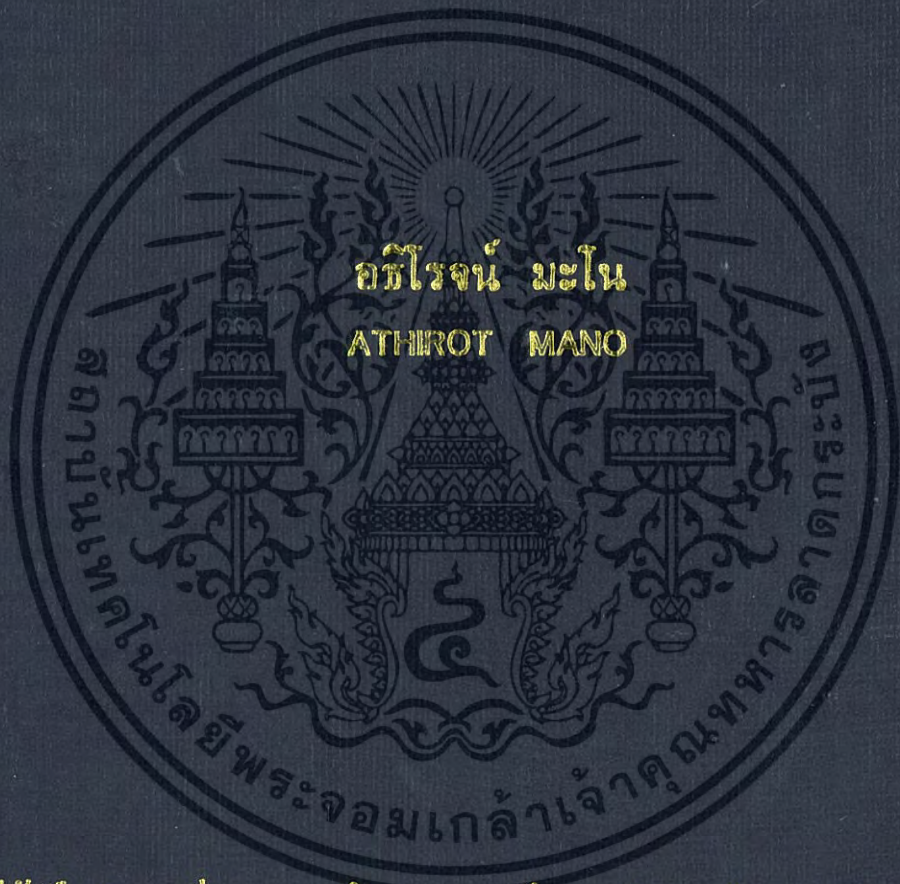


หัวข้อสนามแม่เหล็กชนิดซิลิกอนสองมิติแบบสองมิติ

TWO-DIMENSIONS SILICON HALL MAGNETIC SENSOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-043

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดซิลิกอนฮอลล์แบบสองมิติ

TWO-DIMENSIONS SILICON HALL MAGNETIC SENSOR



T144053



อธีโรจน์ มะโน
ATHIROT MANO

b. 00267032
l.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144053
วัน,เดือน,ปี. 25 ต.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ พ.ศ.2559 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2016-EN-D-018-043

TWO-DIMENSIONS SILICON HALL MAGNETIC SENSOR



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2016
KMUTL-2016-EN-D-018-043



COPYRIGHT 2016


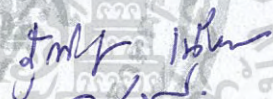



FACULTY OF ENGINEERING

เอกสาร KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

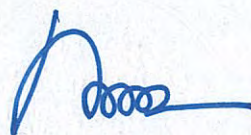
หัวข้อวิทยานิพนธ์ หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดซิลิกอนฮอลล์แบบสองมิติ
Thesis Title Two-Dimensions Silicon Hall Magnetic Sensor
นักศึกษา นายอธิโรจน์ มะโน
รหัสประจำตัว 55610118
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-043

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.วันชัย	ธีรวิรุจ	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.30-12.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่อาจกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องขอยกย่องถึงเจ้าของเนื้อหาที่มีการนำไปใช้
ณ วันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ห้ววัดสนามแม่เหล็กชนิดซิลิกอนฮอลล์แบบสองมิติ
นักศึกษา	นายอธิโรจน์ มะโน
รหัสนักศึกษา	55610118
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างห้ววัดฮอลล์สองมิติสำหรับประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งห้ววัดที่ได้ออกแบบขึ้นเป็นการรวมเอาโครงสร้างฮอลล์เพลตแบบพื้นฐานที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานไว้บนอุปกรณ์แบบพลาเนอร์ ทำให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองมิติบนอุปกรณ์ตัวเดียวกัน โครงสร้างของห้ววัดประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเพียงห้าขั้ว ที่ถูกสร้างขึ้นจากโลหะอลูมิเนียมบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี ซึ่งได้ทำการออกแบบทั้งหมด 6 โครงสร้างซึ่งมีระยะขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ในการทดลองจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ในส่วนแรกเป็นการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้ววัดและส่วนที่สองเป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง [1] โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งโครงสร้างที่มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.070 และ 0.388 $\mu\text{V}/\text{G}$ ตามลำดับ ที่กระแส 0.5 มิลลิแอมป์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก -5,000 ถึง 5,000 เกาส์ โดยการตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองในการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับห้ววัด 0-180 องศา เป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์โดยสมบูรณ์ นอกจากนี้ห้ววัดฮอลล์ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง เพื่อให้สามารถใช้งานห้ววัดร่วมกับเทคนิคการวัดได้อย่างสอดคล้อง สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองที่ได้จากห้ววัดจึงถูกขยายด้วยอัตราขยายเท่ากับ 17,400 และ 3,100 เท่า สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากและแนวขนานตามลำดับ ทำให้ค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นและมีค่าเท่าเทียมกันซึ่งมีค่าประมาณ 1.2 mV/G ด้วยสมบัติการตอบสนองของห้ววัดจึงสามารถทำการทดลองในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ที่ไม่ขึ้นกับมุมได้จากสมการของหลักการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง และสามารถคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางโดยใช้โปรแกรมแลบวิวได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด 2,000 เกาส์ โดยทำการสอบเทียบกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน(FWBELL5170) ดังนั้นจากการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงการนำเอาฮอลล์สองมิติมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม และสามารถนำไปพัฒนาสร้างเป็นห้ววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในรูปแบบวงจรรวมต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	TWO-DIMENSIONS SILICON HALL MAGNETIC SENSOR
Student	Mr. Athirot Mano
Student ID.	55610118
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

The aim of this thesis is fabrication of 2-D Hall device for application relating with the independent directional magnetic field measurement technique. This device is designed by using combination of the conventional Hall plate structure and vertical Hall structure placed on planar Hall device together in order for this device to response to magnetic field on two dimensions in single device. This structure consists of only five Al Ohmic contacts which are growth on the top side of P-type silicon substrate. There are 6 structures and each structure has different distance of sensitive Ohmic contact. The experiments are divided in two main parts which are characterization on magnetic field response properties and application of 2-D Hall device for measurement technique. And as the result, the magnetic field response on every device with high linearity. For the device that has highest sensitivity at 0.5 mA bias current which equal to 0.070 and 0.388 $\mu\text{V}/\text{G}$ for perpendicular and parallel field response, respectively. The both outputs of Hall voltage are depending on an angle that magnetic field interact with device which corresponds absolutely in sine and cosine function. Furthermore, an application of 2-D Hall device was tested. To be able to use 2-D Hall device with consistent measurement technique. The signal of two dimensions magnetic field response are amplified by using instrument amplifier with different gain approximately as 17,400 and 3,100 times for perpendicular and parallel field response, respectively in order to increase sensitivity response to approximately 1.2 mV/G. With the characteristic of 2-D Hall device that corresponds with this measurement technique can calculate constant Hall voltage and magnetic flux density with high accuracy by using equation of independent directional magnetic field measurement technique with LabVIEW programing. The precision of this measurement technique is determined by error percentage less than 1% which are compared with standard Gaussmeter (FWBELL5170) in maximum magnetic flux density as 2,000 gauss. Therefore, the results of 2-D Hall device characteristic are proven that designed device is efficient for independent directional magnetic field measurement technique and can be developed for design and fabricate independent directional magnetic sensor in an integrated circuit.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยคำแนะนำ และแนวคิดสำหรับการพัฒนางานวิจัย จาก รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าได้ร่วมงานวิจัย ทำให้รู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาของท่านอาจารย์ที่คอยให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการรวมถึงด้านการดำเนินชีวิต ในโอกาสนี้จึงขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้การสนับสนุนสำหรับการสร้างห้วัดสนามแม่เหล็กฮอลล์สองมิติ ตลอดจนการให้คำปรึกษาและแนวคิดสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) รหัสผู้รับทุน TG-๔๔-๒๒-๕๖-๐๑๐D ที่ให้โอกาสสำหรับการเป็นส่วนหนึ่งเพื่อทำงานวิจัยในการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ ตลอดจนสนับสนุนทุนการศึกษาสำหรับการศึกษาวิจัยให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.จิรวัดน์ ปราบเขต และทีมงานนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยสนับสนุนและช่วยเหลือสำหรับกระบวนการสร้างห้วัดสนามแม่เหล็ก ตลอดจนให้คำแนะนำเพื่อทำให้เกิดผลสำเร็จในการสร้างอุปกรณ์

ขอขอบคุณ อริญญา พันธุ์พานิช ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบสมบัติของห้วัดฮอลล์ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่คอยผลักดันให้สามารถต่อสู้กับอุปสรรคจนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่วัยเยาว์จนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณเอกสารอ้างอิงต่างๆที่ข้าพเจ้าได้หยิบยกมา ก่อให้เกิดองค์ความรู้ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งข้าพเจ้าคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจทางด้านการศึกษาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับสร้างเป็นห้วัดสนามแม่เหล็ก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่มีความแม่นยำสูงต่อไปอนาคตได้

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อสุเมธ และคุณแม่รำไพ มะโน ที่อบรมสั่งสอนให้ข้าพเจ้าเป็นคนดี มีจิตสำนึกที่ดีและประพฤติปฏิบัติดีเพื่อพัฒนาประเทศชาติ ตลอดจนเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าสามารถทำงานได้สำเร็จลุล่วง คุณประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่คุณพ่อและคุณแม่ที่รักและเคารพยิ่ง

อธิโรจน์ มะโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	5
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	7
2.1 ปรากฎการณ์ฮอลล์.....	7
2.1.1 ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อจุดประจุในปรากฏการณ์ฮอลล์.....	8
2.1.2 ปรากฎการณ์ฮอลล์ในสารตัวนำ.....	11
2.1.3 ปรากฎการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ.....	13
2.1.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทริชนิด.....	13
2.1.3.2 ปรากฎการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทริชนิด.....	16
2.1.4 หัววัดฮอลล์สำหรับสร้างเป็นวงจรรวม.....	18
2.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	20
2.2.1 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	20
2.2.2 ปรากฎการณ์ฮอลล์ในฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	22
2.3 เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ.....	24
2.3.1 หลักการของเทคนิคการวัด.....	24
2.3.2 วงจรไฟฟ้าสำหรับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	25
2.3.2.1 วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์.....	25
2.3.2.2 วงจรกำลังสอง (Squaring circuit).....	27
2.3.2.3 วงจรถอดรากที่สอง (Square rooting circuit).....	28
บทที่ 3 การทดสอบสมบัติหัววัดฮอลล์สองมิติและการประยุกต์ใช้งาน.....	29
3.1 กระบวนการสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	29
3.2 โครงสร้างทางกายภาพและการต่อใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	33
3.2.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	33
3.2.2 ลักษณะการใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การทดสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	38
3.3.1 การทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิคของขั้วไฟฟ้า.....	39
3.3.2 การทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์.....	40
3.3.3 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม.....	42
3.4 การทดสอบระบบประมวลสัญญาณการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	43
3.4.1 การทดสอบอัตราการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติ.....	44
3.4.2 การทดสอบระบบแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC).....	45
3.5 การทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดสนามแม่เหล็ก.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	48
4.1 ผลการทดสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดฮอลล์.....	48
4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติขั้วไฟฟ้าโอห์มมิคของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	48
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	51
4.1.2.1 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนาน.....	51
4.1.2.2 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก.....	57
4.1.2.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์.....	63
4.1.3 ผลทดสอบสมบัติการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติที่ขึ้นกับมุม.....	66
4.1.4 การวิเคราะห์ผลสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของฮอลล์สองมิติ.....	67
4.1.4.1 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์.....	68
4.1.4.2 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์.....	69
4.2 การประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์สองมิติสำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	70
4.2.1 ผลทดสอบการปรับปรุงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติ.....	70
4.2.2 ผลทดสอบระบบอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า.....	74
4.2.3 ผลทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	76
4.2.4 ผลทดสอบระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	83
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก. โปรแกรมแลบวิวที่ใช้ในงานวิจัย.....	91
ภาคผนวก ข. วงจรขยายและวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	92
ภาคผนวก ค. ข้อมูลอุปกรณ์การขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์.....	93
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่ระยะ $S=40\mu\text{m}$, $W=100, 200$ และ $300\mu\text{m}$	36
3.2	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่ระยะ $S=80\mu\text{m}$, $W=100, 200$ และ $300\mu\text{m}$	37
4.1	เปรียบเทียบค่าความไวของฮอลล์ทั้งหกโครงสร้างที่กระแส 0.5 mA	63
4.2	เปรียบเทียบค่าความไวของฮอลล์ทั้งหกโครงสร้างที่กระแส 1 mA	64
4.3	เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ภายใต้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ.....	77
4.4	ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กที่มุม 10 องศา.....	81
4.5	ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กที่มุม 20 องศา.....	81
4.6	ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กที่มุม 30 องศา.....	81
4.7	ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กที่มุม 40 องศา.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	3
1.2 ฮอลล์แนวตั้งแบบพลาแนร์.....	4
1.3 หัววัดสนามแม่เหล็กแนวขนาน.....	4
1.4 การตอบสนองของหัววัดฮอลล์ที่ขึ้นกับมุม.....	4
1.5 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่วางตั้งฉากกัน.....	5
2.1 เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็ก.....	7
2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารตัวนำ.....	8
2.3 ผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับประจุพาหะภายในสารของแข็ง.....	8
2.4 ผลของสนามแม่เหล็กกระทำต่อจุดประจุที่มีการเคลื่อน.....	10
2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารตัวนำของแข็ง.....	10
2.6 กลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำ.....	16
2.7 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สำหรับการสร้างวงจรรวม.....	19
2.8 ความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x,y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย.....	20
2.9 กราฟฟังก์ชันไซน์สำหรับพิกัดจุด (x,y) บนวงกลมหนึ่งหน่วย.....	21
2.10 กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \sin x$	21
2.11 กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันโคไซน์ $y = \cos x$	21
2.12 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ.....	23
2.13 การเลื่อนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์.....	23
2.14 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์.....	25
2.15 วงจรกำลังสองด้วยไอซี MYP634.....	27
2.16 วงจรถอดรอกที่สองด้วยไอซี MYP634.....	28
3.1 เครื่องมือการผลิตหัววัด.....	30
3.2 ภาพจำลองการสร้างชั้นอะลูมิเนียมบนฐานรองซิลิคอน.....	30
3.3 ภาพจำลองการเคลือบน้ำยาไวแสงบนชั้นอะลูมิเนียม.....	31
3.4 ภาพจำลองการฉายแสงในกระบวนการลิโทกราฟี.....	31
3.5 ภาพจำลองการเดเวลอปสารไวแสงเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า.....	32
3.6 ภาพจำลองการกัดชั้นอะลูมิเนียม.....	32
3.7 ภาพจำลองการลอกน้ำยาไวแสง.....	32
3.8 หัววัดฮอลล์ที่ได้จากกระบวนการสร้าง.....	33
3.9 หัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์สองมิติในแพ็คเกจ PDIP24.....	33
3.10 (ก) ภาพขั้วไฟฟ้าไอทมมิค.....	34
(ข) ภาพตัดขวางของอุปกรณ์.....	34
3.11 พารามิเตอร์ของระยะ W , L และ S ที่ใช้ในการออกแบบหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	35
3.12 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=100\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$	35
3.14 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=300\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$	36
3.15 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$	36
3.16 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=200\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$	37
3.17 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$	37
3.18 ภาพจำลองการใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	38
3.19 เครื่องทดสอบสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A.....	39
3.20 หัววัดรุ่น Cascade Microtech Model M150.....	40
3.21 ตัวอย่างการทดสอบรอยสัมผัสแบบโหม้มิคของหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	40
3.22 (ก) สนามแม่เหล็กทิศตั้งฉาก.....	41
(ข) สนามแม่เหล็กทิศขนาน.....	41
3.23 (ก) ทิศสนามแม่เหล็กกระทำตั้งฉากกับหัววัดตามแนวแกน z	42
(ข) ทิศสนามแม่เหล็กกระทำขนานกับหัววัดตามแนวแกน x	42
3.24 การทดสอบสมบัติการตอบสนองของหัววัดที่ขึ้นกับมุม.....	43
3.25 แผนภาพไดอะแกรมระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็ก.....	43
3.26 ระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	44
3.27 การต่อวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์เข้ากับหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์.....	44
3.28 วงจรขยายอินสตรูเมนต์.....	45
3.29 ระบบการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	46
3.30 บอร์ดแปลงสัญญาณทั้งสอง.....	46
3.31 วงจรแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง.....	46
3.32 บอร์ดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในการสอบเทียบแบบ 5 จุด.....	47
3.33 การแสดงผลความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบบนโปรแกรมแลบวิว.....	47
4.1 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า C_3 กับ C_4 ($W=300\mu\text{m}$) ของหัววัด.....	49
4.2 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า C_1 และ C_2 ($W=80\mu\text{m}$) ของหัววัด.....	49
4.3 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า C_2 และ C_5 ($L=300\mu\text{m}$) ของหัววัด.....	50
4.4 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 1 ($W=100\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$).....	51
4.5 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 2 ($W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$).....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 3 ($W=300\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$).....	53
4.7 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 4 ($W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$).....	54
4.8 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 5 ($W=200\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$).....	55
4.9 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 6 ($W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$).....	56
4.10 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 1 ($W=100\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$).....	57
4.11 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 2 ($W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$).....	58
4.12 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 3 ($W=300\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$).....	59
4.13 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 4 ($W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$).....	60
4.14 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 5 ($W=200\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$).....	61
4.15 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์ โครงสร้างที่ 6 ($W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$).....	62
4.16 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากและแนวขนานของ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 6 ($W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$) ที่กระแส 0.5 มิลลิแอมป์.....	66
4.17 กราฟความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ 0-180 องศา.....	67
4.18 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	68
4.19 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	68
4.20 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	69
4.21 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์สองมิติ.....	69
4.22 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_x) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก -2,000 ถึง 2,000 เกาส์.....	71
4.23 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_z) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก -2,000 ถึง 2,000 เกาส์.....	72
4.24 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_x) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก -2,000 ถึง 2,000 เกาส์.....	72
4.25 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_z) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก -2,000 ถึง 2,000 เกาส์.....	73
4.26 กราฟความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มุม 0-180 องศา ในสนามแม่เหล็ก 2,000 เกาส์.....	74
4.27 การทดสอบอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดที่ 1.....	75
4.28 การทดสอบอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดที่ 2.....	75
4.29 กราฟความสัมพันธ์ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าฮอลล์โดยไม่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ.....	76

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 กราฟความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คิงที่เฉลี่ยภายใต้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ.....	77
4.31 โปรแกรมแลบVIEWสำหรับการคำนวณและแสดงผล.....	78
4.32 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรณีหัววัดทำมุมเอียง 10 องศา.....	79
4.33 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรณีหัววัดทำมุมเอียง 20 องศา.....	79
4.34 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรณีหัววัดทำมุมเอียง 30 องศา.....	80
4.35 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรณีหัววัดทำมุมเอียง 40 องศา.....	80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก(Magnetometer) เป็นเครื่องมือทางการวัดชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในงานทั้งทางภาคอุตสาหกรรมและภาคการศึกษาวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการทดสอบและศึกษาสมบัติของวัสดุสารแม่เหล็ก รวมถึงงานที่มีความเกี่ยวข้องกับการวัดองค์ประกอบทางสนามแม่เหล็ก โดยเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวัดเชิงแม่เหล็กยกตัวอย่างเช่น เครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Gauss Meter), Vibrating Sample Magnetometer (VSM) เป็นต้น [1] โดยเครื่องมือวัดปริมาณความเข้มสนามแม่เหล็กดังที่ได้กล่าวมานี้ ส่วนประกอบหลักที่มีความสำคัญซึ่งมีหน้าที่สำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่สามารถนำมาคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กได้ อุปกรณ์นี้คือ หัววัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic sensors) สำหรับหัววัดสนามแม่เหล็กที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบการวัดทางสนามแม่เหล็กซึ่งมีหลายโครงสร้างยกตัวอย่างเช่น แมกนีโตไดโอด (Magneto diode) , แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magneto transistor), Magnetic field-effect transistor (MAGFET) และ ฮอลล์เพลต (Hall plate) เป็นต้น [2-4] อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่แล้ว หัววัดสนามแม่เหล็กอาศัยหลักการบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งสิ้น ดังนั้นการใช้หัววัดเพียงตัวเดียวในระบบการวัดจึงมีข้อจำกัดในเรื่องของการจัดวางตำแหน่งของหัววัดให้มีทิศตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็กที่ต้องการการวัด เมื่อมีการวางหัววัดให้เอียงไม่ทำมุมตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยจะส่งผลต่อค่าความถูกต้องทำให้ค่าที่อ่านมีโอกาสผิดพลาดสูง

ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมานี้จึงมีการพัฒนาเทคนิคการวัดให้มีความแม่นยำสูงซึ่งไม่ขึ้นกับทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดเรียกว่า เทคนิคการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง (Independent Directional Magnetic field Measurement Technique) [6-9] โดยในระบบเดิมใช้หัววัดฮอลล์เชิงพาณิชย์สองตัวมาวางในทิศทางตั้งฉากกันเพื่อให้การตอบสนองของอุปกรณ์ฮอลล์ทั้งสองมีการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ แล้วทำการหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ตามสมการสำหรับการวัด อย่างไรก็ตามผลที่ได้ยังมีค่าความแม่นยำที่ไม่สูงมากเนื่องจากการนำอุปกรณ์ฮอลล์สองตัวมาจัดวางให้อยู่ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกันโดยสมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ยาก จึงทำให้มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของค่าที่วัดได้

ดังนั้นในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาและทำการออกแบบหัววัดฮอลล์สองมิติขึ้นโดยการรวมเอาโครงสร้างฮอลล์พื้นฐานแบบเพลต (Conventional Hall plate) [2] กับโครงสร้างฮอลล์แนวตั้ง (Vertical Hall sensor) [4-5] แบบหัววัดสนามแม่เหล็กแนวขนาน (parallel-field hall sensor) [10-15], เข้าไว้บนระนาบเดียวกันเพื่อให้มีการตอบสนองที่สอดคล้องกับหลักการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบกล่าวคือ สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองมิติคือในแนวตั้งฉากและแนวขนาน โดยมีการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขึ้นกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ที่มีความต่างเฟสกัน 90 องศาโดยสมบูรณ์ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดวิธีการวัดแบบเดิมสำหรับการจัดวางตำแหน่งของฮอลล์สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวให้ตั้งฉากกัน ทำให้สามารถพัฒนาเทคนิคการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กให้มีความแม่นยำสูงขึ้น และสามารถนำเอาหัววัดที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างแม่นยำสูงสุด นอกจากนี้ด้วยสมบัติของหัววัดที่ทำการออกแบบขึ้นสามารถการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง สามารถที่จะนำเอาหัววัดไปใช้ในงานที่ต้องการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่มากกว่าหนึ่งทิศทางได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบเป็นเทคนิคการวัดอย่างหนึ่งที่ทำกราคิดค้นและพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแบบเดิมที่อาศัยหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์เพียงอุปกรณ์เดียวในการวัด ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าอันเนื่องมาจากผลของมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดไม่ตั้งฉากกันโดยสมบูรณ์ โดยเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบเดิมนั้นอาศัยหัววัดฮอลล์เชิงพาณิชย์สองตัวมาจัดวางในตำแหน่งที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แล้วใช้ความสัมพันธ์ทางสมการตรีโกณมิติเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ซึ่งโดยไม่ขึ้นกับมุมและทำการคำนวณเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งระบบการวัดเดิมที่ใช้ อาจเกิดความผิดพลาดได้สูงอันเป็นผลเนื่องมาจากการวางหัววัดสองตัวไม่ทำมุมตั้งฉากกันโดยสมบูรณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเทคนิคการวัดลดลง

การใช้เทคนิคการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางให้เกิดประสิทธิภาพที่ส่งผลให้เกิดความแม่นยำของการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดนั้น ต้องอาศัยความสัมพันธ์ของสององค์ประกอบสำคัญคือ หัววัดสนามแม่เหล็กและเทคนิคการวัด ซึ่งหัววัดสนามแม่เหล็กที่ใช้ต้องมีสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กซึ่งมีความสอดคล้องกับเงื่อนไขของเทคนิคการวัด ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นถึงการออกแบบหัววัดฮอลล์สองมิติที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มีขั้นตอนสำหรับกระบวนการสร้างที่น้อย มีการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย และสิ่งที่สำคัญที่สุดคือให้มีการตอบสนองที่มีความสอดคล้องกับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางอย่างสมบูรณ์คือ สมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองมิติและการตอบสนองทั้งสองขึ้นกับมุมต้องเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ ที่สามารถแสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันระหว่างหัววัดสนามแม่เหล็กที่ทำการออกแบบขึ้นกับเทคนิคการวัด เพื่อประยุกต์สร้างเป็นระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

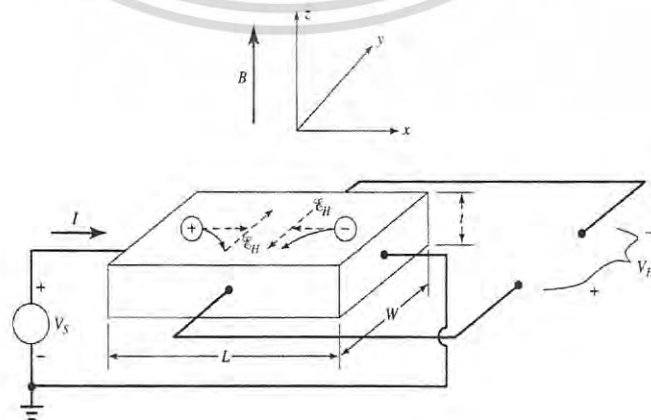
1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เบื้องต้นเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางนั้นเริ่มต้นด้วยการอาศัยหัววัดฮอลล์เชิงพาณิชย์ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป โดยมีสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้เพียงแนวเดียวคือแนวตั้งฉากกับหัววัดซึ่งมีการตอบสนองที่ขึ้นกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ ดังนั้นความต้องการที่จะทำให้อำนาจหัววัดทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกันทำให้เกิดความต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา ส่งผลให้หัววัดอีกตัวมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ แต่เนื่องจากการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ให้ตั้งฉากกันโดยสมบูรณ์เป็นไปได้ยาก จึงเกิดความไม่สอดคล้องกันระหว่างหัววัดกับเทคนิค

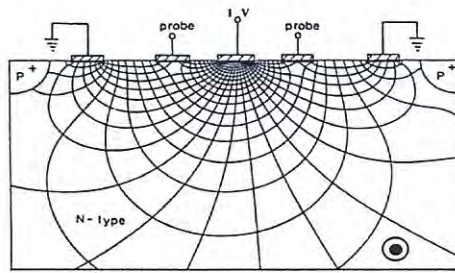
การวัด ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำสำหรับการวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความคิดสำหรับการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองแนวแกนและทั้งสองแนวแกนมีการตอบสนองที่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำมีเฟสต่างกันอยู่ 90 องศา ดังนั้นการตั้งสมมติฐานของการศึกษาเบื้องต้นคือการออกแบบหัววัดบนพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยการเอาโครงสร้างหัววัดฮอลล์เฟลตพื้นฐานที่มีคุณสมบัติเด่นที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัดได้ รวมเข้าด้วยกันกับหัววัดฮอลล์แนวตั้งแบบหัววัดสนามแม่เหล็กแนวขนานที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดเพื่อให้หัววัดที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแม่เหล็กได้ทั้งสองแนวแกนภายในอุปกรณ์ตัวเดียวกัน และมีการตอบสนองเป็นฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดได้อย่างเหมาะสม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

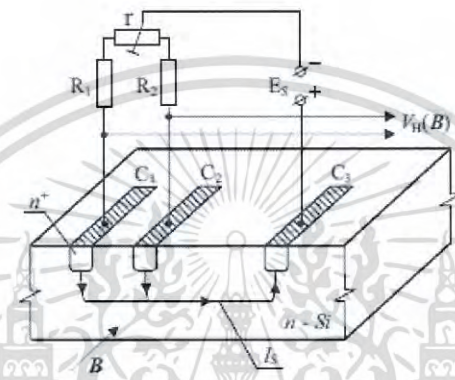
พื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดในเงื่อนไขของการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสารภายใต้สนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉาก ผลของแรงแตรอนสนามแม่เหล็กที่กระทำในทิศตั้งฉากกับแตรอนของกระแสทำให้เกิดแรงลอเรนทซ์ (Lorentz force) ผลักประจุพาหะให้มีการเบี่ยงเบนทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมเรียก ศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดในสารของแข็งกึ่งตัวนำ ที่สามารถอธิบายกลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ได้สองกรณีขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ที่มีประจุพาหะข้างมากเป็นโฮลหรืออิเล็กตรอน สำหรับการอธิบายกลไกของปรากฏการณ์ฮอลล์ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายกลไกการเกิดได้ดังรูปที่ 1.1 [16] โดยปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นโดยการสร้างศักย์ไฟฟ้า (V_S) ระหว่างขั้ว ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในชิ้นสารตามแนวแกน x ผลักประจุให้เกิดการเคลื่อนที่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในชิ้นสารกึ่งตัวนำ เมื่อทำการสร้างสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากให้กับชิ้นสารตามแนวแกน z ด้วยอิทธิพลของแรงลอเรนทซ์เหนี่ยวนำเกิดเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าปรากฏขึ้นระหว่างขั้วในแนวแกน y เรียกความต่างศักย์ไฟฟ้านี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) โดยมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ ดังนั้นในโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แบบพื้นฐานสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ในแนวตั้งฉากเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 1.1 กลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

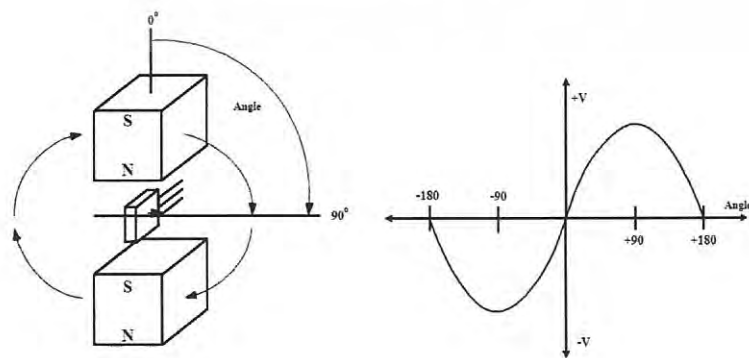


รูปที่ 1.2 ฮอลล์แนวตั้งแบบพลาแนร์



รูปที่ 1.3 หัววัดสนามแม่เหล็กแนวขนาน

เพื่อให้ฮอลล์สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานได้จึงมีการคิดค้นโครงสร้างสำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในแนวขนานซึ่งอุปกรณ์นี้ถูกเรียกเรียกว่า หัววัดแบบพลาแนร์ฮอลล์แนวตั้ง[4-5] แสดงดังรูปที่ 1.2 และหัววัดสนามแม่เหล็กแนวขนาน แสดงดังรูปที่ 1.3 [10-15] โดยมีขั้วไฟฟ้าทั้งหมดอยู่ในแนวเดียวกันทางด้านบนของอุปกรณ์ ลักษณะเช่นนี้ทำให้เวกเตอร์ของกระแสที่ไหลเข้าสู่ชั้นสารเมื่อมีสนามแม่เหล็กกระทำในแนวขนานจึงเกิดแรงลอเรนตซ์ขึ้น ด้วยกลไกนี้จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในชั้นสารที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแนวขนานซึ่งมีขั้วไฟฟ้าเพียง 3 ขั้ว บนพื้นฐานพลาแนร์ฮอลล์แนวตั้งแสดงดังรูปที่ 1.3

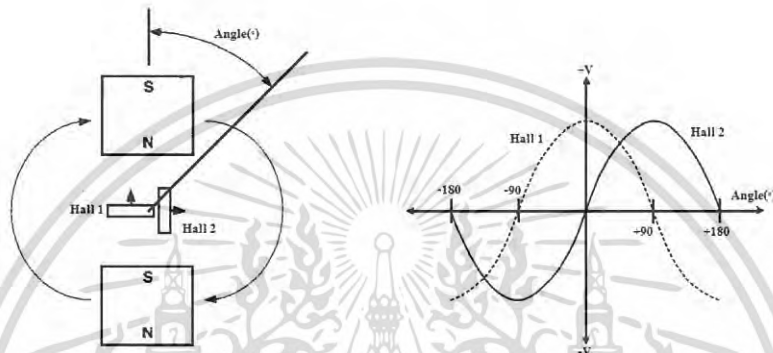


รูปที่ 1.4 การตอบสนองของหัววัดฮอลล์ที่ขึ้นกับมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น ๆ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยทั่วไปที่ใช้หัววัดฮอลล์เพียงอุปกรณ์เดียว อาจมีความผิดพลาดสูง อันเป็นผลเนื่องมาจากมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในการตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ดังรูปที่ 1.4 [3]

จึงได้มีการคิดค้นหลักการวัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับมุมสำหรับสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดขึ้น โดยหลักการอาศัยหัววัดฮอลล์สองตัวมาวางในตำแหน่งที่ตั้งฉากกันแสดงดังรูปที่ 1.5 ทำให้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ ในกรณีนี้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำได้



