

การศึกษานวัตกรรมวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์
สองมิติ

A STUDY ON INDEPENDENT DIRECTIONAL MAGNETIC FIELD
MEASUREMENT TECHNIQUE BY USING TWO-DIMENSION HALL DEVICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-043-070

การศึกษาเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์
สองมิติ

A STUDY ON INDEPENDENT DIRECTIONAL MAGNETIC FIELD
MEASUREMENT TECHNIQUE BY USING TWO-DIMENSION HALL DEVICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON INDEPENDENT DIRECTIONAL MAGNETIC FIELD
MEASUREMENT TECHNIQUE BY USING TWO-DIMENSION HALL DEVICE



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
2016

KMITL-2016-EN-M-043-070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

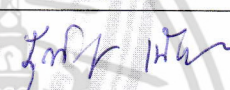




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

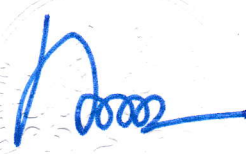
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติ
Thesis Title A Study on Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique by Using Two-Dimension Hall Device
นักศึกษา นายวชิระ น้อยหว่า
รหัสประจำตัว 57601190
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-070

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 9.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมตัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ถือว่าผิดกฎหมายทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติ
นักศึกษา	นายวชิระ น้อยหว่า
รหัสนักศึกษา	57601190
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงการศึกษาเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติ ในระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็กนิยมนำหัววัดฮอลล์เป็นอุปกรณ์สำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็ก ซึ่งหัววัดฮอลล์มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า แต่เนื่องจากค่าการตอบสนองของหัววัดฮอลล์แปรผันกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากกระทำโดยเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ จึงต้องให้ทิศของสนามแม่เหล็กกระทำในแนวตั้งฉากเท่านั้นจึงจะทำให้ได้ค่าที่ถูกต้อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้รวมเอาโครงสร้างที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศขนาน (Vertical Hall) และโครงสร้างที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (Conventional Hall) เป็นหัววัดฮอลล์สองมิติ ซึ่งหัววัดฮอลล์สองมิติมีคุณสมบัติเด่นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดได้ โดยโครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ใช้ประกอบด้วยชั้นนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีทั้งหมด 5 ชั้น มีพื้นที่ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กขนาด $600 \times 300 \mu\text{m}^2$ เทคนิคการวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติถูกนำเสนอโดยใช้ความสัมพันธ์ทางสมการตรีโกณมิติระหว่างฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองทิศการตอบสนอง โดยใช้วงจรประมวลสัญญาณแบบอนาล็อก ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่มากกระทำในแต่ละมุมจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ โดยไม่ขึ้นกับมุมที่กระทำ และเมื่อเทียบวัดสนามแม่เหล็กช่วง 0-5000 เกาส์ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4.4 เปอร์เซ็นต์

Thesis Title	A Study on Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique by Using Two-Dimension Hall Device
Student	Mr. Wachira Noiwa
Student ID.	57601190
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis purposed the study on independent directional magnetic field measurement technique by using two-dimension hall device. Typical magnetic flux density measurement is two-dimension hall device which responds to magnetic flux density changing. Two-dimension hall device changes magnetic flux density to voltage. However, two-dimension hall device varies following magnetic field angle in sine function that caused magnetic field shall preform with hall device in only perpendicular direction for accuracy measurement. Therefore, this thesis included hall device structure which respond to magnetic field in parallel and perpendicular direction. Two-dimension hall device can respond to magnetic field in perpendicular and parallel direction. Two-dimension hall device compose of 5 aluminum poles which respond to magnetic flux density changing. Active area of magnetic flux density is $600 \times 300 \mu\text{m}^2$. Independent directional magnetic field measurement technique is presented by inducting trigonometric correlation between sine and cosine function of hall voltage for calculation with analog data processing. Result of independent directional magnetic field measurement in each angle, voltage is constant that does not depend on direction and result of measuring magnetic flux density 0-5000 Gauss between measurement comparison design and standard measuring tool is error less than 4.4%

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้อบรมสั่งสอน ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียนและการดำเนินชีวิตจนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ตั้งใจให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยให้ความสนับสนุนทางด้านเครื่องมือสำหรับการสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติ

ขอขอบคุณ ดร. จิรวัดน์ ปราบเขต และทีมงานนักวิจัยศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยสนับสนุนทางด้านความรู้เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติ รวมถึงให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณ. อธิโรจน์ มะโน ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือเกี่ยวกับงานวิจัย อีกทั้งสนับสนุนหัววัดฮอลล์สองมิติมาให้ข้าพเจ้าใช้ในการทดสอบสมบัติ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณขอขอบคุณเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยกมา ก่อให้เกิดองค์ความรู้ที่นำมา ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งข้าพเจ้าคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ ทางด้านการศึกษาสมบัติสนามแม่เหล็ก เพื่อนำไปพัฒนาในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไปข้างหน้าได้

ขอขอบคุณ คุณ. สมฤทัย ศรีหาตา คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายสุดคุณประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแก่บิดา นายเกษร น้อยหว่า และ มารดา นางดอกไม้ น้อยหว่า ที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดและ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

วชิระ น้อยหว่า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect).....	5
2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในโลหะ.....	9
2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก.....	11
2.3.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรีนซิก.....	11
2.3.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรีนซิก.....	13
2.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	16
2.4.1 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	16
2.4.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ตามฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	18
2.5 วงจรประมวลสัญญาณ.....	19
2.5.1 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง.....	20
2.5.2 วงจรกำลังสอง.....	21
2.5.3 วงจรรวมสัญญาณ วงจรถอดรอกที่สอง.....	22
2.5.4 วงจรถอดรอกที่สอง.....	23
บทที่ 3 วิธีการออกแบบระบบการวัดและการทดลอง.....	25
3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 โครงสร้างของห้วัดฮอลล์สองมิติ.....	25
3.1.2 หลักการทำงานของห้วัดฮอลล์สองมิติ	27
3.2 การออกแบบระบบการวัดฮอลล์สองมิติโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง	27
3.2.1 ระบบชุดวัดสนามแม่เหล็ก.....	28
3.2.2 ระบบประมวลสัญญาณ	29
3.3 การทดสอบสมบัติของห้วัดฮอลล์สองมิติ	32
3.3.1 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของห้วัดฮอลล์สองมิติ	32
3.3.2 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติ..	32
3.3.3 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติที่ผ่านวงจรมายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์.....	33
3.3.4 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติที่ผ่านวงจรมายสัญญาณอนาล็อก	35
3.3.4.1 วงจรยกกำลังสอง.....	35
3.3.4.2 วงจรรวมสัญญาณ.....	37
3.3.4.3 วงจรถอดรอกที่สอง.....	37
3.4 การทดสอบสมบัติของห้วัดฮอลล์สองมิติโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง	38
การทดสอบความแม่นยำของวิธีการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางกับเครื่องมือมาตรฐาน	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของห้วัดฮอลล์สองมิติ	40
4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติ	40
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติ	41
4.1.3 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติที่ถูกขยายสัญญาณ	50
4.1.4 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรมายสัญญาณอนาล็อก.....	53
4.1.4.1 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติที่ผ่านวงจรมายยกกำลังสอง	53
4.1.4.2 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรรวมสัญญาณ	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4.3 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์ สองมิติเมื่อผ่านวงจรถอดราก็สอง.....	56
4.2 การทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	58
ผลการทดสอบการวัดเทียบของระบบการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับ ทิศทางกับเครื่องมือมาตรฐาน	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	67
ภาคผนวก ข. ข้อมูลอุปกรณ์การประมวลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์	68
ภาคผนวก ค. ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างห้ววัดฮอลล์สองมิติทั้ง 3 โครงสร้าง	26
4.1 เปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คงที่กับค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ระบบวัดสนามแม่เหล็ก โดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้.....	59
4.2 เปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง วัดได้กับค่าสนามแม่เหล็กที่เครื่องมือมาตรฐานวัดได้.....	60



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) ลักษณะของแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมบาง (ข) อุปกรณ์และวิธีการทดลองการค้นพบปรากฏการณ์ฮอลล์.....	5
2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในชั้นสาร (ก) กรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ (ข) กรณีที่มีสนามแม่เหล็กเข้ามากระทำในทิศตั้งฉากกับชั้นสาร	6
2.3 ผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับประจุพาหะภายในสารของแข็ง	6
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นตัวนำ	8
2.5 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ	14
2.6 ความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x,y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย	16
2.7 ฟังก์ชันไซน์สำหรับพิกัดจุด y บนวงกลมหนึ่งหน่วย	16
2.8 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \sin x$	17
2.9 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \cos x$	17
2.10 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ.....	18
2.11 การเลื่อนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์.....	19
2.12 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง	21
2.13 วงจรกำลังสอง.....	22
2.14 วงจรรวมสัญญาณ	22
2.15 วงจรลอการิทึมที่สอง	24
3.1 รูปตัดขวางของหัววัดฮอลล์สองมิติ	25
3.2 หัววัดฮอลล์สองมิติ	25
3.3 ขั้วไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์สองมิติ	26
3.4 หลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติ	27
3.5 ระบบการวัดสนามแม่เหล็ก	27
3.6 ชุดระบบวัดสนามแม่เหล็ก.....	28
3.7 ลักษณะการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก	28
3.8 ลักษณะการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศขนาน	29
3.9 วงจรประมวลสัญญาณ	29
3.10 วงจรขยายสัญญาณ.....	30
3.11 วงจรคำนวณสัญญาณแบบอนุลอก	31
3.12 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์สองมิติ	32
3.13 การวัดสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	33
3.14 ไอซีอินสตรูเมนต์ในวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ INA101.....	34
3.15 การต่อวงจรขยายอินตูลูเมนต์โดยใช้ไอซีเบอร์ INA101.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 วงจรยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทิศขนาน.....	35
3.17 วงจรยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทิศตั้งฉาก	36
3.18 ลักษณะการวัดค่าการตอบสนองเมื่อผ่านวงจรยกกำลังสองในทั้งสองทิศทาง (ก) ลักษณะการวัดค่าการตอบสนองต่อความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศขนาน (ข) ลักษณะการวัดค่าการตอบสนองต่อความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก	36
3.19 วงจรบวกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์	37
3.20 วงจรถอดรอกที่สองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์	38
3.21 การวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของฮอลล์สองมิติ	38
4.1 ลักษณะกระแส - แรงดันของขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 ขั้ว.....	40
4.2 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศขนานของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA	41
4.3 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศขนานของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ที่จ่ายกระแส 1 mA	42
4.4 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA.....	43
4.5 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ที่จ่ายกระแส 1 mA	43
4.6 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศขนานของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA.....	44
4.7 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศขนานของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่จ่ายกระแส 1 mA	45
4.8 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA.....	46
4.9 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่จ่ายกระแส 1 mA	46
4.10 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศขนานของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA.....	47
4.11 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศขนานของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่จ่ายกระแส 1 mA.....	48
4.12 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA.....	49
4.13 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่จ่ายกระแส 1 mA.....	49

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศขนานที่ถูกขยาย สัญญาณ	51
4.15 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากที่ถูกขยาย สัญญาณ	51
4.16 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็กทั้งสองทิศทางที่ถูกขยาย สัญญาณแล้ว	52
4.17 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถูกกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แนวขนาน	53
4.18 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถูกกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แนวตั้งฉาก.....	54
4.19 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกรวมสัญญาณกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ทิศทาง	55
4.20 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกรวมสัญญาณกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แนวตั้งฉาก.....	55
4.21 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถอดรากที่สองกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แนวขนาน	56
4.22 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถอดรากที่สองกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แนวขนาน	57
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่กับมุมที่เปลี่ยนแปลงจาก 0-180 องศา	58
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่กับสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจาก 0-5000 เกาส์.....	59
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบวัดกับค่าความเข้ม สนามแม่เหล็กของระบบวัดมาตรฐาน	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำหัววัดสนามแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆมากมาย ทั้งด้านอุตสาหกรรม รวมถึงด้านการศึกษาและงานวิจัย ซึ่งหัววัดสนามแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ถูกประยุกต์และพัฒนาสำหรับอำนวยความสะดวกให้กับมนุษย์ หัววัดฮอลล์จัดเป็นหนึ่งในอุปกรณ์หัววัดสนามแม่เหล็กที่มีสมบัติการตอบสนองต่อปริมาณความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแรงดัน เช่น เครื่องวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Gauss Meter), เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่น (VSM) เป็นต้น หัววัดสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่อาศัยหลักของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างของหัววัดที่นิยมใช้ยกตัวอย่างเช่น แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode), แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) และ ฮอลล์เพลต (Hall plate) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างเป็นฮอลล์เพลตที่มีข้อดีคือโครงสร้างและกระบวนการสร้างที่ง่าย ความเป็นเชิงเส้นสูงและมีความไวในการตอบสนองสูง ด้วยคุณสมบัติที่ดีหลายประการนี้จึงนำหัววัดฮอลล์มาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เพลตเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage) แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้นั้นขึ้นกับมุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับตัววัสดุฮอลล์ตามฟังก์ชันไซน์ (Sine function) ดังนั้นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของหัววัดสนามแม่เหล็กจะได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด เส้นแรงแม่เหล็กต้องกระทำกับหัววัดฮอลล์เป็นมุม 90 องศา ซึ่งหากทำการวัดโดยวางหัววัดฮอลล์ทำมุมไม่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ผิดพลาดได้ จึงเป็นข้อจำกัดของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เพลต

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงพัฒนาให้หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เพลตสามารถตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กได้มากกว่าหนึ่งทิศทาง (หัววัดฮอลล์สองมิติ) โดยการนำโครงสร้างที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (Conventional Hall) และโครงสร้างที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศขนาน (Vertical Hall) รวมเข้าด้วยกันเพื่อให้หัววัดฮอลล์สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง ซึ่งหัววัดฮอลล์สองมิตินี้มีลักษณะการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และฟังก์ชันโคไซน์ จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยใช้วงจรประมวลผลสัญญาณเชิงอนาล็อกในการคำนวณ เพื่อให้มุมที่เส้นแรงแม่เหล็กกระทำกับหัววัดไม่ส่งผลต่อการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ ซึ่งเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางนี้สามารถนำมาสร้างเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กในทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้หัววัดสามารถนำมาใช้ในงานด้านการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างแม่นยำและถูกต้องอย่างเหมาะสม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

สำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติ โดยทั่วไปแล้วจะทดสอบหาค่าความไวในการตอบสนองซึ่งได้จากค่าความชันในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดต่อค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์อ่านได้จากเครื่องมือวัดจะต้องมีทิศตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด จึงจะมีค่าการตอบสนองที่แม่นยำสูง ซึ่งสำหรับการจัดวางอุปกรณ์ให้มีทิศตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กนั้นมีความเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของหัววัดที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอการศึกษาสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติและเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับมุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์สองมิติ โดยใช้วงจรประมวลสัญญาณเชิงอนาล็อกในการคำนวณจากสมการ $V_H = \sqrt{V_{HX}^2 + V_{HZ}^2}$ เพื่อที่จะนำระบบวัดไปพัฒนาเป็นวงจรรวมสำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในเชิงไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ในอนาคต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติที่อยู่บนพื้นฐานของหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง ซึ่งมีโครงสร้างและกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำหัววัดฮอลล์สองมิติมาศึกษาและประยุกต์ใช้ด้วยเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางเป็นจุดมุ่งหมายหลัก โดยศึกษาสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติ และออกแบบระบบประมวลสัญญาณเชิงอนาล็อก (Signal conditioner) เพื่อที่จะนำระบบวัดไปพัฒนาเป็นวงจรรวมสำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในเชิงไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ในอนาคต

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

หัววัดสนามแม่เหล็กที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เป็นค่าแรงดันไฟฟ้านั้นส่วนใหญ่อาศัยหลักการพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กมากระทำกับหัววัดในทิศทางตั้งฉากจะทำให้ประจุพาหะ (Charge Carrier) เกิดการเบี่ยงเบนระหว่างขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่มากระทำ หากความเข้มสนามแม่เหล็กมากก็จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้ามาก และถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยความต่างศักย์ไฟฟ้านั้นก็จะน้อยตามไปด้วยโดยค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับมุมที่กระทำกับหัววัด จึงทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีการเปลี่ยนแปลงตามมุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำ ลักษณะของงานวิจัยนี้จึงนำสมมติการทดสอบการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง เพื่อลดข้อจำกัดที่ขึ้นกับมุมของหัววัดฮอลล์ โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติ อธิบายค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ ที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างๆ สำหรับการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

สำหรับการวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดสนามแม่เหล็กเพียงตัวเดียวให้มีลักษณะการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้หลายทิศทางหรือไม่ขึ้นกับทิศทางนั้นเป็นไปได้ยาก จึงเป็นข้อจำกัดของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบพื้นฐาน ซึ่งหัววัดฮอลล์สองมิติที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้มากกว่าหนึ่งทิศทางคือ ทิศที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในแนวตั้งฉากและแนวขนาน จากนั้นได้ทำการออกแบบเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งอาศัยหลักความสัมพันธ์ของทฤษฎีตรีโกณมิติ โดยใช้วงจรปรับปรุงสัญญาณแบบอนาล็อก (Signal conditioner) แสดงให้เห็นถึงการวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง เพื่อนำเอาหลักการของเทคนิคที่ใช้ไปประยุกต์ทำเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยนำระบบวัดไปพัฒนาเป็นวงจรรวมสำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในเชิงไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ในอนาคตต่อไปได้

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิธีการวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางของหัววัดฮอลล์ในสองมิติเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ลดความผิดพลาดในการวัด ซึ่งขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติ และการทดสอบระบบการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง ในการลดข้อจำกัดค่าการตอบสนองที่ขึ้นกับมุมของเส้นแรงแม่เหล็กกับหัววัดฮอลล์สองมิติ โดยใช้วงจรประมวลสัญญาณเชิงอนาล็อกในการคำนวณ เพื่อหาแนวโน้มนำเอาหลักการไปประยุกต์ทำเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติ โดยการทดสอบความเป็นไอหุ้มคของรอยสัมผัสระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้ากับฐานรองซิลิกอนชนิดพี เพื่อแสดงให้เห็นถึงรอยสัมผัสระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้ากับฐานรองซิลิกอนชนิดพีไม่ส่งผลต่อการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ จากนั้นทดสอบการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติที่สนามแม่เหล็กมากระทำในทิศตั้งฉากและทิศขนาน เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ทำให้เข้าใจถึงปัญหาหรือข้อจำกัดของการวัดค่าและทำการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมถึงการลดข้อจำกัดในการวัดค่าลง โดยการใช้ทฤษฎีทางตรีโกณมิติที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ อันเนื่องมาจากมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์แล้วทำการทดสอบการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับมุม ซึ่งทำการออกแบบระบบทดลองโดยใช้วงจรประมวลสัญญาณแบบอนาล็อก เพื่อปรับระดับสัญญาณให้เหมาะสมแล้วนำไปประมวลด้วยวงจรคำนวณสัญญาณ เพื่อให้ทราบถึงเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง และสามารถนำหลักการจากการศึกษาไปประยุกต์สร้างเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิด และทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของงานวิจัย และขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัยเทคนิคการวัดความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบ ประกอบด้วยพื้นฐานทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์พื้นฐานของทฤษฎีตรีโกณมิติที่สัมพันธ์กับปรากฏการณ์ฮอลล์ รวมไปถึงระบบประมวลสัญญาณเชิงอนาล็อก

บทที่ 3 กล่าวถึงโครงสร้างทางกายภาพและหลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติ การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์ และการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ตลอดจนนำไปทดสอบเทคนิคการวัดที่ไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยวงจรประมวลสัญญาณเชิงอนาล็อก

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของระบบ

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

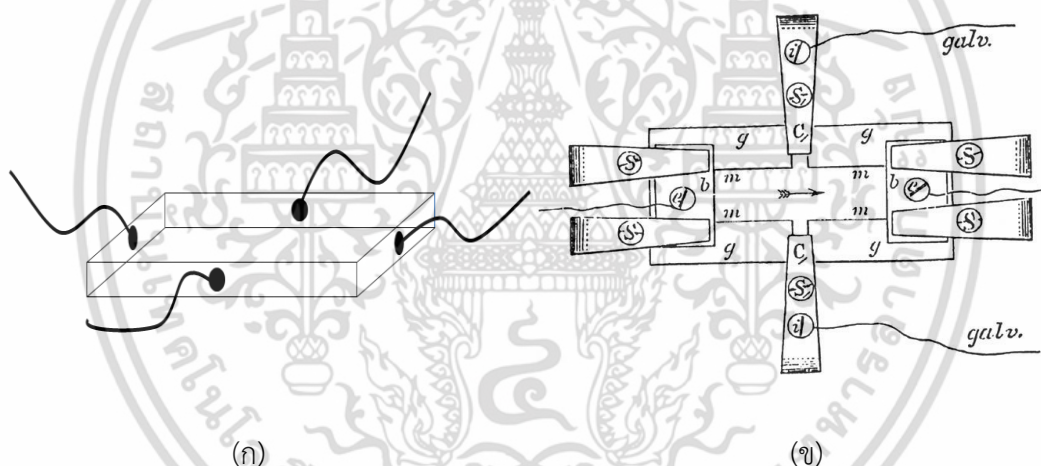


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.1 ปปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

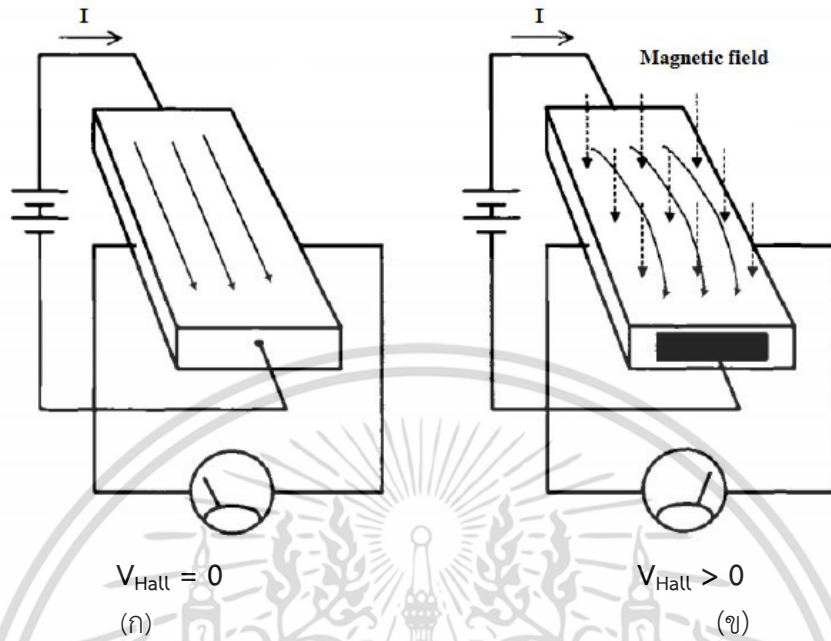
ในปี ค.ศ. 1879 นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ เอ็ดวิน ฮอลล์ (E.H. Hall) ได้ค้นพบปรากฏการณ์อย่างหนึ่ง ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ผลของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ภายนอกที่กระทำกับชิ้นสารตัวนำขณะที่มีสนามไฟฟ้า (Electric field) กระทำ ผลของปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงความต่างศักย์ที่ตกคร่อมชิ้นสาร จึงให้เกียรติตั้งชื่อปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ ตามชื่อนักฟิสิกส์ที่เป็นผู้ค้นพบ [1] โดยทำการทดลองด้วยอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นโลหะบางๆ [7] (ทอง, เงิน, เหล็ก) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1(ก) จากนั้นทำการวัดค่าความไวในการตอบสนองด้วยกัลป์วานอ์มิเตอร์ (Galvanometer) ซึ่งขั้วทั้งสองของกัลป์วานอ์มิเตอร์ถูกต่อตรงกันข้ามที่อยู่ใกล้กับเส้นแรงไฟฟ้า (Electromagnet) ซึ่งการทดลองดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์ใหม่ของการเกิดกระแสไฟฟ้าภายใต้สนามแม่เหล็ก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)”



รูปที่ 2.1 (ก) ลักษณะของแผ่นโลหะที่เหล็บบาง
(ข) อุปกรณ์และวิธีการทดลองการค้นพบปรากฏการณ์ฮอลล์

โดยรูปที่ 2.2 (ก) แสดงการไหลของกระแสผ่านชิ้นสารตัวนำจากขั้ว 1 ไปยังขั้ว 2 โดยทำการจ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply) แล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารที่ขั้ว 3 และ ขั้ว 4 ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามากระทำ พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสารมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อทำการสร้างสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับชิ้นสาร ทำให้ทิศการไหลของกระแสซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่เบี่ยงเบนไป แสดงในรูปที่ 2.2 (ข) จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้ว 3 และ ขั้ว 4 เรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า “แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)” ในกรณีที่มีการกลับขั้วหรือเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับ

ชิ้นสารส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสไปในทางตรงกันข้าม ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมจะกลับทิศกันกับกรณีที่กำลังมาข้างต้น

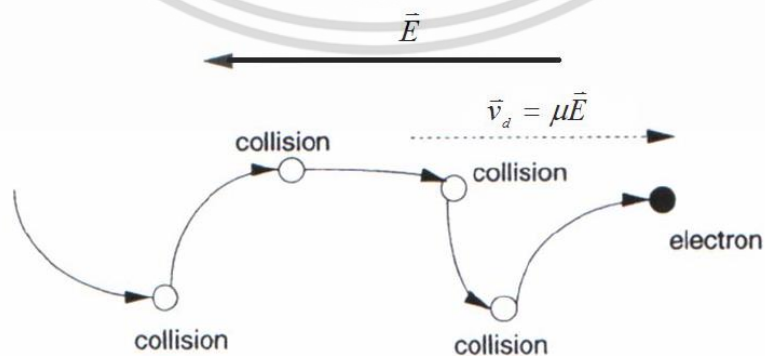


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาฮอลล์ที่เกิดขึ้นในชิ้นสาร

(ก) กรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

(ข) กรณีที่มีสนามแม่เหล็กเข้ามากระทำในทิศตั้งฉากกับชิ้นสาร

ในการศึกษาหัววัดเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบค่าสนามแม่เหล็กหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย ทฤษฎีของสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ ลำดับแรกจะกล่าวถึงสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในสารของแข็งก่อน ดังนั้นเมื่อสร้างความต่างศักย์ระหว่างสองตำแหน่งบนชิ้นสารของแข็ง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศจากศักย์มากพุ่งไปหาศักย์น้อยแสดง โดยแรงที่กระทำกับจุดประจุ [2] เป็นผลเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1)



รูปที่ 2.3 ผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับประจุพาหะภายในสารของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซึ่งการเคลื่อนที่ของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า การดริฟท์ (Drift) โดยมีความเร็วของพาหะจะถูกจำกัดโดยการชนที่เกิดขึ้นกับพาหะนั้นๆ เรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วดริฟท์ (Drift Velocity) ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นความเร็วดริฟท์เฉลี่ย หรือ ความเร็วเฉลี่ยของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้าในสารของแข็งมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.2)

