

หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสำหรับประยุกต์ใช้งานในการวัดมุม
TWO DIMENSIONS HALL DEVICE FOR ANGLE MEASUREMENT
APPLICATION

เคมีชญญา สัมภาวะผล
KHEMCHANYA SAMBHAVAPHALA

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสำหรับประยุกต์ใช้งานในการวัดมุม
TWO DIMENSIONS HALL DEVICE FOR ANGLE MEASUREMENT
APPLICATION

เขมชัญญา สัมภาวะผล
KHEMCHANYA SAMBHAVAPHALA

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

TWO DIMENSIONS HALL DEVICE FOR ANGLE MEASUREMENT
APPLICATION

KHEMCHANYA SAMBHAVAPHALA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2559
สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสำหรับประยุกต์ใช้งานในการวัดมุม
Two-Dimensions Hall Device for Angle Measurement Application
ผู้จัดทำ นางสาวเข็มชัยญา สัมภาวะผล รหัสประจำตัว 55010114

รายงานนี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสำหรับประยุกต์ใช้งานในการวัด มุม
นักศึกษา	นางสาวเข็มชัยญา สัมภาวะผล
รหัสนักศึกษา	55010114
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติโดยวัดได้ทั้งในทิศตั้งฉากและขนาน ซึ่งห้ววัดสนามแม่เหล็กนี้จะทำการขยายสัญญาณโดยผ่านวงจรขยายเพื่อที่จะเห็นค่าความไวในการตอบสนองที่ดีขึ้น และใช้โปรแกรม Lab-View ในการติดต่อกับบอร์ดคอนโทรลเลอร์เพื่อรับข้อมูลที่อ่านได้มาแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ แล้วนำผลที่ได้มาทำการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน Gauss meter รุ่น F.W Bell 5170 เพื่อประยุกต์ใช้งานสำหรับการวัดมุม ซึ่งในการทดลองจะทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้ววัดฮอลล์ทั้งสองแนวแกน การวัดมุมจะใช้ฟังก์ชันไซน์และโคไซน์เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสอง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองแนวแกนและนำไปประยุกต์ใช้งานในการวัดมุมได้

Thesis Title	Two Dimensions Hall Device for Angle Measurement Application
Student	Miss.Khemchanya Sambhavaphala
Student ID.	55010114
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This project presents a fabricant of two-dimensional hall device which respond to perpendicular and parallel dimensional of magnetic field interact to device. The signal is passed in amplifier for better sensitivity. And amplified signal is connected to the micro-controller board for showing the result on computer screen using Lab-View program. The result will be calibrated with standard measurement tool Gauss meter (F.W Bell 5170). In the experiment, this device is tested to respond to perpendicular and parallel dimensional magnetic field. And angle measurement corresponding to sine and cosine function. As the result show that device be capable of magnetic sensing in multi-directional and angle measurement.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยคำแนะนำจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ในการวางแผนการทำรายงานตลอดจนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณยงยุทธ แก้วจรัส นักศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตใน ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้า

เขมชัยญา สัมภาวะผล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	3
2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)	3
2.1.1 ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อจุดประจุในปรากฏการณ์ฮอลล์.....	6
2.1.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในโลหะ	10
2.1.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ	12
2.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	15
2.2.1 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	15
2.2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ตามฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	18
บทที่ 3 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติและวิธีการทดลอง	25
3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติ	25
3.1.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติ	25

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง	27
3.3 วิธีการทดลอง	28
3.3.1 การทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิคของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	28
3.3.2 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อแม่เหล็กของ Hall Device (เมื่อไม่มีวงจรรขยาย)....	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	34
4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ (ความเป็นโอห์มมิค).....	34
4.2 ผลการทดลองคุณสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ (เมื่อไม่มีวงจรรขยาย).....	36
4.2.2 ผลการทดลองคุณสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์	37
4.2.2 ผลการทดลองคุณสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดฮอลล์.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	49
บรรณานุกรม.....	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างห้วัดฮอลล์ 2 มิติทั้ง 3 โครงสร้าง	22
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 ขั้วในโครงสร้างที่ 3 ของตัวอุปกรณ์ และเปรียบเทียบความต้านทานโอห์มมิระหว่างขั้ว	27
4.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และแสดงความต้านทานระหว่างขั้วของขั้วไฟฟ้า C3-C4 ในแต่ละโครงสร้างของตัวอุปกรณ์	28
4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของแต่ละโครงสร้างเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับตัวอุปกรณ์	31
4.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของแต่ละโครงสร้างเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับตัวอุปกรณ์	34
4.5 เปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เครื่องมือมาตรฐานวัดได้	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	3
2.2 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ V_H	4
2.3 ผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับประจุพาหะภายในสารของแข็ง	6
2.4 ผลของสนามแม่เหล็กต่อการเคลื่อนที่ของจุดประจุ	8
2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นตัวนำ.....	9
2.6 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ.....	14
2.7 ความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x, y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย.....	16
2.8 กราฟฟังก์ชันไซน์สำหรับพิกัดจุด y บนวงกลมหนึ่งหน่วย.....	17
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \sin x$	17
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันโคไซน์	18
2.11 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ	19
2.12 การเลื่อนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์	20
3.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	21
3.2 อุปกรณ์ทดลองฮอลล์และโครงสร้างภายใน.....	21
3.3 Electromagnet	23
3.4 Gauss meter	23
3.5 Power supply	23
3.6 Multimeter.....	24
3.7 การทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิกของหัววัดฮอลล์สองมิติ	25
3.8 การทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ	26
4.1 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 ขั้วในโครงสร้างที่ 3 ของตัวอุปกรณ์.....	26
4.2 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของขั้วไฟฟ้า C3-C4 ในแต่ละโครงสร้างของตัวอุปกรณ์.....	27
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตั้งฉากในโครงสร้างที่ 1	29
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตั้งฉากในโครงสร้างที่ 2	29
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตั้งฉากในโครงสร้างที่ 3	30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแต่ละโครงสร้างเมื่อ จ่ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์.....	30
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขนานอุปกรณ์ตัวที่ 1	32
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขนานอุปกรณ์ตัวที่ 2	32
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขนานอุปกรณ์ตัวที่ 3	33
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแต่ละอุปกรณ์เมื่อ จ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดฮอลล์.....	33
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรรยอกกำลังสองกับค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก ไฟฟ้าในแนวขนาน.....	43
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรรยอกกำลังสองกับค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก ไฟฟ้าในทิศตั้งฉาก	44
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกรวมสัญญาณกับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า ในแนวขนาน	44
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกรวมสัญญาณกับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า ไฟฟ้าในทิศตั้งฉาก	45
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถอดราก็สองกับค่าความเข้มข้นไฟฟ้าใน แนวขนาน	45
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถอดราก็สองกับค่าความเข้มข้นไฟฟ้าในทิศตั้ง ฉาก	46
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่กับมุมที่เปลี่ยนแปลง	47
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้ กับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่เครื่องมือมาตรฐาน	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กสองมิติ และนำหัววัดสนามแม่เหล็กสองมิตินี้มาประยุกต์ใช้ทำเป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก โดยต่อกับวงจรขยายเพื่อเพิ่มค่า Gain (Av) ให้มากขึ้น และนำไปประยุกต์ใช้กับการวัดมุม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฮอลล์ รวมถึงกลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ สำหรับประยุกต์ใช้สร้างเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบ 2 มิติ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็ก 2 มิติแบบฮอลล์ที่สร้างขึ้น
3. เพื่อศึกษาแล้วนำผลที่ได้ไปทำการขยายให้ gain มีค่ามากขึ้นเพื่อให้ค่า sensitivity มีค่าสูงขึ้น
4. เพื่อนำผลการคำนวณ hall voltage ให้เป็นค่าสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม Lab – View
5. เพื่อนำไปทำเป็น Gauss meter ที่มีคุณสมบัติเทียบเคียง กับ F.W BELL 5170
6. เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการวัดมุม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เป็นการศึกษาพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยใช้เทคนิคการวัดของสนามแม่เหล็กซึ่งสามารถตอบสนองได้ใน 2 ทิศทาง ที่ให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ภายในสนามแม่เหล็กกระทำในทิศตั้งฉากและขนาน ซึ่งการทดลองนี้เมื่อเราสามารถศึกษาและจัดทำตัวฮอลล์เซนเซอร์ที่สามารถวัดได้ใน 2 ทิศทางของสนามแม่เหล็กได้แล้ว ในการวิจัยนี้จึงได้มีการนำมาประยุกต์ เพื่อศึกษาและจัดทำเป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโดยจะทำการวัดได้ใน 2 ทิศทาง (Gauss meter) โดยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กนี้ต้องมีการจัดท่วงจรขยายเพื่อที่จะเห็นค่าการตอบสนองที่มากขึ้น ซึ่งแสดงผลโดยใช้โปรแกรม Lab-view ใช้ฟังก์ชันไซน์และโคไซน์เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองในการวัดมุม

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทำการวัดคุณสมบัติของฮอลล์ โดยทำการวัดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของฮอลล์
2. วัดทิศทางของสนามแม่เหล็ก เพื่อใช้ข้อมูลบอกถึงความไวต่อการตอบสนองของฮอลล์ที่สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กได้อย่างถูกต้อง
3. ทำวงจรรขยายเพื่อทำการเพิ่มค่าSensitivityให้ดีขึ้น
4. นำผลการขยายจากวงจรรขยายแบบ Analog ไปแปลงเป็น Digital เพื่อนำผลลัพธ์ทาง Digital ไปแสดงผลบนโปรแกรม Lab-view
5. ใช้ฟังก์ชันไซน์และโคไซน์เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองเพื่อการวัดมุม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

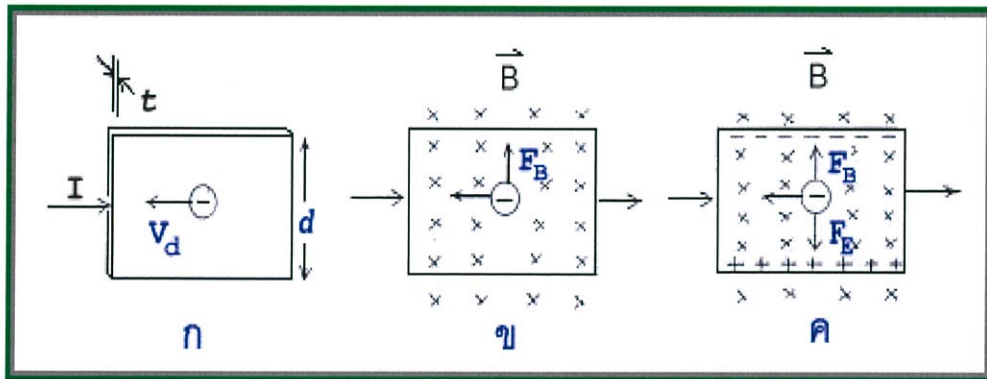
1. ได้ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์
2. ทราบถึงโครงสร้างสำหรับการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์
3. สามารถทดสอบการทำงานและการตอบสนองของฮอลล์ที่ค่าสนามแม่เหล็กต่างๆ
4. สามารถนำ Hall device ไปประยุกต์ทำเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่สามารถวัดได้ใน2ทิศทาง
5. ทราบถึงคุณสมบัติของวงจรรขยายอีกทั้งยังสามารถนำผลลัพธ์ทางดิจิตอลไปแสดงผลบนโปรแกรมLab-viewได้
6. ทำอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้ในการวัดมุมได้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวินฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปคินส์ ซึ่งในขณะนั้นมีอายุ 24 ปี ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์



รูปที่ 2.1 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อาจอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.1 ดังนี้

-รูป 2.1ก แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง d หนา t และมีกระแสไฟฟ้า (conventional current) I ผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน v_d) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า I จากด้านขวาไปด้านซ้าย

-รูป 2.1ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางหรือกระดาษ จะเกิดแรงแม่เหล็ก F_B กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง

-รูป 2.1ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (hall field) E_H ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไป

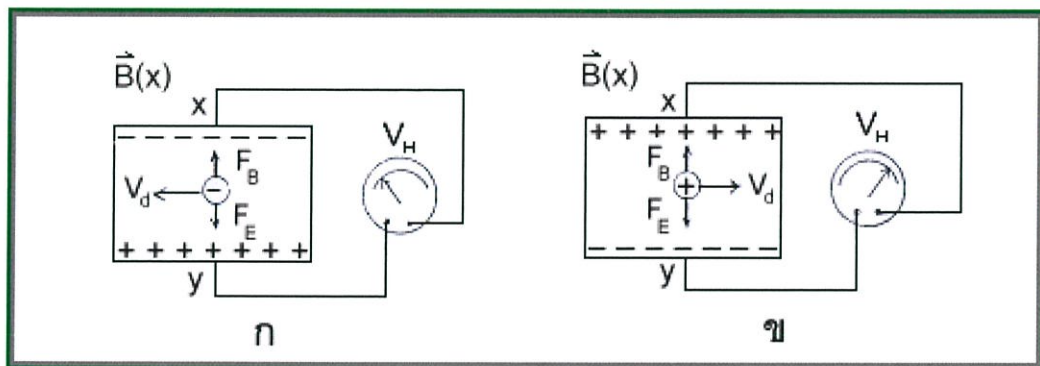
ขอบด้านบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า F_E กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบน

สนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลเตจ V ดังนี้

$$E_H = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

ความต่างศักย์หรือโวลเตจที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (hall potential difference หรือ hall voltage) V_H พบว่า ความต่างศักย์ฮอลล์มีค่ามากที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำบางทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน และเจอร์เมเนียม ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่ามาก (เหตุผล พิจารณาได้จากสมการ (2.2) หรือสมการ (2.3) ในตอนท้ายจากสมการ (2.1) จะได้ว่า

$$V_H = E_H d \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ V_H

เราสามารถวัด V_H โดยต่อ มิลลิโวลต์มิเตอร์เข้ากับจุด x และจุด y ดังรูป 2.2 สภาพัฒของ V_H ทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จาก มิลลิโวลต์มิเตอร์

จากรูป 2.2ก พาหะประจุคืออิเล็กตรอนจึงมีประจุลบ ถ้าพาหะประจุมีประจุบวก ทิศของ V_d และ E_H จะตรงข้ามกับในรูป 2.2ก แต่ทิศของ F_B และ E_E ยังคงเดิม ดังแสดงในรูป 2.2ข ทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านขวา ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านซ้าย และสภาพัฒของ V_H จะตรงข้ามกับกรณีที่พาหะประจุมีประจุลบ จากรูปที่ 2.2ข ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน เราจะได้

$$(-e)E_H = (-e)V_d B \quad (2.3)$$

$$E_H = V_d B$$

จากสมการ (2.2) จะได้

$$V_H = E_H d \quad (2.4)$$

$$V_H = V_d B d$$

เนื่องจากอัตราเร็วลอยเลื่อน V_d มีค่า

$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (2.5)$$

เมื่อ n คือจำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร (หรือความหนาแน่นของพาหะประจุ) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง แทนสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.4) จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (2.6)$$

เนื่องจาก $t = \frac{d}{A}$ คือความหนาของแผ่นตัวนำบาง ดังนั้น

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (2.7)$$

สมการ (2.7) เขียนได้ใหม่เป็น

$$B = neti^{-1} V_H \quad (2.8)$$

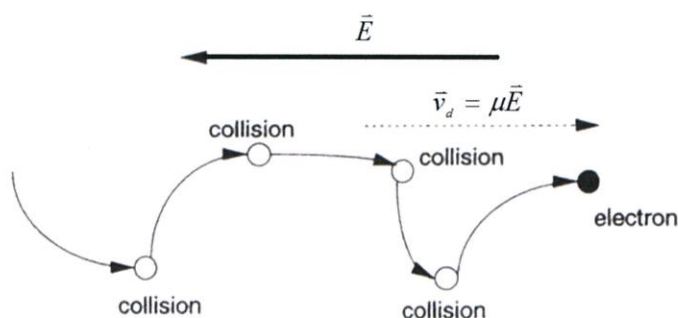
ปริมาณ V_H และ t ในสมการ (2.8) หาได้จากการวัด ส่วนค่า n ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนฉนวนมีจำนวนพาหะประจุน้อยมาก แต่ก็ยอมให้

กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยผ่าน จากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำที่เจือสิ่งเจือปนมีค่า $n = 10^{22} \text{ m}^{-3}$ และโลหะทั่วไปมีค่า $n = 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ดังนั้น เราจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการ (2.7) ได้

ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นเทสลา (tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์ T หน่วยเดิมของความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ เกาส์ (gauss) แทนด้วยสัญลักษณ์ G โดยที่ $1\text{T} = 10^4 \text{ G}$

2.1.1 ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อจุดประจุในปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการศึกษาหัววัดเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบค่าสนามแม่เหล็กหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย ทฤษฎีของสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ ลำดับแรกจะกล่าวถึงสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในสารของแข็งก่อน ดังนั้นเมื่อสร้างความต่างศักย์ระหว่างสองตำแหน่งบนชิ้นสารของแข็ง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศจากศักย์มากพุ่งไปหาศักย์น้อยแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยแรงที่กระทำกับจุดประจุ เป็นผลเนื่องมาจากสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 ผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับประจุพาหะภายในสารของแข็ง

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.9)$$

ซึ่งการเคลื่อนที่ของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า การดริฟท์(Drift) โดยมีความเร็วของพาหะจะถูกจำกัดโดยการชนที่เกิดขึ้นกับพาหะนั้นๆ เรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วดริฟท์ (Drift Velocity) ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นความเร็วดริฟท์เฉลี่ย หรือ ความเร็วเฉลี่ยของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้าในสารของแข็งมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.10)

$$v_d = \mu E \quad (2.10)$$

สำหรับในกรณีของสนามแม่เหล็กจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของจุดประจุที่หยุดนิ่ง เว้นแต่จะมีการเคลื่อนที่ด้วยแรงอื่น ๆ มากกระทำ เช่น แรงจากสนามไฟฟ้า เป็นต้น โดยแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของประจุ และสำหรับแรงของสนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุ โดยจะขึ้นกับฟังก์ชันความเร็วของประจุพาหะ ความเข้มสนามแม่เหล็ก และทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับประจุสามารถหาได้ตามสมการ (2.11)

$$F = qvB\sin\theta \quad (2.11)$$

การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ต้องมีความเข้าใจถึงอนุภาค เช่น อิเล็กตรอน ที่มีการเคลื่อนที่ ภายใต้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้านี้ส่งผลต่อจุดประจุสามารถอธิบายได้จากสมการ (2.12)

$$F = qE + qvB\sin\theta \quad (2.12)$$

โดยที่ F คือ ฟังก์ชันของแรง

E คือ สนามไฟฟ้า

v คือ ความเร็วของประจุ

B คือ สนามแม่เหล็ก

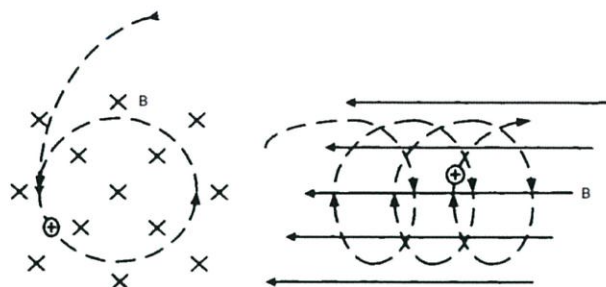
q คือ ประจุไฟฟ้า

θ คือ มุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุ

ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ซึ่งในสมการของลอเรนซ์นี้ ค่าประจุไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งบนระนาบ x, y, z โดยในสมการของลอเรนซ์จะแบ่งปรากฏการณ์ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ประจุตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า และการตอบสนองของการเคลื่อนที่ของประจุต่อสนามแม่เหล็ก

ในกรณีของสนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดแรงทางไฟฟ้ากระทำกับจุดประจุ เกิดการเคลื่อนที่ของประจุพาหะและเกิดกระแสภายในชิ้นสารขึ้น ซึ่งแรงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดของประจุไฟฟ้าและปริมาณความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า

สำหรับในส่วนที่สองเป็นการแสดงการตอบสนองของประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้การเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงเป็นแนวโค้งหรือหมุนเป็นเกลียว แสดงให้เห็นดังรูป 2.4 ซึ่งขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 ผลของสนามแม่เหล็กต่อการเคลื่อนที่ของจุดประจุ

ในกรณีของประจุพาหะที่เคลื่อนที่ในชั้นสารฮอลล์ ความเร็วของประจุพาหะจะมีความหนาแน่นไปในทิศทางหนึ่งของวัสดุดังรูป 2.4 โดยข้อที่ใช้ต่อออกมาเพื่อวัดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กนี้ จะถูกต่อคร่อมชั้นสารโดยกำหนดให้พาหะมีความเร็วเคลื่อนที่ไปในระนาบแกน x ($v_y = 0$ m/s , $v_z = 0$ m/s) และผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เกิดขึ้นในแกน x แสดงถึงแรงสนามแม่เหล็กที่กระทำกับจุดประจุในแนวแกน x ดังสมการ (2.13)

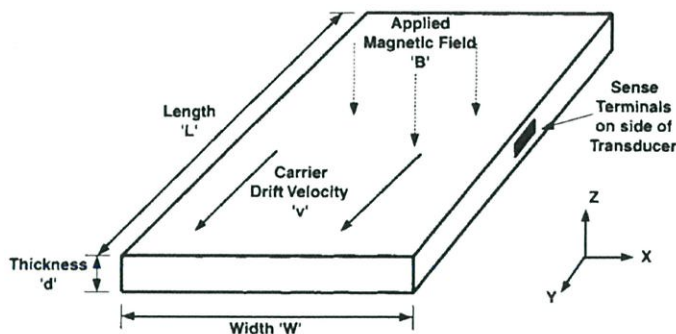
$$F_x = q_0 v_y B_z \quad (2.13)$$

โดยที่ q_0 คือ ประจุไฟฟ้า

v_y คือ ความเร็วของจุดประจุแนวแกน y

B_z คือ สนามแม่เหล็กแนวแกน z

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



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นตัวนำ

จากรูปที่ 2.5 สามารถหาสนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field) จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กดังสมการ (2.14)

$$q_0 E_H + q_0 v \times B_{\perp} = 0 \quad (2.14)$$

โดยที่ E_H คือสนามไฟฟ้าฮอลล์ ที่เกิดในชั้นสาร E_H จะมีค่าตามสมการ

$$E_H = -v \times B_{\perp} \quad (2.15)$$

โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของความเร็วประจุพาหะและความเข้มของสนามแม่เหล็ก สำหรับชั้นสารที่มีความกว้างเป็น w ระหว่างขั้วทั้งสอง สามารถหาศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมได้จากการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นความกว้าง w ได้ตามสมการ (2.16)

$$V_H = -wvB_{\perp} \quad (2.16)$$

ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Voltage, V_H) จะเป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับฟังก์ชัน ทั้ง 3 คือ

1. ความเร็วของจุดประจุสำหรับชั้นสารใด ๆ
2. ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้กับชั้นสาร
3. ระยะของขั้วต่อที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก

2.1.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในโลหะ

ค่าความไว (Sensitivity) ของวัสดุฮอลล์ เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้รู้ถึงความเร็วเฉลี่ยของพาหะสภาวะของอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระเป็นผลมาจากพลังงานความร้อน (Thermal Velocity) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) เป็นความเร็วอันเนื่องมาจากความร้อนมีผลเป็นอย่างมากต่ออิเล็กตรอน การเคลื่อนที่แบบสุ่มนี้จะนำไปเฉลี่ยเป็นความเร็วสุทธิ ค่าความเร็วรวมที่ได้จึงเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จะทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน เมื่อมีค่าสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นให้กับวัสดุฮอลล์ที่เป็นโลหะ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งไปในแนวทิศของสนามไฟฟ้า ที่มีค่ามากกว่าการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากพลังงานความร้อน ดังนั้นอัตราการเคลื่อนที่ของพาหะที่เกิดจากสนามไฟฟ้านี้ ถูกเรียกว่า ความเร็วดริฟท์

ในกรณีที่เป็นโลหะนำไฟฟ้าอย่างดีสามารถที่จะประมาณค่าได้ ในขั้นแรกจะทำการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับกรณีของโลหะ เช่น ทองแดง สามารถประมาณได้ว่าอะตอมของทองแดงมีอิเล็กตรอนชั้นวงนอกสุดที่ทำให้เกิดการไหลของกระแส ซึ่งความหนาแน่นของประจุพาหะมาจากผลของปริมาณอะตอมของทองแดงต่อหน่วยน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จาก

$$N = \frac{N_A}{M_m} D \quad (2.17)$$

โดยที่ N คือจำนวนของพาหะต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

N_A คือค่าคงที่อะโวกาโดร ($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

M_m คือมวลโมเลกุล ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)

D คือความถ่วงจำเพาะของทองแดง (g / cm^3)

ตัวอย่างการหาจำนวนของพาหะต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กรณีของทองแดงซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ $63.55 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ $8.89 \text{ g} / \text{cm}^3$ ดังนั้นค่าจำนวนของพาหะจะได้ $8.42 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ สามารถประมาณค่าความเร็วดริฟท์ของพาหะได้จาก กระแสที่อยู่ในหน่วยแอมแปร์ สมมติให้ค่าความหนาแน่นของพาหะเป็นค่าคงที่ และเพิ่มปริมาณพาหะ ในระบบได้ ความเร็วของพาหะจะแปรผันกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ยิ่งพื้นที่หน้าตัดมีค่ามาก ค่า ความเร็วเฉลี่ยของพาหะลดลง ดังนั้นความเร็วดริฟท์ของพาหะสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.18)

$$v = \frac{I}{q_0 NA} \quad (2.18)$$

ที่ I คือกระแส

q_0 คือค่าประจุอิเล็กตรอน ($1.66 \times 10^{-19} C$)

N คือความหนาแน่นของพาหะต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

A คือพื้นที่หน้าตัด

ผลที่เกิดขึ้นคือความเร็วของพาหะในวัสดุโลหะ ที่เคลื่อนที่อันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้านี้ เคลื่อนที่ผ่านวัสดุด้วยความเร็วประมาณเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วแสงที่พิจารณาต่างกันตามขนาด ของขดลวดต่อกระแสหนึ่งแอมแปร์ พบว่าความเร็วของพาหะในขดลวดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัด 0.0078 ตารางเซนติเมตร จะมีความเร็วดังนี้

$$v = \frac{1A}{1.6 \times 10^{-19} C \cdot 8.42 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \cdot 0.0078 \text{ cm}^2} = 0.009 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

เมื่อพิจารณาถึงความเร็วของพาหะดังตัวอย่างพบว่าจะมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วแสง เมื่อทำการรวมสมการ (2.17) และ (2.18) สามารถที่จะพิสูจน์เพื่อใช้ในการอธิบาย ค่าความไว ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับพื้นที่หน้าตัด กระแสและความหนาแน่นของพาหะหาได้ตามสมการ (2.19)

$$V_H = \frac{IB}{q_0 Nd} \quad (2.19)$$

โดยที่ d คือ ความหนาของชั้นสารตัวนำ

เมื่อพิจารณาในกรณีของปรากฏการณ์ที่เกิดในโลหะชนิดทองแดง ซึ่งเป็นไปดังรูป 2.5 โดยใช้กระแส 1 A ความหนาของวัสดุประมาณ $25\mu\text{m}$ สร้างสนามแม่เหล็กให้กระทำตั้งฉากกับวัสดุประมาณ 1 เทสลา(10^4 G) ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V = \frac{1\text{A} \cdot 1\text{T}}{1.66 \times 10^{-19}\text{ C} \cdot 8.42 \times 10^{22}\text{ cm}^{-3} \cdot 25 \times 10^{-6}\mu\text{m}} = 3.0 \times 10^{-6}\text{ V}$$

ในกรณีตัวอย่างที่ใช้คำนวณนี้ใช้ในหน่วย SI สำหรับในกรณีนี้ที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น 10,000 เกาส์ ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้ โลหะเพื่อสร้างเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่อยู่บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์

2.1.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

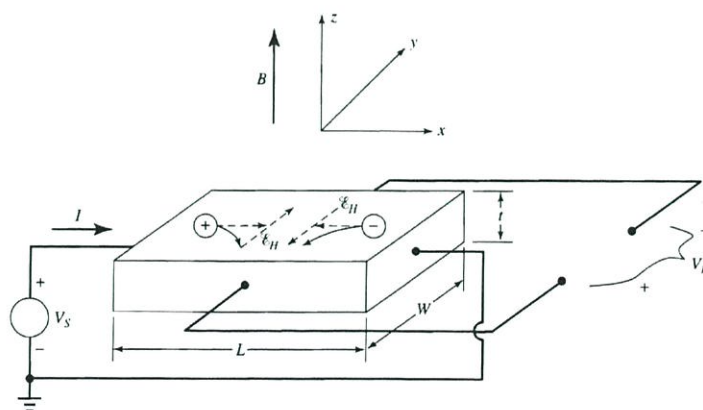
สำหรับวัสดุศาสตร์ที่จำแนกประเภทตามคุณสมบัติทางไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็นสามประเภท คือ ตัวนำ ฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในกรณีที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นิยมใช้สารกึ่งตัวนำเป็นหลักวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ เช่น ซิลิกอน (Si), เยอรมันเนียม(Ge), แกลเลียม(Ga)เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวนำและฉนวนอย่างชัดเจน กล่าวคือ ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าขึ้นกับอุณหภูมิและแสงจากภายนอกที่มากกระทำในวัสดุ โดยวัสดุชนิดนี้เมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือที่เหมาะสมคุณสมบัติการนำไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คุณสมบัติดังกล่าวที่มีความเหมาะสมสำหรับทำการสร้างเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางฟิสิกส์ในธรรมชาติ เช่น แสง อุณหภูมิ เป็นต้น รวมถึงการวัดปริมาณความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ มาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆอย่างกว้างขวาง สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดสนามแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก(Intrinsic semiconductor) และสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก(Extrinsic Semiconductor) ด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุทั้งสองชนิดที่ต่างกัันนี้ เมื่อนำมาประดิษฐ์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กการตอบสนองของวัสดุทั้งสองชนิดจึงแตกต่างกัน โดยจะทำการวิเคราะห์ในเรื่องของความหนาแน่นของพาหะที่มีผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเป็นหลัก

2.1.3.1 ปฏิกิริยาฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็ทรินซิก

ปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของแรงภายนอกกระทำกับจุดประจุ (Charge) ที่เคลื่อนที่โดยแรงที่กระทำนี้เนื่องจากสนามแม่เหล็ก โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของจุดประจุ โดยผลของเวกเตอร์ที่เกิดขึ้น เกิดจาก Cross product ซึ่งปริมาณเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามทิศทางของมุมสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ตามฟังก์ชันไซน์

ผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมธาตุอื่น ซึ่งจะประกอบไปด้วยพาหะส่วนใหญ่หนึ่งชนิด ตามอะตอมธาตุสารเจือที่ใช้ โดยจะทำการพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือ พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนกับโฮล

กระแสต่อประจุพาหะโฮลและอิเล็กตรอนในชิ้นสาร จะมีแรงจากสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของประจุพาหะทั้งสอง ในสภาวะคงตัว ด้วยแรงจากสนามแม่เหล็กที่สมดุลนี้เป็นผลทำให้จุดประจุเคลื่อนที่อีกทิศทางหนึ่ง การกระจายตัวของพาหะจึงเปลี่ยนไป เกิดเป็นการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งขึ้น โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field; \mathcal{E}_H) [6]-[9] เมื่อทำการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของความกว้างชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ผลที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากพื้นผิวรอยสัมผัสตรงกันข้ามกันของชิ้นสารกึ่ง ตัวนำที่ใช้ ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ขึ้นกับรูปแบบของชิ้นสารและสนามแม่เหล็กที่กระทำเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์และความกว้างของชิ้นสาร (W) ; $V_H = \mathcal{E}_H W$



รูปที่ 2.6 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

ในรูปที่ 2.6 กระแสที่ไหลในชิ้นสารแนวแกน x ที่เกิดจากความต่างศักย์ V_s เป็นผลทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกับกระแส ในกรณีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทางตรงกันข้าม โดยที่พาหะทั้งสองมีค่าประจุที่ต่างกันทำให้เกิดทิศของความเร็วที่ตรงกันข้าม เมื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสารในแนว $+z$ แรงแม่เหล็กกระทำกับประจุทั้งสองส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไป

ทิศเดียวกันในแนวแกน y แต่เนื่องจากค่าประจุทั้งสองตรงข้ามกัน ทำให้เกิดแรงดันที่มีขั้วต่างกัน เรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะข้างมากต่างชนิดกัน คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ทฤษฎีอย่างง่ายที่แสดงกลไกการเกิดดังรูปที่ 2.6 โดยแสดงให้เห็นการไบอัสกระแสให้กับชิ้นสารในแนวแกน x แล้วป้อนสนามแม่เหล็กในแนวแกน z สนามไฟฟ้าฮอลล์ จะเกิดขึ้นในแนวแกน y ซึ่งกรณีที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สนามไฟฟ้าฮอลล์จะเกิดในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณากระแสพาหะจะทำให้เกิดความเร็วค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ความเร็วดริฟท์ (v_d) โดยความเร็วดริฟท์จะสัมพันธ์กับขนาดของกระแสสำหรับพาหะที่เป็นโฮลแสดงดังสมการ (2.20)

$$v_d = \frac{J_x}{qp} \quad (2.20)$$

สำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนจะได้

$$v_d = \frac{J_x}{qn} \quad (2.21)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าฮอลล์สามารถอธิบายในเทอมของกระแสและสนามแม่เหล็กสำหรับพาหะที่เป็นโฮล ตามสมการ (2.22)

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

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนเขียนได้เป็น

$$\epsilon_H = -\frac{J_x B_{\perp}}{qn} \quad (2.23)$$

ส่วนปริมาณของแรงสนามแม่เหล็กกับแรงสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เท่ากันเขียนได้ว่า

$$q\epsilon_H = qV_d B_{\perp} \quad (2.24)$$

เขียนใหม่ได้ว่า

$$\varepsilon_H = R_H J_x B_{\perp} \quad (2.25)$$

เมื่อ R_H คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์(Hallcoefficient) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/qp$ สำหรับโฮลและเท่ากับ $-1/qn$ สำหรับอิเล็กตรอน ซึ่งในสมการ (2.25) สามารถที่จะคำนวณการเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ได้อย่างแม่นยำ ถ้าสามารถเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ ได้อย่างเหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ที่มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของประจุพาหะ ซึ่งจะทำให้เกิดพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอีกคือ r เพื่อที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้องสำหรับพาหะที่เป็นโฮลตามสมการ (2.26)

$$R_H = \frac{r}{qp} \quad (2.26)$$

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนตามสมการ (2.27)

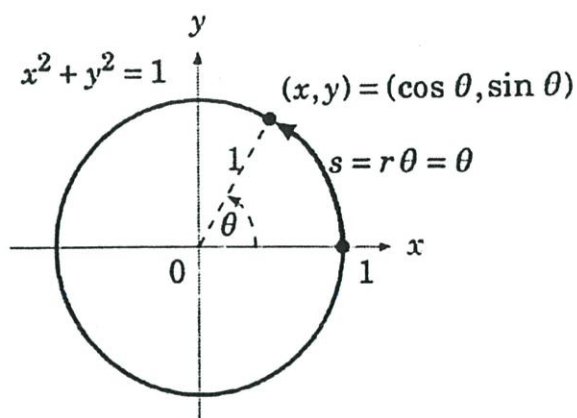
$$R_H = -\frac{r}{qn} \quad (2.27)$$

2.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ

2.2.1 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

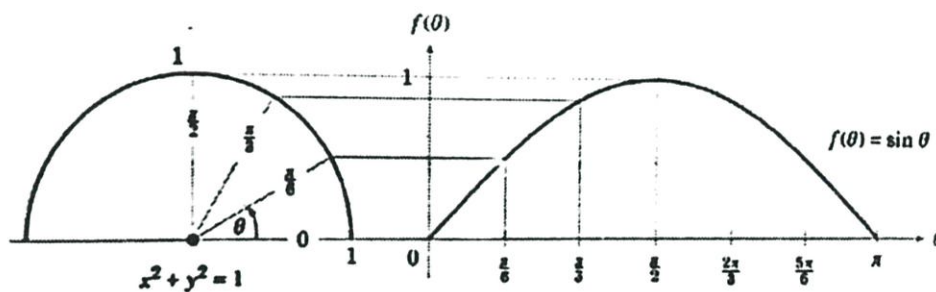
สำหรับฟังก์ชันตรีโกณมิติโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x, y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย (Unit circle) ซึ่งรัศมีของวงกลมนี้มีค่าเป็นหนึ่งดังรูปที่ 2.7 โดยแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของจุดที่อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยซึ่งมีพิกัดเป็น $(x, y) = (\cos\theta, \sin\theta)$ โดยขึ้นกับมุมจากจุดกำเนิดกระทำกับแกน x สามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.28)

$$x^2 + y^2 = 1 \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x, y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย

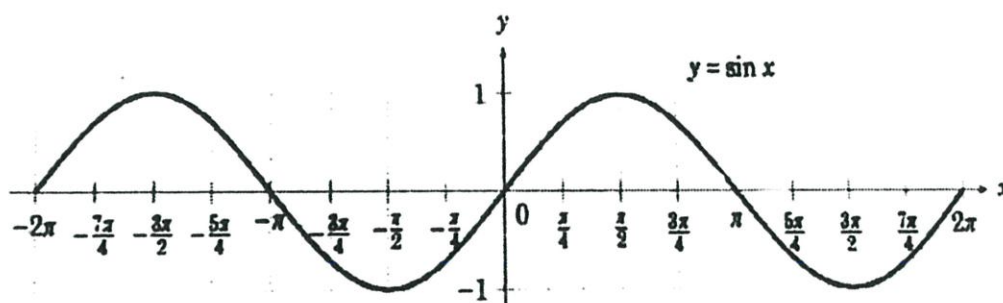
ดังนั้นจุดใดๆบนวงกลมหนึ่งหน่วยจะมีพิกัดในแกน y เป็น $\sin\theta$ สามารถเขียนพิกัดจุดบนวงกลมหนึ่งหน่วยสำหรับแนวแกนเป็นฟังก์ชันไซน์ $f(\theta) = \sin\theta$ ที่มุม 0 ถึง π ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟฟังก์ชันไซน์สำหรับพิกัดจุด y บนวงกลมหนึ่งหน่วย

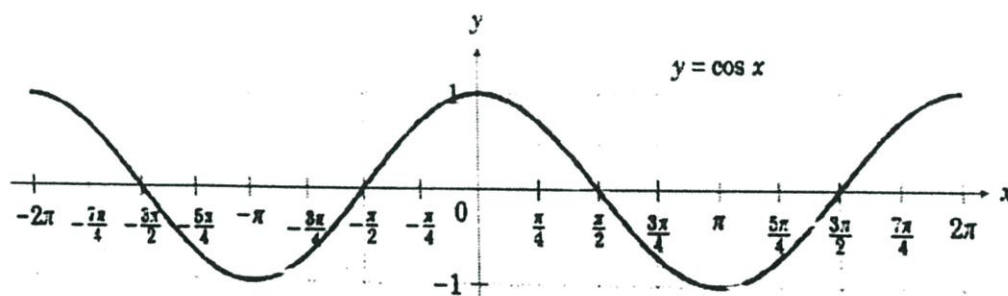
เมื่อทำการเขียนกราฟในระบบพิกัด (x, y) โดยให้แกน x แทนมุมที่กระทำอยู่ในช่วง $(-2\pi, 2\pi)$ แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (2.29)

$$y = \sin x \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \sin x$

สำหรับฟังก์ชันโคไซน์สามารถพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งของพิกัดในแนวแกน x รอบวงกลม โดยกราฟความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x, y) ของฟังก์ชันนี้ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันโคไซน์ $y = \cos x$

ซึ่งเป็นไปตามสมการของฟังก์ชันโคไซน์เขียนได้ว่า

$$y = \cos x \quad (2.30)$$

เมื่อนำสมการ (2.29) และ (2.30) แทนค่าลงในสมการ (2.28) จะได้ว่า

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (2.31)$$

จากรูปที่ และ จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง $\cos 0^\circ$ จะมีค่าเท่ากับ $\sin 90^\circ$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันไซน์กับฟังก์ชันโคไซน์มีความต่างเฟสกันอยู่ 90° โดยอธิบายความสัมพันธ์ได้ตามสมการ (2.32)

$$\cos x = \sin(x + 90^\circ) \quad (2.32)$$

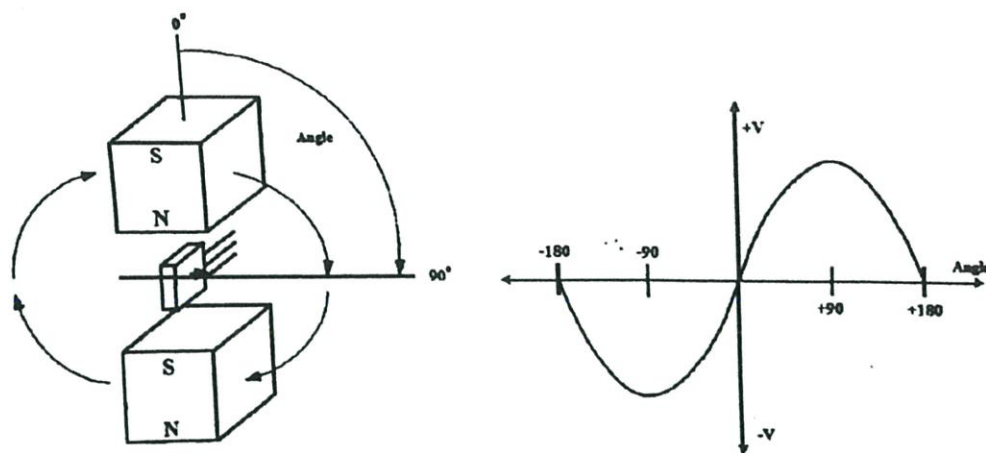
2.2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ตามฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ผลของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อจุดประจุในสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นปริมาณเวกเตอร์แรงที่เกิดขึ้นนี้จะแปรผันตามมุมที่สนามแม่เหล็กที่กระทำกับจุดประจุเป็นฟังก์ชันไซน์ เมื่อทดลองการเปลี่ยนตำแหน่งโดยการหมุนสนามแม่เหล็กรอบหัววัดฮอลล์ที่อยู่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการหมุน ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ในมุมต่างๆ พบว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ดังสมการ (2.33)

$$V_{HI} = k_1 \sin \theta \quad (2.33)$$

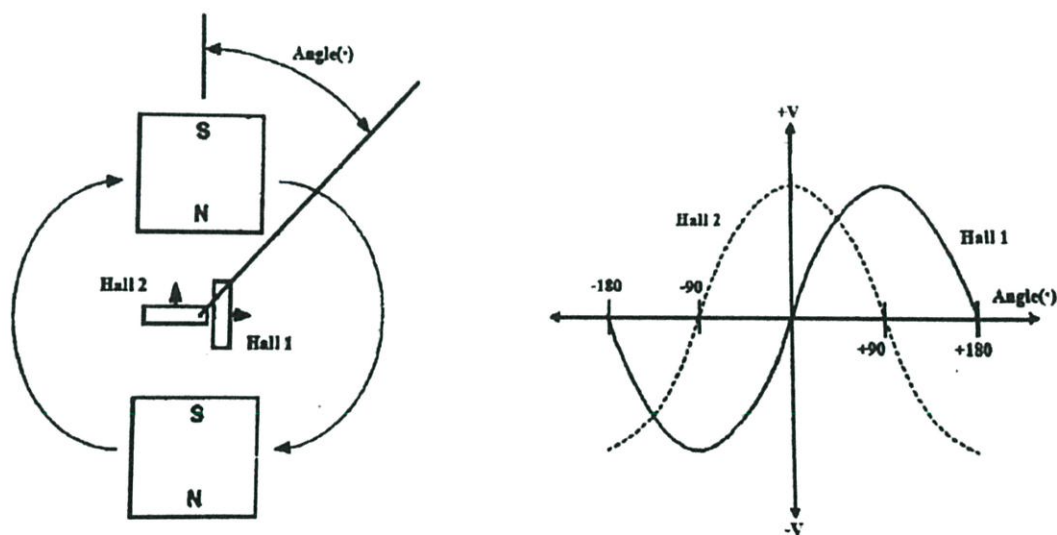
โดยค่า k_1 เป็นค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในระบบการวัด

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.11 แสดงการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เปลี่ยนเป็นมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำในวัสดุฮอลล์ ดังนั้นที่ตำแหน่งแรกคือที่ศูนย์กลางวัสดุฮอลล์ถูกวางให้ด้านกระทำ (active area) ไว้ที่ตำแหน่งขนานกับแนวเส้นแรงสนามแม่เหล็กนั่นคือ เส้นแรงแม่เหล็กทำมุมศูนย์กลางกับวัสดุฮอลล์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้จึงมีค่าน้อยสุด และเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งให้เส้นแรงแม่เหล็กกระทำเป็นมุมตั้งฉากกับวัสดุฮอลล์ ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นจะได้ค่าสูงสุด



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มีมุมต่างๆ

ในกรณีเมื่อนำฮอลล์เซนเซอร์สองตัวมาวางแนวตั้งฉากในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นเท่ากัน มุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำตรงตำแหน่งแรกของฮอลล์เซนเซอร์ต่างกันที่ 90° ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเลื่อนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์

นั่นคือเส้นแรงแม่เหล็กกระทำในฮอลล์เซนเซอร์ตัวแรกที่มีมุม 90° ส่วนฮอลล์เซนเซอร์ตัวที่สองทำมุม 0° จึงประมาณได้ว่าที่ตำแหน่งแรกค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เซนเซอร์ตัวที่หนึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ตามสมการ (2.33) และค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เซนเซอร์ตัวที่สองเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ตามสมการ (2.34)

$$V_{H2} = k_2 \cos\theta \quad (2.34)$$

โดยค่า k_2 เป็นค่าคงที่ของฮอลล์ตัวที่ 2

2.3 วงจรประมวลสัญญาณ

2.3.1 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

วงจรขยายสัญญาณผลต่างดังรูปที่ 2.13 ใช้สำหรับหาผลต่างทางพีชคณิตของแรงดันสองชุด หรือผลต่างทางเวกเตอร์ของสัญญาณอินพุตสองชุด โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเท่ากับผลต่างของแรงดันอินพุตทั้งสองคูณด้วยอัตราขยายสัญญาณของวงจร ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอท์พุทกับแรงดันอินพุทวงจรมันสามารถคำนวณหาได้โดยวิธีวิเคราะห์แรงดันโหนดตั้งขึ้นตอนต่อไป

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

$$\frac{V_1 - V_A}{R_1} = \frac{V_A - V_0}{R_2} \quad (2.35)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$V_A = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_1 + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_0 \quad (2.36)$$

ได้ผลรวมกระแสที่โหนด B เท่ากับ

$$\frac{V_2 - V_B}{R_3} = \frac{V_B}{R_4} \quad (2.37)$$

หรือ

$$V_B = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_2 \quad (2.38)$$

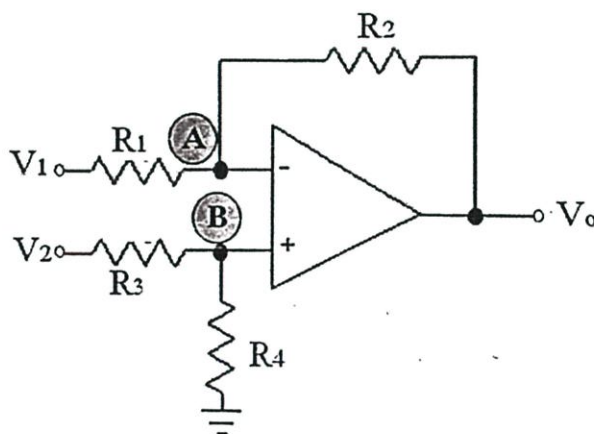
อาศัยคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ว่า $V_{os} \approx 0$ หรือจะได้ $V_A = V_B$ นั่นคือสมการที่(2.36) จึงเท่ากับสมการ (2.38) ทำให้ได้

ดังนั้น

$$V_o = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_2 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) V_1 \quad (2.40)$$

โดยทั่วไปการใช้งานของวงจรจำเป็นต้องเลือกค่าตัวต้านทานในวงจรให้ $R_1 = R_3 = R_i$ และ $R_2 = R_4 = R_f$ ดังสมการ (2.36) จึงกลายเป็น

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_i} \right) (V_2 - V_1) \quad (2.41)$$