รูปที่ 1.5 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่วางตั้งฉากกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบโดยรวมเอาโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานและแนวตั้งฉากไว้ในอุปกรณ์เดียวกันเพื่อสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดได้อย่างเหมาะสม

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

โดยทั่วไปแล้วหัววัดสนามแม่เหล็กมีกลไกในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ เช่น แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode), แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor), Magnetic field-effect transistor (MAGFET) และ ฮอลล์เพลต (Hall plate) เป็นต้น ดังนั้นผลกระทบของมุมจึงเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก ในงานวิจัยจึงนำเสนอถึงการออกแบบหัววัดฮอลล์แบบเพลตที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้สองมิติซึ่งทั้งสองแนวแกนมีการตอบสนองขึ้นกับมุมเป็นฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีความเป็นเชิงเส้นสูง และสามารถเชื่อมต่อกับวงจรเพื่อนำไปใช้งานได้ง่าย ด้วยคุณสมบัติของหัววัดตั้งที่กล่าวมาจึงมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้กับหลักการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่มีความแม่นยำในการวัดสูงได้

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตในของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและสร้างห้วัดฮอลล์สองมิติแบบเพลตโดยการรวมเอาโครงสร้างของห้วัดฮอลล์พื้นฐานกับห้วัดฮอลล์แนวตั้งเข้าไว้บนอุปกรณ์เดียวกัน โดยห้วัดที่สร้างขึ้นนี้ถูกนำไปทดสอบสมบัติการตอบสนองเพื่อแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ทั้งแนวขนานและแนวตั้งฉาก และมีการตอบสนองสนามแม่เหล็กเป็นไปตามหลักการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และสุดท้ายสามารถนำห้วัดฮอลล์สองมิติที่ได้สร้างขึ้นมาใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางสำหรับการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำการทดลองให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบได้

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาในหลักการของสองส่วนหลักคือ หลักการของห้วัดสนามแม่เหล็กโครงสร้างต่างๆ บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อทำการออกแบบห้วัดให้มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้ในสองมิติ และในส่วนที่สองคือหลักการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบห้วัดสนามแม่เหล็กให้สามารถตอบสนองสอดคล้องกับหลักการวัดได้ เมื่อทำการออกแบบและสร้างสำเร็จแล้วห้วัดฮอลล์ที่ได้ออกแบบขึ้นจะถูกนำไปทดสอบสมบัติทั้งทางไฟฟ้าและสมบัติทางการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก เพื่อทดสอบให้เห็นถึงสมบัติของห้วัดโครงสร้างต่างๆ และทำการเปรียบเทียบเพื่อเลือกใช้ห้วัดสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ตลอดจนถึงขั้นตอนการทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดที่ได้สร้างขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิด และทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของงานวิจัย และขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กระบวนการสร้างห้วัด โครงสร้างทางกายภาพและการต่อใช้งานของห้วัดฮอลล์สองมิติ การทดสอบสมบัติเฉพาะของห้วัดฮอลล์สองมิติ การทดสอบระบบประมวลสัญญาณการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง และสุดท้ายเป็นการทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดสนามแม่เหล็กสองมิติ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวขนานและแนวตั้งฉากกับห้วัด รวมถึงผลทดสอบการตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขึ้นกับมุมเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับหลักการวัด ตลอดจนทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้ห้วัดฮอลล์สองมิติสำหรับสร้างเป็นระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม

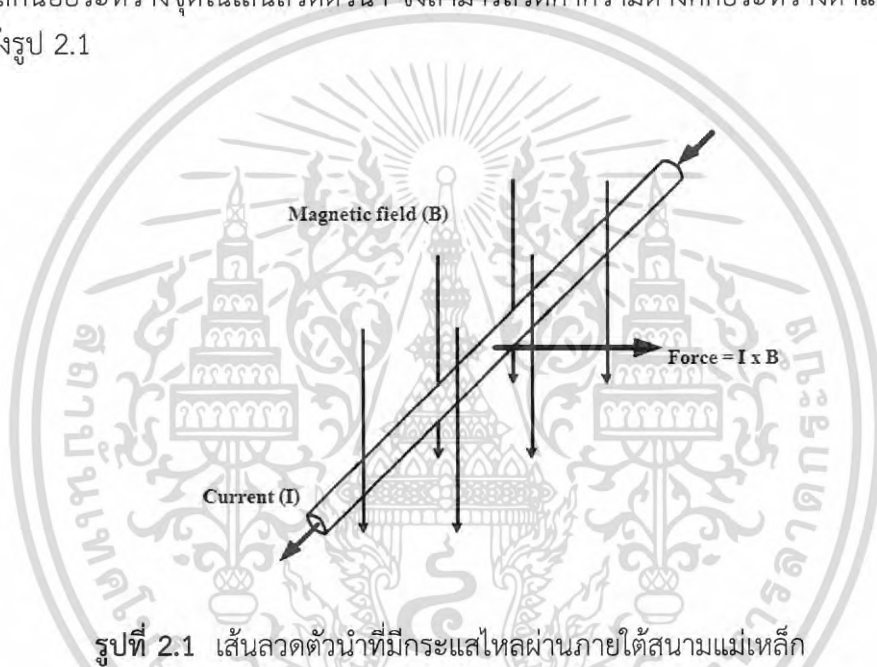
บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

เริ่มต้นปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกศึกษาโดยนักฟิสิกส์ชื่อแอมแปร์ (Andre M. Ampere) [3] ในปี ค.ศ. 1820 โดยเริ่มทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ถึงลักษณะความหนาแน่นกระแสอันเป็นผลเนื่องมาจากประจุพาหะอิเล็กตรอนในสารตัวนำ โดยผลของแรงลอเรนตซ์ที่กระทำต่อประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสระหว่างตำแหน่งในเส้นลวด เกิดความหนาแน่นของกระแสที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยระหว่างจุดในเส้นลวดตัวนำ จึงสามารถวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างตำแหน่งทั้งสองได้แสดงดังรูป 2.1

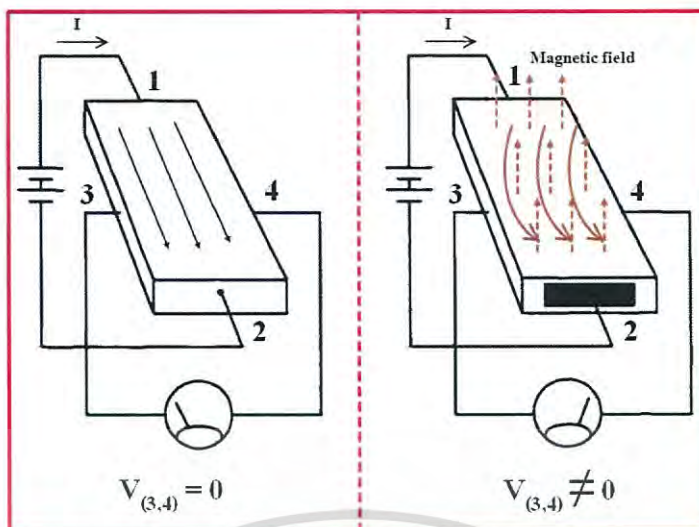


รูปที่ 2.1 เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็ก

ต่อมาในปี ค.ศ. 1879 นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall) ได้ทำการศึกษาและค้นพบปรากฏการณ์อย่างหนึ่งอันเกิดจากผลของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ภายนอกที่กระทำกับชิ้นสารตัวนำขณะที่มีการสร้างสนามไฟฟ้า (Electric field) กระทำกับจุดประจุไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในชิ้นสาร ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ผลของปรากฏการณ์นี้ทำให้สามารถวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมชิ้นสารได้ จากการค้นพบปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงให้เกียรติตั้งชื่อปรากฏการณ์ตามชื่อผู้ค้นพบว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

เบื้องต้นปรากฏการณ์ฮอลล์อย่างง่ายสามารถอธิบายกลไกการเกิดภายในแผ่นสารตัวนำทองแดงแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยทำการสร้างความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 และ 2 ผลของสนามไฟฟ้ากระทำกับจุดประจุทำให้เกิดกระแสไหลจากขั้วไฟฟ้า 1 ไปยัง 2 ในขณะที่แผ่นตัวนำทองแดงยังไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ เมื่อทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า 3 และ 4 พบว่าจะไม่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

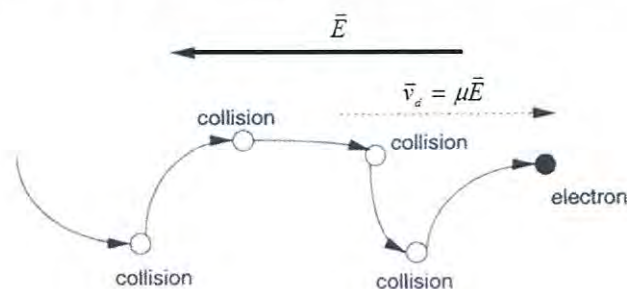


รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารตัวนำ

ในกรณีที่ทำการสร้างสนามแม่เหล็กมากระทำในแนวตั้งฉากทิศพุ่งขึ้นกับชิ้นสารดังกล่าว ทำให้ทิศการไหลของกระแสซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้ามีการเบี่ยงเบนไปแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.2 [3] เกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองของชิ้นสาร ในกรณีที่ทำการกลับทิศสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนทิศการไหลของกระแสที่กระทำกับชิ้นสารส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าของศักย์ไฟฟ้าตรงกันข้ามกับกรณีแรก

2.1.1 ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อจุดประจุในปรากฏการณ์ฮอลล์

สำหรับการศึกษาหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ กลไกพื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์สามารถอธิบายด้วยหลักการพื้นฐานประกอบด้วย ผลของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า รวมถึงสมบัติเฉพาะของวัสดุ สำหรับการวิเคราะห์และสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ ลำดับแรกจะกล่าวถึงผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อจุดประจุในสารของแข็งก่อน โดยสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.3 เมื่อสร้างความต่างศักย์ระหว่างสองตำแหน่งบนชิ้นสารตัวนำของแข็ง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศจากศักย์มากพุ่งไปหาศักย์น้อย เกิดแรงทางสนามไฟฟ้าที่กระทำกับจุดประจุ [17-18] ผลักให้ประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ โดยแรงทางสนามไฟฟ้าที่กระทำกับจุดประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.3 ผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับประจุพาหะภายในสารของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การเคลื่อนที่ของประจุพาหะภายใต้สนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า การดริฟท์ (Drift) ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในสารของแข็งจะถูกจำกัดโดยการชนที่เกิดขึ้นภายในโครงผลึกของชิ้นสาร เรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็วดริฟท์ (Drift Velocity) ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นความเร็วดริฟท์เฉลี่ย หรือ ความเร็วเฉลี่ยของประจุพาหะภายใต้สนามไฟฟ้าในสารของแข็งมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.2) [13-14]

$$\vec{v}_d = \mu\vec{E} \quad (2.2)$$

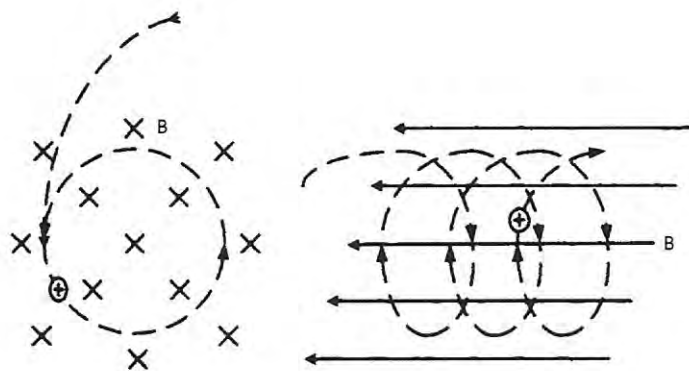
สำหรับในกรณีของสนามแม่เหล็กจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของจุดประจุที่หยุดนิ่ง เว้นแต่จะมีการเคลื่อนที่ด้วยแรงอื่น ๆ มากกระทำ เช่น แรงจากสนามไฟฟ้า เป็นต้น โดยแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของประจุ และสำหรับแรงของสนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุ โดยจะขึ้นกับฟังก์ชันความเร็วของประจุพาหะ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

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

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

การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ต้องมีความเข้าใจถึงอนุภาค เช่น อิเล็กตรอน ที่มีการเคลื่อนที่ ภายใต้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้านี้ส่งผลต่อจุดประจุสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.3)

ความสัมพันธ์ของแรงดังกล่าวนี้เรียกว่า แรงลอเรนตซ์ (Lorentz force) ซึ่งในสมการที่ของลอเรนตซ์นี้ ค่าประจุไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งบนระนาบ x, y, z โดยในสมการของลอเรนตซ์เป็นการแสดงการตอบสนองของประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้การเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงเป็นแนวโค้งหรือหมุนเป็นเกลียว [3],[7] แสดงให้เห็นดังรูป 2.4 ซึ่งขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 ผลของสนามแม่เหล็กกระทำต่อจุดประจุที่มีการเคลื่อน

ในกรณีของประจุพาหะที่เคลื่อนที่ในชั้นสารฮอลล์ ความเร็วของประจุพาหะจะมีความหนาแน่นไปในทิศทางหนึ่งของวัสดุตั้งรูป 2.5 โดยขั้วที่ใช้ต่อออกมาเพื่อวัดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กนี้ จะถูกต่อคร่อมขึ้นสารโดยกำหนดให้พาหะมีความเร็วเคลื่อนที่ไปในระนาบแกน x ($v_y = 0 \text{ m/s}$, $v_z = 0 \text{ m/s}$) และผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เกิดขึ้นในแกน x แสดงถึงแรงสนามแม่เหล็กที่กระทำกับจุดประจุในแนวแกน x ดังสมการที่ (2.4) [3],[7]

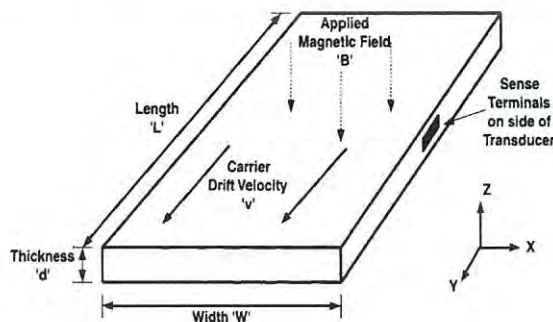
$$F_x = q_0 v_y B_z \tag{2.4}$$

โดยที่ q_0 คือ ประจุไฟฟ้า

v_y คือ ความเร็วของจุดประจุแนวแกน y

B_z คือ สนามแม่เหล็กแนวแกน z

ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวแกน z (B_z) นั่นคือเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำกับวัสดุฮอลล์ ส่งผลทำให้เกิดแรงแม่เหล็กค่าหนึ่งทีกระทำกับประจุเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของประจุจากทางเดิมที่เคลื่อนที่ในแนวแกน y เปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน x ทำให้ความหนาแน่นของประจุนบริเวณด้านทั้งสองของวัสดุแนวแกน x ต่างกัน ซึ่งมีระยะเท่ากับ ความกว้างของชั้นสารกรณีนี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในชั้นสารขึ้น จึงเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างด้านทั้งสองของวัสดุ[3],[7]



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารตัวนำของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 สามารถหาสนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field) [3],[7] จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กดังสมการที่ (2.5)

$$q_0 E_H + q_0 v \times B_{\perp} = 0 \quad (2.5)$$

โดยที่ E_H คือสนามไฟฟ้าฮอลล์ ที่เกิดในชิ้นสาร E_H จะมีค่าตามสมการที่ (2.6)

$$E_H = -v \times B_{\perp} \quad (2.6)$$

โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของความเร็วประจุพาหะและความเข้มของสนามแม่เหล็ก สำหรับชิ้นสารที่มีความกว้างเป็น w ระหว่างขั้วทั้งสอง สามารถหาศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมได้จากการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นความกว้าง w ได้ตามสมการที่ (2.7)

$$V_H = -wvB_{\perp} \quad (2.7)$$

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

1. ความเร็วของจุดประจุสำหรับชิ้นสารใด ๆ
2. ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้กับชิ้นสาร
3. ระยะของขั้วต่อที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก

2.1.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารตัวนำ

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

ในกรณีที่ เป็นโลหะนำไฟฟ้าอย่างดีสามารถที่จะประมาณค่าได้ ในขั้นแรกจะทำการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับกรณีของโลหะ เช่น ทองแดงสามารถประมาณได้ว่าอะตอมของทองแดงมีอิเล็กตรอนชั้นวงนอกสุดที่ทำให้เกิดการไหลของกระแส ซึ่งความหนาแน่นของประจุพาหะมาจากผลของปริมาณอะตอมของทองแดงต่อหนึ่งน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8) [3],[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = \frac{N_A}{M_m} D \quad (2.8)$$

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

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 สามารถประมาณค่าความเร็วดริฟท์ของพาหะได้จากกระแสที่อยู่ในหน่วยแอมแปร์ สมมติให้ค่าความหนาแน่นของพาหะเป็นค่าคงที่ และเพิ่มปริมาณพาหะในระบบได้ ความเร็วของพาหะจะแปรผันกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ยิ่งพื้นที่หน้าตัดมีค่ามาก ค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะลดลง ดังนั้นความเร็วดริฟท์ของพาหะสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2.9)

$$v = \frac{I}{q_0 N A} \quad (2.9)$$

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

ผลที่เกิดขึ้นคือความเร็วของพาหะในวัสดุโลหะ ที่เคลื่อนที่อันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้านี้เคลื่อนที่ผ่านวัสดุด้วยความเร็วประมาณเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วแสงที่พิจารณาต่างกันตามขนาดของขดลวดต่อกระแสหนึ่งแอมแปร์ พบว่าความเร็วของพาหะในขดลวดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัด 0.0078 ตารางเซนติเมตร จะมีความเร็วดังนี้

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

เมื่อพิจารณาถึงความเร็วของพาหะดังตัวอย่างพบว่าจะมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วแสง เมื่อทำการรวมสมการที่ (2.8) และ (2.9) สามารถที่จะพิสูจน์เพื่อใช้ในการอธิบาย ค่าความไว ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับพื้นที่หน้าตัด กระแสและความหนาแน่นของพาหะหาได้ตามสมการที่ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = \frac{IB}{q_0 Nd} \quad (2.10)$$

โดยที่ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวนำ

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

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

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 ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าขึ้นกับอุณหภูมิและแสงจากภายนอกที่กระทำในวัสดุ โดยวัสดุชนิดนี้เมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือที่เหมาะสมคุณสมบัติการนำไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คุณสมบัติดังกล่าวที่มีความเหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางฟิสิกส์ในธรรมชาติ เช่น แสง อุณหภูมิ เป็นต้น รวมถึงการวัดปริมาณความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็ก ที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์มาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง โดยส่วนใหญ่แล้วสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดสนามแม่เหล็ก คือ สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค (Extrinsic Semiconductor) โดยจะทำการวิเคราะห์ในเรื่องของความหนาแน่นของพาหะที่มีผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเป็นหลัก

2.1.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิค

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิค ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้คุณสมบัติทางการนำไฟฟ้าดีขึ้น โดยการเติมอะตอมสารเจือ (Impurity atoms) ลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ และสามารถเลือกชนิดของอะตอมสารเจือ เพื่อกำหนดชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ โดยสามารถแบ่งประเภทของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิคได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) และ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type Semiconductor) ตามชนิดของพาหะในการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) เป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิคที่ถูกรวมสารเจือชนิดเอ็น เช่น การเติมอะตอมฟอสฟอรัสในซิลิคอนบริสุทธิ์ เป็นต้น คือเติมอะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor atom) ทำให้มีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่า โฮล ($n_0 \gg p_0$) อิเล็กตรอนจึงเป็นพาหะส่วนมากที่มีหน้าที่หลักในการนำไฟฟ้า ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี เป็นการเติมอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor atom) ซึ่งเป็นอะตอมธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ 3 ของตารางธาตุ เป็นการเติมอะตอมโบรอนในซิลิคอนบริสุทธิ์ ทำให้ปริมาณโฮลมีมากกว่าอิเล็กตรอน ($p_0 \gg n_0$) ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะนำไฟฟ้าโดยโฮล ซึ่งแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก สำหรับการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของพาหะของสารเอ็กทรีนซิค [7],[19-22] เริ่มจากสมการที่ (2.11)

$$p_0 + N_D^+ = n_0 + N_A^- \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$N_V \exp\left(\frac{-E_F}{KT}\right) + \frac{N_D}{1 + \exp\left(\frac{E_F - E_D}{KT}\right)} = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_g}{KT}\right) + N_A \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{KT}\right)} \quad (2.12)$$

ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ($N_A = 0$) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก หาได้จากสมการที่ (2.13)

$$n_0 = \frac{N_D}{2} + \left[\left(\frac{N_D}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

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

ในการกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($N_D = 0$) ความหนาแน่นของโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก หาได้จากสมการที่ (2.14)

$$p_0 = \frac{N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_A}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

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

ดังนั้นสำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรีนซิคในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กมีข้อดีหลายประการ ข้อดีหนึ่งที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรีนซิคที่เหนือกว่าการใช้โลหะ คือ สามารถควบคุมความหนาแน่นของพาหะที่มีผลต่อการตอบสนองต่อเอกซาร์เป็นเอกซาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่กระทำ อีกทั้งยังสามารถเลือกพาหะในการนำไฟฟ้า ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจากการเติมสารเจือได้ โดยปกติแล้วพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าพาหะที่เป็นโฮล ดังนั้นในทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์จึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีพาหะข้างมาก (majority carriers) เป็นอิเล็กตรอน มากกว่าการใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีพาหะเป็นโฮล ซึ่งเคลื่อนที่ภายในชั้นสารได้ช้ากว่า และสำหรับสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็ทรินซิก ยังมีจุดเด่นที่เหนือกว่าสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ คือ โดยทั่วไปแล้ว ความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะแปรผันกับฟังก์ชันอุณหภูมิอย่างมาก ซึ่งต่างจากกับสารกึ่งตัวนำเอ็ทรินซิกที่มีการเติมอะตอมสารเจือเข้าไปมากพอจนทำให้มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งกรณีที่น่าไปประดิษฐ์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณความหนาแน่นของพาหะ เมื่อมีการเจือสารปริมาณมากเพียงพอที่มีเสถียรภาพโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นเหตุผลเหล่านี้จึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำเอ็ทรินซิก ในการประดิษฐ์เป็นวงจรรวมสำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

เมื่อพิจารณาฮอลล์เซ็นเซอร์ที่เป็นโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้ว โดยกำหนดปริมาณสารเจือที่ระดับ $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ชั้นสารหนา $25 \mu\text{m}$ แล้วทำการป้อนกระแสที่ 1 mA . เมื่อทำการคำนวณการหาแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่สนามแม่เหล็ก 1 เทสลา ตามสมการที่ (2.10) จะได้

$$v = \frac{0.001 \text{ A} \cdot 1 \text{ T}}{1.66 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot 25 \times 10^{-6} \text{ m}} = 0.083 \text{ V}$$

ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้เป็น 83 mV ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นในวัสดุทองแดงประมาณ $20,000$ เท่า และกระแสที่ใช้้น้อยกว่าประมาณ $1,000$ เท่า เมื่อเทียบกับทองแดง ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของวัสดุที่ใช้ทำเซนเซอร์[3],[7]

ถึงแม้รูปร่างลักษณะของชั้นสาร ปริมาณสารเจือและกระแสที่ไบอัสให้กับชั้นสารมีผลต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ก็ตาม ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ ค่าความต้านทานของชั้นสาร ที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และพารามิเตอร์อื่นโดยตรง สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารปริมาณน้อย ๆ ทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น นั่นคือจำเป็นต้องใช้ปริมาณกระแสที่ไบอัสเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการไบอัสกระแสระดับมิลลิแอมป์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนความต่างศักย์ในระดับร้อยโวลต์ ซึ่งตัวอย่างแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความต้านทานที่ขึ้นกับฟังก์ชันของสภาพความนำและรูปทรงของชั้นสาร และค่าความต้านทานของชั้นสารเป็นไปตามสมการที่ (2.15)

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.15)$$

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

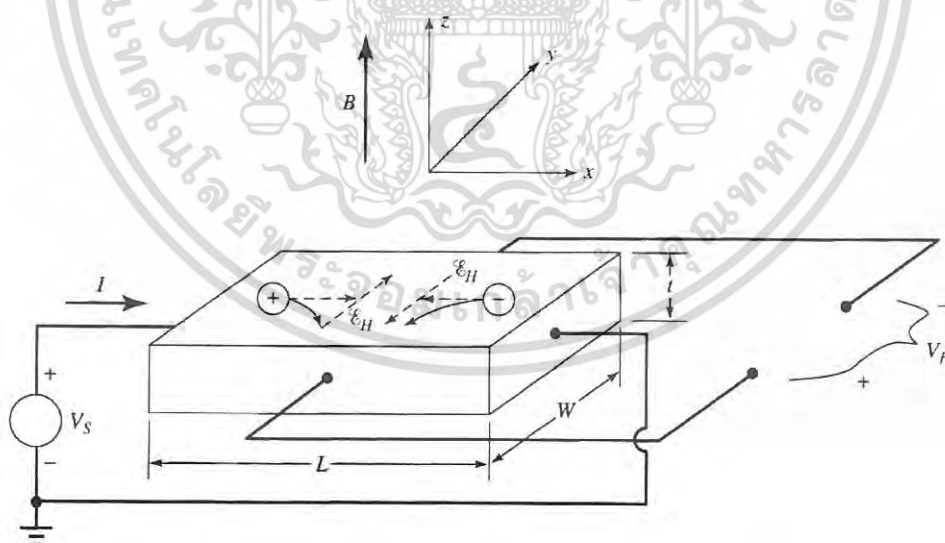
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็ทรินซิก

ปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของแรงภายนอกกระทำกับจุดประจุ (Charge) ที่เคลื่อนที่โดยแรงที่กระทำนี้เนื่องจากสนามแม่เหล็ก โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของจุดประจุ เขียนได้ตามสมการที่ (2.3) โดยผลของเวกเตอร์ที่เกิดขึ้น เกิดจาก Cross product ซึ่งปริมาณเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามทิศทางของมุมสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ตามฟังก์ชันไซน์ [3],[7]

ผลของปรากฏการณ์ฮอลล์แสดงให้เห็นตามแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 2.6 สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมธาตุอื่น ซึ่งจะประกอบไปด้วยพาหะส่วนใหญ่หนึ่งชนิด ตามอะตอมธาตุสารเจือที่ใช้ โดยจะทำการพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือ พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนกับโฮล ดังรูปที่ 2.6

จากสมการที่ (2.3) แสดงให้เห็นถึงผลของกระแสต่อประจุพาหะโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสาร โดยมีแรงจากสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของประจุพาหะทั้งสองในสภาวะคงตัว ด้วยแรงจากสนามแม่เหล็กที่สมดุลนี้เป็นผลทำให้จุดประจุเคลื่อนที่อีกทิศทางหนึ่ง การกระจายตัวของพาหะจึงเปลี่ยนไป เกิดเป็นการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งขึ้น โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field; ϵ_H) [2-3],[7],[16],[23] เมื่อทำการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของความกว้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ผลที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากพื้นผิวรอยสัมผัสตรงกันข้ามกันของชั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ขึ้นกับรูปแบบของชั้นสารและสนามแม่เหล็กที่กระทำเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์และความกว้างของชั้นสาร (W) ; $V_H = \epsilon_H W$



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำ

ในรูปที่ 2.6 กระแสที่ไหลในชั้นสารแนวแกน x ที่เกิดจากความต่างศักย์ V_S เป็นผลทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกับกระแส ในกรณีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทางตรงกันข้าม โดยที่พาหะทั้งสองมีค่าประจุที่ต่างกันทำให้เกิดทิศของความเร็วที่ตรงกันข้าม เมื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้กับชั้นสารในแนว $+z$ แรงแม่เหล็กกระทำกับประจุทั้งสองส่งผลให้เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปทิศเดียวกันในแนวแกน y แต่เนื่องจากค่าประจุทั้งสองตรงข้ามกัน ทำให้เกิดแรงดันที่มีขั้วต่างกัน เรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะข้างมากต่างชนิดกัน คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ทฤษฎีอย่างง่ายที่แสดงกลไกการเกิดดังรูปที่ 2.6 โดยแสดงให้เห็นการโบกสกรแสให้กับชั้นสารในแนวแกน x แล้วป้อนสนามแม่เหล็กในแนวแกน z สนามไฟฟ้าฮอลล์ จะเกิดขึ้นในแนวแกน y ซึ่งกรณีที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สนามไฟฟ้าฮอลล์จะเกิดในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณากระแสพาหะจะทำให้เกิดความเร็วก่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ความเร็วดริฟท์ (v_d) โดยความเร็วดริฟท์จะสัมพันธ์กับขนาดของกระแสสำหรับพาหะที่เป็นโฮลแสดงดังสมการที่ (2.16)

$$v_d = \frac{J_x}{qp} \tag{2.16}$$

สำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนจะได้

$$v_d = \frac{J_x}{qn} \tag{2.17}$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าฮอลล์สามารถอธิบายในเทอมของกระแสและสนามแม่เหล็กสำหรับพาหะที่เป็นโฮลตามสมการที่ (2.18)

$$\varepsilon_H = \frac{J_x B_z}{qp} \tag{2.18}$$

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนเขียนได้เป็น

$$\varepsilon_H = -\frac{J_x B_z}{qn} \tag{2.19}$$

ส่วนปริมาณของแรงสนามแม่เหล็กกับแรงสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เท่ากันเขียนได้ว่า

$$q\varepsilon_H = qV_d B_z \tag{2.20}$$

เขียนใหม่ได้ว่า

$$\varepsilon_H = R_H J_x B_z \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R_H คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์(Hall coefficient) [3],[7],[16],[23] ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/qp$ สำหรับโฮลและเท่ากับ $-1/qn$ สำหรับอิเล็กตรอน ซึ่งในสมการที่ (2.18) สามารถที่จะคำนวณการเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ได้อย่างแม่นยำ ถ้าสามารถเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ ได้อย่างเหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ที่มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของประจุพาหะ ซึ่งจะทำให้เกิดพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอีกคือ r เพื่อที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้องสำหรับพาหะที่เป็นโฮลตามสมการที่ (2.22)

$$R_H = \frac{r}{qp} \quad (2.22)$$

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนตามสมการที่ (2.23)

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

ที่ค่าพารามิเตอร์ r ที่มีค่าอยู่ในระหว่าง 1-2 โดยที่ r สำหรับการเกิดการกระเจิงในแลตทิซมีค่าประมาณ 1.18 และสำหรับการกระเจิงแบบไอออนไนซ์มีค่าประมาณ 1.93 [7],[16]

แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) ที่ได้ เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ (\mathcal{E}_H) และระยะความกว้างของชิ้นสาร (w) พิจารณาในเทอมของกระแสรวมได้ดังสมการที่ (2.24)

$$V_H = \frac{R_H IB_{\perp}}{t} \quad (2.24)$$

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

จากสมการที่ (2.24) สำหรับสารกึ่งตัวนำใด ๆ ที่ไม่ทราบชนิด สามารถทราบค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ที่สนามแม่เหล็กและกระแสค่าหนึ่ง ส่วนชนิดของพาหะและค่าความหนาแน่นของพาหะสามารถรู้ได้เมื่อทราบค่าของกระแส ค่าสภาพความนำไฟฟ้า และค่าความคล่องตัวของฮอลล์ ($\mu = \sigma |R_H|$)

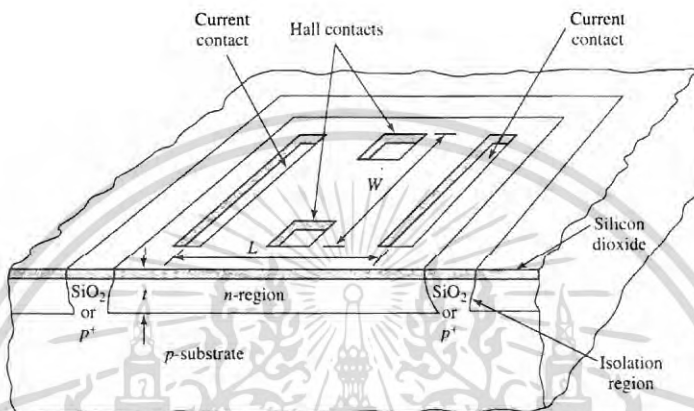
2.1.4 หัววัดฮอลล์สำหรับสร้างเป็นวงจรรวม

ในการพัฒนาหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์เซ็นเซอร์ในรูปแบบของวงจรรวม (Integrated Circuit) [7],[16] นั้น มีความจำเป็นที่จะต้องแยกส่วนตัวนำออกจากกัน เพื่อที่จะสามารถทำงานให้มีความใกล้เคียงกับการเกิดปรากฏการณ์อย่างง่าย ซึ่งวิธีการหนึ่งที่สามารถทำการแยกชิ้นของสารกึ่งตัวนำได้ คือ การใช้ชั้นอีพิทักเซียล (epitaxial) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นการสร้างฮอลล์เซ็นเซอร์อย่างง่ายที่เป็นไปตามทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยสร้างระยะ w ให้มีความกว้างกว่าระยะ L ดังนั้นความหนาแน่นกระแส J ไหลผ่านชิ้นจะมีความเป็นระเบียบในพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นกับความต้านทานของผิวสัมผัส ถ้าระยะ $L \gg W$ [4],[7],[16],[24],

ดังนั้น เมื่อทำในรูปแบบของวงจรรวมจำเป็นที่จะต้องคำนวณระยะ L และ W ให้มีความเหมาะสมที่สุด และเมื่อทำการพิจารณาโครงสร้างวัสดุฮอลล์ในรูปทรงสี่เหลี่ยม วิธีการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อให้มีความสมบูรณ์ถูกต้องที่สุด ต้องนำแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้จากสมการที่ (2.24) คูณด้วยค่าคงที่ K ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ที่เป็นอัตราส่วนของ W/L



