ่าน

ปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของแรงภายนอกกระทำกับจุดประจุ (Charge) ที่เคลื่อนที่โดยแรงที่กระทำนี้เนื่องจากสนามแม่เหล็ก โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของจุดประจุเขียนได้ตามสมการ (2.3) โดยผลของเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นเกิดจาก Cross product ซึ่งปริมาณเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามทิศทางของมุมสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ตามฟังก์ชันเอกซานนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซน์ ผลของปรากฏการณ์ฮอลล์แสดงให้เห็นตามแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 2.4 สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมธาตุอื่น ซึ่งจะประกอบไปด้วยพาหะส่วนใหญ่หนึ่งชนิดตามอะตอมธาตุสารเจือที่ใช้ โดยจะทำการพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือ พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนกับโฮล ดังรูปที่ 2.4

จากสมการ (2.3) แสดงให้เห็นถึงผลของกระแสต่อประจุพาหะโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสาร โดยมีแรงจากสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของประจุพาหะทั้งสอง ในสภาวะคงตัวด้วยแรงจากสนามแม่เหล็กที่สมดุลนี้เป็นผลทำให้จุดประจุเคลื่อนที่อีกทิศทางหนึ่ง การกระจายตัวของพาหะจึงเปลี่ยนไปเกิดเป็นการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งขึ้น โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field; ϵ_H) [7]-[10]” เมื่อทำการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆของความกว้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ผลที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากพื้นผิวรอยสัมผัสตรงกันข้ามกันของชั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ขึ้นกับรูปแบบของชั้นสารและสนามแม่เหล็กที่กระทำเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์และความกว้างของชั้นสาร (W) ; $V_H = \epsilon_H W$



รูปที่ 2.4 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

ในรูปที่ 2.4 กระแสที่ไหลในชั้นสารแนวแกน x ที่เกิดจากความต่างศักย์ V_s เป็นผลทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกับกระแส ในกรณีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทางตรงกันข้าม โดยที่พาหะทั้งสองมีค่าประจุที่ต่างกันทำให้เกิดทิศของความเร็วที่ตรงกันข้าม เมื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้กับชั้นสารในแนว $+z$ แรงแม่เหล็กกระทำกับประจุทั้งสองส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่เปียงเบนไปทิศเดียวกันในแนวแกน y แต่เนื่องจากค่าประจุทั้งสองตรงข้ามกัน ทำให้เกิดแรงดันที่มีขั้วต่างกัน เรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะข้างมากต่างชนิดกัน คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ทฤษฎีอย่างง่ายที่แสดงกลไกการเกิดดังรูปที่ 2.4 โดยแสดงให้เห็นการโบกสกระแสให้กับชั้นสารในแนวแกน x แล้วป้อนสนามแม่เหล็กในแนวแกน z สนามไฟฟ้าฮอลล์จะเกิดขึ้นในแนวแกน y ซึ่งกรณีที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สนามไฟฟ้าฮอลล์จะเกิดในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณากระแสพาหะจะทำให้เกิดความเร็วค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ความเร็วดริฟท์ (v_d) โดยความเร็วดริฟท์จะสัมพันธ์กับขนาดของกระแสสำหรับพาหะที่เป็นโฮลแสดงดังสมการ (2.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_d = \frac{J_x}{qp} \quad (2.17)$$

สำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนจะได้

$$v_d = \frac{J_x}{qn} \quad (2.18)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าฮอลล์สามารถอธิบายในเทอมของกระแสและสนามแม่เหล็กสำหรับพาหะที่เป็นโฮลตามสมการ (2.19)

$$\varepsilon_H = \frac{J_x B_{\perp}}{qp} \quad (2.19)$$

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนเขียนได้เป็น

$$\varepsilon_H = -\frac{J_x B_{\perp}}{qn} \quad (2.20)$$

ส่วนปริมาณของแรงสนามแม่เหล็กกับแรงสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เท่ากันเขียนได้ว่า

$$q\varepsilon_H = qV_d B_{\perp} \quad (2.21)$$

เขียนใหม่ได้ว่า

$$\varepsilon_H = R_H J_x B_{\perp} \quad (2.22)$$

เมื่อ R_H คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/qp$ สำหรับโฮลและเท่ากับ $-1/qn$ สำหรับอิเล็กตรอน ซึ่งในสมการ (2.22) สามารถที่จะคำนวณการเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ได้อย่างแม่นยำ ถ้าสามารถเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ ได้อย่างเหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ที่มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของประจุพาหะ ซึ่งจะทำให้เกิดพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอีกคือ r เพื่อที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้องสำหรับพาหะที่เป็นโฮลตามสมการ (2.23)

$$R_H = \frac{r}{qp} \quad (2.23)$$

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนตามสมการ (2.24)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H = -\frac{r}{qn} \quad (2.24)$$

ที่ค่าพารามิเตอร์ r ที่มีค่าอยู่ในระหว่าง 1-2 โดยที่ r สำหรับการเกิดการกระเจิงในแลตต์ที่มีค่าประมาณ 1.18 และสำหรับการกระเจิงแบบไอออนไนซ์มีค่าประมาณ 1.93

แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) ที่ได้ เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ (\mathcal{E}_H) และระยะความกว้างของชิ้นสาร (w) พิจารณาในเทอมของกระแสรวมได้ดังสมการ (2.25)

$$V_H = \frac{R_H IB_{\perp}}{t} \quad (2.25)$$

โดยที่ R_H ทำการวัดในหน่วย $m^3 \cdot c^{-1}$, I ในหน่วยแอมแปร์ (Ampere), B_{\perp} ในหน่วยเทสลา (Tesla), t ในหน่วยเมตร (Meter) และ V_H ในหน่วยโวลต์ (Voltage)

จากสมการ (2.25) สำหรับสารกึ่งตัวนำใดๆที่ไม่ทราบชนิดแต่สามารถทราบค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ที่สนามแม่เหล็กและกระแสค่าหนึ่ง ส่วนชนิดของพาหะและค่าความหนาแน่นของพาหะสามารถรู้ได้เมื่อทราบค่าของกระแส ค่าสภาพความนำไฟฟ้าและค่าความคล่องตัวของฮอลล์ ($\mu = \sigma |R_H|$) เพื่อใช้ในการคำนวณในสมการ (2.24) กับ (2.23)

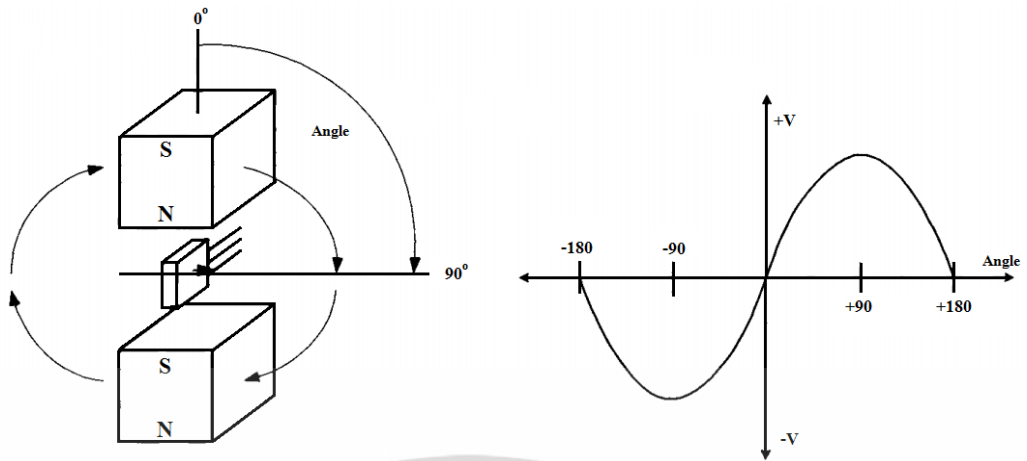
2.4 ปฏิกิริยาฮอลล์ตามฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ผลของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อจุดประจุในสารกึ่งตัวนำนั้นสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.3) ซึ่งปริมาณเวกเตอร์ของแรงที่เกิดขึ้นนี้จะแปรผันตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุเป็นฟังก์ชันไซน์ [19] เมื่อทดลองการเปลี่ยนตำแหน่งโดยการหมุนสนามแม่เหล็กรอบหัววัดฮอลล์ที่อยู่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการหมุน ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ในมุมต่างๆพบว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ดังสมการ (2.26)

$$V_H = k \sin \theta \quad (2.26)$$

โดยที่ค่า k เป็นค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในระบบการวัด

เมื่อพิจารณาในรูป 2.5 แสดงการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เปลี่ยนเป็นมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำในวัสดุฮอลล์ ดังนั้นที่ตำแหน่งแรกคือที่ศูนย์กลาง วัสดุฮอลล์ถูกวางให้ด้านที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก (active area) ไว้ที่ตำแหน่งขนานกับแนวเส้นแรงสนามแม่เหล็กนั่นคือ เส้นแรงแม่เหล็กทำมุมศูนย์กลางกับวัสดุฮอลล์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้จึงมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งให้เส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำเป็นมุมตั้งฉาก (90°) กับวัสดุฮอลล์ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นจะได้ค่าสูงสุด

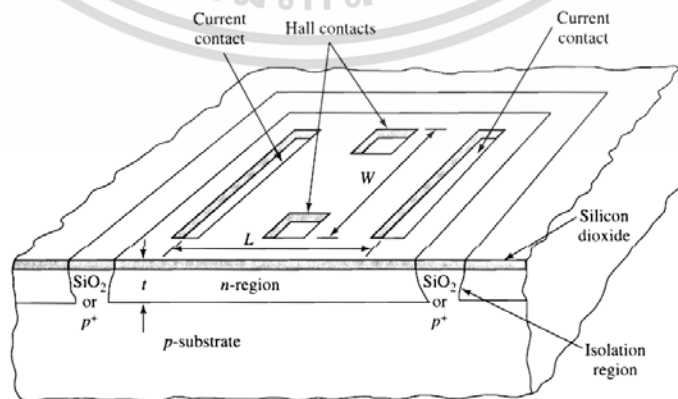


รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ

2.5 วงจรรวมสำหรับหัววัดฮอลล์ (Integrated Hall Effect Magnetic sensor)

ในการพัฒนาหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์เซ็นเซอร์ในรูปแบบของวงจรรวม[7] (Integrated Circuit) นั้น มีความจำเป็นที่จะต้องแยกส่วนตัวนำออกจากกัน เพื่อที่จะสามารถทำงานให้มีความใกล้เคียงกับการเกิดปรากฏการณ์อย่างง่าย ซึ่งวิธีการหนึ่งที่สามารถทำการแยกชิ้นของสารกึ่งตัวนำได้ คือ การใช้ชั้นอิพิแทกเซียล (epitaxial) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นการสร้างฮอลล์เซ็นเซอร์อย่างง่ายที่เป็นไปตามทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์[7] โดยสร้างระยะ W ให้มีความกว้างกว่าระยะ L ดังนั้นความหนาแน่นกระแส J ไหลผ่านขั้วจะมีความเป็นระเบียบในพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสาร อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นกับความต้านทานของผิวสัมผัส ถ้าระยะ $L \gg W$

ดังนั้นเมื่อทำในรูปแบบของวงจรรวมจำเป็นที่จะต้องคำนวณระยะ L และ W ให้มีความเหมาะสมที่สุด และเมื่อทำการพิจารณาโครงสร้างวัสดุฮอลล์ในรูปแบบทรงสี่เหลี่ยม วิธีการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อให้ความสมบูรณ์ถูกต้องที่สุด ต้องนำแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้จากสมการ (2.24) คูณด้วยค่าคงที่ K ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ที่เป็นอัตราส่วนของ W/L



รูปที่ 2.6 ชิ้นสารฮอลล์ที่สร้างเป็นวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการสร้างวัสดุฮอลล์ในรูปแบบของวงจรรวม คือ ค่ากำลัง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าของวัสดุ สามารถอธิบายได้จากค่าความต้านทานของชั้นสารที่ใช้ โดยเริ่มพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ได้ดังสมการ (2.27)

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{L}{q\mu_p W t} = \frac{LR_H}{r\mu_p W t} \quad (2.27)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R = \frac{LR_H}{r\mu_n W t} \quad (2.28)$$

ส่วนแรงดันไฟฟ้า V_s สามารถเขียนได้เป็น $I = \frac{V_s}{R}$ หรือในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเขียนได้เป็น

$$I = \frac{rV_s \mu_p W t}{R_H L} \quad (2.29)$$

และในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะได้

$$I = \frac{rV_s \mu_n W t}{R_H L} \quad (2.30)$$

จากสมการ (2.27) คูณด้วยค่าคงที่ K สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะได้

$$V_H = r\mu_p V_s \frac{W}{L} B_{\perp} \quad (2.31)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะได้

$$V_H = r\mu_n V_s \frac{W}{L} B_{\perp} \quad (2.32)$$

โดยที่ค่า B ทำการคำนวณในหน่วยเทสลา

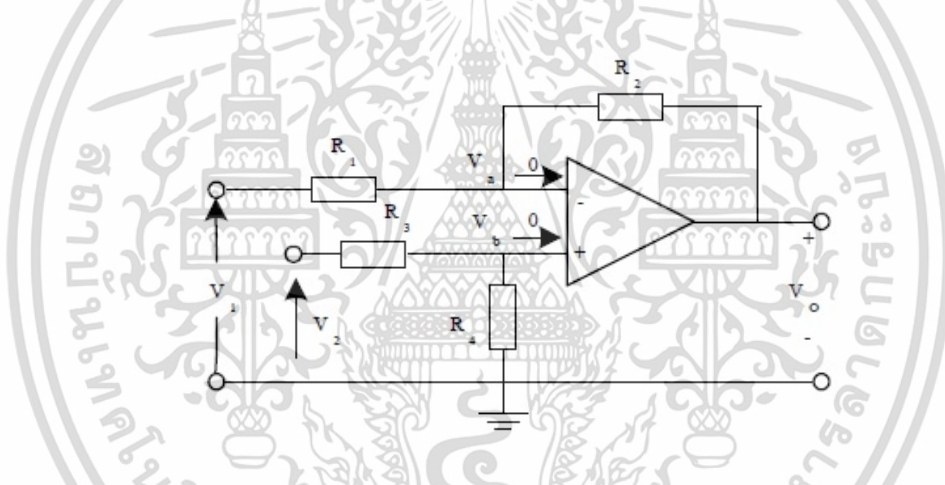
2.6 วงจรขยายสัญญาณโดยใช้โอปแอมป์ (OP-AMP)

โอปแอมป์ (Operational Amplifier : INA128 และ INA125) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกพัฒนามาจาก ทรานซิสเตอร์โดยจะถูกผลิตอยู่ในรูปของวงจรรวม (Integrated Circuit) หรือที่เรียกสั้นๆว่า ไอซี ในปัจจุบันโอปแอมป์ [6] ได้รับความนิยมในการใช้งานมาก เนื่องจากวงจรรวมหนึ่งๆ นั้นจะใช้อุปกรณ์ภายนอกต่อร่วมน้อยมาก ด้วยจุดประสงค์ในการสร้างโอปแอมป์ คือ ต้องการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราการขยายสูงและสามารถใช้ขยายแรงดันได้ทั้งไฟตรงและไฟสลับ ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอุปกรณ์ที่ง่ายต่อการทำงานทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Operation) เช่น การบวก การลบ การคูณ หรือการหาร เป็นต้น สามารถขยายขอบเขตการใช้งานออปแอมป์ไปใช้งานด้านอื่น เช่น วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรรักษาแรงดัน วงจรกรองความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรตั้งเวลาและอื่นๆ อีกมากมาย วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก วงจรขยายสัญญาณในรูปแบบต่างๆ นี้เป็นวงจรพื้นฐานสำคัญที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งในระบบประมวลผลสัญญาณต่างๆ มากมาย เช่น ทำหน้าที่ขยายสัญญาณในภาคอินพุตของระบบวัด ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณอนาล็อกในระบบสื่อสารหรือแม้กระทั่งทำหน้าที่ปรับแต่งสภาพสัญญาณ เชื่อมต่อสัญญาณ และควบคุมกระบวนการในระบบควบคุม เป็นต้น

2.6.1 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง (Difference Amplifier)

การขยายผลต่าง คือ วงจรที่ใช้ในการขยายความแตกต่างของสัญญาณระหว่างขาต้านเข้าทั้งสอง ซึ่งจะตรงข้ามกับหัวข้อการขยายแบบรวมสัญญาณที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังมีลักษณะคล้ายหรือเกี่ยวข้องกับขยายสำหรับเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier) อันเป็นวงจรขยายที่มีประโยชน์และนิยมใช้มาก [12],[13]



รูปที่ 2.7 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

พิจารณาจากรูปที่ 2.7 และใช้ข้อกำหนดของออปแอมป์ที่กล่าวไว้ว่าไม่มีกระแสไหลเข้า ขั้วต้านขาเข้าของออปแอมป์ เช่น เดิมเราประยุกต์ใช้กฎกระแส KCL (Kirchhoff current law) ที่จุด a เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{V_1 - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_o}{R_2} \quad (2.33)$$

หรือ

$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_a - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) V_1 \quad (2.34)$$

ที่จุด b ใช้กฎกระแส KCL จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_2 - V_b}{R_3} = \frac{V_b - 0}{R_4} \quad (2.35)$$

หรือ
$$V_b = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \quad (2.36)$$

เมื่อ $V_a = V_b$ แทนสมการ (2.35) ลงในสมการ (2.36) จะได้สมการ

$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.37)$$

หรือ
$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{\frac{R_2 + 1}{R_1}}{\frac{R_3 + 1}{R_4}} \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.38)$$

เมื่อแรงดัน $V_1 = V_2$ วงจรขยายต้องให้แรงดันด้านหัวขาออก $V_o = 0$ ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของวงจรที่ขจัดสัญญาณร่วม (Reject a Signal Common) ที่ขาต้านเข้าทั้งสอง ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวและเมื่อ

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.39)$$

นั่นคือเมื่อวงจรเป็นการขยายผลต่างสมการ (2.37) จะกลายเป็น

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.40)$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (2.41)$$

ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_2$ และ $R_3 = R_4$ วงจรการขยายความแตกต่างจะกลายเป็นตัวลบสัญญาณ ซึ่งมีแรงดันด้านขาออกเป็น

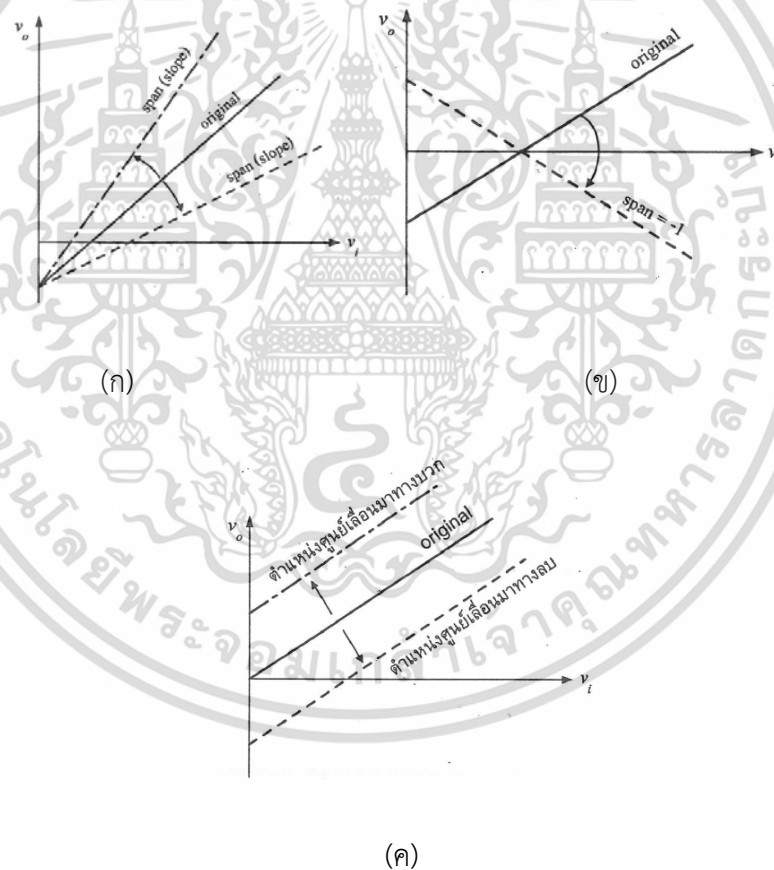
$$V_o = V_2 - V_1 \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ (Zero and span circuit)