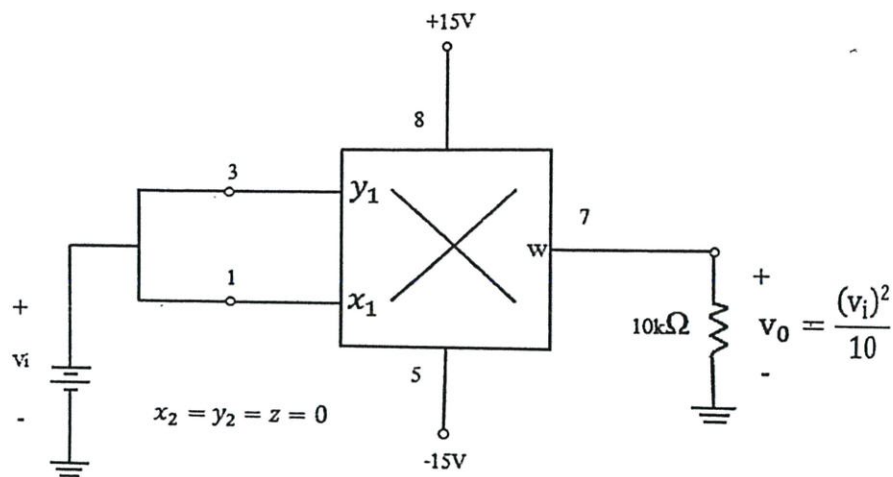
รูปที่ 2.13 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

2.3.2 วงจรกำลังสอง

วงจรคูณสัญญาณสามารถนำไปออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้ในการยกกำลังสองของแรงดันไฟตรงที่มีค่าเป็นบวกและลบได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งกระทำได้โดยป้อนแรงดันอินพุต V_i เข้าที่ขั้วอินพุต x_1 และ y_1 ทั้งสองของวงจрдังรูปที่ 2.14 จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรกรณีนี้มีค่าเท่ากับ

$$V_o = \frac{x_1 y_1}{10} = \frac{V_i^2}{10} \quad (2.42)$$

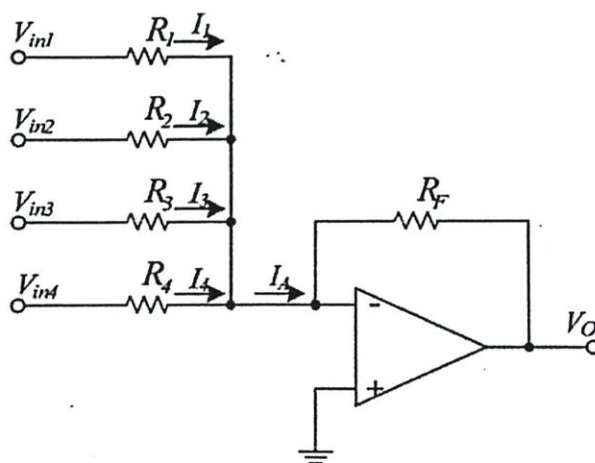
เรียกวงจรลักษณะนี้ว่า “วงจรกำลังสอง”



รูปที่ 2.14 วงจรกำลังสอง

2.3.3 วงจรรวมสัญญาณ

วงจรรวมสัญญาณคือวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่มีหลายอินพุต โดยแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณนี้จะเกิดจากผลรวมของแรงดันอินพุตแต่ละตัวคูณด้วยอัตราขยายสัญญาณของอินพุตนั้นๆ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{in1}, V_{in2}, V_{in3}, V_{in4}$ กับ V_o ของวงจรดังรูปที่ 2.15 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหา V_o ได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรรวมสัญญาณ

จากกฎของเคอร์ชอฟ

$$I_A = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (2.43)$$

และกฎของโอห์ม

$$I_1 = \frac{V_{in1}}{R_1}, I_2 = \frac{V_{in2}}{R_2}, I_3 = \frac{V_{in3}}{R_3}, I_4 = \frac{V_{in4}}{R_4} \quad (2.44)$$

และ

$$V_o = R_f I_A \quad (2.45)$$

นำสมการ (2.44) แทนที่ในสมการ (2.43) จะได้

$$I_A = \frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} + \frac{V_{in3}}{R_3} + \frac{V_{in4}}{R_4} \quad (2.46)$$

นำสมการ (2.46) แทนที่ในสมการ (2.45) จะได้

$$V_o = -R_f \left(\frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} + \frac{V_{in3}}{R_3} + \frac{V_{in4}}{R_4} \right) \quad (2.47)$$

2.3.4 วงจรถอดรอกที่สอง

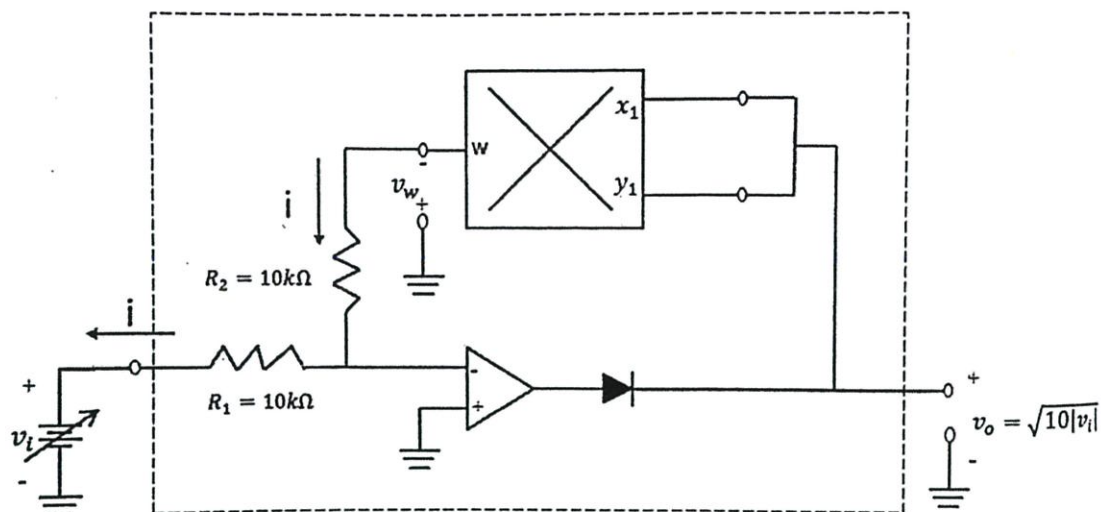
วงจรถอดรอกที่สองที่ถูกดัดแปลงมาจากวงจรหารสัญญาณที่มีความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเป็นอัตราส่วนของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจร โดยการต่อขั้วอินพุต x_1 และ y_1 เข้ากับขั้วเอาต์พุตของออปแอมป์ดังแสดงในรูป 2.16

จากความสัมพันธ์

$$V_w = -V_i = \frac{V_o^2}{10} \quad (2.48)$$

เมื่อ V_i เป็นแหล่งจ่ายไฟลบแล้ว ทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรถอดรอกที่สอง V_o มีค่าเท่ากับ

$$V_o = \sqrt{10|V_i|} \quad (2.49)$$



รูปที่ 2.16 วงจรถอดรากที่สอง

ซึ่งพบว่าแรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจรมีค่าเท่ากับรากที่สองของสิบลเท่าของแรงดันอินพุต กรณีนี้แรงดันอินพุต V_i ของวงจรจำเป็นต้องมีค่าเป็นลบเสมอ หากไม่เป็นลบจะทำให้ออปแอมป์เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวขณะที่ไดโอดทางด้านเอาต์พุตของออปแอมป์ต่อไว้เพื่อป้องกันออปแอมป์เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวในกรณีที่ V_i มีค่าเป็นบวก กล่าวคือเมื่อ V_i เป็นบวก ไดโอดจะถูกไบอัสกลับทำให้หยุดนำกระแสเปิดวงจรทางด้านเอาต์พุตของออปแอมป์

บทที่ 3

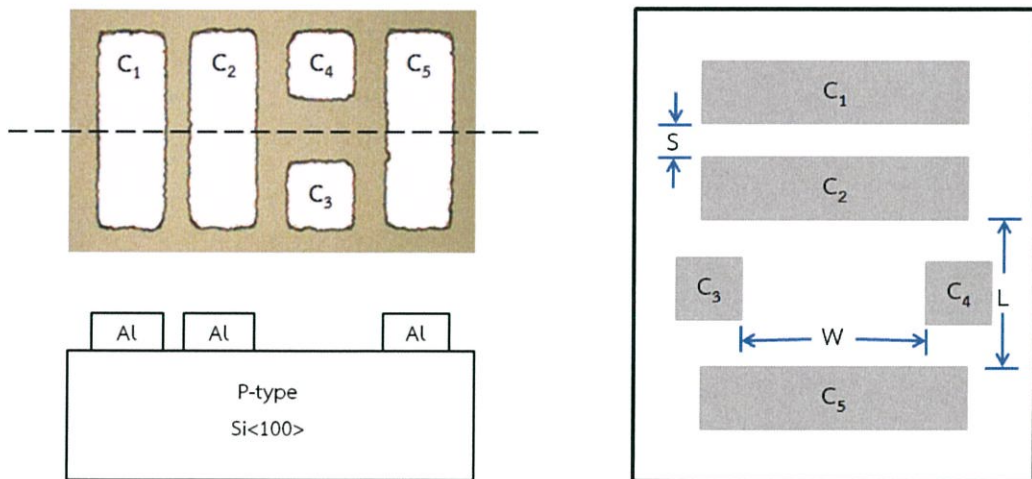
โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติและวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างระบบการวัดสนามแม่เหล็กในสองมิติ เพื่อพัฒนาระบบให้มีความเหมาะสม ในการนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์และสามารถนำหลักการของวิธีการวัดนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็ก

3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.1.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติ

หัววัดฮอลล์สองมิติที่ใช้ในโครงงานนี้สร้างด้วยกระบวนการเทคโนโลยีซิลิคอนที่ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 5 ขั้วบนฐานรองซิลิกอนชนิดพีระนาบ <100> เส้นผ่านศูนย์กลางขนาน 6 นิ้ว ค่าสภาพความต้านทาน $5 \Omega \cdot \text{cm}$ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติ

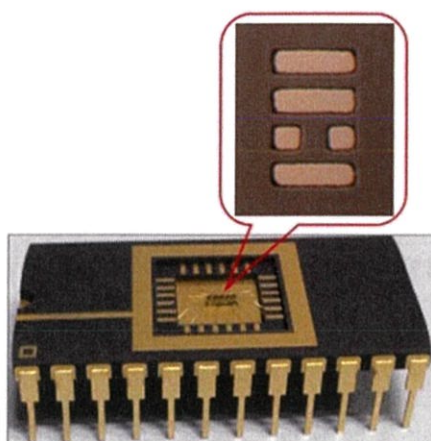
ในการทดลองเลือกใช้หัววัดฮอลล์สองมิติที่มีโครงสร้างแตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองแต่ละโครงสร้างที่พื้นที่ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก $600 \times 300 \mu\text{m}^2$ โดยในแต่ละโครงสร้างของอุปกรณ์แต่ละชั้นมีความกว้าง (W) ระหว่างขั้ว C3 กับ C4 ที่แตกต่างกัน แต่มีระยะห่าง (S) ระหว่างขั้ว C1 กับ C2 และความยาว (L) ระหว่างขั้ว C2 กับ C5 ที่เท่ากันในทุกโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติทั้ง 3 โครงสร้าง

ค่าพารามิเตอร์	อุปกรณ์ตัวที่	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2	โครงสร้างที่ 3
C ₁ -C ₂ (S)	1	40 μm	40 μm	40 μm
	2	60 μm	60 μm	60 μm
	3	80 μm	-	80 μm
C ₃ -C ₄ (W)	1	100 μm	200 μm	300 μm
	2	100 μm	200 μm	300 μm
	3	100 μm	-	300 μm
C ₂ -C ₅ (L)	1	300 μm	300 μm	300 μm
	2	300 μm	300 μm	300 μm
	3	300 μm	-	300 μm

แผ่นฟิล์มอะลูมิเนียมบางถูกกัดเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิก 5 ขั้ว ประกอบด้วยขั้ว C₁, C₂, C₃, C₄ และ C₅ ซึ่งขั้ว C₁, C₂ และ C₅ ใช้สำหรับจ่ายกระแส ส่วนขั้ว C₃ กับ C₄ ใช้สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก และขั้ว C₁ กับ C₂ ใช้สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 3.3 ตัวอุปกรณ์ทดสอบของฮอลล์และโครงสร้างภายใน



รูปที่ 3.4 Electromagnet



รูปที่ 3.5 Gauss Meter (F.W Bell 5170)



รูปที่ 3.6 Power Supply (BK Precision 1735A)

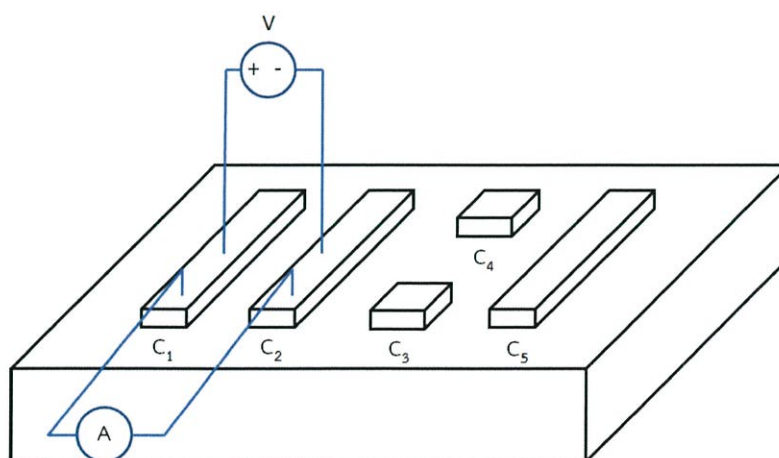


รูปที่ 3.7 Multimeter (Fluke 8808A)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิคของหัววัดฮอลล์สองมิติ

ทดสอบด้วยการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าจาก -2 ถึง 2 โวลต์ ที่ตกคร่อมในแต่ละตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.7 ปรับแรงดันเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 โวลต์วัด 4 ตำแหน่ง ในแต่ละโครงสร้าง โดยวัดตำแหน่งที่ 1 คือระหว่าง C_1 - C_2 ตำแหน่งที่ 2 คือระหว่าง C_3 - C_4 ตำแหน่งที่ 3 คือระหว่าง C_1 - C_5 และตำแหน่งที่ 4 คือระหว่าง C_2 - C_5 จากนั้นบันทึกค่ากระแสวัดที่ได้ แล้วนำไปพล็อตกราฟเพื่อดูความเป็นโอห์มมิค

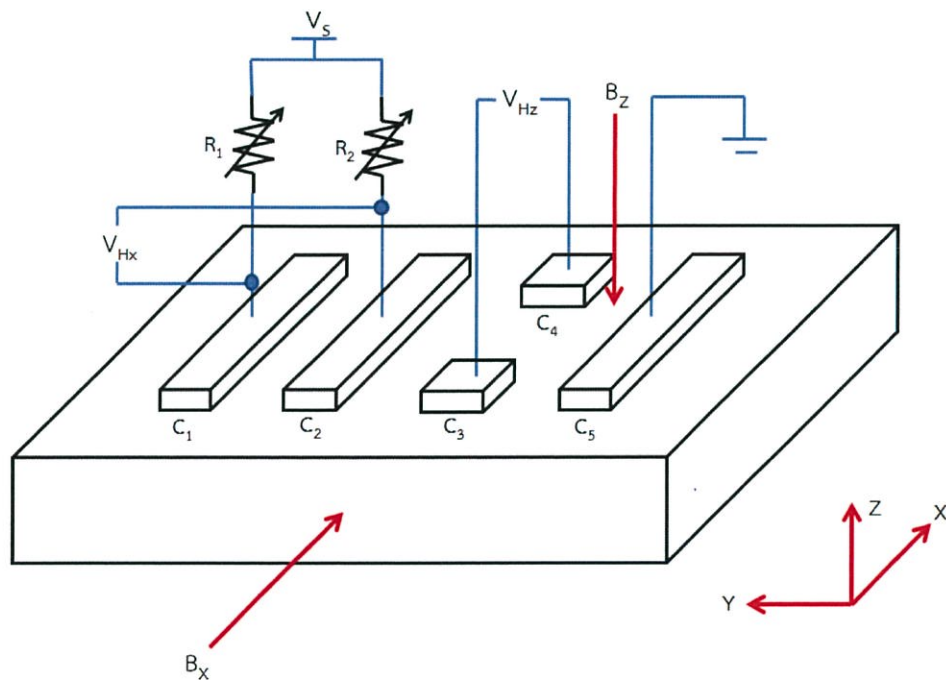


รูปที่ 3.7 การทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิคของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.3.2 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อแม่เหล็กของ Hall Device (เมื่อไม่มีวงจรรขยาย)