รูปที่ 2.7 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สำหรับการสร้างวงจรรวม

สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการสร้างวัสดุฮอลล์ในรูปแบบของวงจรรวม คือ ค่ากำลัง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าของวัสดุ สามารถอธิบายได้จากค่าความต้านทานของชิ้นสารที่ใช้ โดยเริ่มพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี [7],[16] ได้ตั้งสมการที่ (2.25)

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{L}{q\mu_p p W t} = \frac{L R_H}{r\mu_p W t} \quad (2.25)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R = \frac{L R_H}{r\mu_n W t} \quad (2.26)$$

ส่วนแรงดันไฟฟ้า V_s สามารถเขียนได้เป็น $I = \frac{V_s}{R}$ หรือ ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเขียนได้เป็น

$$I = \frac{r V_s \mu_p W t}{R_H L} \quad (2.27)$$

และในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{rV_s\mu_n Wt}{R_H L} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.28) คูณด้วยค่าคงที่ K สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะได้

$$V_H = r\mu_p V_s \frac{W}{L} B_{\perp} \quad (2.29)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะได้

$$V_H = r\mu_n V_s \frac{W}{L} B_{\perp} \quad (2.30)$$

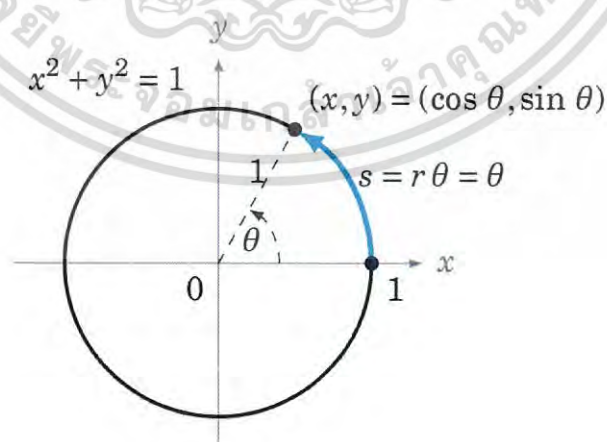
โดยที่ค่า B ทำการคำนวณในหน่วยเทสลา

2.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ

2.2.1 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

สำหรับฟังก์ชันตรีโกณมิติ โดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x,y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย (Unit circle) [7],[25-26] ซึ่งรัศมีของวงกลมนี้มีค่าเป็นหนึ่งดังรูปที่ 2.8 โดยแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของจุดที่อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยซึ่งมีพิกัดเป็น $(x, y) = (\cos \theta, \sin \theta)$ โดยขึ้นกับมุมจากจุดกำเนิดกระทำกับแกน x สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2.31)

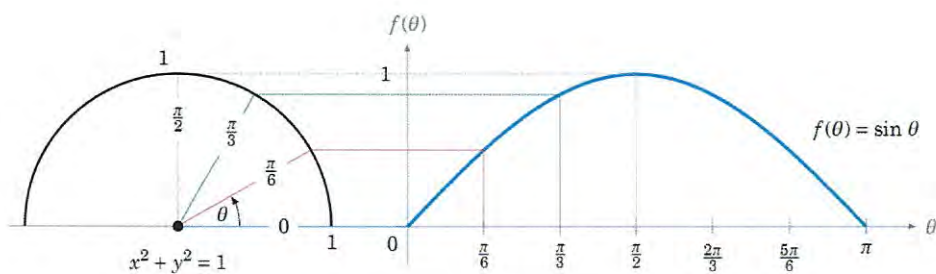
$$x^2 + y^2 = 1 \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x,y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย

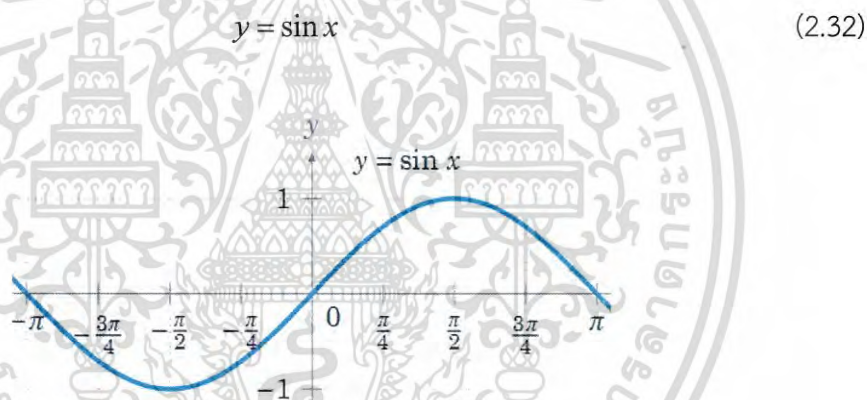
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจุดใดๆบนวงกลมหนึ่งหน่วยจะมีพิกัดในแกน y เป็น $\sin \theta$ สามารถเขียนพิกัดจุดบนวงกลมหนึ่งหน่วยสำหรับแนวแกนเป็นฟังก์ชันไซน์ $f(\theta) = \sin \theta$ ที่มีม $0 - \pi$ ดังรูปที่ 2.9



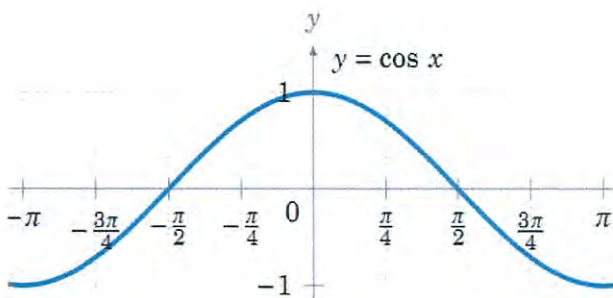
รูปที่ 2.9 กราฟฟังก์ชันไซน์สำหรับพิกัด (x,y) บนวงกลมหนึ่งหน่วย

เมื่อทำการเขียนกราฟในระบบพิกัด (x,y) โดยให้แกน x แทนมุมที่กระทำอยู่ในช่วง $(-\pi, \pi)$ แสดงดังรูปที่ 2.10 [25] ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (2.32)



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \sin x$

สำหรับฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine Function) สามารถพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งของพิกัดในแนวแกน x รอบวงกลม โดยกราฟความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x,y) ในช่วง $(-\pi, \pi)$ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันโคไซน์ $y = \cos x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นไปตามสมการของฟังก์ชันโคไซน์เขียนได้ว่า

$$y = \cos x \quad (2.33)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.32) และ (2.33) แทนค่าลงในสมการที่ (2.31) จะได้ว่า

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (2.34)$$

จากรูปที่ 2.10 และ 2.11 เห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง $\cos 0$ จะมีค่าแมกนิจูดเท่ากับหนึ่ง สำหรับที่ตำแหน่ง $\sin 0$ จะมีแมกนิจูดเท่ากับศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันไซน์กับฟังก์ชันโคไซน์มีความต่างเฟสกันอยู่ 90° โดยอธิบายความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.35)

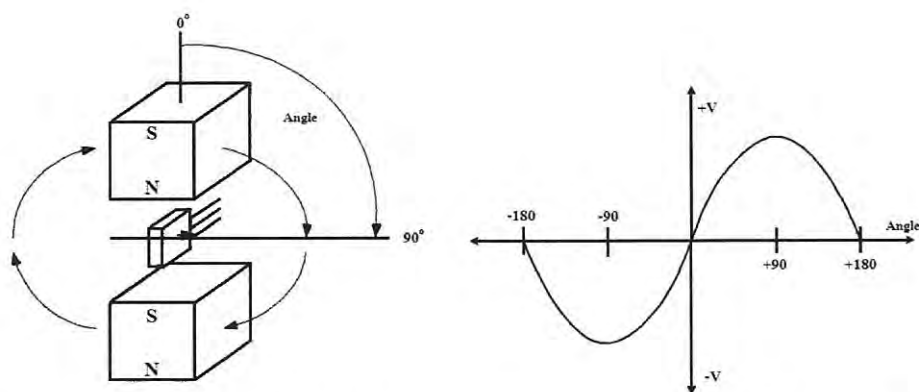
$$\cos x = \sin(x + 90^\circ) \quad (2.35)$$

2.2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ผลของแม่เหล็กที่กระทำกับชิ้นสาร ทำให้เกิดแรงลอเรนตซ์เกิดขึ้น แรงดังกล่าวนี้กระทำต่อจุดประจุภายในสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2.3) โดยปริมาณเวกเตอร์ของแรงที่เกิดขึ้นนี้จะแปรผันตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุเป็นฟังก์ชันไซน์ เมื่อทดลองการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุม โดยให้เส้นแรงแม่เหล็กกระทำกับวัสดุฮอลล์ที่มุมต่างๆรอบตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการหมุน ส่งผลทำให้เกิดแรงลอเรนตซ์ที่มีค่าขึ้นกับมุม พบว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ดังสมการที่ (2.36) [23]

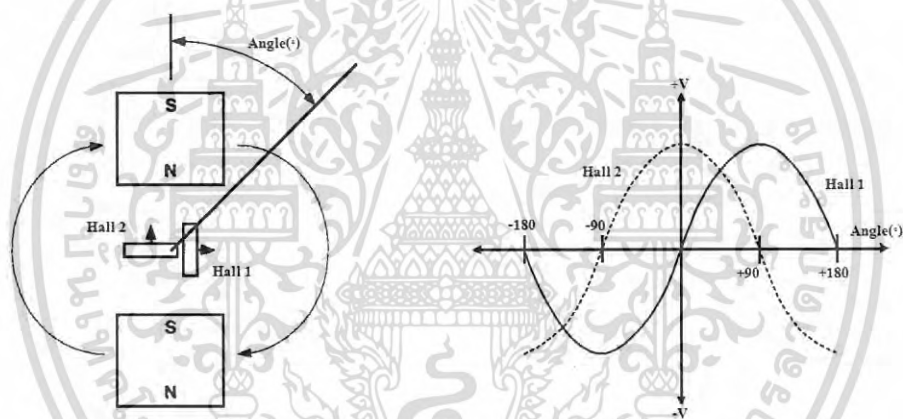
$$V_H = \frac{R_H IB}{t} \sin \theta \quad (2.36)$$

เมื่อทำการพิจารณาในกรณีที่ทำกรเปลี่ยนตำแหน่งเส้นแรงแม่เหล็กเชิงมุม โดยการหมุนสนามแม่เหล็กรอบหัววัดฮอลล์ที่มุม -180 ถึง 180 องศา ดังรูปที่ 2.12 ในตำแหน่งที่เส้นแรงแม่เหล็กกระทำกับหัววัดที่ศูนย์องศา หรือการปรับหมุนให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับพื้นที่ในการตอบสนองของฮอลล์ (active area) ผลการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอาท์พุทจะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กให้กระทำตั้งฉากกับหัววัด การตอบสนองของหัววัดฮอลล์จะเกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าสูงที่สุด โดยในรูปที่ 2.12 แสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เปลี่ยนแปลงตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำดังเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการที่ (2.36)



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ

ดังนั้นในกรณีที่น่าเอาหัววัดฮอลล์สองตัวมาวางตั้งฉากซึ่งกันและกัน ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มคงที่ เมื่อทำการเปลี่ยนแปนมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดฮอลล์ ผลทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองเกิดการต่างเฟสกันที่ 90° ดังรูปที่ 2.13 [3]



รูปที่ 2.13 การเลื่อนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์

กล่าวคือ ตรงตำแหน่งแรกหรือตำแหน่งที่เส้นแรงแม่เหล็กกระทำกับหัววัดฮอลล์ตัวแรกที่มีศูนย์องศา สำหรับกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กจะขนานกับหัววัดฮอลล์ตัวแรกทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่เดียวกันเส้นแรงแม่เหล็กจะกระทำกับหัววัดฮอลล์ตัวที่สองในแนวตั้งฉาก เป็นผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าสูงสุด ในกรณีนี้แสดงให้เห็นว่าหัววัดฮอลล์ตัวที่หนึ่งมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ ดังสมการที่ (2.36) และสามารถอุปมาได้ว่า การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของหัววัดฮอลล์ตัวที่สองเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ตามสมการที่ (2.37)

$$V_H = \frac{R_H IB}{t} \cos \theta \quad (2.37)$$

ด้วยความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์จึงสามารถใช้สมการทางตรีโกณเพื่อลดข้อจำกัดในการตอบสนองของหัววัดที่ขึ้นกับมุมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ

2.3.1 หลักการของเทคนิคการวัด

สำหรับหลักการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางเป็นวิธีการที่อาศัยความสัมพันธ์ในการตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองมิติมาคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยมีเงื่อนไขสำหรับเทคนิคการวัดคือ มีความเท่าเทียมกันในการตอบสนองทั้งสองแนวแกน และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด เป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์โดยสมบูรณ์ [5-8] จากสมการที่ (2.36) แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่เป็นไปตามเงื่อนไข จึงสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.38) [3],[7]

$$V_{H1} = k_1 \sin \theta \quad (2.38)$$

โดยที่ค่า k_1 เป็นค่าคงที่ของฮอลล์ตัวที่ 1

ซึ่งค่าคงที่ k_1 เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับลักษณะเฉพาะทางกายภาพของหัววัด กระแส และสนามแม่เหล็ก โดยค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด เป็นไปตามฟังก์ชันไซน์

สำหรับหัววัดตัวที่สองที่ได้ทำการวางในตำแหน่งตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ตัวแรก ทำให้การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีเฟสต่างกันที่ 90° จึงสามารถอุปมานได้ว่าหัววัดตัวที่สองมีพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมที่เส้นแรงแม่เหล็กกระทำกับหัววัดเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ ซึ่งจากสมการ 2.37 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{H2} = k_2 \cos \theta \quad (2.39)$$

โดยที่ค่า k_2 เป็นค่าคงที่ของฮอลล์ตัวที่ 2

จากสมการที่ (2.38) สามารถเขียนในรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{V_{H1}}{k_1} = \sin \theta \quad (2.40)$$

และสำหรับสมการที่ (2.39) สามารถเขียนในรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{V_{H2}}{k_2} = \cos \theta \quad (2.41)$$

ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ จะขึ้นกับมุมของเส้นแรงที่แม่เหล็กกระทำกับวัสดุฮอลล์ โดยมีความสอดคล้องกับฟังก์ชันตรีโกณมิติ แทนค่าสมการที่ (2.38) และ (2.39) ในสมการที่ (2.34) จะได้

$$\frac{V_{H1}^2}{k_1^2} + \frac{V_{H2}^2}{k_2^2} = 1 \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำให้ค่าคงที่ของฮอลล์ทั้งสองมีค่าเท่าเทียมกัน โดยให้ค่า $k_1 = k_2 = k$ จะได้

$$V_{H1}^2 + V_{H2}^2 = k^2 \quad (2.43)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าคงที่หรือแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ไม่ขึ้นกับมุมได้จาก

$$\sqrt{V_{H1}^2 + V_{H2}^2} = \sqrt{k^2} = V_{out} \quad (2.44)$$

โดยที่ค่า k เป็นค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในระบบการวัด

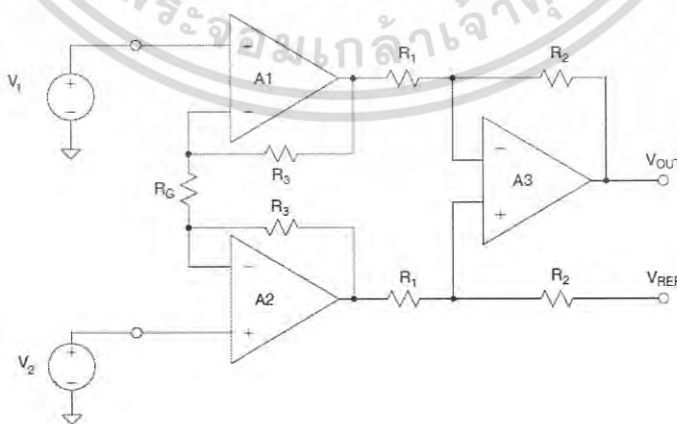
จากสมการที่ (2.44) สามารถนำมาใช้ในการอธิบายถึงการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด และสุดท้ายสามารถนำไปสู่การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้

2.3.2 วงจรไฟฟ้าสำหรับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

สำหรับหัววัดฮอลล์สองมิติที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสมนั้น จำเป็นต้องมีการประมวลผลสัญญาณเชิงอนาล็อกสำหรับการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งสัญญาณอนาล็อกทั้งสองของหัววัดฮอลล์สองมิติได้จากการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองทิศทางถูกทำการปรับแต่งสัญญาณให้มีความเหมาะสม และทำการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับทิศทาง สุดท้ายเป็นการนำเอาสัญญาณอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ไปคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางต่อไป

2.3.2.1 วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์

วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrument Amplifier) [27-28] เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายผลต่างของสัญญาณอินพุตทั้งสอง รูปที่ 2.14 แสดงวงจรขยายอินสตรูเมนต์ที่ใช้โอปแอมป์ 3 ตัว



รูปที่ 2.14 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวงจรขยายอินสตรูเมนต์เป็นวงจรที่ถูกพัฒนามาจากหลักการพื้นฐานของวงจรขยายสัญญาณแบบผลต่าง เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานของวงจรให้ดีขึ้น โดยมีข้อดีที่เหนือกว่าวงจรขยายสัญญาณผลต่างพื้นฐานคือ มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่สูง อัตราการขยายสูง และมีคุณสมบัติในการตัดสัญญาณรบกวน (CMRR) สูง ซึ่งมีใกล้เคียงกับวงจรขยายสัญญาณผลต่างในทางอุดมคติ

จากรูปวงจรขยายอินสตรูเมนต์นี้ประกอบด้วยออปแอมป์จำนวน 3 ตัว โดยที่ออปแอมป์ตัวที่ 1 และ 2 ทำหน้าที่เป็นวงจรอินพุตภาคหน้า โดยที่ในส่วนที่สองเป็นออปแอมป์ตัวที่ 3 ทำหน้าที่เป็นวงจรภาคเอาต์พุต ถ้ากำหนดให้ V_{O1} คือ แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ A_1 และ V_{O2} คือ แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ A_2 สามารถคำนวณแรงดันเอาต์พุตของ A_3 หรือแรงดันเอาต์พุตของวงจรได้เท่ากับ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{O2} - V_{O1}) \quad (2.45)$$

เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน R_3 และ R_G มีค่าเท่ากัน จากกฎของโอห์มทำให้ได้ว่า

$$V_{O1} - V_{O2} = (2R_3 + R_G)i_{R_G} \quad (2.46)$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าออฟเซตอินพุต $V_{OS} = 0$ แล้ว ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน R_G มีค่าเท่ากับ

$$i_{R_G} = \frac{V_1 - V_2}{R_G} \quad (2.47)$$

แทนสมการที่ (2.47) ลงในสมการที่ (2.46) ก่อนแล้วจึงแทนค่าในสมการที่ (2.45) เขียนใหม่จะได้เป็น

$$V_o = A(V_2 - V_1) \quad (2.48)$$

โดยที่

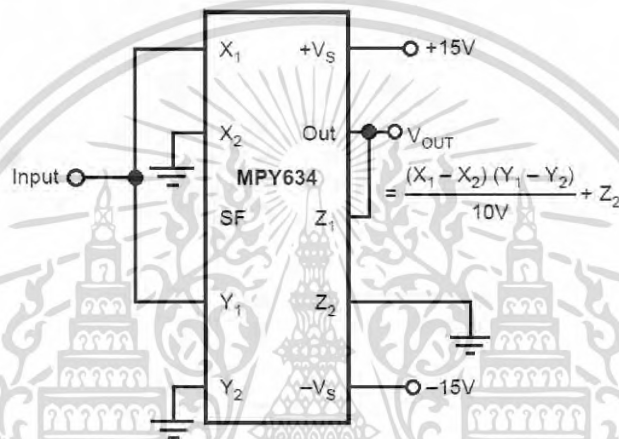
$$A = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.49)$$

ซึ่งข้อดีของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตทั้งสองสำหรับวงจรนี้ถูกป้อนเข้าทางอินพุตแบบไม่กลับเฟสของออปแอมป์โดยตรง จึงทำให้วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมากจึงสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มาจากหัววัดได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรยังสามารถปรับแต่งค่าให้มีความเหมาะสมกับงานที่ใช้โดยการปรับค่า R_G อย่างเป็นอิสระทำให้สามารถปรับค่าอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าอย่างสะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 วงจรกำลังสอง (Squaring circuit)

วงจรกำลังสองเป็นวงจรที่ถูกประยุกต์สร้างมาจากวงจรคูณสัญญาณ [27-28] ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานสำหรับการประมวลผลเชิงสัญญาณอนาล็อกทั่วไป โดยวงจรคูณสัญญาณถูกออกแบบในรูปของวงจรรวมอาศัยการทำงานของออปแอมป์สำหรับการคำนวณพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะนำเสนอถึงการอุปกรณ์วงจรรวมการคูณเบอร์ MYP634 ของบริษัท Texas Instruments ที่มีลักษณะเด่นเป็นวงจรคูณสัญญาณอนาล็อกแบบสี่ควอดแดรนต์(Quadrant) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเป็นสัดส่วนกับผลคูณของแรงดันอินพุตทั้งสอง ซึ่งสามารถมาปรับปรุงเพื่อการประยุกต์เป็นวงจรกำลังสองได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังมีความสอดคล้องกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองตามหลักการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 2.15 วงจรกำลังสองด้วยไอซี MYP634

โดยรูปที่ 2.15 เป็นวงจรกำลังสองที่ถูกปรับแต่งโดยใช้ไอซีการคูณ ซึ่งเป็นการยกกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสตรงที่เป็นทั้งค่าบวกและลบได้ โดยการป้อนสัญญาณอนาล็อกอินพุตที่ X_1 และ Y_1 ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.50)

$$V_o = \frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10} + z_2 \quad (2.50)$$

จากวงจรรูปที่ 2.15 เมื่อทำการต่อขา X_2 , Y_2 และ Z_2 ลงกราวด์ สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (2.51)

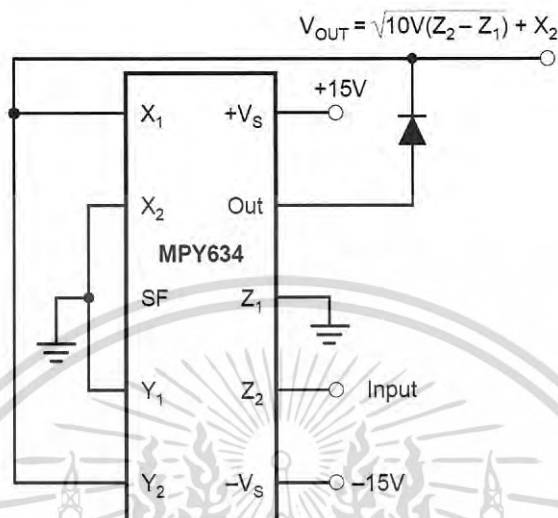
$$V_o = \frac{(V_i)^2}{10} \quad (2.51)$$

ดังนั้นจึงสามารถนำวงจรมูลคูณกำลังสองมาใช้สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับหลักการวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 วงจรถอดรากที่สอง (Square rooting circuit)

นอกจากนี้วงจรคูณสัญญาณยังสามารถปรับแต่งเป็นวงจรถอดรากสัญญาณ [27-28] และดัดแปลงเพื่อทำเป็นวงจรถอดรากที่สองได้ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรถอดรากที่สองด้วยไอซี MYP634

อาศัยการต่อสัญญาณอินพุตทั้งสองคือ X_1 และ Y_2 ไปยังขั้วเอาต์พุตของไอซี ซึ่งมีไดโอดต่อกันไว้เพื่อป้องกันการเข้าสู่สภาวะจุดอิมิตัวของไอซี โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับรากที่สองของสิบท่ำของแรงดันไฟฟ้าอินพุตเป็นไปตามสมการที่ (2.52)

$$V_o = \sqrt{10(Z_2 - Z_1) + X_2} \quad (2.52)$$

จากวงจรรูปที่ 2.16 เมื่อทำการต่อขา X_2 , Y_1 และ Z_1 ลงกราวด์ สามารถเขียนสมการที่ (2.52) ใหม่ได้เป็น

$$V_o = \sqrt{10(Z_2)} \quad (2.53)$$

ด้วยการทำงานของวงจรถอดรากที่สองและวงจรถอดรากที่สอง สามารถนำมาเชื่อมต่อกันเพื่อการประยุกต์ใช้งานร่วมกับหัววัดฮอลล์ที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในสองมิติ สำหรับประยุกต์ใช้กับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

บทที่ 3

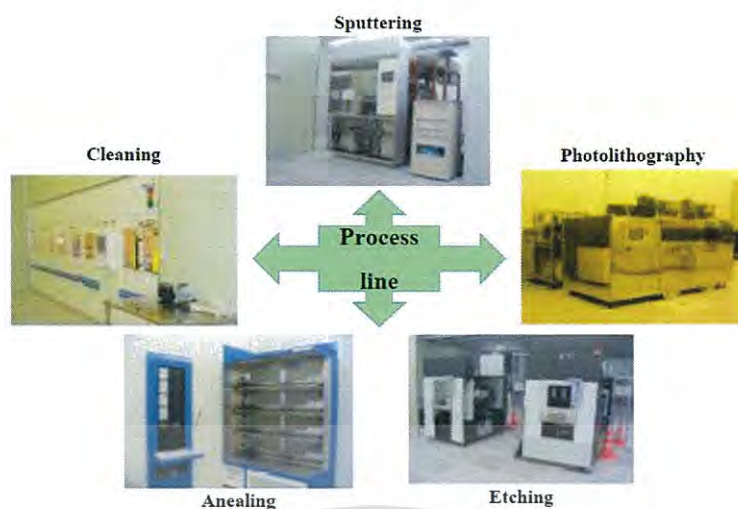
การทดสอบสมบัติหัววัดฮอลล์สองมิติและการประยุกต์ใช้งาน

การออกแบบหัววัดสนามแม่เหล็กบนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์โดยให้มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้ในสองทิศทาง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางนั้น ส่วนที่มีความสำคัญที่สุดคือหัววัด ที่ต้องทำการออกแบบให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีในสองทิศทาง ด้วยโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับหลักการวัดได้อย่างเหมาะสม ในบทนี้นำเสนอหัววัดหลักสำหรับงานวิจัยประกอบด้วย 1. กระบวนการสร้างหัววัด เป็นการนำเสนอถึงขั้นตอนกระบวนการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติบนพื้นฐานเทคโนโลยีซิลิกอน 2. โครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กสองมิติที่อธิบายถึงลักษณะเฉพาะทางกายภาพของหัววัด รวมถึงการออกแบบในการสร้างเพื่อให้หัววัดตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในสองทิศทางได้ 3. ลักษณะการทำงานของหัววัด ซึ่งอธิบายการต่อใช้งานของหัววัดที่ได้ทำการออกแบบขึ้น 4. การทดสอบสมบัติของหัววัด เป็นขั้นตอนสำหรับทดสอบการทำงานของหัววัดที่ได้สร้างขึ้นทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะการทำงานและพฤติกรรมเฉพาะของหัววัดเป็นข้อมูลสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม และ 5. การประยุกต์ใช้งานของหัววัดสำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยในหัวข้อนี้นุ่งเน้นการประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์สองมิติสำหรับสร้างระบบการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยอธิบายถึงการปรับปรุงสัญญาณที่ได้จากหัววัด ตลอดจนการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

3.1 กระบวนการสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติ

การสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กสองมิติในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานกับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติได้อย่างเหมาะสม จึงมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบที่สำคัญสองประการคือ ประการแรกหัววัดที่ถูกสร้างขึ้นต้องสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางคือ สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก(Perpendicular field) และสนามแม่เหล็กในแนวขนาน(Parallel field) โดยการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง และประการที่สองสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์(Sine function) สำหรับโครงสร้างฮอลล์เพลตแบบพื้นฐาน และโคไซน์(Cosine function) สำหรับโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งตามลำดับ

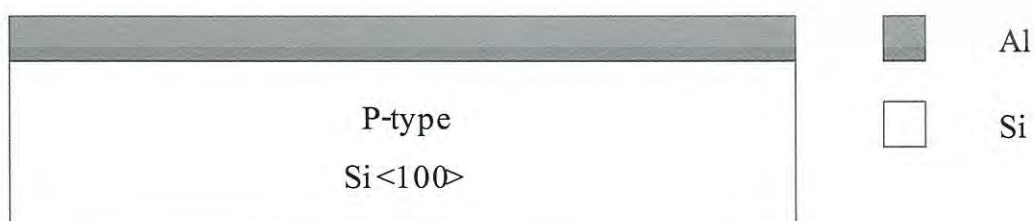
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องมือการผลิตหัววัด

ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการออกแบบโดยการรวมเอาสมบัติของฮอลล์เพลตแบบพื้นฐานที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับฮอลล์แบบแนวตั้งที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานเข้าไว้ด้วยกันในหนึ่งตัวอุปกรณ์ โดยโครงสร้างฮอลล์สองมิติถูกสร้างบนเทคโนโลยีพลาสมาซิลิกอนที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center : TMEC) แสดงภาพของเครื่องมือการผลิตหัววัดดังรูปที่ 3.1 สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์หัววัดฮอลล์สองมิติสร้างขึ้นโดยใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดพี (P-type silicon) ระบาย<100> ที่มีความหนา 625 ไมโครเมตร ขนาด 6 นิ้ว และมีค่าสภาพความต้านทานประมาณ 20-30 โอห์ม-เซนติเมตร ($\Omega.cm$)

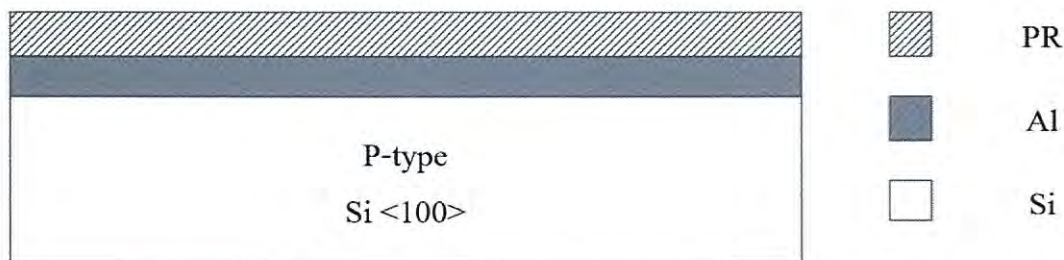
ซึ่งในขั้นแรกแผ่นซิลิคอนจะผ่านกระบวนการทำความสะอาดแผ่น (Cleaning process)[29], [30] ด้วยสารละลายฟิรินย่า ($H_2SO_4:H_2O_2$) และสารละลายไฮโดรฟลูออริก (HF) เพื่อทำการกำจัดสารอินทรีย์ (organic contamination) และซิลิคอนไดออกไซด์ (Native silicon dioxide) ที่อยู่บนพื้นผิวหน้าแผ่นซิลิคอนออก และทำการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ตามลำดับ โดยในขั้นตอนนี้แผ่นซิลิคอนจะถูกเป่าแห้งเพื่อเตรียมที่จะนำไปสู่กระบวนการปลูกชั้นอะลูมิเนียมต่อไป



รูปที่ 3.2 ภาพจำลองการสร้างชั้นอะลูมิเนียมบนฐานรองซิลิคอน

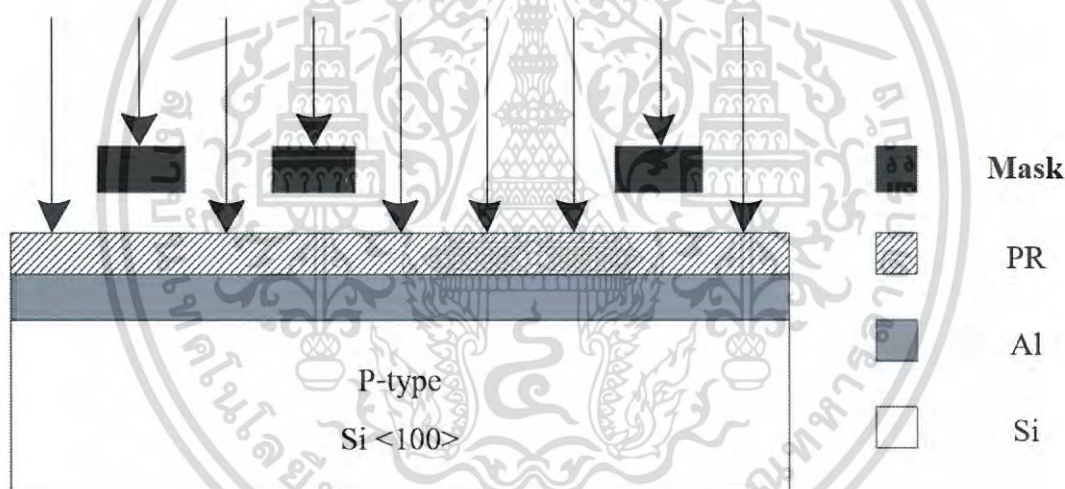
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสร้างชั้นอะลูมิเนียมบนผิวหน้าแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง (RF-sputtering) [31] เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้า โดยชั้นอะลูมิเนียมมีความหนา 1 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.2



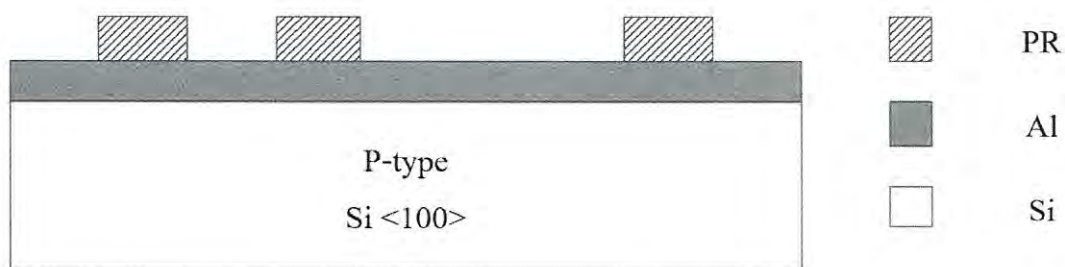
รูปที่ 3.3 ภาพจำลองการเคลือบน้ำยาไวแสงบนชั้นอะลูมิเนียม