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

สำหรับในกรณีของสนามแม่เหล็กจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของจุดประจุที่หยุดนิ่ง เว้นแต่จะมีการเคลื่อนที่ด้วยแรงอื่น ๆ มากกระทำ เช่น แรงจากสนามไฟฟ้า เป็นต้น โดยแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของประจุ และสำหรับแรงของสนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุ โดยจะขึ้นกับฟังก์ชันความเร็วของประจุพาหะ ความเข้มสนามแม่เหล็ก และทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับประจุ สามารถหาได้ตามสมการ (2.3)

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

การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ต้องมีความเข้าใจถึงอนุภาค เช่น อิเล็กตรอน ที่มีการเคลื่อนที่ภายใต้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้านี้ส่งผลต่อจุดประจุสามารถอธิบายได้จากสมการ (2.4)

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

โดย 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 และการตอบสนองของการเคลื่อนที่ของประจุต่อสนามแม่เหล็กในกรณีของสนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดแรงทางไฟฟ้ากระทำกับจุดประจุ เกิดการเคลื่อนที่ของประจุพาหะและเกิดกระแสภายในชิ้นสารขึ้น ซึ่งแรงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดของประจุไฟฟ้าและปริมาณความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสำหรับในส่วนที่สองเป็นการแสดง

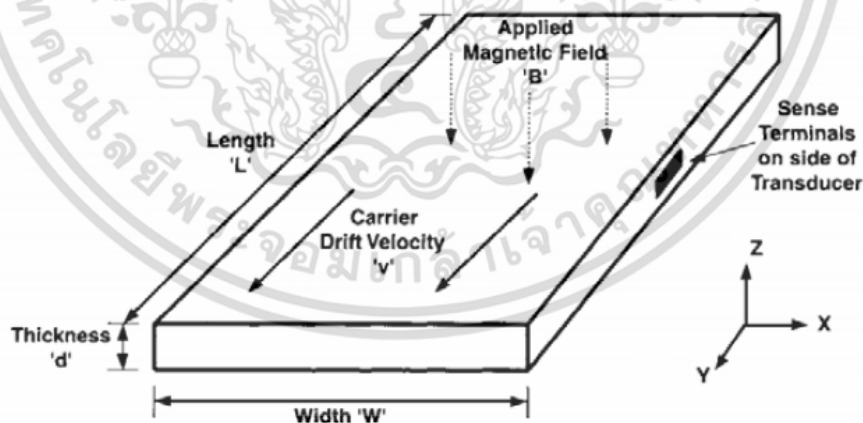
การตอบสนองของประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้การเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงเป็นแนวโค้งหรือหมุนเป็นเกลียว ซึ่งขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับสนามแม่เหล็ก

ในกรณีของประจุพาหะที่เคลื่อนที่ในชั้นสารฮอลล์ ความเร็วของประจุพาหะจะมีความหนาแน่นไปในทิศทางหนึ่งของวัสดุดังรูป 2.4 โดยข้อที่ใช้ต่อออกมาเพื่อวัดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กนี้ จะถูกต่อคร่อมชั้นสารโดยกำหนดให้พาหะมีความเร็วเคลื่อนที่ไปในระนาบแกน x ($V_y = 0$ m/s, $V_z = 0$ m/s) และผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เกิดขึ้นในแกน x แสดงถึงแรงสนามแม่เหล็กที่กระทำกับจุดประจุในแนวแกน x ดังสมการ (2.5)

$$F = q_0 V_y B_z \quad (2.5)$$

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

ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวแกน z (B_z) นั่นคือเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากกระทำกับวัสดุฮอลล์ ส่งผลทำให้เกิดแรงแม่เหล็กค่าหนึ่งที่กระทำกับประจุ เปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของประจุจากทางเดิมที่เคลื่อนที่ในแนวแกน y เปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน x ทำให้ความหนาแน่นของประจุบริเวณด้านทั้งสองของวัสดุแนวแกน x ต่างกัน ซึ่งมีระยะเท่ากับ ความกว้างของชั้นสารกรณีนี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในชั้นสารขึ้น จึงเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างด้านทั้งสองของวัสดุ



รูปที่ 2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นตัวนำ

จากรูปที่ 2.4 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 ที่เกิดในชั้นสาร E_H จะมีค่าตามสมการ

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

โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของความเร็วประจุพาหะและความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก สำหรับชั้นสารที่มีความกว้างเป็น w ระหว่างขั้วทั้งสอง สามารถหาศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมได้จากการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นความกว้าง w ได้ตามสมการ (2.8)

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

ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Voltage, V_H) จะเป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับฟังก์ชัน ทั้ง 3 คือ ความเร็วของจุดประจุสำหรับชั้นสารใด ๆ ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กที่ใช้กับชั้นสาร และระยะของขั้วต่อที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสนามแม่เหล็กส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีความเป็นเชิงเส้น

2.2 ปฏิกิริยาฮอลล์ในโลหะ

ค่าความไว (Sensitivity) ของวัสดุฮอลล์ เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้รู้ถึงความเร็วเฉลี่ยของพาหะสถานะของอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระเป็นผลมาจากพลังงานความร้อน (Thermal Velocity) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) เป็นความเร็วอันเนื่องมาจากความร้อนมีผลเป็นอย่างมากต่ออิเล็กตรอน การเคลื่อนที่แบบสุ่มนี้จะนำไปเฉลี่ยเป็นความเร็วสุทธิ ค่าความเร็วรวมที่ได้จึงเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จะทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านเมื่อมีค่าสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นให้กับวัสดุฮอลล์ที่เป็นโลหะ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วค่าหนึ่งไปในแนวทิศของสนามไฟฟ้า ที่มีค่ามากกว่าการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากพลังงานความร้อน ดังนั้นอัตราการเคลื่อนที่ของพาหะที่เกิดจากสนามไฟฟ้านี้ ถูกเรียกว่าความเร็วดริฟท์ ในกรณีที่เป็นโลหะนำไฟฟ้าอย่างดีสามารถที่จะประมาณค่าได้ ในขั้นแรกจะทำการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับกรณีของโลหะ เช่น ทองแดงสามารถประมาณได้ว่าอะตอมของทองแดงมีอิเล็กตรอนชั้นวงนอกสุดที่ทำให้เกิดการไหลของกระแส ซึ่งความหนาแน่นของประจุพาหะมาจากผลของปริมาณอะตอมของทองแดงต่อหนึ่งน้ำหนักสามารถคำนวณได้จาก

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

โดยที่ N คือ จำนวนของพาหะต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 N_A คือ ค่าคงที่อะโวกาโดร ($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M_m คือ มวลโมเลกุล ($g.mol^{-1}$)

D คือ ความถ่วงจำเพาะของทองแดง (g / cm^3)

ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ สามารถประมาณค่าความเร็วดริฟท์ของพาหะได้จาก กระแสที่อยู่ในหน่วยแอมแปร์ สมมติให้ค่าความหนาแน่นของพาหะเป็นค่าคงที่ และเพิ่มปริมาณพาหะ ในระบบได้ ความเร็วของพาหะจะแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ยิ่งพื้นที่หน้าตัดมีค่ามาก ค่า ความเร็วเฉลี่ยของพาหะลดลง ดังนั้นความเร็วดริฟท์ของพาหะสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.10)

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

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

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

$$V_H = \frac{IB}{q_0 Nd} \quad (2.11)$$

โดยที่ d คือ ความหนาของชั้นสารตัวนำ

ซึ่งในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้ โลหะเพื่อสร้างเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่อยู่บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

สำหรับวัสดุศาสตร์ที่จำแนกประเภทตามคุณสมบัติทางไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็นสามประเภท คือ ตัวนำ ฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในกรณีที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นิยมใช้สารกึ่งตัวนำเป็นหลักวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ เช่น ซิลิกอน (Si) ,เยอรมันเนียม(Ge), แกลเลียม(Ga) เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวนำและฉนวนอย่างชัดเจน กล่าวคือ ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าขึ้นกับอุณหภูมิและแสงจากภายนอกที่มากระทำในวัสดุ โดยวัสดุชนิดนี้เมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือที่เหมาะสมคุณสมบัติการนำไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คุณสมบัติดังกล่าวที่มีความเหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางฟิสิกส์ในธรรมชาติ เช่น แสง อุณหภูมิ เป็นต้น รวมถึงการวัดปริมาณความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็ก ที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง สำหรับสารกึ่งตัวนำ ที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดสนามแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก (Intrinsic semiconductor) และสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic Semiconductor) ด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันนี้ เมื่อนำมาประดิษฐ์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก การตอบสนอง ของวัสดุทั้งสองชนิดจึงแตกต่างกัน โดยจะทำการวิเคราะห์ในเรื่องของความหนาแน่นของพาหะที่มีผล ต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเป็นหลัก

2.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก [3],[4] หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ปราศจากการเจือปนจากอะตอมแปลกปลอมอื่น ๆ เช่น สารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ เป็นต้น เมื่อก่อกำโดยสรุปของคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ ที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์เคลวินพลังงานความร้อน (Thermal Energy) ทำให้บาง อะตอมเกิดไอออนอิสระเป็นคู่พาหะอิเล็กตรอนโฮล (Electron Hole pair) อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้า ทิ้งโฮลอยู่ที่แถบวาเลนซ์ทำให้เกิดความหนาแน่นของพาหะคือ อิเล็กตรอน และโฮล มีค่าต่างกัน ความหนาแน่นของพาหะจะเป็นค่าคงที่ในสภาวะสมดุลความร้อนที่ อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ความหนาแน่นอินทรินซิก (n_i) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและความกว้างของช่องว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิกแล้ว อิเล็กตรอนวาเลนซ์ (Valence electron) จะถูกยึดเหนี่ยวไว้ที่แถบวาเลนซ์ จำเป็นต้องใช้พลังงานภายนอกที่สูงมากเพื่อจะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนขึ้นระดับพลังงานสู่แถบนำไฟฟ้าได้ แสดงถึงคุณสมบัติคล้ายกับฉนวนคือมีค่าความนำไฟฟ้าน้อยมาก จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

2.3.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิก

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิก ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทำให้คุณสมบัติทางการนำไฟฟ้าดีขึ้น โดยการเติมอะตอมสารเจือ (Impurity atoms) ลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ และสามารถเลือกชนิดของอะตอมสารเจือ เพื่อกำหนดชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ โดยสามารถแบ่งประเภทของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิกได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type Semiconductor) ตามชนิดของพาหะในการนำไฟฟ้า กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) เป็นสารกึ่งตัวนำอินทรินซิกที่ถูกเติม สารเจือชนิดเอ็น เช่น การเติมอะตอมฟอสฟอรัสในซิลิคอนบริสุทธิ์ เป็นต้น คือเติมอะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor atom) ทำให้มีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่า โฮล ($n_0 \gg p_0$) อิเล็กตรอนจึงเป็นพาหะ ส่วนมากที่มีหน้าที่หลักในการนำไฟฟ้า ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี เป็นการเติมอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor atom) ซึ่งเป็นอะตอมธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ 3 ของตารางธาตุ เป็นการเติมอะตอมโบรอนในซิลิคอนบริสุทธิ์ทำให้ปริมาณโฮลมีมากกว่าอิเล็กตรอน ($p_0 \gg n_0$) ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะนำไฟฟ้าโดยโฮล ซึ่งแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก สำหรับการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของพาหะของ สารเอ็กทรินซิกจะเริ่มจากสมการ (2.12)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการความเป็นกลางทางไฟฟ้า (Charge Neutrality Equation) ดังแสดงในสมการที่ (2.13)

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

เมื่อพิจารณากรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ($N_A = 0$) 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 $N_D \gg n_i$

ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($N_D = 0$) ความหนาแน่นของโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก หาได้จากสมการ (2.15)

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

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

ดังนั้นสำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิกในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กมีข้อดีหลายประการ ข้อดีหนึ่งที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิกที่เหนือกว่าการใช้โลหะ คือ สามารถควบคุมความหนาแน่นของพาหะที่มีผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำ อีกทั้งยังสามารถเลือกพาหะในการนำไฟฟ้า เป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลจากการเติมสารเจือได้โดยปกติแล้วพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าพาหะที่เป็นโฮล ดังนั้นในทางไมโคร อิเล็กทรอนิกส์จึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีพาหะข้างมาก (majority carriers) เป็นอิเล็กตรอน มากกว่าการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีพาหะเป็นโฮล ซึ่งเคลื่อนที่ภายในชั้นสารได้ช้ากว่า และสำหรับสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็กทรินซิก ยังมีจุดเด่นที่เหนือกว่าสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ คือ โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะแปรผันกับฟังก์ชันอุณหภูมิอย่างมาก ซึ่งต่างจากกับสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกที่มีการเติมอะตอมสารเจือเข้าไปมากพอจนทำให้มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งกรณีที่น่าไปประดิษฐ์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณความหนาแน่นของพาหะ เมื่อมีการเจือสารปริมาณมากเพียงพอที่มีเสถียรภาพโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นเหตุผลเหล่านี้จึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก ในการประดิษฐ์เป็นวงจรรวมสำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็ก ถึงแม้รูปร่างลักษณะของชั้นสาร ปริมาณสารเจือและกระแสที่ป้อนให้กับชั้นสารมีผลต่อการตอบสนองของเซ็นเซอร์ก็ตาม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ ค่าความต้านทานของชั้นสาร ที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และพารามิเตอร์อื่นโดยตรง สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารปริมาณน้อย ๆ ทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น นั่นคือจำเป็นต้องใช้ปริมาณกระแสที่ไบอัสเพิ่มขึ้นด้วยตัวอย่างเช่นถ้าต้องการไบอัสกระแสระดับมิลลิแอมป์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนความต่างศักย์ในระดับร้อยโวลต์ ซึ่งตัวอย่างแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความต้านทานที่ขึ้นกับฟังก์ชันของสภาพความนำและรูปทรงของชั้นสาร และค่าความต้านทานของชั้นสารเป็นไปตามสมการ (2.16)

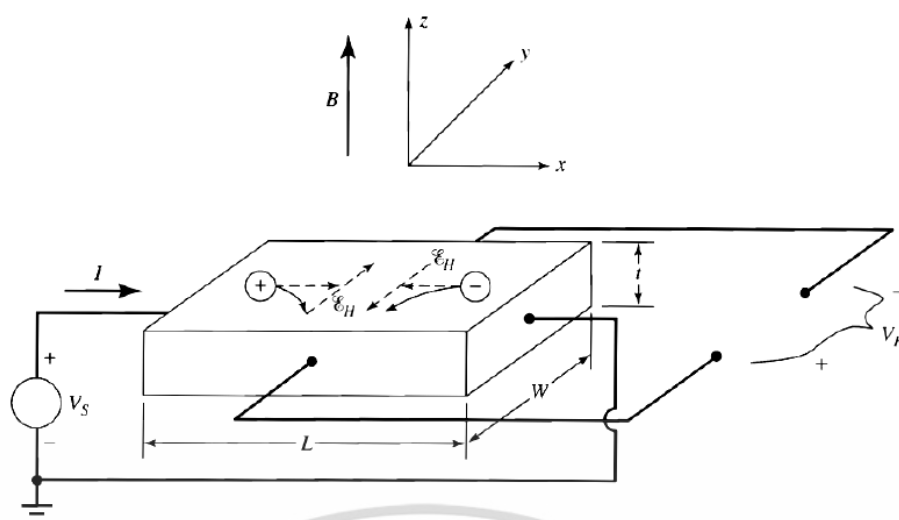
$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.16)$$

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

2.3.3 ปปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิค

ปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของแรงภายนอกกระทำกับจุดประจุ (Charge) ที่เคลื่อนที่โดยแรงที่กระทำนี้เนื่องจากสนามแม่เหล็ก โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของจุดประจุ เขียนได้ตามสมการ (2.3) โดยผลของเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นเกิดจาก Cross product ซึ่งปริมาณเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามทิศทางของมุมสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ตามฟังก์ชันไซน์ ผลของปรากฏการณ์ฮอลล์แสดงให้เห็นตามแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 2.6 สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมธาตุอื่น ซึ่งจะประกอบไปด้วยพาหะส่วนใหญ่หนึ่งชนิด ตามอะตอมธาตุสารเจือที่ใช้ โดยจะทำการพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือ พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนกับโฮล ดังรูปที่ 2.5

จากสมการ (2.3) แสดงให้เห็นถึงผลของกระแสต่อประจุพาหะโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสาร โดยมีแรงจากสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของประจุพาหะทั้งสอง ในสภาวะคงตัว ด้วยแรงจากสนามแม่เหล็กที่สมดุลนี้เป็นผลทำให้จุดประจุเคลื่อนที่อีกทิศทางหนึ่ง การกระจายตัวของพาหะจึงเปลี่ยนไป เกิดเป็นการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งขึ้น โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field; \mathcal{E}_H) [6]-[9] เมื่อทำการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของความกว้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ผลที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากพื้นผิวรอยสัมผัสตรงกันข้ามกันของชั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ขึ้นกับรูปแบบของชั้นสารและสนามแม่เหล็กที่กระทำเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์และความกว้างของชั้นสาร (W) ; $V_H = \mathcal{E}_H W$



รูปที่ 2.5 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

ในรูปที่ 2.5 กระแสที่ไหลในชิ้นสารแนวแกน x ที่เกิดจากความต่างศักย์ V_S เป็นผลทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกับกระแส ในกรณีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทางตรงกันข้าม โดยที่พาหะทั้งสองมีค่าประจุที่ต่างกันทำให้เกิดทิศของความเร็วที่ตรงกันข้าม เมื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสารในแนว $+z$ แรงแม่เหล็กกระทำกับประจุทั้งสองส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่เปียงเบนไปทิศเดียวกันในแนวแกน y แต่เนื่องจากค่าประจุทั้งสองตรงข้ามกัน ทำให้เกิดแรงดันที่มีขั้วต่างกัน เรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะข้างมากต่างชนิดกัน คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ทฤษฎีอย่างง่ายที่แสดงกลไกการเกิดดังรูปที่ 2.5 โดยแสดงให้เห็นการไบอัสกระแสให้กับชิ้นสารในแนวแกน x แล้วบ่อนสนามแม่เหล็กในแนวแกน z สนามไฟฟ้าฮอลล์ จะเกิดขึ้นในแนวแกน y ซึ่งกรณีที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศบวกส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสนามไฟฟ้าฮอลล์จะเกิดในทิศตรงกันข้าม เมื่อพิจารณากระแสพาหะจะทำให้เกิดความเร็วค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความเร็วดริฟท์ (v_d) โดยความเร็วดริฟท์จะสัมพันธ์กับขนาดของกระแสสำหรับพาหะที่เป็นโฮลแสดงดังสมการ (2.17)

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

สำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนจะได้

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

ดังนั้นสนามไฟฟ้าฮอลล์สามารถอธิบายในเทอมของกระแสและสนามแม่เหล็กสำหรับพาหะที่เป็นโฮลตามสมการ (2.19)

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

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนเขียนได้เป็น

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

ส่วนปริมาณของแรงสนามแม่เหล็กกับแรงสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เท่ากันเขียนได้ว่า

$$q\epsilon_H = qv_d B_{\perp} \quad (2.21)$$

เขียนใหม่ได้ว่า

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

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)

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

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

แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) ที่ได้ เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ (ϵ_H) และระยะความกว้างของชิ้นสาร (w) พิจารณาในเทอมของกระแสรวมได้ดังสมการ (2.25)

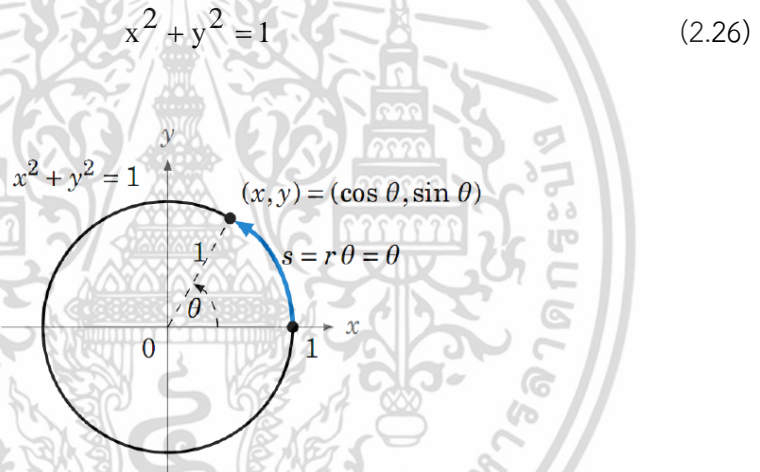
$$V_H = \frac{R_H I B_{\perp}}{t} \quad (2.25)$$

โดยที่ R_H ทำการวัดในหน่วย $m^3 c^{-1}$, I ในหน่วยแอมแปร์ (Ampere), B_{\perp} ในหน่วยเทสลา (Tesla), t ในหน่วยเมตร (Meter) และ V_H ในหน่วยโวลต์ (Voltage) จากสมการ (2.25) สำหรับสารกึ่งตัวนำใดๆ ที่ไม่ทราบชนิดสามารถทราบค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่สนามแม่เหล็กและกระแสค่าหนึ่งส่วนชนิดของพาหะและค่าความหนาแน่นของพาหะสามารถรู้ได้เมื่อทราบค่าของกระแสค่าสภาพความนำไฟฟ้าและค่าความ คล่องตัวของฮอลล์ ($\mu = \sigma \cdot |R_H|$) เพื่อใช้ในการคำนวณในสมการ (2.23) กับ (2.24)

2.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ

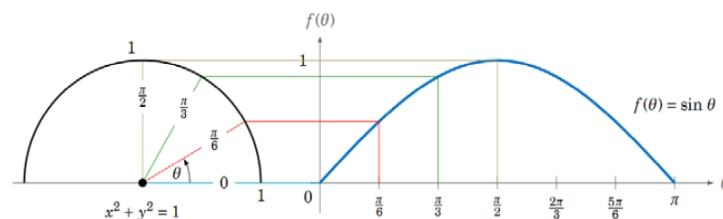
2.4.1 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

สำหรับฟังก์ชันตรีโกณมิติ [18] โดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x, y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย (Unit circle) ซึ่งรัศมีของวงกลมนี้มีค่าเป็นหนึ่งดังรูปที่ 2.6 โดยแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของจุดที่อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยซึ่งมีพิกัดเป็น $(x, y) = (\cos\theta, \sin\theta)$ โดยขึ้นกับมุมจากจุดกำเนิดกระทำกับแกน x สามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.26)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x, y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย

ดังนั้นจุดใดๆบนวงกลมหนึ่งหน่วยจะมีพิกัดในแกน y เป็น $\sin\theta$ สามารถเขียนพิกัดจุดบนวงกลมหนึ่งหน่วยสำหรับแนวแกนเป็นฟังก์ชันไซน์ $f(\theta) = \sin\theta$ ที่มุม $0 - \pi$ ดังรูปที่ 2.7

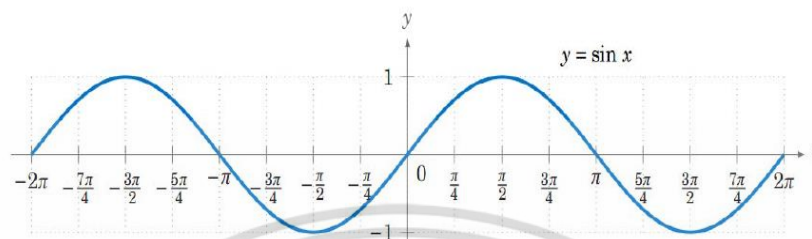


รูปที่ 2.7 กราฟฟังก์ชันไซน์สำหรับพิกัดจุด y บนวงกลมหนึ่งหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

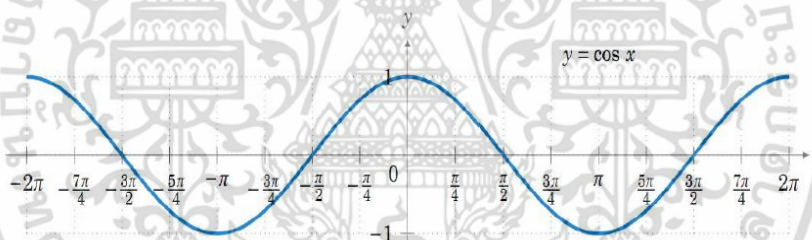
เมื่อทำการเขียนกราฟในระบบพิกัด (x, y) โดยให้แกน x แทนมุมที่กระทำอยู่ในช่วง $(-2\pi, 2\pi)$ แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (2.27)

$$y = \sin x \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \sin x$

สำหรับฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine Function) สามารถพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งของพิกัดในแนวแกน x รอบวงกลม โดยกราฟความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x, y) ของฟังก์ชันนี้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \cos x$

ซึ่งเป็นไปตามสมการของฟังก์ชันโคไซน์เขียนได้ว่า

$$y = \cos x \quad (2.28)$$

เมื่อนำสมการ (2.27) และ (2.28) แทนค่าลงในสมการ (2.26) จะได้ว่า

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (2.29)$$

จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 เห็นได้ชัดว่าที่ตำแหน่ง $\cos 0$ จะมีค่าเท่ากับ $\sin 90^\circ$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันไซน์กับฟังก์ชันโคไซน์มีความต่างเฟสกันอยู่ 90° โดยอธิบายความสัมพันธ์ได้ตามสมการ (2.30)

$$\cos x = \sin(x + 90^\circ) \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