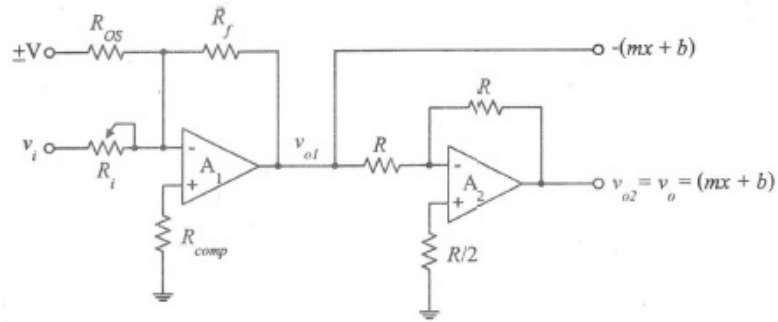
การนำเอาออปแอมป์ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการประมวลผลสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal Processing) ลักษณะต่างๆ เช่น ระบบเครื่องมือวัด ระบบควบคุมค่ากระบวนการหรือระบบสื่อสาร เป็นต้น ซึ่งได้เน้นเฉพาะวงจรประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นโดยใช้ออปแอมป์ที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเป็นไปตามคุณสมบัติของความ เป็นเชิงเส้น (Linear op-amp circuit) และในส่วนของวงจรประมวลผลสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ออปแอมป์ (Nonlinear op-amp circuit)

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เป็นวงจรที่มีความสำคัญอย่างมากวงจรหนึ่งในระบบการวัดและระบบการควบคุมกระบวนการ วงจรนี้จะทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณ (Transmission) และปรับแต่งสัญญาณ (Signal conditioner) ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตให้มีความสัมพันธ์ไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความชัน (Slope) และปรับตำแหน่งศูนย์ของกราฟคุณสมบัติของวงจร

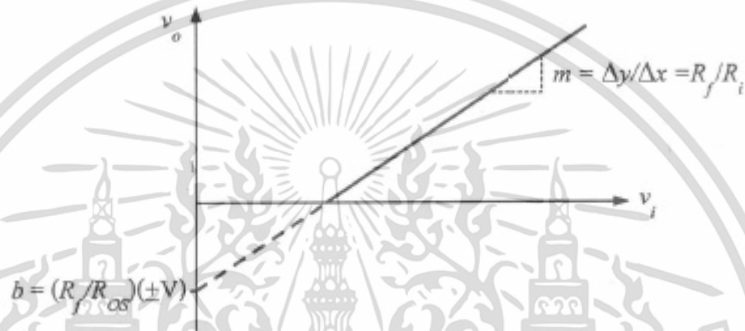


รูปที่ 2.8 ผลของการปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ (ก) การเปลี่ยนแปลงความชัน (ข) ความชันเท่ากับ -1 และ (ค) การปรับตำแหน่งศูนย์ (จุดตัดแกน y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 (ก) วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ และ (ข) คุณสมบัติของวงจร

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์และกราฟคุณสมบัติระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_i ของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรรวมสัญญาณ A_1 และวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส A_2 ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของ A_1 (V_{o1}) จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{o1} = -\left[\frac{R_2}{R_1} V_i + \frac{R_2}{R_{os}} (\pm V) \right] \tag{2.43}$$

จากนั้นแรงดันเอาต์พุต V_{o1} จะถูกป้อนเป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส A_2 ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ -1 ทำให้แรงดันเอาต์พุตของ A_2 (V_{o2}) หรือวงจรเอาต์พุตของวงจร V_o มีค่าเท่ากับ

$$V_o = V_{o2} = (-1)V_{o1} = \left[\frac{R_2}{R_1} V_i + \frac{R_2}{R_{os}} (\pm V) \right] \tag{2.44}$$

จากสมการ 2.41 แสดงให้เห็นว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ V_i ของวงจรมีอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง และจากรูปทั่วไปของสมการเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = mx + b \quad (2.45)$$

ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมการ 2.44 และ 2.45 จะเป็นไปความสัมพันธ์ $m = \frac{R_2}{R_1}$

คือ ค่าความชันของกราฟเส้นตรงหรืออัตราการขยายวงจร (Span) และ $b = \frac{R_2}{R_{OS}}(\pm V)$ คือ จุดตัด

แกน y ของกราฟหรือตำแหน่งศูนย์ (Zero) หมายความว่า การปรับแต่งค่าความชันสามารถกระทำได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทาน R_2 กับ R_1 ของวงจร ในขณะที่ตำแหน่งศูนย์ของกราฟความสัมพันธ์จะปรับค่าได้จากค่าความต้านทาน R_{OS} หรือปรับได้จากระดับแรงดันอ้างอิง $\pm V$

2.7 วงจรขยายอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว

วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrument Amplifier) หรือเรียกย่อๆว่า วงจร IA นั้นเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณอินพุตแบบผลต่างซึ่งพัฒนามาจากหลักการของวงจรขยายสัญญาณผลต่างพื้นฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้น จากรูปที่ 2.7 เพื่อปรับปรุงให้สมรรถนะของวงจรดีขึ้น โดยแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ 2.41 ดังนี้คือ

$$V_o = A(V_2 - V_1) \quad (2.46)$$

โดยที่ A คือ อัตราการขยายแรงดันของวงจร วงจร IA ซึ่งถูกปรับปรุงขึ้นนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับวงจรขยายสัญญาณผลต่างพื้นฐานในรูปที่ 2.7 ก็คือ มีค่าอิมพีแดนซ์สูง อัตราการขยายแรงดันของวงจรสูง และมีคุณสมบัติในการตัดสัญญาณรบกวน (CMRR) สูง ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของวงจร IA ให้ผลใกล้เคียงกับวงจรขยายสัญญาณผลต่างในทางอุดมคติวงจรหนึ่ง

วงจรขยายอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว [7] และสัญลักษณ์ของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยที่ออปแอมป์ A_1 และ A_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรภาคอินพุตส่วนหน้า ขณะที่วงจรส่วนที่สอง คือ ออปแอมป์ A_3 จะทำหน้าที่เป็นวงจรภาคเอาต์พุตของวงจร ถ้ากำหนดให้ V_{O1} และ V_{O2} คือ แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ A_1 และ A_2 ตามลำดับ ดังนั้นจากสมการ 2.41 แรงดันเอาต์พุตของ A_3 หรือแรงดันเอาต์พุตของวงจร V_o จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_{O2} - V_{O1}) \quad (2.47)$$

เนื่องจากคุณสมบัติของออปแอมป์ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน R_3 และ R_G มีค่าเท่ากัน ($i_{R3} \cong i_{RG}$) อาศัยกฎของโอห์มทำให้ได้

$$V_{O1} - V_{O2} = (2R_3 + R_G)i_{RG} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $V_{OS} = 0$ แล้ว กระแสที่ไหลผ่าน R_G มีค่าเท่ากับ

$$i_{RG} = \frac{V_1 - V_2}{R_G} \quad (2.49)$$

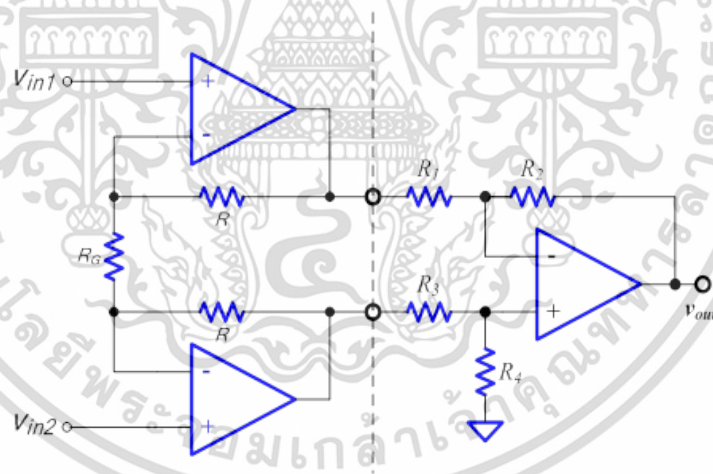
แทนค่าสมการ 2.49 ลงในสมการ 2.48 และ 2.47 จะได้

$$V_o = A(V_2 - V_1) \quad (2.50)$$

โดยที่

$$A = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.51)$$

เนื่องจากแรงดันอินพุต V_1 และ V_2 ของวงจรนี้ถูกป้อนโดยตรงเข้าทางอินพุตไม่กลับเฟสของออปแอมป์จึงทำให้วงจร IA นี้มีค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของวงจรสูงมาก (ประมาณเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของออปแอมป์) นอกจากนี้ อัตราการขยายแรงดัน A ของวงจรยังสามารถปรับแต่งค่าได้อย่างสะดวกและอิสระด้วยการปรับค่าของ R_G



รูปที่ 2.10 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

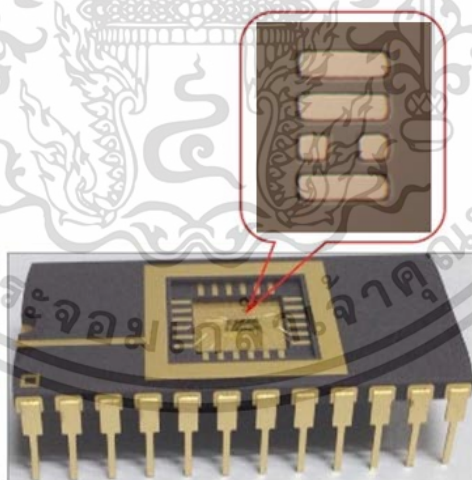
บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดสอบหัววัดฮอลล์สองมิติสำหรับเครื่องวัด ความเข้มสนามแม่เหล็ก

ในการประยุกต์ใช้หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เพลตสองมิติสำหรับการสร้างเป็นเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นจึงควรที่จะทราบถึงลักษณะ และสมบัติเฉพาะของหัววัด เพื่อสามารถนำมาใช้งานได้อย่างเหมาะสม ในบทนี้เป็นการนำเสนอถึงลักษณะโครงสร้างเฉพาะตัวของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เพลตที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง ลักษณะการทำงานและการนำหัววัดสนามแม่เหล็กไปใช้งาน รวมถึงการทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กตลอดจนการเชื่อมต่อกับวงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณสำหรับการประยุกต์ใช้สร้างเป็นเครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม

3.1 สมบัติทางกายภาพของหัววัดฮอลล์สองมิติ

สำหรับหัววัดฮอลล์เพลตสองมิติที่นำมาใช้ในการประยุกต์สร้างเป็นระบบวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นหัววัดที่ถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานเทคโนโลยีซิลิคอนที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้สองแนวแกน โดยมีขั้วนำไฟฟ้าทั้งหมดห้าขั้วแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.1

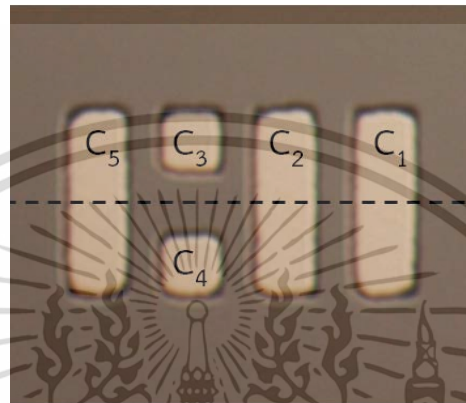


รูปที่ 3.1 หัววัดสนามแม่เหล็กสองทิศทาง

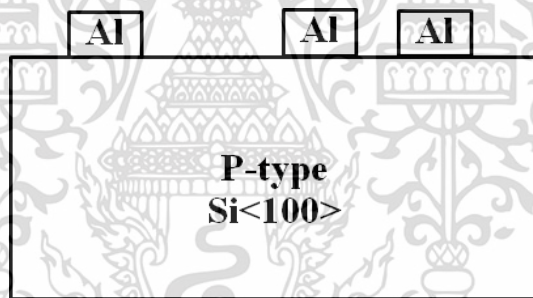
3.1.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติแบบเพลต

หัววัดฮอลล์แบบเพลตที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองแนวแกนคือ ในแนวที่สนามแม่เหล็กกระทำตั้งฉาก (Perpendicular field : B_z) และที่สนามแม่เหล็กกระทำในแนวขนาน (Parallel field : B_x) กับพื้นที่ในการตอบสนองของหัววัดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหัววัดทำการสร้างด้วยกระบวนการสร้างบนเทคโนโลยีซิลิคอนที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center : TMEC) ประกอบด้วยขั้วอะลูมิเนียมไฟฟ้า (Ohmic contact) ทั้งหมดห้าขั้วคือ C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , และ C_5 แสดงดังรูปที่ 3.2(ก) ซึ่งถูกสร้างขึ้นบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี (P-type silicon substrate) หนา $<100>$ ที่มีค่าสภาพความต้านทานของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เท่ากับ 20-30 โอห์ม-เซนติเมตร มีพื้นที่สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่ากับ $600 \times 300 \mu m^2$ รูปที่ 3.2(ข) แสดงถึงภาคตัดขวางของอุปกรณ์

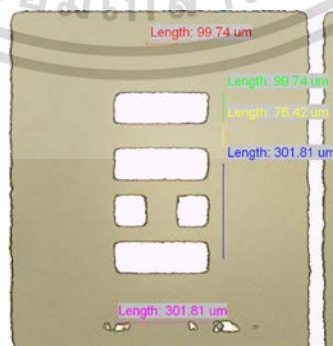


(ก)



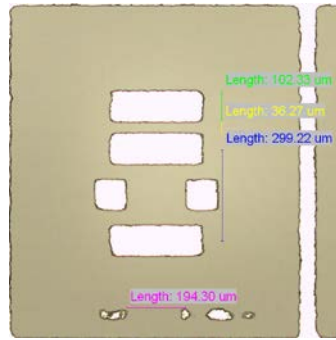
(ข)

รูปที่ 3.2 หัววัดสนามแม่เหล็กสองมิติ (ก) ภาพด้านบน และ (ข) ภาพตัดขวาง

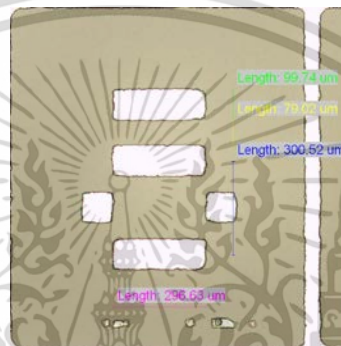


รูปที่ 3.3 โครงสร้างหัววัดฮอลล์เพลตที่ระยะ $W=100\mu m$ $S=80\mu m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

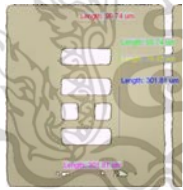




รูปที่ 3.4 โครงสร้างหัววัดฮอลล์เพลตที่ระยะ $W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$



รูปที่ 3.5 โครงสร้างหัววัดฮอลล์เพลตที่ระยะ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของสองโครงสร้าง

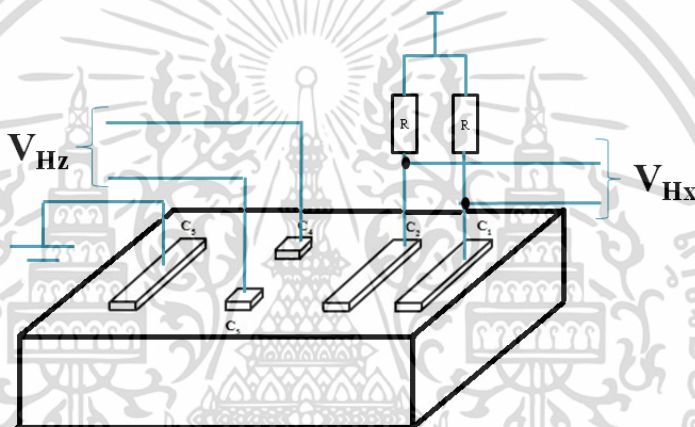
สมบัติเฉพาะของ โครงสร้างหัววัดสอง มิติ			
ชนิด	พี	พี	พี
ระนาบ	100	100	100
สภาพความต้านทาน	20-30 Ω-cm.	20-30 Ω-cm.	20-30 Ω-cm.
ความยาว (l)	300μm	300μm	300μm
ความกว้าง (w)	100μm	200μm	300μm
ระยะห่างของขั้ว (s)	80μm	40μm	80μm

ในการทดลองเลือกใช้หัววัดฮอลล์ที่มีลักษณะโครงสร้างของขั้ว C_3 กับ C_4 และ C_1 กับ C_2 ที่มีระยะแตกต่างกันสามโครงสร้างคือระยะโครงสร้างที่ 1 คือ $W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ โครงสร้างที่ 2 คือ $W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$ และโครงสร้างที่ 3 คือ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติความไวในการตอบสนองต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่ดีและเลือกนำไปใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กในระบบวัด โดยแสดงค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 1

3.1.2 ลักษณะการต่อใช้งานโครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติแบบเพลต

โดยการทำงานของหัววัดเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง สามารถเชื่อมต่อใช้งานได้ตามแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 3.6 จากรูปแสดงให้เห็นถึงการต่อใช้งานผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมดห้าขั้ว กล่าวคือ ทำการป้อนกระแสผ่าน R_1 และ R_2 ไปยังขั้วไฟฟ้า C_1 และ C_2 ลงกราวด์ที่ขั้ว C_5 และทำการวัดค่าการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำได้สองทิศทาง คือ V_{Hz} และ V_{Hx} ที่ขั้ว C_3 และ C_4 สำหรับสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉาก ที่ขั้ว C_1 และ C_2 สำหรับสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานกับหัววัดตามลำดับ แสดงแผนภาพการต่อวงจรเพื่อใช้งานหัววัดดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.2 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.2.1 สมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัด

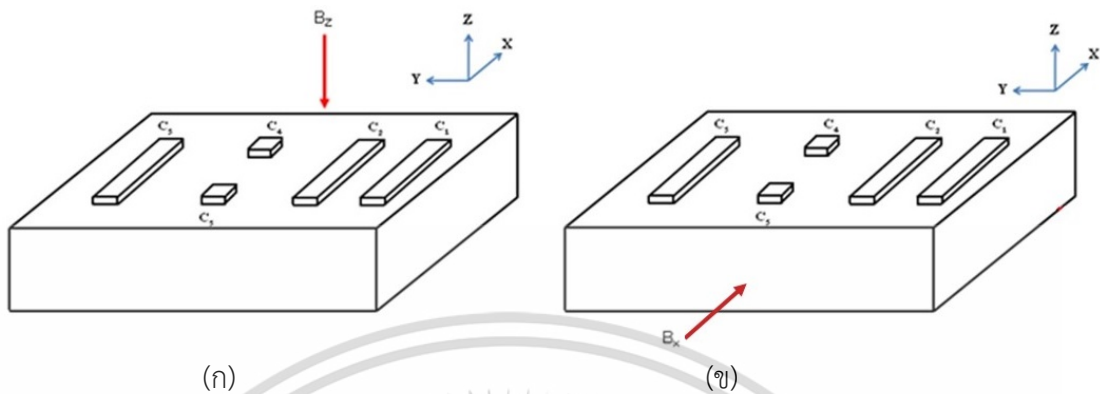
การนำหัววัดฮอลล์สองมิติมาใช้งานสำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก สมบัติเฉพาะของหัววัดที่ต้องทดสอบเพื่อให้สามารถระบุถึงศักยภาพในการตอบสนองต่อความเข้มแม่เหล็กได้นั้นคือค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด ซึ่งมีความสำคัญที่ส่งผลต่อการออกแบบระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กให้มีความเหมาะสมและถูกต้อง

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาและทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ได้สร้างขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงความไวในการตอบสนองได้ทั้งสองแนวแกน กล่าวคือสามารถตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและในแนวขนานกับหัววัด และสามารถตอบสนองต่อทิศทางของเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับขั้วแม่เหล็กได้

สำหรับการทดสอบค่าความไวของหัววัดฮอลล์สองมิติสามารถแบ่งการทดลองได้สองกรณีตามทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด คือ ทิศสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์ในแนวตั้งฉาก (B_z)

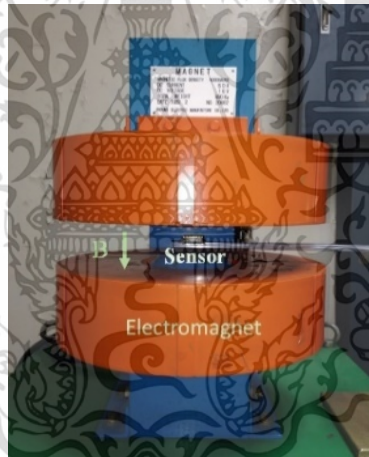
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทิศสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์ในแนวขนาน (B_x) ดังรูปที่ 3.7(ก) และรูปที่ 3.7(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ทิศของสนามแม่เหล็กในการทดลอง