ขั้นตอนที่ 3 เป็นส่วนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี(Photolithography) [24-27] โดยเริ่มจากการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) บนชั้นอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) แสดงดังรูปที่ 3.3



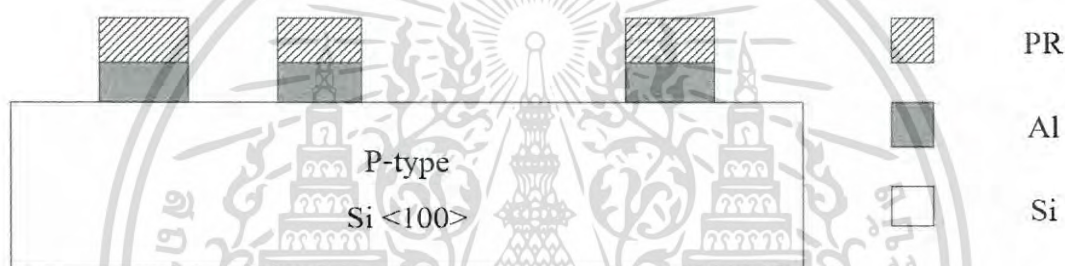
รูปที่ 3.4 ภาพจำลองการฉายแสงในกระบวนการลิโทกราฟี

และทำการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต(UV) ผ่านมาสก์ลงบนลงบนสารไวแสงที่ถูกเคลือบเพื่อทำการเปิดลวดลายสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิคแสดงดังรูปที่ 3.4 หลังผ่านการฉายแสงแล้วจะทำการล้างเดเวลอป(Dewelop) ส่วนที่ถูกแสงออก ในกระบวนการนี้สารไวแสงที่คงเหลืออยู่บนชั้นอะลูมิเนียมคือส่วนที่ถูกมาสก์บดบังแสงไว้ แสดงดังรูปที่ 3.5 เหลือไว้เฉพาะส่วนที่ต้องการสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมหลังจากขั้นตอนการกัดโลหะต่อไป



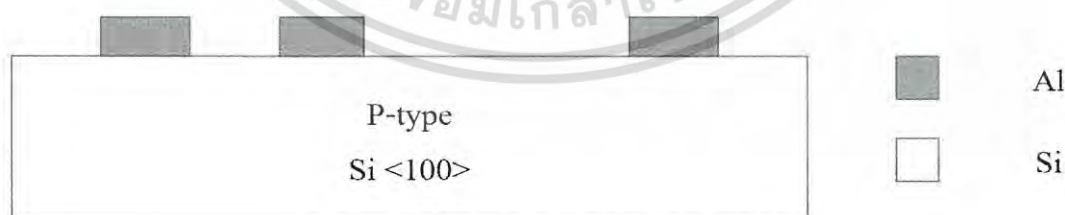
รูปที่ 3.5 ภาพจำลองการเคลือบสารไวแสงเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 4 คือกระบวนการกัดชั้นโลหะอะลูมิเนียมแบบแห้ง (Dry etching) ด้วยพลาสมา ในกระบวนการนี้ชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมที่ไม่มีสารไวแสงบดบังถูกกัดกร่อนออกจนหมด คงเหลือไว้เฉพาะส่วนของฟิล์มอะลูมิเนียมที่ต้องการสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้า โดยแสดงแบบจำลองกระบวนการกัดชั้นโลหะอะลูมิเนียมดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาพจำลองการกัดชั้นอะลูมิเนียม

ขั้นตอนที่ 5 เป็นการลอกเอาสารไวแสง (Strip resist) ที่เหลืออยู่บนขั้วอะลูมิเนียมออก หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการนี้สามารถสังเกตเห็นถึงขั้วอะลูมิเนียมที่อยู่บนฐานรองซิลิคอนแสดงดังรูปที่ 3.7 เพื่อการใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้ามีหน้าที่สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์แบบสองมิติ



รูปที่ 3.7 ภาพจำลองการลอกน้ำยาไวแสง

ขั้นตอนที่ 6 เป็นกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า การซินเตอร์ริง (Sintering) เพื่อทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ด้วยวิธีการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอน

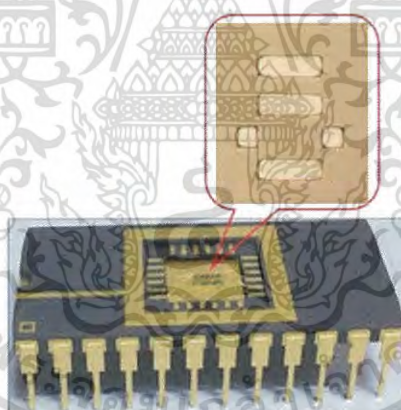
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายสำหรับการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์สองมิติ โดยรูปที่ 3.8 แสดงถึงภาพชิ้นงาน หัววัดฮอลล์สองมิติที่ได้ทำการสร้างขึ้นจริง



รูปที่ 3.8 หัววัดฮอลล์ที่ได้จากกระบวนการสร้าง

หลังจากที่ผ่านกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว หัววัดฮอลล์สองมิติจะถูกบรรจุลงในตัวถังไอซีแบบ PDIP มีทั้งหมด 24 ขา ดังรูปที่ 3.9 เพื่อนำไปทดสอบและศึกษาพฤติกรรมของหัววัดฮอลล์สองมิติ ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.9 หัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์สองมิติในแพ็คเกจ PDIP24

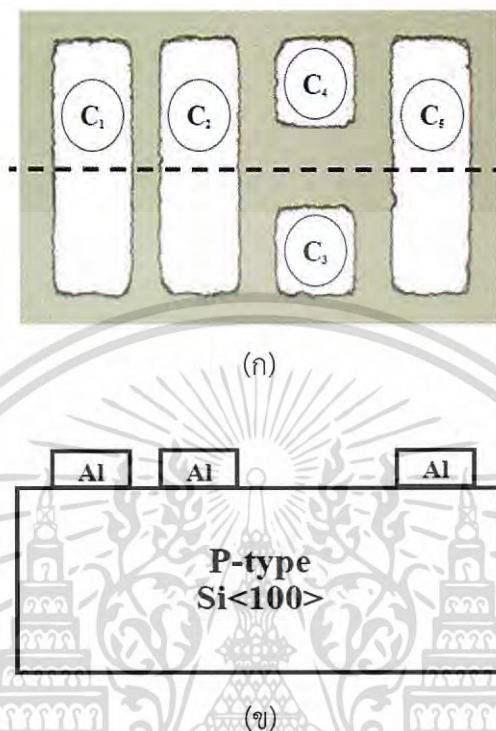
3.2 โครงสร้างทางกายภาพและการต่อใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.2.1 โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติ

โดยลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์หัววัดฮอลล์สองมิติที่ถูกสร้างขึ้นนี้ ใช้ซิลิกอนชนิดพี (P-type silicon) ระบาย <100> ที่มีความหนา 625 ไมโครเมตรและมีค่าสภาพความต้านทานเท่ากับ 20-30 โอห์ม-เซนติเมตรเป็นฐานรอง โดยทำการสร้างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (Ohmic contact) บนฐานรองทั้งหมดห้าขั้วคือ C_1 , C_2 , C_3 , C_4 และ C_5 ซึ่งมีขนาดพื้นที่ของขั้วโอห์มิกที่แตกต่างกันสองขนาด สำหรับขนาดของขั้วไฟฟ้าโอห์มิก C_3 และ C_4 มีขนาดเท่ากับ $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ส่วนขั้วไฟฟ้าโอห์มิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_1, C_2 และ C_5 มีขนาดเท่ากับ $100 \times 300 \mu\text{m}^2$ แสดงดังรูปที่ 3.10(ก) โดยมีพื้นที่สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองแนวแกนเท่ากับ $300 \times 600 \mu\text{m}^2$ สำหรับรูปที่ 3.10(ข) แสดงถึงภาคตัดขวางของอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกที่ถูกสร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพี

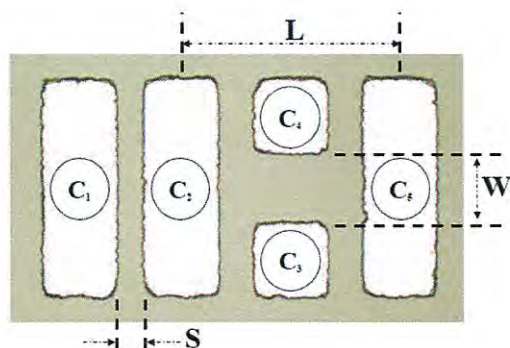


รูปที่ 3.10 หัววัดสนามแม่เหล็กสองมิติ (ก) ภาพขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก และ (ข) ภาพตัดขวางของอุปกรณ์

โดยพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์นั้น หนึ่งในปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์เฟลตคือระยะของขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ผู้ทำการออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาเพื่อให้หัววัดที่ออกแบบขึ้นมีการตอบสนองที่ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ส่วนของต้นแบบหัววัดฮอลล์สองมิติที่ได้ทำการสร้างขึ้นจึงถูกออกแบบให้มีระยะของขั้วไฟฟ้าในการตอบสนองที่แตกต่างกันทั้งสองโครงสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เป็นแนวทางในการเลือกใช้โครงสร้างของระยะขั้วไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้หัววัดสนามแม่เหล็กมีการตอบสนองที่ดี

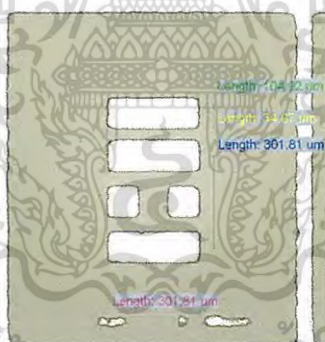
ฮอลล์สองมิติที่ออกแบบขึ้นมีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกทั้งหมดห้าขั้วซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกัน โดยกำหนดระยะระหว่างขั้ว C_2 ไปยัง C_5 คือระยะ $L=300$ ไมโครเมตร สำหรับขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก C_1 และ C_2 ใช้สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hx}) สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนาน (Parallel field : B_x) ของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งโดยกำหนดระยะระหว่างขั้ว C_1 กับ C_2 คือระยะ S ทำการออกแบบไว้สองระยะคือ 40 และ 80 ไมโครเมตร สุดท้ายคือระยะระหว่างขั้ว C_3 กับ C_4 กำหนดเป็นระยะ W โดยทำการออกแบบทั้งหมดสามระยะคือ 100, 200 และ 300 ไมโครเมตร โดยขั้วไฟฟ้าโอห์มมิกดังกล่าวใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hz}) ที่ใช้สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (B_z) ของฮอลล์เฟลตพื้นฐาน แสดงดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

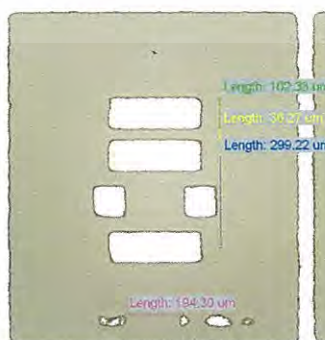


รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์ของระยะ W , L และ S ที่ใช้ในการออกแบบหัววัดฮอลล์สองมิติ

ระยะของขั้วไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการออกแบบให้มีสมบัติตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิทธิพลของระยะขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด เพื่อนำไปทดสอบสมบัติและทำการวิเคราะห์ให้ทราบถึงค่าความไวในการตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอถึงลักษณะโครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ทำการออกแบบขึ้นมีทั้งหมด 6 โครงสร้าง ซึ่งมีระยะของขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก S และ W ที่แตกต่างกันออกไป โดยทำการพิจารณาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ที่สามโครงสร้างแรกมีระยะ $S=40$ ไมโครเมตร และมีระยะ $W=100, 200$ และ 300 ไมโครเมตรดังรูปที่ 3.12, 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ โดยแสดงพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1

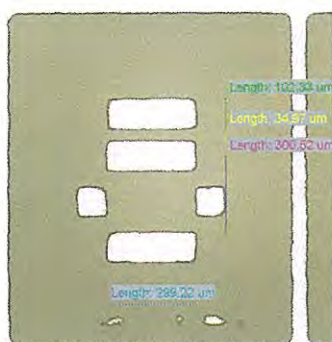


รูปที่ 3.12 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=100\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$



รูปที่ 3.13 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

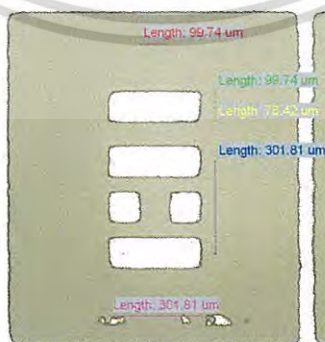


รูปที่ 3.14 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=300\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่ระยะ $S=40\mu\text{m}$, $W=100, 200$ และ $300\mu\text{m}$

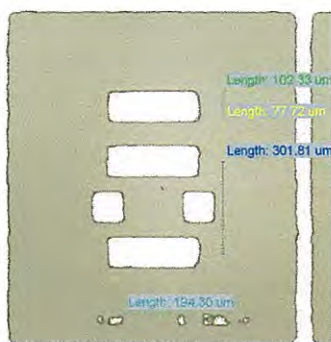
สมบัติเฉพาะของ โครงสร้างหัววัดสอง มิติ			
ชนิดฐานรองซิลิกอน	พี	พี	พี
ระนาบ	<100>	<100>	<100>
สภาพความต้านทาน	20-30 $\Omega\text{-cm}$.	20-30 $\Omega\text{-cm}$.	20-30 $\Omega\text{-cm}$.
ความยาว (l)	300 μm	300 μm	300 μm
ความกว้าง (w)	100 μm	200 μm	300 μm
ระยะห่างของขั้ว (s)	40 μm	40 μm	40 μm

สำหรับสามโครงสร้างในกลุ่มที่สองมีระยะ $S=80$ ไมโครเมตร และมีระยะ $W=100, 200$ และ 300 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.15, 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ โดยแสดงค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของโครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติดังตารางที่ 3.2

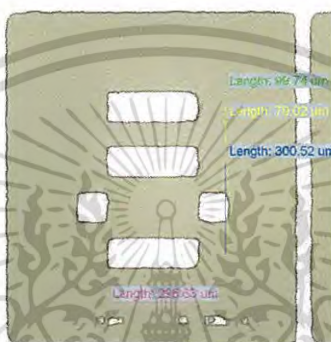


รูปที่ 3.15 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้






รูปที่ 3.16 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=200\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$



รูปที่ 3.17 โครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติที่ระยะ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่ระยะ $S=80\mu\text{m}$, $W=100, 200$ และ $300\mu\text{m}$

สมบัติเฉพาะของ โครงสร้างหัววัดสอง มิติ			
ซิลิกอนชนิด	พี	พี	พี
ระนาบ	<100>	<100>	<100>
สภาพความต้านทาน	20-30 $\Omega\text{-cm.}$	20-30 $\Omega\text{-cm.}$	20-30 $\Omega\text{-cm.}$
ความยาว (l)	300 μm	300 μm	300 μm
ความกว้าง (w)	100 μm	200 μm	300 μm
ระยะห่างของขั้ว (s)	80 μm	80 μm	80 μm

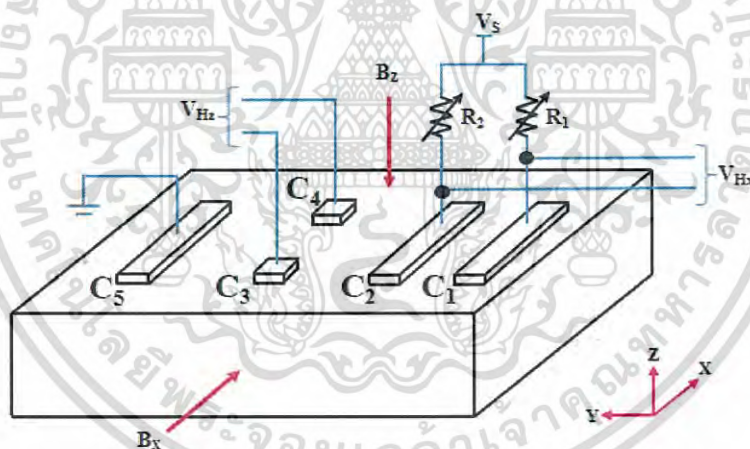
โดยฮอลล์สองมิติทั้งหกโครงสร้างจะถูกนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแม่เหล็ก เพื่อแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของแต่ละโครงสร้างและสามารถเลือกนำไปใช้กับระบบวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสมในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ลักษณะการใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ

ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกทั้งหมดห้าขั้ว ซึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก C_2 และ C_5 เกิดแรงทางสนามไฟฟ้ากระทำกับพาหะในชั้นสารกึ่งตัวนำ ส่งผลทำให้มีกระแสไหลผ่านจากขั้ว C_2 ไปยัง C_5 สำหรับขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก C_1 และ C_2 ใช้สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hx}) ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวขนาน (B_x) ของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้ง และขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก C_3 และ C_4 ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hz}) สำหรับการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (B_z) ของโครงสร้างฮอลล์เพลตแบบพื้นฐาน

หัววัดฮอลล์สองมิติสามารถเชื่อมต่อตามแผนภาพจำลองการต่อใช้งานดังรูปที่ 3.18 ที่แสดงการต่อวงจรผ่านห้าขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในสองแนวแกน ในส่วนแรกเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับการจ่ายกระแสให้กับหัววัดฮอลล์ โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_s) จะถูกเชื่อมต่อกับ R_1 และ R_2 ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลไปยังขั้วไฟฟ้า C_1 กับ C_2 ครบวงจรที่ขั้ว C_5 และสามารถทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hx}) ที่เกิดจากการตอบสนองของหัววัดต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากของโครงสร้างฮอลล์เพลตแบบพื้นฐานได้ที่ขั้ว C_3 และ C_4 สำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานสามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hx}) ของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งได้ที่ขั้ว C_1 และ C_2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ภาพจำลองการใช้งานของหัววัดฮอลล์สองมิติ

3.3 การทดสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดฮอลล์สองมิติ

การทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญภายหลังจากกระบวนการการออกแบบและกระบวนการสร้างเสร็จสิ้นแล้ว โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการทำงานเฉพาะของอุปกรณ์ที่สามารถระบุถึงศักยภาพและข้อจำกัดในการตอบสนองได้ อีกทั้งยังสามารถยืนยันให้เห็นถึงผลของการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติที่มีความสอดคล้องตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ในข้างต้น และเป็นแนวทางในการเลือกใช้หัววัดฮอลล์สองมิติสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้เข้าไปเผยแพร่บนเว็บไซต์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิคของขั้วไฟฟ้า

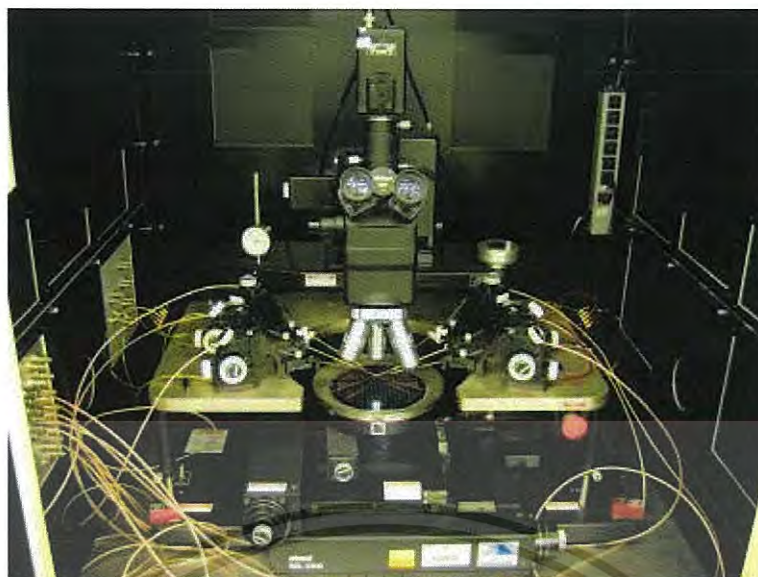
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติขึ้นโดยมุ่งเน้นให้หัววัดมีคุณสมบัติในการตอบสนองได้สองทิศทางและมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เออร์ทพุททั้งสองของหัววัดสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ จึงได้ทำการออกแบบและสร้างหัววัดฮอลล์บนโครงสร้างฮอลล์เพลตที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการเช่น การตอบสนองที่เป็นเชิงเส้น ใช้กำลังไฟฟ้าที่ต่ำ สามารถเชื่อมต่อกับวงจรสำหรับปรับปรุงสัญญาณได้ง่าย นอกจากนี้ยังเป็นโครงสร้างที่ง่ายสำหรับการสร้างด้วยกระบวนการผลิตบนพื้นฐานซิลิกอนเทคโนโลยี โดยหัววัดสนามแม่เหล็กที่ได้สร้างขึ้นนี้เป็นการรวมเอาโครงสร้างหัววัดฮอลล์เพลตแบบพื้นฐานกับหัววัดฮอลล์แนวตั้งเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กได้สองมิติด้วยโครงสร้างที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิคเพียงห้าขั้วบนฐานรองซิลิกอน ซึ่งหนึ่งในสมบัติทางไฟฟ้าที่มีอิทธิพลต่อความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์เพลตสองมิติคือ ลักษณะความเป็นโอห์มมิคของรอยสัมผัสที่ขั้วไฟฟ้าระหว่างโลหะอะลูมิเนียมกับซิลิกอนโดยใช้แผ่นซิลิกอนชนิดพีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 นิ้ว ซึ่งต้องการทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติแบบโอห์มมิคด้วยเงื่อนไขการสร้างเดียวกันทั้งหกโครงสร้าง

ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นโอห์มมิคของขั้วไฟฟ้า โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A แสดงดังรูปที่ 3.19 ซึ่งใช้ทดสอบอุปกรณ์ร่วมกับหัววัดรุ่น Cascade Microtech Model M150 แสดงดังรูปที่ 3.20



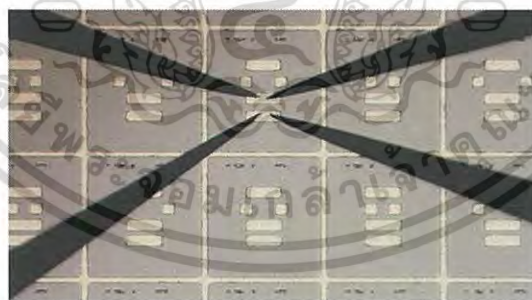
รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 หัววัดรุ่น Cascade Microtech Model M150

ในการทดลองทำการเลือกฟังก์ชันของเครื่องทดสอบสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A ในโหมดกระแสที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าของหัววัดในช่วง -0.1 ถึง 0.1 มิลลิแอมป์ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยผลที่ได้จะนำมาทำการวิเคราะห์ความเป็นขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม ในการทดลองจะทำการเลือกทดสอบขั้วไฟฟ้าของโครงสร้างที่ 6 คือ ขั้ว C_2 และ C_5 ที่ระยะ $L=300$ ไมโครเมตร, ขั้ว C_1 และ C_2 ที่ระยะ 80 ไมโครเมตร และขั้ว C_3 และ C_4 ที่ระยะ $S=300$ ไมโครเมตร รูปที่ 3.21 แสดงตัวอย่างการทดสอบสมบัติโอห์มมิกสำหรับขั้วไฟฟ้าทั้งห้าขั้วของหัววัดฮอลล์สองมิติ



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการทดสอบรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกของหัววัดฮอลล์สองมิติ

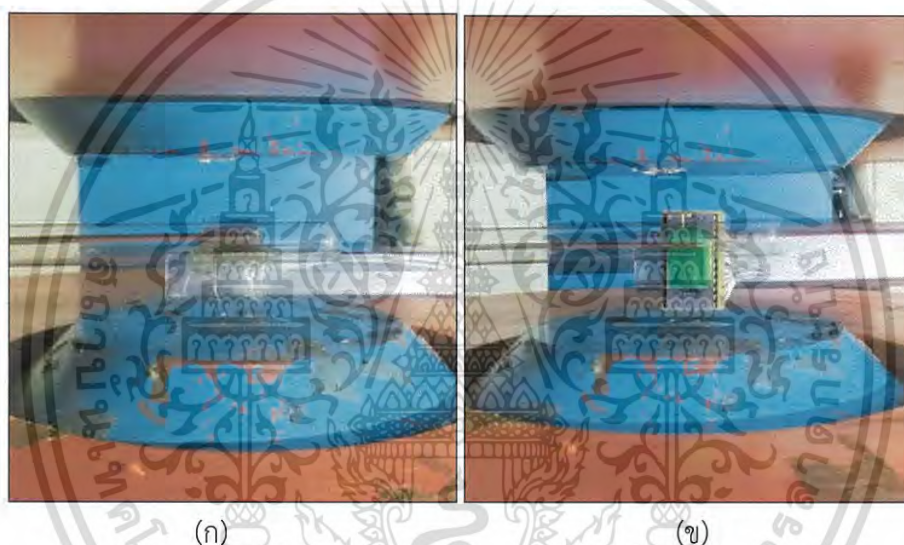
3.3.2 การทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์

หนึ่งในสมบัติเฉพาะของหัววัดฮอลล์สองมิติที่แสดงถึงลักษณะการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กคือ สมบัติความไวในการตอบสนอง (Sensitivity) โดยค่าความไวของหัววัดฮอลล์บ่งบอกถึงศักยภาพในการตอบสนองต่อปริมาณความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดเป็นสัญญาณของศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาและทดสอบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสองทิศทางทั้งการตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและในแนวขนานกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

เอกส...
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวขนานของหัววัด เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะการตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างเป็นเชิงเส้นได้ทั้งสองแนวแกน และสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขั้วแม่เหล็กได้

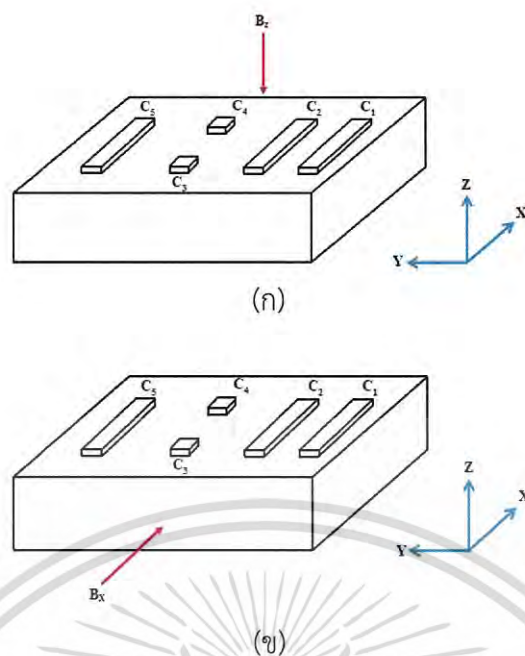
การทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติสามารถทำการทดลองโดยการต่อวงจรเพื่อใช้งานหัววัดตามรูปที่ 3.18 ทำการจ่ายกระแสคงที่ 0.5 กับ 1 มิลลิแอมป์ ผ่านตัวต้านทานไฟฟ้า R_1 และ R_2 ที่เชื่อมต่ออยู่กับขั้ว C_1 กับ C_2 ตามลำดับ โดยไปครบวงจรที่ขั้วไฟฟ้า C_5 ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กอิเล็กทรอนิกส์ (Electromagnet) ที่สามารถทำการปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง -5,000 ถึง 5,000 เกาส์ แสดงดังรูปที่ 3.22(ก) และ 3.22(ข) ที่สนามแม่เหล็กกระทำในสองทิศทาง โดยทำการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติทั้งหมด 6 โครงสร้าง เพื่อทำการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของระยะขั้วไฟฟ้าต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด



รูปที่ 3.22 ทิศทางของสนามแม่เหล็ก (ก) สนามแม่เหล็กทิศตั้งฉากและ (ข) สนามแม่เหล็กทิศขนาน

การทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดนี้สามารถแบ่งการทดสอบได้เป็นสองกรณีตามทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด คือ ในกรณีแรกการตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากกับหัววัดฮอลล์ (B_z) แสดงภาพจำลองทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์ดังรูปที่ 3.23(ก) โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอาท์พุทของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัด ทำการวัดค่าได้ที่ขั้วไฟฟ้า C_3 และ C_4 และในกรณีที่สองทิศสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์ในแนวขนาน (B_x) แสดงดังรูปที่ 3.23(ข) ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ได้ที่ขั้วไฟฟ้า C_1 และ C_2 ในการทดสอบนี้ค่าการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กจะถูกบันทึกและนำไปพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองแนวแกนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



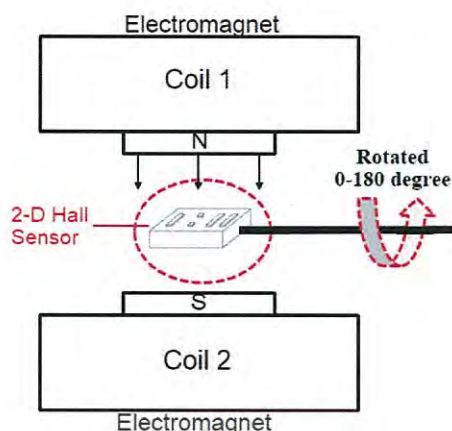
รูปที่ 3.23 ภาพจำลองทิศของสนามแม่เหล็กในการทดลอง

- (ก) ทิศสนามแม่เหล็กกระทำตั้งฉากกับหัววัดตามแนวแกน z
 (ข) ทิศสนามแม่เหล็กกระทำขนานกับหัววัดตามแนวแกน x

3.3.3 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม

การออกแบบหัววัดฮอลล์สองมิติมีเป้าหมายหลักเพื่อสามารถนำหัววัดไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบได้อย่างเหมาะสม โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบเพื่อสร้างหัววัดให้มีสมบัติในการตอบสนองได้สองทิศทางในแนวระนาบเดียวกัน อีกทั้งยังมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับมุมที่เส้นแรงแม่เหล็กกระทำเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ และโคไซน์ตามลำดับ

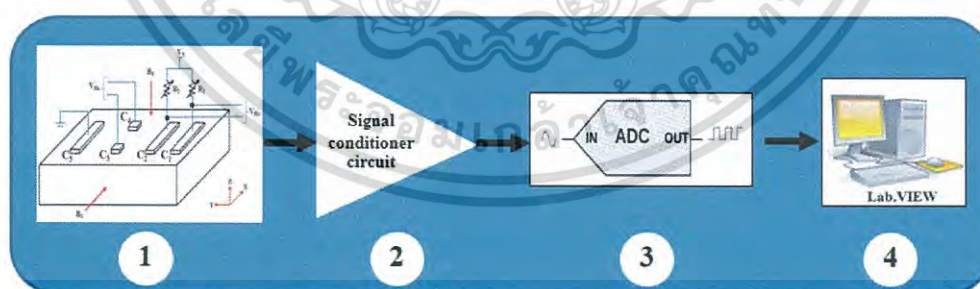
ดังนั้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองและมีความสอดคล้องกับทฤษฎีตามที่ได้ตั้งสมมติฐาน ในการทดลองจึงทำการทดสอบการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติต่อการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ โดยทำการหมุนหัววัดฮอลล์เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ 0-180 องศา ครั้งละ 10 องศา ภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ 5,000 เกาส์ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองสัญญาณสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองที่ขึ้นกับมุม โดยการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การทดสอบสมบัติการตอบสนองของหัววัดที่ขึ้นกับมุม

3.4 การทดสอบระบบประมวลสัญญาณการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

ระบบการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติเป็นระบบที่อาศัยการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ในสองทิศทางซึ่งขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด โดยใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอาต์พุตทั้งสองที่เป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์สำหรับคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตามเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง มีองค์ประกอบสำคัญสำหรับการวัดแสดงดังรูปที่ 3.25 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนหลักคือ หัววัดสนามแม่เหล็กสองทิศทาง วงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Signal conditioner circuit) ส่วนแปลงสัญญาณ (Analog to Digital Converter) และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนประมวลผลโดยการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและการแสดงผลค่าความเข้มสนามแม่เหล็กผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมแลบวิว แสดงระบบการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 แผนภาพไดอะแกรมระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

หลังจากทำการทดสอบเพื่อให้ทราบถึงสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติในส่วนแรกแล้ว ในหัวข้อนี้นำเสนอถึงขั้นตอนการทดสอบสมบัติและพฤติกรรมการทำงานในส่วนของวงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณ และส่วนแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมบัติขององค์ประกอบในระบบ ที่สามารถสร้างเป็นเครื่องมือในการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างแม่นยำได้

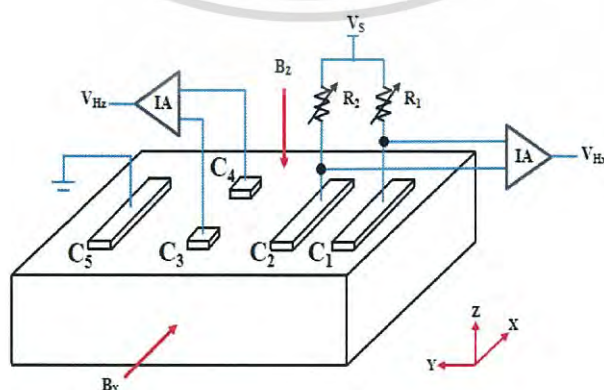
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 ระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

3.4.1 การทดสอบอัตราขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติ

ในส่วนของวงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณเป็นวงจรภายนอกที่ถูกเชื่อมต่อและใช้งานร่วมกับหัววัด มีหน้าที่หลักสำหรับการขยายและการปรับระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ออฟเซตของหัววัดฮอลล์สองมิติให้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม โดยในงานวิจัยอาศัยวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ที่มีคุณสมบัติสามารถขยายผลต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสองขั้วไฟฟ้าฮอลล์ในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่เปลี่ยนแปลงทั้งสองมิติของหัววัด โดยมีอัตราขยายแตกต่างกันสองชุดเพื่อทำการขยายค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของโครงสร้างฮอลล์เพลตพื้นฐานในการตอบสนองแนวตั้งฉากและของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งสำหรับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวขนาน ทำให้เห็นความแตกต่างของขนาดสัญญาณที่ชัดเจนขึ้น โดยแสดงการเชื่อมต่อหัววัดฮอลล์สองมิติกับวงจรขยายดังรูปที่ 3.27 อีกทั้งยังช่วยเพิ่มค่าความไวในการตอบสนองให้มีค่ามากยิ่งขึ้นก่อนที่จะนำสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ไปทำการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไป



รูปที่ 3.27 การต่อวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์เข้ากับหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 วงจรขยายอินสตรูเมนต์

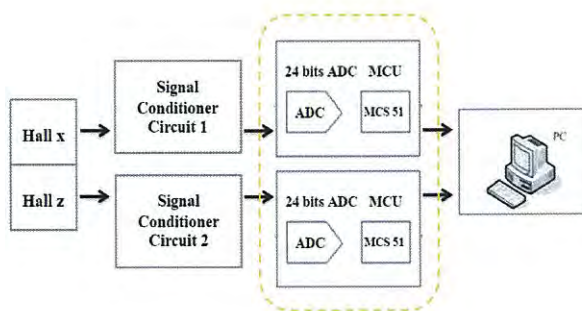
ในการทดลองได้ทำการออกแบบวงจรปรับปรุงสัญญาณเพื่อทำการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และทำการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าออฟเซตให้มีค่าที่เหมาะสม โดยทำการเลือกใช้วงจรรวมของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ ไอซีเบอร์ INA128 จำนวน 2 ตัว สำหรับการขยายในชุดแรก และไอซีเบอร์ INA125 จำนวน 1 ตัว สำหรับการขยายและปรับระดับแรงดันไฟฟ้าออฟเซตในชุดที่สอง แสดงแผนภาพวงจรปรับปรุงสัญญาณดังรูปที่ 3.28 โดยวงจรทั้งสองที่ออกแบบขึ้นนี้จะทำการขยายสัญญาณของหัววัดเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนทางมีความไวที่สูงขึ้นและมีการตอบสนองที่เท่าเทียมกันระหว่างสองสัญญาณเอาท์พุท โดยทำการปรับอัตราขยายที่มีค่าประมาณ 3,100 เท่า สำหรับทดสอบความไวของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนาน (B_x) และ อัตราขยายที่มีค่าประมาณ 17,400 เท่า สำหรับทดสอบความไวของโครงสร้างฮอลล์เฟลตพื้นฐานในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก (B_z) เพื่อให้การตอบสนองของฮอลล์ทั้งสองทิศทางให้มีค่าเท่ากัน

โดยในขั้นแรกจะทำการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ผ่านการเชื่อมต่อกับวงจรเพื่อทำการปรับปรุงสัญญาณ ซึ่งการทำงานของวงจรจะทำการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าออฟเซตให้มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของไฟเลี้ยง โดยไฟเลี้ยงที่ใช้มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความไวในการตอบสนองของหัววัดทั้งสองแนวแกนที่เพิ่มสูงขึ้นภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็ก -2,000 ถึง 2,000 เกาส์ หลังจากทำการปรับปรุงสัญญาณแล้ว โดยค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกขยายจะถูกลบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าออฟเซตแล้วทำการหาค่าความไวในการตอบสนองต่อนอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นการตอบสนองที่เท่าเทียมกันของหัววัดต่อการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ 0-180 องศา ภายใต้สนามแม่เหล็กคงที่ 2,000 เกาส์ ภายหลังจากผ่านวงจรปรับปรุงสัญญาณแล้ว

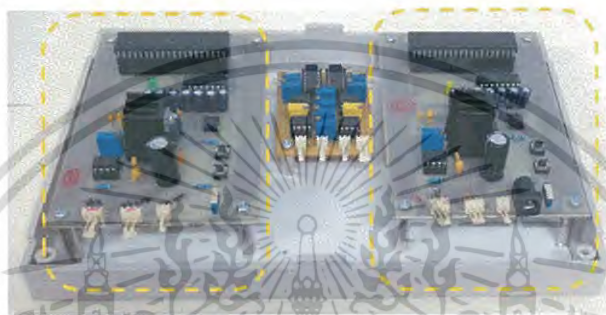
3.4.2 การทดสอบระบบแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC)

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ส่วนของการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียด 24 bit มีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 สำหรับการประมวลผลค่าแรงดันไฟฟ้ามีด้วยกัน 2 บอร์ด โดยมีความละเอียดในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.298 ไมโครโวลต์ต่อบิต ชุดระบบการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแสดงดังรูปที่ 3.29 และแสดงบอร์ดแปลงสัญญาณและอ่านค่าดังรูปที่ 3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



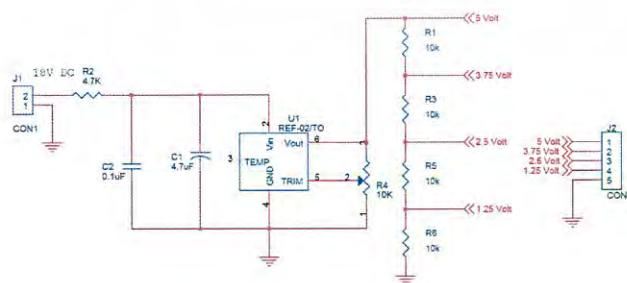
รูปที่ 3.29 ระบบการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล



รูปที่ 3.30 บอร์ดแปลงสัญญาณทั้งสอง

โดยบอร์ดแปลงสัญญาณทำการแปลงค่าสัญญาณไฟฟ้าฮอลล์อนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Communication) ไปยังคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้ถูกประมวลผลและแสดงค่าของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์บนโปรแกรมแลบวิว (Lab VIEW) [29-30]

สำหรับการทดสอบระบบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำการออกแบบขึ้นนี้เพื่อทดสอบให้เห็นถึงความแม่นยำสำหรับการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในระบบ โดยการสอบเทียบกับเครื่องมือตรวจวัดมาตรฐานดิจิทัลมิเตอร์ Fluke รุ่น 8808A ที่ทำการสอบเทียบแบบ 5 จุด (The five point test) [34-35] ที่ทำการวัด 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของช่วงการวัด 0 – 5.00 โวลต์ โดยในการทดลองได้ทำการออกแบบชุดวงจรแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งใช้ไอซีเบอร์ REF-02 ที่มีความแม่นยำสูงเพื่อใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 วงจรแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 บอร์ดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในการสอบเทียบแบบ 5 จุด

ในรูปที่ 3.32 แสดงบอร์ดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงแบบ 5 จุด ที่ 0, 12.5, 2.5, 3.75 และ 5.00 โวลต์ตามลำดับ โดยทำการสอบเทียบการอ่านค่าของระบบที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือมาตรฐานโดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke รุ่น 8808A

3.5 การทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดสนามแม่เหล็ก

ในการทดสอบความแม่นยำของระบบการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่ได้ ออกแบบขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบโดยภาพหน้าจอการแสดงผลด้วยโปรแกรม แลบริวดังรูป 3.33 จึงทำการทดสอบโดยทำการเปรียบเทียบค่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่อ่านจากระบบวัดที่ได้สร้างขึ้นกับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน(FWBELL5170) ในกรณีที่มีการทำมุมเอียงระหว่างสนามแม่เหล็กกับหัววัดที่ 10, 20, 30 และ 40 องศา แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้ในการวัดด้วยเงื่อนไขที่มุมต่างๆกับสนามแม่เหล็กจริงที่สร้างขึ้น โดยการทดสอบจะทำการสอบเทียบแบบห้าจุดที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ 0, 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 เกาส์ตามลำดับ ผลที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์และทำการเปรียบเทียบถึงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างเครื่องมือการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กมาตรฐานกับเครื่องมือที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.33 การแสดงผลความเข้มสนามแม่เหล็กของระบบบนโปรแกรมแลบริว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ทราบถึงลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นตามเงื่อนไขในการออกแบบ ตลอดจนสามารถระบุถึงคุณสมบัติที่มีความสอดคล้องกับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีความแม่นยำสูง โดยเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับสมบัติเฉพาะของหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์สำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้ในสองมิติและมีการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดเป็นไปตามเงื่อนไขของเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่เหมาะสม อีกทั้งยังทดสอบการประยุกต์ใช้หัววัดร่วมกับเทคนิคการวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.1 ผลการทดสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดฮอลล์

สำหรับการออกแบบและสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติบนพื้นฐานเทคโนโลยีซิลิกอนที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้หัววัดมีสมบัติเฉพาะสอดคล้องกับเงื่อนไขของหลักการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบนั้น การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นหลังจากการสร้างและสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก รวมถึงพฤติกรรมในการทำงานของหัววัดจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ในเบื้องต้น ดังนั้นการทดสอบและการวิเคราะห์ผลสมบัติของอุปกรณ์จึงมีความจำเป็นสำคัญในการออกแบบระบบ ทำให้การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติขั้วไฟฟ้าโอห์มมิคของหัววัดฮอลล์สองมิติ

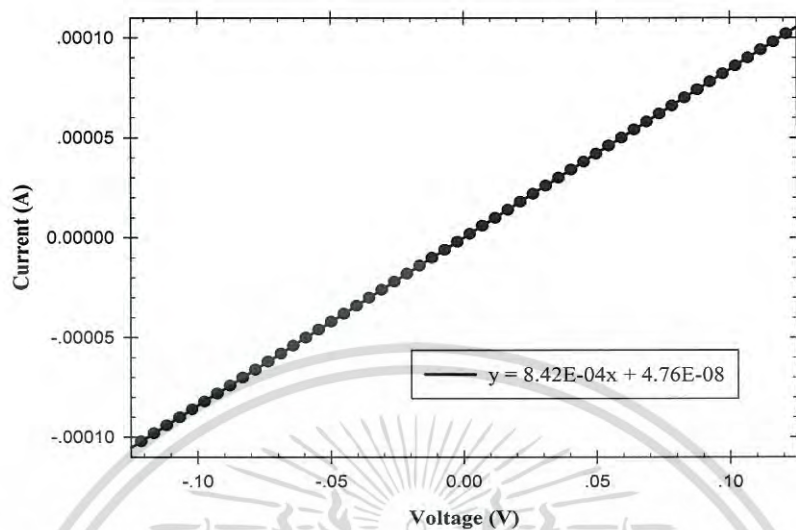
โครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ถูกออกแบบขึ้นมีลักษณะเฉพาะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทั้งหมดเพียงห้าขั้วที่ถูกสร้างบนฐานรองซิลิกอน ดังนั้นในขั้นแรกจึงต้องทำการทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิคของขั้วไฟฟ้าหลังจากกระบวนการสร้างเสร็จแล้ว เพื่อสามารถยืนยันความเป็นโอห์มมิคที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติหลังจากกระบวนการสร้างหัววัดฮอลล์

จากผลการทดลองทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้วสัมผัส โดยทำการเลือกทดสอบขั้วไฟฟ้าของโครงสร้างที่ 6 โดยเป็นตัวแทนของหัววัดที่ถูกสร้างขึ้นบนฐานรองซิลิกอนและมีเงื่อนไขสำหรับกระบวนการสร้างเดียวกัน ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่ถูกวัดค่าความเป็นโอห์มมิค ประกอบด้วยขั้ว C_2 และ C_5 ที่ระยะ $L=300$ ไมโครเมตร ที่ใช้จ่ายกระแสสำหรับการใช้งานของหัววัด, ขั้ว C_1 และ C_2 ที่ระยะ 80 ไมโครเมตร ที่ใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) และขั้ว C_3 และ C_4 ที่ระยะ $S=300$ ไมโครเมตร ที่ใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของโครงสร้างฮอลล์เพลด์พื้นฐานในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก (B_z) โดยทำการจ่ายกระแส -0.1 ถึง 0.1 มิลลิแอมป์ ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A ซึ่งใช้ทดสอบ

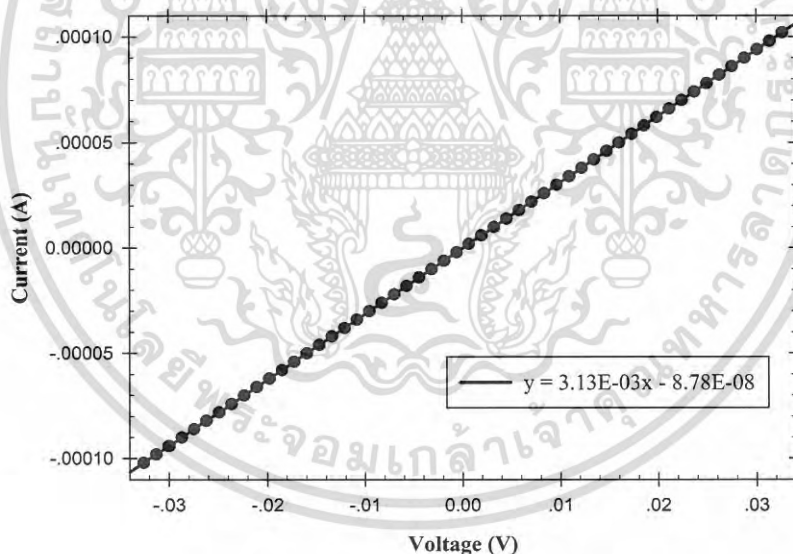
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา โดยผู้จัดทำเอกสารนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกับหัววัดรุ่น Cascade Microtech Model M150 แสดงผลความสัมพันธ์ให้เห็นดังกราฟในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

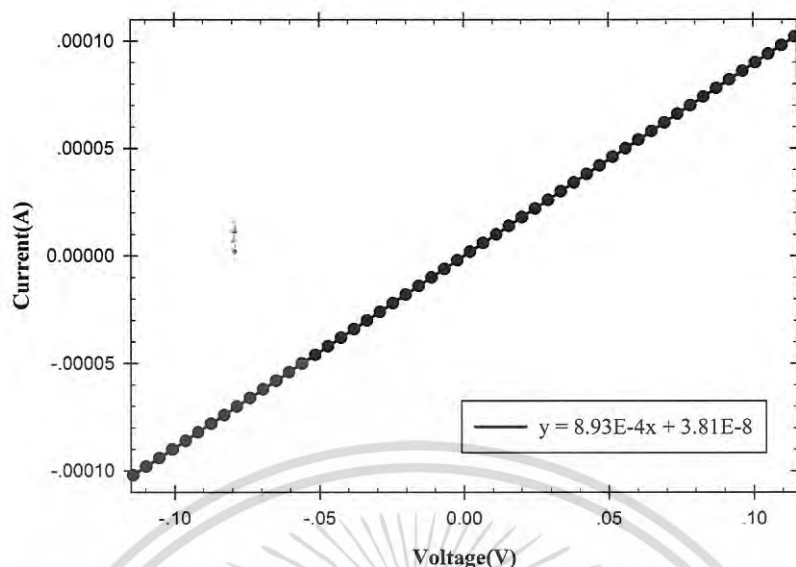


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า C_3 กับ C_4 ($W=300 \mu m$) ของหัววัด



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า C_1 และ C_2 ($W=80 \mu m$) ของหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า C_2 และ C_5 ($L=300 \mu m$) ของหัววัด

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ทำการวัดคร่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีลักษณะเป็นเชิงเส้น สามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงรอยสัมผัสระหว่างขั้วโลหะอะลูมิเนียมกับฐานรองซิลิกอนชนิดพีที่มีสมบัติความเป็นโอห์มมิกที่ดี ซึ่งถูกอธิบายความเป็นเชิงเส้นได้ตามสมการที่ (4.1) สำหรับขั้วไฟฟ้า C_3 กับ C_4 ($W=300 \mu m$) ในสมการที่ (4.2) สำหรับขั้วไฟฟ้า C_1 และ C_2 ($W=80 \mu m$) และสมการที่ (4.3) สำหรับขั้วไฟฟ้า C_2 และ C_5 ($L=300 \mu m$) ตามลำดับ

$$y = (8.42 \times 10^{-4})x + (4.76 \times 10^{-8}) \quad (4.1)$$

$$y = (3.13 \times 10^{-3})x - (8.78 \times 10^{-8}) \quad (4.2)$$

$$y = (8.93 \times 10^{-4})x + (3.81 \times 10^{-8}) \quad (4.3)$$

ความชันของกราฟที่ได้จากสมการเชิงเส้นแสดงถึงส่วนกลับของค่าความต้านทาน ซึ่งสามารถอธิบายถึงค่าความต้านทานภายในชิ้นสารเมื่อทำการวัดระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสามกรณีมีค่าเท่ากับ 1,187.65 โอห์ม ระหว่างขั้วไฟฟ้า C_3 กับ C_4 ($W=300 \mu m$), 319.49 โอห์ม ระหว่างขั้วไฟฟ้า C_1 และ C_2 ($W=80 \mu m$), และเท่ากับ 1,119.82 โอห์ม ระหว่างขั้วไฟฟ้า C_2 กับ C_5 ($L=300 \mu m$) ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานที่มีความแตกต่างกันนี้ได้รับอิทธิพลมาจากระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่ทำการวัดค่าและขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน ดังนั้นจากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถบ่งชี้ถึงสมบัติความเป็นโอห์มมิกของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองของหัววัดตรงตามที่ได้ออกแบบไว้

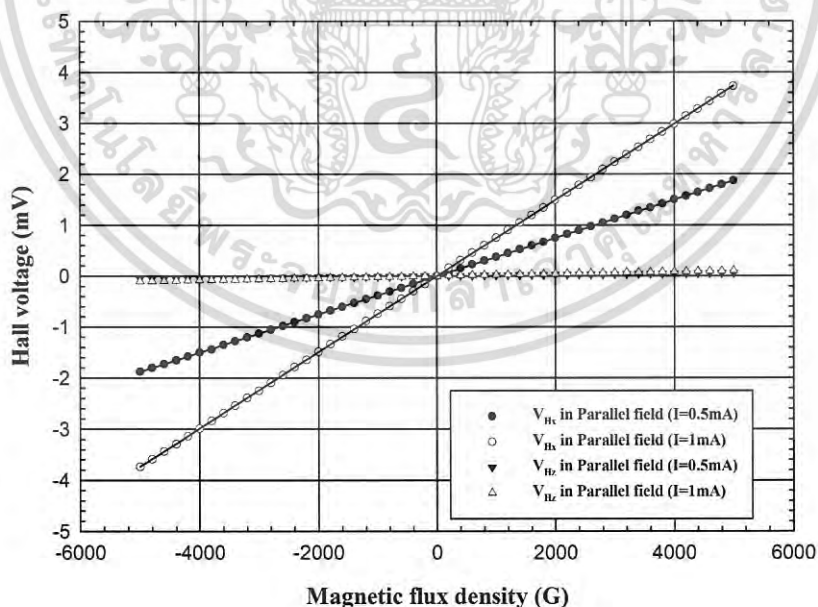
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ

หลังจากการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นโอห์มมิกของขั้วไฟฟ้าทั้งห้าในหัววัดฮอลล์สองมิติแล้ว ลำดับถัดมาจึงทำการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองบนพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ของแต่ละโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบขึ้น เพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและการแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัด ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดในสองทิศทางคือ ในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดฮอลล์

4.1.2.1 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนาน

โดยในการทดลองทำการทดสอบหัววัดฮอลล์สองมิติทั้งหมด 6 โครงสร้างด้วยกัน ซึ่งแต่ละโครงสร้างมีระยะของขั้วไฟฟ้าฮอลล์ที่แตกต่างกัน คือ โครงสร้างที่ 1 มีระยะ $W=100\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$, โครงสร้างที่ 2 มีระยะ $W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$, โครงสร้างที่ 3 มีระยะ $W=300\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$, โครงสร้างที่ 4 มีระยะ $W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$, โครงสร้างที่ 5 มีระยะ $W=200\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ และ โครงสร้างที่ 6 มีระยะ $W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$ ตามลำดับ สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนอง ซึ่งการทดสอบหาค่าความไวของหัววัดทำการจ่ายกระแสคงที่สองค่าคือ 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ เพื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของกระแสที่ส่งผลต่อค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด และทำการปรับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจากการเพิ่มกระแสให้กับอิลีคโตรแมกเนต ที่สามารถสร้างความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง $-5,000$ ถึง $5,000$ เกาส์ ผลการทดลองหัววัดทั้ง 6 โครงสร้างภายใต้ทิศสนามแม่เหล็กในแนวขนาน แสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 1 ($W=100\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$)

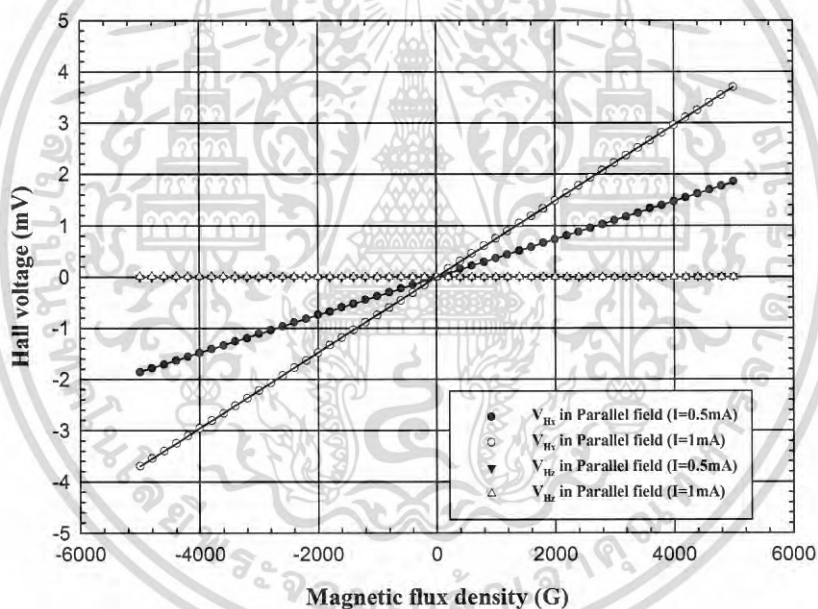
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรูปที่ 4.4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับหัววัด จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวขนาน (V_{Hx}) ตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการตอบสนองมีความเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ (4.4) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.5) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000375x - 0.003558 \quad (4.4)$$

$$y = 0.000747x - 0.001423 \quad (4.5)$$

จากสมการเชิงเส้นที่ได้สามารถทำการพิจารณาถึงค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดจากความชันของกราฟเส้นตรงทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.375 และ 0.747 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 2 ($W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$)

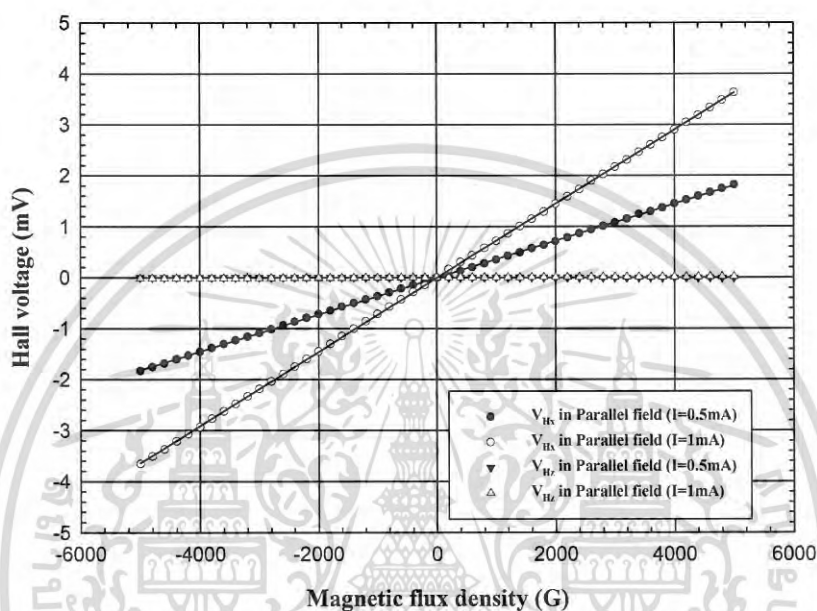
รูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวขนาน (V_{Hx}) ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ซึ่งมีการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ (4.6) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.7) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000370x - 0.005885 \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = 0.000739x - 0.000475 \quad (4.7)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรง ทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.370 และ 0.739 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ โดยมีความแตกต่างกันประมาณสองเท่าตามปริมาณอัตราส่วนของกระแสที่จ่ายให้กับหัววัด และจะไม่มี การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแม่เหล็กในแนวขนานเช่นกัน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กแนวขนานของหัววัด ฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ($W=300\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$)

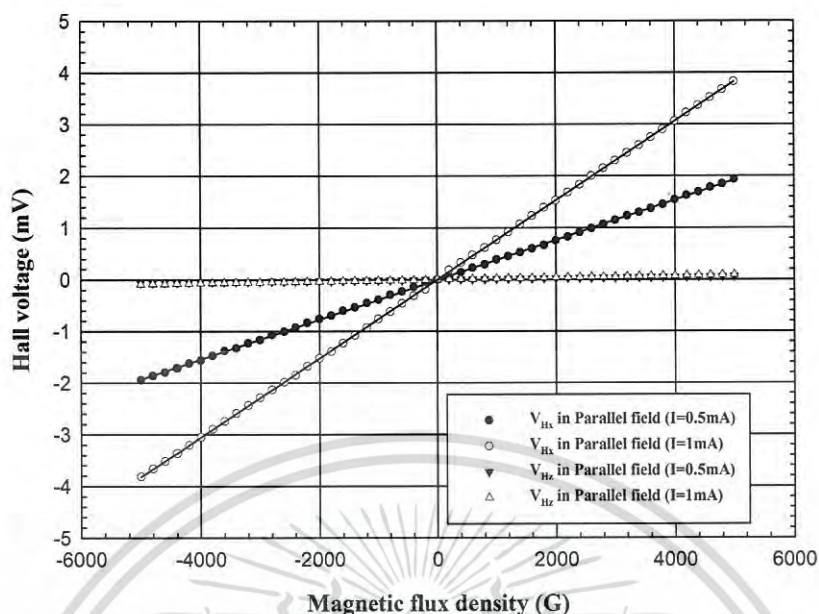
รูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวขนาน (V_{Hx}) ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆ ซึ่งมีการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ (4.8) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.9) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000362x - 0.004154 \quad (4.8)$$

$$y = 0.000727x - 0.006077 \quad (4.9)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรง ทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.362 และ 0.727 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ซึ่งมีความแตกต่างกันประมาณสองเท่าตามปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 4 ($W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$)

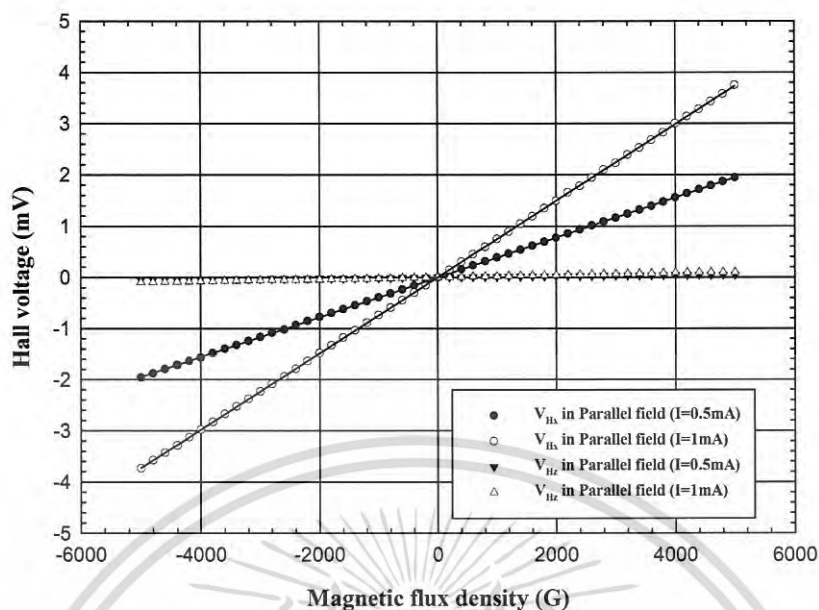
โดยในโครงสร้างที่ 4, 5 และ 6 มีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า $S=80\mu\text{m}$ ซึ่งต่างจากโครงสร้าง 1, 2 และ 3 ที่มีระยะ $S=40\mu\text{m}$ เพื่อทำการพิจารณาถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานที่มีต่อค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด

โดยจากกราฟในรูปที่ 4.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวขนาน (V_{Hx}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานเป็นไปตามสมการที่ (4.10) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.11) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000389x - 0.001904 \quad (4.10)$$

$$y = 0.000745x + 0.002385 \quad (4.11)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรงทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.389 และ 0.745 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ



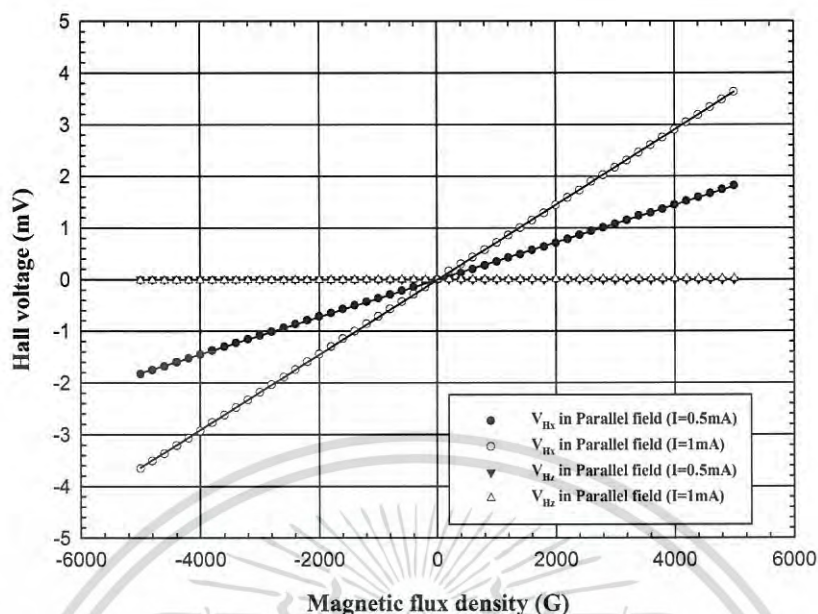
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัด ฮอลล์โครงสร้างที่ 5 ($W=200\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$)

จากกราฟดังรูปที่ 4.8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวขนาน (V_{Hx}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานเป็นไปตามสมการที่ (4.12) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.13) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000385x - 0.005212 \quad (4.12)$$

$$y = 0.000764x + 0.001346 \quad (4.13)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรง ทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.385 และ 0.764 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 6 ($W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$)

จากกราฟดังรูปที่ 4.9 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวขนาน (V_{Hx}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานเป็นไปตามสมการที่ (4.14) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.15) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000388x - 0.004885 \quad (4.14)$$

$$y = 0.000746x + 0.016192 \quad (4.15)$$

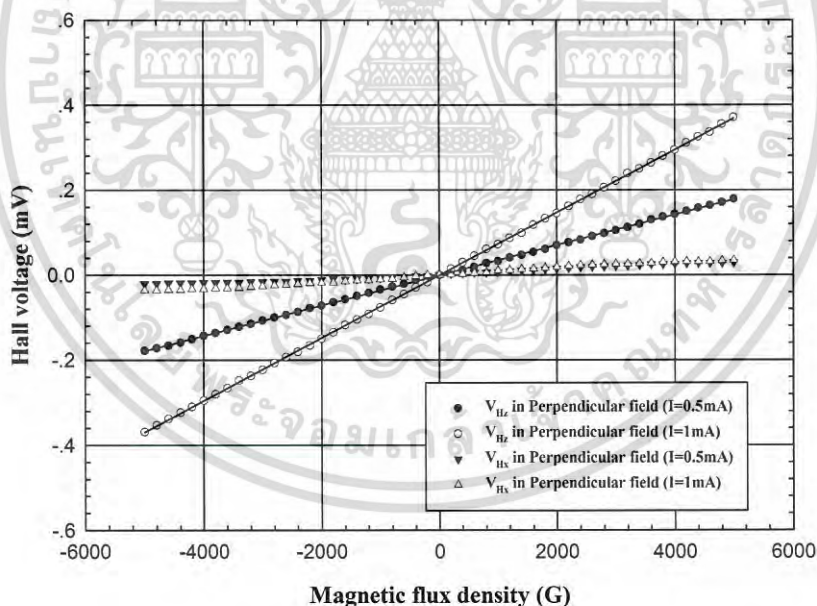
โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรงทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.388 และ 0.746 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กทั้ง 6 รูป แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองแม่เหล็กในแนวขนานทั้งสองทิศทางคือ ทิศพุ่งเข้าหาหัววัด ($+B_x$) และทิศพุ่งออกจากหัววัด ($-B_x$) จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่อ่านได้มีค่าตรงกันข้ามกันกล่าวคือ เมื่อสนามแม่เหล็กแนวขนานทิศพุ่งเข้าหาหัววัด ($+B_x$) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นบวกและจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากขึ้นแสดงให้เห็นในควอดรันต์ (quadrant) ที่ 1 ของกราฟทั้ง 6 ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการสร้างสนามแม่เหล็กแนวขนานกระทำกับหัววัดในทิศพุ่งออก ($-B_x$) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นในควอดรันต์ (quadrant) ที่ 3 ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มีค่าเป็นบวกและลบนี้สามารถบอกถึงขั้วของสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งลักษณะกราฟ

การตอบสนองของหัววัดทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงความสมมาตรในการตอบสนองที่ขึ้นกับขั้วของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดได้เป็นอย่างดี ในขณะที่เดียวกันโครงสร้างฮอลล์เพลตพื้นฐานจะไม่มี การตอบสนอง