นำหัววัดฮอลล์สองมิติไปตั้งในเครื่อง Electromagnet ปรับเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กตั้งแต่ -5000 ถึง 5000 เกาส์ โดยเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กครั้งละ 500 เกาส์ ทดสอบการตอบสนองต่อ

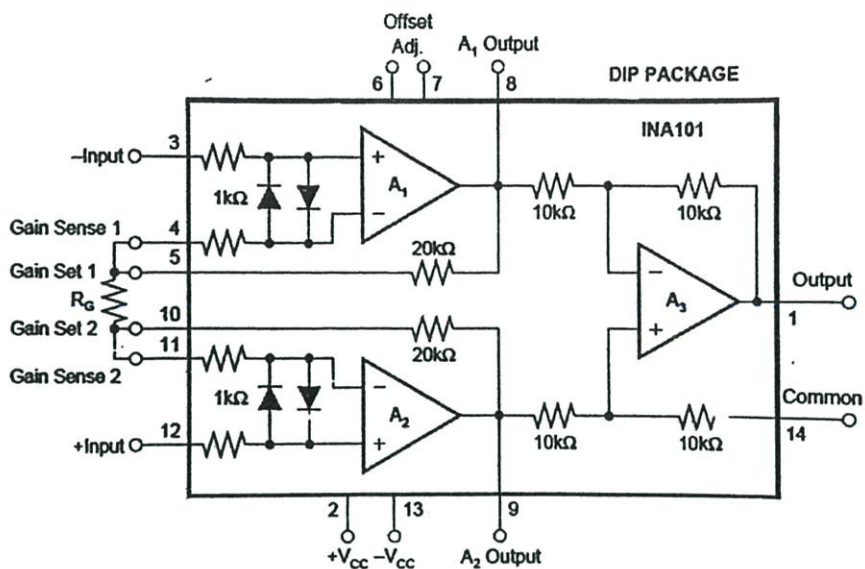
สนามแม่เหล็กในสองทิศทางคือ สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉาก (B_z) และสนามแม่เหล็กที่มีทิศขนานกับหัววัดฮอลล์สองมิติ (B_x) โดยขั้นแรกจะพิจารณาการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัด โดยจ่ายกระแส 1 mA ผ่านตัวต้านทานสองตัวเข้าที่ขั้ว C_1, C_2 ไปยัง C_5 การตอบสนองในทิศตั้งฉากจะถูกพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตกคร่อมขั้ว C_3, C_4 จากนั้นทดสอบหาค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัด แล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตกคร่อมขั้ว C_1, C_2 ดังรูปที่ 3.8 แล้วนำค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่วัดได้ไปพล็อตกราฟเพื่อดูค่าการตอบสนอง



รูปที่ 3.8 การทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ

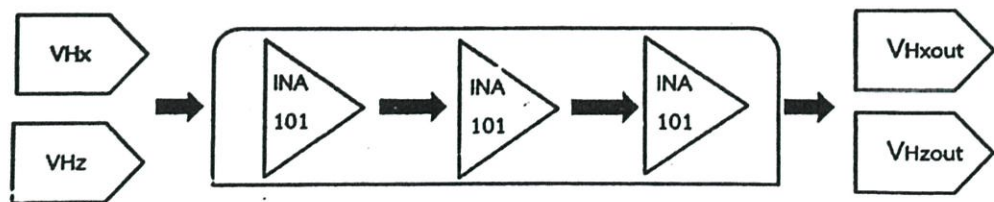
3.3.3 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อแม่เหล็กของ Hall Device (เมื่อต่อกับวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์)

ทดลองโดยนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในสองทิศทางมาทำการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายสัญญาณที่เป็นแบบอินสตรูเมนต์เพื่อทำการขยายผลต่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์ให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนขึ้นของสัญญาณ ภายใต้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจาก -5000 ถึง 5000 เกาส์



รูปที่ 3.9 ไอซีอินสตรูเมนต์ในวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ INA101

ในการทดลองเลือกวงจรรวมของวงจรถ่ายแบบอินสตรูเมนต์โดยใช้ไอซีเบอร์ INA101 จำนวน 6 ตัว สำหรับการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ แสดงโครงสร้างของไอซีดังรูปที่ 3.9 ซึ่งได้ทำการออกแบบวงจรถ่ายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ไว้สองชุด เพื่อทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งทิศตั้งฉากและทิศขนานกับหัววัดฮอลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยทำการปรับอัตราขยายประมาณ 1,500 เท่าสำหรับการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (B_z) และปรับอัตราขยายประมาณ 6,500 เท่าสำหรับการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก (B_y) เพื่อให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของหัววัดฮอลล์ทั้งสองทิศทางให้มีค่าแอมพลิจูดเท่ากัน ($k_1=k_2$)



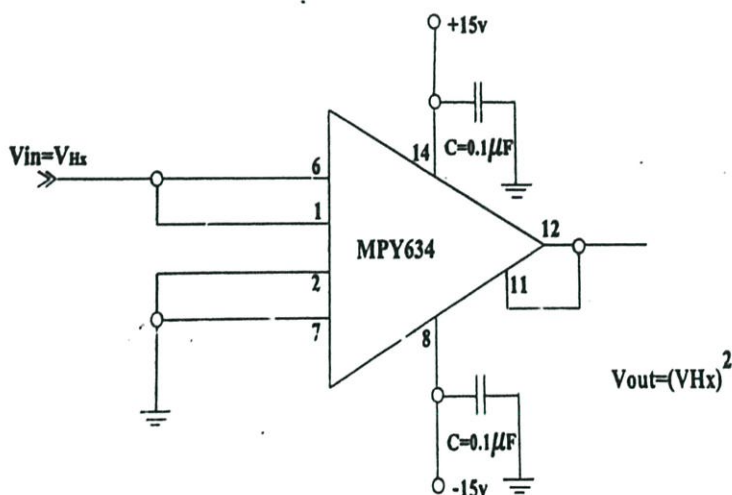
รูปที่ 3.10 การต่อวงจรถ่ายอินสตรูเมนต์โดยใช้ไอซีเบอร์ INA101

3.3.4 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ผ่าน วงจรรคำนวณสัญญาณอนาล็อก

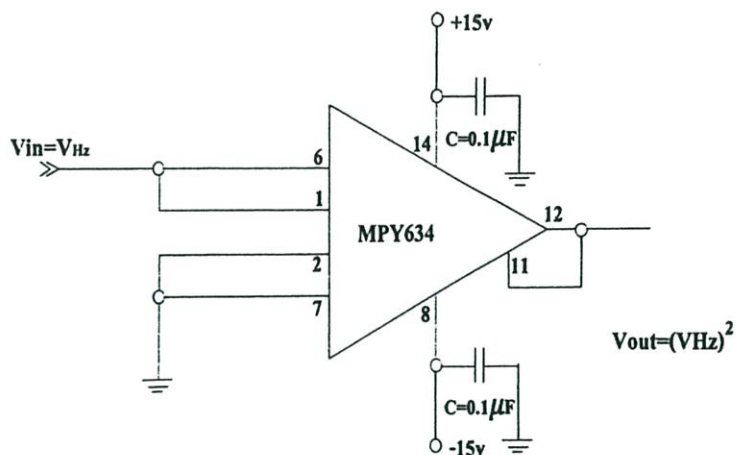
สำหรับการทดลองนี้จะทำการนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกขยายสัญญาณในทั้งสองทิศทางมาทำการคำนวณสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สำหรับประยุกต์ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็ก โดยไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยผ่านวงจรรยกกำลังสอง วงจรรวมสัญญาณ และวงจรถอดรากที่สอง ซึ่งใช้หลักการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ของตรีโกณมิติ $V_H = \sqrt{V_{Hz}^2 + V_{Hx}^2}$ ในการคำนวณ

3.3.4.1 วงจรรยกกำลังสอง

การทดลองนี้เป็นการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตจากวงจขยายมาใช้เป็นอินพุตของวงจรรยกกำลังสอง เพื่อทำการยกกำลังสองแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองทิศทางในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยในไอซีอนาล็อกมัลติพลายเบอร์ MPY634KP เพื่อทำการยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ทั้งในทิศทางและทิศตั้งฉาก ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 ตามลำดับ



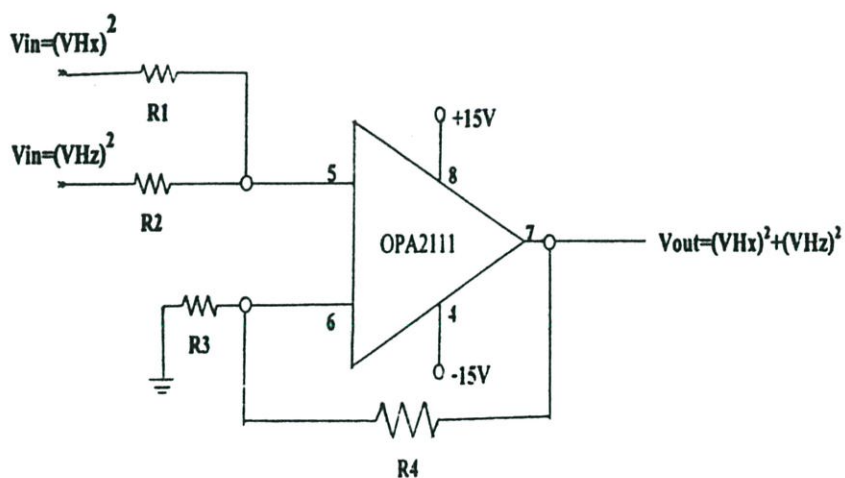
รูปที่ 3.11 วงจรรยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทิศทางาน



รูปที่ 3.12 วงจรยกกำลังสองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทิศตั้งฉาก

3.3.4.2 วงจรรวมสัญญาณ

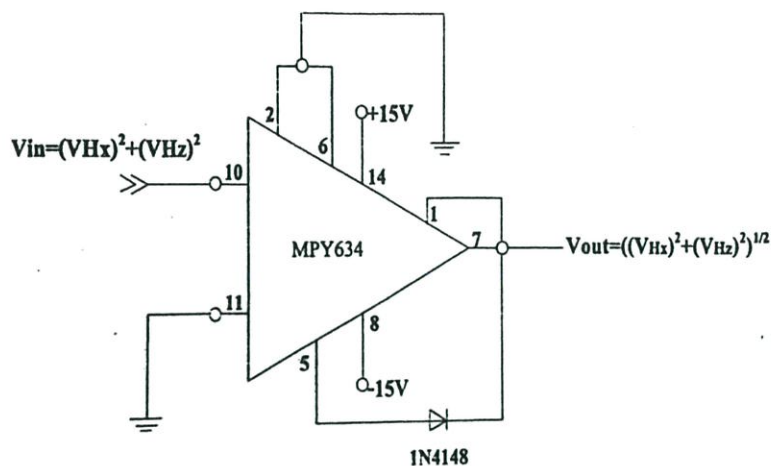
เป็นการนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำการยกกำลังสองสัญญาณทั้งในทิศตั้งฉาก (V_{Hz}^2) และทิศขนาน (V_{Hx}^2) เข้าสู่วงจรรวมสัญญาณได้เอาท์พุทคือ ($V_{Hz}^2 + V_{Hx}^2$) โดยใช้ไอซีเบอร์ OPA2111KP ซึ่งมีลักษณะการต่อใช้งานดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรบวกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

3.3.4.3 วงจรถอดรอกที่สอง

ในการทดลองนี้เป็นการนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองทิศทางที่ได้ผ่านวงจรยกกำลังสองและวงจรรวมสัญญาณแล้วมาทำการถอดรอกที่สอง โดยใช้ไอซีเบอร์ MPY364KP ซึ่งมีลักษณะการต่อใช้งานดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรถอดรากที่สองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

3.4 การทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

การทดลองนี้เป็นการวัดค่าการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยจะทำการหมุนหัววัดฮอลล์สองมิติที่มุม 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 องศาภายใต้ค่าสนามแม่เหล็กคงที่ 0, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 เกาส์ตามลำดับโดยผ่านวงจรประมวลสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อแสดงให้เห็นว่ามุมที่สนามแม่เหล็กมากระทำต่อหัววัดฮอลล์สองมิติไม่ส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่วัดได้

3.5 การทดสอบความแม่นยำของระบบเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือมาตรฐาน

หัวข้อนี้เป็นการทดสอบความแม่นยำของระบบที่สร้างขึ้นโดยนำมาสอบเทียบกับเครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็กมาตรฐานอ้างอิง (BELL 5170) ซึ่งช่วงการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ที่ 0 ถึง 5000 เกาส์ ใช้การสอบเทียบแบบ 5 จุด โดยให้สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดฮอลล์สองมิติและเครื่องมือมาตรฐานที่มุม 90 องศา อ้างอิงโดยทำการหาเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำดังสมการ

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

โดยที่ Deviation คือค่าที่วัดได้ลบจากค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานอ้างอิง

Span คือค่าช่วงของการวัด

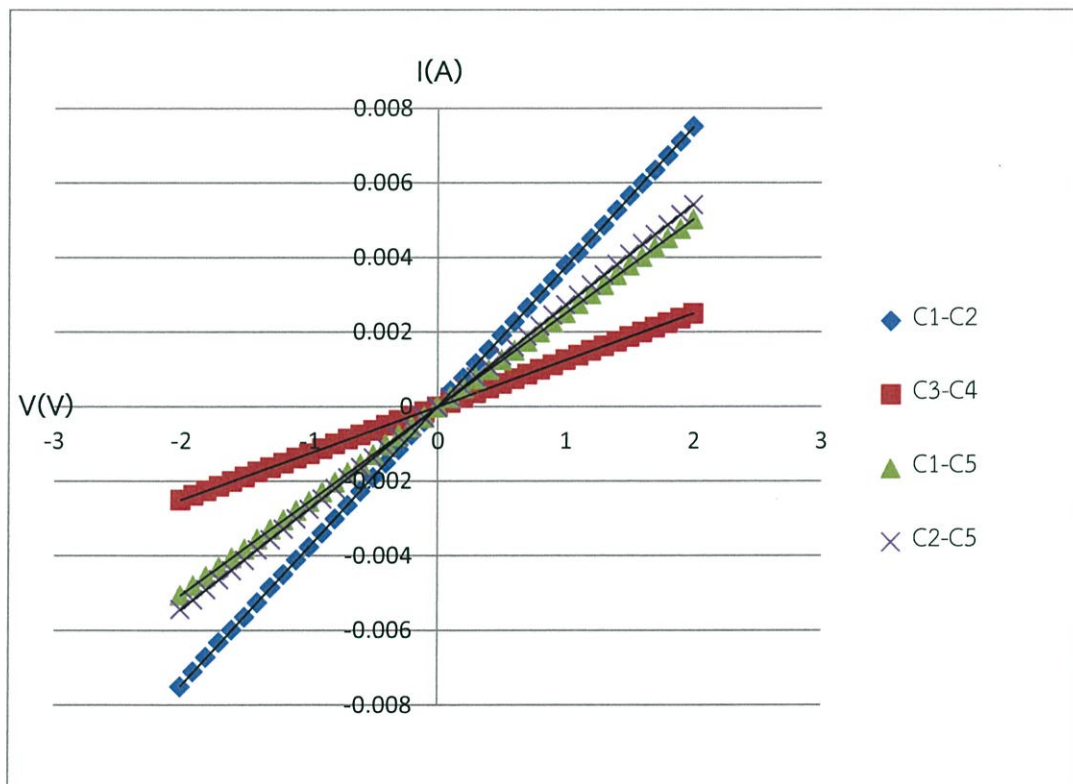
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบสมบัติของของหัววัดฮอลล์สองมิติ

4.1.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ (ความเป็นโอห์มมิก)

ในการทดลองนี้จะทดสอบหาค่าความต้านทานโอห์มมิกระหว่างขั้วไฟฟ้าในโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ ซึ่งผลการทดลองสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2