- (ก) สนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งเข้าหาหัววัดตามแนวแกน z
 (ข) สนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งเข้าทางด้านข้างตามแนวแกน x



รูปที่ 3.8 แผนภาพการใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิลลิ

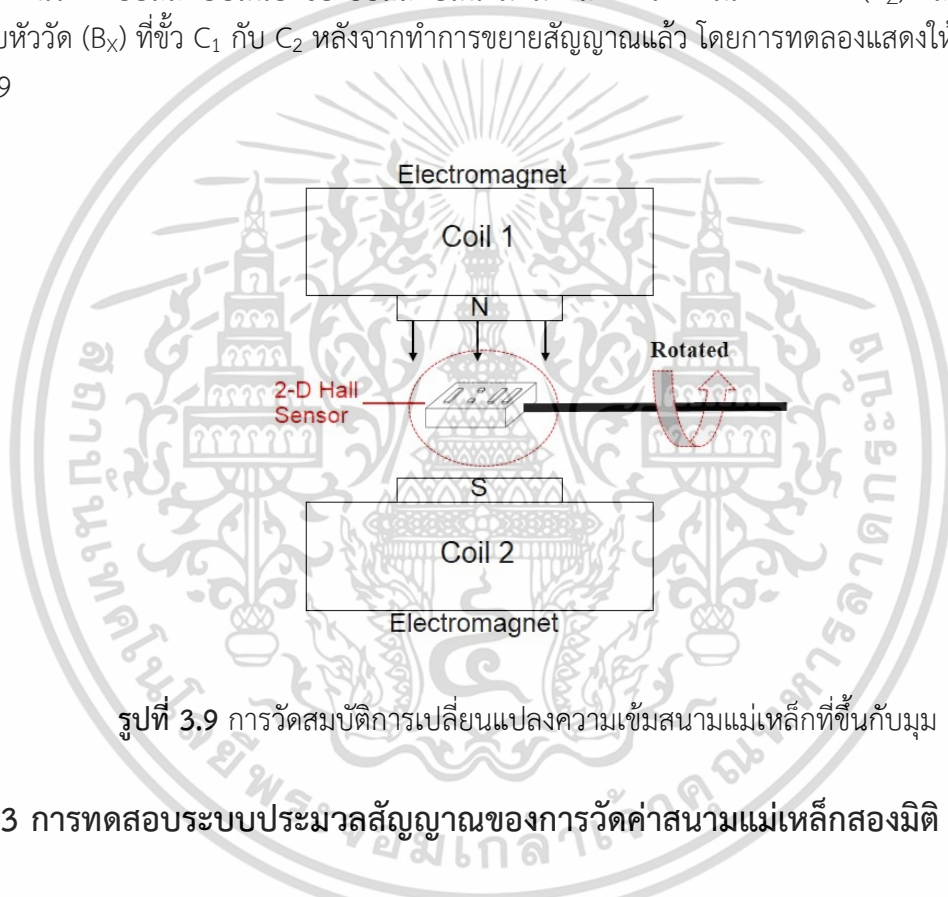
ในการทดลองการตอบสนองของฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำในทิศตั้งฉาก (B_z) จะทำการวางฮอลล์ให้ตำแหน่งของเส้นแรงแม่เหล็กกระทำดังรูปที่ 3.7(ก) ในสนามแม่เหล็ก -5,000 ถึง 5,000 เกาส์ จากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 3.8 โดยทำการจ่ายกระแสที่ขั้ว C_2 กับ C_5 เท่ากับ 1 mA และทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

ส่วนในกรณีการทดสอบการตอบสนองของฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานกับหัววัด (B_x) แสดงทิศของเส้นแรงแม่เหล็กกระทำดังรูปที่ 3.7(ข) ทำการปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง -5,000 ถึง 5,000 เกาส์เช่นกัน โดยทำการจ่ายกระแส 1 mA ผ่าน R_1 และ R_2 ไปยังขั้ว C_1 กับ C_2 ดังรูปที่ 3.6 แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขั้วไฟฟ้า C_1 กับ C_2 หาค่าความเอกซอร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไวในการตอบสนองของฮอลล์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาสำหรับการขยายสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ให้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์สร้างเป็นเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กสองมิติต่อไปได้

3.2.2 สมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม

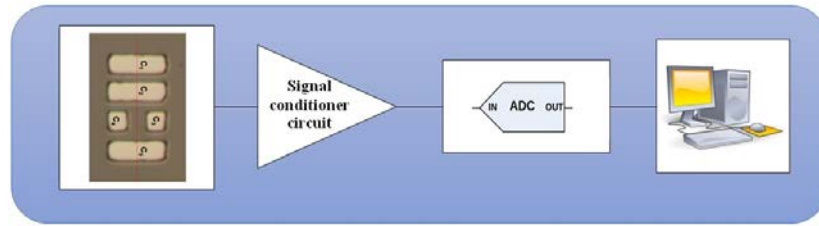
เพื่อแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมของสัญญาณเอาต์พุต และสามารถแสดงถึงความสอดคล้องกับทฤษฎีตามที่ได้ออกแบบหัววัด ดังนั้นในการทดลองเป็นการทดสอบการตอบสนองของฮอลล์สองมิติต่อการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ โดยการหมุนหัววัดฮอลล์ เปลี่ยนแปลงมุม 0-180 องศา ครั้งละ 10 องศา ภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตอบสนองของฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำในทิศตั้งฉาก (B_z) และแนวขนานกับหัววัด (B_x) ที่ขั้ว C_1 กับ C_2 หลังจากทำการขยายสัญญาณแล้ว โดยการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การวัดสมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม

3.3 การทดสอบระบบประมวลสัญญาณของการวัดค่าสนามแม่เหล็กสองมิติ

การประยุกต์ใช้หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เพลตสองมิติสำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่สามารถอ่านค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางนี้มีส่วนสำคัญที่แสดงระบบการวัดดังรูปที่ 3.8 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนหลักคือ หัววัดสนามแม่เหล็กสองทิศทาง วงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณ (Signal conditioner circuit) ส่วนแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter) และสุดท้ายเป็นส่วนการประมวลผลรวมถึงการแสดงผลค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้แสดงให้เห็นดังรูป 3.10

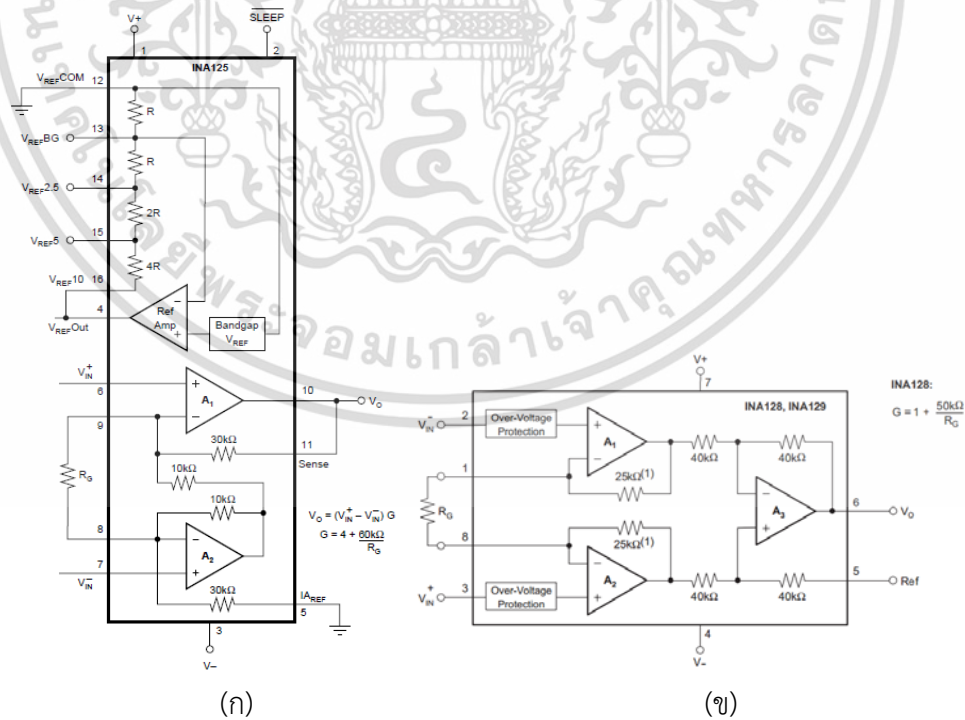


รูปที่ 3.10 ระบบการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก

นอกจากการทดสอบสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็กแล้ว ส่วนที่มีความสำคัญในการอ่านค่าความเข้มสนามแม่เหล็กให้มีความถูกต้องแม่นยำ ที่มีความจำเป็นต้องทดสอบพฤติกรรมในการทำงานคือ ส่วนวงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณ และส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

3.3.1 การทดสอบอัตราการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติ

วงจรการปรับปรุงสภาพสัญญาณที่ใช้ร่วมกับหัววัดฮอลล์สองมิตินั้นอาศัยวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ เพื่อทำการขยายผลต่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กทั้งสองแนวแกนของหัววัดให้เห็นสัญญาณความแตกต่างที่ชัดเจนขึ้น รวมถึงการปรับออฟเซตของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ก่อนที่สัญญาณอนาลอกของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองจะถูกนำไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผลและคำนวณเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมและถูกต้อง



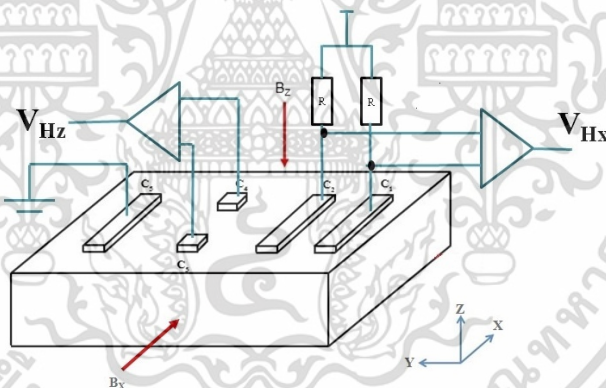
รูปที่ 3.11 ไอซีอินสตรูเมนต์ในวงจรขยาย (ก) INA125 และ (ข) INA128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

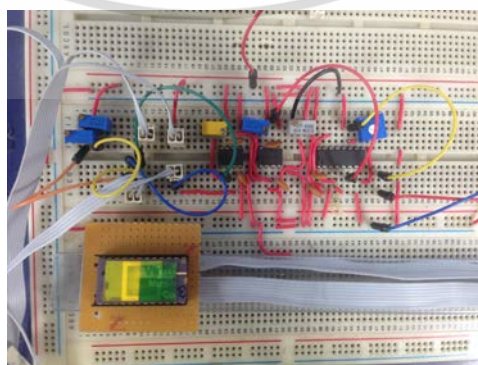
ในการทดลองเลือกใช่วงจรรวมของวงจรถยายแบบอินสตรูเมนต์ โดยการใช้ไอซีเบอร์ INA125 จำนวน 1 ตัว สำหรับการขยายในชุดแรก และไอซีเบอร์ INA128 จำนวน 2 ตัว สำหรับการขยายในชุดที่สอง แสดงโครงสร้างของไอซีทั้งสองเบอร์ดังรูปที่ 3.11(ก) และรูปที่ 3.11(ข) ตามลำดับ เพื่อให้การตอบสนองของหัววัดฮอลล์มีค่าที่เท่ากันทั้งในแนวตั้งฉากและแนวขนาน แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.12 การต่อวงจรถยายอินสตรูเมนต์เพื่อใช้ในการทดสอบอัตราการขยายของหัววัดและเพื่อทำการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองทิศทางให้มากขึ้นตามที่ต้องการ โดยทำการปรับอัตราขยายที่มีค่าประมาณ 4,000 เท่า สำหรับทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดในแนวตั้งฉาก (B_z) และ อัตราขยายที่มีค่าประมาณ 21,000 เท่า สำหรับทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดในแนวขนาน (B_x) เพื่อให้การตอบสนองของฮอลล์ทั้งสองทิศทางให้มีค่าเท่ากัน โดยในขั้นแรกจะทำการทดสอบอัตราการขยายของวงจรรวมของวงจรถยายแบบอินสตรูเมนต์โดยทำการต่อวงจรดังกล่าวดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นถึงวงจรถยายอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.12 การต่อวงจรถยายอินสตรูเมนต์จำนวน 3 ตัว



รูปที่ 3.13 การต่อวงจรถยายแบบอินสตรูเมนต์เข้ากับหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์

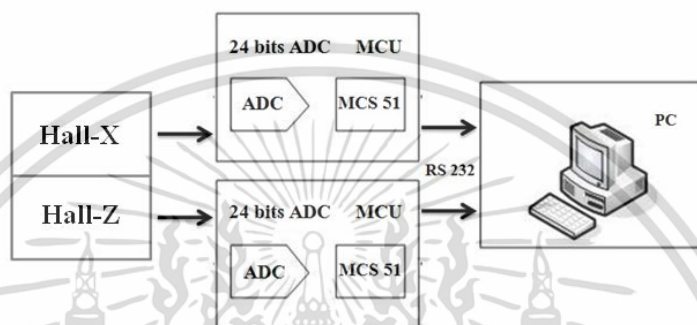


รูปที่ 3.14 วงจรถยายอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของหัววัด

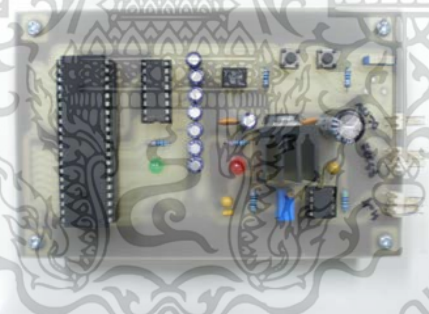
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทดสอบระบบแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC)

การอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของระบบที่สร้างขึ้น ทำการออกแบบโดยใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียด 24 บิต ร่วมกับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ในการประมวลผล ชุดระบบการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแสดงดังรูปที่ 3.15 และแสดงบอร์ดแปลงสัญญาณและอ่านค่าด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ระบบการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

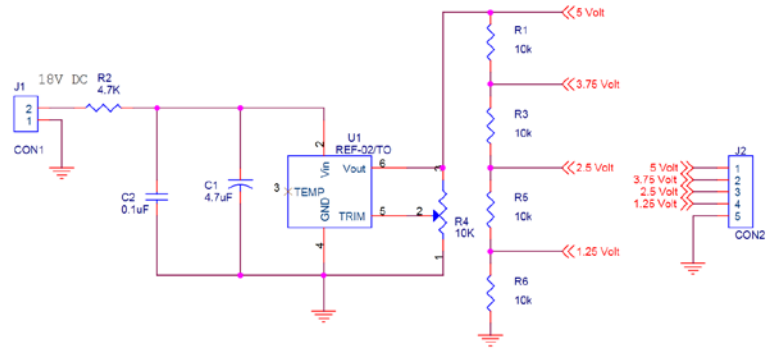


รูปที่ 3.16 บอร์ดแปลงสัญญาณ

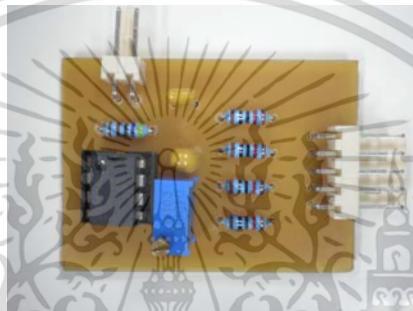
โดยการทำงานจะทำการส่งข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่อ่านได้ผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Communication) ไปยังคอมพิวเตอร์ แล้วแสดงผลบนโปรแกรมแลบวิว (Lab View) และนำข้อมูลที่ได้อ่านมาทำการวิเคราะห์

ในการทดสอบระบบแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ทำการออกแบบขึ้นเพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อแสดงถึงความแม่นยำในการอ่านค่า โดยการสอบเทียบกับเครื่องมือตรวจวัดมาตรฐาน ซึ่งใช้วิธีสอบเทียบแบบ 5 จุด (The five point test) ที่ทำการวัด 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของช่วงการวัด 0 – 5.00 โวลต์ ซึ่งใช้วงจรแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วงจรแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง



รูปที่ 3.18 บอร์ดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในการสอบเทียบแบบ 5 จุด

ในรูปที่ 3.18 แสดงบอร์ดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงแบบ 5 จุด ที่ 0, 12.5, 2.5, 3.75 และ 5.00 โวลต์ตามลำดับ โดยทำการสอบเทียบการอ่านค่าของระบบที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือมาตรฐานโดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke รุ่น 8808A

3.4 การทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดสนามแม่เหล็กสองมิติ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คองที่ แล้วทำการแก้สมการตรีโกณเพื่อหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรมแลบวิวในการคำนวณและแสดงผล เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ โดยทำการสอบเทียบระหว่างระบบที่ได้สร้างขึ้นกับเครื่องมือวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมาตรฐานอ้างอิง (FWBELL5170) แสดงในรูปของความแม่นยำในช่วงของการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งช่วงการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ที่ 0-4,000 เกาส์ โดยการใช้เทคนิคการสอบเทียบแบบ 5 จุด แสดงการอ่านค่าความเข้มสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.19 และสามารถคำนวณค่า Deviation ได้ดังสมการ 3.1

$$\text{Deviation} = \text{Average} - \text{Actual} \quad (3.1)$$

โดยที่ Average คือ ค่าที่วัดได้จากหัววัดฮอลล์ที่ทำการสร้างขึ้น
Actual คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่กำหนดขึ้น (0-4,000 เกาส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการวัดนั้นจะทำการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการอ่านค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับเครื่องมือวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมาตรฐานอ้างอิงโดยทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำได้ดังสมการ 3.2

$$Accuracy(\%) = \frac{deviation}{span} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ Deviation คือ ค่าที่วัดได้ลบด้วยค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดค่ามาตรฐานอ้างอิง
Span คือ ค่าช่วงของการวัด



รูปที่ 3.19 การแสดงผลความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองสำหรับการทดสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดสนามแม่เหล็กสองมิติรวมถึงวิธีการนำไปประยุกต์ใช้งาน เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบระบบการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางอย่างมีประสิทธิภาพ

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหัววัดฮอลล์

การสร้างระบบวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางนั้น ความเข้าใจถึงการทำงานของหัววัดและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวด ดังนั้นการทดสอบสมบัติของอุปกรณ์จึงมีความจำเป็นสำคัญในการออกแบบระบบรวมถึงเลือกใช้อุปกรณ์อย่างเหมาะสม เพื่อให้การวัดมีความแม่นยำถูกต้องมากที่สุด

4.1.1 ผลการทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ

ขั้นแรกทำการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ทั้งสองทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำคือ ในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดฮอลล์ โดยในการทดลองเลือกใช้หัววัดสามโครงสร้างที่มีระยะของขั้วไฟฟ้าฮอลล์ที่แตกต่างกัน คือ ที่ระยะโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่โครงสร้างที่ 1 คือ $W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ โครงสร้างที่ 2 คือ $W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$ และโครงสร้างที่ 3 คือ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ ตามลำดับ สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนอง ซึ่งการทดสอบหาค่าความไวของหัววัดทำการจ่ายกระแสคงที่ 1 mA แล้วทำการปรับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยการเพิ่มกระแสให้กับ อิเล็กโตรแมกเน็ต ที่สามารถสร้างความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง -5,000 ถึง 5,000 เกาส์ ผลการทดลองหัววัดทั้งสามโครงสร้างภายใต้ทิศทางสนามแม่เหล็กสองทิศทาง แสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.1 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 1 ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆในทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
0	0.000	0.000
200	0.020	0.006
400	0.035	0.013
600	0.051	0.020
800	0.067	0.026
1000	0.082	0.035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1(ต่อ)

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
1200	0.099	0.038
1400	0.121	0.042
1600	0.132	0.049
1800	0.148	0.055
2000	0.168	0.063
2200	0.186	0.067
2400	0.201	0.072
2600	0.214	0.077
2800	0.237	0.085
3000	0.249	0.092
3200	0.265	0.098
3400	0.283	0.101
3600	0.299	0.103
3800	0.317	0.108
4000	0.337	0.113
4200	0.348	0.119
4400	0.369	0.125
4600	0.387	0.131
4800	0.401	0.137
5000	0.418	0.142

ตารางที่ 4.2 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 1 ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ ในทิศทางออกจากหัววัดฮอลล์