4.1.2.2 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก

ภายหลังจากทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานแล้ว จึงทำการปรับหมุนหัววัดฮอลล์ให้อยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็กโดยทำการพิจารณาแรงดันไฟฟ้า (V_{Hz}) ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก แล้วทดสอบการตอบสนองตามขั้นตอนการทดลอง เช่นเดียวกับการทดสอบในแนวขนาน โดยการทดลองทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัววัดแบ่งเป็นสองกรณีคือ 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งการตอบสนองในแนวตั้งฉาก (V_{Hz}) และแนวขนาน (V_{Hx}) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในช่วง -5,000 ถึง 5,000 เกาส์ โดยผลการวัดจะนำไปพิจารณาประกอบกับการวัดในแนวขนานเพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ได้ออกแบบขึ้นสามารถตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงได้สองทิศทาง และสามารถเลือกนำหัววัดหนึ่งโครงสร้างที่ดีที่สุดเพื่อการประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติได้อย่างเหมาะสม โดยผลการทดลองหัววัดทั้ง 6 โครงสร้างภายใต้ทิศสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก แสดงดังรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 1 ($W=100\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉาก (V_{Hz}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำการปรับเปลี่ยนในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัด โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการเชิงเส้นที่

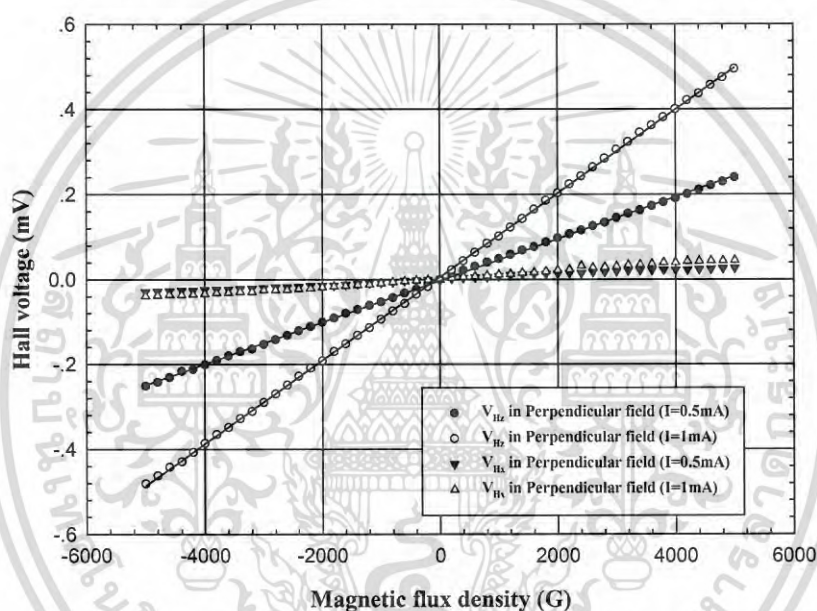
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4.16) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.17) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000036x - 0.000596 \quad (4.16)$$

$$y = 0.000074x - 0.000558 \quad (4.17)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรงทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 0.036 และ 0.074 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ และกราฟยังแสดงให้เห็นถึงการไม่ตอบสนองในการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งขนาน (V_{Hx}) คือ มีค่าใกล้เคียงศูนย์



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 2 ($W=200\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$)

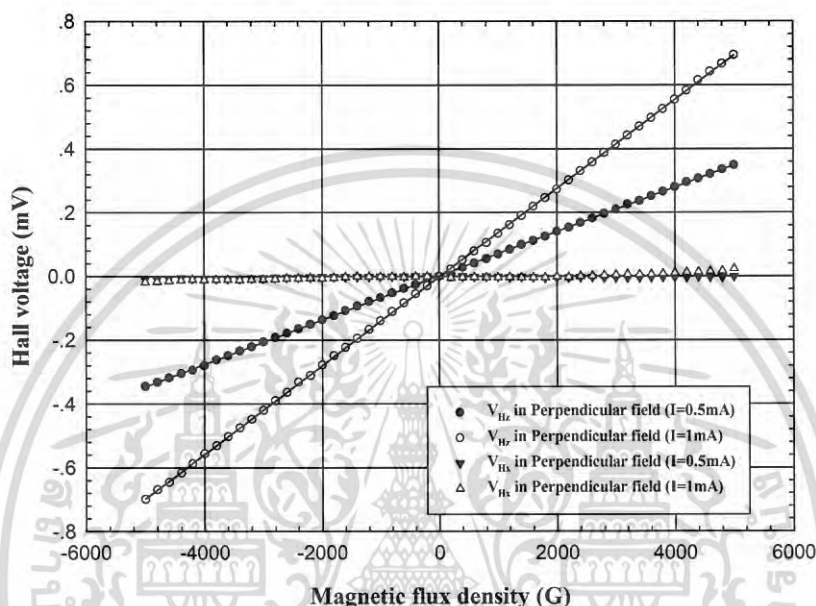
รูปที่ 4.11 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉาก (V_{Hz}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำการปรับเปลี่ยน แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัด โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการเชิงเส้นที่ (4.18) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.19) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000049x - 0.002731 \quad (4.18)$$

$$y = 0.000098x + 0.005962 \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรง ทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 0.049 และ 0.098 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ และกราฟยังแสดงให้เห็นถึงการไม่ตอบสนองในการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งขนาน (V_{Hx}) คือ มีค่าใกล้เคียงศูนย์ บ่งบอกถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทางเมื่อทำการวิเคราะห์ผลรวมกับการตอบสนองของฮอลล์ในแนวขนาน



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 3 ($W=300\mu\text{m}$ $S=40\mu\text{m}$)

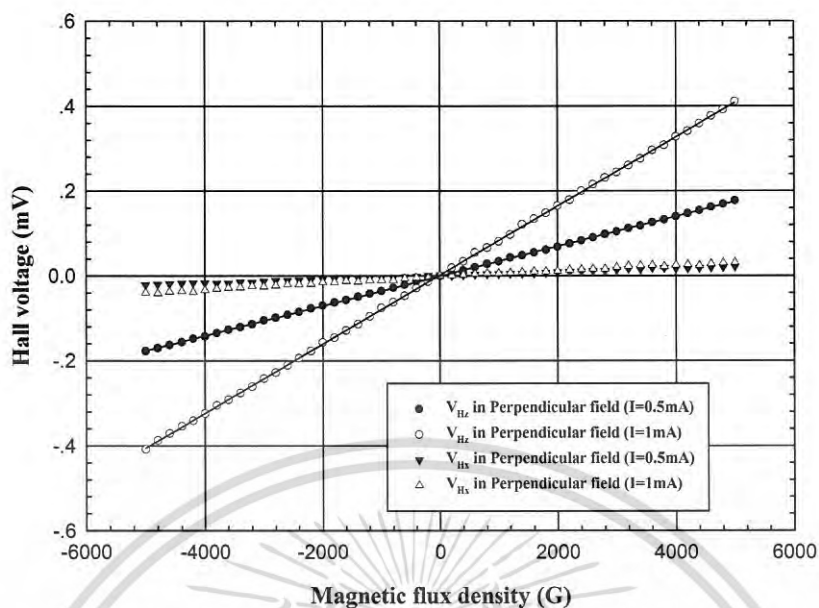
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉาก (V_{Hz}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำการปรับเปลี่ยนแสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัด โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการเชิงเส้นที่ (4.20) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.21) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000070x + 0.001465 \quad (4.20)$$

$$y = 0.000139x - 0.002250 \quad (4.21)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรง ทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 0.07 และ 0.138 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ และกราฟยังแสดงให้เห็นถึงการไม่ตอบสนองสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งขนาน (V_{Hx})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



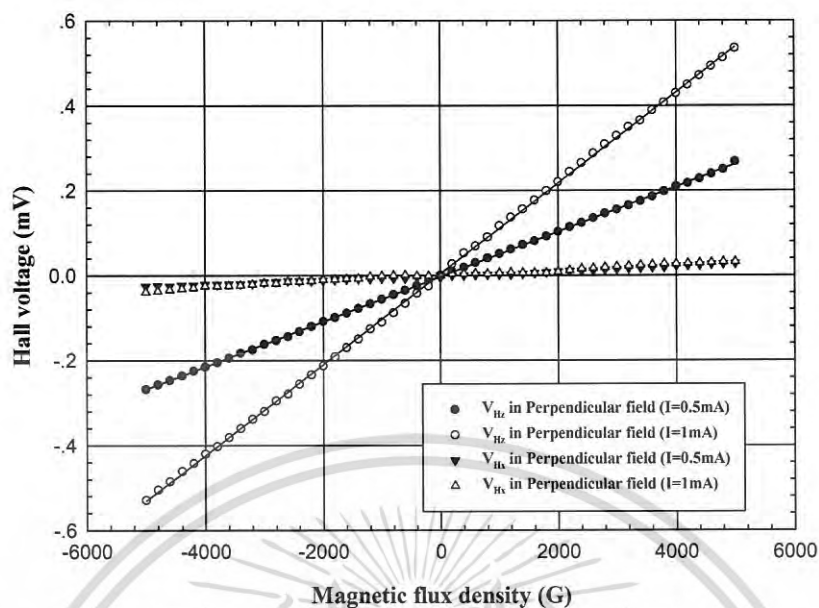
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 4 ($W=100\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$)

รูปที่ 4.13 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉาก (V_{Hz}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำการปรับเปลี่ยน แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัด โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการเชิงเส้นที่ (4.22) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.23) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000035x - 0.000654 \quad (4.22)$$

$$y = 0.000081x + 0.001846 \quad (4.23)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรงทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 0.035 และ 0.081 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ



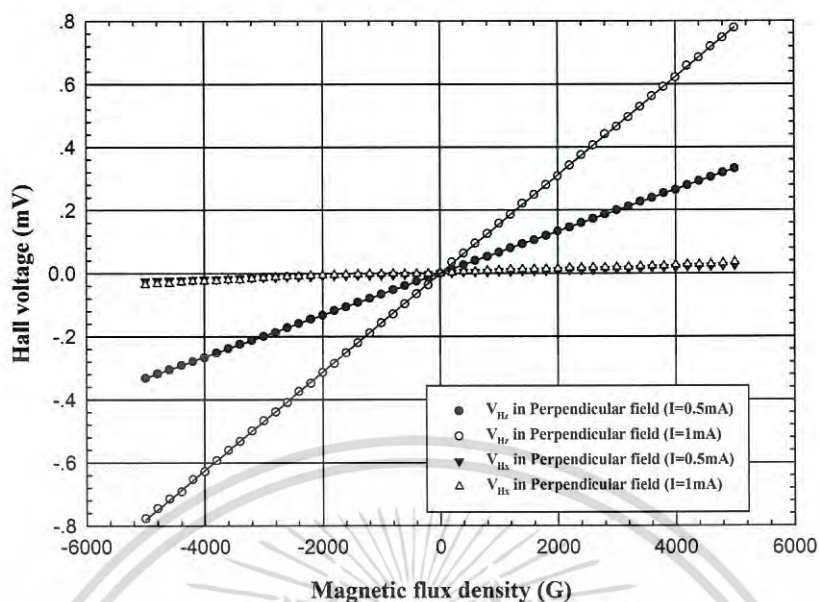
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 5 ($W=200\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$)

รูปที่ 4.14 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉาก (V_{Hz}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำการปรับเปลี่ยน แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัด โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการเชิงเส้นที่ (4.24) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.25) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000053x - 0.003054 \quad (4.24)$$

$$y = 0.000107x + 0.003692 \quad (4.25)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรงทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 0.053 และ 0.107 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 6 ($W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$)

สำหรับรูปที่ 4.15 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉาก (V_{Hx}) กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำการปรับเปลี่ยน แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัด โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการเชิงเส้นที่ (4.26) สำหรับกระแสที่จ่ายให้หัววัด 0.5 มิลลิแอมป์ และตามสมการที่ (4.27) เมื่อทำการจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์

$$y = 0.000070x + 0.001465 \quad (4.26)$$

$$y = 0.000139x - 0.002250 \quad (4.27)$$

โดยค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นตรงทั้งสองที่มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 0.070 และ 0.139 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ที่กระแส 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ



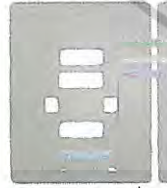

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กทั้ง 6 รูป แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัดทั้งสองทิศทางคือ ทิศพุ่งเข้าหาหัววัด ($+B_z$) และทิศพุ่งออกจากหัววัด ($-B_z$) จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่อ่านได้มีค่าตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ เมื่อสนามแม่เหล็กแนวขนานทิศพุ่งเข้าหาหัววัด ($+B_z$) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นบวกและจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากขึ้นแสดงให้เห็นในควอดรันต์ที่ 1 ของกราฟทั้ง 6 ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการสร้างสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากกระทำกับหัววัดในทิศพุ่งออก ($-B_z$) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นในควอดรันต์ที่ 3 อันเป็นผลเนื่องมาจากทิศของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงลอเลนซ์ที่กระทำกับประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ สมบัติดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของหัววัดที่สามารถระบุถึงขั้วของสนามแม่เหล็กซึ่งมีความสมมาตรกันทั้งสองทิศทาง ในขณะที่เดียวกัน โครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแนวขนานจะไม่มี การตอบสนอง



4.1.2.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์

ผลของการทดสอบทั้งหมดสามารถทำการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กทั้งสองแนวแกน เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการเลือกโครงสร้างของหัววัดที่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีที่สุดทั้งสองแนวแกนมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบ โดยพิจารณาถึงค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติแต่ละโครงสร้างดังตารางที่ 4.1 สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ 0.5 มิลลิแอมป์ และ ตารางที่ 4.2 สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ 1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ




ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความไวของฮอลล์ทั้งหกโครงสร้างที่กระแส 0.5 mA

Structure	Sensitivity (B_x)	Sensitivity (B_z)
 <p>โครงสร้างที่ 1 (W=100, S=40 μm)</p>	0.375 $\mu\text{V/G}$	0.036 $\mu\text{V/G}$
 <p>โครงสร้างที่ 2 (W=200, S=40 μm)</p>	0.370 $\mu\text{V/G}$	0.049 $\mu\text{V/G}$
 <p>โครงสร้างที่ 3 (W=300, S=40 μm)</p>	0.362 $\mu\text{V/G}$	0.070 $\mu\text{V/G}$
 <p>โครงสร้างที่ 4 (W=100, S=80 μm)</p>	0.389 $\mu\text{V/G}$	0.035 $\mu\text{V/G}$

ตารางที่ 4.1(ต่อ)




Structure	Sensitivity (B_x)	Sensitivity (B_z)
 <p>โครงสร้างที่ 5 (W=200, S=80 μm)</p>	0.385 $\mu\text{V/G}$	0.053 $\mu\text{V/G}$
 <p>โครงสร้างที่ 6 (W=300, S=80 μm)</p>	0.388 $\mu\text{V/G}$	0.070 $\mu\text{V/G}$

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความไวของฮอลล์ทั้งหกโครงสร้างที่กระแส 1 mA

Structure	Sensitivity (B_x)	Sensitivity (B_z)
 <p>โครงสร้างที่ 1 (W=100, S=40 μm)</p>	0.747 $\mu\text{V/G}$	0.074 $\mu\text{V/G}$
 <p>โครงสร้างที่ 2 (W=200, S=40 μm)</p>	0.739 $\mu\text{V/G}$	0.098 $\mu\text{V/G}$
 <p>โครงสร้างที่ 3 (W=300, S=40 μm)</p>	0.727 $\mu\text{V/G}$	0.138 $\mu\text{V/G}$

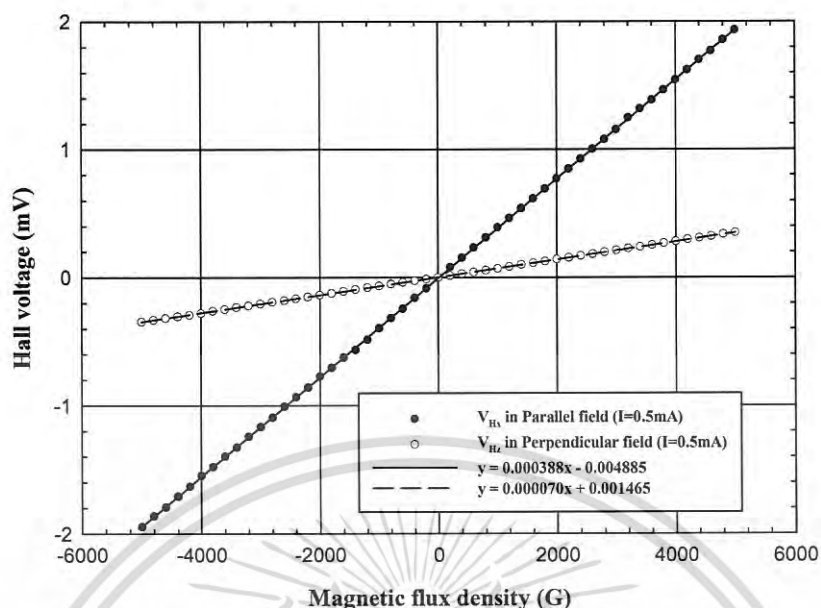
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2(ต่อ)

Structure	Sensitivity (B_x)	Sensitivity (B_z)
 โครงสร้างที่ 4 (W=100, S=80 μm)	0.745 $\mu\text{V/G}$	0.081 $\mu\text{V/G}$
 โครงสร้างที่ 5 (W=200, S=80 μm)	0.764 $\mu\text{V/G}$	0.107 $\mu\text{V/G}$
 โครงสร้างที่ 6 (W=300, S=80 μm)	0.746 $\mu\text{V/G}$	0.139 $\mu\text{V/G}$

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดทั้งสองมิติรวมทั้งหมด 6 โครงสร้าง เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของกระแสที่จ่ายให้กับหัววัดพบว่าทำให้ค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อทำการเพิ่มกระแสจาก 0.5 มิลลิแอมป์ เป็น 1 มิลลิแอมป์ สำหรับในส่วนผลของการทดสอบผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้ว(S) ของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวขนาน($\pm B_x$) จากการเปรียบเทียบค่าในตารางพบว่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่มี S=40 กับ S=80 ไมโครเมตร ซึ่งมีความไวของการตอบสนองในช่วง 0.362-0.389 $\mu\text{V/G}$ และ 0.727-0.764 $\mu\text{V/G}$ ที่กระแส 0.5 มิลลิแอมป์ กับ 1 มิลลิแอมป์ตามลำดับ และสำหรับการทดสอบผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า(W) ของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก ($\pm B_z$) จากการเปรียบเทียบค่าพบว่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่กระแส 0.5 มิลลิแอมป์ โครงสร้างระยะ W=100, 200 และ 300 ไมโครเมตร มีค่าความไวในการตอบสนองประมาณ 0.036 $\mu\text{V/G}$, 0.049 $\mu\text{V/G}$ และ 0.070 $\mu\text{V/G}$ ตามลำดับ และสำหรับที่กระแส 1 มิลลิแอมป์ มีค่าความไวในการตอบสนองประมาณ 0.074 $\mu\text{V/G}$, 0.098 $\mu\text{V/G}$ และ 0.138 $\mu\text{V/G}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นอิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า W ที่มีต่อค่าความไวในการตอบสนองอย่างเป็นสัดส่วนกันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่าง W/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

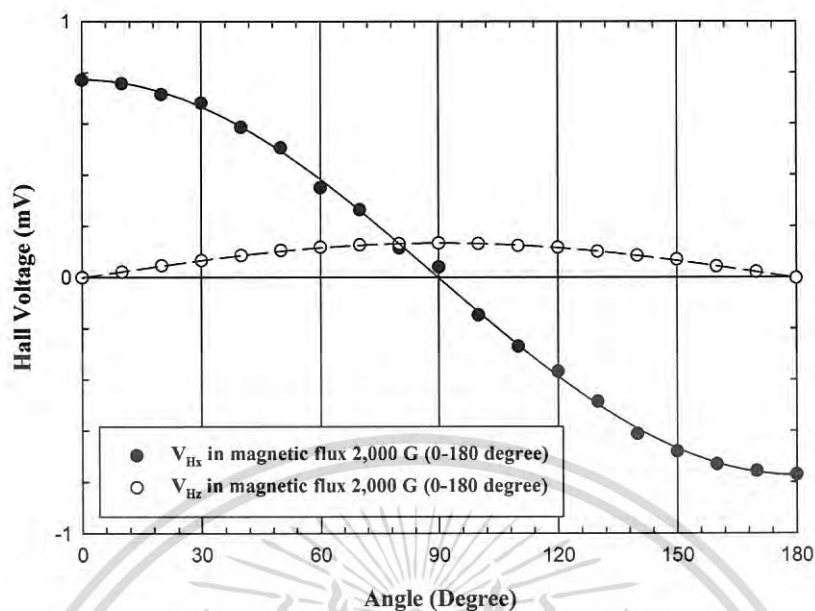


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากและแนวขนานของหัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 6 ($W=300\mu\text{m}$ $S=80\mu\text{m}$) ที่กระแส 0.5 มิลลิแอมป์

ดังนั้นจากตารางสรุปผลการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดทำให้สามารถเลือกหัววัดฮอลล์สองมิติเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งทำการพิจารณาจากค่าความไวในการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดคือ หัววัดฮอลล์สองมิติโครงสร้างที่ 6 ที่มีระยะ $W=300$ ไมโครเมตร และมี ระยะ $S=80$ ไมโครเมตร โดยมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากเท่ากับ $0.070 \mu\text{V/G}$ และค่าความไวเท่ากับ $0.388 \mu\text{V/G}$ ในแนวขนานที่กระแส 0.5 มิลลิแอมป์ โดยการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานมีค่าสูงกว่าแนวตั้งฉากอยู่ประมาณ 5.5 เท่า แสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.16 ซึ่งหัววัดที่ถูกเลือกนี้จะนำไปทดสอบร่วมกับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางต่อไป

4.1.3 ผลทดสอบสมบัติการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติที่ขึ้นกับมุม

เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการตอบสนองที่ขึ้นกับมุมระหว่างสนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดฮอลล์สองมิติ จึงทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวการตอบสนองคือ สนามแม่เหล็กแนวขนานกับแนวตั้งฉาก โดยการหมุนฮอลล์สองมิติภายใต้สนามแม่เหล็กคงที่ 2,000 เกาส์ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนที่มุมต่างๆ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ 0-180 องศา

จากกราฟพบว่า การตอบสนองของหัววัดทั้งสองแนวแกนมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด โดยลักษณะการตอบสนองของหัววัดในแนวตั้งฉาก (V_{Hz}) มีการเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันไซน์เมื่อเทียบกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ กล่าวคือ ขณะที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดที่มุม 0 องศา จะไม่มีแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ปรากฏขึ้น และเมื่อปรับให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับหัววัดทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด และจะมีค่าต่ำสุดอีกครั้งเมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุม 180 องศา แสดงความสัมพันธ์ดังกราฟเส้นประในรูป สำหรับในกรณีของการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแนวตั้งขนาน (V_{Hx}) จะมีค่าสูงสุดเมื่อสนามแม่เหล็กกระทำที่มุม 0 กับ 180 องศา และจะลดลงจนมีค่าน้อยที่สุดเมื่อสนามแม่เหล็กกระทำในทิศตั้งฉากกับหัววัดหรือที่ 90 องศา ทำให้เกิดการซัพเพลกันที่ 90 องศา ที่แสดงดังกราฟเส้นทึบดังรูปที่ 4.17 โดยสามารถอธิบายลักษณะการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานกับหัววัดที่ขึ้นกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ได้เป็นอย่างดี เมื่อทำการพิจารณาถึงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สูงสุดของการตอบสนองทั้งสองแนวแกนที่มีค่าไม่เท่ากันเป็นผลเนื่องมาจากการตอบสนองที่มีความแตกต่างกันถึง 5.5 เท่า ของหัววัด

4.1.4 การวิเคราะห์ผลสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของฮอลล์สองมิติ

การออกแบบและสร้างหัววัดฮอลล์สองมิติมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กได้สองมิติ โดยตั้งสมมุติฐานจากการรวมเอาโครงสร้างฮอลล์แบบพื้นฐานกับโครงสร้างฮอลล์แบบแนวตั้งเข้าไว้ด้วยกันในแนวระนาบ ดังนั้นในการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติจึงสามารถวิเคราะห์การตอบสนองโดยแบ่งเป็นสองกรณีตามแนวเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด คือ สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและสนามแม่เหล็กในแนวขนาน ซึ่งพิจารณาจากแรงลอเรนตซ์อันเป็นผลเนื่องจาก

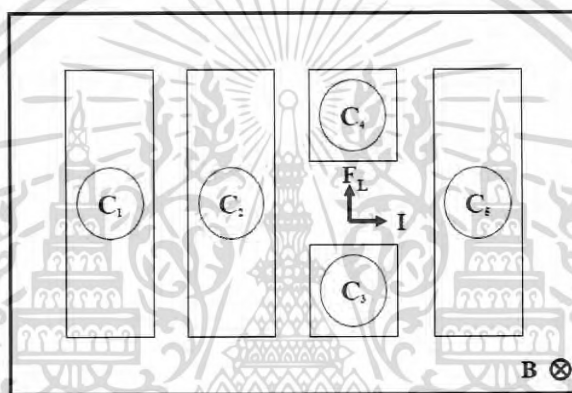
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ของกระแสและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์

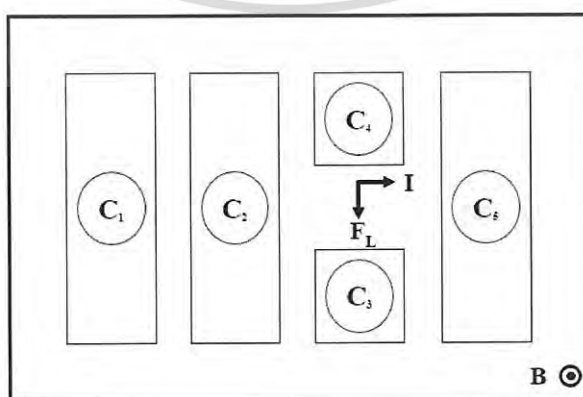
4.1.4.1 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากของหัววัดฮอลล์

ในการทดลองเมื่อสร้างสนามแม่เหล็กโดยเส้นแรงแม่เหล็กในแนวตั้งฉากทิศพุ่งเข้ากระทำกับหัววัดที่มีทางเดินของกระแสในแนวระนาบมีทิศจากขั้วไฟฟ้า C_2 ไปยังขั้วไฟฟ้า C_5 ผลการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงลอเรนตซ์ตามกฎมือขวา ผลของแรงลอเรนตซ์ผลักประจุโฮลให้เบี่ยงเบนไปยังขั้วไฟฟ้า C_4 เกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้ว C_4 กับ C_3 แสดงกลไกการเกิดปรากฏการณ์ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างฮอลล์เฟลตแบบพื้นฐาน ในกรณีนี้จะมีแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับหัววัดเกิดขึ้นมีศักย์ค่าเป็นบวก แต่จะไม่เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า C_1 กับ C_2 สำหรับโครงสร้างฮอลล์แนวตั้ง



รูปที่ 4.18 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์สองมิติ

ในทางตรงกันข้ามเมื่อสร้างสนามแม่เหล็กกระทำในแนวตั้งฉากทิศพุ่งออกจากหัววัด ผลการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงลอเรนตซ์ในทิศตรงกันข้ามกับกรณีแรก โดยแรงลอเรนตซ์ผลักประจุโฮลให้เบี่ยงเบนไปยังขั้วไฟฟ้า C_3 มากขึ้น เกิดศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบตกคร่อมระหว่างขั้ว C_4 กับ C_3 แสดงกลไกการเกิดปรากฏการณ์ดังรูปที่ 4.19

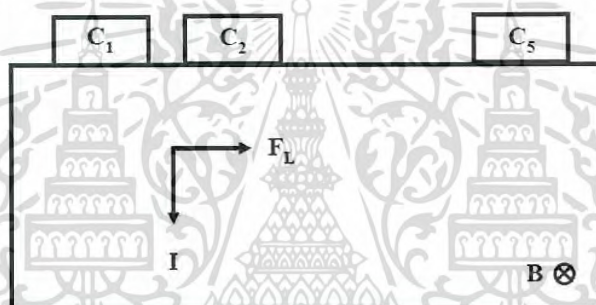


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.19 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์สองมิติ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดในทิศพุ่งเข้าและพุ่งออกในแนวตั้งฉาก ซึ่งมีความสมมาตรกันทั้งสองทิศทาง และไม่มีผลต่อการตอบสนอง (V_{Hx}) ต่อโครงสร้างฮอลล์แนวตั้ง ซึ่งแสดงถึงการตอบสนองที่มีความเป็นอิสระต่อกันระหว่างสนามแม่เหล็กสองแนวแกน

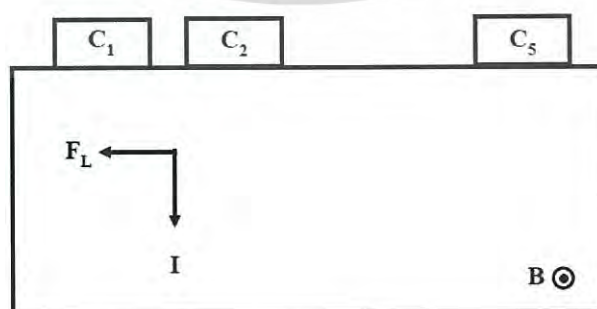
4.1.4.2 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานของฮอลล์

เมื่อทำการพิจารณาการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดในแนวขนาน โดยทำการจ่ายกระแสที่ขั้ว C_1 และ C_2 ผ่านตัวต้านทานไปยังขั้ว C_5 ผลของกระแสที่มีทิศทางการไหลในแนวตั้งเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวขนานทิศพุ่งเข้ากระทำกับโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งดังรูปที่ 4.20 ดังนั้นเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กจึงกระทำในตั้งฉากกับเวกเตอร์ของกระแสในอีกแนวแกน เกิดแรงลอเรนซ์ผลักประจุไปทางขั้วไฟฟ้า C_2 จึงเกิดศักย์ไฟฟ้าบวกตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า C_2 กับ C_1 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โครงสร้างฮอลล์สองมิติสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับหัววัดได้



รูปที่ 4.20 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานทิศพุ่งเข้าหาหัววัดฮอลล์สองมิติ

ในกรณีตรงกันข้าม เมื่อสนามแม่เหล็กแนวขนานมีทิศพุ่งออกกระทำกับโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งดังรูปที่ 4.21 ผลของทิศสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับกรณีแรก ผลทำให้เกิดการผลักประจุไปทางขั้วไฟฟ้า C_1 มากขึ้น จึงเกิดศักย์ไฟฟ้าลบตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า C_2 กับ C_1



รูปที่ 4.21 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานทิศพุ่งออกจากหัววัดฮอลล์สองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากผลการทดสอบสมบัติในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติ แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของหัววัดที่ได้ทำการสร้างขึ้นประกอบด้วย 1. หัววัดฮอลล์สองมิติที่ได้ทำการสร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแม่เหล็กได้ทั้งสองมิติ 2. หัววัดโครงสร้างต่างๆ ซึ่งมีระยะขั้วสำหรับการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉาก (V_{Hz}) ที่แตกต่างกันคือ 100, 200 และ 300 ไมโครเมตรตามลำดับ ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉาก (V_{Hz}) ส่วนหนึ่งได้รับอิทธิพลมาจากผลของการออกแบบสร้างระยะของขั้วไฟฟ้า โดยค่าความไวจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราส่วนของระยะ W/L ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างที่กว้างขึ้นด้วย โดยสามารถสรุปถึงค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองทิศทางของหัววัดทั้งหมด 6 โครงสร้างได้ตามตารางที่ 4.1 และสำหรับผลความแตกต่างของระยะขั้วไฟฟ้า S ที่ 40 และ 80 ไมโครเมตร สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวขนาน (V_{Hx}) เกิดความแตกต่างของค่าความไวในการตอบสนองเพียงเล็กน้อยเนื่องจากระยะการไหลของกระแสในแนวตั้งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับระยะ S ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์น้อยมาก 3. จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติสำหรับการระบุถึงขั้วแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดที่พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มข้นแม่เหล็กในควอดรันต์ที่ 1 และ 3 โดยทั้งสองทิศทางมีการตอบสนองที่สมมาตรกัน 4. การเพิ่มปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับหัววัดส่งผลให้ได้ค่าความไวในการตอบสนองที่สูงขึ้นด้วย โดยแสดงการเปรียบเทียบตามตารางที่ 4.1 และ 4.2 และ 5. หัววัดฮอลล์สองมิติมีสมบัติที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กซึ่งเปลี่ยนแปลงกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์

4.2 การประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์สองมิติสำหรับการวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

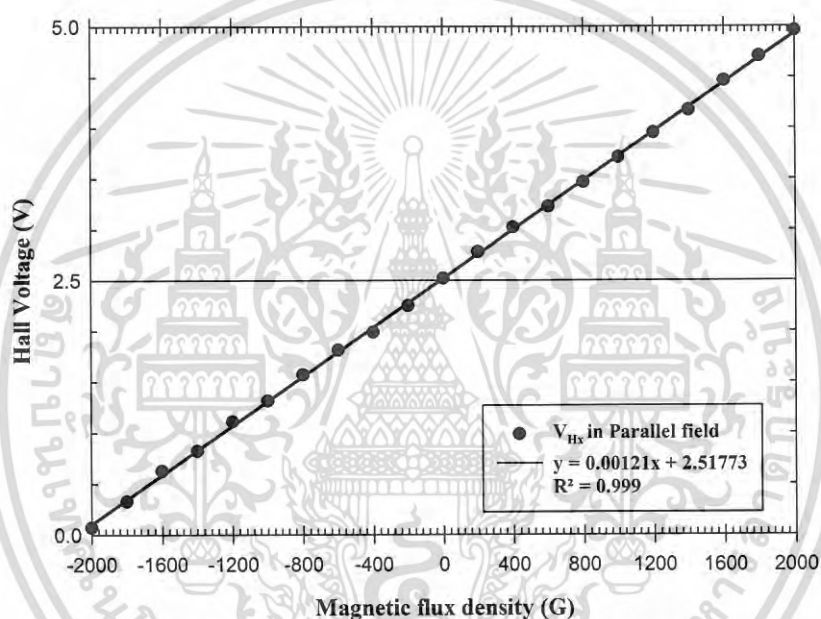
การนำหัววัดฮอลล์แบบสองมิติที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางให้มีความเหมาะสมนั้น หลังจากทดสอบและทำการวิเคราะห์สมบัติในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ได้สร้างขึ้น ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการตอบสนองของหัววัดและข้อจำกัดในการทำงานอย่างครบถ้วนแล้ว ในขั้นตอนต่อมาจึงทำการออกแบบระบบเพื่อการประยุกต์ใช้งานหัววัดฮอลล์สำหรับใช้ในการวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งระบบของเครื่องมือวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบนี้มีส่วนสำคัญประกอบด้วย 1. หัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์แบบสองมิติ 2. ส่วนของวงจรปรับปรุงสัญญาณ 3. ส่วนการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และส่วนของการประมวลผลและคำนวณผลด้วยโปรแกรมแลบวิว ดังนั้นเพื่อให้ระบบการวัดมีความถูกต้องจึงทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลถึงการทำงานส่วนประกอบต่างๆของเครื่องมือวัด