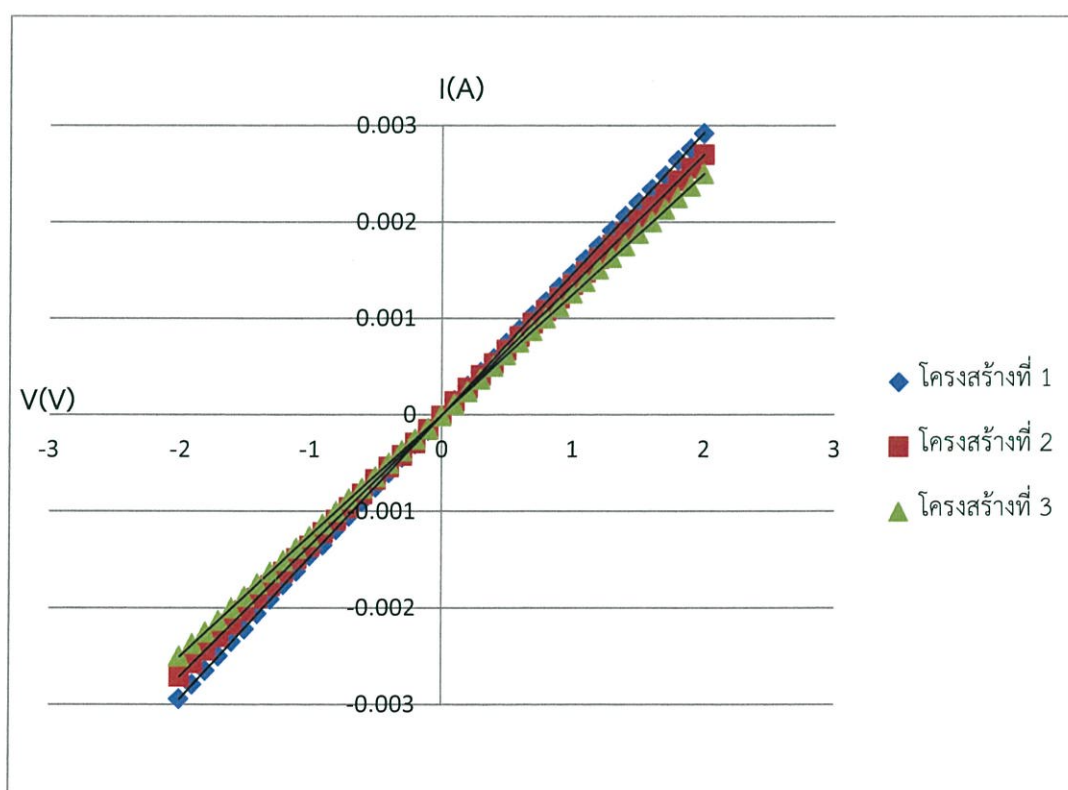
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 ขั้วในโครงสร้างที่ 3 ของอุปกรณ์ตัวที่ 1

จากกราฟในรูปที่ 4.1 ผลจากการทดสอบจ่ายแรงดันแล้วทำการวัดกระแสทุกรอยสัมผัสของโครงสร้างที่ 3 บนอุปกรณ์ฮอลล์ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันไฟฟ้าอย่าง

เป็นเชิงเส้น นำความชันจากสมการมาคำนวณกลับได้ค่าความต้านทาน แสดงให้เห็นว่าความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งห้าขั้วมีค่าไม่เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 ขั้วในโครงสร้างที่ 3 ของตัวอุปกรณ์และเปรียบเทียบความต้านทานระหว่างขั้ว

ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์	C ₁ -C ₂	C ₃ -C ₄	C ₁ -C ₅	C ₂ -C ₅
ระยะห่างระหว่างขั้ว(μm)	40	300	340	300
สมการ I,V	$y = 0.003750x + 0.000005$	$y = 0.001251x - 0.000002$	$y = 0.002524x - 0.000015$	$y = 0.002724x - 0.000014$
ความต้านทาน(Ω)	266.667	799.361	396.197	367.107



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของขั้วไฟฟ้า C₃-C₄ ในแต่ละโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ตัวที่ 1

จากกราฟในรูปที่ 4.2 ผลจากการทดสอบจ่ายแรงดันแล้วทำการวัดกระแสทุกระยะสัมผัสของ ขั้วไฟฟ้า C_3-C_4 ในแต่ละโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสและ แรงดันไฟฟ้าอย่างเป็นเชิงเส้น นำความชันจากสมการมาคำนวณกลับได้ค่าความต้านทาน พบว่า ความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้า C_3-C_4 ในแต่ละโครงสร้างของตัวอุปกรณ์มีค่าไม่เท่ากันดังแสดงใน ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และแสดงความต้านทานระหว่างขั้วของ ขั้วไฟฟ้า C_3-C_4 ในแต่ละโครงสร้างของตัวอุปกรณ์

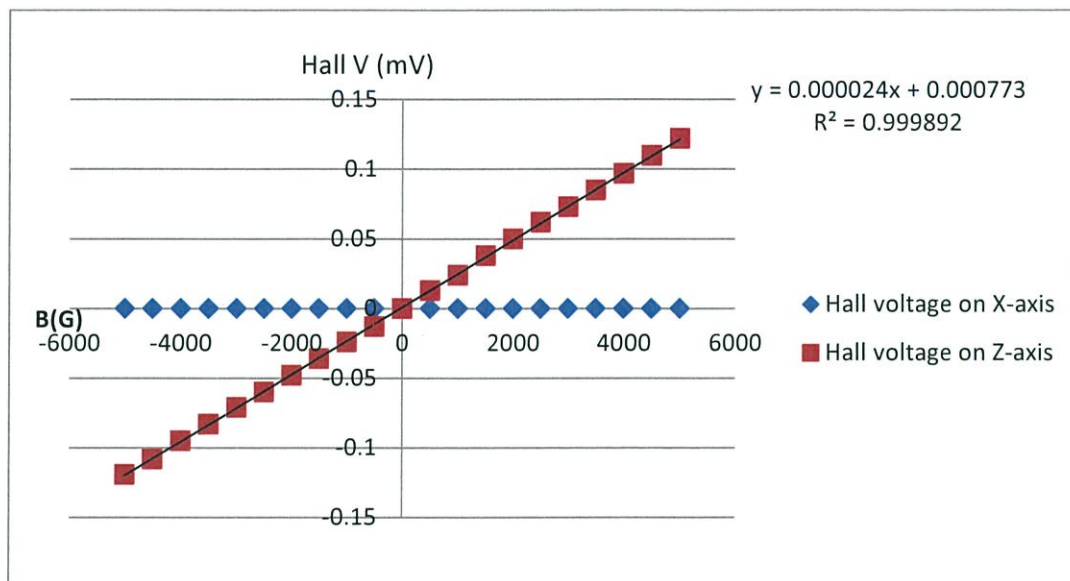
ค่าพารามิเตอร์	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2	โครงสร้างที่ 3
$W(\mu\text{m})$	100	200	300
สมการ $I(A), V(V)$	$y = 0.001468x - 0.000007$	$y = 0.001353x - 0.000005$	$y = 0.001251x - 0.000002$
ความต้านทาน(Ω)	681.199	739.098	799.360

จากตารางที่ 4.2 พบว่าความต้านทานระหว่างขั้วของขั้วไฟฟ้า C_3-C_4 ขึ้นอยู่กับความกว้าง (W) โดยค่าความต้านทานจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างขั้ว

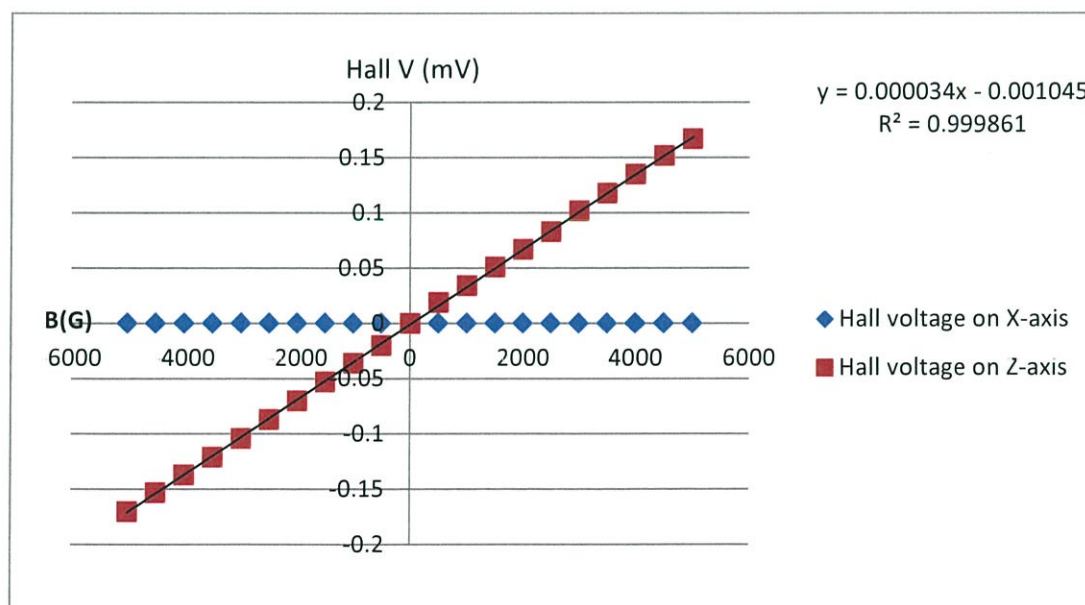
4.2 ผลการทดลองคุณสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ (เมื่อไม่มี วงจรขยาย)

ในการทดลองนี้จะทดสอบหาค่าความไวการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติในแต่ละ โครงสร้างโดยการจ่ายกระแสคงที่ 1 mA ซึ่งผลการทดลองสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ดังแสดงในรูปที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6

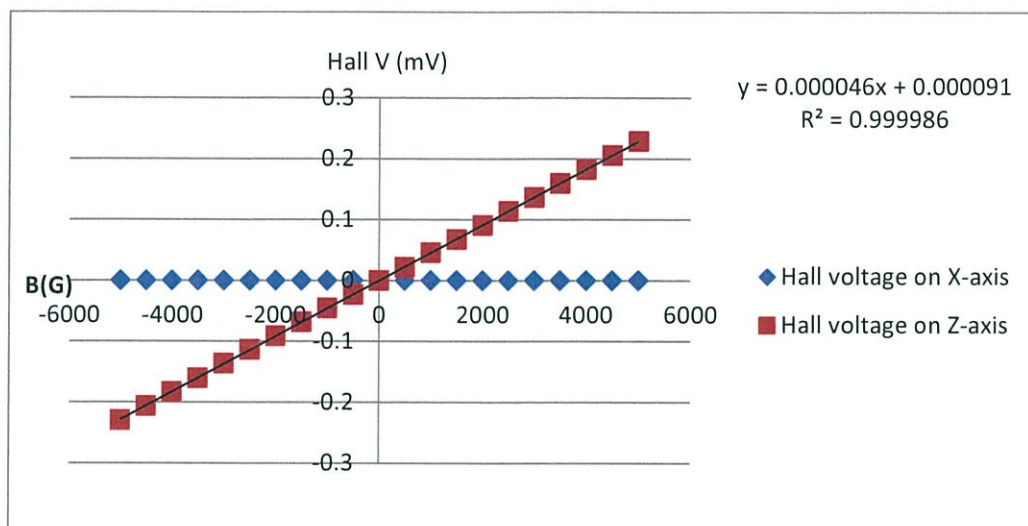
4.2.1 ผลการทดลองคุณสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์



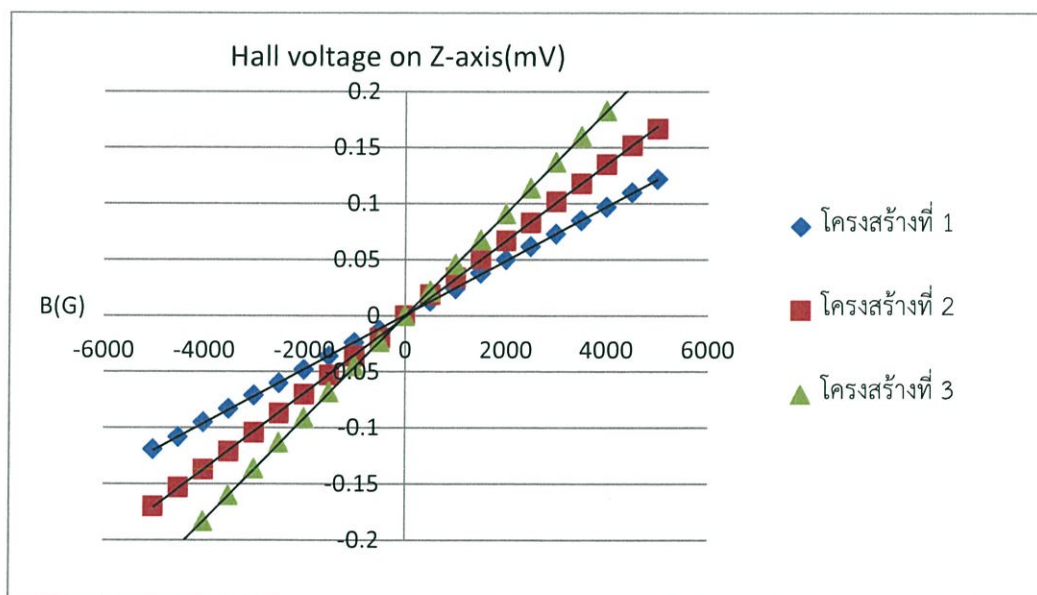
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในโครงสร้างที่ 1
เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ตัวที่ 1



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในโครงสร้างที่ 2
เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ตัวที่ 1



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในโครงสร้างที่ 3 เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ตัวที่ 1



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแต่ละโครงสร้างเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ตัวที่ 1

จากรูปที่ 4.6 ผลจากการทดสอบเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กโดยปรับเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่จ่ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับตัวอุปกรณ์แล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า C_3-C_4 ในแต่ละโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามแม่เหล็กและ

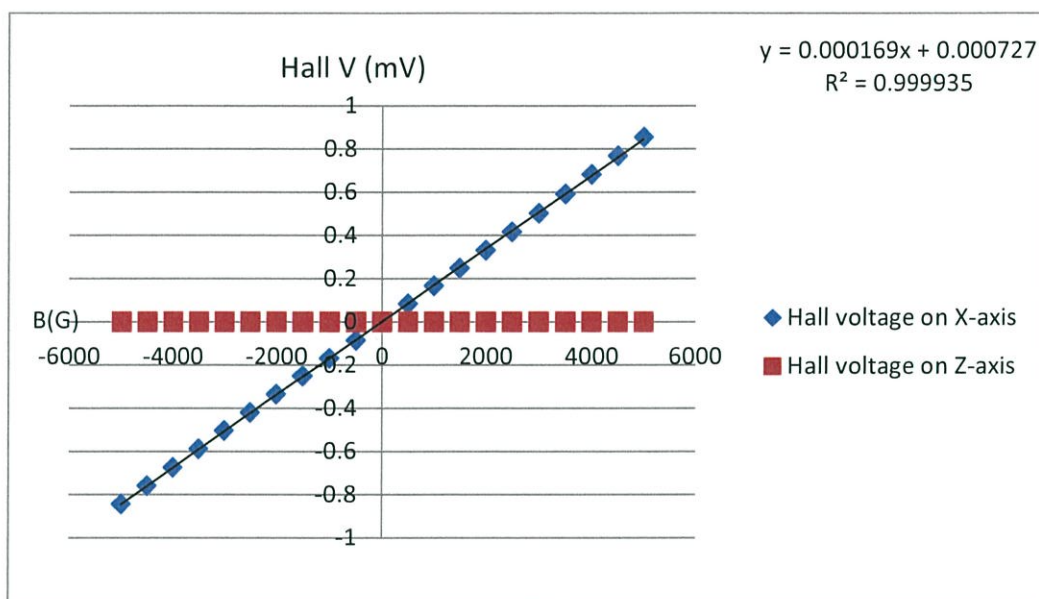
แรงดันไฟฟ้าฮอลล์อย่างเป็นเชิงเส้น โดยค่าความชันของกราฟคือค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของแต่ละโครงสร้างเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับตัวอุปกรณ์