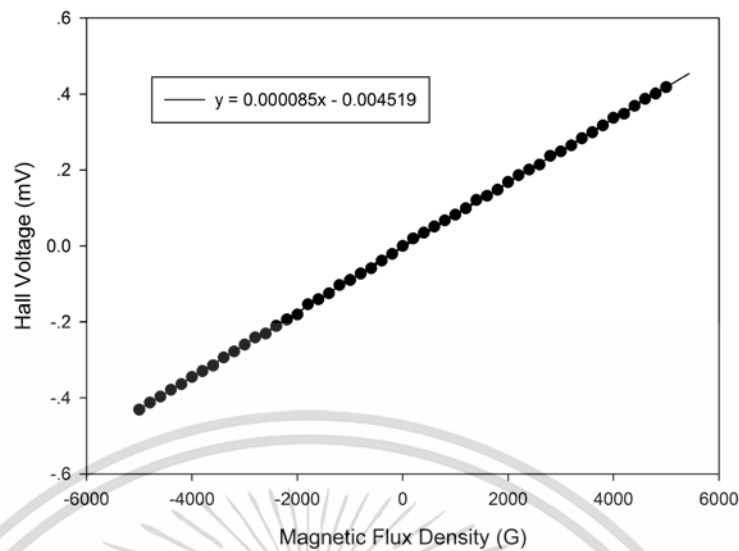
Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
0	0.000	0.000
-200	-0.021	-0.005
-400	-0.039	-0.012
-600	-0.059	-0.020
-800	-0.073	-0.026
-1000	-0.090	-0.034
-1200	-0.103	-0.039
-1400	-0.125	-0.045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

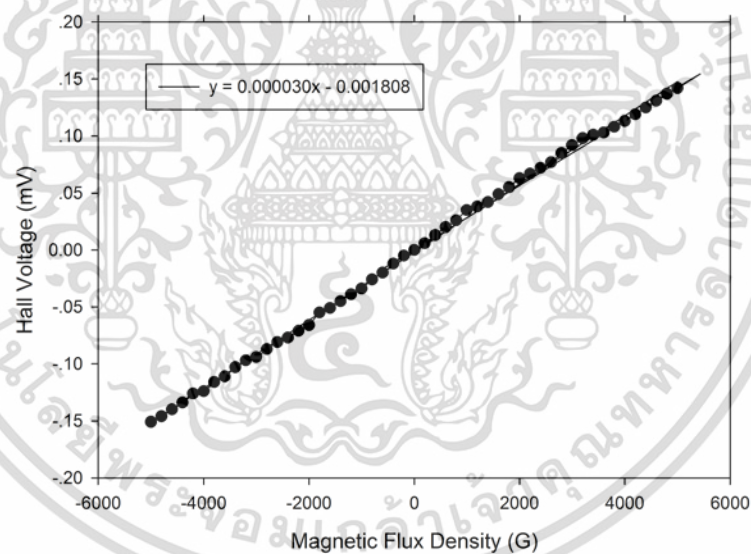
ตารางที่ 4.2(ต่อ)

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
-1600	-0.141	-0.051
-1800	-0.154	-0.055
-2000	-0.181	-0.066
-2200	-0.194	-0.071
-2400	-0.211	-0.077
-2600	-0.231	-0.081
-2800	-0.241	-0.087
-3000	-0.260	-0.094
-3200	-0.278	-0.097
-3400	-0.294	-0.103
-3600	-0.315	-0.111
-3800	-0.330	-0.116
-4000	-0.345	-0.124
-4200	-0.364	-0.126
-4400	-0.379	-0.134
-4600	-0.397	-0.140
-4800	-0.413	-0.146
-5000	-0.431	-0.151

จากผลการทดลองสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดโครงสร้างที่ 1 ได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยกราฟความสัมพันธ์การตอบสนองแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนต่อสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ของหัววัดฮอลล์สองมิติซึ่งมีระยะโครงสร้างขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่ $W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ โดยขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ แรงดันไฟฟ้าออฟเซตที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 4.519 ไมโครโวลต์ ดังรูปที่ 4.1 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y=0.000085x-0.004519$ โดยความชันของกราฟคือค่าความไวของหัววัดตัวที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ 0.085 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ และสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) ดังรูปที่ 4.2 มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นกัน โดยขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ แรงดันไฟฟ้าออฟเซตที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1.808 ไมโครโวลต์ และมีสมการเชิงเส้นเป็น $y=0.000030x-0.001808$ แสดงถึงค่าความไวเท่ากับ 0.030 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ จากการเปรียบเทียบค่าความไวของการตอบสนองระหว่างสองแนวแกนมีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2.5 เท่า



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 1



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 1

ตารางที่ 4.3 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 2 ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ ในทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
0	0.000	0.000
200	0.023	0.005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3(ต่อ)

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
400	0.040	0.008
600	0.058	0.012
800	0.077	0.015
1000	0.094	0.019
1200	0.113	0.020
1400	0.138	0.022
1600	0.151	0.023
1800	0.169	0.024
2000	0.192	0.025
2200	0.212	0.027
2400	0.230	0.030
2600	0.244	0.031
2800	0.271	0.032
3000	0.284	0.033
3200	0.303	0.035
3400	0.323	0.038
3600	0.341	0.041
3800	0.362	0.046
4000	0.385	0.048
4200	0.397	0.049
4400	0.421	0.050
4600	0.442	0.051
4800	0.458	0.053
5000	0.477	0.054

ตารางที่ 4.4 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 2 ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ ในทิศทาง
ออกจากหัววัดฮอลล์

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
0	0.000	0.000
-200	-0.024	-0.002
-400	-0.045	-0.005
-600	-0.067	-0.007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

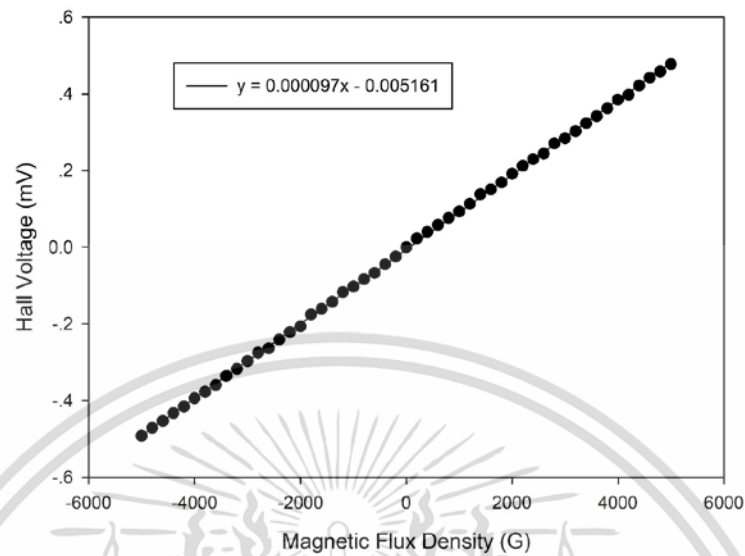
ตารางที่ 4.4(ต่อ)

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
-800	-0.083	-0.009
-1000	-0.103	-0.013
-1200	-0.118	-0.017
-1400	-0.143	-0.022
-1600	-0.161	-0.028
-1800	-0.176	-0.036
-2000	-0.207	-0.040
-2200	-0.222	-0.045
-2400	-0.241	-0.048
-2600	-0.264	-0.050
-2800	-0.275	-0.053
-3000	-0.297	-0.057
-3200	-0.317	-0.060
-3400	-0.336	-0.066
-3600	-0.360	-0.071
-3800	-0.377	-0.073
-4000	-0.394	-0.077
-4200	-0.416	-0.079
-4400	-0.433	-0.082
-4600	-0.453	-0.085
-4800	-0.472	-0.087
-5000	-0.492	-0.089

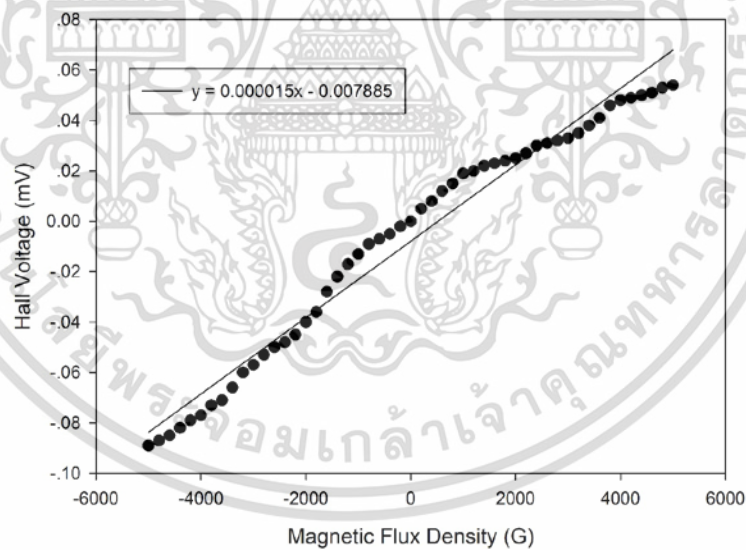
จากตารางผลการทดลองข้างต้นสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดโครงสร้างที่ 2 ได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 โดยกราฟความสัมพันธ์การตอบสนองแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนต่อสนามแม่เหล็กค่าต่างๆของหัววัดฮอลล์สองมิติซึ่งมีระยะโครงสร้างขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่ $W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$ โดยขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ แรงดันไฟฟ้าออฟเซตที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 5.161 ไมโครโวลต์ ดังรูปที่ 4.3 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y=0.000097x-0.005161$ โดยความชันของกราฟคือค่าความไวของหัววัดตัวที่สองมีค่าเท่ากับ 0.097 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ และสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) ดังรูปที่ 4.4 มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นกัน โดยขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ แรงดันไฟฟ้าออฟเซตที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 7.885 ไมโครโวลต์ และมีสมการเชิงเส้นเป็น $y=0.000015x-0.007885$ แสดงถึงค่าความไวเท่ากับ 0.015 ไมโคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ต่อเกาส์ จากการเปรียบเทียบค่าความไวของการตอบสนองระหว่างสองแนวแกนมีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 6.5 เท่า



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของฮอลล์
โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของฮอลล์
โครงสร้างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ ในทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
0	0.000	0.000
200	0.029	0.006
400	0.056	0.014
600	0.087	0.019
800	0.109	0.022
1000	0.140	0.028
1200	0.166	0.031
1400	0.194	0.047
1600	0.222	0.049
1800	0.250	0.051
2000	0.275	0.058
2200	0.305	0.063
2400	0.330	0.068
2600	0.363	0.07
2800	0.385	0.074
3000	0.413	0.081
3200	0.441	0.087
3400	0.466	0.089
3600	0.491	0.095
3800	0.518	0.098
4000	0.548	0.105
4200	0.574	0.108
4400	0.604	0.113
4600	0.629	0.119
4800	0.657	0.126
5000	0.681	0.132

ตารางที่ 4.6 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ ในทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
0	0.000	0.000
-200	-0.027	-0.009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

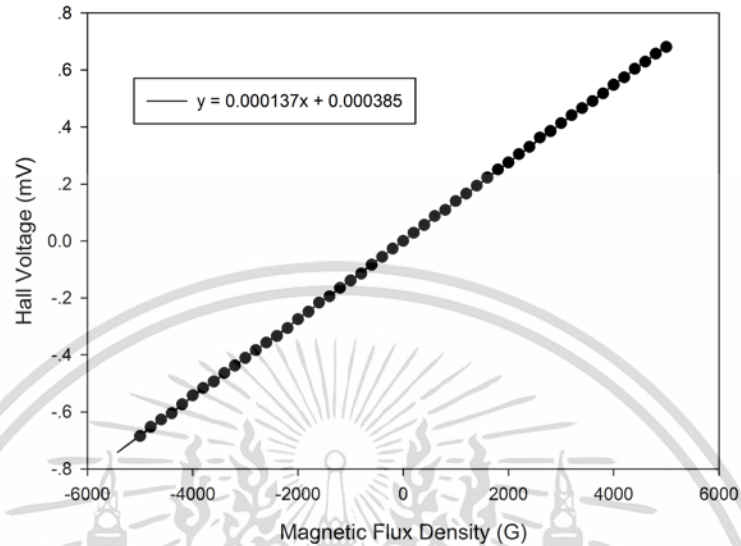
ตารางที่ 4.6(ต่อ)

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (mV)	Hall voltage (B_x) (mV)
-400	-0.056	-0.014
-600	-0.084	-0.019
-800	-0.115	-0.027
-1000	-0.139	-0.029
-1200	-0.165	-0.031
-1400	-0.195	-0.040
-1600	-0.217	-0.048
-1800	-0.249	-0.050
-2000	-0.275	-0.055
-2200	-0.306	-0.059
-2400	-0.334	-0.064
-2600	-0.357	-0.069
-2800	-0.384	-0.074
-3000	-0.411	-0.076
-3200	-0.438	-0.080
-3400	-0.464	-0.085
-3600	-0.494	-0.091
-3800	-0.516	-0.097
-4000	-0.543	-0.104
-4200	-0.574	-0.110
-4400	-0.605	-0.116
-4600	-0.627	-0.122
-4800	-0.653	-0.129
-5000	-0.685	-0.132

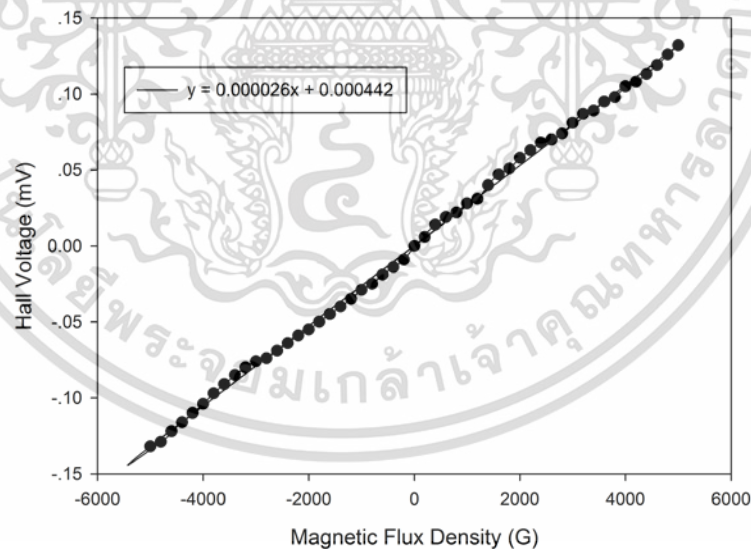
สำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก และแนวขนานกับหัววัดโครงสร้างที่ 3 ได้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 โดยกราฟความสัมพันธ์การตอบสนองแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนต่อสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ของหัววัดฮอลล์สองมิติซึ่งมีระยะโครงสร้างขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ โดยขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ แรงดันไฟฟ้าออฟเซตที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.385 ไมโครโวลต์ ดังรูปที่ 4.5 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y=0.000137x+0.000385$ โดยความชันของกราฟคือค่าความไวของหัววัดตัวที่สามมีค่าเท่ากับ 0.137 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ และสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) ดังรูปที่ 4.6 มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นกัน โดยขณะที่ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กกระทำ แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.442 ไมโครโวลต์ และมีสมการเชิงเส้นเป็น $y=0.000026x+0.000442$ แสดงถึงค่าความไวเท่ากับ 0.026 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ จากการเปรียบเทียบค่าความไวของการตอบสนองระหว่างสองแนวแกนมีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 5 เท่า



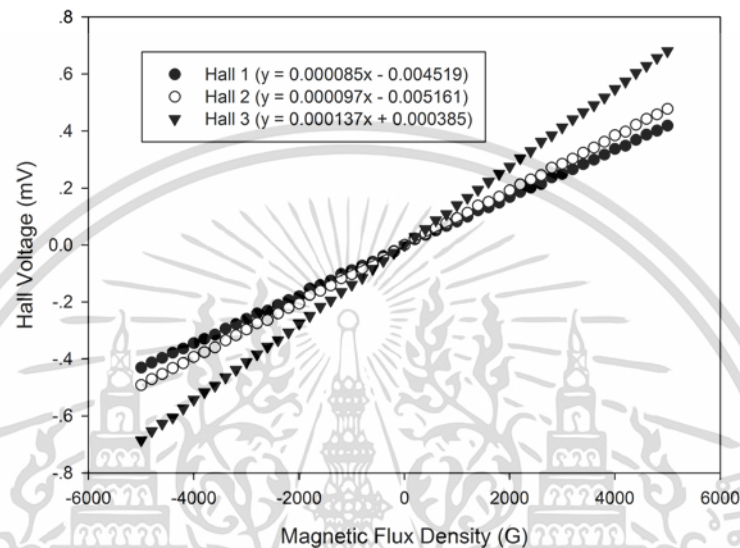
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของฮอลล์โครงสร้างที่ 3



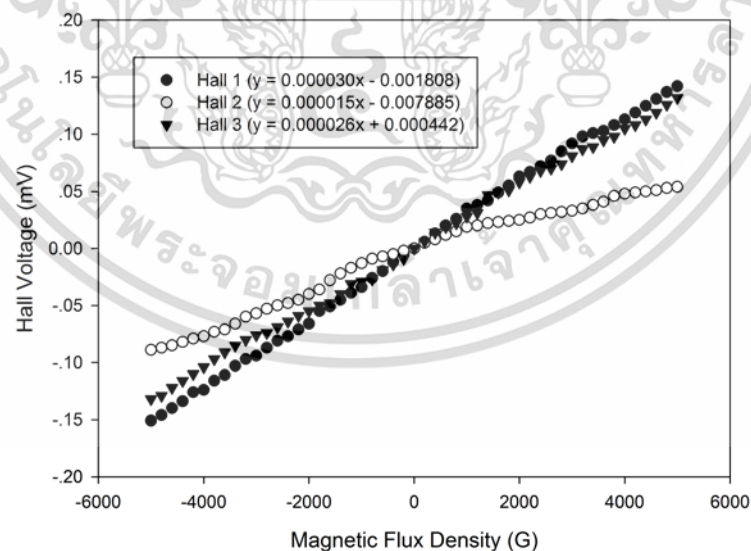
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของฮอลล์โครงสร้างที่ 3

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงตารางการเปรียบเทียบความสามารถในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดทั้งสามโครงสร้างพบว่ามีความสัมพันธ์ความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ในแนวตั้งฉาก (B_z) ที่ดีกว่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนาน (B_x) เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างที่มีระยะของขั้วไฟฟ้าต่างกันทั้งสามโครงสร้าง ที่แสดงให้เห็นถึงระยะโครงสร้างขั้วไฟฟ้าฮอลล์ที่ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ มีค่าในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กดีกว่าทั้งสองทิศทาง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 อันเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานสำหรับระยะของขั้วไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 2.27 ส่งผลถึงค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดที่พิจารณาได้จากตารางที่ 4.7 คือ ตารางการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดจึงสามารถเลือกหัววัดโครงสร้างที่ 3 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ต่อไป



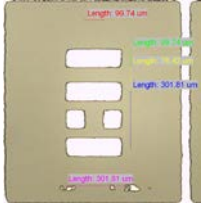
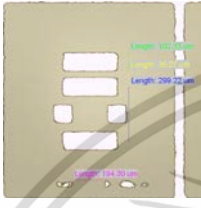

รูปที่ 4.7 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) ของฮอลล์โครงสร้างที่ 1 2 และ 3



รูปที่ 4.8 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) ของฮอลล์โครงสร้างที่ 1 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

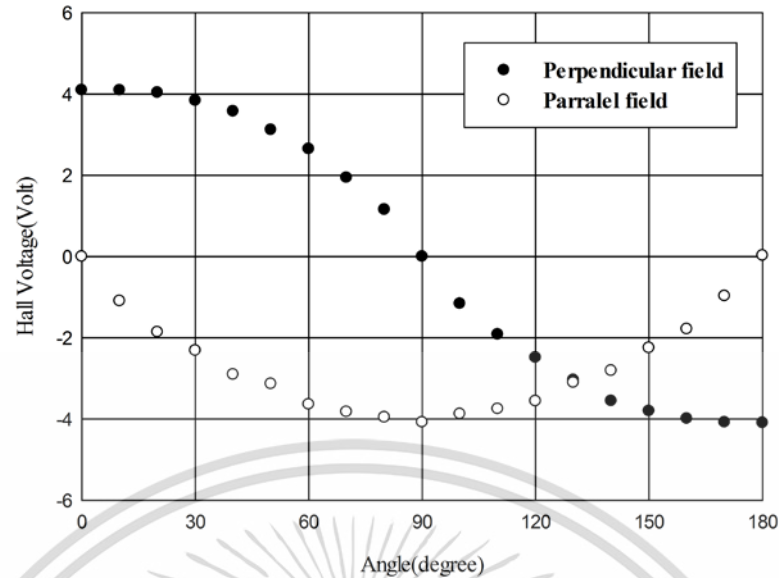
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความไวการตอบสนองของฮอลล์ทั้งสามโครงสร้าง