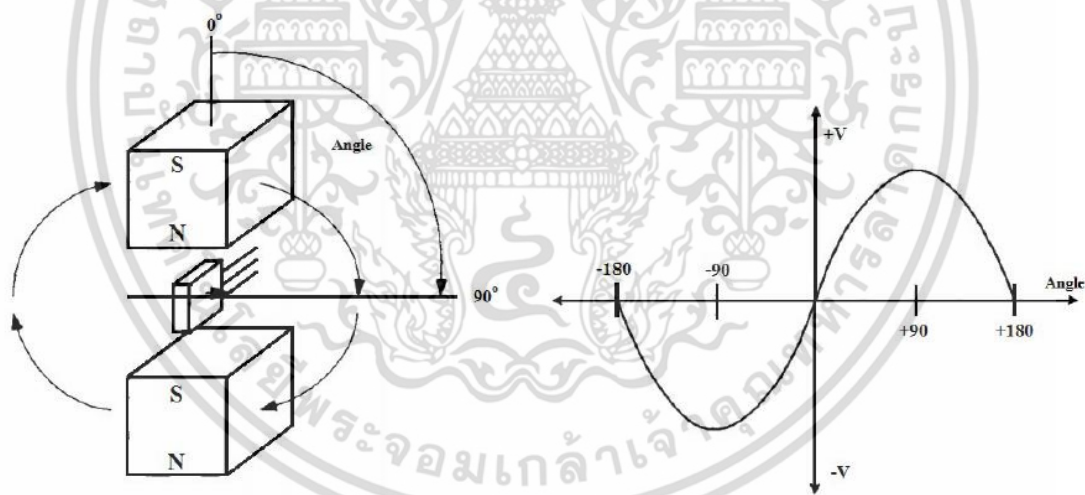
2.4.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ตามฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ผลของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อจุดประจุในสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นปริมาณเวกเตอร์แรงที่เกิดขึ้นนี้จะแปรผันตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุเป็น ฟังก์ชันไซน์ เมื่อทดลองการเปลี่ยนตำแหน่งโดยการหมุนสนามแม่เหล็กรอบหัววัดฮอลล์ที่อยู่ตำแหน่ง จุดศูนย์กลางของการหมุน ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ในมุมต่างๆพบว่าแรงดันไฟฟ้า ฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ดังสมการ (2.31)

$$V_{HI} = k_1 \sin\theta \quad (2.31)$$

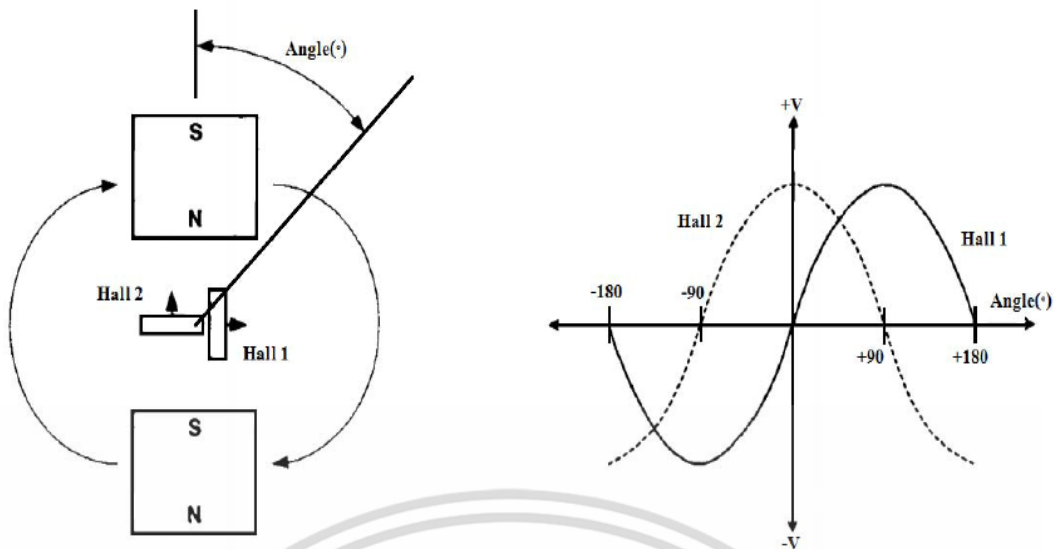
โดยค่า k_1 เป็นค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในระบบการวัด

เมื่อพิจารณาในรูป 2.10 แสดงการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เปลี่ยนเป็นมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำในวัสดุฮอลล์ ดังนั้นที่ตำแหน่งแรกคือที่ศูนย์กลางคาบวัสดุฮอลล์ถูกวางให้ด้านกระทำ (active area) ไว้ที่ตำแหน่งขนานกับแนวเส้นแรงสนามแม่เหล็กนั่นคือ เส้นแรงแม่เหล็กทำมุมศูนย์กลางกับวัสดุฮอลล์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้จึงมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งให้เส้นแรงแม่เหล็ก กระทำเป็นมุมตั้งฉาก (90°) กับวัสดุฮอลล์ ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นจะได้ค่าสูงสุด



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ

ในกรณีเมื่อนำฮอลล์เซนเซอร์สองตัวมาวางแนวตั้งฉากในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มเท่ากันมุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำตรงตำแหน่งแรกของฮอลล์เซนเซอร์ต่างกันที่ 90° ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเลื่อนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์

นั่นคือ เส้นแรงแม่เหล็กกระทำในฮอลล์เซนเซอร์ตัวแรกที่มีมุม 90° ส่วนฮอลล์เซนเซอร์ตัวที่สองทำมุม 0° จึงประมาณได้ว่าที่ตำแหน่งแรก ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เซนเซอร์ตัวที่หนึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ ดังสมการ (2.31) และค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เซนเซอร์ที่ตำแหน่งแรกของตัวที่สองเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ตามสมการ (2.32)

$$V_{H2} = k_2 \cos\theta \quad (2.32)$$

โดยที่ค่า k_2 เป็นค่าคงที่ของฮอลล์ตัวที่ 2

2.5 วงจรประมวลสัญญาณ

ออปแอมป์ (Operation Amplifier, Op-Amp) หรือวงจรขยายเชิงดำเนินการเป็นอุปกรณ์วงจรรวมหรือไอซี ประเภทเชิงเส้น (Linear Integrated Circuit) ซึ่งมีการนำไปใช้ในกาประยุกต์ต่างๆ อย่างกว้างขวาง ออปแอมป์ถูกออกแบบครั้งแรกในปี 1948 เพื่อช่วยปฏิบัติการด้านคณิตศาสตร์ในเครื่องอนาล็อกคอมพิวเตอร์ (Analog Computer) ตั้งนั้น จึงใช้ชื่อว่า Operational Amplifier ซึ่งหมายถึง วงจรขยายดำเนินการ นอกจากนี้ออปแอมป์ยังได้ ถูกนำไปใช้ในกาประยุกต์ต่าง ๆ มากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องจากเป็นวงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier) ที่มีอัตรา ขยายที่สูงมากและการออกแบบและวิเคราะห์วงจรที่ใช้ออปแอมป์ก็สามารถทำได้ง่าย งานประยุกต์ที่ใช้ออปแอมป์จะพบได้ในวงจรเครื่องวัด, วงจรแสดงผล และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการควบ คุมกระบวนการ, วงจรปรับสัญญาณ, วงจรสื่อสาร, ระบบเตือนภัย, วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์, ดานวิทยาศาสตร์ และในระบบคอมพิวเตอร์ เป็นต้นจะเห็นได้ว่าออปแอมป์ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงอาจเรียกออปแอมป์ได้วา เป็นวงจรขยายเชิงเส้นอเนกประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

วงจรขยายสัญญาณผลต่างดังรูปที่ 2.12 ใช้สำหรับหาผลต่างทางพีชคณิตของแรงดันสองชุดหรือผลต่างทางเวกเตอร์ (vector) ของสัญญาณอินพุตสองชุด [5] โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเท่ากับผลต่างของแรงดันอินพุตทั้งสองคูณด้วยอัตราขยายสัญญาณของวงจร ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าสามารถคำนวณหาได้โดยใช้วิธีวิเคราะห์แรงดันโหนด (node voltage analysis) ดังขั้นตอนต่อไปนี้

จากวงจรพิจารณาว่าออปแอมป์มีค่าอิมพีแดนซ์อินพุตสูงมากเป็นอนันต์ ทำให้กระแสที่ไหลเข้าขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ประมาณได้ว่ามีค่าน้อยมากหรือมีค่าประมาณศูนย์ ($I_{B+} = I_{B-} \cong 0$) ดังนั้นผลรวมกระแสที่โหนด A จึงเท่ากับ

$$\frac{V_1 - V_A}{R_1} = \frac{V_A - V_0}{R_2} \quad (2.33)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$V_A = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_1 + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_0 \quad (2.34)$$

เช่นเดียวกันจะได้ผลรวมกระแสที่โหนด B เท่ากับ

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

หรือ

$$V_B = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_2 \quad (2.36)$$

อาศัยคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ว่า $V_{OS} \cong 0$ หรือจะได้ $V_A = V_B$ นั่นคือสมการที่ (2.34) จึงเท่ากับสมการ (2.36) ทำให้ได้

$$\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_1 + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_0 = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_2 \quad (2.37)$$

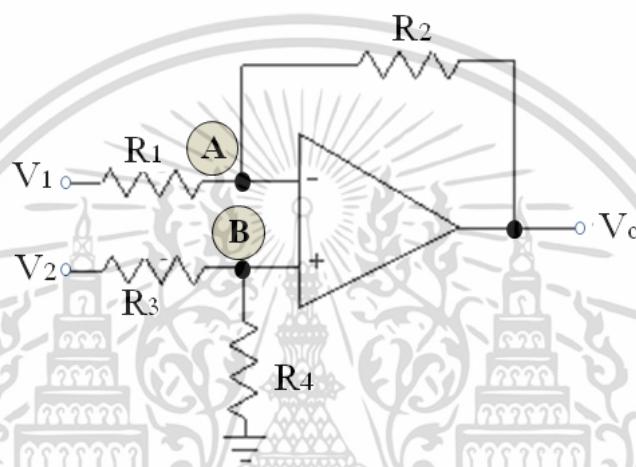
ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_0 = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_2 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) V_1 \quad (2.38)$$

โดยทั่วไปการใช้งานของวงจรจำเป็นต้องเลือกค่าตัวต้านทานในวงจรให้ $R_1 = R_3 = R_i$ และ $R_2 = R_4 = R_f$ ดังสมการที่ (2.34) จึงกลายเป็น

$$V_0 = \left(\frac{R_f}{R_i} \right) (V_2 - V_1) \quad (2.39)$$



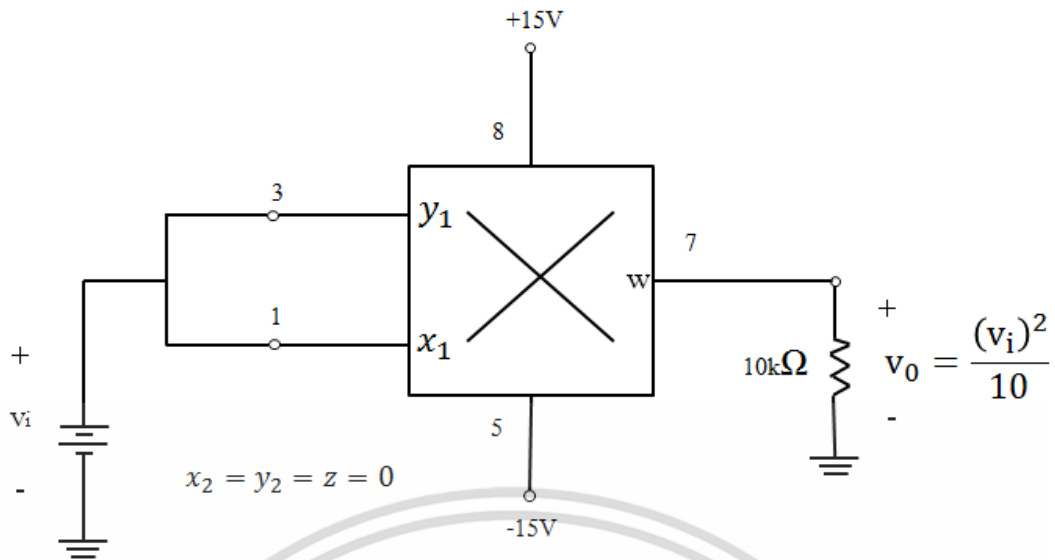
รูปที่ 2.12 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

2.5.2 วงจรกำลังสอง

วงจรคูณสัญญาณสามารถนำไปออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้ในการยกกำลังสองของแรงดันไฟตรงที่มีค่าเป็นบวกและลบได้ [5] ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งกระทำได้ง่ายโดยการป้อนแรงดันอินพุต V_i เข้าที่ขั้วอินพุต x_1 และ y_1 ทั้งสองของวงจрдังรูป 2.13 จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ

$$V_0 = \frac{x_1 y_1}{10} = \frac{V_i^2}{10} \quad (2.40)$$

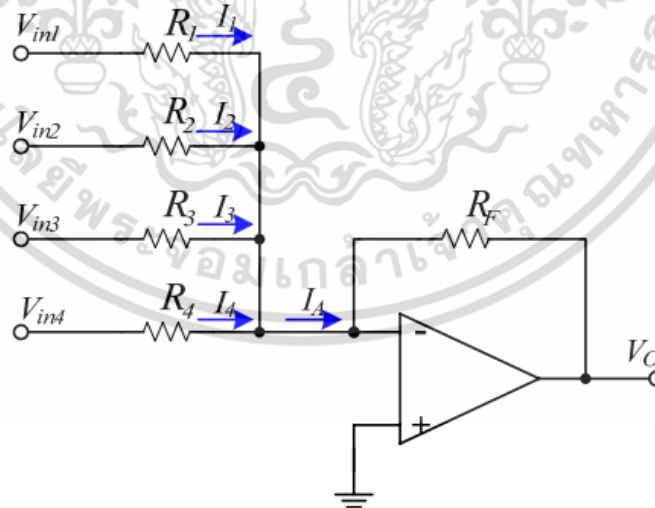
และเรียกวงจรลักษณะนี้ว่า “วงจรกำลังสอง (squaring circuit)”



รูปที่ 2.13 วงจรกำลังสอง

2.5.3 วงจรรวมสัญญาณ

วงจรรวมสัญญาณ คือ วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่มีหลายอินพุต [5] นั่นเอง โดยแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณนี้จะเกิดจากผลรวมของแรงดันอินพุตแต่ละตัวคูณด้วยอัตราขยายสัญญาณของอินพุตนั้นๆ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{in1}, V_{in2}, V_{in3}, V_{in4}$ กับ V_o ของวงจรดังรูปที่ 2.14 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหา V_o ได้ดังนี้



รูปที่ 2.14 วงจรรวมสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์

$$I_A = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (2.41)$$

และกฎของโอห์ม

$$I_1 = \frac{V_{in1}}{R_1}, I_2 = \frac{V_{in2}}{R_2}, I_3 = \frac{V_{in3}}{R_3}, I_4 = \frac{V_{in4}}{R_4} \quad (2.42)$$

และ

$$V_o = -R_F I_A \quad (2.43)$$

นำสมการที่ (2.42) แทนในสมการที่ (2.41) จะได้

$$I_A = \frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} + \frac{V_{in3}}{R_3} + \frac{V_{in4}}{R_4} \quad (2.44)$$

นำสมการที่ (2.44) แทนลงในสมการที่ (2.43) จะได้

$$V_o = -R_F \left(\frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} + \frac{V_{in3}}{R_3} + \frac{V_{in4}}{R_4} \right) \quad (2.45)$$

2.5.4 วงจรถอดราก็สอง

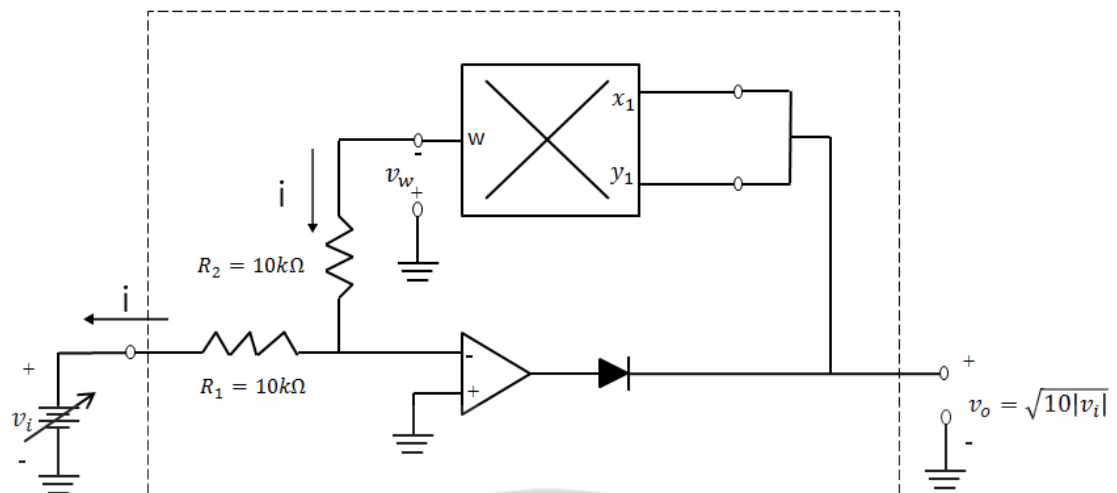
วงจรถอดราก็สองถูกดัดแปลงมาจากวงจรหารสัญญาณที่มีความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเป็นอัตราส่วนของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจร โดยการต่อขั้วอินพุต x_1 และ y_1 เข้ากับขั้วเอาต์พุตของออปแอมป์ [5] ดังแสดงในรูป 2.15

จากความสัมพันธ์

$$V_w = -V_i = \frac{V_o^2}{10} \quad (2.46)$$

เมื่อ V_i เป็นแหล่งจ่ายไฟลบแล้ว ทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรถอดราก็สอง V_o มีค่าเท่ากับ

$$V_o = \sqrt{10|V_i|} \quad (2.47)$$



รูปที่ 2.15 วงจรถอดรากที่สอง

ซึ่งพบว่าแรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจรมีค่าเท่ากับรากที่สองของสลับเท่าของแรงดันอินพุต V_i กรณีนี้แรงดันอินพุต V_i ของวงจรจำเป็นต้องมีค่าเป็นลบเสมอ หากไม่เป็นลบจะทำให้ออปแอมป์เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวขณะที่ไดโอดทางด้านเอาต์พุตของออปแอมป์ต่อไว้เพื่อป้องกันออปแอมป์เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวในกรณีที่ V_i มีค่าเป็นบวก กล่าวคือเมื่อ V_i เป็นบวก ไดโอดจะถูกไบอัสกลับ (reverse bias) ทำให้หยุดนำกระแส เปิดวงจรทางด้านเอาต์พุตของออปแอมป์

บทที่ 3

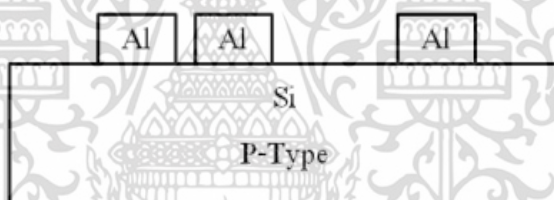
วิธีการออกแบบระบบการวัดและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อหลักสำหรับงานวิจัย เริ่มต้นจากสมบัติทางโครงสร้างและการต่อใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ แล้วทำการทดสอบสมบัติสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กตลอดจนการเลือกใช้หัววัด และทำการออกแบบระบบการประมวลผลแบบอนาล็อกสำหรับการประยุกต์ใช้งานพร้อมกับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม

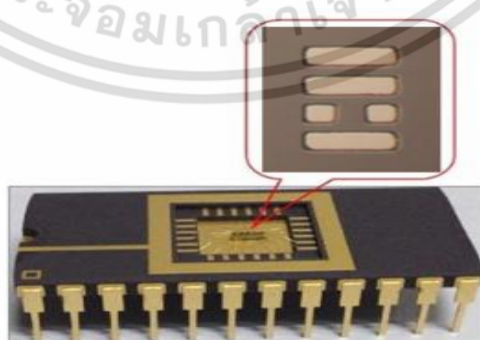
3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.1.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติ

โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติทำการออกแบบขึ้นเพื่อให้มี สมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางด้วยโครงสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อนซึ่ง โครงสร้างของหัววัดฮอลล์ถูกสร้างด้วยกระบวนการสร้างบนเทคโนโลยีซิลิคอนที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) โดยใช้เทคนิคสปีเตอร์ริงสร้างรอยต่ออะลูมิเนียมแบบโอห์มมิคบนฐานรองซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า 20-30 โอห์ม-เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



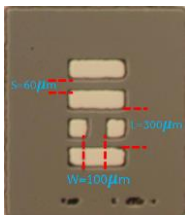
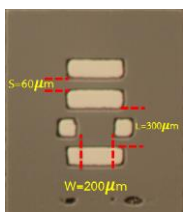
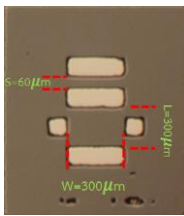
รูปที่ 3.1 รูปตัดขวางของหัววัดฮอลล์สองมิติ



รูปที่ 3.2 หัววัดฮอลล์สองมิติ

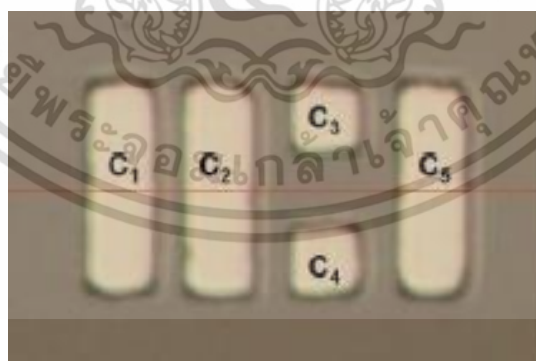
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติทั้ง 3 โครงสร้าง

ลักษณะเฉพาะและค่าพารามิเตอร์ของแต่ละโครงสร้าง			
สภาพความต้านทาน	20-30Ω-cm	20-30Ω-cm	20-30Ω-cm
ความยาว (L)	300 µm	300 µm	300 µm
ความกว้าง (W)	100 µm	200 µm	300 µm
ระยะห่าง (S)	60 µm	60 µm	60 µm

ในการทดลองเลือกใช้หัววัดฮอลล์สองมิติที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบค่าการตอบสนองของแต่ละโครงสร้าง โดยในแต่ละโครงสร้างมีระยะห่างระหว่างขั้ว C_3 กับ C_4 ที่แตกต่างกัน แต่มีระยะห่างระหว่างขั้ว C_1 กับ C_2 ค่าความยาว (S) และระยะห่างระหว่างขั้ว C_2 กับ C_5 ค่าระยะยาว (L) คือ 60 µm และ 300 µm ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3.1

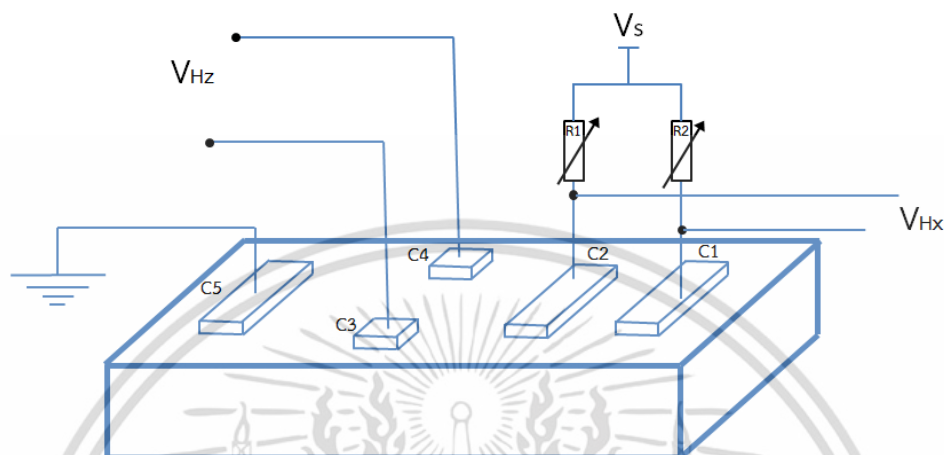
แผ่นฟิล์มอะลูมิเนียมบางถูกกัดเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโหนดมิก 5 ขั้ว ประกอบด้วยขั้ว C_1 , C_2 , C_3 , C_4 และ C_5 ซึ่งขั้ว C_1 , C_2 และ C_5 ใช้สำหรับจ่ายกระแส ขั้ว C_3 กับ C_4 ใช้สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก โดยขั้ว C_1 กับ C_2 เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศขนาน แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งมีพื้นที่ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก $600 \times 300 \mu\text{m}^2$ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.1.2 หลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติ

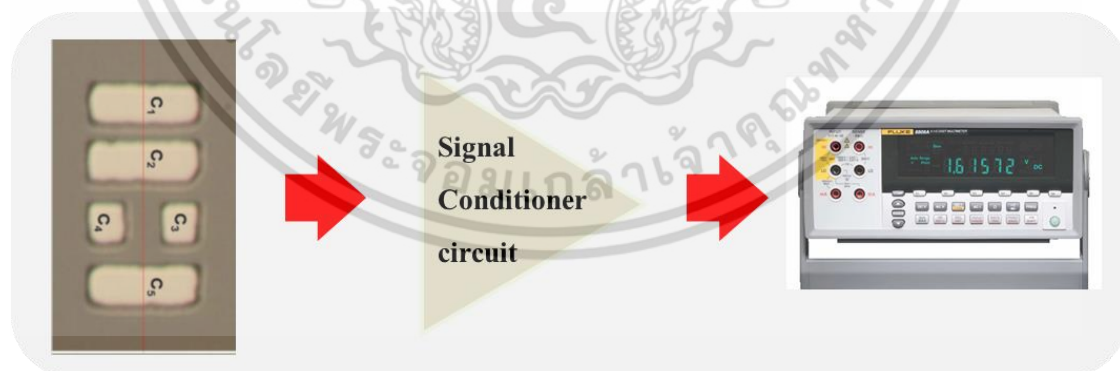
สำหรับการต่อใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ จะทำการจ่ายกระแสที่ขั้วไฟฟ้า C_1 กับ C_2 ไปยัง C_5 โดยผ่านตัวต้านทาน R_1 และ R_2 โดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศตั้งฉาก (V_{Hz}) ระหว่างขั้ว C_3 และ C_4 และวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hx}) ระหว่างขั้ว C_1 และ C_2 สำหรับสนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดฮอลล์สองมิติในทิศขนาน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.2 การออกแบบระบบการวัดฮอลล์สองมิติโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

ระบบการสร้างชุดทดลองการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลักสามส่วนคือ ระบบชุดวัด ระบบประมวลสัญญาณ และส่วนแสดงผล



รูปที่ 3.5 ระบบการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ระบบชุดวัดสนามแม่เหล็ก

สำหรับระบบชุดวัดสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง มีส่วนประกอบสำคัญคือ หัววัดฮอลล์สองมิติ เครื่องจ่ายสนามแม่เหล็ก (Electromagnet) ที่สามารถให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด 5000 เกาส์ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุดระบบวัดสนามแม่เหล็ก

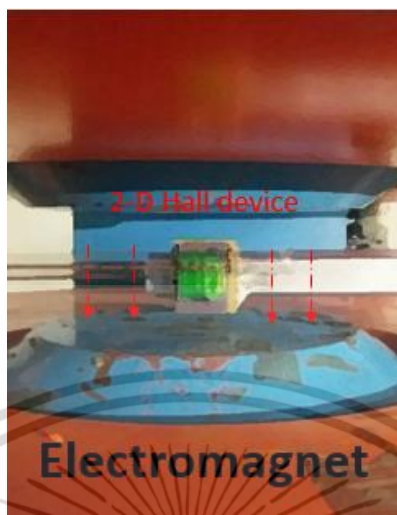
โดยทำการวัดค่าการตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กสองทิศทางคือ ทิศตั้งฉาก และทิศขนาน ซึ่งการวัดค่าการตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

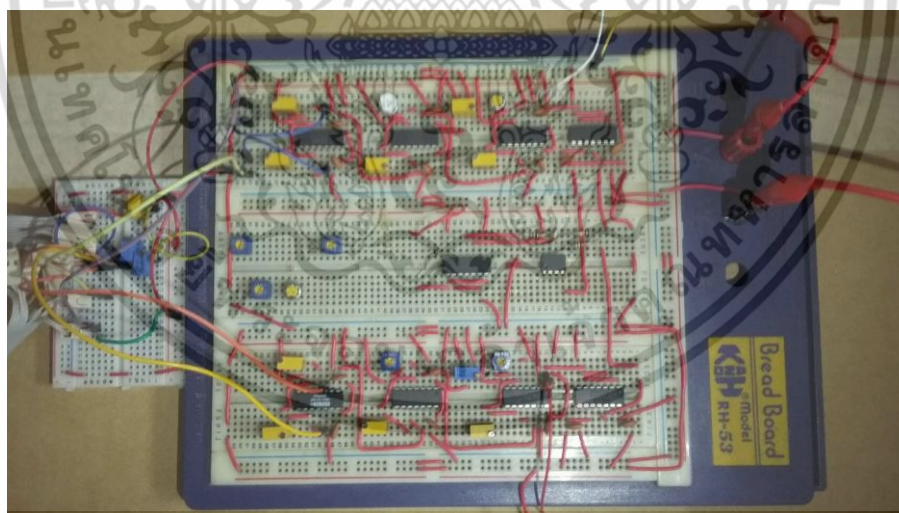
และการวัดค่าการตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในทิศขนานแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศขนาน

3.2.2 ระบบประมวลสัญญาณ

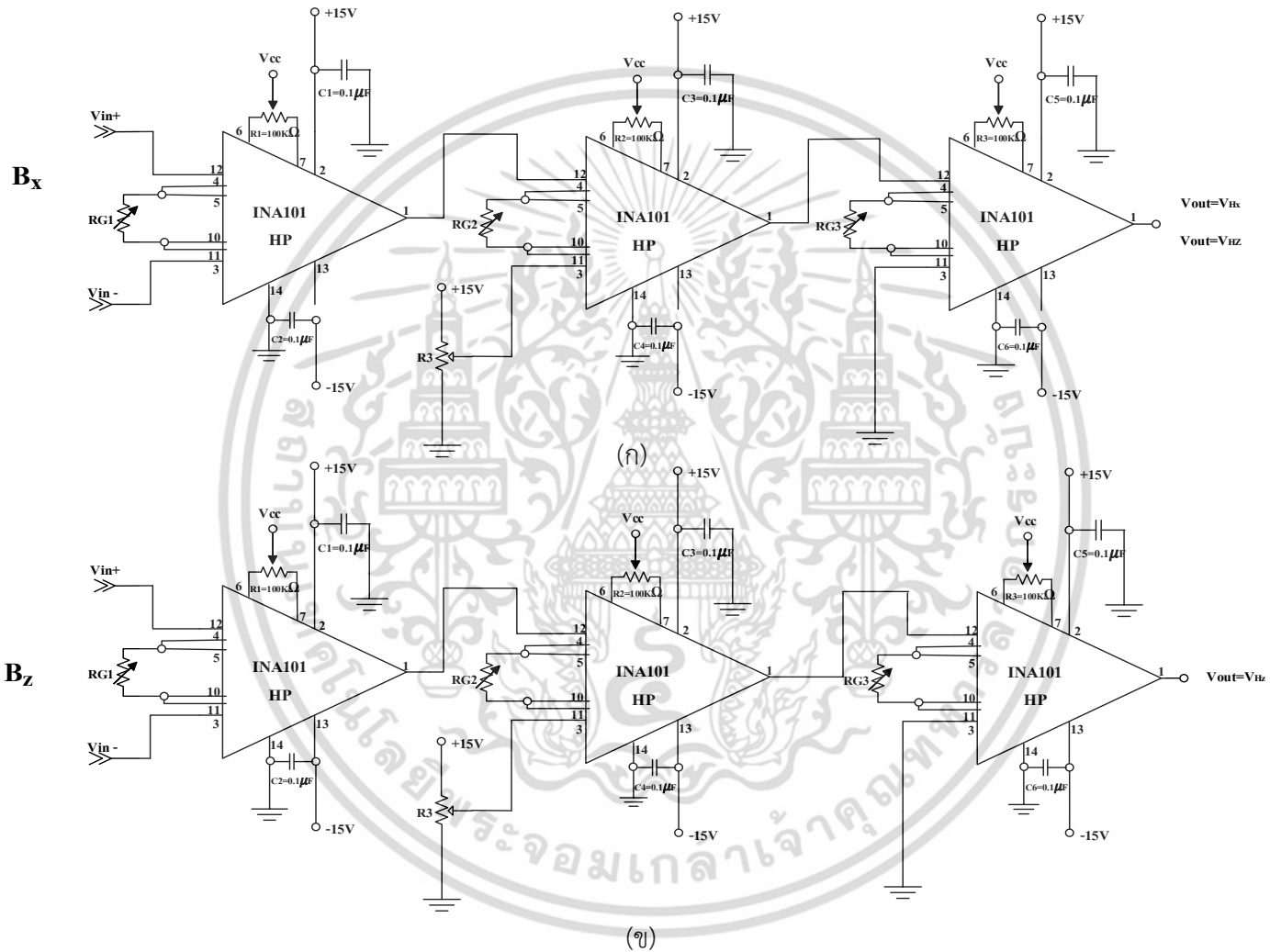
ระบบประมวลสัญญาณเป็นส่วนที่ออกแบบขึ้นเพื่อทำการปรับแต่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งชุดประมวลสัญญาณที่ออกแบบขึ้น แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.) ระบบขยายสัญญาณ 2.) ระบบคำนวณสัญญาณเชิงอนุภาค แสดงดังรูปที่ 3.9, 3.10 และ 3.11



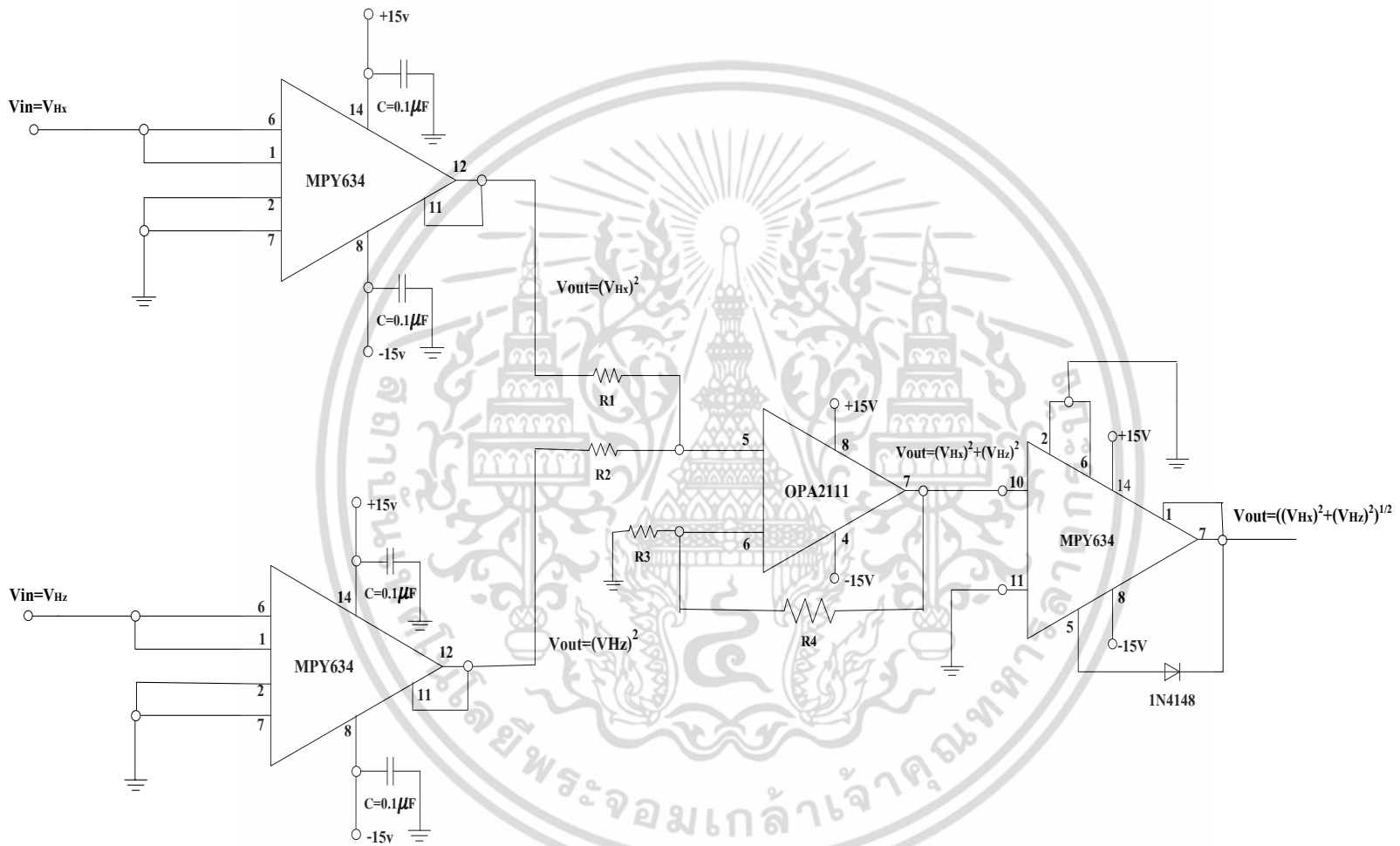
รูปที่ 3.9 วงจรประมวลสัญญาณ

จากรูปที่ 3.9 เป็นบอร์ดรวมวงจรประมวลสัญญาณทั้งหมดโดยมีชุดวงจรขยายสัญญาณและชุดวงจรคำนวณสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ที่มีสนามแม่เหล็กกระทำในทิศตั้งฉากและขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณ (ก)วงจรขยายสัญญาณทิศขนาน (ข)วงจรขยายสัญญาณทิศตั้งฉาก



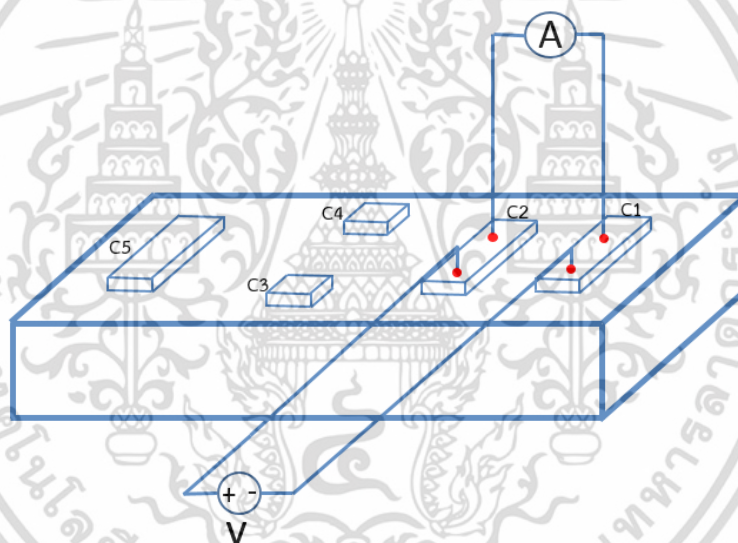
รูปที่ 3.11 วงจรคำนวณสัญญาณแบบอนาลอก

3.3 การทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติ

การสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติ สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงคือสมบัติเฉพาะ และขีดความสามารถ ข้อจำกัดของหัววัด เพื่อที่จะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างถูกต้อง จึงมีการทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติทั้งทางไฟฟ้าและสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

3.3.1 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์สองมิติ

การทดสอบสมบัติทางด้านไฟฟ้า จะทำการทดสอบเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างรอยสัมผัสขั้วโลหะนำไฟฟ้าและฐานรองซิลิกอนชนิด พี โดยในการทดสอบนี้จะทำการวัดความเป็นโอห์มมิกของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกที่ดีนั้นจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ และการไหลของกระแสผ่านบริเวณรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกจะต้องเกิดแรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัสเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับแรงดันตกคร่อมในส่วนที่เป็นบริเวณแอกทีฟของอุปกรณ์ และกระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัสของชั้นสารจะต้องมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า จึงจะถือว่าเป็นลักษณะของรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกที่ดี



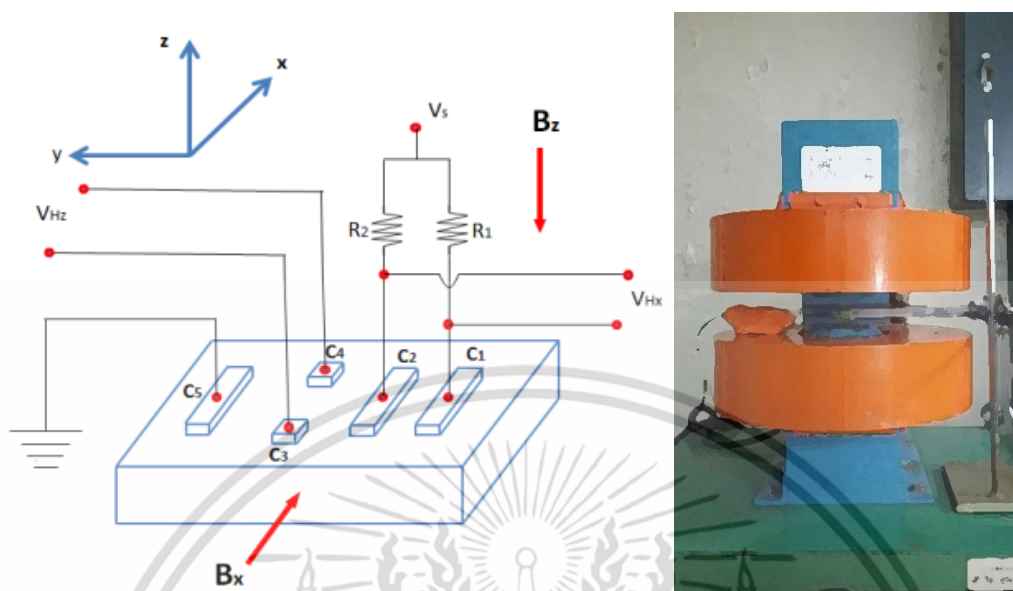
รูปที่ 3.12 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์สองมิติ

ในการทดลองจะทำการทดลองที่ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 4 กรณีย โดยทำการทดลองเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าจาก -2 ถึง 2 V ที่ขั้วไฟฟ้า C_1 กับ C_2 และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จากนั้นทำการวัดด้วยเงื่อนไขเดิมระหว่างขั้ว C_3 กับ C_4 , C_2 กับ C_5 และ C_1 กับ C_5 ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งข้อมูลกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ถึงความ เป็นโอห์มมิกต่อไป

3.3.2 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ

สมบัติความไว (Sensitivity) ของหัววัดฮอลล์สองมิติเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่บอกถึงความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งในการทดลองจะทำ

การทดสอบสมบัติการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ ทั้งในทิศตั้งฉากและขนาน จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของทั้งสองทิศทางมาขยายสัญญาณด้วยวงจรถยาย

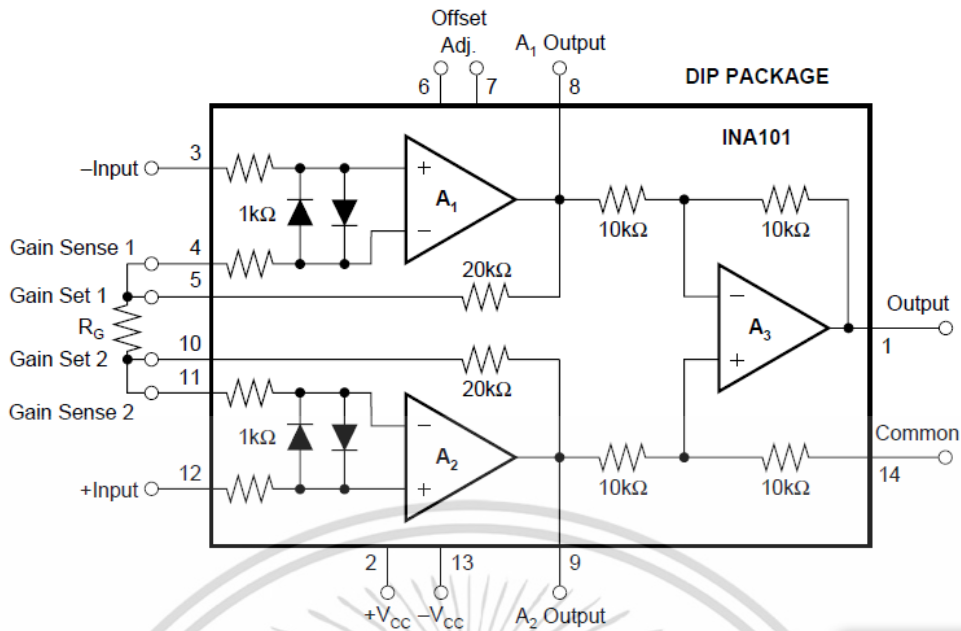


รูปที่ 3.13 การวัดสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ

ในการทดลองจะพิจารณาการตอบสนองสมบัติทางแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ได้ ออกแบบขึ้น โดยในการทดลองหัววัดฮอลล์สองมิติที่ตั้งอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง -5000 ถึง 5000 เกาส์ ของสองทิศทางคือ สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉาก (B_z) และที่สนามแม่เหล็กมีทิศขนาน (B_x) กับหัววัดฮอลล์สองมิติ ซึ่งมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง -5000 ถึง $5,000$ เกาส์ ในขั้นแรกพิจารณาทิศทางของสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์สองมิติโดยกระแสที่จ่ายมีค่าเท่ากับ 0.5 mA และ 1 mA จ่ายเข้าที่ขั้ว C_1, C_2 ไปยัง C_5 ผ่านด้านทานสองตัวที่เชื่อมต่อกับ C_1 และ C_2 โดยการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กตั้งฉากจะถูกวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตกคร่อมขั้ว C_3 , กับ C_4 จากนั้นทำการทดสอบการตอบสนองในทิศของสนามแม่เหล็กจะมีทิศขนาน (B_x) กับหัววัดฮอลล์สองมิติ แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า C_1 กับ C_2 แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.13

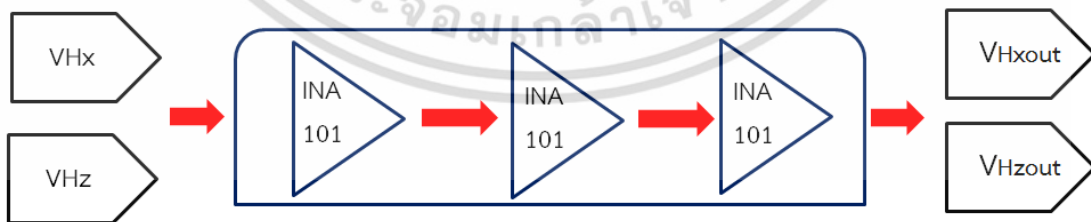
3.3.3 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ผ่านวงจรถยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

สำหรับในการทดลองนี้ จะเป็นการนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทั้งสองทิศทาง มาทำการขยายสัญญาณด้วยวงจรถยายสัญญาณ โดยวงจรถยายสัญญาณที่ใช้เป็นวงจรถยายแบบอินสตรูเมนต์เพื่อทำการขยายผลต่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กทั้งสองทิศทางของหัววัดฮอลล์สองมิติให้เห็นสัญญาณความแตกต่างที่ชัดเจนขึ้น รวมถึงการปรับค่าออฟเซตของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งกระแสที่จ่ายให้กับหัววัดฮอลล์สองมิติมีค่าที่ 1 mA ภายใต้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจาก -5000 ถึง 5000 เกาส์



รูปที่ 3.14 ไอซีอินสตรูเมนต์ในวงจรรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ INA101

ในการทดลองเลือกวงจรรวมของวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์ โดยใช้ไอซีเบอร์ INA101 จำนวน 6 ตัว สำหรับการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ แสดงโครงสร้างของไอซีดังรูปที่ 3.14 ซึ่งได้ทำการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ไว้สองชุด เพื่อทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งทิศสนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดในทิศตั้งฉากและทิศขนาน แสดงดังรูปที่ 3.15 โดยทำการปรับอัตราขยายที่มีค่าประมาณ 1,500 เท่า สำหรับการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (Bz) และสำหรับการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดในทิศขนาน (Bx) กับสนามแม่เหล็กมีค่าอัตราการขยายประมาณ 6,500 เท่า เพื่อให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์ทั้งสองทิศทางให้มีค่าแอมพลิจูดเท่ากัน ($k_1=k_2$) และเหมาะสมกับการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 3.15 การต่อวงจรรขยายอินสตรูเมนต์โดยใช้ไอซีเบอร์ INA101

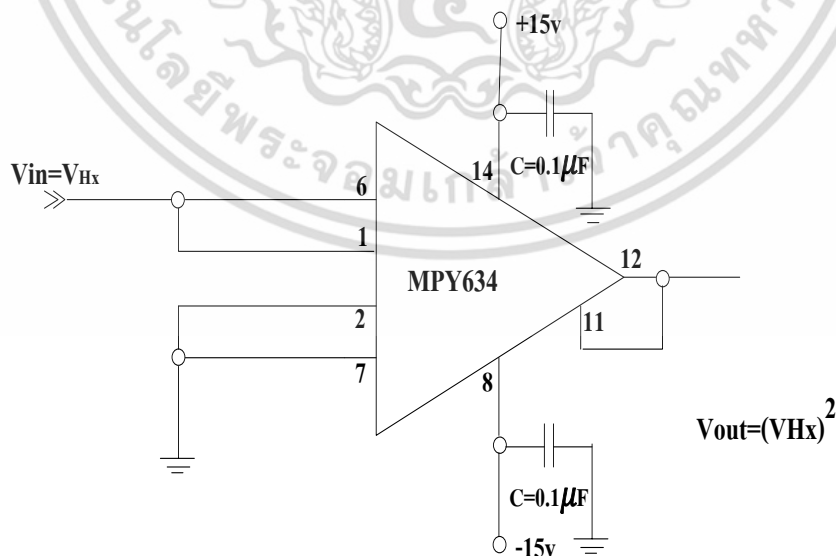
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ผ่าน วงจรคำนวณสัญญาณอนาล็อก

สำหรับการทดลองนี้จะทำการนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกขยายสัญญาณในทั้งสองทิศทางของการตอบสนองแล้วมาคำนวณด้วยวงจรคำนวณสัญญาณเชิงอนาล็อก เพื่อทำการคำนวณสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สำหรับการประยุกต์ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยผ่านวงจรรยกกำลังสอง วงจรรวมสัญญาณ และวงจรถอดราก็สอง ซึ่งอาศัยหลักการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ของตรีโกณมิติ $V_H = \sqrt{V_{HZ}^2 + V_{HX}^2}$ ในการคำนวณ

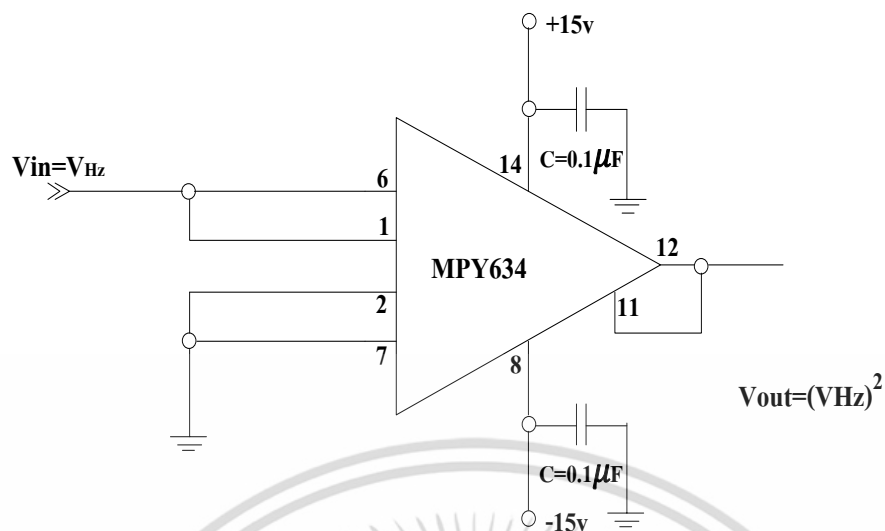
3.3.4.1 วงจรรยกกำลังสอง

การทดลองนี้จะเป็นการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรรขยาย เป็นอินพุตของวงจรรยกกำลังสอง เพื่อทำการยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองทิศทางในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยใช้ไอซีอนาล็อกมัลติพลาย เบอร์ MPY634KP เพื่อทำการยกกำลังสองสัญญาณ ซึ่ง MPY634KP เป็นวงจรรวมสัญญาณอนาล็อกสี่ควอดแดรนต์ (quadrant) โดยให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนกับผลคูณของแรงดันอินพุตทั้งสอง มีค่าอิมพีแดนซ์อินพุตสูงมาก ความแม่นยำสูง และมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่กว้าง มีฟังก์ชันการใช้งานได้หลากหลายทั้งยกกำลังสองสัญญาณ ถอดราก็สองสัญญาณ และต่อใช้งานได้อย่างง่าย ซึ่งการต่อใช้งานสำหรับการยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งในทิศทาง (V_{Hx}) และทิศตั้งฉาก (V_{HZ}) จะทำการออกแบบเป็น 2 ชุด แสดงดังรูปที่ 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่ใช้มีค่าประมาณ ±15V ดังนั้นแรงดันอินพุตของวงจรรที่ป้อนเข้าทางขาอินพุตทั้งสองนั้นควรมีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน +10V หรือ -10V เทียบกราวด์ ดังนั้นเอาต์พุตของวงจรรจึงสามารถแปรค่าได้ไม่เกิน ±10V และทำให้ค่าเพคเตอร์การคูณของวงจรรวมซึ่งมีค่าเป็นส่วนกลับของแรงดันเอาต์พุตสูงสุด หรือมีค่าประมาณ 1/10V จึงทำให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ $V_o = \frac{V_i^2}{10}$



รูปที่ 3.16 วงจรรยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วงจรรยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทิศตั้งฉาก

ซึ่งครั้งแรกจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรรยกกำลังสอง ในทิศที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศขนานดังรูปที่ 3.18 (ก) จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรรยกกำลังสอง ที่สนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดในทิศตั้งฉากดังรูปที่ 3.18 (ข)



(ก)



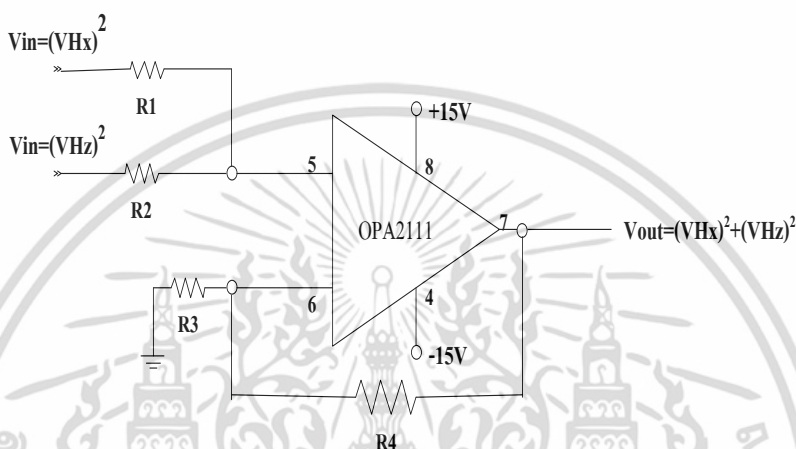
(ข)

รูปที่ 3.18 ลักษณะการวัดค่าการตอบสนองเมื่อผ่านวงจรรยกกำลังสองในทั้งสองทิศทาง
 (ก) ลักษณะการวัดค่าการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศขนาน
 (ข) ลักษณะการวัดค่าการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.2 วงจรรวมสัญญาณ