4.2.1 ผลทดสอบการปรับปรุงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติ

การใช้เทคนิคการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทางมีเงื่อนไขสำคัญคือการตอบสนองของสองแนวแกนต้องมีความเท่าเทียมกัน และมีการตอบสนองเป็นฟังก์ชันไซน์และโคไซน์โดยสมบูรณ์ ดังนั้นหลังจากการวิเคราะห์ผลและทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติทั้งหมด 6 โครงสร้าง จึงได้ทำการเลือกเอาหัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 6 เพื่อมาประยุกต์ใช้งานซึ่งมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดีของทั้งสองแนวแกน แต่เนื่องจากสัญญาณการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนที่

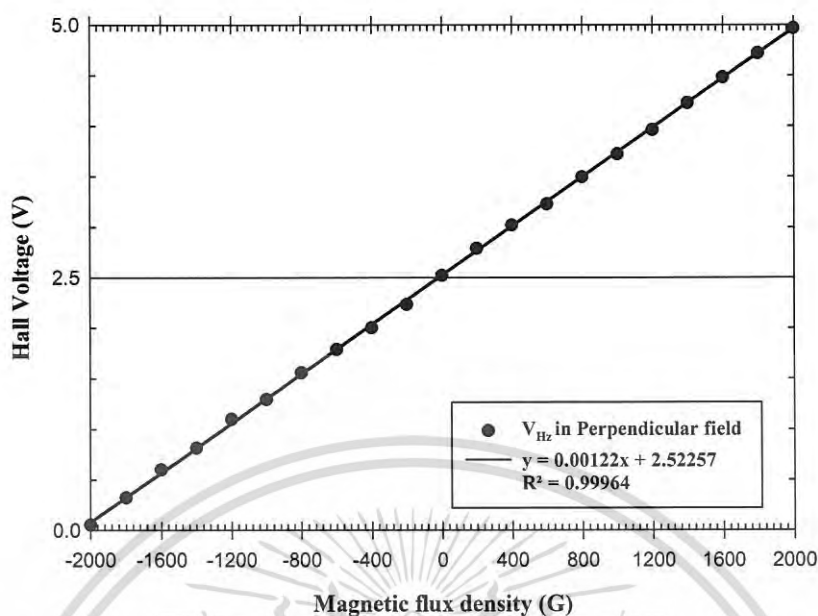
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มีขนาดเล็กมากอีกทั้งยังมีค่าความไวในการตอบสนองที่ไม่เท่าเทียมกัน จึงมีความจำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณรวมถึงปรับระดับสัญญาณให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของเทคนิคการวัด โดยวงจรรขยายที่นำมาใช้ขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คือ วงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์ ดังนั้นในการทดลองได้ทำการออกแบบวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์เป็นสองชุดโดยมีอัตราเกำลังขยายที่แตกต่างกันสำหรับการตอบสนองสองแนวแกน เพื่อให้สัญญาณทั้งสองแนวแกนมีค่าความไวในการตอบสนองเท่าเทียมกันมากที่สุด ซึ่งวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์ที่ได้ออกแบบขึ้นทำการปรับระดับสัญญาณออฟเซตมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ($V_s = 5$ โวลต์) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก ($B = 0$) เพื่อให้ส่วนของการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลสามารถอ่านค่าการตอบสนองได้ทั้งทิศพุ่งออกและพุ่งเข้าหาหัววัด โดยผลการทดสอบการปรับปรุงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สองมิติแสดงดังรูปที่ 4.22 สำหรับการตอบสนองแนวตั้งฉาก และรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก $-2,000$ ถึง $2,000$ เกาส์

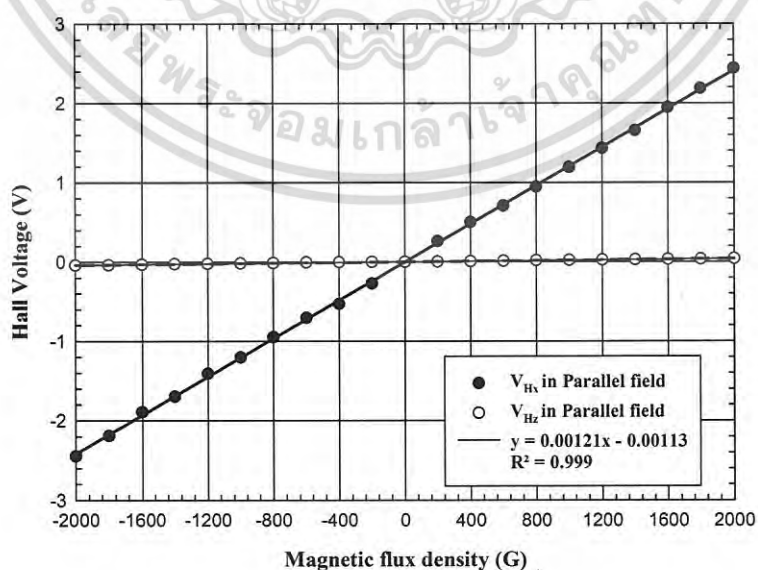
จากกราฟในรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวขนานที่กระทำกับหัววัดในทิศทางพุ่งออกทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นลบแสดงในควอรันต์ที่ 3 ของกราฟ และมีค่าเป็นบวกเมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในทิศทางพุ่งเข้าแสดงค่าการตอบสนองในควอรันต์ที่ 1 ของกราฟ และยังคงแสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กมากกระทำค่าแรงดันไฟฟ้าออฟเซตจะมีค่าประมาณ 2.517730 โวลต์



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_z) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก -2,000 ถึง 2,000 เกาส์

สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากทั้งในทิศทางเข้าหาและทิศทางออกจากหัววัดแสดงดังรูปที่ 4.23 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าออฟเซตมีค่าประมาณ 2.52257 โวลต์

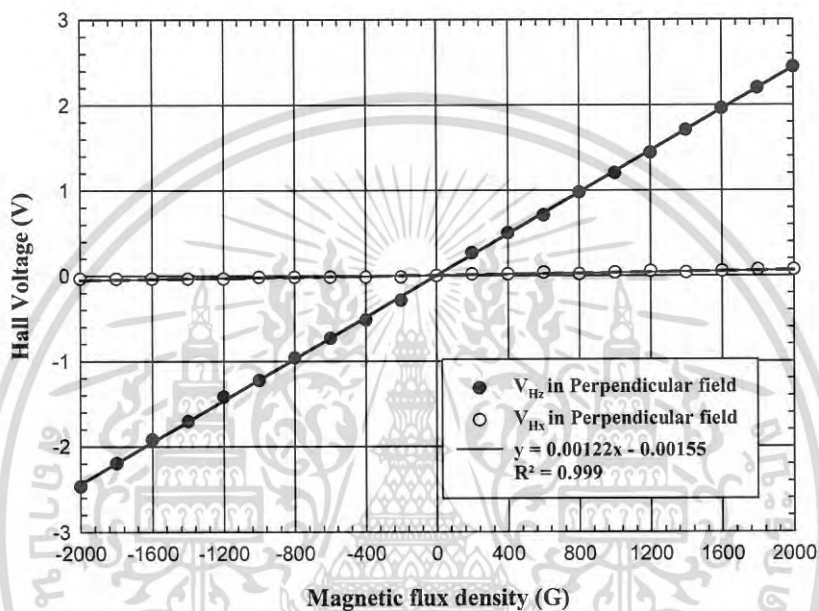
เมื่อทำการลบค่าออฟเซตของวงจรขยายทั้งสองออก แล้วทำการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ถูกขยายกับความเข้มสนามแม่เหล็กทั้งสองแนวแกนสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 สำหรับสนามแม่เหล็กในแนวขนานและแนวตั้งฉากตามลำดับ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_x) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก -2,000 ถึง 2,000 เกาส์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปเผยแพร่บนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการขยายสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกน โดยในการตอบสนองแนวขนานใช้กำลังขยายแรงดันไฟฟ้าประมาณ 3,100 เท่า ที่มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นอธิบายได้ตามสมการที่ (4.28) โดยมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 1.21 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์

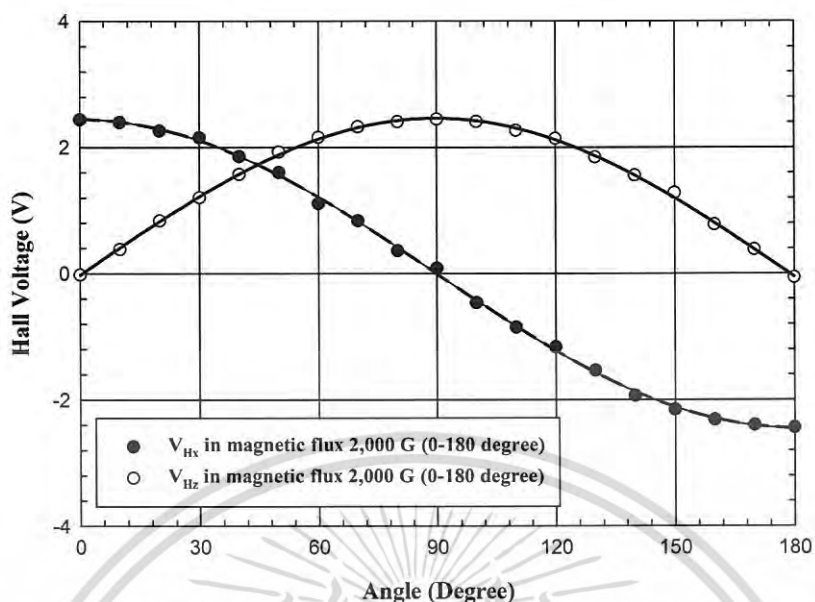
$$y = 0.00121x + 0.00113 \quad (4.28)$$



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_z) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก -2,000 ถึง 2,000 เกาส์

และสำหรับการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แนวตั้งฉากใช้กำลังขยายประมาณ 17,400 เท่า ทำให้ค่าความไวในการตอบสนองสูงขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.22 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ สมการที่ (4.29)

$$y = 0.00122x + 0.00155 \quad (4.29)$$



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มุม 0-180 องศา ในสนามแม่เหล็ก 2,000 เกาส์

นอกจากทำการทดสอบค่าความไวที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านวงจรปรับปรุงสัญญาณแล้ว หัววัดฮอลล์สองมิติยังถูกทดสอบระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับมุม โดยทำการทดสอบเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ 0-180 องศา ภายใต้สนามแม่เหล็ก 2,000 เกาส์ แสดงการตอบสนองดังรูปที่ 4.26 จากรูปแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันเมื่อทำการเปรียบเทียบระดับสัญญาณที่สูงที่สุดของแต่ละแนวแกนการตอบสนอง

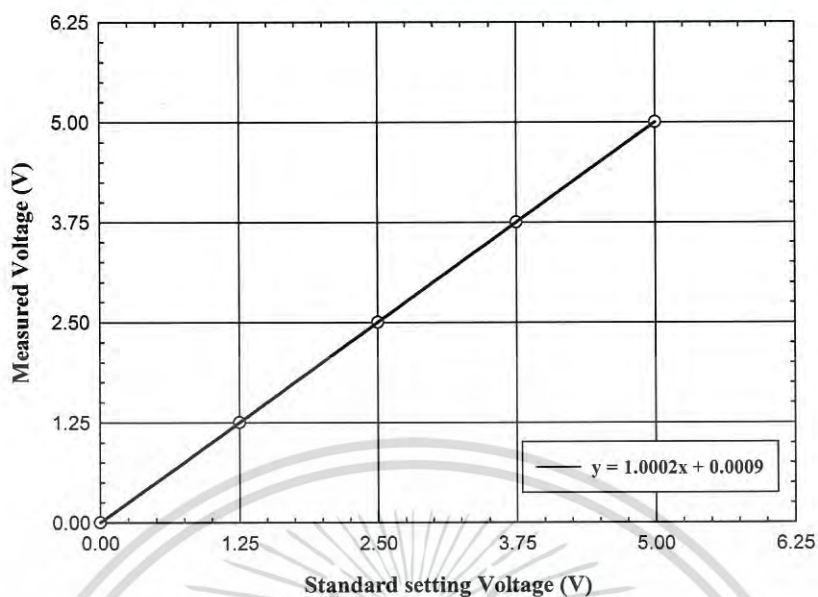
ด้วยค่าความไวของการตอบสนองทั้งสองแนวแกนแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่มีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นวงจรปรับปรุงสัญญาณที่ออกแบบขึ้นจึงมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับเงื่อนไขของการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถสร้างเป็นระบบวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแนวระนาบที่มีความแม่นยำสูงได้ต่อไป

4.2.2 ผลทดสอบระบบอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า

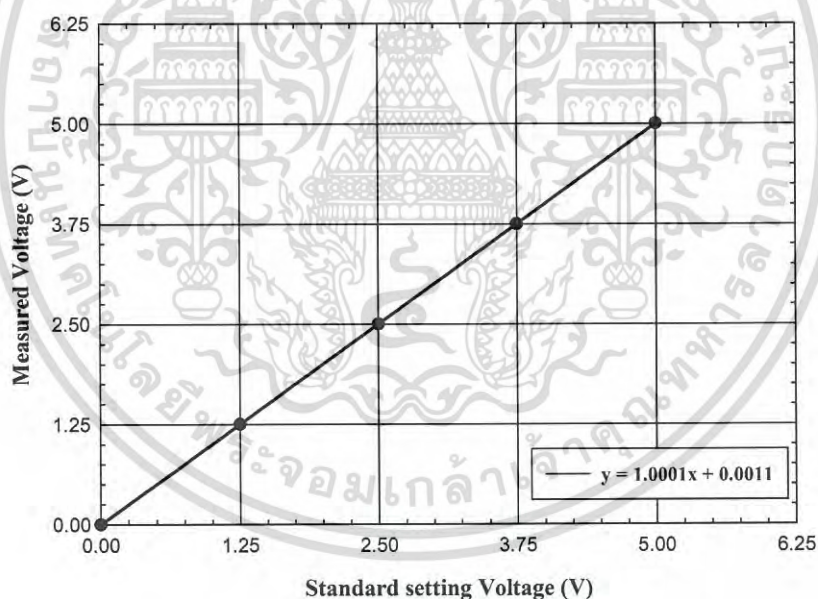
ส่วนประกอบสำคัญสำหรับการสร้างระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางนั้น คือส่วนของระบบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ส่วนของการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียด 24 บิต ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 สำหรับการประมวลผลค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีด้วยกัน 2 บอร์ด โดยมีความละเอียดในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.298 ไมโครโวลต์ต่อบิต

ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความถูกต้องในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน คือ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke รุ่น 8808A ซึ่งทำการสอบเทียบแบบห้าจุดที่ 0, 1.25, 2.5, 3.75 และ 5 โวลต์ โดยผลแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.27 และ 4.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 การทดสอบอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดที่ 1



รูปที่ 4.28 การทดสอบอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดที่ 2

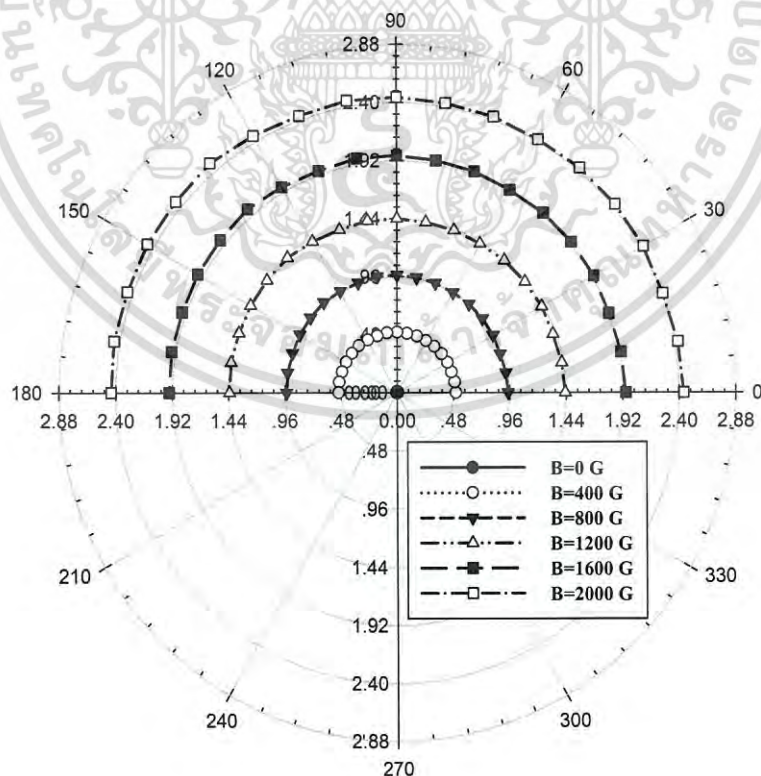
ผลการทดสอบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของบอร์ดแปลงสัญญาณแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของการอ่านค่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามาตรฐานกับค่าจากบอร์ดแปลงสัญญาณเพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์บอร์ดที่ 1 อ่านได้ แสดงในรูปที่ 4.27 โดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตามสมการ $y=0.0009+1.0002x$ ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ 1.0002 และสำหรับบอร์ดแปลงสัญญาณเพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์บอร์ดที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ดังกราฟในรูปที่ 4.28 มีสมการเชิงเส้นเป็น $y=0.0011+1.0001x$ ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ 1.0001 เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการพิจารณาถึงค่าความชันของทั้งสองบอร์ดมีค่าความชันใกล้เคียง 1 แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า และสามารถอ่านค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จากหัววัดได้อย่างถูกต้อง

4.2.3 ผลทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

เนื้อหาสำหรับหัวข้อนี้จะแสดงถึงการทดสอบสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยการนำเอาสมบัติการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองมิติมาคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด ซึ่งจากการวิเคราะห์สมบัติการตอบสนองต่อมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดชี้ให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ และสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของโครงสร้างฮอลล์เพลตเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ ซึ่งเป็นไปตามหลักตรีโกณมิติที่สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้ดังสมการที่ (2.44) ในการทดลองจึงทำการทดสอบโดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองหลังจากการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด ซึ่งทำการปรับหมุนตำแหน่งของหัววัดฮอลล์ที่มุม 0-180 องศา ภายใต้อสนามแม่เหล็กคงที่ทั้งหมด 6 ค่า คือ 0, 400, 800, 1,200, 1,600 และ 2,000 เกาส์ เพื่อทำการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ โดยผลการทดลองแสดงในรูปแบบของกราฟวงกลม(Polar curve) ดังรูปที่ 4.29 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ที่คำนวณจากสมการที่ (2.44) เทียบกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด



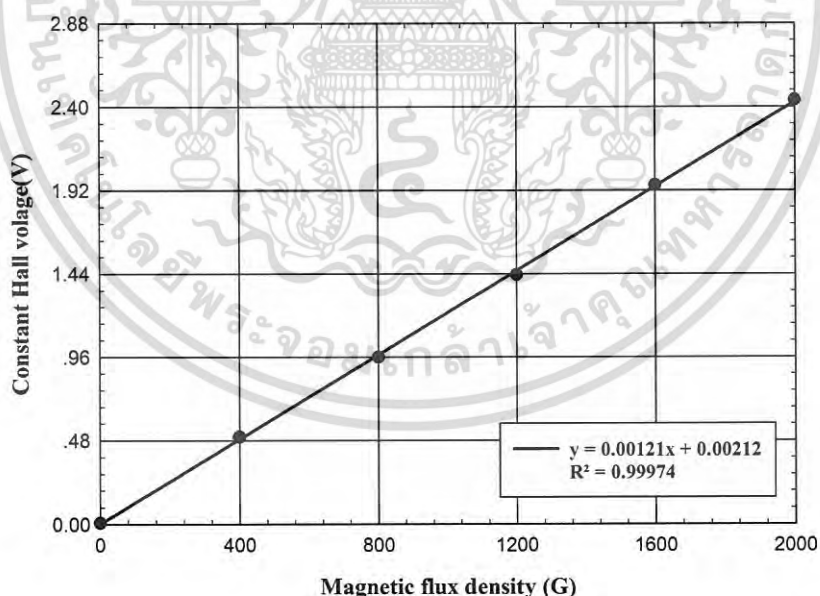
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟวงกลมดังรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามมุม 0-180 องศา โดยทำการคำนวณจากสัญญาณเอาต์พุทของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองมิติตามสมการที่ (2.44) ด้วยโปรแกรมแลบวิว ภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็ก 0, 400, 800, 1,200, 1,600 และ 2,000 เกาส์ ทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่เฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ภายใต้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

Magnetic Flux Density (G)	Constant Hall voltage (V)
0	0.0077
400	0.5002
800	0.9592
1,200	1.4347
1,600	1.9509
2,000	2.4391

ผลจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้ดังตารางนี้สามารถนำมาหาค่าความไวในการตอบสนองของระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่นับกับทิศทางได้ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่เฉลี่ยภายใต้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

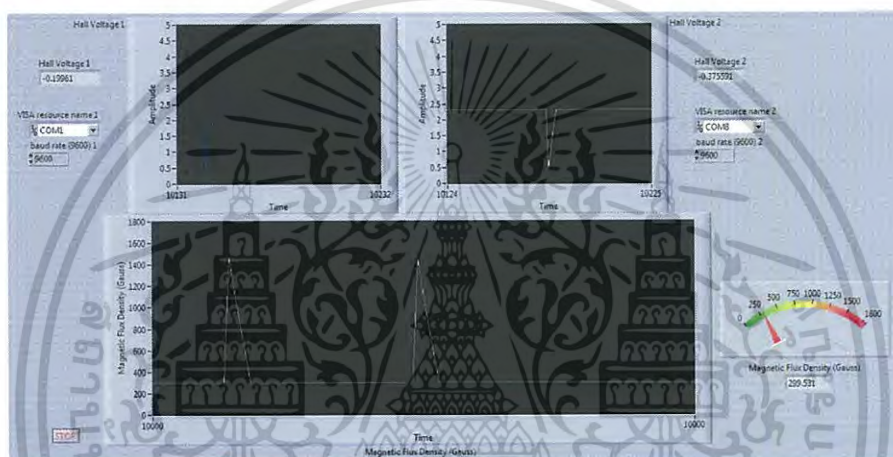
จากกราฟในรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นไปตามสมการที่ (4.30) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.99974 ซึ่งแสดงถึงความเป็นเชิงเส้นของระบบสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = 0.00121x + 0.00212 \quad (4.30)$$

ด้วยความเป็นเชิงเส้นของเทคนิคการวัดที่ใช้ร่วมกับหัววัดนี้ สามารถนำเอาสมการเชิงเส้นที่ได้ไปประมวลผลและคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบได้ต่อไป

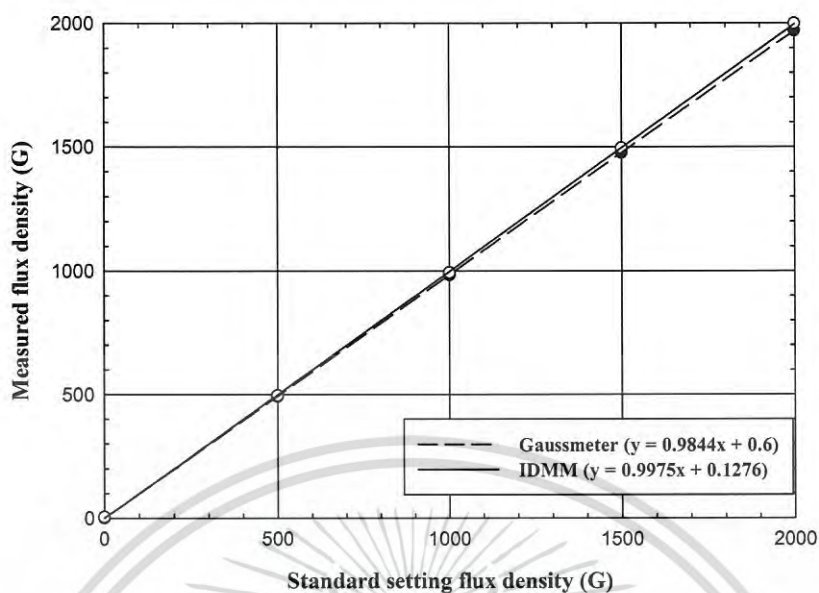
4.2.4 ผลทดสอบระบบการวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

จากผลที่ได้จากการทดสอบการตอบสนองของระบบวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง สามารถใช้สมการเชิงเส้นที่ (4.30) สำหรับคำนวณและแสดงค่าความเข้มข้นแม่เหล็กด้วยโปรแกรมแลบวิวแสดงส่วนของโปรแกรมดังรูปที่ 4.31

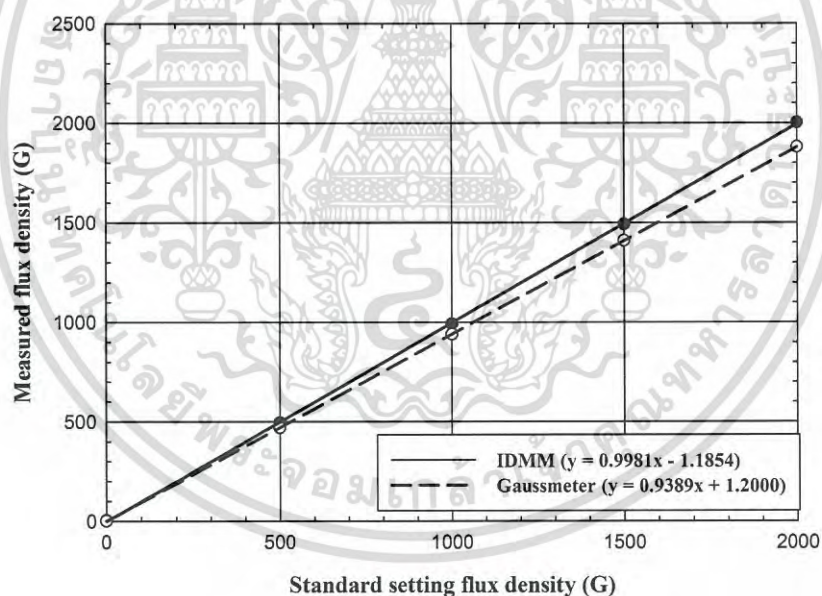


รูปที่ 4.31 โปรแกรมแลบวิวสำหรับการคำนวณและแสดงผล

จากรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่วัดได้ในเงื่อนไขของมุมต่างๆ กับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กจริงที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.32, 4.33, 4.34 และ 4.35 ตามลำดับ ซึ่งสามารถทำการพิจารณาความแม่นยำของระบบการวัดของค่าความชันจากสมการเชิงเส้นของแต่ละกรณี โดยความชันที่ได้ควรมีค่าเท่ากับ 1 ผลที่ได้แสดงความแม่นยำของระบบการวัดที่ได้สร้างขึ้น (IDMM: Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique) โดยมีค่าเท่ากับ 0.9975, 0.9981, 0.9993 และ 0.9998 แต่สำหรับกรณีที่ทำกรวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน เกาส์มิเตอร์(FWBELL 5170) ในกรณีที่ทำมุมเอียงเหมือนกับกรณีแรกจะมีค่าเท่ากับ 0.9844, 0.9389, 0.8656 และ 0.7656 ที่มุม 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ

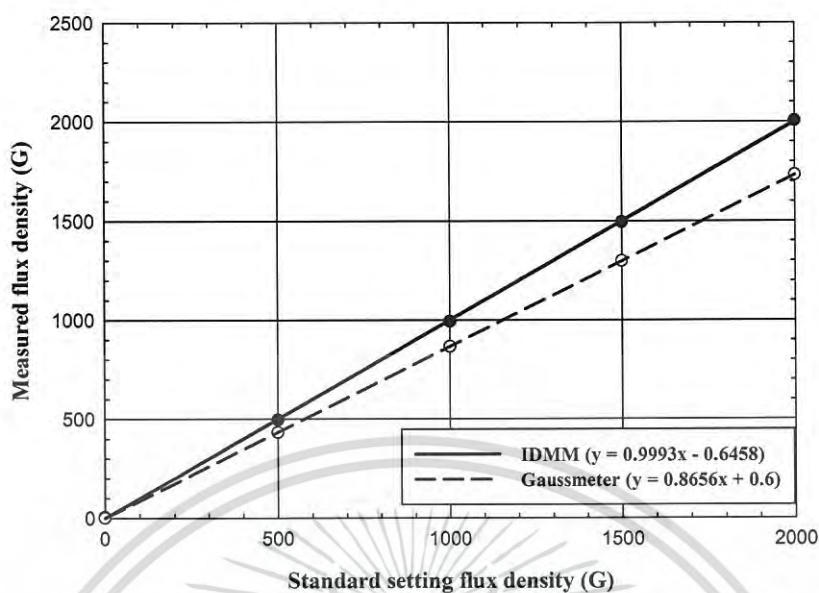


รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรณีหัววัดทำมุมเอียง 10 องศา

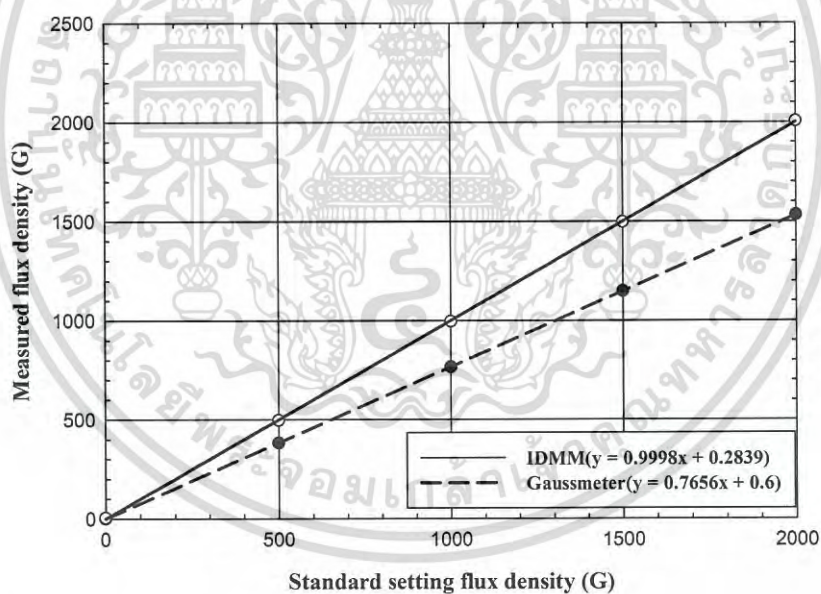


รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรณีหัววัดทำมุมเอียง 20 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรณีหัววัดทำมุมเอียง 30 องศา



รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกรณีหัววัดทำมุมเอียง 40 องศา

ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติ โดยมุมเอียงที่เกิดจากการวางหัววัดไม่ส่งผลกระทบต่อค่าในการวัดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องมือมาตรฐานที่ทำการทดสอบในเงื่อนไขเดียวกัน นอกจากนี้ยังสามารถสรุปการเปรียบเทียบความแม่นยำที่ได้จากการวัดที่แสดงดังตารางที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กที่มุม 10 องศา

No.	Magnetic flux density(G)				
	0%	25%	50%	75%	100%
IDMM	4.6148	496.1743	993.2834	1495.1987	1998.8386
Gauss	1	492	984	1477	1969
Actual	0	500	1000	1500	2000
Deviation(IDMM)	4.6148	3.8257	6.7166	4.8013	1.1614
Deviation(Gauss)	1.0000	8.0000	16.0000	23.0000	31.0000
IDMM Error (%)	-	0.7651	0.6717	0.3201	0.0581
Gauss Error (%)	-	1.6000	1.6000	1.5333	1.5500

ตารางที่ 4.5 ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กที่มุม 20 องศา

No.	Magnetic flux density(G)				
	0%	25%	50%	75%	100%
IDMM	4.8809	495.1055	991.1778	1491.5476	2001.9584
Gauss	2	469	941	1409	1879
Actual	0	500	1000	1500	2000
Deviation(IDMM)	4.8809	4.8945	8.8222	8.4524	1.9584
Deviation(Gauss)	2.0000	31.0000	59.0000	91.0000	121.0000
IDMM Error (%)	-	0.9789	0.8822	0.5635	0.0979
Gauss Error (%)	-	6.2000	5.9000	6.0667	6.0500

ตารางที่ 4.6 ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กที่มุม 30 องศา

No.	Magnetic flux density(G)				
	0%	25%	50%	75%	100%
IDMM	5.0607	496.2099	993.4297	1494.3532	2004.2605
Gauss	1	433	869	1300	1733
Actual	0	500	1000	1500	2000
Deviation(IDMM)	5.0607	3.7901	6.5703	5.6468	4.2605
Deviation(Gauss)	1.0000	67.0000	131.0000	200.0000	267.0000
IDMM Error (%)	-	0.7580	0.6570	0.3765	0.2130
Gauss Error (%)	-	13.4000	13.1000	13.3333	13.3500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลของการทดสอบความแม่นยำการวัดสนามแม่เหล็กที่มุม 40 องศา

No.	Magnetic flux density(G)				
	0%	25%	50%	75%	100%
IDMM	5.2198	495.1055	995.869	1497.2163	2004.9083
Gauss	1	383	769	1152	1528
Actual	0	500	1000	1500	2000
Deviation(IDMM)	5.2198	4.8945	4.1310	2.7837	4.9083
Deviation(Gauss)	1.0000	117.0000	231.0000	348.0000	472.0000
IDMM Error (%)	-	0.9789	0.4131	0.1856	0.2454
Gauss Error (%)	-	23.4000	23.1000	23.2000	23.6000