Structure	Sensitivity (B_z)	Sensitivity (B_x)
 <p>โครงสร้างที่ 1</p>	0.085 $\mu\text{V/G}$	0.030 $\mu\text{V/G}$
 <p>โครงสร้างที่ 2</p>	0.097 $\mu\text{V/G}$	0.015 $\mu\text{V/G}$
 <p>โครงสร้างที่ 3</p>	0.137 $\mu\text{V/G}$	0.026 $\mu\text{V/G}$

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติที่ขึ้นกับมุม

ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขึ้นกับมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์สองมิติ โดยทำการเปลี่ยนแปลงมุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์เป็นมุม 360 องศา อิทธิพลของมุมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก และจะมีค่าความเข้มสูงสุดเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กกระทำเป็นมุมตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีการเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันไซน์ที่แสดงดังรูปที่ 4.9 จากการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับมุมในแนวเส้นแรงแม่เหล็ก (B_z) ซึ่งสามารถพิสูจน์ให้เห็นถึงความสอดคล้องกับสมการ $V_H = k \sin \theta$ ที่เป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ตามทฤษฎีตรีโกณมิติ

ในทางตรงกันข้ามการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) ของหัววัดฮอลล์ที่มุมต่างๆ พบว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีการเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันโคไซน์เป็นไปตามสมการ $V_H = k \cos \theta$



รูปที่ 4.9 การตอบสนองตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติที่ขึ้นกับมุม

4.2 ผลการทดสอบสมบัติในส่วนประมวลสัญญาณของการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กสองมิติ

ส่วนนี้เป็นการทดสอบระบบประมวลสัญญาณทั้งหมดของการวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์สองมิติ ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนสำคัญ คือ วงจรสำหรับปรับปรุงสัญญาณโดยเริ่มต้นจากการขยายสัญญาณอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในสองแนวแกนรวมถึงการปรับระดับสัญญาณให้มีค่าเหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อในการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และส่วนที่สองเป็นการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อทดสอบแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องแม่นยำในการอ่านค่า

4.2.1 การขยายสัญญาณสำหรับหัววัดฮอลล์สองมิติ

เนื่องจากสัญญาณอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในการตอบสนองที่ได้มีขนาดเล็กมากทำให้ต้องมีการขยายสัญญาณรวมถึงปรับระดับสัญญาณให้เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเพื่อการอ่านค่า จึงมีความจำเป็นในการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งวงจรขยายที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ร่วมกับหัววัดฮอลล์คือ วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ โดยในการทดลองจะทำการออกแบบวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์เป็นสองชุดสำหรับการตอบสนองสองแนวแกนของหัววัดเพื่อให้มีการตอบสนองที่เห็นได้ชัดเจนขึ้นและการปรับให้การตอบสนองของสองแนวแกนมีค่าที่เท่ากันสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย

ในการทดลองขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โดยทำการเลือกใช้โครงสร้างฮอลล์สองมิติซึ่งมีระยะโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ ซึ่งมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดีกว่าระยะโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่ $W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$ และ $W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ ดังข้อมูลที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.1.1

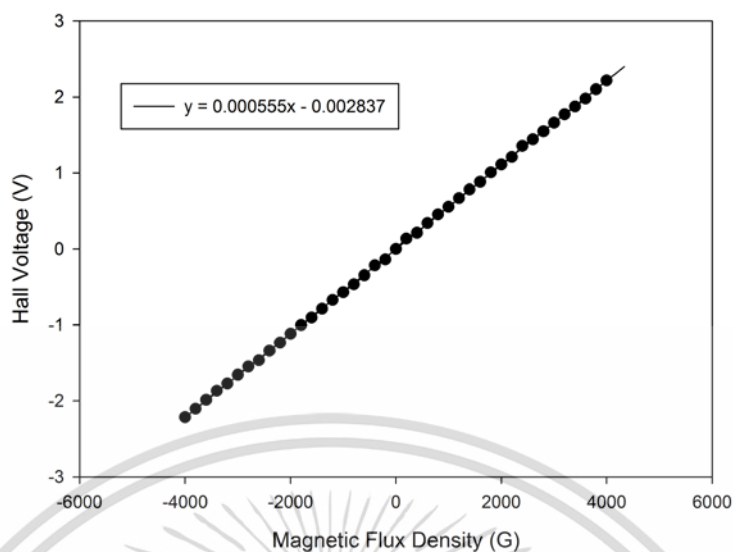
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ ในทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์

Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B _z) (V)	Hall voltage (B _x) (V)
0	0.000	0.000
200	0.137	0.068
400	0.212	0.219
600	0.339	0.348
800	0.454	0.462
1000	0.554	0.559
1200	0.669	0.675
1400	0.782	0.762
1600	0.885	0.853
1800	1.008	0.946
2000	1.111	1.077
2200	1.211	1.173
2400	1.357	1.309
2600	1.443	1.410
2800	1.547	1.527
3000	1.659	1.640
3200	1.772	1.764
3400	1.874	1.860
3600	1.979	1.975
3800	2.102	2.101
4000	2.217	2.253

ผลการทดสอบขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก -4,000 ถึง 4,000 เกาส์ โดยทำการจ่ายกระแสจ่ายกระแสให้หัววัดคงที่ 1.03 mA แสดงดังตารางที่ 4.8 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำการขยายสัญญาณกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 4.10

จากรูปแสดงให้เห็นค่าความไวในการตอบสนองที่สูงขึ้นหลังจากผ่านวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ ซึ่งยังคงความเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y=0.000555x-0.002837$ มีค่าความไวเป็น 555 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ โดยมีค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านวงจรขยายสัญญาณประมาณ 4,000 เท่า เมื่อเทียบกับการวัดการตอบสนองโดยไม่ใช้วงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกขยายสัญญาณกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของฮอลล์โครงสร้างที่ 3

ตารางที่ 4.9 ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของโครงสร้างที่ 3 ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆในทิศพุ่งออกจากหัววัด

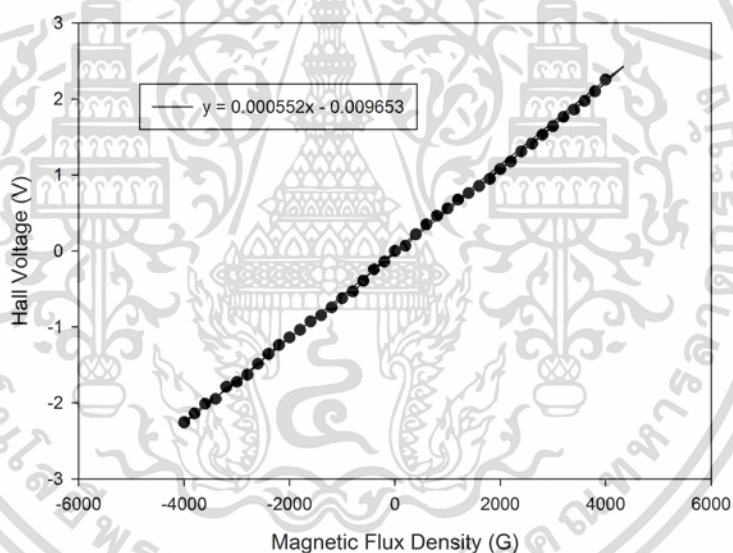
Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (V)	Hall voltage (B_x) (V)
0	0.000	0.000
-200	-0.139	-0.143
-400	-0.218	-0.244
-600	-0.350	-0.393
-800	-0.465	-0.535
-1000	-0.570	-0.626
-1200	-0.672	-0.746
-1400	-0.789	-0.850
-1600	-0.907	-0.930
-1800	-1.005	-1.039
-2000	-1.117	-1.140
-2200	-1.235	-1.238
-2400	-1.342	-1.358
-2600	-1.466	-1.486
-2800	-1.548	-1.630
-3000	-1.658	-1.724
-3200	-1.774	-1.789

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9(ต่อ)

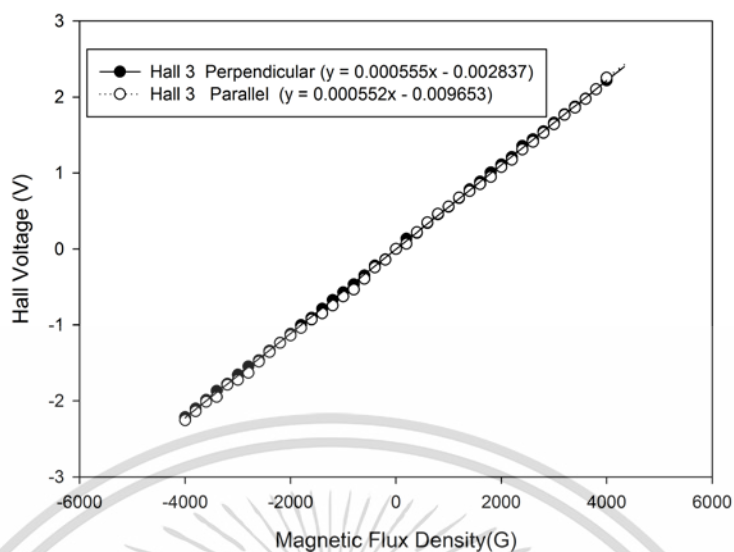
Magnetic Flux Density (G)	Hall voltage (B_z) (V)	Hall voltage (B_x) (V)
-3400	-1.869	-1.949
-3600	-1.988	-2.013
-3800	-2.104	-2.139
-4000	-2.216	-2.256

สำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานหลังผ่านการขยายสัญญาณด้วยชุดวงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ชุดที่สอง เพื่อทำการขยายสัญญาณให้มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่ากันกับการตอบสนองในแนวตั้งฉากแสดงดังรูปที่ 4.11 แสดงความเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y=0.000552x-0.009653$ มีค่าความไวเป็น 552 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ โดยมีค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นหลังผ่านวงจรขยายสัญญาณประมาณ 21,000 เท่า เมื่อเทียบกับการวัดการตอบสนองแนวขนานโดยไม่ใช้วงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกขยายสัญญาณกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของฮอลล์โครงสร้างที่ 3

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์ทั้งสองแนวแกน พบว่ามีค่าการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันแสดงกราฟการเปรียบเทียบความไวในการตอบสนองดังรูปที่ 4.12 ซึ่งมีค่าความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็กสองทิศทางหลังถูกขยายสัญญาณด้วยวงขยายแบบอินสตรูเมนต์

4.2.2 ระบบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายถึงความเที่ยงตรงและความแม่นยำสำหรับการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ด้วยระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC 24 bit) ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้า โดยการสอบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้กับเครื่องมือมาตรฐานคือ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke รุ่น 8808A ด้วยวิธีการสอบเทียบแบบ 5 จุด ที่ 0% 25% 50% 75% และ 100% ของช่วงการวัด 0-5.00 โวลต์ ผลของการทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากบอร์ดแปลงสัญญาณสองบอร์ดแสดงให้เห็นตามตารางที่ 4.10 และ 4.11

ตารางที่ 4.10 ผลการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 1

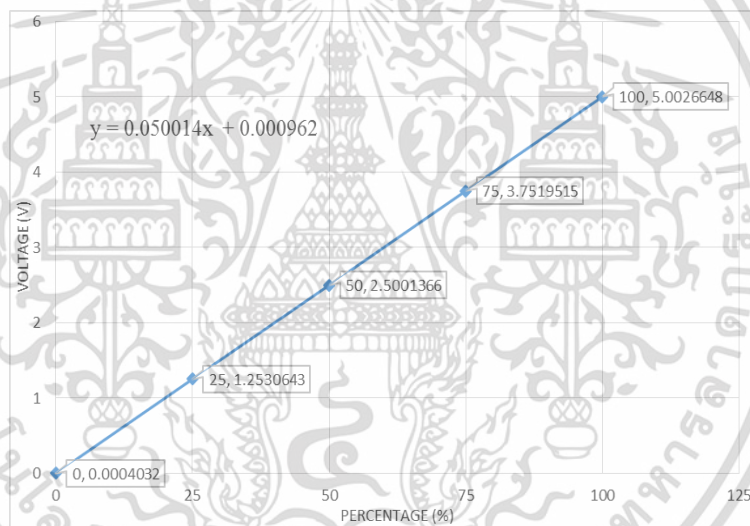
ลำดับที่	ค่าแรงดันไฟฟ้า(Volt)				
	0%	25%	50%	75%	100%
1	0.000403	1.253064	2.500134	3.751945	5.002660
2	0.000406	1.253063	2.500132	3.751948	5.002660
3	0.000400	1.253061	2.500139	3.751951	5.002657
4	0.000401	1.253051	2.500137	3.751950	5.002652
5	0.000405	1.253068	2.500136	3.751951	5.002662
6	0.000403	1.253071	2.500139	3.751961	5.002674

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10(ต่อ)

ลำดับที่	ค่าแรงดันไฟฟ้า(Volt)				
	0%	25%	50%	75%	100%
7	0.000403	1.253074	2.500137	3.751955	5.002669
8	0.000402	1.253061	2.500132	3.751952	5.002666
9	0.000405	1.253066	2.500141	3.751953	5.002673
10	0.000404	1.253064	2.500139	3.751949	5.002675
ค่าเฉลี่ย	0.000412	1.253058	2.500130	3.751938	5.002681

ผลการทดลองนำมาเขียนเป็นกราฟคุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณเพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของบอร์ดที่ 1 ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟการทดสอบคุณสมบัติบอร์ดแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 1

ในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์นั้น บอร์ดแปลงสัญญาณจะต้องสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าตามคุณสมบัติความไวของฮอลล์เซนเซอร์ ดังนั้นการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติบอร์ดแปลงสัญญาณต้องสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ภายในช่วงการวัดที่มีความถูกต้องจาก 0 ถึง 5.00 โวลต์ได้ จากกราฟจึงเป็นการแสดงวิธีทดสอบแบบ 5 จุด ทำการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าจากบอร์ดสร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 5 ระดับ คือ 0, 1.25, 2.50, 3.75 และ 5.00 โวลต์ ผลที่ได้เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของบอร์ดแปลงสัญญาณที่ 1 โดยความชัน (Slope) มีค่าเท่ากับ 0.050014 โวลต์ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าออฟเซต (offset) มีค่าเท่ากับ 0.000962 โวลต์ ที่ระบุถึงการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดแปลงสัญญาณขณะที่ไม่มีแรงดันไฟฟ้า

ตกคร่อมบอร์ด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ โดยสมการความเป็นเชิงเส้นนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

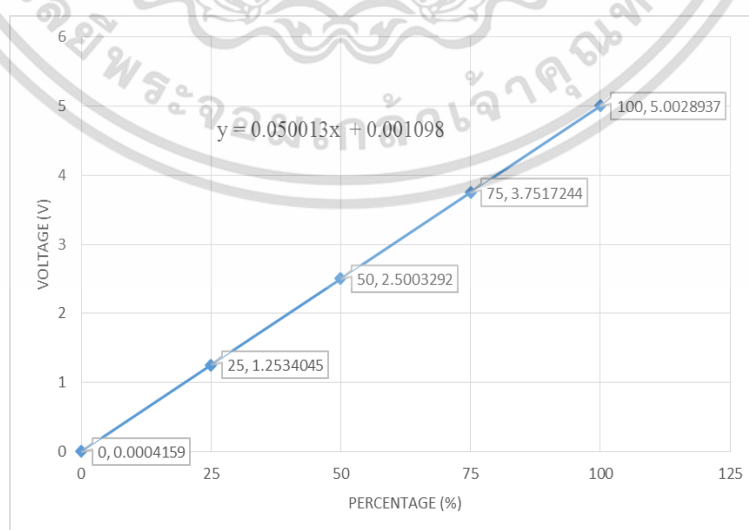
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บอร์ดแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 2 เพื่อตรวจสอบความเท่าเทียมกันสำหรับผลการทดสอบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 2

ลำดับที่	ค่าแรงดันไฟฟ้า(Volt)				
	0%	25%	50%	75%	100%
1	0.000412	1.253401	2.500330	3.751723	5.002894
2	0.000413	1.253404	2.500329	3.751723	5.002892
3	0.000414	1.253405	2.500328	3.751720	5.002892
4	0.000415	1.253403	2.500329	3.751720	5.002894
5	0.000422	1.253403	2.500330	3.751728	5.002893
6	0.000421	1.253406	2.500337	3.751728	5.002888
7	0.000412	1.253406	2.500330	3.751722	5.002895
8	0.000416	1.253406	2.500321	3.751727	5.002894
9	0.000417	1.253405	2.500321	3.751728	5.002898
10	0.000417	1.253406	2.500337	3.751725	5.002897
ค่าเฉลี่ย	0.000414	1.253398	2.500316	3.751712	5.002893

ผลการทดลองนำมาเขียนเป็นกราฟคุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณเพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของบอร์ดที่ 2 ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟการทดสอบคุณสมบัติบอร์ดแปลงสัญญาณบอร์ดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

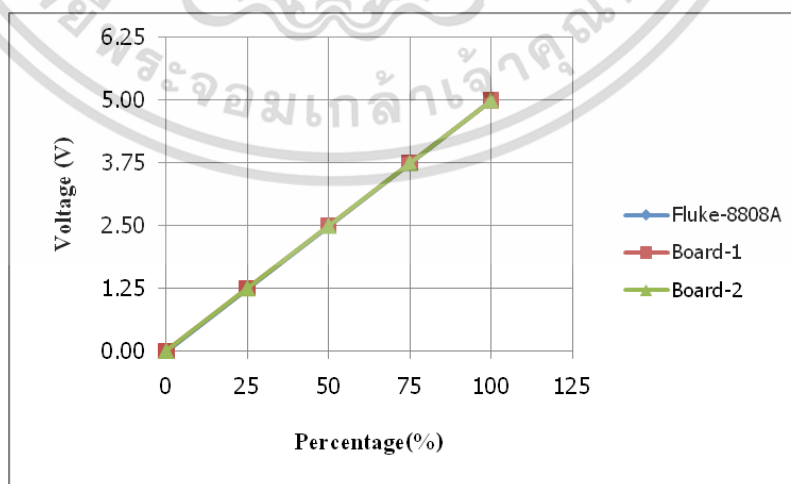
จากกราฟรูปที่ 4.14 แสดงถึงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของบอร์ดแปลงสัญญาณที่ 2 โดยความชัน มีค่าเท่ากับ 0.050013 โวลต์ และค่าแรงดันไฟฟ้าออฟเซต มีค่าเท่ากับ 0.001098 โวลต์

เมื่อทำการเปรียบเทียบบอร์ดแปลงสัญญาณที่ 1 กับบอร์ดแปลงสัญญาณที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความเท่าเทียมกันของบอร์ดทั้งสอง โดยที่มีค่าความชันเท่ากันซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ ผลการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานแสดงค่าความแม่นยำในการอ่านค่าดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการหาค่าความแม่นยำของบอร์ดแปลงสัญญาณ

Characteristics	ค่าแรงดันไฟฟ้า (Volt)				
	0(%)	25(%)	50(%)	75(%)	100(%)
Average 1	0.000412	1.253058	2.500130	3.751938	5.002681
Average 2	0.000414	1.253398	2.500316	3.751712	5.002893
Actual	0.000000	1.251830	2.497300	3.749560	5.000040
Deviation 1	0.000412	0.001228	0.002830	0.002378	0.002641
Deviation 2	0.000414	0.001568	0.003016	0.002152	0.002853
Accuracy 1 (%)	0.000082	0.000246	0.000566	0.000476	0.000528
Accuracy 2 (%)	0.000083	0.000314	0.000603	0.000430	0.000571

สำหรับการเปรียบเทียบความแม่นยำของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตามตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องในการวัดค่าของบอร์ดแปลงสัญญาณทั้งสอง สำหรับเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดที่ 1 มีค่าสูงสุดที่ 0.000566 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความแม่นยำในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดที่ 2 มีค่าสูงสุดที่ 0.000603 เปอร์เซ็นต์ และมีความใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Fluke8808A) ที่สามารถบอกถึงความแม่นยำในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้อย่างถูกต้อง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การสอบเทียบคุณสมบัติบอร์ดแปลงสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