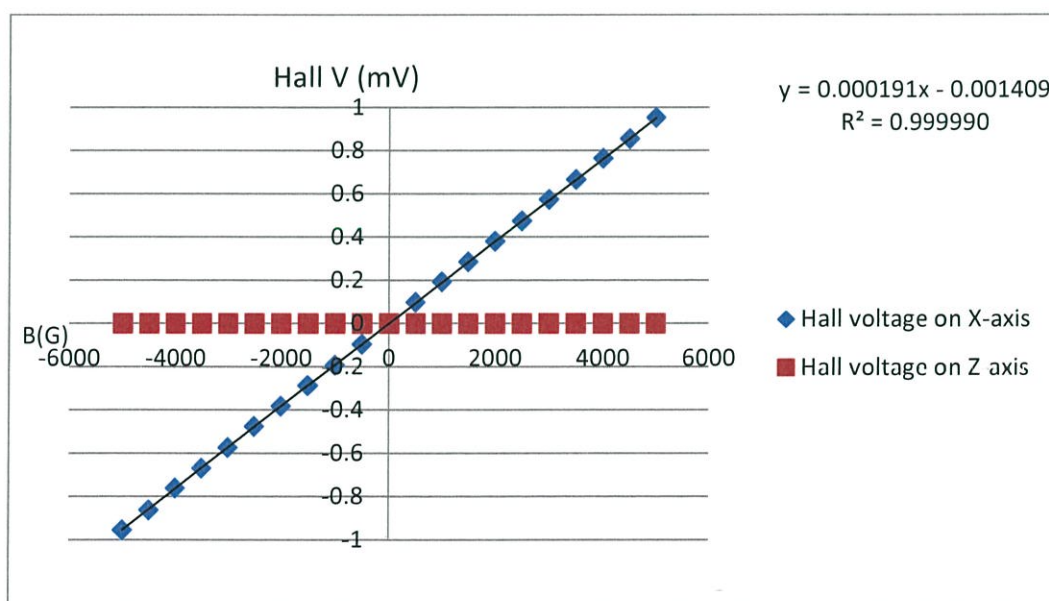
โครงสร้าง	$C_3-C_4(W)$	ค่าความไวในการตอบสนองในทิศตั้งฉาก ($\mu V/G$)		
		อุปกรณ์ตัวที่ 1	อุปกรณ์ตัวที่ 2	อุปกรณ์ตัวที่ 3
1	100	24	25	30
2	200	34	30	-
3	300	46	43	45

จากตารางที่ 4.3 ค่าความชันของกราฟคือค่าความไวในการตอบสนอง ผลทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากมีค่าขึ้นกับความกว้าง(W) เนื่องจากในโครงสร้างเดียวกันของอุปกรณ์ทุกชั้นมีค่าความกว้าง(W) เท่ากันอุปกรณ์ทุกชั้นจะมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากใกล้เคียงกันในโครงสร้างเดียวกัน และจากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างขั้ว C_3-C_4 ที่มากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความไวในการตอบสนองในแนวตั้งฉากเพิ่มขึ้น

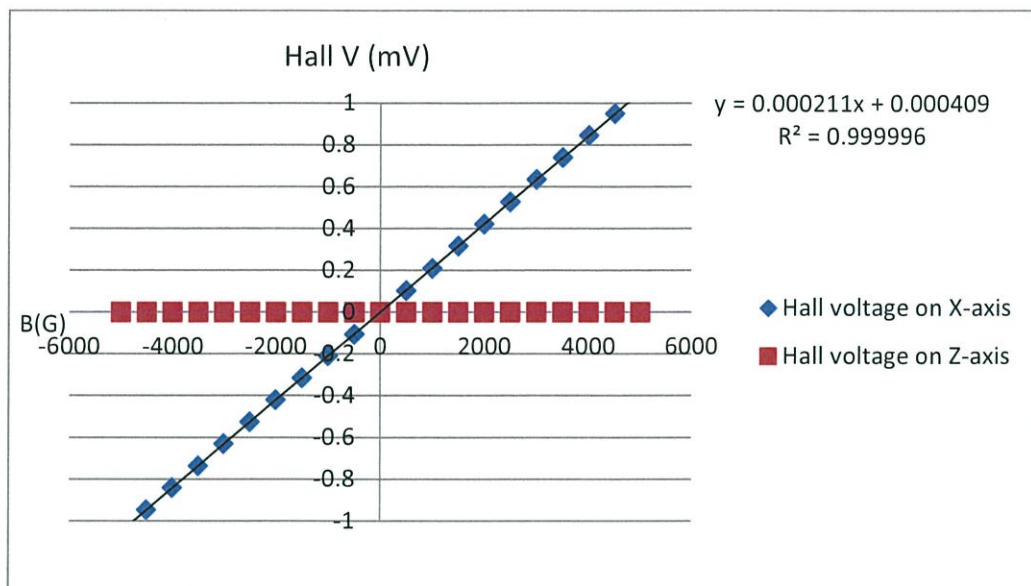
4.2.2 ผลการทดลองคุณสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดฮอลล์



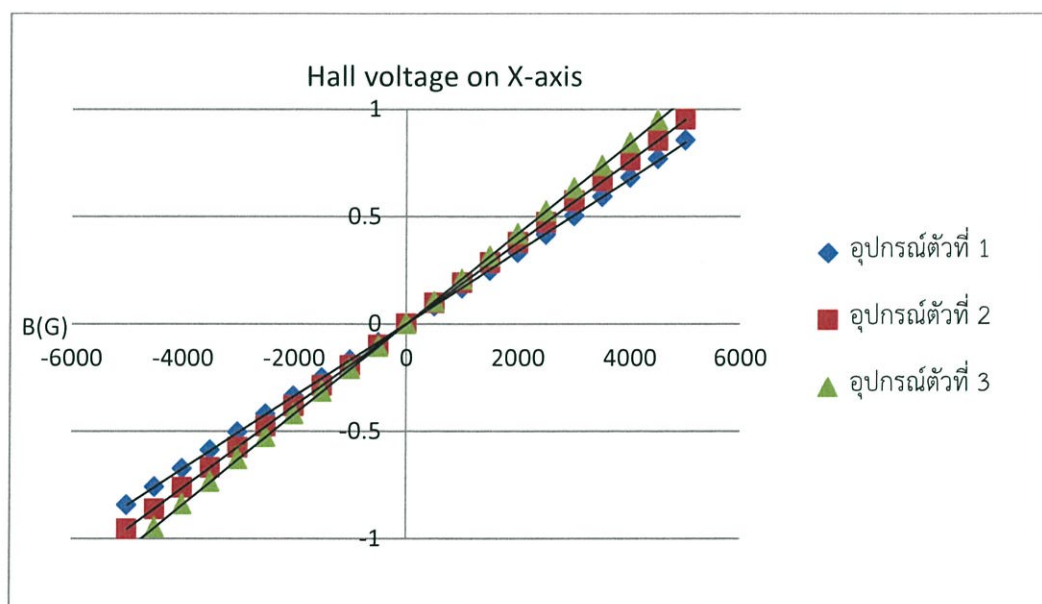
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในโครงสร้างที่ 3
เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดฮอลล์ตัวที่ 1



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในโครงสร้างที่ 3
เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดฮอลล์ตัวที่ 2



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในโครงสร้างที่ 3 เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดฮอลล์ตัวที่ 3



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์บนโครงสร้างที่ 1 ของอุปกรณ์ฮอลล์แต่ละตัวเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดฮอลล์

จากรูปที่ 4.10 ผลจากการทดสอบเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กโดยปรับเครื่องอิล็กโตรแม็กเน็ตที่จ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับตัวอุปกรณ์แล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า C_1 - C_2 ในแต่ละโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามแม่เหล็ก

และแรงดันไฟฟ้าฮอลล์อย่างเป็นเชิงเส้น โดยค่าความชันของกราฟคือค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของแต่ละ

โครงสร้างเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับตัวอุปกรณ์

อุปกรณ์ตัวที่	$C_1-C_2(S)$	ค่าความไวในการตอบสนองในแนวขนาน ($\mu V/G$)		
		โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2	โครงสร้างที่ 3
1	100	169	172	169
2	200	188	189	192
3	300	210	-	211

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากมีค่าขึ้นกับระยะ(S) โดยทุกโครงสร้างจะมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานใกล้เคียงกันในอุปกรณ์ชิ้นเดียวกัน เนื่องจากในอุปกรณ์เดียวกันนั้นมีค่าระยะ(S) ที่เท่ากันในทุกโครงสร้าง แต่ว่าอุปกรณ์แต่ละตัวนั้นมีค่าระยะ(S) ที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างขั้ว C_1-C_2 ที่มากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความไวในการตอบสนองในแนวขนานเพิ่มขึ้น

4.1.3 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ถูกขยายสัญญาณ

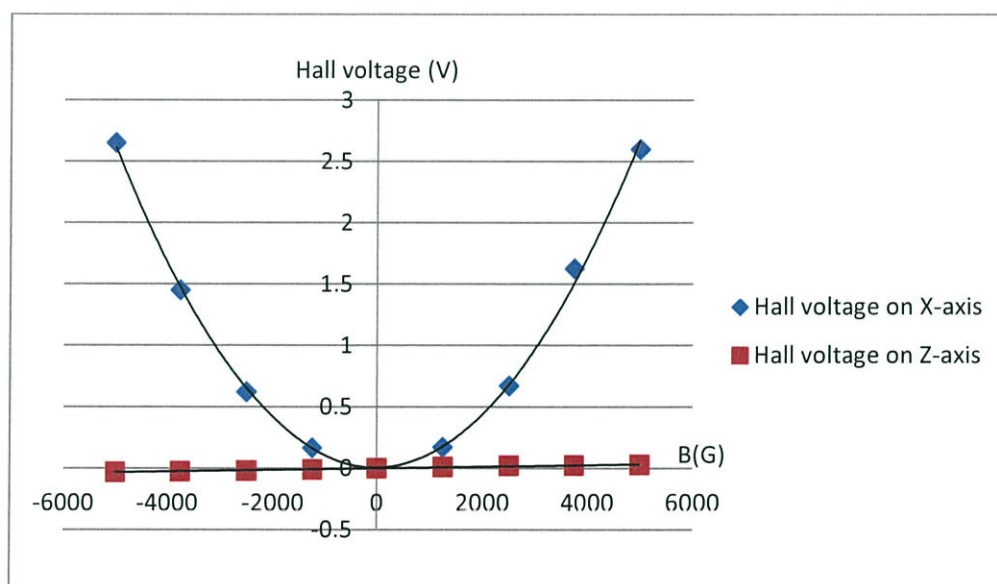
สำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศขนานกับหัววัดหลังผ่านวงจรขยายให้มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 1.015 mV/G มีการขยายสัญญาณประมาณ 5,000 เท่าเมื่อเทียบกับค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ยังไม่ผ่านวงจรขยายสัญญาณ และการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดหลังผ่านวงจรขยาย มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 1.004 mV/G มีการขยายสัญญาณประมาณ 22,000 เท่าเมื่อเทียบกับค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ยังไม่ผ่านวงจรขยายสัญญาณ เมื่อเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์ทั้งสองทิศทางพบว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อ

สนามแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถนำค่าความไวในการตอบสนองทั้งสองทิศทางของหัววัดไปประยุกต์ใช้ในการวัดที่ไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม

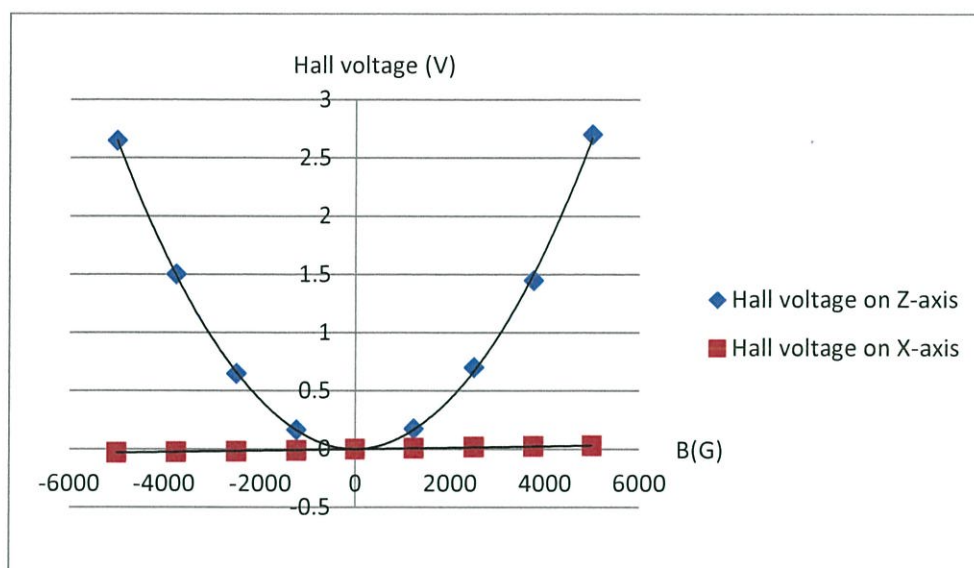
4.1.4 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรถ่ายสัญญาณอนาล็อก

4.1.4.1 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรถ่ายกำลังสอง

ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากผ่านวงจรถ่ายกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ 0, 1,250, 2,500, 3,750 และ 5,000 เกาส์ โดยลักษณะของกราฟเป็นแบบพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $y = x^2$ ซึ่งจากการทดลองใช้วงจรถ่ายกำลังสองในการคำนวณสัญญาณที่มีค่าเอาต์พุตคือ $V_{out} = \frac{V_m^2}{10}$



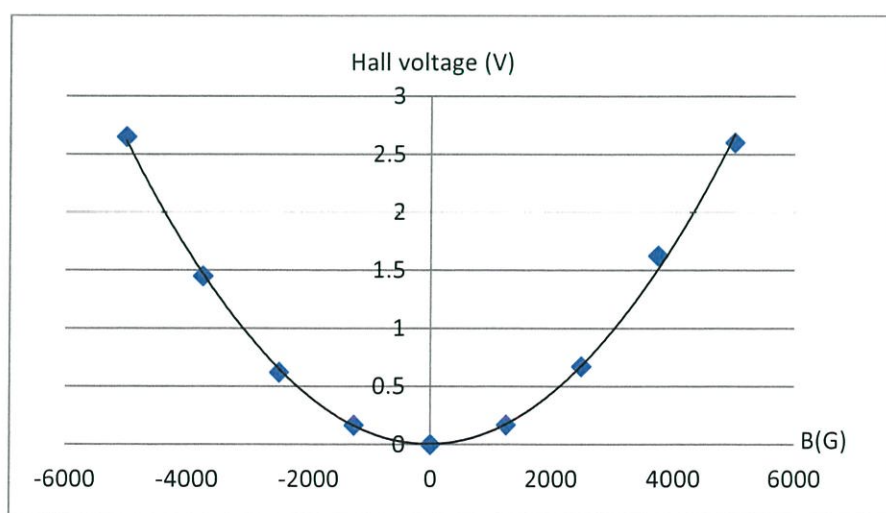
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถ่ายกำลังสองกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขนาน



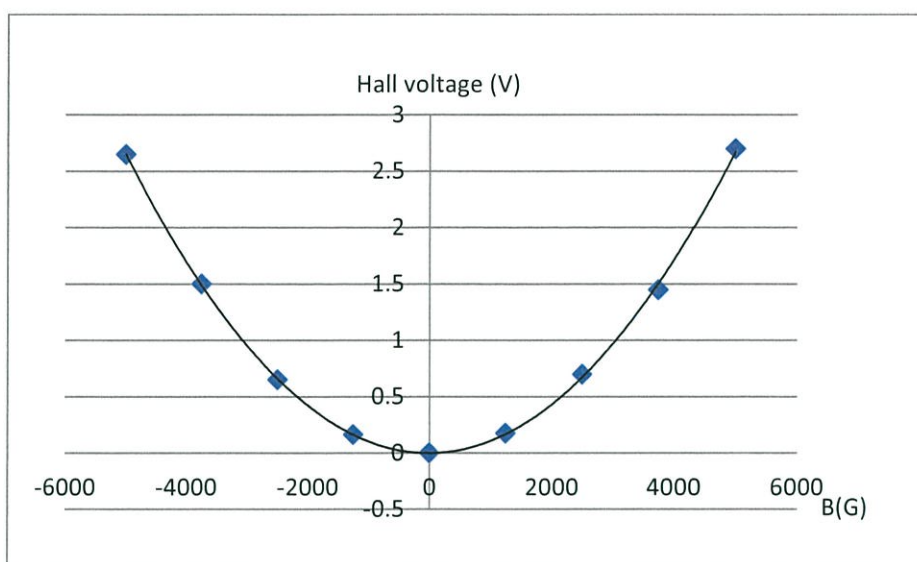
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรรยกำลังสองกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศตั้งฉาก