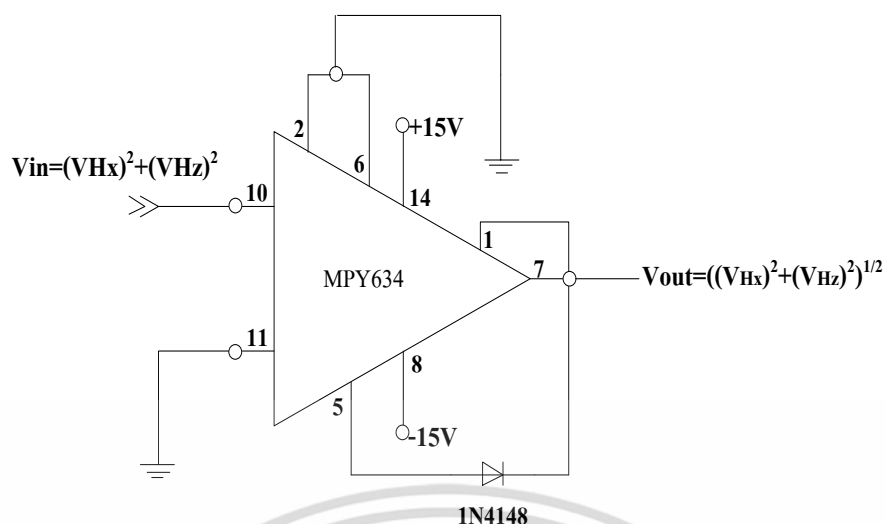
ในการทดลองนี้จะเป็นการรวมเอาสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำการยกกำลังสองสัญญาณทั้งในทิศตั้งฉาก (V_{HZ}^2) และทิศขนาน (V_{HX}^2) แล้วเข้าสู่วงจรบวกสัญญาณ เพื่อที่จะทำการรวมเอาสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกยกกำลังสองแล้วในทั้งสองทิศทางการตอบสนองรวมเข้าด้วยกัน เอาท์พุทคือ ($V_{HX}^2 + V_{HZ}^2$) โดยใช้ไอซี เบอร์ OPA2111KP ที่มีสัญญาณรบกวนที่ต่ำ และใช้กระแสในการไบอัสต่ำ มีความแม่นยำสูงเหมาะสำหรับการนำมาใช้งานในการรวมสัญญาณ ซึ่งมีลักษณะการต่อใช้งานดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรบวกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

3.3.4.3 วงจรถอดรากที่สอง

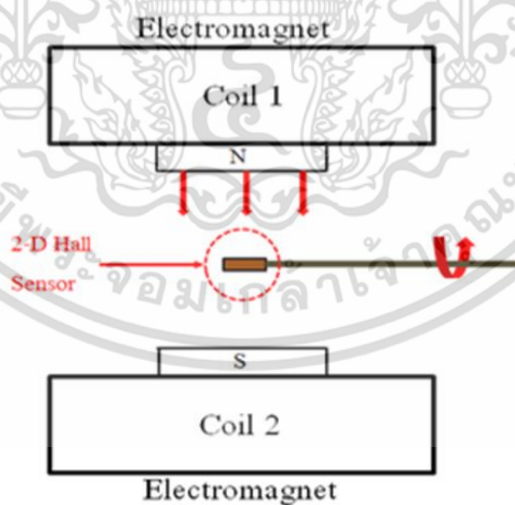
สำหรับในการทดลองนี้จะเป็นการถอดรากที่สองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ โดยการนำเอาสัญญาณแรงดันเอาท์พุททั้งในทิศตั้งฉาก (V_{HZ}) และทิศขนาน (V_{HX}) ที่ได้ผ่านวงจรยกกำลังสอง และวงจรรวมสัญญาณแล้ว มาทำการถอดรากที่สองสัญญาณแรงดันด้วยวงจรถอดรากที่สอง โดยใช้ไอซีเบอร์ MPY634KP ที่มีความแม่นยำสูง และมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่กว้างมีฟังก์ชันการใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งมีลักษณะการต่อใช้งานดังรูปที่ 3.20 พบว่าแรงดันเอาท์พุท V_O ของวงจรมีค่าเท่ากับรากที่สองของลิบเท่าของแรงดันอินพุท V_i กรณีนี้แรงดันอินพุท (V_{HX})² + (V_{HZ})² ของวงจรถูกจำเป็นต้องมีค่าเป็นลบเสมอ หากไม่เป็นลบจะทำให้ออปแอมป์เข้าสู่ภาวะอิ่มตัวขณะที่ไดโอดทางด้านเอาท์พุทของออปแอมป์ต่อไว้เพื่อป้องกันออปแอมป์เข้าสู่ภาวะอิ่มตัวในกรณีที่ V_i มีค่าเป็นบวก กล่าวคือเมื่อ V_i เป็นบวก ไดโอดจะถูกไบอัสกลับ (reverse bias) ทำให้หยุดนำกระแส เปิดวงจรทางด้านเอาท์พุทของออปแอมป์



รูปที่ 3.20 วงจรถอดรากที่สองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

3.4 การทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

ในการทดลองนี้ จะเป็นการวัดค่าการตอบของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยจะทำการหมุนหัววัดฮอลล์สองมิติ ที่มุม 0, 30, 60, 90, 120, 150, และ 180 องศา ภายใต้ค่าสนามแม่เหล็กคงที่ ที่ 0, 1000, 2000, 3000, 4000, และ 5000 เกาส์ ตามลำดับ โดยผ่านวงจรประมวลสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อแสดงให้เห็นว่ามุมที่สนามแม่เหล็กมากระทำต่อหัววัดฮอลล์สองมิติ ไม่ส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่วัดได้ ซึ่งในทุกๆ มุมจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เท่ากัน



รูปที่ 3.21 การวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของฮอลล์สองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความแม่นยำของวิธีการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางกับเครื่องมือมาตรฐาน

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คองที แล้วทำการแก้สมการเส้นตรง เพื่อหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ โดยทำการสอบเทียบระหว่างระบบที่ได้สร้างขึ้นกับเครื่องมือวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมาตรฐานอ้างอิง (BELL-5170) แสดงในรูปของความแม่นยำในช่วงของการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งช่วงการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ที่ 0-5000 เกาส์ ใช้เทคนิคการสอบเทียบแบบ 5 จุด โดยให้สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดฮอลล์สองมิติและเครื่องมือมาตรฐานที่มุม 90 องศา ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการวัดนั้นจะทำการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงค่าความแม่นยำของระบบวัดเทียบกับเครื่องมือวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมาตรฐานอ้างอิงโดยทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำดังสมการ

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

โดยที่ Deviation คือ ค่าที่วัดได้ลบด้วยค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดค่ามาตรฐานอ้างอิง
Span คือ ค่าช่วงของการวัด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

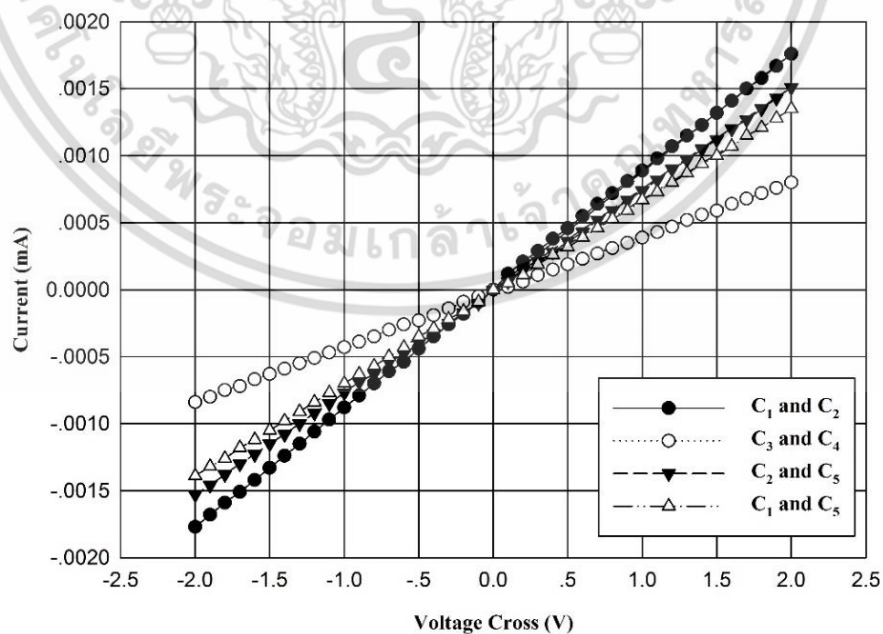
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสมบัติหัววัดฮอลล์สองมิติและการทดสอบเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของหัววัดฮอลล์สองมิติ เพื่อเป็นแนวทางนำไปสู่กระบวนการแก้ปัญหาในการวัดสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุมให้สามารถวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้

4.1 ผลการทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติ

สำหรับการออกแบบระบบที่จะทดสอบการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิตินั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ถึงหลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติและคุณสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติ ดังนั้นการทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติจึงมีความสำคัญในการออกแบบระบบการวัด เพื่อให้การวัดมีความแม่นยำและถูกต้องมากที่สุด

4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์สองมิติ

ในขั้นตอนแรกทำการทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิคของขั้วไฟฟ้าสำหรับหัววัดฮอลล์สองมิติ โดยการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าจาก -2 ถึง 2 V ที่ตกคร่อมขั้ว C_1 กับ C_2 แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C_3 กับ C_4 , C_2 กับ C_5 และ C_1 กับ C_5 แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง



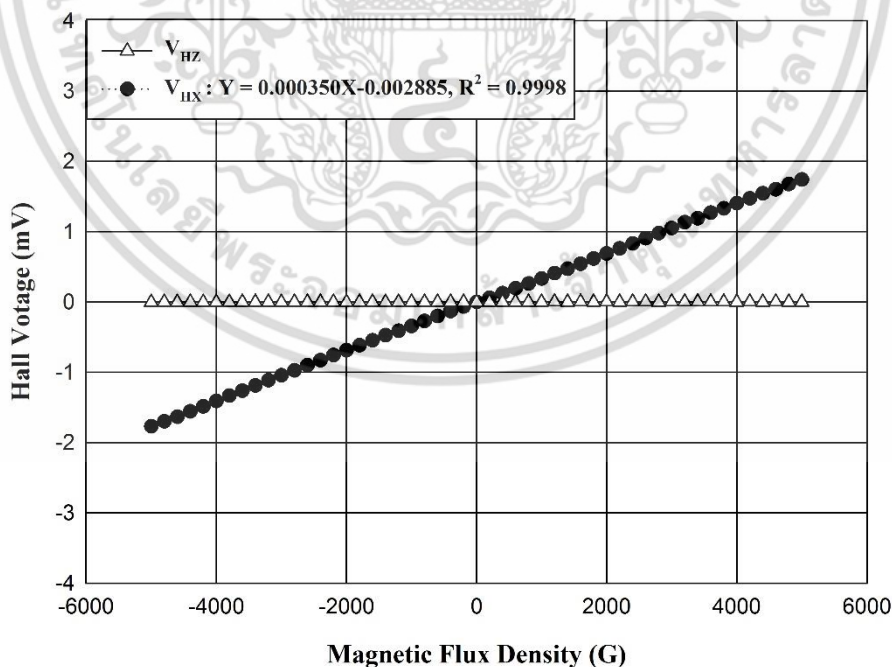
รูปที่ 4.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 ขั้ว พบว่ามีค่าความเป็นเชิงเส้นซึ่งสามารถยืนยันผลได้อย่างชัดเจนว่ารอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำของหัววัดฮอลล์สองมิติเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้

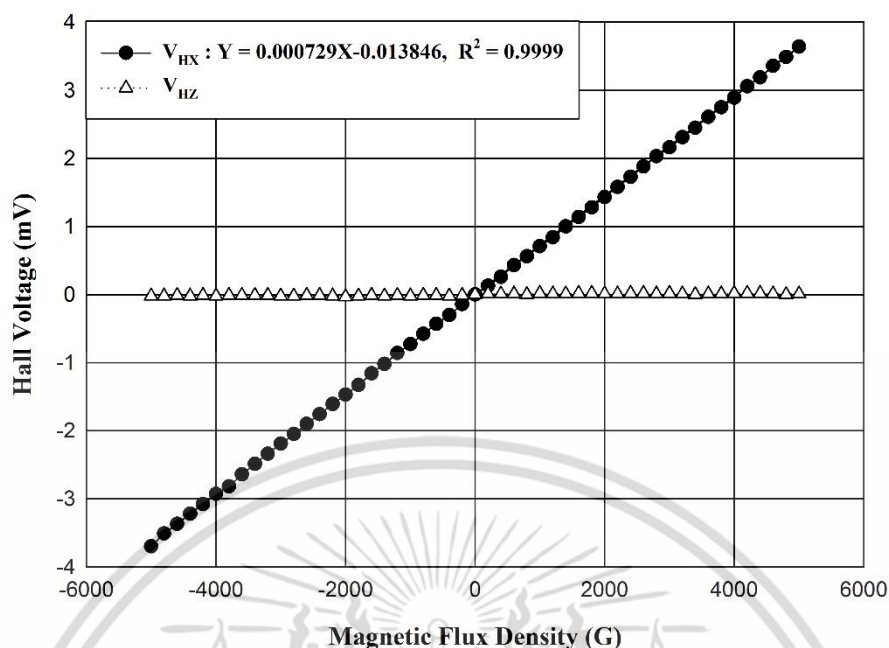
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ

ในการทดสอบสมบัติการตอบสนองของหัววัดจะทำการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติทั้งสองทิศทางที่สนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดฮอลล์สองมิติคือ ในแนวตั้งฉากและแนวขนาน โดยในการทดลองเลือกใช้หัววัดฮอลล์สองมิติสามโครงสร้างที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือ โครงสร้างที่ 1 มีค่า $W = 100 \mu\text{m}$ โครงสร้างที่ 2 มีค่า $W = 200 \mu\text{m}$ และโครงสร้างที่ 3 มีค่า $W = 300 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งทำการทดสอบหาความไวในการตอบสนองของหัววัดในแต่ละโครงสร้างโดยการจ่ายกระแสคงที่ 0.5 mA แล้วปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยการเพิ่มกระแสให้กับ อิเล็กโตรแมกเนต ที่สามารถให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง $-5,000$ ถึง $5,000$ เกาส์ และเปลี่ยนค่ากระแสเป็น 1 mA เพื่อเปรียบเทียบค่ากระแสทั้งสองค่า โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของแต่ละโครงสร้างเพื่อที่จะนำโครงสร้างที่มีค่าความไวในการตอบสนองสูงที่สุดไปทำการประยุกต์ใช้ในการวัดต่อไป ซึ่งผลการทดลองสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กโดยแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13



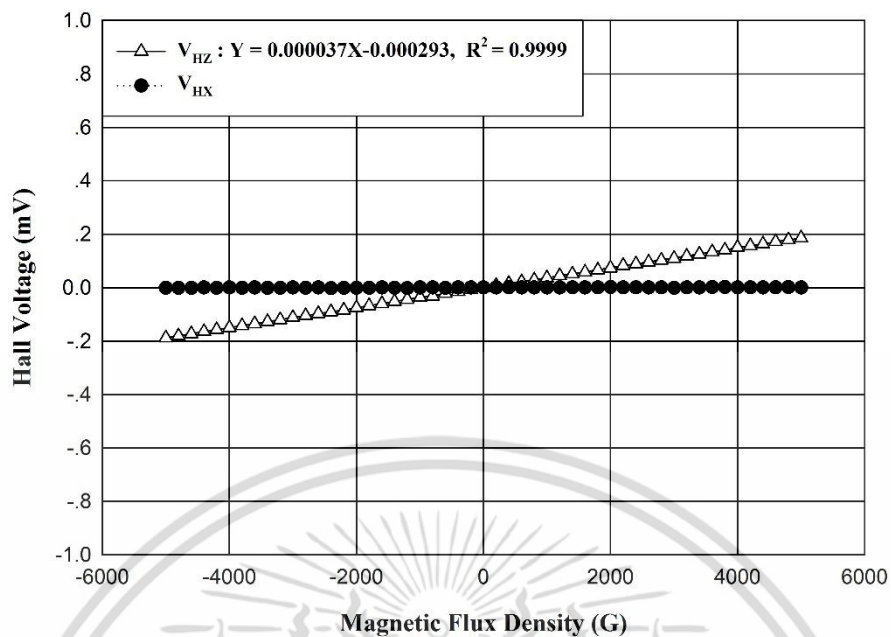
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่1 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

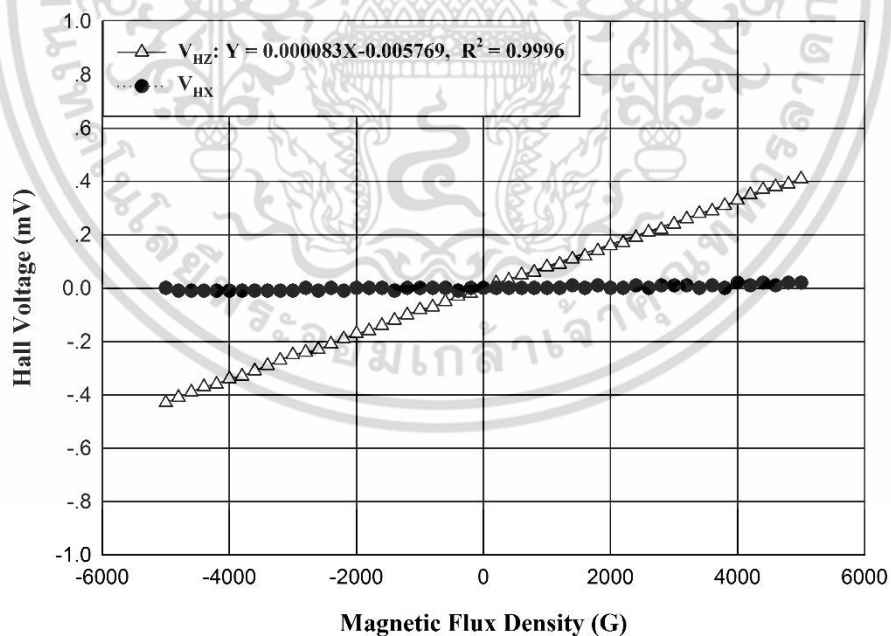


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางานของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ที่จ่ายกระแส 1 mA

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางานกับหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ซึ่งมีระยะโครงสร้างขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่ $W = 100 \mu\text{m}$, $S = 60 \mu\text{m}$ ที่มีการจ่ายกระแสแตกต่างกันคือ 0.5 mA และ 1mA ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางาน (B_x) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 0.5 mA มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y = 0.00035x - 0.002885$ โดยค่าความชันของกราฟคือค่าความไวของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 มีค่าเท่ากับ $350 \mu\text{V/G}$ และจุดตัดแกนที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์มีค่าเท่ากับ -0.002885 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงศูนย์ โดยในทิศตั้งฉากที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากจะทำให้ค่าความไวในการตอบสนองเป็นศูนย์ และเมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับหัววัดฮอลล์สองมิติ 1 mA มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นกันโดยขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์มีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเท่ากับ 0.0138 มิลลิโวลต์ มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $729 \mu\text{V/G}$ ตามสมการเชิงเส้น $y = 0.000729x + 0.013846$ โดยในทิศตั้งฉากที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากจะทำให้ค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.000004 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงศูนย์ดังรูปที่ 4.3 จากการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางานที่กระแสต่างกันคือ 0.5 mA และ 1mA มีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า



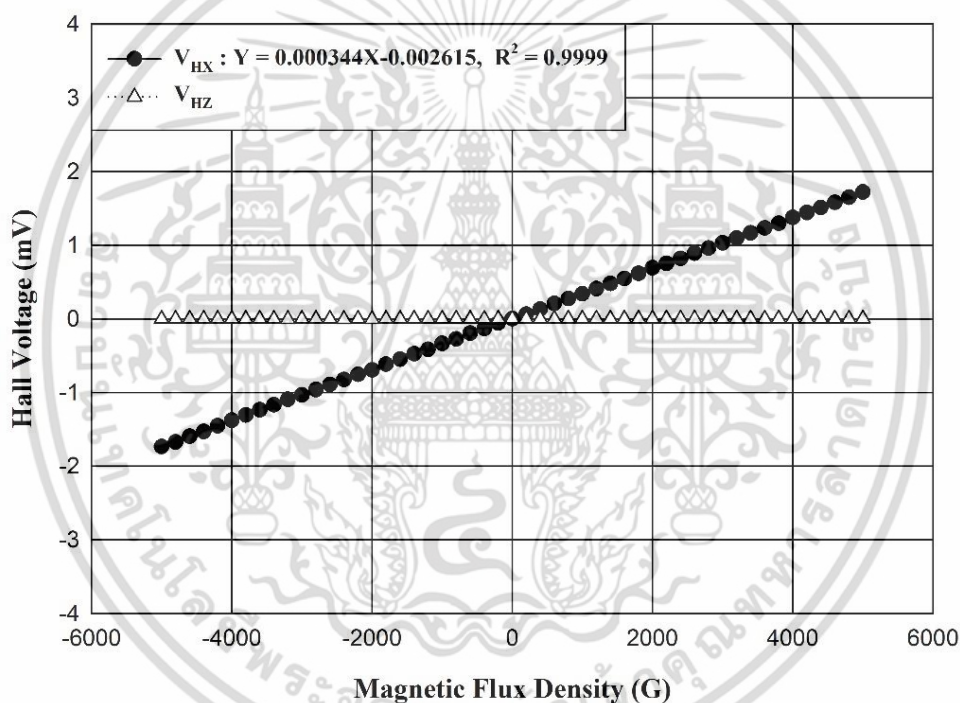
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA



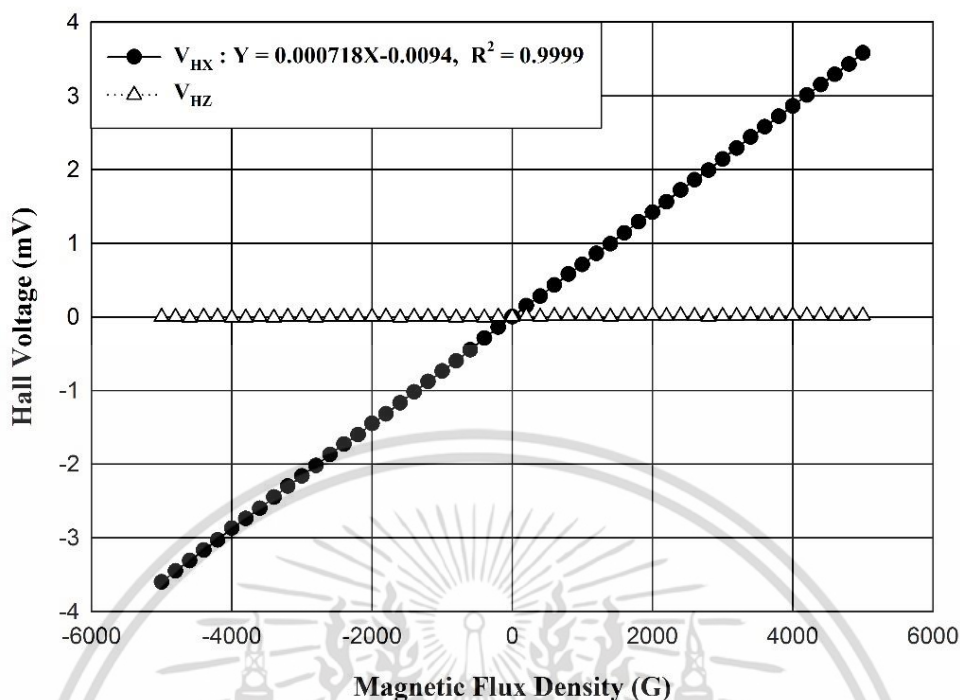
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ที่จ่ายกระแส 1 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ทิศสนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดฮอลล์สองมิติในทิศตั้งฉากของโครงสร้างที่ 1 แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัด ที่กระแส 0.5 mA มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่ากับ $37\mu\text{V}/\text{G}$ มีลักษณะเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y = 0.000037x - 0.000293$ ซึ่งในทิศขนานที่ไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำมีค่าความไวเท่ากับศูนย์ และที่กระแส 1 mA มีค่าความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ $83\mu\text{V}/\text{G}$ ตามสมการเชิงเส้น $y = 0.000083x - 0.0005769$ และในทิศขนานที่ไม่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากระทำมีค่าความไวเท่ากับ 0.000002 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ จากการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 ที่มีค่าการจ่ายกระแสต่างกันคือ 0.5 mA และ 1mA ที่มีสนามแม่เหล็กกระทำในทิศตั้งฉากมีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า

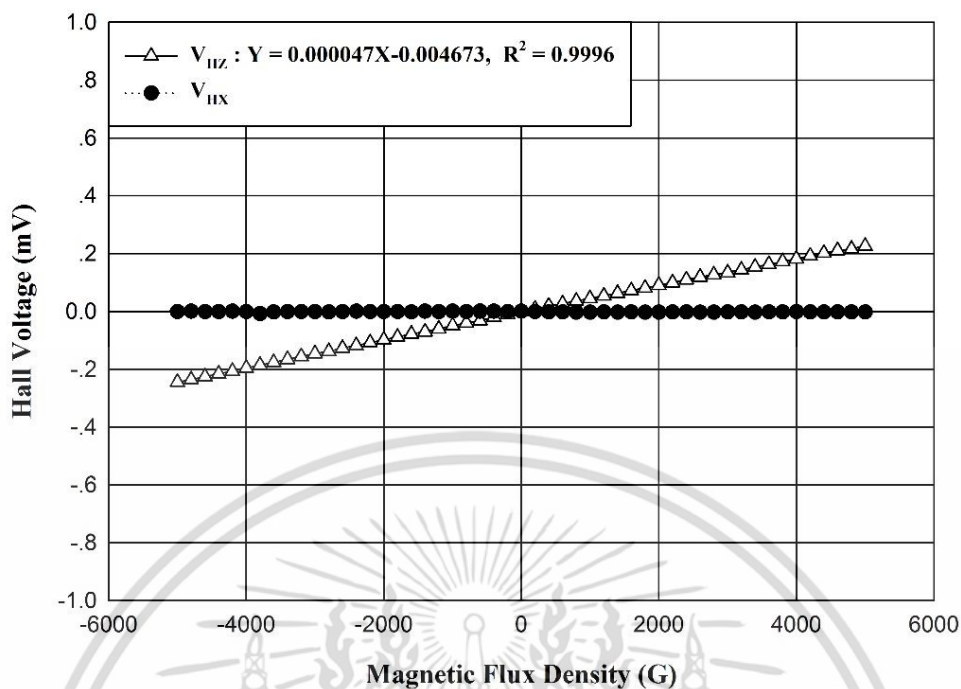


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศขนานของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA

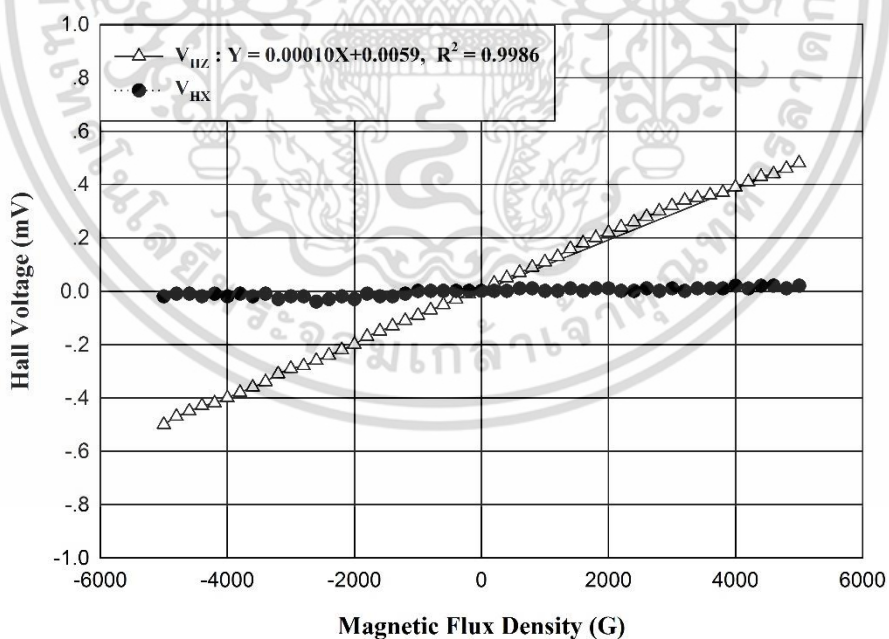


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่จ่ายกระแส 1 mA

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางกับหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ซึ่งมีระยะโครงสร้างขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่ $W = 200 \mu\text{m}$, $S = 60 \mu\text{m}$ ที่มีการจ่ายกระแสแตกต่างกันคือ 0.5 mA และ 1 mA ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง (B_x) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 0.5 mA มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y = 0.000344X - 0.002615$ โดยค่าความชันของกราฟคือค่าความไวของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 มีค่าเท่ากับ $344 \mu\text{V/G}$ และจุดตัดแกนที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์มีค่าเท่ากับ -0.002615 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงศูนย์ โดยในทิศตั้งฉากที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากจะทำให้ไม่มีการตอบสนอง และเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสให้กับหัววัดฮอลล์สองมิติเป็น 1 mA มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นกันโดยขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์มีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเท่ากับ -0.0094 มิลลิโวลต์ มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $718 \mu\text{V/G}$ ตามสมการเชิงเส้น $y = 0.000718X - 0.0094$ โดยในทิศตั้งฉากที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากจะทำให้ไม่มีการตอบสนอง ดังรูปที่ 4.7 จากการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางที่กระแสต่างกันคือ 0.5 mA และ 1 mA มีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า



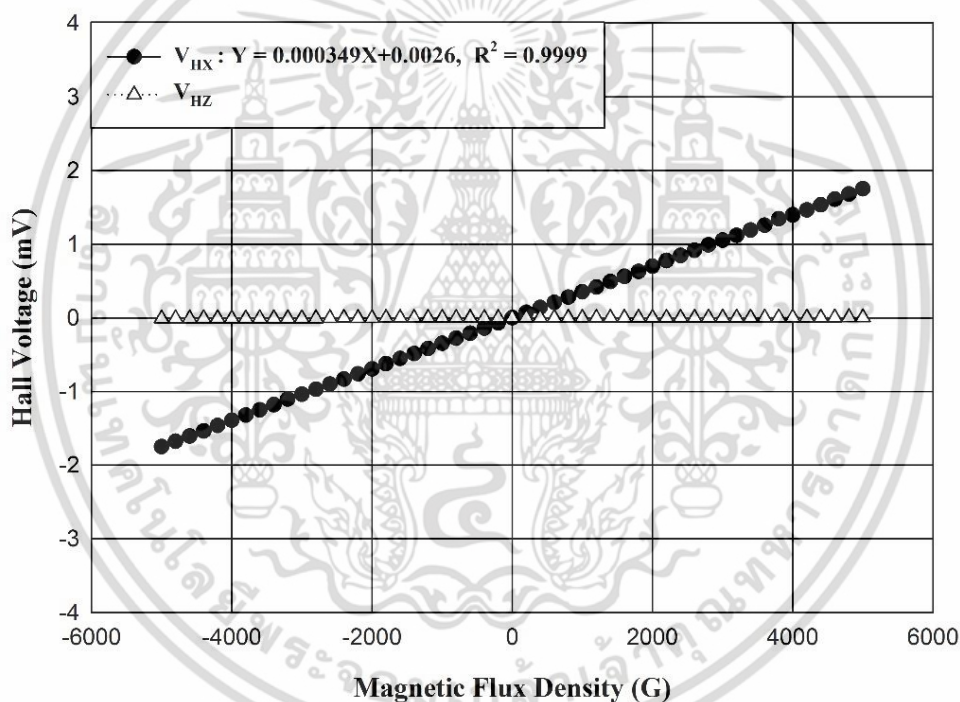
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA



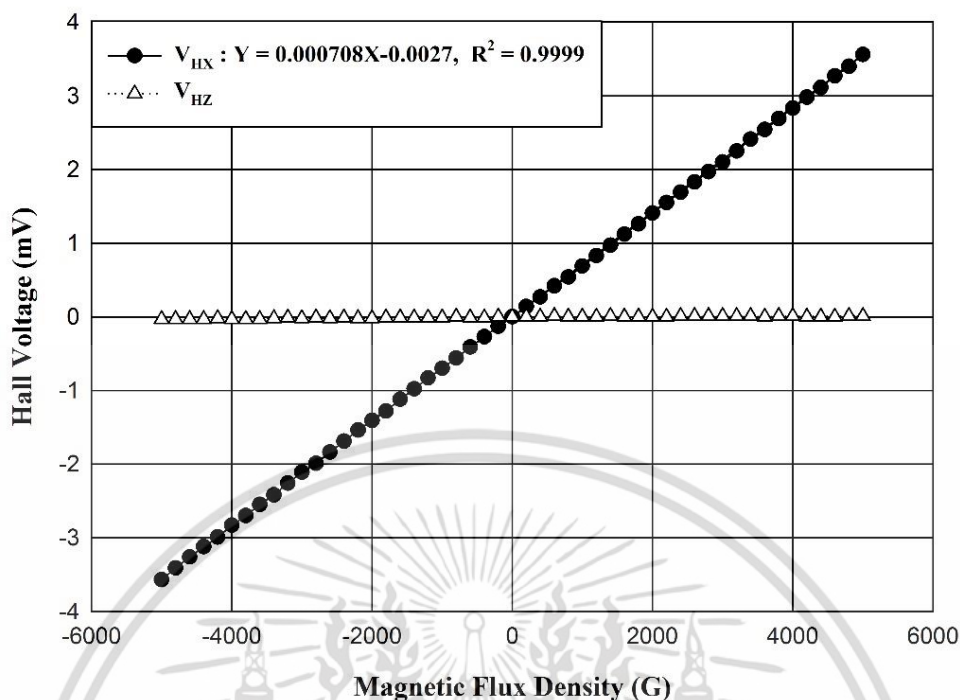
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่จ่ายกระแส 1 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ทิศสนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดฮอลล์สองมิติในทิศตั้งฉากของโครงสร้างที่ 2 แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัด ที่จ่ายกระแส 0.5 mA มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่ากับ $47\mu\text{V}/\text{G}$ มีลักษณะเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y = 0.000047X - 0.004673$ ซึ่งในทิศขนานที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกระท่อมามีค่าความไวเท่ากับศูนย์ และที่กระแส 1 mA มีค่าความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ $100\mu\text{V}/\text{G}$ ตามสมการเชิงเส้น $y = 0.0001X + 0.0059$ และในทิศขนานที่ไม่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากกระทำจะไม่มีการตอบสนอง จากการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 2 ที่มีค่าการจ่ายกระแสต่างกันคือ 0.5 mA และ 1mA ที่มีสนามแม่เหล็กกระทำในทิศตั้งฉากมีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า

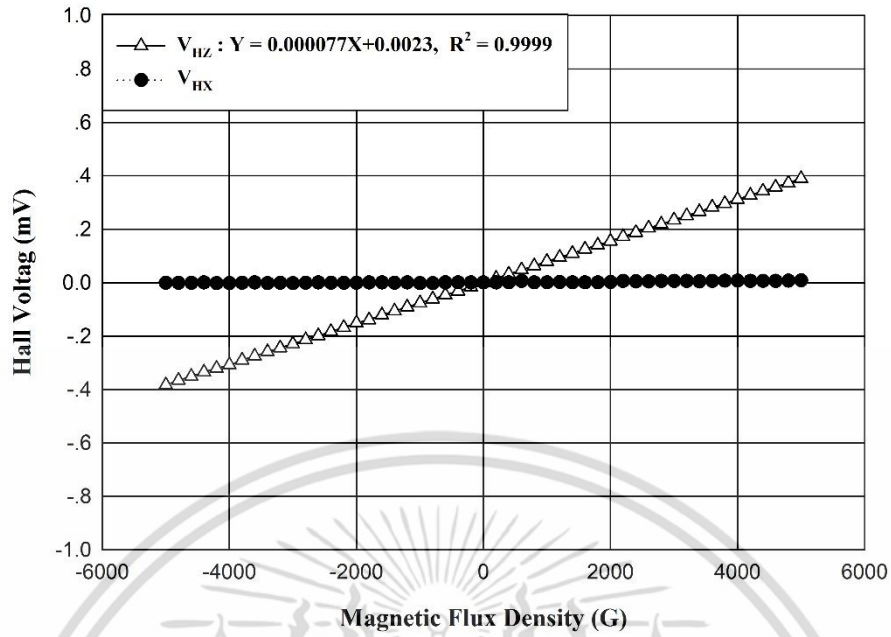


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศขนานของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA

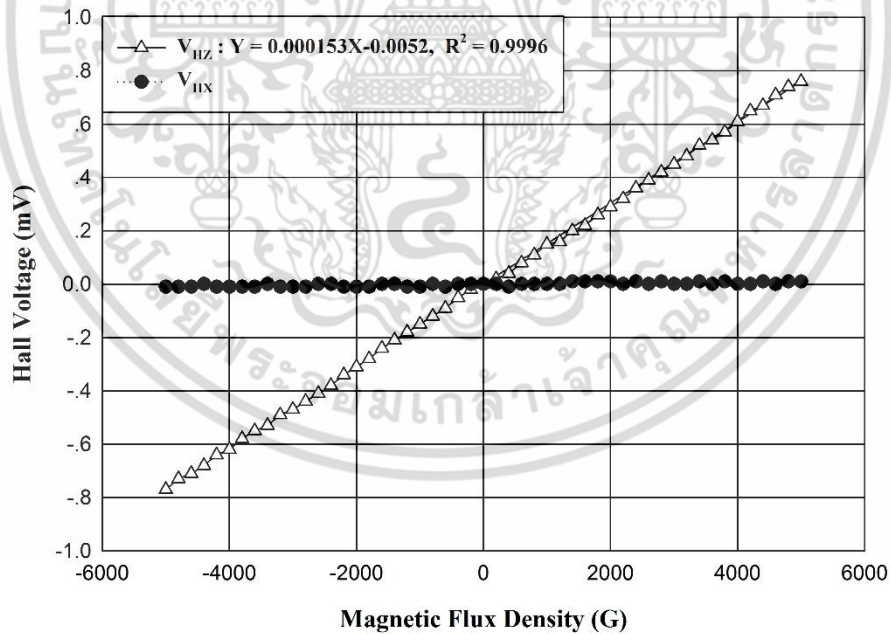


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่จ่ายกระแส 1 mA

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางกับหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ซึ่งมีระยะโครงสร้างขั้วไฟฟ้าการตอบสนองที่ $W = 300 \mu\text{m}$, $S = 60 \mu\text{m}$ ที่มีการจ่ายกระแสแตกต่างกันคือ 0.5 mA และ 1mA ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทาง (B_x) โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 0.5 mA มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y = 0.000349X + 0.0026$ โดยค่าความชันของกราฟคือค่าความไวของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 1 มีค่าเท่ากับ $349 \mu\text{V/G}$ และจุดตัดแกนที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์มีค่าเท่ากับ -0.0026 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงศูนย์ โดยในทิศตั้งฉากที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกระทำจะไม่มีการตอบสนอง และเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสให้กับหัววัดฮอลล์สองมิติเป็น 1 mA มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นกันโดยขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์มีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเท่ากับ -0.0027 มิลลิโวลต์ มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $708 \mu\text{V/G}$ ตามสมการเชิงเส้น $y = 0.000708X - 0.0027$ โดยในทิศตั้งฉากที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกระทำจะไม่มีการตอบสนอง ดังรูปที่ 4.11 จากการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางที่กระแสต่างกันคือ 0.5mA และ 1mA มีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่จ่ายกระแส 0.5 mA



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่จ่ายกระแส 1 mA

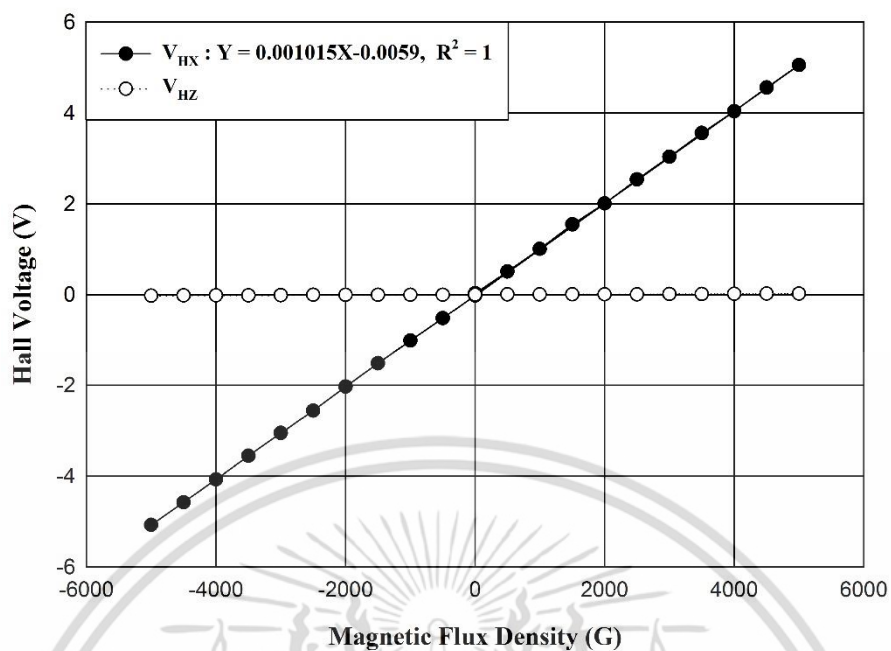
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ทิศสนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดฮอลล์สองมิติในทิศตั้งฉากของโครงสร้างที่ 3 แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัด ที่จ่ายกระแส 0.5 mA มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่ากับ 0.000077 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ มีลักษณะเป็นเชิงเส้นตามสมการ $y = 0.000077X + 0.0023$ สำหรับในทิศขนานที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าจะไม่มี การตอบสนอง และที่กระแส 1 mA มีค่าความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ 0.000153 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ ตามสมการเชิงเส้น $y = 0.000153X - 0.0052$ ในทิศขนานที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าจะไม่มี การตอบสนอง จากการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 3 ที่มีค่าการจ่ายกระแสต่างกันคือ 0.5 mA และ 1mA ที่มีสนามแม่เหล็กกระทำในทิศตั้งฉากมีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า

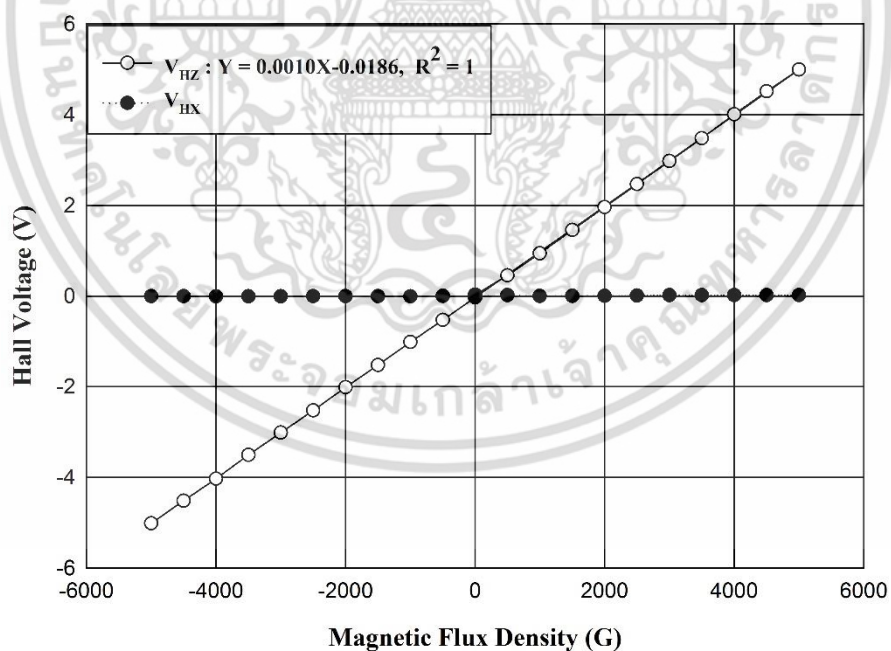
4.1.3 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ ถูกขยายสัญญาณ

เนื่องจากสัญญาณอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้ามีขนาดเล็กและการตอบสนองของโครงสร้างทั้งสองที่แตกต่างกันจึงต้องมีขยายสัญญาณรวมถึงปรับระดับสัญญาณให้เหมาะสมสำหรับเทคนิคการวัดที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง จึงมีความจำเป็นในการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นและมีความเท่าเทียมกัน ซึ่งวงจรที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้คือ วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ โดยในการทดลองจะทำการสร้างวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์เป็นสองชุดสำหรับการตอบสนองในทิศตั้งฉากละทิศขนานของหัววัด เพื่อให้มีการตอบสนองที่เห็นได้ชัดเจนขึ้นและปรับให้มีค่าการตอบสนองของสองทิศทางมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะทำให้สามารถนำสัญญาณการตอบสนองของทั้งสองทิศทางมาเปรียบเทียบและนำมาใช้ในเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางได้

โดยการทดลองเลือกใช้โครงสร้างฮอลล์สองมิติ โครงสร้างที่ 3 ซึ่งมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่ากับ 300 μm ซึ่งมีค่าความไวในการตอบสนองดีกว่าโครงสร้างที่ 1 และ 2 โดยให้กระแสกับหัววัดฮอลล์สองมิติที่ 1mA



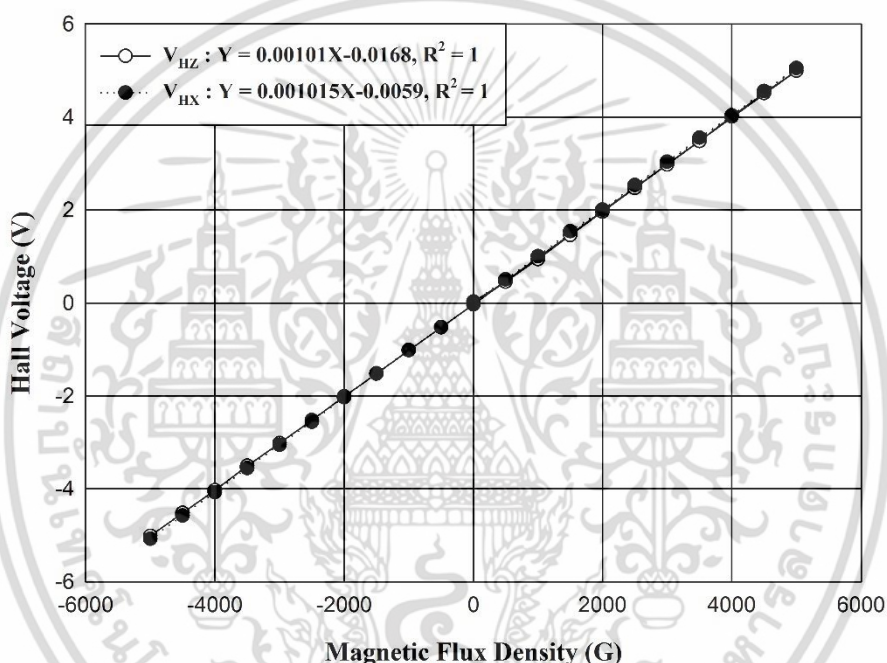
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศขนานที่ถูกขยาย สัญญาณที่กระแส 1mA



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากที่ถูกขยาย สัญญาณโครงสร้างที่ 3 W=300µm ที่กระแส 1mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางกับหัววัดหลังผ่านวงจรถายด้วยชุดวงจรถายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ที่กระแส 1mA แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.14 ซึ่งมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 1.015mV/G มีการขยายสัญญาณประมาณ 1,500 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความไวในการตอบสนองที่ยังไม่ผ่านวงจรถายสัญญาณ และการทดสอบการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดหลังผ่านวงจรถายด้วยชุดวงจรถายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 1.001mV/G โดยมีการขยายสัญญาณประมาณ 6,500 เท่า เมื่อเทียบกับค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ยังไม่ผ่านวงจรถายสัญญาณ



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็กทั้งสองทิศทางที่ถูกขยายสัญญาณโครงสร้างที่ $3 \text{ W}=300\mu\text{m}$ ที่กระแส 1mA

เมื่อเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์ทั้งสองทิศทางพบว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งมีค่าความไวในการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันมาก และสามารถนำค่าความไวในการตอบสนองทั้งสองทิศทางของหัววัดไปประยุกต์ใช้ในการวัดที่ไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม

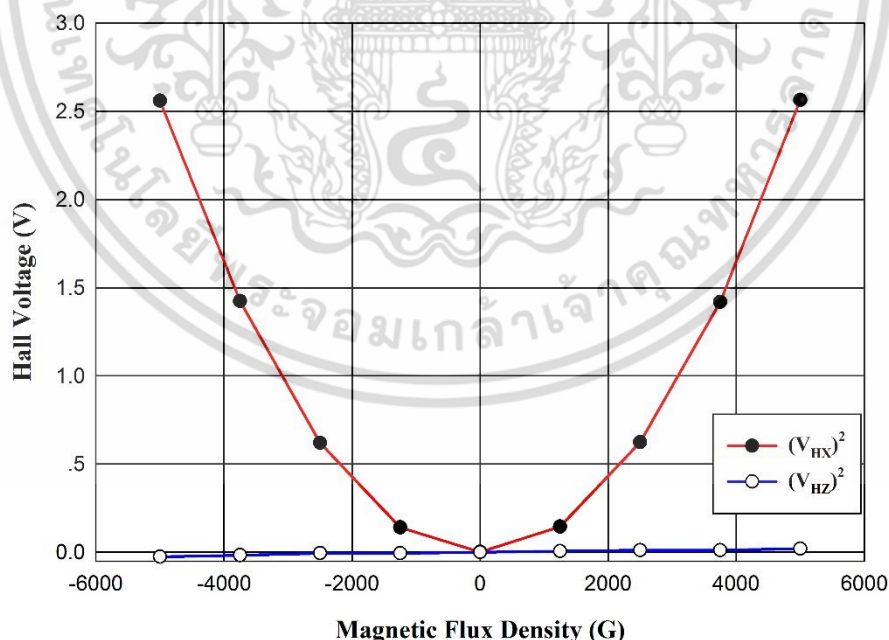
4.1.4 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรรคำนวณสัญญาณนอก

เนื่องจากหัววัดฮอลล์สองมิติมีการตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ ซึ่งจากหลักความสัมพันธ์ตรีโกณ $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ไม่ขึ้นกับมุมได้โดยสมการ $V_H = \sqrt{V_{HX}^2 + V_{HZ}^2}$ โดยใช้วงจรรคำนวณสัญญาณนอกที่ได้ ออกแบบไว้ในการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ วงจรรยกกำลังสองสัญญาณ, วงจรรวมสัญญาณ, วงจรถอดรอกที่ส่งสัญญาณ สำหรับการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

4.1.4.1 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ผ่านวงจรรยกกำลังสอง

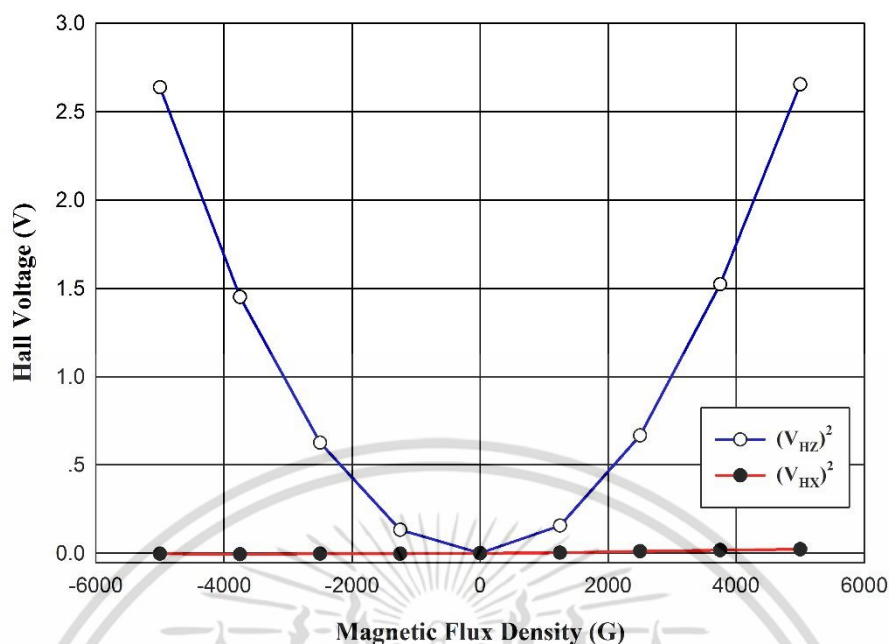
สำหรับในการทดลองนี้จะทำการยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทั้งสองทิศทางการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยผ่านวงจรรยกกำลังสองที่ทำการออกแบบไว้สองชุดสำหรับการตอบสนองในทิศตั้งฉากและทิศขนาน ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.17 และ 4.18

โดยผลการทดลองในรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าภายหลังจากผ่านวงจรรยกกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศขนาน ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ 5 ค่า คือ 0, 1,250, 2,500, 3,750 และ 5,000 เกาส์ โดยลักษณะของกราฟเป็นแบบพาราโบลา ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $y = x^2$ แสดงให้เห็นถึงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ได้ถูกยกกำลังสองสัญญาณแล้ว



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรรยกกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

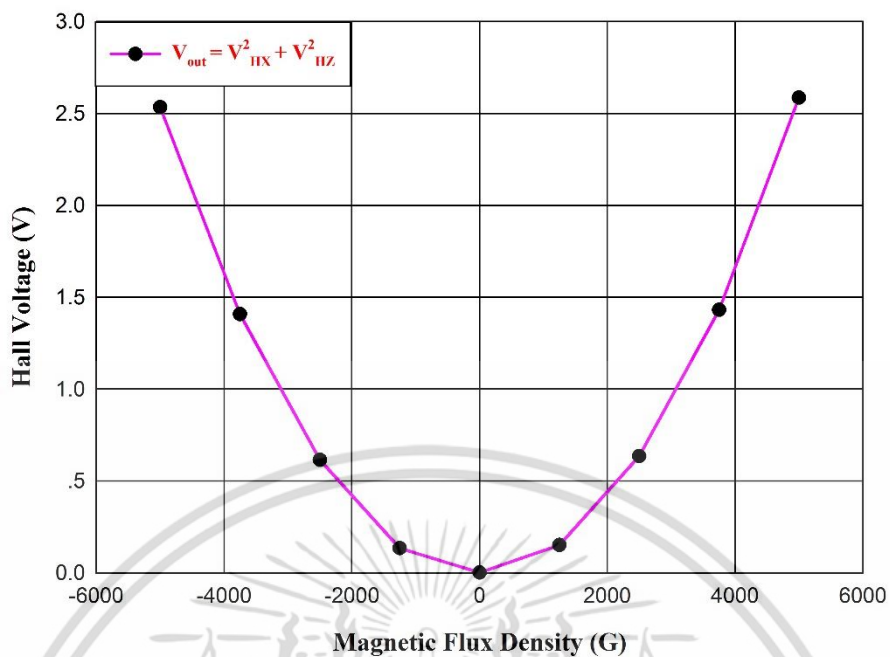


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรรยกกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก

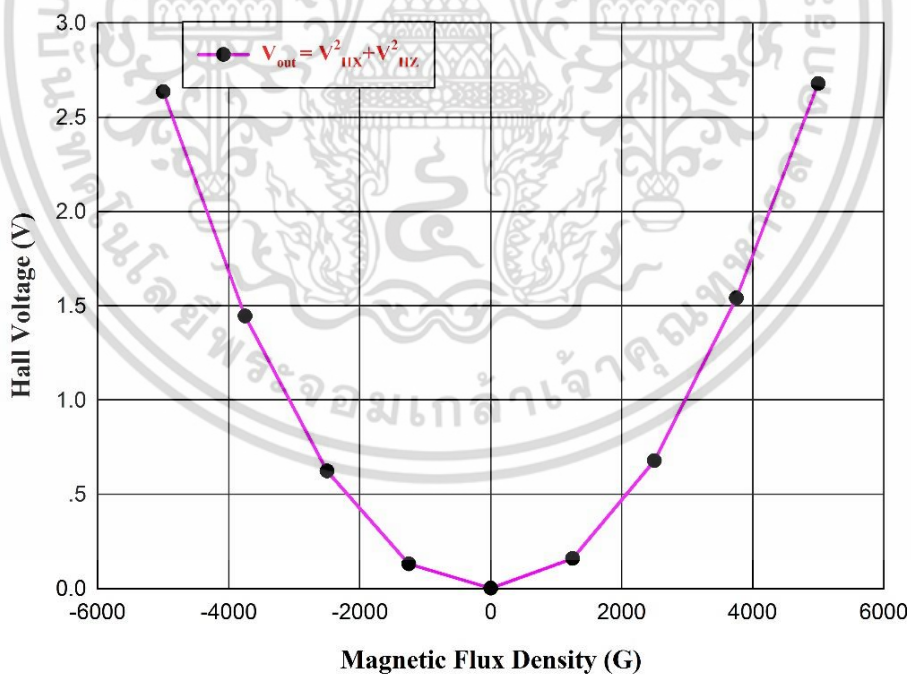
ซึ่งกราฟรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากผ่านวงจรรยกกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศตั้งฉาก ที่ค่าที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ 5 ค่า คือ 0, 1,250, 2,500, 3,750 และ 5,000 เกาส์ โดยลักษณะของกราฟเป็นแบบพาราโบลา สำหรับการตอบสนองในทิศตั้งฉาก ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $y = x^2$ แสดงให้เห็นถึงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ได้ถูกยกกำลังสองสัญญาณแล้ว ซึ่งจากการทดลองใช้วงจรรยกกำลังสองในการคำนวณสัญญาณที่มีค่าเอาต์พุตคือ $V_{out} = \frac{V_{in}^2}{10}$

4.1.4.2 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านจรรวมสัญญาณ

สำหรับการทดสอบนี้จะทำการรวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่สนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดทั้งในทิศตั้งฉากและทิศขนาน โดยการนำสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านวงจรรยกกำลังสองมารวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยทำการรวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทั้งสองทิศทางคือ ทิศตั้งฉากและขนาน ซึ่งทำการทดสอบการตอบสนองต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่คงที่ 5 ค่า คือ 0, 1,250, 2,500, 3,750, และ 5,000 เกาส์ ผลของการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกรวมสัญญาณกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนว
ขนาน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกรวมสัญญาณกับความเข้มสนามแม่เหล็ก
แนวตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

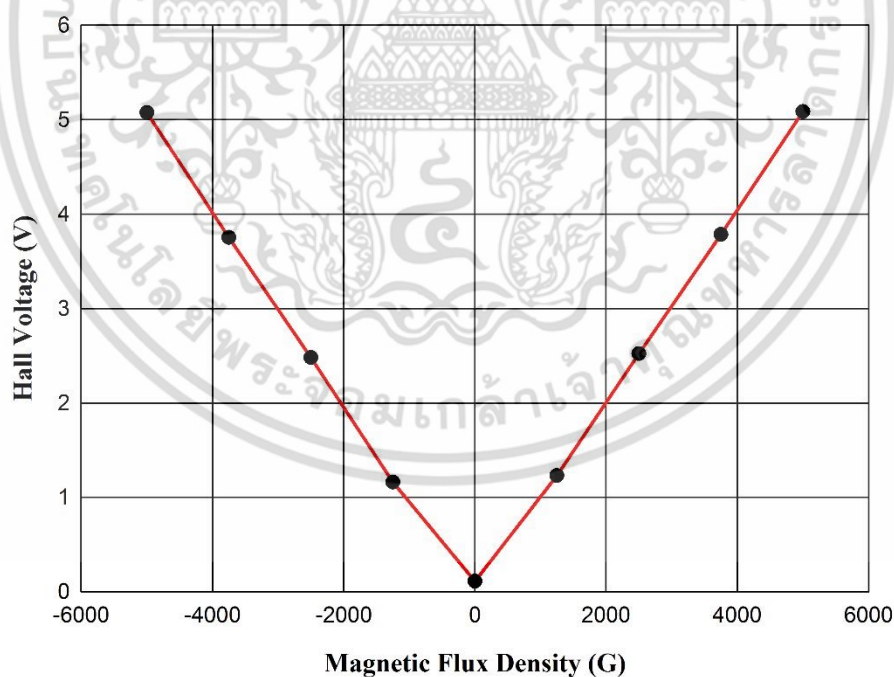
เมื่อรวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในทิศการตอบสนองทั้งสองทิศเข้าด้วยกัน แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.19 ซึ่งมีการตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในทิศขนาน โดยลักษณะของกราฟเป็นแบบพาราโบลา ซึ่งมีการยกค่าออฟเซ็ทขึ้น เนื่องจากได้รวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศขนานที่มีค่าออฟเซ็ทอยู่

สำหรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากที่ผ่านวงจรรวมสัญญาณ ดังรูปที่ 4.20 มีลักษณะของกราฟเป็นแบบพาราโบลาซึ่งมีการยกค่าออฟเซ็ทขึ้น เนื่องจากได้รวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศขนานที่มีค่าออฟเซ็ทอยู่

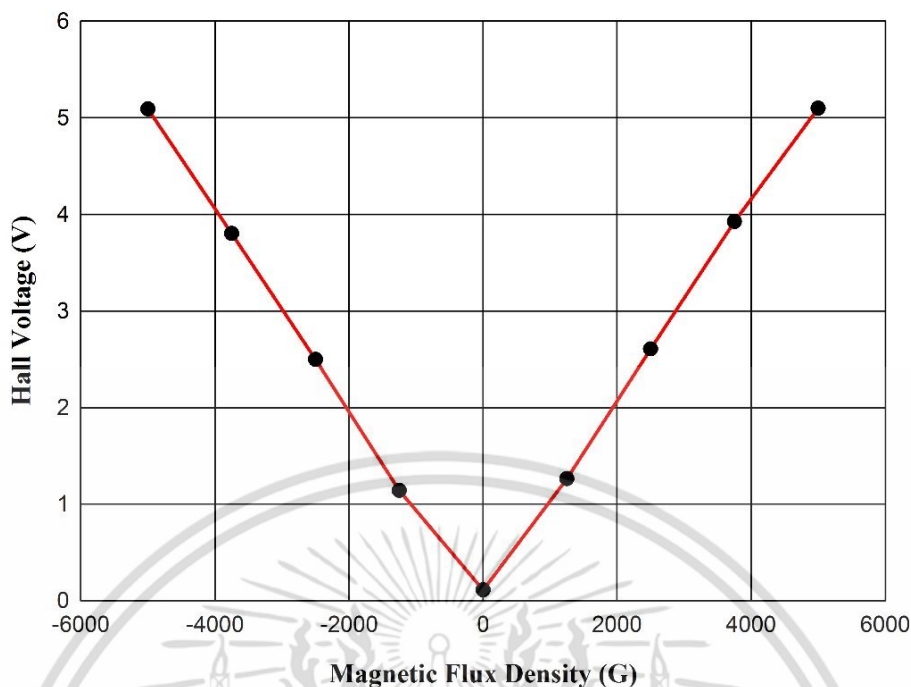
4.1.4.3 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรถอดรอกที่สอง

ผลการทดลองสัญญาณค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านวงจรถอดรอกที่สอง จะนำสัญญาณเอาท์พุทจากการทดลองที่ 4.1.4.3 มาผ่านวงจรถอดรอกที่สองเพื่อให้สอดคล้องกับสมการตรีโกณในการคำนวณเพื่อที่จะนำไปวัดค่าการตอบสนองโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

เมื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีทิศสนามแม่เหล็กกระทำในทิศขนานกับหัววัดฮอลล์ แสดงให้เห็นดังกราฟรูปที่ 4.21 ซึ่งมีลักษณะของกราฟไปรูปตัววีที่สอดคล้องกับสมการ $y = |x|$ ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าได้มีการถอดรอกที่สองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอย่างถูกต้อง



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถอดรอกที่สองกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนาน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถอดกราฟที่สองกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนาน

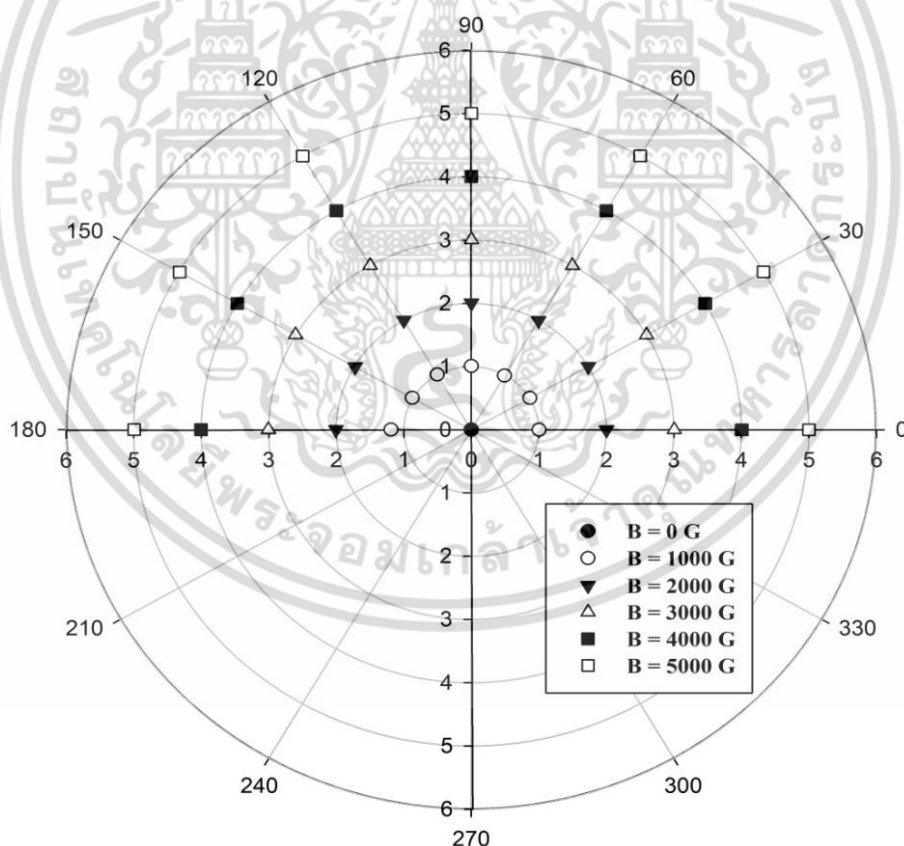
เมื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีทิศทางแม่เหล็กกระทำในทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ แสดงให้เห็นดังกราฟรูปที่ 4.22 ซึ่งมีลักษณะของกราฟไปรูปตัววีที่สอดคล้องกับสมการ $y = |x|$ ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าได้มีการถอดกราฟที่สองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอย่างถูกต้อง

จากการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรรคำนวณสัญญาณนาฬิกา พบว่าเมื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ผ่านวงจรรขยายสัญญาณในทั้งสองทิศทางการตอบสนองต่อทิศทางแม่เหล็ก ได้แสดงถึงขนาดสัญญาณที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเท่าเทียมกัน รวมถึงความเป็นเชิงเส้นที่เท่าเทียมกันในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในสองทิศทางคือ ทิศพุ่งเข้าและพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์สองมิติได้เป็นอย่างดี ซึ่งเหมาะสมสำหรับการเลือกใช้เพื่อวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าเมื่อผ่านวงจรรยกกำลังสองในทั้งสองทิศทางการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก พบว่ามีลักษณะกราฟเป็นแบบพาราโบลาโบล่าซึ่งสอดคล้องกับสมการ $y = x^2$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ได้ถูกยกกำลังสองอย่างถูกต้อง จากนั้นนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทั้งสองทิศทางการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ถูกยกกำลังสองแล้วมาทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการรวมกันของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งมีการยกค่าออฟเซ็ทขึ้นเนื่องจากมีค่าออฟเซ็ทของทิศการตอบสนองที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ เมื่อนำสัญญาณที่ถูกรวมกันแล้วมาถอดกราฟที่สองด้วยวงจรถอดกราฟที่สอง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ $y = |x|$ แสดงให้เห็นว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ได้ถูกถอดกราฟที่สองแล้ว ซึ่ง

ผลจากการทดลองข้างต้นได้ทำการคำนวณตามสมการ $V_H = \sqrt{V_{HX}^2 + V_{HZ}^2}$ และมีผลการทดลองที่ถูกต้อง ซึ่งสามารถนำไปวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้

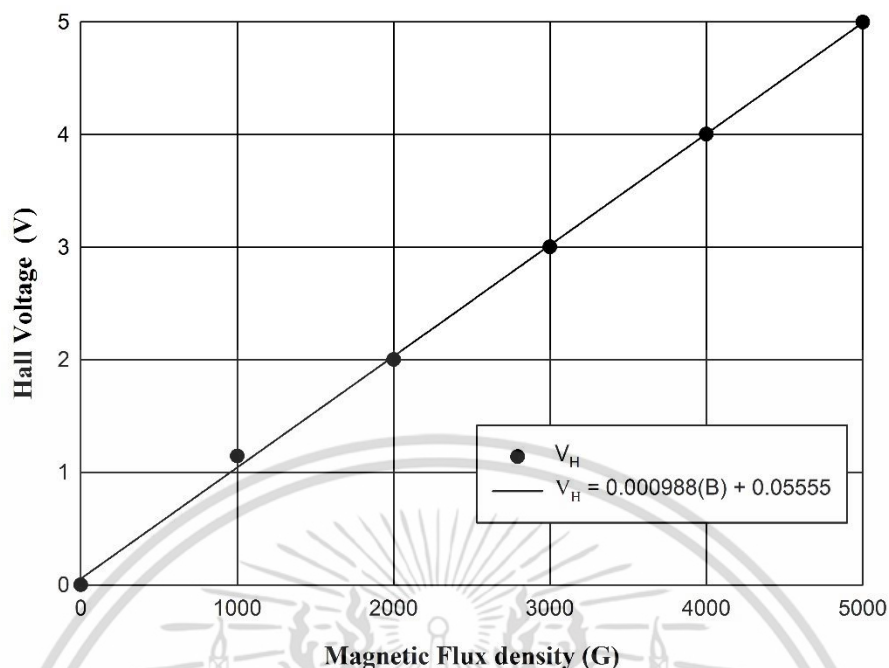
4.2 การทดสอบเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติ

จากที่ได้ทำการทดสอบและออกแบบวงจรประมวลสัญญาณเชิงอนาล็อกสำหรับการทดสอบการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิตินั้น พบว่าวงจรคำนวณทั้งสามวงจรแสดงให้เห็นว่าการคำนวณเชิงอนาล็อกมีความถูกต้องสอดคล้องกับสมการสำหรับการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งได้นำวงจรเชิงอนาล็อกนี้มาทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางโดยให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ 0, 1000, 2000, 3000, 4000 และ 5000 เกาส์ แล้วทำการหมุนหัววัดฮอลล์สองมิติภายใต้ค่าสนามแม่เหล็กที่คงที่ดังกล่าวที่มุม 0, 30, 60, 90, 120, 150, และ 180 องศา ผลของการทดสอบเทคนิคการวัดนี้แสดงให้เห็นดังกราฟรูปที่ 4.23 พบว่าผลการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ในแต่ละมุมมีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ โดยไม่ขึ้นกับทิศทาง



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่กับมุมที่เปลี่ยนแปลงจาก 0-180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คิงที่กับสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจาก 0-5000 เกาส์

ซึ่งผลของค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.1 ที่ค่าสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่วัดได้จากระบบการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางเท่ากับ 0.0001V ที่ค่าสนามแม่เหล็กคิงที่ 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 เกาส์ ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คิงที่ได้ 1.144 V, 2.000 V, 3.002 V, 4.002V และ 4.998V ตามลำดับ โดยผลของค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้เทียบกับค่าสนามแม่เหล็กที่คิงที่แสดงดังกราฟรูปที่ 4.24 ซึ่งมีลักษณะความเป็นเชิงเส้น

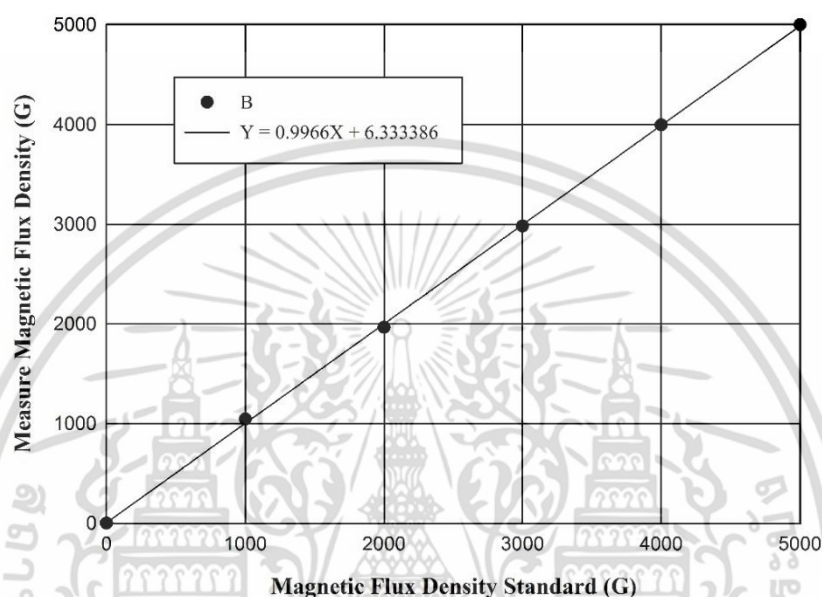
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คิงที่กับค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้

สนามแม่เหล็กคิงที่ (G)	แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V)
0	0.0001
1000	1.144
2000	2.000
3000	3.002
4000	4.002
5000	4.998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการวัดเทียบของระบบการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางกับเครื่องมือมาตรฐาน

ผลของการวัดเทียบของระบบที่ได้ออกแบบกับเครื่องมือมาตรฐาน (FW BELL5170) แสดงดังกราฟรูปที่ 4.25 ซึ่งมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.2-4.4% ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กช่วง 0-5000 เกาส์ โดยแสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้กับเครื่องมือมาตรฐานวัดได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบวัดกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบวัดมาตรฐาน

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้กับค่าสนามแม่เหล็กที่เครื่องมือมาตรฐานวัดได้

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เครื่องมือมาตรฐานวัดได้ (G)	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้ (G)	ค่าความคาดเคลื่อน (%)
0	0.0001	0
1000	1044	4.4
2000	1964	3.6
3000	2982	1.8
4000	3995	0.5
5000	5002	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์หลักสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการศึกษาสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติและการประยุกต์ใช้งานหัววัดด้วยเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติ โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาสมบัติเฉพาะของหัววัดฮอลล์สองมิติ เพื่อนำเอาสมบัติที่ทำการศึกษาเหล่านี้ไปวิเคราะห์และนำมาประยุกต์ใช้งานในการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม ตลอดจนการออกแบบระบบการวัดค่าการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยระบบประมวลสัญญาณเชิงอนาล็อก ซึ่งผลการศึกษาออกมาเป็นไปตามวัตถุประสงค์และสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยรายละเอียดผลการศึกษามีลำดับขั้นตอนดังนี้

เนื่องจากหัววัดฮอลล์สองมิติในงานวิจัยนี้ ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการทางซิลิคอนเทคโนโลยี โดยใช้เทคนิคสเปคโตรริงสร้างรอยต่ออะลูมิเนียมบนฐานรองซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า 20-30 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นขั้วนำไฟฟ้า 5 ขั้ว ซึ่งเป็นรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงเริ่มจากทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์สองมิติ เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของรอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์สองมิติพบว่ารอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำของหัววัดฮอลล์สองมิติที่สร้างขึ้นนั้น มีลักษณะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก พบว่ามีค่าความเป็นเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องกับกฎของโอห์มและสามารถยืนยันผลได้อย่างชัดเจนว่ารอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำของหัววัดฮอลล์สองมิติเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้

โดยการทดสอบสมบัติการตอบสนองของหัววัดจะทำการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติทั้งสองทิศทางที่สนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดฮอลล์สองมิติคือ ในแนวตั้งฉากและแนวขนาน ในการทดลองเลือกใช้หัววัดฮอลล์สองมิติสามโครงสร้างที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือ โครงสร้างที่ 1 มีค่า $W = 100 \mu\text{m}$ $S = 60 \mu\text{m}$ โครงสร้างที่ 2 มีค่า $W = 200 \mu\text{m}$ $S = 60 \mu\text{m}$ และโครงสร้างที่ 3 มีค่า $W = 300 \mu\text{m}$ $S = 60 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งทดสอบหาความไวในการตอบสนองของหัววัดในแต่ละโครงสร้างโดยจ่ายกระแสคงที่ 0.5 mA แล้วรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยการเพิ่มกระแสให้กับอเล็กโตรแมกเนตจาก -5,000 ถึง 5,000 เกาส์ และเปลี่ยนค่ากระแสเป็น 1 mA เพื่อเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของค่ากระแสทั้งสองค่า

ผลการทดสอบการตอบสนองของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 1 ($W = 100 \mu\text{m}$) พบว่าผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง (B_x) ที่กระแส 0.5 mA มีลักษณะการตอบสนองเป็นเชิงเส้น มีค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ $350 \mu\text{V/G}$ และที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศตั้งฉาก (B_z) มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $37 \mu\text{V/G}$ เมื่อให้กระแส 1 mA กับหัววัด ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง (B_x) มีค่าเท่ากับ $729 \mu\text{V/G}$ และค่าความไวในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (B_z) มีค่าเท่ากับ $83\mu\text{V/G}$ เมื่อเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติที่สนามแม่เหล็กกระทำในทิศขนานและทิศตั้งฉาก ที่ค่าการจ่ายกระแสต่างกันคือ 0.5 mA และ 1mA มีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า และที่ค่ากระแสเท่ากันมีค่าความไวในการตอบสนองของทั้งสองทิศทางต่างกันประมาณ 9 เท่า

โดยผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของโครงสร้างที่ 2 ($W = 200\ \mu\text{m}$) พบว่าผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศขนาน (B_x) ที่กระแส 0.5 mA มีลักษณะการตอบสนองเป็นเชิงเส้น มีค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ $344\mu\text{V/G}$ และที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศตั้งฉาก (B_z) มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $47\mu\text{V/G}$ เมื่อให้กระแส 1 mA กับหัววัด ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศขนาน (B_x) มีค่าเท่ากับ $718\mu\text{V/G}$ และค่าความไวในการตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (B_z) มีค่าเท่ากับ $100\mu\text{V/G}$ เมื่อเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติที่สนามแม่เหล็กกระทำในทิศขนานและทิศตั้งฉาก ที่มีค่าการจ่ายกระแสต่างกันคือ 0.5 mA และ 1mA มีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 2 เท่า และที่ค่ากระแสเท่ากันมีค่าความไวในการตอบสนองต่างกันประมาณ 7.2 เท่า และผลการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ โครงสร้างที่ 3 ($W = 300\ \mu\text{m}$) ที่ค่ากระแส 0.5 mA มีค่าความไวในการตอบสนองต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศขนาน (B_x) เท่ากับ $349\mu\text{V/G}$ และที่ค่ากระแส 1 mA มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $708\mu\text{V/G}$ ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณ 2 เท่า และค่าความไวในการตอบสนองต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (B_z) กับหัววัดที่กระแส 0.5 mA มีค่าเท่ากับ $77\mu\text{V/G}$ และที่ค่ากระแส 1 mA มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ $153\mu\text{V/G}$ ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณ 2 เท่า โดยที่ค่ากระแสเท่ากันมีค่าความไวในการตอบสนองต่างกันประมาณ 4.5 เท่า จากข้อมูลที่ได้ยังแสดงถึงคุณสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ในทิศขนาน (B_x) ที่ดีกว่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (B_z) เมื่อทำการวิเคราะห์หลังโครงสร้างที่มีระยะขั้วไฟฟ้าฮอลล์ที่ $W = 300\ \mu\text{m}$ มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดีกว่าทั้งสองทิศทาง อันเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานสำหรับระยะของขั้วไฟฟ้าฮอลล์ ส่งผลถึงค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด ดังนั้นจึงสามารถเลือกหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่อไป

โดยเมื่อทำการขยายสัญญาณด้วยชุดวงจขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ เนื่องจากสัญญาณอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในการตอบสนองมีขนาดเล็กมากทำให้ต้องมียังจขยายสัญญาณรวมถึงปรับระดับสัญญาณให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ให้มีค่าสูงขึ้น โดยในการทดลองจะออกแบบชุดวงจขยายแบบอินสตรูเมนต์ออกเป็นสองชุดสำหรับการตอบสนองในทั้งสองทิศทางของหัววัดเพื่อให้มีการตอบสนองที่เห็นได้อย่างชัดเจนและการปรับให้การตอบสนองของทั้งสองทิศทางมีค่าที่เท่ากัน ผลการทดสอบขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทิศขนานกับหัววัดฮอลล์ โดยจ่ายกระแสคงที่ 1mA ที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก $-5,000$ ถึง $5,000$ เกาส์ หลังผ่านวงจขยายแบบอินสตรูเมนต์ยังคงความเป็นเชิงเส้น และมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 1.015mV/G ด้วยอัตราขยายประมาณ 1,500 เท่า และค่าความไวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองของหัววัดฮอลล์ในทิศตั้งฉากกับหัววัด ที่ผ่านวงจรรขยายแล้ว มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 1.001mV/G ด้วยอัตราขยายประมาณ 6,500 เท่า เมื่อเทียบกับค่าความไวในการตอบสนองที่ยังไม่ผ่านวงจรรขยายสัญญาณ ซึ่งค่าความไวในการตอบสนองเมื่อผ่านวงจรรขยายสัญญาณแล้วในทั้งสองทิศทางมีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับผลการทดสอบวงจรรคำนวณสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อที่จะนำไปวัดค่าการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ที่ไม่ขึ้นกับทิศทางนั้นทำการออกแบบวงจรรคำนวณเชิงอนาล็อกออกเป็น 3 ส่วนคือ วงจรรยกกำลังสอง, วงจรรวมสัญญาณ, และวงจรรถดรากที่สอง เพื่อนำไปคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ไม่ขึ้นกับทิศทางดังสมการความสัมพันธ์ตรีโกณมิติ ดังสมการ

$$\sqrt{V_{Hx}^2 + V_{Hz}^2} = k = V_H$$

ผลการทดสอบวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทั้งสองทิศทาง ที่ทำการทดสอบการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กทั้ง 5 ค่า คือค่าที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น 0, 1,250, 2,500, 3,750, 5,000 เกาส์ พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรรยกกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแบบพาราโบลาตามสมการ $y = x^2$ แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ได้ถูกยกกำลังสองแล้วอย่างชัดเจน จากนั้นนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกยกกำลังสองในทั้งสองทิศทางมาทำการรวมสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โดยผ่านวงจรรวมสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นแบบพาราโบลา และมีการยกค่าออฟเซตขึ้น แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งในทิศตั้งฉากและทิศขนานมีการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน และเมื่อนำสัญญาณทั้งสองที่รวมเข้าด้วยกันมาเข้าวงจรรถดรากที่สอง พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มีการรวมกันแล้วกับความเข้มสนามแม่เหล็ก มีลักษณะเป็นรูปตัววี ซึ่งเป็นไปตามสมการ $y = |x|$ แสดงให้เห็นว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ผ่านวงจรรถดรากที่สองได้อย่างถูกต้อง วงจรรคำนวณทั้งสามวงจรรแสดงให้เห็นว่าการคำนวณเชิงอนาล็อกมีความถูกต้องสอดคล้องกับสมการสำหรับการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งผลการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ในแต่ละมุมมีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ โดยไม่ขึ้นกับทิศทางผลของการวัดเทียบของระบบที่ได้ออกแบบกับเครื่องมือมาตรฐาน มีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.2-4.4% ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กช่วง 0-5000 เกาส์ ด้วยวงจรรคำนวณที่สร้างขึ้นสามารถที่จะคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้ตามสมมุติฐาน และมีความสอดคล้องกับสมการของเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง สามารถที่จะนำระบบวัดไปพัฒนาเป็นวงจรรวมสำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในเชิงไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ในอนาคต