จากผลของการตอบสนองของฮอลล์ที่ผ่านการขยายและปรับระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมแล้ว เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ในการตอบสนองความเข้มสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงได้เห็นถึงการตอบสนองสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง คือ ในทิศตั้งฉากกับหัววัด และในแนวขนานกับหัววัดตามสมการ $y=0.000555x-0.002837$ และ $y=0.000552x-0.009653$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำสมการที่ได้นี้มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในสองมิติได้ ด้วยการใช้โปรแกรมแลบวิวในการคำนวณหาค่ารวมถึงการแสดงค่าที่วัดได้ ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 โปรแกรมแลบวิวสำหรับการคำนวณและแสดงผล

โดยค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้จะถูกคำนวณตามสมการที่ได้ทั้งสองแนวแกนด้วยโปรแกรมแลบวิวซึ่งอยู่ในหน่วยเกาซ์ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำการทดสอบความแม่นยำของระบบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด 4,000 เกาซ์ ด้วยวิธีการสอบเทียบแบบ 5 จุด ทำการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ 0, 1,000 2,000 3,000 และ 4,000 เกาซ์ ตามลำดับ โดยทำการทดสอบความแม่นยำอยู่บนเงื่อนไขทิศทางตามการตอบสนองของฮอลล์สองมิติ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

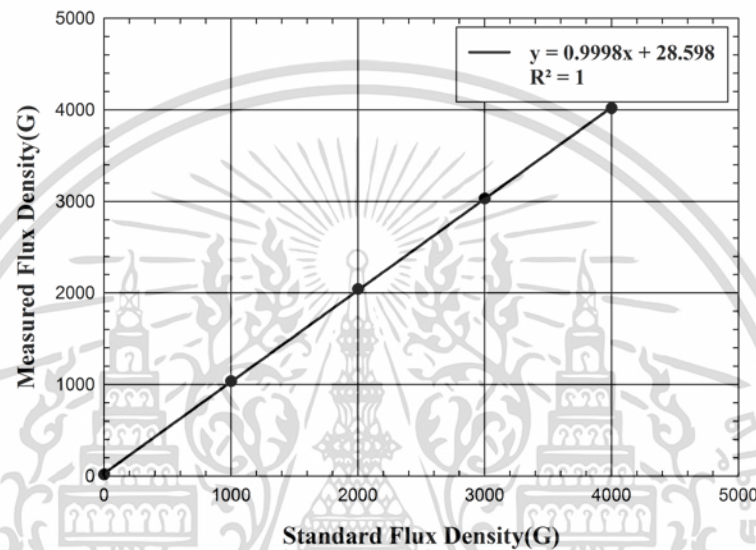
ตารางที่ 4.13 ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก

No.	Magnetic flux density(G)				
	0%	25%	50%	75%	100%
Average	16.5075	1035.0527	2040.7982	3031.2891	4017.4345
Actual	0	1000	2000	3000	4000
Deviation	16.5075	35.0527	40.7982	31.2891	17.4345
Accuracy(%)	0.4127	0.8763	1.0200	0.7822	0.4359

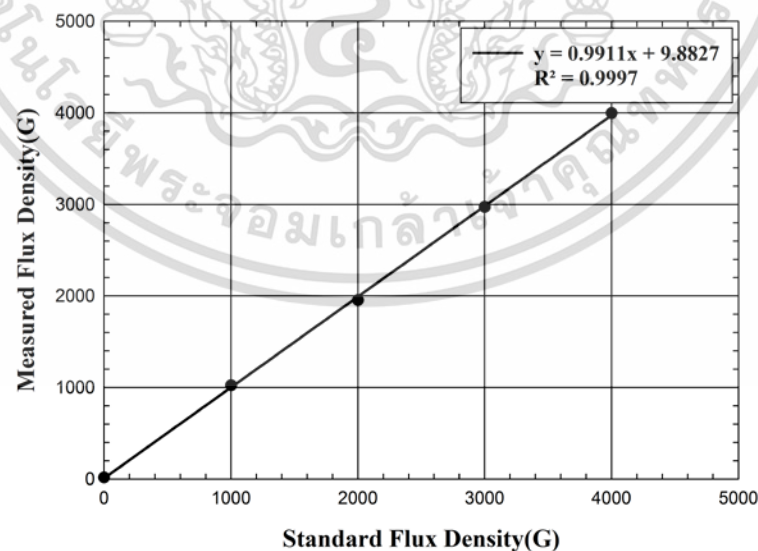
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กแนวขนาน

No.	Magnetic flux density(G)				
	0%	25%	50%	75%	100%
Average	16.3291	1021.8147	1953.3615	2972.1745	3996.5647
Actual	0	1000	2000	3000	4000
Deviation	16.3291	21.8147	46.6385	27.8255	3.4353
Accuracy(%)	0.4082	0.5454	1.1660	0.6956	0.0859



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสำหรับการตอบสนองในแนวตั้งฉาก (B_z)



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสำหรับการตอบสนองในแนวขนาน (B_x)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบแล้วทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็กมาตรฐาน (FW.BELL 5170) แบบ 5 จุด พบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากหัววัดฮอลล์สองมิติและระบบที่ทำการออกแบบขึ้นนี้สามารถวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ใกล้เคียงกันกับเครื่องมือมาตรฐาน โดยสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสำหรับการตอบสนองในแนวตั้งฉากแสดงกราฟดังรูปที่ 4.17 ซึ่งข้อมูลจากกราฟแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในช่วงการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 0-4,000 เกาส์ ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำมีค่าไม่เกิน 1.0200 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่า $R^2=1$

สำหรับการตอบสนองในแนวขนานดังรูปที่ 4.18 โดยข้อมูลจากกราฟแสดงถึงความแม่นยำในช่วงการตอบสนองค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 0-4,000 เกาส์ ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำมีค่าไม่เกิน 1.1660 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่า $R^2=0.9997$ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองมิติ และสามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำ



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

วัตถุประสงค์หลักสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การศึกษาการประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์สองมิติ โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของหัววัดฮอลล์ที่ถูกสร้างขึ้น เพื่อนำเอาสมบัติที่ทำการศึกษาเหล่านี้ไปวิเคราะห์และนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ตลอดจนการออกแบบระบบการวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กทั้งในส่วนการประมวลผลเชิงอนาล็อกที่ได้จากฮอลล์สองมิติ และระบบประมวลผลเชิงดิจิทัลเพื่อการคำนวณค่าความเข้มข้นแม่เหล็กได้อย่างแม่นยำ บนพื้นฐานของความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์ที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะตัว ทำการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างและสมบัติการตอบสนองที่เหมาะสมในการออกแบบวงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองทิศทางในการตอบสนอง

โดยหัววัดฮอลล์เพลตสองมิติถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการทางซิลิคอนเทคโนโลยีด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนซึ่งมีขั้วการตอบสนองฮอลล์เพียงห้าขั้วสำหรับการตอบสนองสนามแม่เหล็กสองทิศทาง และสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ง่าย ซึ่งหัววัดที่สร้างขึ้นนี้ถูกนำมาทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็ก สำหรับการทดสอบหาค่าความไวของหัววัดทำการจ่ายกระแสคงที่ 1 mA แล้วทำการปรับค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กโดยการเพิ่มกระแสให้กับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ ในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 1 โครงสร้างที่ 2 และโครงสร้างที่ 3 ภายใต้ช่วงความเข้มข้นแม่เหล็ก -5,000 ถึง 5,000 เกาส์ พบว่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ในแนวตั้งฉากและแนวขนานของโครงสร้างที่ 1 เป็นเชิงเส้นซึ่งมีค่าประมาณ 0.085 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ และ 0.030 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่าความไวของการตอบสนองทั้งสองแนวแกนมีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2.5 เท่า ส่วนความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ในแนวตั้งฉากและแนวขนานของโครงสร้างที่ 2 พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ 0.097 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ และ 0.015 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ ซึ่งค่าความไวต่างกันอยู่ประมาณ 6.5 เท่า และสำหรับความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ในแนวตั้งฉากและแนวขนานของโครงสร้างที่ 3 พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ 0.137 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ และ 0.026 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ ซึ่งค่าความไวต่างกันอยู่ประมาณ 5 เท่า จากข้อมูลที่ได้ยังแสดงถึงคุณสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ในแนวตั้งฉากที่ดีกว่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนาน (B_x) เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างที่มีระยะของขั้วไฟฟ้าต่างกันระหว่างสองโครงสร้าง ที่แสดงให้เห็นถึงระยะโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าฮอลล์ที่ $w=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ มีค่าในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดีกว่าทั้งสองทิศทาง อันเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานสำหรับระยะของขั้วไฟฟ้าฮอลล์ ส่งผลถึงค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด ดังนั้นจึงสามารถเลือกนำหัววัดโครงสร้างที่ 3 ไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่อไป

ในกรณีที่ทำการขยายสัญญาณด้วยชุดวงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ เนื่องจากสัญญาณอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในการตอบสนองที่ได้มีขนาดเล็กมากทำให้ต้องมีการขยายสัญญาณรวมถึงปรับระดับสัญญาณให้เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเพื่อการอ่านค่า จึงมีความจำเป็นในการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งวงจรรขยายที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ร่วมกับหัววัดฮอลล์ คือ วงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์ โดยในการทดลองจะทำการออกแบบวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์เป็นสองชุดสำหรับการตอบสนองสองแนวแกนของหัววัดเพื่อให้มีการตอบสนองที่เห็นได้ชัดเจนขึ้นและการปรับให้การตอบสนองของสองแนวแกนมีค่าที่เท่ากัน ผลการทดสอบขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก -4,000 ถึง 4,000 เกาส์ โดยทำการจ่ายกระแสจ่ายกระแสให้หัววัดคงที่ 1.03 mA พบว่าค่าความไวในการตอบสนองที่สูงขึ้นหลังจากผ่านวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์ซึ่งยังคงความเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y=0.000555x-0.002837$ มีค่าความไวเป็น 555 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ โดยมีค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านวงจรรขยายสัญญาณประมาณ 4,000 เท่า เมื่อเทียบกับการวัดการตอบสนองโดยไม่ใช้วงจรรขยายสัญญาณ

สำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานหลังผ่านการขยายสัญญาณด้วยชุดวงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ชุดที่สอง เพื่อทำการขยายสัญญาณให้มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่ากันกับการตอบสนองในแนวขนานพบว่ามีความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านวงจรรขยายสัญญาณประมาณ 21,000 เท่า สามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดในช่วง -4,000 ถึง 4,000 เกาส์ โดยมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 552 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองแนวแกน พบว่ามีค่าการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นนำสมการที่ได้นี้มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในสองมิติด้วยการใช้โปรแกรมแลบวิวโดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำการทดสอบความแม่นยำของระบบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด 4,000 เกาส์ ด้วยวิธีการสอบเทียบแบบ 5 จุด พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำมีค่าไม่เกิน 1.0200 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่า $R^2=1$ ในแนวตั้งฉากกับหัววัด และค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำมีค่าไม่เกิน 1.1660 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่า $R^2=0.9997$ ในแนวขนานกับหัววัด แสดงให้เห็นถึงค่าความถูกต้องที่พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ดังนั้นแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองมิติ และสามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ramsden E. **Hall-Effect Sensors Theory and Applications**. 2nd ED. Oxford: Elsevier, Inc. 2006.
- [2] Fukuda M. **Optical Semiconductor Devices**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1999.
- [3] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2551.
- [4] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2549.
- [5] เจริญ เพชรธมณี. **เรียนลัด LabVIEW**. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น
- [6] รศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์. **ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งาน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2552
- [7] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins. **Device Electronics for Integrated Circuits**. New York : John Wiley&Sons, Inc. 1986.
- [8] Dieter K.Schroder. **Semiconductor material and device characterization**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1990.
- [9] Sze S. M. and Kwok K. Ng. **Physics of Semiconductor Devices**. 3rd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [10] Popovic R S. **Hall Effect Devices**. 2nd ED. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing, Ltd. 2004.
- [11] Pavel Ripka. **Magnetic Sensors and Magnetometers**. Boston, London : Artech House, Inc. 2001.
- [12] Jame W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell. **Instrumentation for Engineering Measurement**. 2nd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [13] Kelly S. **Foundamentals of Instrumentation**. 2nd ED. New York: Delmar cengage learning. 2008.
- [14] McCurrie R. A. **Ferromagnetic Materials Structure and Properties**. San Diego : Academic Press Limited, Inc. 1994.
- [15] Clayton R. Paul, Keith W. Whites, Syed A. Nasar. **Introduction to Electromagnetic Fields**. 3rd ED. Massachusetts: McGraw-Hill. 1998.
- [16] Cullity B. D. and Graham C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2nd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [17] Bertotti G. **Hysteresis in Magnetism**. California: Academic Press, Inc. 1998.
- [18] Smith William F. **Principles of Materials Science and Engineering**. 2nd ED. New York: McGraw-Hill. 1990.
- [19] Michael Corral. **Trigonometry**. Scoolcraft College : GNU Free Documentation License. 2009.
- [20] National Instruments. **LabVIEW Basics I&II Course Manual**. Texas: National Instruments Corporation. 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] อธิโรจน์ มะโน, สันติ ชาตรูประชีวิน, ลัดดาวัลย์ สุภาตี, ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง”, 33rd Electrical Engineering Conference(EECON-33), pp. 1369-1372, 2010.
- [22] อริญญา พันธุ์พานัก, อธิโรจน์ มะโน, อัมพร โพธิ์ไย, และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “ห้วงวัดสนามแม่เหล็กฮอลล์โดยใช้โครงสร้างแวนเดอร์พาวบนเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน”, 37th Electrical Engineering Conference (EECON-37), pp. 697-700, 2014.
- [23] อริญญา พันธุ์พานัก, อธิโรจน์ มะโน, ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางสำหรับระบบวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก”, Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014), pp.609-612, 2014.
- [24] วชิระ น้อยท้ว, อริญญา พันธุ์พานัก, อธิโรจน์ มะโน, ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การศึกษาผลกระทบของความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้าฮอลล์ต่อความไวในการตอบสนองของห้วงวัดฮอลล์”, Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015), 2015.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

```

#include <reg52.h>
#include <intrins.h>
#include <stdio.h>
unsigned Counter,ADC_DATA,x1,x2,BackGND,BuffGND = 0;
sbit ADC_CS1 = P1^0;
sbit ADC_SDO = P1^1;
sbit ADC_SCK = P1^2;
sbit P1_3 = P1^3;
sbit P1_4 = P1^4;
sbit P1_5 = P1^5;
sbit Debug = P1^6;
sbit Swich = P1^7;
void serinit(void)
{
    TMOD = 0x20;
    SCON = 0x50;
    TH1 = 0xFD;
    TF1 = 0;
    TI = 1;
    TR1 = 1;
}
void send_text(unsigned char *text)
{
    while(*text != 0x00)
    {
        SBUF=*text;
        while(!TI);
        TI = 0;
        text++;
    }
}
void Send_TXT(unsigned int txt)
{
    SBUF = txt ;
    while(~TI);
    TI = 0;
}
void new_line(void)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
void delay
{
    unsigned int i,j;
    for (i=0;i<x;i++)
    {
        for (j=0;j<115;j++) { }
    }
}
unsigned read_ADC1(void)
{
    unsigned char k;
    unsigned long n;
    {
        n<<= 1;
        ADC_SCK = 1;
        n |= ADC_SDO;
        ADC_SCK = 0;
    }
    ADC_CS1 => 1;
    n&=0x1fff;
    n&=0x0fff;
    n>>=4;
    return n;
}
unsigned filter_ADC(void)
{
    char k;
    for(k=0;k<2)
    {
        x2 = x1;
        x1 = read_ADC1();
    }
    return ((x1+x2)/2);
}
Switch_CHK(void)
{
    bit SW = 1;
    if(Swich==0)
    {
        delay(50);
        while(Swich==0);
        SW = 0;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        SW = 1;
    }
    return SW;
}

void Print_Index(unsigned int CNT_IN)
{
    unsigned int Buff_COU,COU_Txt1,COU_Txt2 = 0;
    unsigned int COU_Txt3,COU_Txt4,COU_Txt5 = 0;
    COU_Txt1 = CNT_IN/10000 ;
    Buff_COU = CNT_IN%10000 ;
    Send_TXT(COU_Txt1+48);
    COU_Txt2 = Buff_COU/1000;
    Buff_COU = Buff_COU%1000;
    Send_TXT(COU_Txt2+48);
    COU_Txt3 = Buff_COU/100;
    Buff_COU = Buff_COU%100;
    Send_TXT(COU_Txt3+48);
    COU_Txt4 = Buff_COU/10;
    Buff_COU = Buff_COU%10;
    Send_TXT(COU_Txt4+48);
    COU_Txt5 = Buff_COU;
    Send_TXT(COU_Txt5+48);
    Send_TXT(44);
}

void Print_RS232(unsigned TXT_IN)
{
    unsigned Buff_TXT,TXT0 =0;
    unsigned TXT1,TXT2,TXT3,TXT4 = 0;
    unsigned TXT5,TXT6,TXT7,= 0;
    TXT0 = TXT_IN/100000000 ;
    Buff_TXT = TXT_IN%100000000 ;
    Send_TXT(TXT0+48);
    TXT1 = Buff_TXT/10000000 ;
    Buff_TXT = Buff_TXT%10000000 ;
    Send_TXT(TXT1+48);
    TXT2 = Buff_TXT/1000000;
    Buff_TXT = Buff_TXT%1000000;
    Send_TXT(TXT2+48);
    TXT3 = Buff_TXT/100000;
    Buff_TXT = Buff_TXT%100000;
    Send_TXT(TXT3+48);
    TXT4 = Buff_TXT/10000;
    Buff_TXT = Buff_TXT%10000;
    Send_TXT(TXT4+48);
    TXT5 = Buff_TXT/1000;

```

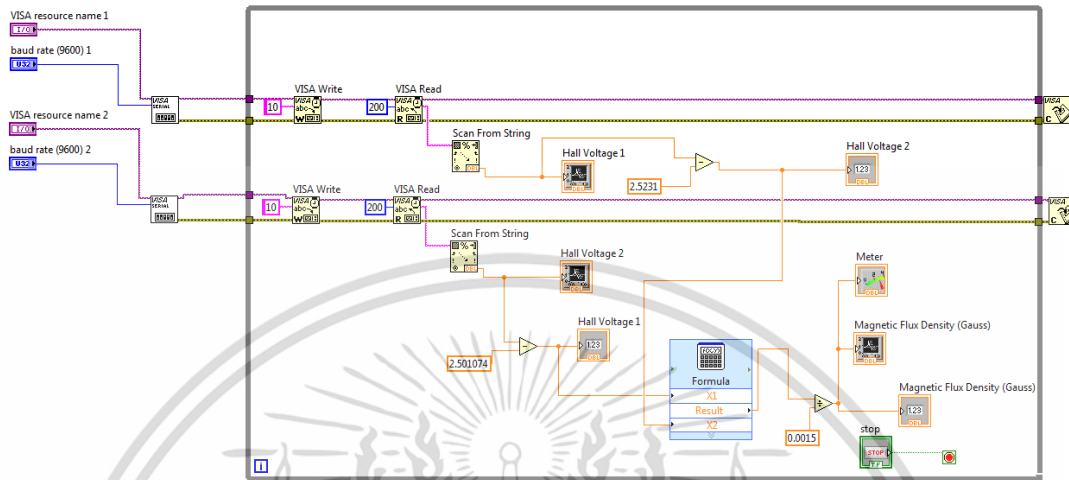
```

    Buff_TXT = Buff_TXT%1000;
    Send_TXT(TXT5+48);
    TXT6 = Buff_TXT/100;
    Buff_TXT = Buff_TXT%100;
    Send_TXT(TXT6+48);
    Send_TXT(46);
    TXT7 = Buff_TXT/10;
    Buff_TXT = Buff_TXT%10;
    Send_TXT(TXT7+48);
}
void Print_Bin(unsigned Bin_IN)
{
    unsigned Bin_Mask = 0x800000;
    char i;
    for(i=0;i<24;i++)
    {
        if(Bin_IN&Bin_Mask)
            Send_TXT(1+48);
        else
            Send_TXT(48);
        Bin_Mask >>= 1;
    }
    Send_TXT(44);
}
void main(void)
{
    P1_3 = 0;
    P1_4 = 0;
    P1_5 = 0;
    BuffGND = 0;
    serinit();
    delay(5000);
    while(1)
    {
        while(Switch_CHK());
        COUNTER++;
        Print_Index(COUNTER);
        ADC_DATA = filter_ADC();
        Print_Bin(ADC_DATA);
        int_RS232(BuffGND);
        Print_RS232(ADC_DATA);
        delay(1000);
    }
}