4.1.4.2 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรรวมสัญญาณ

รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองรวมสัญญาณเอาท์พุทของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่สนามแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดทั้งในทิศตั้งฉากและขนาน ซึ่งทำการทดสอบการตอบสนองต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ 0, 1,250, 2,500, 3,750 และ 5,000 เกาส์



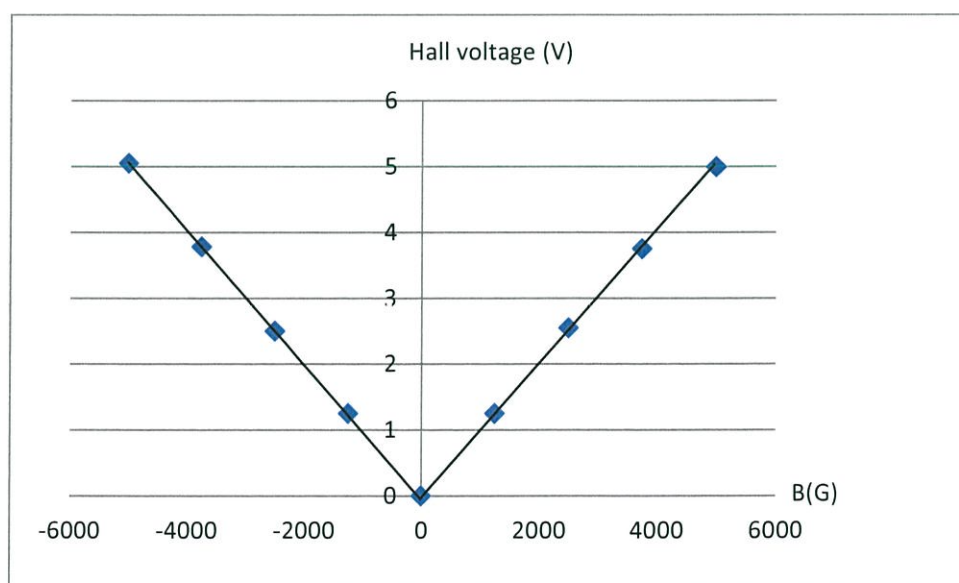
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกรวมสัญญาณกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขนาน



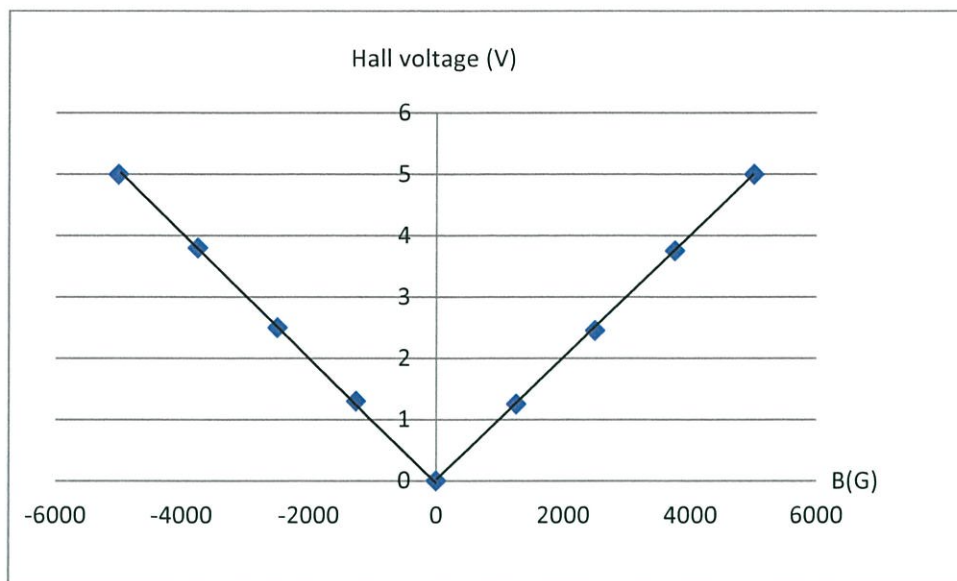
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกรวมสัญญาณกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศตั้งฉาก

4.1.4.3 ผลการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติเมื่อผ่านวงจรถอดรากที่สอง

นำสัญญาณเอาต์พุตจากการทดลองที่ 4.1.4.2 มาผ่านวงจรถอดรากที่สอง ผลแสดงดังกราฟรูปที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งมีลักษณะกราฟที่สอดคล้องกับสมการ $y = |x|$



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถอดรากที่สองกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขนาน

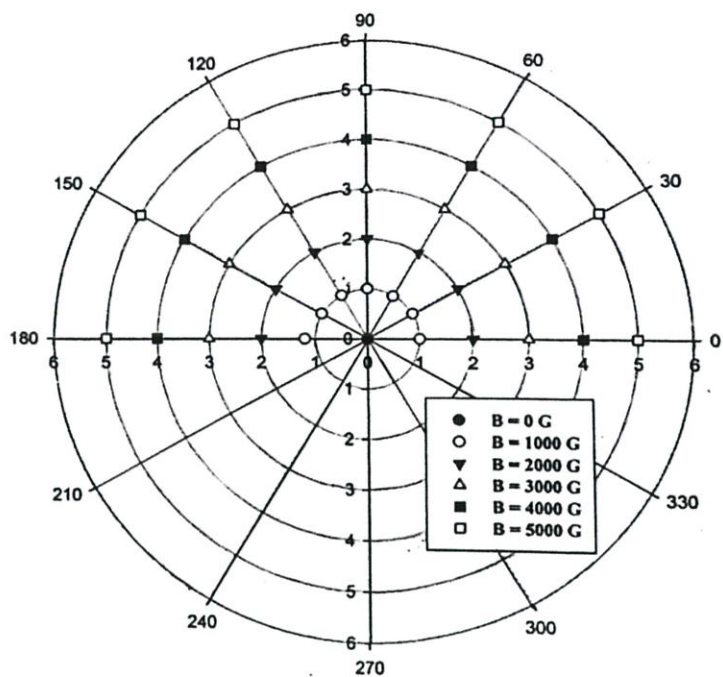


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรถอดรากที่สองกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศตั้งฉาก

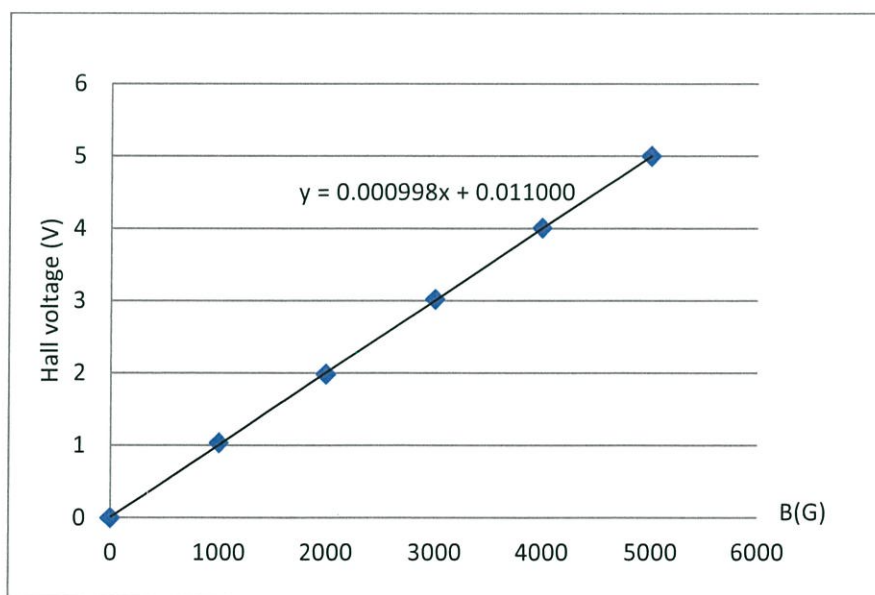
ผลการทดลองข้างต้นได้ทำการคำนวณตามสมการ $V_H = \sqrt{V_{HX}^2 + V_{HZ}^2}$ และมีผลการทดลองที่ถูกต้อง สามารถนำไปวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้

4.2 การทดสอบการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางของหัววัดฮอลล์สองมิติ

นำวงจรรอนาสีอกมาทดสอบการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางจ่ายค่าสนามแม่เหล็กความเข้มคงที่ 5 ค่าคือ 0, 1,000, 2,000 3,000 และ 5,000 เกาส์สำหรับมุม 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 องศา กับหัววัดฮอลล์ ผลทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าผลการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแต่ละมุมมีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับทิศทาง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่กับมุมที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัดได้กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เครื่องมือมาตรฐาน

จากนั้นนำผลมาทดสอบการวัดเทียบของระบบการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางกับเครื่องมือมาตรฐาน (FW BELL5170) ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางวัด
ได้กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เครื่องมือมาตรฐานวัดได้

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ เครื่องมือมาตรฐานวัดได้ (G)	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ ระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ ขึ้นกับทิศทางวัดได้ (G)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
0	0.0001	0
1000	1034	3.4
2000	1984	1.6
3000	3018	1.8
4000	4005	0.5
5000	4998	0.2

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่วัดได้ทั้งในทิศทางตั้งฉากและขนาน ซึ่งหัววัดสนามแม่เหล็กนี้จะทำการขยายสัญญาณโดยผ่านวงจรขยายเพื่อที่จะเห็นค่าความไวในการตอบสนองที่ดีขึ้น และใช้โปรแกรม Lab-View ในการติดต่อกับบอร์ดคอนโทรลเลอร์เพื่อรับข้อมูลที่อ่านได้มาแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ แล้วนำผลที่ได้มาทำการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน Gauss meter รุ่น F.W Bell 5170 เพื่อประยุกต์ใช้งานสำหรับการวัดมุม

ในการทดลองเลือกใช้หัววัดฮอลล์สองมิติ 3 ชั้นที่มีระยะขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือทั้ง 3 โครงสร้างมีระยะ S ที่เท่ากันในอุปกรณ์ชิ้นเดียวกันคือ $40\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$, $80\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ ในอุปกรณ์แต่ละชิ้นมีความกว้าง (W) ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างที่ 1 มีค่า $W = 100\ \mu\text{m}$ โครงสร้างที่ 2 มีค่า $W = 200\ \mu\text{m}$ และโครงสร้างที่ 3 มีค่า $W = 300\ \mu\text{m}$ เหมือนกันในอุปกรณ์ทุกชิ้น นำมาทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า คือค่าความต้านทานระหว่างรอยสัมผัส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างขั้วมีผลต่อความต้านทานระหว่างขั้ว โดยค่าความต้านทานจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างขั้ว และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีความเป็นเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่ารอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำของหัววัดฮอลล์สองมิติเป็นแบบโอห์มมิก

หลังจากนั้นทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของแต่ละโครงสร้างบนทุกอุปกรณ์โดยจ่ายกระแสคงที่ $1\ \text{mA}$ แล้วปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ตั้งตั้งแต่ -5000 ถึง 5000 เกาส์

ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากของแต่ละโครงสร้างที่ค่าความกว้าง (W) ไม่เท่ากัน โดยโครงสร้างที่ 1 ($W = 100\ \mu\text{m}$) มีค่าความไวในการตอบสนอง $25\ \mu\text{V/G}$ โดยประมาณ โครงสร้างที่ 2 ($W = 200\ \mu\text{m}$) มีค่าความไวในการตอบสนอง $32\ \mu\text{V/G}$ โดยประมาณ และโครงสร้างที่ 3 ($W = 300\ \mu\text{m}$) มีค่าความไวในการตอบสนอง $45\ \mu\text{V/G}$ โดยประมาณ

และผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานของอุปกรณ์แต่ละชั้นที่ระยะ (S) ไม่เท่ากัน โดยอุปกรณ์ตัวที่ 1 ($S = 40\ \mu\text{m}$) มีค่าความไวในการตอบสนอง $170\ \mu\text{V/G}$ โดยประมาณ อุปกรณ์ตัวที่ 2 ($S = 60\ \mu\text{m}$) มีค่าความไวในการตอบสนอง $190\ \mu\text{V/G}$ โดยประมาณ และอุปกรณ์ตัวที่ 3 ($S = 80\ \mu\text{m}$) มีค่าความไวในการตอบสนอง $210\ \mu\text{V/G}$ โดยประมาณ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าห้วงอวกาศสองมิตินี้มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน(B_x) ที่สูงกว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (B_z) จากข้อมูลยังแสดงว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าฮอลล์มีผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อห้วงอวกาศ โดยโครงสร้างที่ 3 ของอุปกรณ์ตัวที่ 3 มีค่าความไวในการตอบสนองที่ดีที่สุดทั้งสองทิศทาง จึงเลือกโครงสร้างที่ 3 ของอุปกรณ์ตัวที่ 3 มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่อไป

จากนั้นต่อห้วงอวกาศเข้ากับชุดวงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์เพื่อให้เห็นผลการตอบสนองที่ดีขึ้น โดยทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในทิศตั้งฉากกับห้วงอวกาศด้วยอัตราขยายประมาณ 5,000 เท่า และในแนวขนานกับห้วงอวกาศด้วยอัตราขยายประมาณ 25,000 เท่า ซึ่งค่าความไวในการตอบสนองเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้วในทั้งสองทิศทางมีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับการนำไปวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้วงอวกาศที่ไม่ขึ้นกับทิศทางได้ตามความสัมพันธ์ตรีโกณมิติ $V_H = \sqrt{V_{Hx}^2 + V_{Hz}^2}$ นั้น ทำได้โดยการนำสัญญาณที่ขยายแล้วไปเข้าวงจรคำนวณเชิงอนาล็อก 3 ส่วนคือ วงจรยกกำลังสอง, วงจรรวมสัญญาณ และวงจรถอดรากที่สอง

ผลการทดสอบวงจรยกกำลังสองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองทิศทางที่ทำการทดสอบการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ที่ 0, 1,250, 2,500, 3,750, และ 5,000 เกาส์ พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ผ่านวงจรยกกำลังสองกับความเข้มสนามแม่เหล็กมีลักษณะพาราโบลาตามสมการ $y = x^2$ แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ได้ถูกยกกำลังสองแล้ว จากนั้นนำสัญญาณที่ถูกยกกำลังสองแล้วทั้งสองทิศทางมาทำการรวมสัญญาณโดยผ่านวงจรรวมสัญญาณ กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นพาราโบลาที่มีการยกออฟเซตขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าในสองทิศทางมีการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน และเมื่อนำสัญญาณที่รวมทั้งสองสัญญาณแล้วมาผ่านวงจรถอดรากที่สอง พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่รวมกันแล้วกับความเข้มสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นรูปตัววีเป็นไปตามสมการ $y = |x|$ แสดงให้เห็นว่าสัญญาณได้ถูกถอดรากที่สองแล้ว ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรคำนวณสัญญาณมีความถูกต้องสอดคล้องกับสมการสำหรับการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

จากนั้นนำชุดอุปกรณ์มาวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยจ่ายความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ 0, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 และ 5,000 เกาส์ ที่มุม 0, 45, 90, 135 และ 180 องศา ซึ่งผลการวัดในแต่ละมุมมีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ เมื่อนำค่าที่วัดได้ไปสอบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.2 ถึง 3.4% ค่าที่วัดได้สอดคล้องกับสมการเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

บรรณานุกรม

เจริญ เพชรมณี. เรียนลัด LabVIEW. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น

สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ไอซ์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2549.

สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2551.

Dieter K.Muller. Semiconductor material and device characterization New York: John Wiley & Sons, Inc. 2007

Fukuda M. Optical Semiconductor Devices. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1999.

PavelRipka. Magnetic Sensors and Magnetometers. Boston, London :Artech House, Inc. 2001.

Poppvic R S. Hall Effect Devices. 2rd ED. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing, Ltd. 2004

Ransdom E. Hall-Effect Sensor Theory and Application. 2 ED. Oxford:Elsevier,Inc2006

Richard S.Muller and Theodore I.Kamins.Device Electronics for Intergrated Circuit. New York : John Wiley&Sons, Inc. 1986.

Sze S.M. and Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007