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. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิลิกส์**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2551.
- [4] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2549.
- [5] รศ.ดร.วรวงศ์ ตั้งศรีรัตน์. **ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งาน**. พิมพ์ ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: สจล 2552
- [6] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins. **Device Electronics for Integrated Circuits**. New York : John Wiley&Sons, Inc. 1986.
- [7] Dieter K.Schroder. **Semiconductor material and device characterization**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1990.
- [8] Sze S. M. and Kwok K. Ng. **Physics of Semiconductor Devices**. 3rd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [9] Popovic R S. **Hall Effect Devices**. 2nd ED. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing, Ltd. 2004.
- [10] Pavel Ripka. **Magnetic Sensors and Magnetometers**. Boston, London : Artech House, Inc. 2001.
- [11] Jame W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell. **Instrumentation for Engineering Measurement**. 2nd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [12] Kelly S. **Fundamentals of Instrumentation**. 2nd ED. New York: Delmar cengage learning. 2008.
- [13] McCurrie R. A. **Ferromagnetic Materials Structure and Properties**. San Diego : Academic Press Limited, Inc. 1994.
- [14] Clayton R. Paul, Keith W. Whites, Syed A. Nasar. **Introduction to Electromagnetic Fields**. 3rd ED. Massachusetts: McGraw-Hill. 1998.
- [15] Cullity B. D. and Graham C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2nd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [16] Bertotti G. **Hysteresis in Magnetism**. California: Academic Press, Inc. 1998.
- [17] Smith William F. **Principles of Materials Science and Engineering**. 2nd ED. New York: McGraw-Hill. 1990.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [18] Michael Corral. **Trigonometry**. Scolcraft College : GNU Free Documentation License. 2009.
- [19] Hong Xiao. “Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology”. Prentice-Hall Inc., 2001
- [20] Ramsden E. Hall-Effect Sensors Theory and Applications. 2nd ED. Oxford:Elsevier, Inc. 2006.
- [21] R S Popovic. “Hall Effect Devices”. 2nd ED. IOP Publishing Ltd, 2004.
- [22] Athirot Mano, Narin Atiwongsangthong 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, Sep 2013.
- [23] อธิโรจน์ มะโน, สันติ ชาตรุประชีวิน, ลัดดาวัลย์ สุภาดี, ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง”, 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), pp. 1369-1372, 2010.
- [24] วชิระ น้อยหว่า, อริญชยา พันธุ์พำนัก, อธิโรจน์ มะโน, ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การศึกษาผลกระทบของความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้าฮอลล์ต่อความไว ในการทดสอบของหัววัดฮอลล์”, Proceeding of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015), 2015
- [25] วชิระ น้อยหว่า, อธิโรจน์ มะโน, ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การศึกษาสมบัติของหัววัดฟลานาร์ฮอลล์แบบสองมิติ” 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38), pp. 691-694, 2015



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ก.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์


ชื่อตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า/หน่วย
ประจุอิเล็กตรอน (Electron charge)	q	1.602×10^{-19} C
มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (Rest mass of an electron)	m_e	9.109×10^{-31} kg
ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)	k	1.381×10^{-23} J/K
		8.617×10^{-5} eV/K
ค่าคงที่ริชาร์ดสัน (Richardson's constant)	R	$110 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ (n-Si)
ค่าเปอร์มิตติวิตี้ในสุญญากาศ (Permittivity of free space)	ϵ_0	8.85×10^{-14} F/cm
ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของซิลิคอน (Dielectric constant of Silicon)	ϵ_s	11.8
		1.04×10^{-12} F/cm
ความหนาแน่นอินทรินซิกของซิลิคอนที่ 300 K	n_i	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

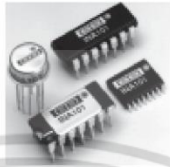
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลอุปกรณ์การประมวลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

Instrument Amplifier INA101





INA101

High Accuracy INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

- LOW DRIFT: 0.25 μ V/ $^{\circ}$ C max
- LOW OFFSET VOLTAGE: 25 μ V max
- LOW NONLINEARITY: 0.002%
- LOW NOISE: 13nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- HIGH CMR: 106dB AT 60Hz
- HIGH INPUT IMPEDANCE: 10¹⁰ Ω
- 14-PIN PLASTIC, CERAMIC DIP, SOL-16, AND TO-100 PACKAGES

APPLICATIONS

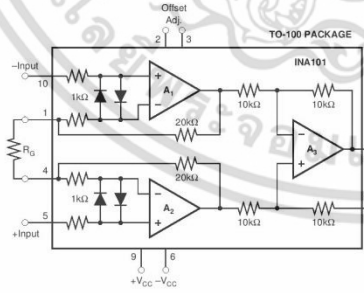
- STRAIN GAGES
- THERMOCOUPLES
- RTDs
- REMOTE TRANSDUCERS
- LOW-LEVEL SIGNALS
- MEDICAL INSTRUMENTATION

DESCRIPTION

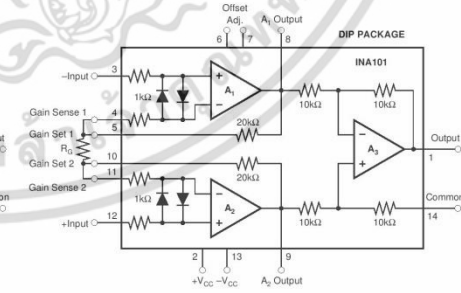
The INA101 is a high accuracy instrumentation amplifier designed for low-level signal amplification and general purpose data acquisition. Three precision op amps and laser-trimmed metal film resistors are integrated on a single monolithic integrated circuit.

The INA101 is packaged in TO-100 metal, 14-pin plastic and ceramic DIP, and SOL-16 surface-mount packages. Commercial, industrial and military temperature range models are available.

TO-100 PACKAGE



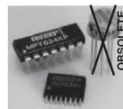
DIP PACKAGE



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALOG MULTIPLIER MPY634



MPY634

SBFS017A – DECEMBER 1995 – REVISED DECEMBER 2004

Wide Bandwidth PRECISION ANALOG MULTIPLIER

FEATURES

- WIDE BANDWIDTH: 10MHz typ
- $\pm 0.5\%$ MAX FOUR-QUADRANT ACCURACY
- INTERNAL WIDE-BANDWIDTH OP AMP
- EASY TO USE
- LOW COST

APPLICATIONS

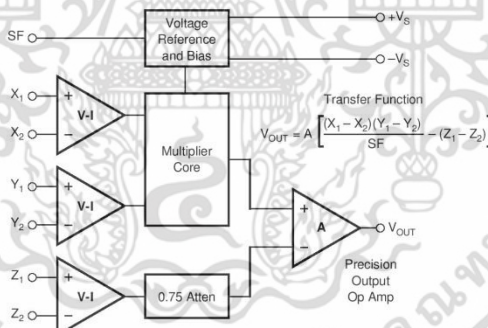
- PRECISION ANALOG SIGNAL PROCESSING
- MODULATION AND DEMODULATION
- VOLTAGE-CONTROLLED AMPLIFIERS
- VIDEO SIGNAL PROCESSING
- VOLTAGE-CONTROLLED FILTERS AND OSCILLATORS

DESCRIPTION

The MPY634 is a wide bandwidth, high accuracy, four-quadrant analog multiplier. Its accurately laser-trimmed multiplier characteristics make it easy to use in a wide variety of applications with a minimum of external parts, often eliminating all external trimming. Its differential X, Y, and Z inputs allow configuration as a multiplier, squarer, divider, square-rooter, and other functions while maintaining high accuracy.

The wide bandwidth of this new design allows signal processing at IF, RF, and video frequencies. The internal output amplifier of the MPY634 reduces design complexity compared to other high frequency multipliers and balanced modulator circuits. It is capable of performing frequency mixing, balanced modulation, and demodulation with excellent carrier rejection.

An accurate internal voltage reference provides precise setting of the scale factor. The differential Z input allows user-selected scale factors from 0.1 to 10 using external feedback resistors.



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.



Copyright © 1995-2004, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPERATIONAL AMPLIFIER

OPA2111

Dual Low Noise Precision *Difet*[®] OPERATIONAL AMPLIFIER

FEATURES

- LOW NOISE: 100% Tested, $8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ max at 10kHz
- LOW BIAS CURRENT: 4pA max
- LOW OFFSET: 500 μV max
- LOW DRIFT: 2.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- HIGH OPEN-LOOP GAIN: 114dB min
- HIGH COMMON-MODE REJECTION: 96dB min

APPLICATIONS

- PRECISION INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION
- TEST EQUIPMENT
- PROFESSIONAL AUDIO EQUIPMENT
- MEDICAL EQUIPMENT
- DETECTOR ARRAYS

DESCRIPTION

The OPA2111 is a high precision monolithic dielectrically isolated FET (*Difet*) operational amplifier. Outstanding performance characteristics allow its use in the most critical instrumentation applications. Noise, bias current, voltage offset, drift, open-loop gain, common-mode rejection, and power supply rejection are superior to BIFET[®] amplifiers.

Very low bias current is obtained by dielectric isolation with on-chip guarding.

Laser trimming of thin-film resistors gives very low offset and drift. Extremely low noise is achieved with patented circuit design techniques. A cascode design allows high precision input specifications and reduced susceptibility to flicker noise.

Standard dual op amp pin configuration allows upgrading of existing designs to higher performance levels.

BIFET[®] National Semiconductor Corp., *Difet*[®] Burr-Brown Corp.

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 • Cable: BBRCORP • Telex: 065-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] วชิระ น้อยหว่า, อธิโรจน์ มะโน, ขบา สุรียามรานนท์ และวิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การศึกษาสมบัติของหัววัดพลังงานร้อลล์แบบสองมิติ” The 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38), pp. 691-694, 2015



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

การศึกษาสมบัติของหัววัดฟลักซ์แบบสองมิติ

A Study on Characteristic of 2-D Planar Hall Sensor

วชิระ น้อยท้าว อธิโรจน์ มะโน ชนา สุริยาอนรรณท์ และวิสุทธิ์ จูฑูรัมย์เรือง

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนจตุพลางาม เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์: 023264222 E-mail: wachira.kmitl@gmail.com, manothiro@yahoo.com, ktwisut@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอถึงการศึกษาสมบัติของหัววัดฮอลล์แบบสองมิติ โดยศึกษาสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดได้ด้วยโครงสร้างที่ง่าย โดยโครงสร้างฮอลล์สองมิติที่ใช้ประกอบด้วยชั้นนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมสำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีขนาด 5 μm โดยมีพื้นที่ในการทดสอบขนาด $600 \times 300 \mu\text{m}^2$ ในการทดลองหัววัดฮอลล์สองมิติถูกนำมาทดสอบค่าการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม 0-180 องศา ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงในการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ขึ้นกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ นอกจากนี้ยังทดสอบความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากและแนวขนาน ด้วยความเข้มสนามแม่เหล็ก -5000 ถึง 5000 เกาส์ ผลของความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สามารถตอบสนองต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นสูง ผลการตอบสนองต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากมีความไวที่ 0.000097 mV/G และสำหรับการตอบสนองต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวขนานมีความไวที่ 0.000018 mV/G ซึ่งมีค่า (R^2) มีค่าอยู่ในช่วง 0.999-1.000 แสดงให้เห็นถึงความเข้มเชิงเส้นที่ดีเหมาะสมกับกรณีนำไปใช้สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสองทิศทางด้วยโครงสร้างที่ง่าย

คำสำคัญ: ความเข้มสนามแม่เหล็ก, ปรากฏการณ์ฮอลล์, หัววัดฮอลล์สองมิติ

Abstract

This research presents a study on characteristic of 2-D Hall device that can respond to magnetic field more than one dimension, perpendicular and parallel directions with simple structure. The structure of 2-D Hall device consists of the five aluminum sensitive ohmic contacts are made on p-type silicon substrate with active area as $600 \times 300 \mu\text{m}^2$. In the experiment, I-V characteristic is tested in order to confirm the ohmic contact properties. After that, the response of 2-D Hall device that depend on an angle 0-180 degree for magnetic field interact with Hall device was tested. And as the result of two signal

output are shown as sine and cosine function response. Also the sensitivity of 2-D Hall device was tested in magnetic flux density varied from -5,000 to 5,000 Gauss for perpendicular and parallel field response respectively. The linear were found. The sensitivity of perpendicular field response is 0.000097 mV/G and the parallel field response is 0.000018 mV/G respectively. Also the ranges of R^2 values are 0.999-1.000. Therefore, all of the results show appropriate of 2-D Hall device for two dimension of magnetic field response with a simple structure.

Keywords: Magnetic flux density, Hall effect, 2-D Hall sensor

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำเอาคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถอธิบายถึงลักษณะของอุปกรณ์แม่เหล็ก ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยส่วนใหญ่นิยมใช้หัววัดฮอลล์ เป็นส่วนประกอบหลัก เพื่อใช้ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยโครงสร้างของหัววัดที่นิยมใช้คือคอร์ดวงแหวน แมกนีโตไดโอด แมกนีโตทรานซิสเตอร์ และฮอลล์เพลต [1-3] เป็นต้น

โดยทั่วไปหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ นั้นมีข้อดีสำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้เพียงทิศทางเดียว คือ ในทิศทางฉาก ไม่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานได้ จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้หัววัดสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งทิศทาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการศึกษาสมบัติของหัววัดสองมิติแบบพลาแนรี ที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางทั้งในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัด

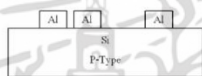
หัววัดฮอลล์แบบสองมิติที่ถูกนำมาศึกษานี้สร้างจากกระบวนการซิลิโคนที่ศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายประกอบด้วยชั้นนำไฟฟ้าสำหรับรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งหมด 5 ชั้น บนฐานรองซิลิโคนชนิดพี ที่มีสภาพความต้านทานประมาณ $30 \Omega\cdot\text{cm}$ โดยการทดสอบทำการทดลองถึงลักษณะของหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

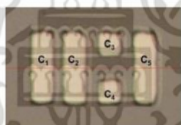
ไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ตลอดจนการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์และค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด โดยผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงกระบวนการสร้างรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี ซึ่งไม่ส่งผลต่อการตอบสนองของหัววัด และการตอบสนองของหัววัดมีความเป็นเชิงเส้นสูง สามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางได้เป็นอย่างดีทั้งในแนวตั้งและแนวนอน และงานวิจัยนี้ยังสามารถพัฒนาต่อยอดให้มีความสอดคล้องกับหลักการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่มีขั้วกับทิศทาง(4-5) รวมถึงการประยุกต์ใช้สำหรับงานที่ต้องการการตอบสนองมากกว่าหนึ่งทิศทางต่อไปในอนาคต

2. โครงสร้างและหลักการทำงานของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ

โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติโดยทำการออกแบบขึ้นเพื่อให้มีสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางด้วยโครงสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อนซึ่งโครงสร้างของหัววัดฮอลล์ถูกสร้างด้วยพอลิเมอร์ซิลิกอนเทคโนโลยีของไทยไบโอโรลิติกทรอนิกส์เซมิคอนดักเตอร์ (TMEC) โดยใช้เทคนิคสปีดเดอริงสร้างรอยต่ออะตอมแบบโอห์มมิกบนฐานรอยซิลิกอนชนิดที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า 30 Ω.cm ดังรูปที่ 1 แสดงภาพตัดขวางของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ



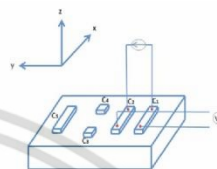
รูปที่ 2 ขั้วไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ

แผ่นที่สวมอะตอมเป็นแบบถูกกัดเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิก 5 ขั้ว แสดงขั้วโลหะนำไฟฟ้าดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยขั้ว C_1 , C_2 , C_3 , C_4 และ C_5 ซึ่งขั้ว C_1 , C_2 และ C_3 ใช้สำหรับจ่ายกระแสขั้ว C_4 และ C_5 ใช้สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางจาก C_1 และ C_2 เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอน ซึ่งมีพื้นที่ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก $600 \times 300 \mu m^2$

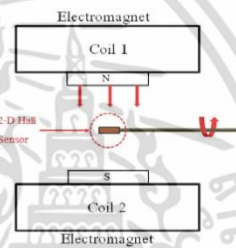
3. การทดลอง

ในการทดลองประกอบด้วยวงจรทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแม่เหล็กใน 2 ทิศทางของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ เริ่มจากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขั้ว C_1 และ C_2 แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่จุดมุ่งหมายของการทดลองนี้เพื่อที่จะพิจารณาลักษณะเฉพาะของรอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

ซึ่งไม่ใช่รอยสัมผัสแบบขดลวดที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ โดยทำการทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้า -0.1 ถึง 0.1 mA ผ่านขั้วไฟฟ้า C_1 ไปยัง C_2 และทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็ก โดยแสดงให้เห็นใน รูปที่ 3 และจากนั้นทำการทดลองหัววัดฮอลล์ 2 มิติ จะถูกทดสอบการตอบสนองสองทิศทางของทิศทางของสนามแม่เหล็ก ในทิศทางจาก (B_x) และทิศทางบน (B_z) กับหัววัดฮอลล์ 2 มิติ

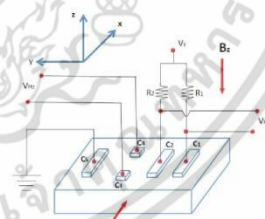


รูปที่ 3 แผนภาพการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 4 เครื่องมือของการทดสอบสมบัติทางแม่เหล็ก

ในรูปที่ 4 เป็นการทดลองการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ที่มุม 0-180 องศา เพื่อทดสอบการตอบสนองของหัววัดที่ขึ้นกับมุมของหัววัดภายใต้สนามแม่เหล็กคงที่ 5000 เกาส์

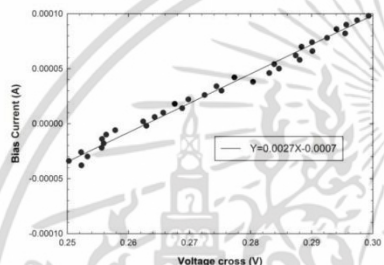


รูปที่ 5 ภาพการทำงานของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ

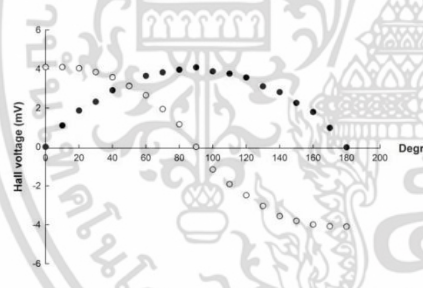
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.ผลการทดลอง

ในขั้นตอนแรกหัววัดฮอลล์ 2 มิติ ได้ทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของรอยต่อแบบโฮมมิก ระหว่างรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ในกราดทดลองทำการจ่ายกระแสผ่านขั้ว C₁, C₂ ที่ 0.1 ถึง 0.1 mA เข้าไปในเนื้อสารและทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม C₁, C₂ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นสาร แสดงดังกราฟในรูปที่ 6 จากความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องกับกฎของโอห์ม สามารถยืนยันผลได้ชัดเจนว่า รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นเป็นรอยต่อแบบโฮมมิก และไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ จึงขึ้นไปตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้



รูปที่ 6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อแบบโฮมมิก



รูปที่ 7 กราฟการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มุมต่างๆของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ

การทดสอบเพื่อแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มุมต่างๆ 0-180 องศา จากกราฟ แสดงให้เห็นถึงหัววัดฮอลล์ มี

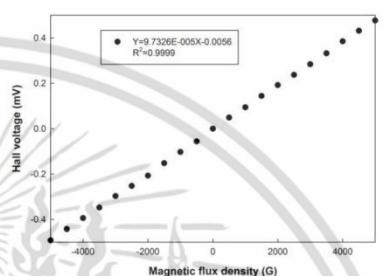
การตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ดังกราฟ รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1),(2) [4-5]

$$V_{Hz} = k_1 \sin\theta \tag{1}$$

สำหรับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวขนานสามารถเขียนได้ว่า

$$V_{Hx} = k_2 \cos\theta \tag{2}$$

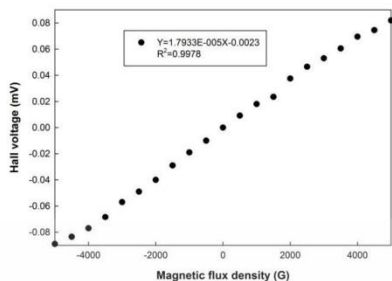
โดยที่ k₁ และ k₂ คือค่าคงที่ของฮอลล์



รูปที่ 8 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก (B_y)

จากนั้นพิจารณาการตอบสนองสมบัติทางแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์ 2 มิติที่ได้ออกแบบขึ้น โดยในการทดลองหัววัดฮอลล์ 2 มิติตั้งอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก -5000 ถึง 5000 เกาส์ ของสองเงื่อนไข เงื่อนไขแรกคือสนามแม่เหล็กมีทิศทางจาก (B_y) และเงื่อนไขที่สองสนามแม่เหล็กมีทิศทางบน (B_x) กับหัววัดฮอลล์ 2 มิติ ที่มีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปลง -5000 ถึง 5,000 เกาส์ ดังรูปที่ 8 เงื่อนไขแรกทิศทางของสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ 2 มิติ โดยกระแสที่จ่ายมีค่าเท่ากับ 1 mA จ่ายเข้าที่ขั้ว C₁, C₂ และ C₃ ผ่านด้านทานสองตัวที่เชื่อมต่อกับ C₁ และ C₂ การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กตั้งฉากจะถูกวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขั้ว C₁, C₂ รูปที่ 8 แสดงการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ 2 มิติที่มีทิศของสนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศตั้งฉากซึ่งมีลักษณะการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ Y = 0.000097X - 0.0056 และมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.000097 mV / G ซึ่งพิจารณาจากค่าความชันของสมการเชิงเส้น ผลการทดลองยังสามารถแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของฮอลล์ในทิศทางอื่นและพุ่งออกกระทำในพื้นที่ตอบสนองของหัววัดฮอลล์ 2 มิติ ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนาน (B_y)

สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ส่งทิศของสนามแม่เหล็กจะมีทิศทาง (B_y) กับ หัววัดฮอลล์ 2 มิติและวัดแรงดันไฟฟ้าให้ฮอลล์ ที่หัว C₁C₂ ที่แสดงให้เห็นใน รูปที่ 5 และมีารตอบสนองแบบเชิงเส้นตามสมการ $Y=1.7933E-005X-0.0023$ ซึ่งมีควมไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.000018 mV/G แสดงในกราฟ รูปที่ 9 ดังนั้นทุกผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงข้อดีของ หัววัดฮอลล์ 2 มิติ ที่สามารถตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งทิศทาง คือตอบสนองในทิศทาง (B_x) และในทิศทาง (B_y) โดยอาศัยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

5.สรุปผลการวิจัย

หัววัดฮอลล์แบบสองมิติเป็นผลรวมของทั้งชิ้นการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดฮอลล์เข้าไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้มากกว่าหนึ่งทิศทาง กล่าวคือสามารถวัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดได้เป็นอย่างดี ซึ่งลักษณะการตอบสนองของหัววัดมีความเป็นเชิงเส้นสูง โดยผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากมีความไวเท่ากับ 0.000097 mV/G และในทิศทางแนวตั้งฉากมีความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 0.000018 mV/G เป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์สอดคล้องกับสมการที่ตั้งสมมติฐานสำหรับการออกแบบเป็นอย่างดี ด้วยข้อดีของหัววัดที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางและมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนจึงสามารถที่จะพัฒนาสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในสองทิศทางต่อไปได้ในอนาคต

6.ลิติศกรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (IMEC) และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการสร้างและการทดสอบสมบัติของหัววัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] R S Popovic. Hall Effect Devices. 2nd ED. IOP Publishing Ltd, 2004.
- [2] Sze S. M. and Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ED. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [3] Dieter K.Schroder, Semiconductor material and device characterization. John Wiley&Sons, New York, 1990.
- [4] อธิโรจน์ มะโน, สันติ ชาครุประวีร์, ถัดดาวัลย์ สุภาคี, ชบา สุริยอภรณ์ และวิศุทธิ์ จูฑิรุ่งเรือง “การวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง”,การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33), pp. 1369-1372, 2553.
- [5] Athirot Mano, Narin Atiwongsangthong 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, Sep 2013.
- [6] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley&Sons, New York, Inc., 1986.

ประวัติผู้เขียนบทความ



วิศิระ น้อยหน้า ปรวัติกรศึกษาจบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



อธิโรจน์ มะโน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.



ดร.วิศุทธิ์ จูฑิรุ่งเรือง สำเร็จการศึกษา DOCTOR OF ENGINEERING จาก TOKAI UNIVERSITY ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิระ น้อยหว่า
วัน เดือน ปีเกิด	17 ธันวาคม 2534
ที่อยู่	127 หมู่ 3 ตำบลท่าศิลา อำเภอสองดาว จังหวัดสกลนคร 47190
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ประยุกต์ (โซลิตสเตทอิเล็คทรอนิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] “การศึกษาผลกระทบของความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้าฮอลล์ต่อความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์” Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015), 27-29 May 2015, Pattaya, Thailand.
- [2] “การศึกษาสมบัติของหัววัดพลาสมาฮอลล์แบบสองมิติ” 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38), pp. 691-694, 2015.
- [3] “การศึกษาสมบัติของหัววัดฮอลล์แบบสองมิติและการประยุกต์ใช้งาน” Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016), pp. 173-176, 2016
- [4] “การสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติต้นทุนต่ำบนพื้นฐานเทคโนโลยีซิลิคอน” Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016), pp. 165-168, 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้