```

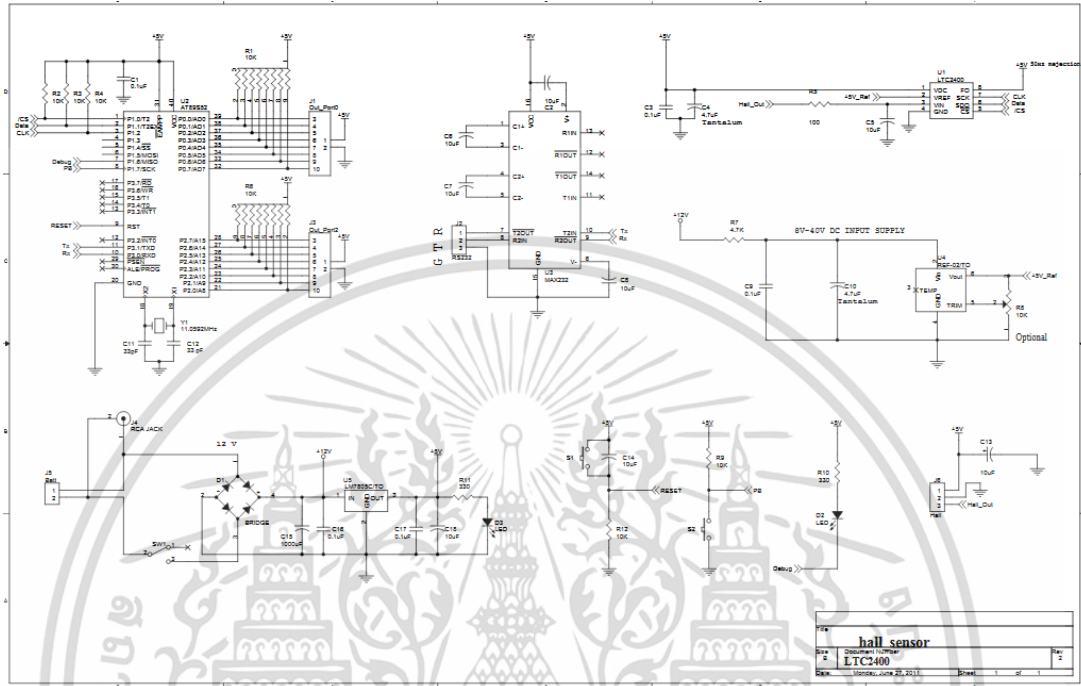
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. โปรแกรมแลบวิวที่ใช้ในงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลอุปกรณ์การขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

Instrument Amplifier INA125





INA125

INSTRUMENTATION AMPLIFIER With Precision Voltage Reference

FEATURES

- LOW QUIESCENT CURRENT: 460µA
- PRECISION VOLTAGE REFERENCE: 1.24V, 2.5V, 5V or 10V
- SLEEP MODE
- LOW OFFSET VOLTAGE: 250µV max
- LOW OFFSET DRIFT: 2µV/°C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 20nA max
- HIGH CMR: 100dB min
- LOW NOISE: 38nV/√Hz at f = 1kHz
- INPUT PROTECTION TO ±40V
- WIDE SUPPLY RANGE
Single Supply: 2.7V to 36V
Dual Supply: ±1.35V to ±18V
- 16-PIN DIP AND SO-16 SOIC PACKAGES

APPLICATIONS

- PRESSURE AND TEMPERATURE BRIDGE AMPLIFIERS
- INDUSTRIAL PROCESS CONTROL
- FACTORY AUTOMATION
- MULTI-CHANNEL DATA ACQUISITION
- BATTERY OPERATED SYSTEMS
- GENERAL PURPOSE INSTRUMENTATION

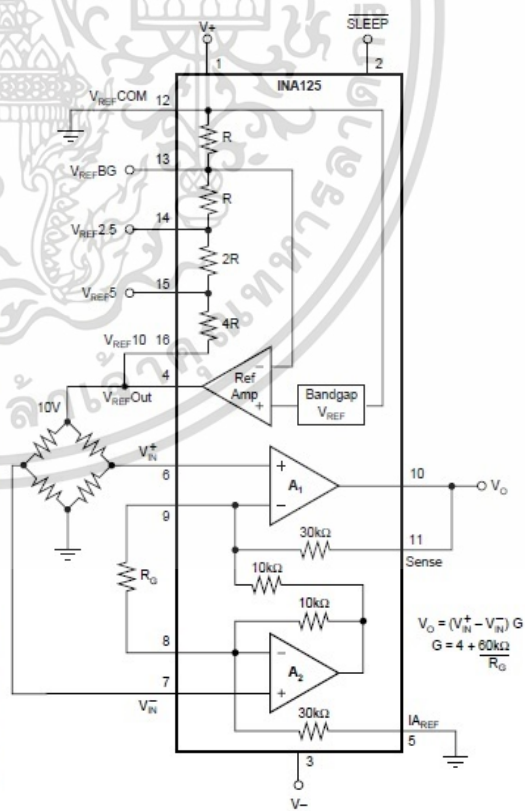
DESCRIPTION

The INA125 is a low power, high accuracy instrumentation amplifier with a precision voltage reference. It provides complete bridge excitation and precision differential-input amplification on a single integrated circuit.

A single external resistor sets any gain from 4 to 10,000. The INA125 is laser-trimmed for low offset voltage (250µV), low offset drift (2µV/°C), and high common-mode rejection (100dB at G = 100). It operates on single (+2.7V to +36V) or dual (±1.35V to ±18V) supplies.

The voltage reference is externally adjustable with pin-selectable voltages of 2.5V, 5V, or 10V, allowing use with a variety of transducers. The reference voltage is accurate to ±0.5% (max) with ±35ppm/°C drift (max). Sleep mode allows shutdown and duty cycle operation to save power.

The INA125 is available in 16-pin plastic DIP and SO-16 surface-mount packages and is specified for the -40°C to +85°C industrial temperature range.



$$V_O = (V_N^+ - V_N^-) G$$

$$G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัท Burr-Brown Corporation หรือบริษัทอื่นที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 PDS-1361B Printed in U.S.A., February, 1998

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: $V_S = \pm 15V$

At $T_A = +25^\circ C$, $V_S = \pm 15V$, I_A common = $0V$, V_{REF} common = $0V$, and $R_L = 10k\Omega$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA125P, U			INA125PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI								
Initial	$V_S = \pm 1.35V$ to $\pm 18V$, $G = 4$		± 50	± 250		*	± 500	μV
vs Temperature			± 0.25	± 2		*	± 5	$\mu V/^\circ C$
vs Power Supply			± 3	± 20		*	± 50	$\mu V/V$
Long-Term Stability				± 0.2		*		$\mu V/mo$
Impedance, Differential				$10^{11} \parallel 2$		*		$\Omega \parallel pF$
Common-Mode			$10^{11} \parallel 9$		*		$\Omega \parallel pF$	
Safe Input Voltage				± 40			*	V
Input Voltage Range			See Text				*	
Common-Mode Rejection	$V_{CM} = -10.7V$ to $+10.2V$							
	$G = 4$	78	84		72	*		dB
	$G = 10$		86		80	*		dB
	$G = 100$		100		90	*		dB
	$G = 500$		100		90	*		dB
BIAS CURRENT	$V_{CM} = 0V$		10	25		*	50	nA
vs Temperature			± 60			*		$pA/^\circ C$
Offset Current			± 0.5	± 2.5		*	± 5	nA
vs Temperature			± 0.5			*		$pA/^\circ C$
NOISE, RTI	$R_G = 0\Omega$							
Voltage Noise, $f = 10Hz$			40			*		nV/\sqrt{Hz}
$f = 100Hz$			38			*		nV/\sqrt{Hz}
$f = 1kHz$			38			*		nV/\sqrt{Hz}
$f = 0.1Hz$ to $10Hz$			0.8			*		$\mu Vp-p$
Current Noise, $f = 10Hz$			170			*		fA/\sqrt{Hz}
$f = 1kHz$			58			*		fA/\sqrt{Hz}
$f = 0.1Hz$ to $10Hz$			5			*		$pAp-p$
GAIN								
Gain Equation			$4 + 60k\Omega/R_G$			*		V/V
Range of Gain		4-		10,000	*		*	V/V
Gain Error	$V_O = -14V$ to $+13.3V$					*		
	$G = 4$		± 0.01	± 0.075		*	± 0.1	%
	$G = 10$		± 0.03	± 0.3		*	± 0.5	%
	$G = 100$		± 0.05	± 0.5		*	± 1	%
	$G = 500$		± 0.1			*		%
Gain vs Temperature	$G = 4$		± 1	± 15		*	*	$ppm/^\circ C$
	$G > 4^{(1)}$		± 26	± 100		*	*	$ppm/^\circ C$
Nonlinearity	$V_O = -14V$ to $+13.3V$					*		
	$G = 4$		± 0.0004	± 0.002		*	± 0.004	% of FS
	$G = 10$		± 0.0004	± 0.002		*	± 0.004	% of FS
	$G = 100$		± 0.001	± 0.01		*	*	% of FS
	$G = 500$		± 0.002			*	*	% of FS
OUTPUT								
Voltage: Positive			$(V+) - 1.7$	$(V+) - 0.9$	*	*		V
Negative			$(V-) + 1$	$(V-) + 0.4$	*	*		V
Load Capacitance Stability				1000		*		pF
Short-Circuit Current				$-9/+12$		*		mA
VOLTAGE REFERENCE	$V_{REF} = +2.5V, +5V, +10V$							
Accuracy						*		
vs Temperature	$I_L = 0$		± 0.15	± 0.5		*	± 1	%
vs Power Supply, $V+$	$I_L = 0$		± 18	± 35		*	± 100	$ppm/^\circ C$
vs Load	$V+ = (V_{REF} + 1.25V)$ to $+38V$		± 20	± 50		*	± 100	ppm/V
	$I_L = 0$ to $5mA$		3	75		*	*	ppm/mA
Dropout Voltage, $(V+) - V_{REF}^{(2)}$	Ref Load = $2k\Omega$	1.25	1		*	*		V
Bandgap Voltage Reference			1.24			*		V
Accuracy	$I_L = 0$		± 0.5			*		%
vs Temperature	$I_L = 0$		± 18			*		$ppm/^\circ C$

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.



INA125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: $V_S = \pm 15V$ (CONT)

At $T_A = +25^\circ C$, $V_S = \pm 15V$, I_A common = $0V$, V_{REF} common = $0V$, and $R_L = 10k\Omega$, unless otherwise noted.

PARAMETER CONDITIONS	INA125P, U			INA125PA, UA			UNITS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
FREQUENCY RESPONSE							
Bandwidth, -3dB	G = 4	150			*		kHz
	G = 10	45			*		kHz
	G = 100	4.5			*		kHz
	G = 500	0.9			*		kHz
Slew Rate	G = 4, 10V Step	0.2			*		V/ μs
Settling Time, 0.01%	G = 4, 10V Step	80			*		μs
	G = 10, 10V Step	83			*		μs
	G = 100, 10V Step	375			*		μs
	G = 500, 10V Step	1700			*		μs
Overload Recovery	50% Overdrive	5			*		μs
POWER SUPPLY							
Specified Operating Voltage		± 15			*		V
Specified Voltage Range		± 1.35	± 18		*	*	V
Quiescent Current, Positive	$I_O = I_{REF} = 0mA$	460	525		*	*	μA
Negative	$I_O = I_{REF} = 0mA$	-280	-325		*	*	μA
Reference Ground Current ⁽³⁾		180			*	*	μA
Sleep Current ($V_{SLEEP} \leq 100mV$)	$R_L = 10k\Omega$, Ref Load = $2k\Omega$	± 1	± 25		*	*	μA
SLEEP MODE PIN⁽⁴⁾							
V_{IH} (Logic high input voltage)		+2.7	V+		*	*	V
V_{IL} (Logic low input voltage)		0	+0.1		*	*	V
I_{IH} (Logic high input current)		15			*	*	μA
I_{IL} (Logic low input current)		0			*	*	μA
Wake-up Time ⁽⁵⁾		150			*	*	μs
TEMPERATURE RANGE							
Specification Range		-40	+85		*	*	$^\circ C$
Operation Range		-65	+125		*	*	$^\circ C$
Storage Range		-55	+125		*	*	$^\circ C$
Thermal Resistance, θ_{JA}							$^\circ C/W$
16-Pin DIP		80			*	*	$^\circ C/W$
SO-16 Surface-Mount		100			*	*	$^\circ C/W$

* Specification same as INA125P, U.

NOTES: (1) Temperature coefficient of the "Internal Resistor" in the gain equation. Does not include TCR of gain-setting resistor, R_G . (2) Dropout voltage is the positive supply voltage minus the reference voltage that produces a 1% decrease in reference voltage. (3) V_{REFCOM} pin. (4) Voltage measured with respect to Reference Common. Logic low input selects Sleep mode. (5) I_A and Reference, see Typical Performance Curves.

SPECIFICATIONS: $V_S = +5V$

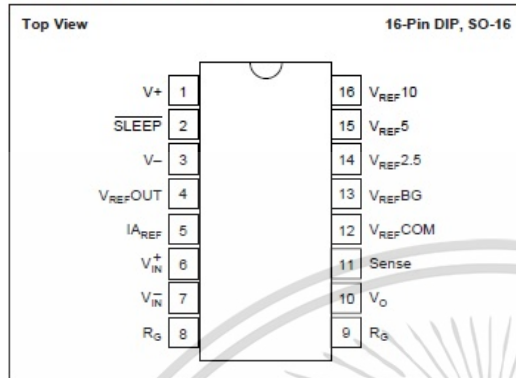
At $T_A = +25^\circ C$, $V_S = +5V$, I_A common at $V_S/2$, V_{REF} common = $V_S/2$, $V_{CM} = V_S/2$, and $R_L = 10k\Omega$ to $V_S/2$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA125P, U			INA125PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI								
Initial			± 75	± 500		*	± 750	μV
vs Temperature			± 0.25			*		$\mu V/^\circ C$
vs Power Supply	$V_S = +2.7V$ to $+36V$		3	20		*	50	$\mu V/V$
Input Voltage Range			See Text			*		
Common-Mode Rejection	$V_{CM} = +1.1V$ to $+3.8V$							
	G = 4	78	84		72	*		dB
	G = 10	86	94		80	*		dB
	G = 100	100	114		90	*		dB
	G = 500	100	114		90	*		dB
GAIN								
Gain Error	$V_O = +0.3V$ to $+3.8V$ G = 4		± 0.01			*		%
OUTPUT								
Voltage, Positive		(V+)-1.2	(V+)-0.8		*	*		V
Negative		(V-)+0.3	(V-)+0.15		*	*		V
POWER SUPPLY								
Specified Operating Voltage			+5			*		V
Operating Voltage Range		+2.7		+36		*	*	V
Quiescent Current	$I_O = I_{REF} = 0mA$		460	525		*	*	μA
Sleep Current ($V_{SLEEP} \leq 100mV$)	$R_L = 10k\Omega$, Ref Load = $2k\Omega$		± 1	± 25		*	*	μA

* Specification same as INA125P, U.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN CONFIGURATION

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Power Supply Voltage, V+ to V-	36V
Input Signal Voltage	±40V
Output Short Circuit	Continuous
Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-55°C to +125°C
Lead Temperature (soldering, 10s)	+300°C

NOTE: Stresses above these ratings may cause permanent damage.

PACKAGE INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER ⁽¹⁾
INA125PA	16-Pin Plastic DIP	180
INA125P	16-Pin Plastic DIP	180
INA125UA	SO-16 Surface-Mount	285
INA125U	SO-16 Surface-Mount	285

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



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.



INA125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Instrument Amplifier INA128



INA128
INA129

SBOS051B – OCTOBER 1995 – REVISED FEBRUARY 2005

Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIERS

FEATURES

- **LOW OFFSET VOLTAGE:** 50 μ V max
- **LOW DRIFT:** 0.5 μ V/ $^{\circ}$ C max
- **LOW INPUT BIAS CURRENT:** 5nA max
- **HIGH CMR:** 120dB min
- **INPUTS PROTECTED TO \pm 40V**
- **WIDE SUPPLY RANGE:** \pm 2.25V to \pm 18V
- **LOW QUIESCENT CURRENT:** 700 μ A
- **8-PIN PLASTIC DIP, SO-8**

APPLICATIONS

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

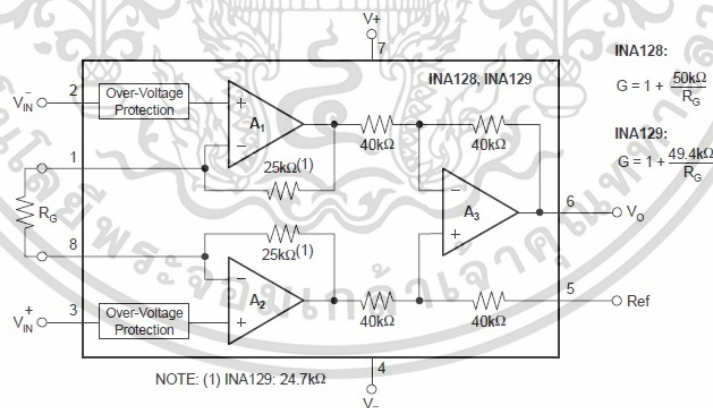
DESCRIPTION

The INA128 and INA129 are low power, general purpose instrumentation amplifiers offering excellent accuracy. The versatile 3-op amp design and small size make them ideal for a wide range of applications. Current-feedback input circuitry provides wide bandwidth even at high gain (200kHz at G = 100).

A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. The INA128 provides an industry-standard gain equation; the INA129 gain equation is compatible with the AD620.

The INA128/INA129 is laser trimmed for very low offset voltage (50 μ V), drift (0.5 μ V/ $^{\circ}$ C) and high common-mode rejection (120dB at G \geq 100). It operates with power supplies as low as \pm 2.25V, and quiescent current is only 700 μ A—ideal for battery-operated systems. Internal input protection can withstand up to \pm 40V without damage.

The INA128/INA129 is available in 8-pin plastic DIP and SO-8 surface-mount packages, specified for the -40° C to $+85^{\circ}$ C temperature range. The INA128 is also available in a dual configuration, the INA2128.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**
www.ti.com

Copyright © 1995–2005, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**INA128
INA129**



SBOS051B – OCTOBER 1995 – REVISED FEBRUARY 2005

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Supply Voltage	±18V
Analog Input Voltage Range	±40V
Output Short-Circuit (to ground)	Continuous
Operating Temperature	-40°C to +125°C
Storage Temperature Range	-55°C to +125°C
Junction Temperature	+150°C
Lead Temperature (soldering, 10s)	+300°C

⁽¹⁾ Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those specified is not implied.

ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY



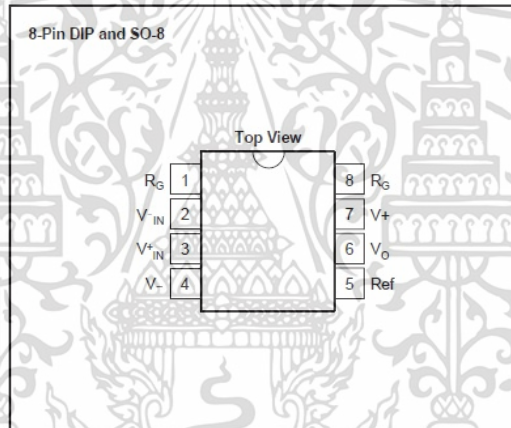
This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

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.

ORDERING INFORMATION

For the most current package and ordering information, see the Package Option Addendum located at the end of this data sheet.

PIN CONFIGURATION



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

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

PARAMETER	CONDITIONS	INA128P, U INA129P, U			INA128PA, UA INA129PA, UA			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI								
Initial	$T_A = +25^\circ\text{C}$		$\pm 10 \pm 100/\text{G}$	$\pm 50 \pm 500/\text{G}$		$\pm 25 \pm 100/\text{G}$	$\pm 125 \pm 1000/\text{G}$	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	$V_S = \pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$		$\pm 0.2 \pm 20/\text{G}$	$\pm 1 \pm 100/\text{G}$		*	$\pm 2 \pm 200/\text{G}$	$\mu\text{V}/\text{V}$
Long-Term Stability			$\pm 0.1 \pm 3/\text{G}$			*		$\mu\text{V}/\text{mo}$
Impedance, Differential			$10^{10} \parallel 2$			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode			$10^{11} \parallel 9$			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode Voltage Range(1)	$V_O = 0\text{V}$	$(V^+) - 2$ $(V^-) + 2$	$(V^+) - 1.4$ $(V^-) + 1.7$		*	*		V
Safe Input Voltage				± 40		*	*	V
Common-Mode Rejection	$V_{\text{CM}} = \pm 13\text{V}$, $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$						*	
	$G = 1$	80	86		73	*		dB
	$G = 10$	100	106		93	*		dB
	$G = 100$	120	125		110	*		dB
	$G = 1000$	120	130		110	*		dB
BIAS CURRENT								
vs Temperature			± 2	± 5		*	± 10	nA
Offset Current			± 30			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
vs Temperature			± 1	± 5		*	± 10	nA
			± 30			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
NOISE VOLTAGE, RTI								
	$G = 1000$, $R_G = 0\Omega$							
$f = 10\text{Hz}$			10			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 100\text{Hz}$			8			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 1\text{kHz}$			8			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			0.2			*		μVpp
Noise Current								
$f = 10\text{Hz}$			0.9			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 1\text{kHz}$			0.3			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			30			*		pApp
GAIN								
Gain Equation, INA128			$1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$			*		V/V
INA129			$1 + (49.4\text{k}\Omega/R_G)$			*		V/V
Range of Gain		1		10000	*		*	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(2)	$G = 1$		± 1	± 10		*	*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
50k Ω (or 49.4k Ω) Resistance(2)(3)			± 25	± 100		*	*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Nonlinearity	$V_O = \pm 13.6\text{V}$, $G = 1$		± 0.0001	± 0.001		*	± 0.002	% of FSR
	$G = 10$		± 0.0003	± 0.002		*	± 0.004	% of FSR
	$G = 100$		± 0.0005	± 0.002		*	± 0.004	% of FSR
	$G = 1000$		± 0.001	(4)		*	*	% of FSR

NOTE: * Specification is same as INA128P, U or INA129P, U.

(1) Input common-mode range varies with output voltage — see typical curves.

(2) Specified by wafer test.

 (3) Temperature coefficient of the 50k Ω (or 49.4k Ω) term in the gain equation.

 (4) Nonlinearity measurements in $G = 1000$ are dominated by noise. Typical nonlinearity is $\pm 0.001\%$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INA128
INA129


SBOS051B – OCTOBER 1995 – REVISED FEBRUARY 2005

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

PARAMETER	CONDITIONS	INA128P, U INA129P, U			INA128PA, UA INA129PA, UA			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
OUTPUT								
Voltage: Positive	$R_L = 10\text{k}\Omega$	(V+) - 1.4	(V+) - 0.9		*	*		V
Negative	$R_L = 10\text{k}\Omega$	(V-) + 1.4	(V-) + 0.8		*	*		V
Load Capacitance Stability			1000			*		pF
Short-Circuit Current			+6/-15			*		mA
FREQUENCY RESPONSE								
Bandwidth, -3dB	G = 1		1.3			*		MHz
	G = 10		700			*		kHz
	G = 100		200			*		kHz
	G = 1000		20			*		kHz
Slew Rate	$V_O = \pm 10\text{V}$, G = 10		4			*		V/ μs
Settling Time, 0.01%	G = 1		7			*		μs
	G = 10		7			*		μs
	G = 100		9			*		μs
	G = 1000		80			*		μs
Overload Recovery	50% Overdrive		4			*		μs
POWER SUPPLY								
Voltage Range		± 2.25	± 15	± 18	*	*	*	V
Current, Total	$V_{IN} = 0\text{V}$		± 700	± 750		*	*	μA
TEMPERATURE RANGE								
Specification		-40		+85	*		*	$^\circ\text{C}$
Operating		-40		+125	*		*	$^\circ\text{C}$
θ_{JA}	8-Pin DIP		80			*	*	$^\circ\text{C/W}$
	SO-8 SOIC		150			*	*	$^\circ\text{C/W}$

NOTE: * Specification is same as INA128P, U or INA129P, U.

(1) Input common-mode range varies with output voltage — see typical curves.

(2) Specified by wafer test.

(3) Temperature coefficient of the 50k Ω (or 49.4k Ω) term in the gain equation.(4) Nonlinearity measurements in G = 1000 are dominated by noise. Typical nonlinearity is $\pm 0.001\%$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. อริญชยา พันธุ์พานัก, อธิโรจน์ มะโน, อัมพร โพธิ์ไย, และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง
“ห้วัดสนามแม่เหล็กฮอลล์โดยใช้โครงสร้างแวนเดอร์พาวบนเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน”
37th Electrical Engineering Conference (EECON-37), pp. 697-700, Konkean,
Thailand, November 19-21, 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์โดยใช้โครงสร้างแวนเดอร์พาวบนเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน Hall Magnetic Sensor by using Van De Pauw Structure based on 0.5 μm CMOS Technology

อริชญา พันธุ์พ้าก^{1,2} อธิโรจน์ มะโน¹ อัมพร โพธิ์โย¹ และวิสุทธิ์ อู่อิฐรุ่งเรือง³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ arinchaya@nimt.or.th

³ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการใช้โครงสร้างแวนเดอร์พาว (Van De Pauw Structure) สำหรับเป็นหัววัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (IMEC) โดยบ่อนอกชนิดพี (P-WELL) รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $40 \times 40 \times 2 \mu\text{m}^3$ ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งใช้สำหรับเป็นพื้นที่ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก บนบ่อนอกชนิดพี ทำการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมสำหรับเป็นขั้วโอห์มมีทั้งหมดสี่ขั้ว หัววัดที่สร้างขึ้นนี้ถูกนำมาทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับทิศของกระแส พบว่าการตอบสนองของหัววัดเป็นเชิงเส้น ผลการทดลองที่ช่วงความเข้มสนามแม่เหล็ก 0-5,000 เกาส์ มีความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.0036 mV/G และในกรณีที่ทำกรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ 230 เท่า สามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดในช่วง 0-3,000 เกาส์ โดยมีความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.8 mV/G หลังจากนั้นนำหัววัดที่ได้มาสร้างเป็นเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กและประมวลผลด้วยโปรแกรมแลบวิว โดยผลของการทดสอบเทียบค่าการวัดสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือมาตรฐานแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องที่พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การวัดคลินใจ (R^2) เท่ากับ 1.000 ดังนั้น หัววัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นนี้มีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นวงจรรวมเพื่อการวัดค่าสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอนได้

คำสำคัญ: โครงสร้างแวนเดอร์พาว, หัววัดสนามแม่เหล็ก, เทคโนโลยีซีมอส

Abstract

This research presents a magnetic sensor made by using Van De Pauw structure based on 0.5 μm CMOS Technology fabricated at Thai Microelectronics Center (IMEC). A squared P-WELL layer with dimensions of $40 \times 40 \times 2 \mu\text{m}^3$ was made on a P-WELL in n-type silicon wafer. This layer is used as an area to response to magnetic field. Also on the P-WELL layer, four contact of aluminum layer were made to fix four ohmic contacts. The response of the magnetic sensor to the change of

magnetic flux density was tested. Linear response was found. And as the result of sensitivity for the magnetic sensor alone in the range between 0-5,000 gauss was 0.0036 mV/G, while that of the sensor with the Hall voltage amplification of 230 times was 0.8 mV/G. This was measured in the magnetic flux density between 0-3,000 gauss. The fabricated magnetic sensor was verified by comparing the calibration results with those obtained from standard equipment. The comparison shows acceptable agreement. Also the coefficient of determination (R^2) was calculated. It was 1.000. Therefore, this implies that the fabricated magnetic sensor can be developed to be an integrated circuit for measuring magnetic flux density based on 0.5 μm CMOS Technology.

Keywords: Van De Pauw structure, Hall Sensor, CMOS Technology

1. บทนำ

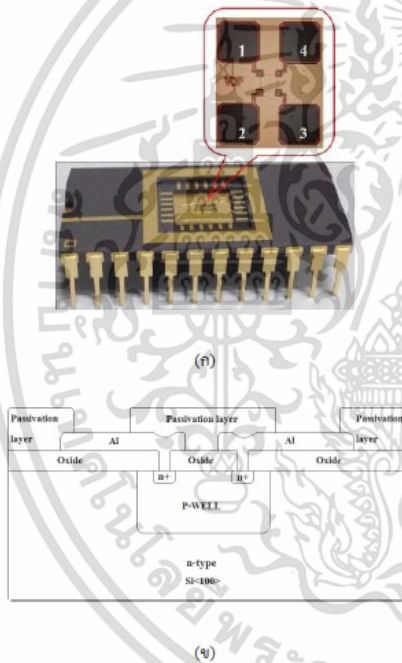
เทคโนโลยีสำหรับการวัดปริมาณทางฟิสิกส์หรือหัววัด (Sensor) ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้การใช้งานได้หลากหลายทั้งตรงและทางอ้อมเพื่อช่วยสนับสนุนและทำให้เกิดความสะดวกสบายในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ส่งผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีหัววัดอย่างมากมาย เช่น หัววัดความดัน (Pressure sensor) หัววัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) และหัววัดสนามแม่เหล็ก (Hall sensor) เป็นต้น โดยมีการพัฒนาให้เกิดคุณสมบัติเด่นตรงที่มีขนาดเล็ก อัตราานการใช้พลังงานที่ต่ำ มีเสถียรภาพที่ดีและสามารถเชื่อมต่อกับระบบภายนอกได้ง่าย ซึ่งถูกเรียกกันว่า หัววัดอัจฉริยะ (Smart Sensor) ดังนั้นเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองต่อการพัฒนาคุณสมบัติดังกล่าวมานี้ นั่นคือ เทคโนโลยีซีมอส (CMOS Technology) เพื่อการพัฒนาเป็นวงจรรวม (IC-Circuit) [1] ของอุปกรณ์การตรวจวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ด้วยโครงสร้างแวนเดอร์พาวเป็นอีกหนึ่งโครงสร้างที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ [2] (Hall Effect) และสามารถสร้างร่วมกับมอสทรานซิสเตอร์ (MOSFET) สำหรับวงจรการปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioner) บนเทคโนโลยีซีมอส เพื่อให้เกิดความเหมาะสมและสอดคล้องกันระหว่างหัววัดกับวงจรการปรับสภาพ ด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างนี้ จึงจำเป็นต้อง

EL008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาและพัฒนาหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์บนโครงสร้างแวนเดอร์พาวจาก กระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยีซีมอส ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการใช้โครงสร้างแวนเดอร์พาวสำหรับการตรวจวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์บนเทคโนโลยีซีมอสถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดีของหัววัด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังแสดงถึงการประยุกต์ใช้เป็นตัววัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

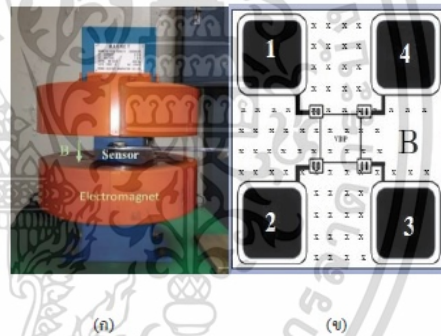
โดยโครงสร้างที่สร้างขึ้นนี้เป็น โครงสร้างแวนเดอร์พาวแบบสมมาตรขนาด $40 \times 40 \times 2 \mu\text{m}^2$ ด้วยเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน [1,6] ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งใช้สำหรับเป็นพื้นที่ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก บนบ่อแยกชนิดที่ทำการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมสำหรับเป็นขั้วต่อที่มีคมทั้งหมดสี่ขั้ว แสดงให้เห็นดังรูปที่ 1(ก) และ รูปที่ 1(ข) เป็นภาพตัดขวางที่แสดงถึงชั้นโครงสร้างของหัววัด



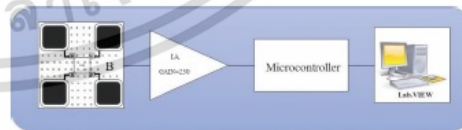
รูปที่ 1 หัววัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยอาศัย โครงสร้างแวนเดอร์พาวด้วยเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน (ก) หัววัดสนามแม่เหล็ก และ (ข) ภาพตัดขวางของหัววัดสนามแม่เหล็ก

2. วิธีการทดลอง

ในการทดลองสมบัติของหัววัดจะแบ่งออกเป็นสองส่วนสำคัญ คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบสมบัติการตอบสนองของหัววัดที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดที่มุม 0-360 องศา โดยการเปลี่ยนแปลงมุมครึ่งละ 10 องศา [3] และรวมไปถึงการทดสอบความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 1 mA ที่ขั้ว 3 ไปยังขั้ว 1 ให้กับหัววัดภายใต้สนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับกระแสดังรูปที่ 2(ข) โดยสนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นจาก อิเล็กโตรแมกเน็ต (Electromagnet) ที่มีค่าความเข้ม 0-5,000 เกาส์ และในส่วนที่สองเป็นการประยุกต์ใช้หัววัดสำหรับการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก เพื่อทดสอบความแม่นยำของหัววัด เมื่อนำมาสร้างเป็นเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยระบบทดสอบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จากหัววัดจะถูกขยายด้วย อินสตรูเมนต์แอมพลิฟาย (Instrument Amplifier) ที่กำลังขยายประมาณ 230 เท่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ 0-3,000 เกาส์ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของเครื่องมือเพื่อหาค่าความไวของระบบ โดยที่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้จะถูกประมวลผลและคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรมแลบวิว (Lab.VIEW Programming) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน (FWBELL 5170) เพื่อทดสอบความแม่นยำของหัววัด



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองของหัววัด (ก) การจัดวางหัววัดในอิเล็กโตรแมกเน็ต และ (ข) ทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด



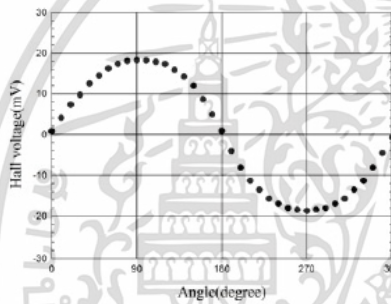
รูปที่ 3 แผนภาพของระบบทดสอบความแม่นยำในการวัดสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

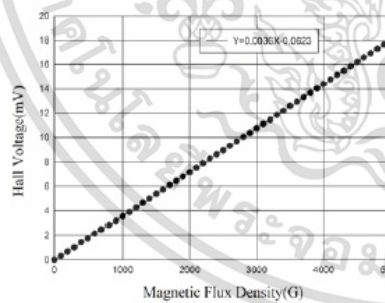
3. ผลและการวิเคราะห์ผล

ตามหลักการทางฟิสิกส์ของปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นผลอันเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมชิ้นสาร เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ ดังนั้นในการทดลองนี้เป็นการทดสอบหัววัดเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องตามหลักการทางฟิสิกส์ในการตอบสนองของหัววัดที่ถูกสร้างขึ้นบนบ่อแยกชนิดพี ทดสอบภายใต้สนามแม่เหล็ก 5,000 เกาส์ ที่กระแส 1 mA โดยผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่ขึ้นกับทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 1

$$V_H = \frac{IB\sin\theta}{qpt} \quad (1)$$

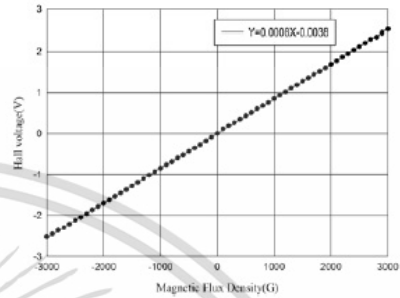


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มุม 0-360 องศา ที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก 5,000 เกาส์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 0-5,000 เกาส์

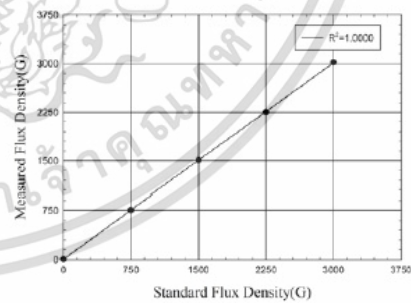
โดยผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กช่วง 0-5,000 เกาส์ เพื่อทดสอบค่าความไวของหัววัด จากกราฟในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงสมบัติค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 1 โดยมีค่าความไวเท่ากับ 0.0036 mV/G



รูปที่ 6 การตอบสนองช่วงความเข้มสนามแม่เหล็ก -3,000 ถึง 3,000 เกาส์

ด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มีค่าในระดับไมโครโวลต์เพื่อให้เห็นถึงค่าการตอบสนองที่ไวขึ้นในการประยุกต์ใช้ รวมไปถึงการพัฒนาสร้างวงจรรวมสำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กในอนาคต จึงได้ทำการทดลองขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ด้วยอินสตรูเมนต์แอมพลิฟายด้วยกำลังขยายประมาณ 230 เท่า พบว่าการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง 0-3,000 เกาส์ มีค่าความไวในการตอบสนองที่สูงขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0008 V/G แสดงการตอบสนองของหัววัดดังกราฟรูปที่ 6 โดยเป็นเชิงเส้นตามสมการที่ 2 สามารถนำสมการ ไปคำนวณด้วยโปรแกรมแลบวิวเพื่อคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

$$y = 0.0008x - 0.0038 \quad (2)$$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำการวัดกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากเครื่องมือมาตรฐาน (FWBELL5170)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการประยุกต์ใช้หัววัดด้วยโครงสร้างแวนเดอร์พาว สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยทำการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน จากการทดสอบแบบห้าจุด[4] ดังรูปที่ 7 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R) มีค่าเท่ากับ 1.000

4. สรุปผลการทดลอง

ด้วยโครงสร้างแบบแวนเดอร์พาวแบบสมมาตรที่ถูกสร้างขึ้นจากการใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่มีขนาดเล็ก มีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ค่อนข้างสูงที่ 0.0036 mV/G ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของปรากฏการณ์ฮอลล์ และเมื่อทำการขยายสัญญาณเพื่อนำไปทำเป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็กด้วยกำลังขยายประมาณ 230 เท่า โดยมีค่าความไวเพิ่มขึ้นเป็น 0.8 mV/G และประมวลผลเพื่อคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรมแลบวิว จากการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐานมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 1.000 แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของหัววัดสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและสามารถต่อยอดสำหรับการสร้างเป็นวงจรรวม โดยการใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน ได้อย่างเหมาะสมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคุณอนุชา เรืองพานิช คุณจิรวัดน์ ปราณเขต และทีมงานนักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนทางด้านการศึกษาตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins, "Device electronics for integrated circuit" John Wiley&Sons, Singapore, 1986.
- [2] Dieter K.Schroder, "Semiconductor material and device characterization" John Wiley&Sons, New York, 1990.
- [3] Hong Xiao, "Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology". Prentice-Hall Inc., 2001
- [4] S. Khunkha, S. Niemcharoen, R. Ruanghlua, N. Klunggien, W.Yamwong, A. Ruangphanit and N. Phongphanthanthr, "Design and Development of CMOS Technology Process for VLSI Fabrication" in Ozean Journal of Applied Sciences.

- [5] Siya Lozanova, Avgust Ivanov and Chavder Roumenin, "A Novel Three-Axis Hall Magnetic Sensor" in Procedia Engineering, Vol.25, pp. 539-542, 2011
- [6] Athirot Mano, Narin Atiwongsangtong and Wisut Titiroongruang, "Improvement of Independent Directional Magnetic field Measurement Technique with Hall Sensors" in Journal of Advanced Materials Research, Vol.811, pp.347-352
- [7] Jame W.Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell, "Instrumentation for Engineering Measurement", John Wiley&Sons, Inc., 1993.
- [8] R S Popovic. "Hall Effect Devices". 2nd ED. IOP Publishing Ltd, 2004.
- [9] อธิโรจน์ มะโน, สันติ ชาครุประชีวิน, ถัดดาวลัย สุภาติ, ชนา สุวิยา อมรนนท์ และวิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง "การวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33), pp. 1369-1372, 2553.

ประวัติผู้เขียนบทความ



อัญญา พันธุ์พานิช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



อธิโรจน์ มะโน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.



ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง สำเร็จการศึกษา DOCTOR OF ENGINEERING จาก TOKAI UNIVERSITY ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวอริญชยา พันธุ์พำนัก
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2530
 สถานที่เกิด ตำบลท่ายาง อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี
 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (โซลิตสเตทอิเล็กทรอนิกส์) ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- พ.ศ. 2557 “การประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางสำหรับระบบวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก” Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014), pp.609-612, 26-28 March 2014, Krabi, Thailand.
- “การปรับปรุงค่าโคเออร์ซิวิตีและค่าแม่เหล็กอิ่มตัวของสารแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอ่อน Co-Fe ด้วยวิธีการสร้างทางไฟฟ้าเคมีแบบพัลส์” Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014), pp.613-616, 26-28 March 2014, Krabi, Thailand.
- “การศึกษาผลกระทบของความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้าฮอลล์ต่อความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์” Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015), 27-29 May 2015, Pattaya, Thailand.
- “หัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์โดยใช้โครงสร้างแวนเดอร์พาวบนเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน” 37th Electrical Engineering Conference (EECON-37), pp. 697-700, November 19-21, 2014, Konkean, Thailand.