จากตารางที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบความแม่นยำของการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยมีเงื่อนไขในการวัดจากการวางตำแหน่งของหัววัดให้ทำมุมกับเส้นแรงแม่เหล็ก 10, 20, 30 และ 40 องศา ตามลำดับ โดยการทดสอบจะทำการสอบเทียบแบบหาค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด ผลการทดลองในเงื่อนไขของการทำมุมเอียง 10 องศาพบว่า ค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error percentage) สูงสุดที่ 0.76 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเครื่องวัดมาตรฐานมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 1.6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบในเงื่อนไขของการทำมุมเอียงระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกระทำกับหัววัดที่ 20 องศาพบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.98 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการวัดในเงื่อนไขเดียวกันโดยใช้เครื่องวัดมาตรฐานมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 6.05 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบในเงื่อนไขของการทำมุมเอียงระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกระทำกับหัววัดที่ 30 องศาพบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.76 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการวัดในเงื่อนไขเดียวกันโดยใช้เครื่องวัดมาตรฐานมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 13.4 เปอร์เซ็นต์ และในเงื่อนไขสุดท้ายเป็นการทดสอบในเงื่อนไขของการทำมุมเอียงระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกระทำกับหัววัดที่ 40 องศา พบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.9789 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการวัดในเงื่อนไขเดียวกันโดยใช้เครื่องวัดมาตรฐานมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 23.6 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างคุณสมบัติของหัววัดฮอลล์สองมิติที่สร้างขึ้นกับเทคนิคการวัด ที่สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกันสำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางซึ่งช่วยลดข้อจำกัดในส่วนของมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดได้อย่างเหมาะสม และสามารถนำไปใช้ในงานวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ต้องการความแม่นยำสูงได้

และสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ด้วยโครงสร้างของหัววัดฮอลล์มีลักษณะเฉพาะตัวเป็นข้อสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะ โดยทำการออกแบบและสร้างให้รอยต่อมีสมบัติความเป็นโอห์มมิก สำหรับทำการป้อนกระแสและวัดสัญญาณไฟฟ้าในการตอบสนองที่มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นที่ดี ดังนั้นในขั้นแรกโครงสร้างของหัววัดฮอลล์สองมิติถูกนำไปทดสอบสมบัติความเป็นโอห์มมิกของข้อไฟฟ้าทั้งห้าข้อ โดยทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลแสดงให้เห็นถึงการแปรผันของกระแสและแรงดันไฟฟ้าอย่างเป็นเชิงเส้น โดยกราฟความสัมพันธ์สามารถหาค่าความต้านทานของชั้นสารที่ขึ้นกับระยะและขนาดพื้นที่ของข้อไฟฟ้า ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้างี้ที่กล่าวมาแสดงให้เห็นถึงความเป็นโอห์มมิกของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่ถูกอธิบายตามกฎของโอห์มได้เป็นอย่างดี โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองของหัววัดที่ได้ทำการออกแบบขึ้น

สำหรับการทดสอบความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดทั้งสนามแม่เหล็กในแนวขนานและแนวตั้งฉาก โดยหัววัดที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 6 โครงสร้างซึ่งมีระยะห่างระหว่างข้อแตกต่างกันหกกรณี โดยมีเงื่อนไขปริมาณของกระแสที่จ่ายให้กับหัววัดที่ 0.5 และ 1 มิลลิแอมป์ โดยทำการปรับความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง -5,000 ถึง 5,000 เกาส์ ผลการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองมิติต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กถูกแสดงดังกราฟความสัมพันธ์ในหัวข้อที่ 4.1.2.1 และหัวข้อ 4.1.2.2 ของบทที่ 4 ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ทั้งหมดสามารถสรุปเกี่ยวกับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์สองมิติที่ได้สร้างขึ้นเป็น 4 ประเด็นหลัก คือ ประเด็นที่ 1 หัววัดที่ได้สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ทั้งในแนวขนานและตั้งฉากกล่าวคือ เมื่อทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hx}) ของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในแนวขนานจะปรากฏแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตกคร่อมข้อไฟฟ้าและจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hz}) สำหรับโครงสร้างฮอลล์เพลตพื้นฐาน ในทางกลับกันเมื่อทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{Hz}) ของฮอลล์เพลตภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก ปรากฏแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตกคร่อมข้อไฟฟ้าขึ้นและจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเช่นกัน แต่สำหรับที่ขั้วการตอบสนองของโครงสร้างฮอลล์แนวตั้งจะไม่มีการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า (V_{Hx}) เกิดขึ้น ประเด็นที่ 2 หัววัดฮอลล์สองมิติสามารถตอบสนองต่อทิศทางของสนามแม่เหล็กคือทิศพุ่งออกจากหัววัด (-B) และทิศพุ่งเข้าหาหัววัด (+B) ทั้งในแนวตั้งฉากและแนวขนาน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากควอดรนต์ที่ 1 และ 3 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ประเด็นที่ 3 การเพิ่มกระแสจาก 0.5 mA เป็น 1mA ส่งผลให้ค่าความไวมีค่ามากขึ้นเป็นสองเท่าซึ่งมีความสอดคล้องกับอัตราส่วนของกระแสที่เพิ่มขึ้น ประเด็นที่ 4 ค่าระยะห่างระหว่างข้อ (W) ที่ 100, 200 และ 300 μm มีอิทธิพลต่อค่าความไวในการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hz}) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความไวจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ W/L ที่ระยะ W มากขึ้นทำให้ค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มสูงขึ้นด้วย ส่วนการเปลี่ยนแปลงระยะห่างข้อไฟฟ้า S เมื่อระยะเพิ่มมากขึ้นจาก 40 μm เป็น 80 μm ทำให้ผลของค่าความไวในการตอบสนองสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อนำสมบัติการตอบสนองของหัววัดมาทำการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 เพื่อทำการเลือกเอาหัววัดไปประยุกต์ใช้งานพบว่า หัววัดฮอลล์โครงสร้างที่ 6 ที่มีระยะห่างของข้อไฟฟ้า S=80 และ W=300 μm ซึ่งมีความเหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความไวในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวนานกับแนวตั้งฉากเท่ากับ $0.388 \mu\text{V/G}$ และ $0.070 \mu\text{V/G}$ ตามลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองของสองแนวแกนมีความแตกต่างกัน 5.5 เท่าโดยประมาณ

หนึ่งในเงื่อนไขของหลักการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางคือการตอบสนองต่อมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดของทั้งสองแนวแกนต้องเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ จึงทำการทดสอบหัววัดสองมิติที่สร้างขึ้นในเงื่อนไขการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ 0-180 องศาพบว่า การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์โดยสมบูรณ์ที่ทำการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงมุมซึ่งมีความต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา ด้วยเหตุผลนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าสมบัติการตอบสนองที่ขึ้นกับมุมในลักษณะนี้มีความสอดคล้องกับหลักการวัดเป็นอย่างดี

หัววัดที่พิจารณาเลือกมาใช้งานนั้นมีความไวในการตอบสนองที่ค่อนข้างน้อย เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสม จึงต้องทำการปรับปรุงสัญญาณโดยการขยายสัญญาณเพื่อปรับระดับค่าความไวในการตอบสนองให้มีค่าสูงขึ้นและมีการตอบสนองที่เท่าเทียมกันของสองแนวแกนอีกทั้งยังทำการปรับระดับค่าแรงดันไฟฟ้าออฟเซตด้วยวงจรไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมสำหรับการประมวลผล ซึ่งวงจรที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้เป็นวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ ที่สามารถขยายสัญญาณผลต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จากขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วของแต่ละแนวแกนในการตอบสนองได้ โดยมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวแกนประมาณ 3,100 เท่า ทำให้ค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.21 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ และในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากมีอัตราขยายสัญญาณประมาณ 17,400 เท่า ซึ่งส่งผลให้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 1.22 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ โดยค่าความไวของการตอบสนองทั้งสองแนวแกนมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้เป็นผลดีต่อการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางต่อไปได้

สำหรับการประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์เพื่อสร้างระบบวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางส่วนการอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้าฮอลล์จึงเป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยมีหน้าที่แปลงค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยในงานวิจัยใช้บอร์ดแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC 24bit) จำนวนสองบอร์ด ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 โดยทำการสอบเทียบสำหรับการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าแบบห้าจุดเทียบกับมัลติมิเตอร์มาตรฐานพบว่าสามารถอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าช่วง 0-5 โวลต์ได้อย่างแม่นยำใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน

การประยุกต์ใช้หัววัดฮอลล์สองมิติเพื่อสร้างเป็นระบบการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางนั้น มีความจำเป็นทดสอบสมบัติเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างหัววัดกับเทคนิคการวัด จากการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด โดยการหมุนฮอลล์ 0-180 องศา ทำการหมุนครั้งละ 10 องศา ภายใต้สนามแม่เหล็กคงที่ 0, 400, 800, 1,200, 1,600 และ 2,000 เกาส์ ทำการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนสำหรับแต่ละครั้งในการหมุน แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 2.40 สามารถหาแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ในแต่ละค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ โดยค่าคงที่ที่ได้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการปรับหมุนฮอลล์ให้กระทำกับสนามแม่เหล็กที่มุมต่างๆ ภายใต้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 0, 400, 800, 1,200, 1,600 และ 2,000 เกาส์ ทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่เท่ากับ 0.0077, 0.5002, 0.9592, 1.4347, 1.9509 และ 2.4391 โวลต์ ตามลำดับ และสามารถนำค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก จากกราฟมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองเป็นเชิงเส้นโดยมีสมการสำหรับการตอบสนองของระบบวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางเท่ากับ $y = 0.00121x + 0.00212$ ที่มีค่าความไวเท่ากับ 1.21 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ ดังนั้นจากผลที่ได้แสดงในบทที่ 4 สามารถสรุปให้เห็นถึงประสิทธิภาพของหัววัดที่สามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถนำไปสร้างเป็นระบบวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้ต่อไป

หลังจากทำการทดสอบโดยผลบ่งชี้อย่างแน่ชัดแล้วว่าหัววัดฮอลล์สองมิติที่ทำการสร้างขึ้นมีสมบัติสอดคล้องกับเงื่อนไขของหลักการวัดเป็นอย่างดี จึงทำการสร้างระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบขึ้นโดยทำการคำนวณค่าและแสดงผลด้วยโปรแกรมแลบวิว เพื่อทดสอบให้เห็นถึงคุณสมบัติเด่นในการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่มีความแม่นยำสูงซึ่งไม่ขึ้นกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด จึงทำการทดสอบความแม่นยำของการวัดจากการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐานหรือเกาส์มิเตอร์ สำหรับเงื่อนไขของมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดที่ 10, 20, 30 และ 40 องศา ซึ่งการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐานโดยทั่วไปที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดในช่วง 1.6-23.6 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่ได้ออกแบบนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเพียง 0.76-0.98 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่น้อยมากนี้ชี้ให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดฮอลล์สองมิติที่ถูกประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pavel Ripka. **Magnetic Sensors and Magnetometers**. Boston, London : Artech House, Inc. 2001.
- [2] Sze S. M. and Kwok K. Ng. **Physics of Semiconductor Devices**. 3rd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [3] Ramsden E. **Hall-Effect Sensors Theory and Applications**. 2nd ED. Oxford: Elsevier, Inc. 2006.
- [4] Popovic R S. **Hall Effect Devices**. 2nd ED. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing, Ltd. 2004.
- [5] Ch. Schott, P.A. Besse, R.S. Popovic. **Planar Hall effect in vertical Hall sensor**. *Sensors and Actuators Vol.85*, pp. 111-115. 2000.
- [6] อธิโรจน์ มะโน, สันติ ขาดรูประชีวิน, ลัดดาวัลย์ สุภาดี, ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง”. 33rd, *Electrical Engineering Conference (EECON-33)*, pp. 1369-1372, 2010.
- [7] อธิโรจน์ มะโน. **เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [8] Athirot Mano, Narin Atiwongsangthong and Wisut Titiroongruang. **Improvement of Independent Directional Magnetic field Measurement Technique with Hall sensors**. *Journal of Advanced Materials Research*, vol. 811, pp. 347-352, 2013.
- [9] Athirot Mano and Wisut Titiroongruang. **A High Accuracy of Magnetometer by Using Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique**. *Journal of Applied Mechanics and Materials*, vol. 565, pp. 133-137, 2014.
- [10] Ch. S. Roumenin, D. Nikolov and A. Ivanov “**A novel parallel-field hall sensor with low offset and temperature drift based 2D integrated magnetometer**” *Sensors and Actuators A* 115, pp. 303-307. 2004.
- [11] Siya Lozanova Avgust Ivanov and Chavdar Roumenin “**Parallel-field Silicon Hall Effect Microsensors with Minimal Design Complexity**” *IEEE Sensors Journal*, Vol9, No. 7, pp. 761-766. 2009.
- [12] Siya Lozanova Avgust Ivanov and Chavdar Roumenin “**A novel Three-Axis Hall Magnetic Sensor**” *Procedia Engineering* 25, pp. 539-542. 2011.
- [13] Ch. Roumenin, D. Nikolov and A. Ivanov “**3-D silicon vector sensor based on a novel parallel-field Hall microdevice**” *Sensors and Actuators A* 110, pp. 219-227. 2004.
- [14] Siya Lozanova and Chavdar Roumenin “**A novel parallel-field Hall microsensor with self-reduced offset and temperature drift**” *Procedia Engineering* 5, pp. 617-620. 2010.

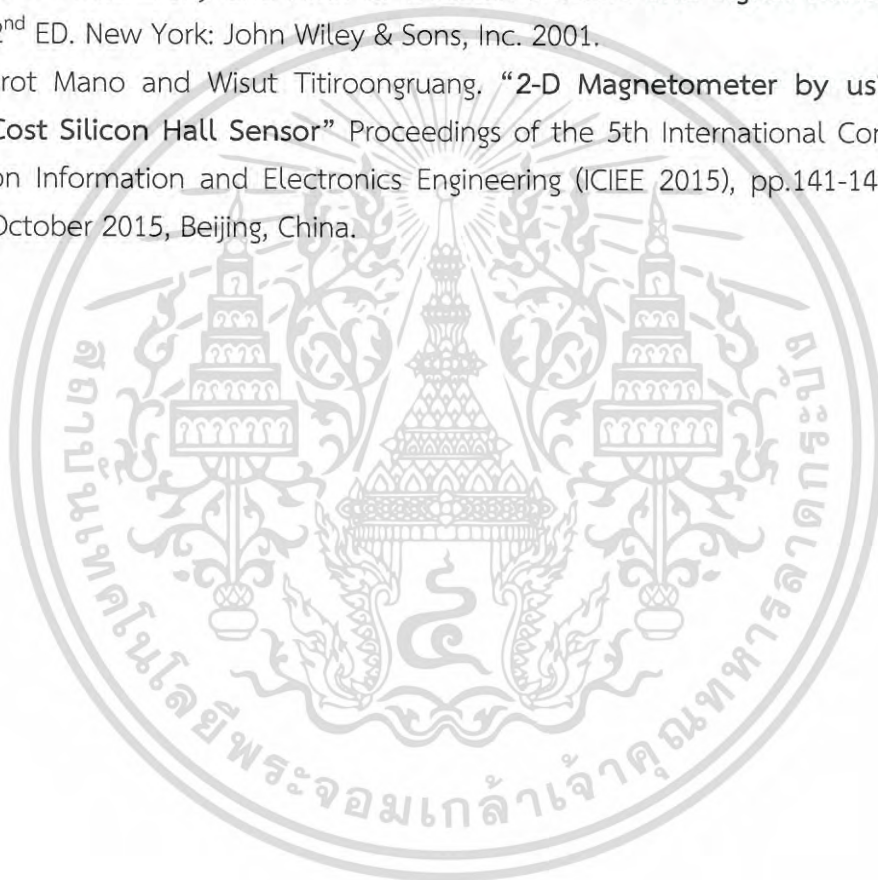
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] S.V. Lozanova and Ch.S. Roumenin. **A Novel 2D Magnetometer Based on a Parallel-Field Silicon Hall Sensor**. Proceedings of the Eurosensors XXIII conference, pp. 847-850. 2009.
- [16] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins. **Device Electronics for Integrated Circuits**. New York : John Wiley&Sons, Inc. 1986.
- [17] David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker. **Fundamentals of Physics**. 7th ED: John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [18] Fukuda M. **Optical Semiconductor Devices**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1999.
- [19] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2551.
- [20] James D. Patterson and Bernard C. Bailey. **Solid-State Physics Introduction to the Theory**. Heidelberg: Springer. 2007.
- [21] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2549.
- [22] Donald A. Neamen. **Semiconductor Physics and Devices Basic Principles**. 3rd ED. New York: McGraw-Hill. 2003.
- [23] Dieter K.Schroder. **Semiconductor material and device characterization**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1990.
- [24] R.Jacob Baker. **CMOS Circuit Design, Layout and Simulation**. 3rd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [25] Michael Corral. **Trigonometry**. Scoolcraft College : GNU Free Documentation License. 2009.
- [26] A. Zygmund. **Trigonometry Series**. 3rd ED. Cambridge: Cambridge university press. 2002.
- [27] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์. **ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งาน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2552.
- [28] Hank Zumbahlen. **Linear Circuit Design Handbook**. 3rd ED. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [29] Richard C. Jaeger. **Introduction to Microelectronic Fabrication**. 2nd ED. New Jersey: Prentice Hall, Inc. 2002.
- [30] Hong Xiao. **Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology**. New Jersey: Prentice Hall, Inc. 2001.
- [31] John E. Mahan. **Physical Vapor Deposition of Thin Films**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000.
- [32] เจริญ เพชรมณี. **เรียนลัด LabVIEW**. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [33] National Instruments. **LabVIEW Basics I&II Course Manual**. Texas: National Instruments Corporation. 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [34] Jame W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell. **Instrumentation for Engineering Measurement**. 2nd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [35] Kelly S. **Fundamentals of Instrumentation**. 2nd ED. New York: Delmar Cengage learning. 2008.
- [36] Gary S. May and Costas J. Spanos. **Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control**. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc. 2006.
- [37] Ramon Pallas-Areny and John G. Webster. **Sensors and Signal Conditioning**. 2nd ED. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [38] Athirot Mano and Wisut Titiroongruang. “2-D Magnetometer by using Low Cost Silicon Hall Sensor” Proceedings of the 5th International Conference on Information and Electronics Engineering (ICIEE 2015), pp.141-144, 23-25 October 2015, Beijing, China.

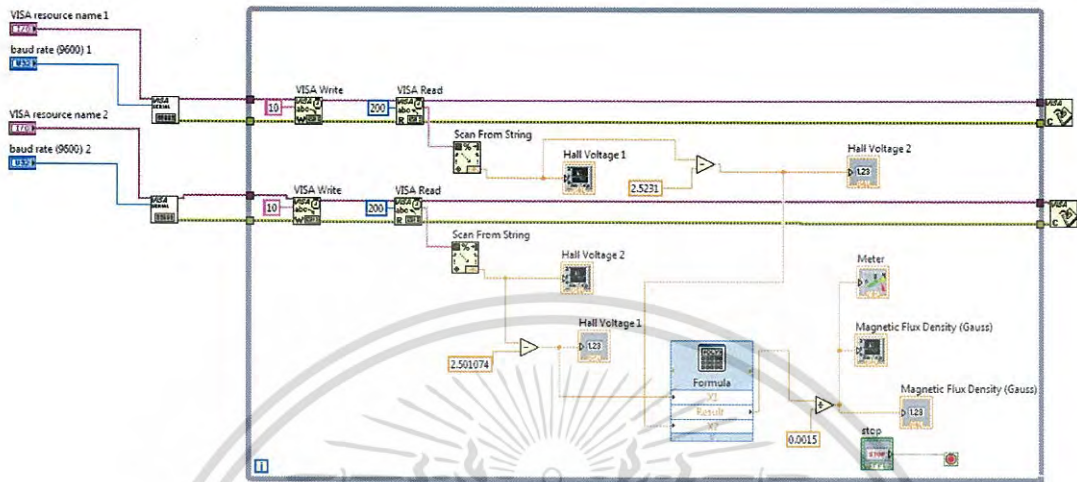


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

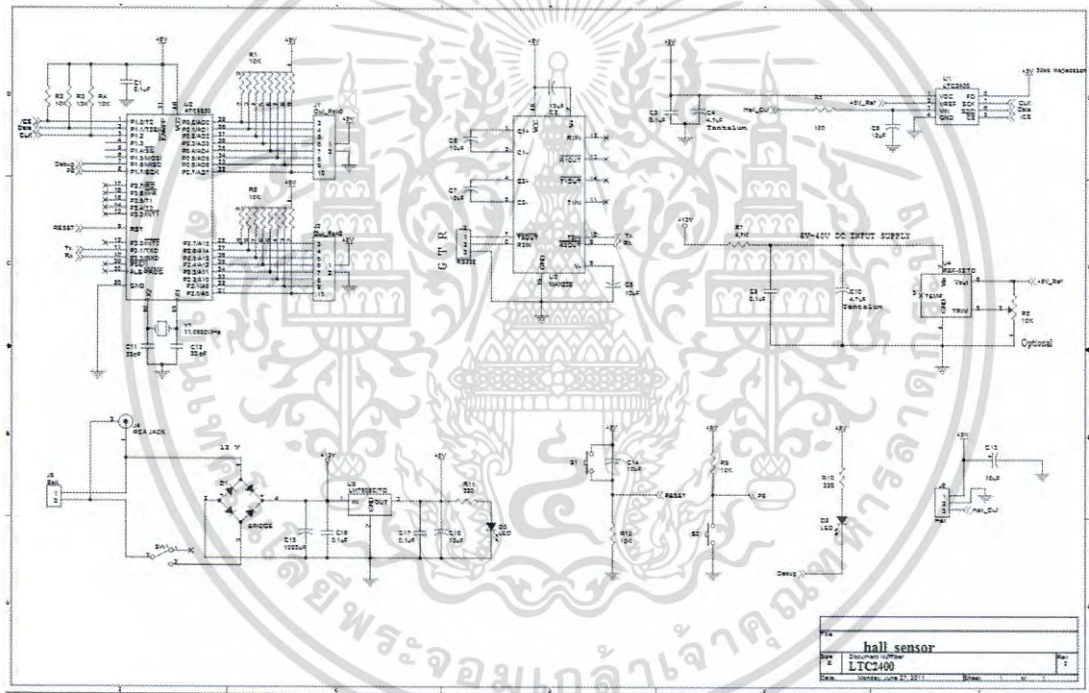
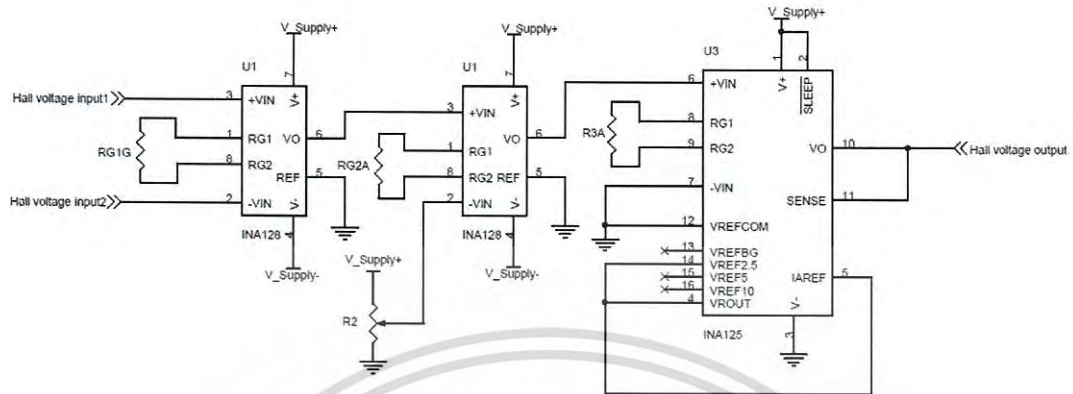
ภาคผนวก ก. โปรแกรมแลบวิวที่ใช้ในงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

วงจรขยายและวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลอุปกรณ์การขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์

Instrument Amplifier INA125





INA125

INSTRUMENTATION AMPLIFIER With Precision Voltage Reference

FEATURES

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

APPLICATIONS

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

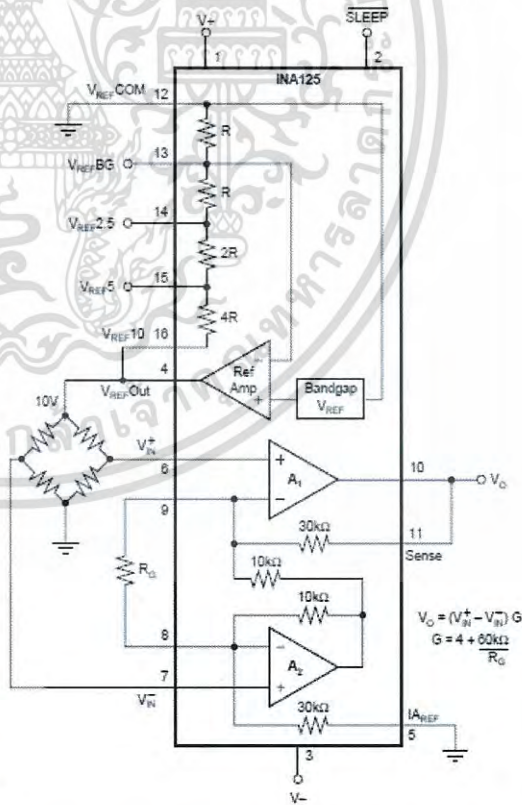
DESCRIPTION

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

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

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

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



$$V_O = (V_+^* - V_-) G$$

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

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

©1997 Burr-Brown Corporation
PDS-1361B
Printed in U.S.A., February, 1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: $V_S = \pm 15V$

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

PARAMETER	CONDITIONS	INA125P, U			INA125PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI Initial	$V_O = \pm 1.35V$ to $\pm 18V$, $G = 4$		± 50	± 250		*	± 500	μV
vs Temperature			± 0.25	± 2		*	± 5	$\mu V/^\circ C$
vs Power Supply			± 3	± 20		*	± 50	$\mu V/V$
Long-Term Stability				± 0.2		*		$\mu V/mo$
Impedance, Differential Common-Mode			$10^{11} \parallel 2$			*	$\Omega \parallel pF$	
Safe Input Voltage				± 40			*	V
Input Voltage Range			See Text			*		
Common-Mode Rejection	$V_{CM} = -10.7V$ to $+10.2V$							
	$G = 4$	78	84		72	*		dB
	$G = 10$	88	94		80	*		dB
	$G = 100$	100	114		90	*		dB
	$G = 500$	100	114		90	*		dB
BIAS CURRENT	$V_{CM} = 0V$							
vs Temperature			10	25		*	50	nA
Offset Current			± 80			*		$pA/^\circ C$
vs Temperature			± 0.5	± 2.5		*	± 5	nA
			± 0.5			*		$pA/^\circ C$
NOISE, RTI	$R_G = 0\Omega$							
Voltage Noise, $f = 10Hz$			40			*		nV/\sqrt{Hz}
$f = 100Hz$			38			*		nV/\sqrt{Hz}
$f = 1kHz$			38			*		nV/\sqrt{Hz}
$f = 0.1Hz$ to $10Hz$			0.8			*		$\mu V/p-p$
Current Noise, $f = 10Hz$			170			*		fA/\sqrt{Hz}
$f = 1kHz$			56			*		fA/\sqrt{Hz}
$f = 0.1Hz$ to $10Hz$			5			*		$pA/p-p$
GAIN								
Gain Equation			$4 + 60k\Omega/R_G$			*		V/V
Range of Gain		4		10,000	*		*	V/V
Gain Error	$V_O = -14V$ to $+13.3V$		± 0.01	± 0.075		*	± 0.1	%
	$G = 4$		± 0.03	± 0.3		*	± 0.5	%
	$G = 10$		± 0.05	± 0.5		*	± 1	%
	$G = 500$		± 0.1			*		%
Gain vs Temperature	$G = 4$		± 1	± 15		*	*	ppm/°C
	$G > 4^{(1)}$		± 25	± 100		*	*	ppm/°C
Nonlinearity	$V_O = -14V$ to $+13.3V$		± 0.0004	± 0.002		*	± 0.004	% of FS
	$G = 4$		± 0.0004	± 0.002		*	± 0.004	% of FS
	$G = 10$		± 0.001	± 0.01		*	*	% of FS
	$G = 100$		± 0.001	± 0.01		*	*	% of FS
	$G = 500$		± 0.002			*	*	% of FS
OUTPUT								
Voltage: Positive		$(V+) - 1.7$	$(V+) - 0.9$		*	*		V
Negative		$(V-) + 1$	$(V-) + 0.4$		*	*		V
Load Capacitance Stability			1000			*		pF
Short-Circuit Current			$-9/\pm 12$			*		mA
VOLTAGE REFERENCE								
Accuracy	$V_{REF} = +2.5V, +5V, +10V$		± 0.15	± 0.5		*	± 1	%
vs Temperature	$I_L = 0$		± 18	± 35		*	± 100	ppm/°C
vs Power Supply, $V+$	$I_L = 0$		± 20	± 50		*	± 100	ppm/V
vs Load	$V+ = (V_{REF} + 1.25V)$ to $+36V$		3	75		*	*	ppm/mA
Dropout Voltage, $(V+) - V_{REF}^{(2)}$	$I_L = 0$ to $5mA$	1.25	1		*	*		V
Bandgap Voltage Reference	Ref Load = $2k\Omega$		1.24			*		V
Accuracy	$I_L = 0$		± 0.5			*		%
vs Temperature	$I_L = 0$		± 18			*		ppm/°C

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

PARAMETER CONDITIONS		INA125P, U			INA125PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
FREQUENCY RESPONSE								
Bandwidth, $-3dB$	$G = 4$		150			*		kHz
	$G = 10$		45			*		kHz
	$G = 100$		4.5			*		kHz
	$G = 500$		0.9			*		kHz
Slew Rate	$G = 4, 10V$ Step		0.2			*		$V/\mu s$
Settling Time, 0.01%	$G = 4, 10V$ Step		60			*		μs
	$G = 10, 10V$ Step		83			*		μs
	$G = 100, 10V$ Step		375			*		μs
	$G = 500, 10V$ Step		1700			*		μs
Overload Recovery	50% Overdrive		5			*		μs
POWER SUPPLY								
Specified Operating Voltage		± 1.35	± 15	± 18	*	*	*	V
Specified Voltage Range								V
Quiescent Current, Positive	$I_O = I_{REF} = 0mA$		480	525	*	*	*	μA
Quiescent Current, Negative	$I_O = I_{REF} = 0mA$		-280	-325	*	*	*	μA
Reference Ground Current ⁽²⁾			180		*	*	*	μA
Sleep Current ($V_{DLEEF} \leq 100mV$)	$R_L = 10k\Omega$, Ref Load = $2k\Omega$		± 1	± 25	*	*	*	μA
SLEEP MODE PIN⁽⁴⁾								
V_{IH} (Logic high input voltage)		+2.7		$V+$	*		*	V
V_{IL} (Logic low input voltage)		0		+0.1	*		*	V
I_{IH} (Logic high input current)			15			*		μA
I_{IL} (Logic low input current)			0			*		μA
Wake-up Time ⁽⁵⁾			150			*		μs
TEMPERATURE RANGE								
Specification Range		-40		+85	*		*	$^\circ C$
Operation Range		-55		+125	*		*	$^\circ C$
Storage Range		-55		+125	*		*	$^\circ C$
Thermal Resistance, θ_{JA}								$^\circ C/W$
16-Pin DIP			80			*		$^\circ C/W$
SO-16 Surface-Mount			100			*		$^\circ C/W$

* Specification same as INA125P, U.

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

SPECIFICATIONS: $V_S = +5V$

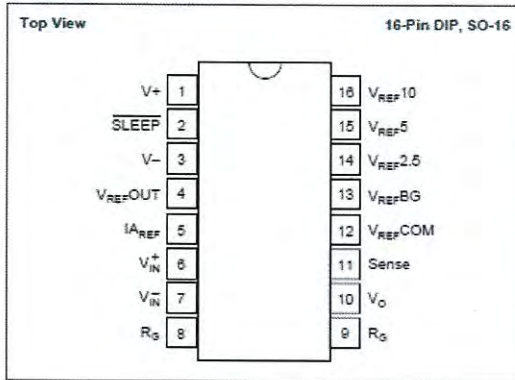
At $T_A = +25^\circ C$, $V_O = +5V$, I_A common at $V_O/2$, V_{REF} common = $V_O/2$, $V_{CM} = V_O/2$, and $R_L = 10k\Omega$ to $V_O/2$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA125P, U			INA125PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI								
Initial			± 75	± 500		*	± 750	μV
vs Temperature			± 0.25			*		$\mu V/^\circ C$
vs Power Supply	$V_O = +2.7V$ to $+3.6V$		3	20		*	50	$\mu V/V$
Input Voltage Range			See Text			*		
Common-Mode Rejection	$V_{CM} = +1.1V$ to $+3.6V$							
	$G = 4$	78	84		72	*		dB
	$G = 10$	86	94		80	*		dB
	$G = 100$	100	114		90	*		dB
	$G = 500$	100	114		90	*		dB
GAIN								
Gain Error	$V_O = +0.3V$ to $+3.8V$ $G = 4$		± 0.01			*		%
OUTPUT								
Voltage, Positive		($V+$)-1.2	($V+$)-0.8		*	*		V
Negative		($V-$)+0.3	($V-$)+0.15		*	*		V
POWER SUPPLY								
Specified Operating Voltage		+2.7	+5	+38	*	*	*	V
Operating Voltage Range								V
Quiescent Current	$I_O = I_{REF} = 0mA$		480	525	*	*	*	μA
Sleep Current ($V_{DLEEF} \leq 100mV$)	$R_L = 10k\Omega$, Ref Load = $2k\Omega$		± 1	± 25	*	*	*	μA

* Specification same as INA125P, U.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN CONFIGURATION

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

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

NOTE: Stresses above these ratings may cause permanent damage.

PACKAGE INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER ⁽¹⁾
INA125FA	16-Pin Plastic DIP	180
INA125P	16-Pin Plastic DIP	180
INA125UA	SO-16 Surface-Mount	265
INA125U	SO-16 Surface-Mount	265

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


ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

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

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



Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIERS

FEATURES

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

APPLICATIONS

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

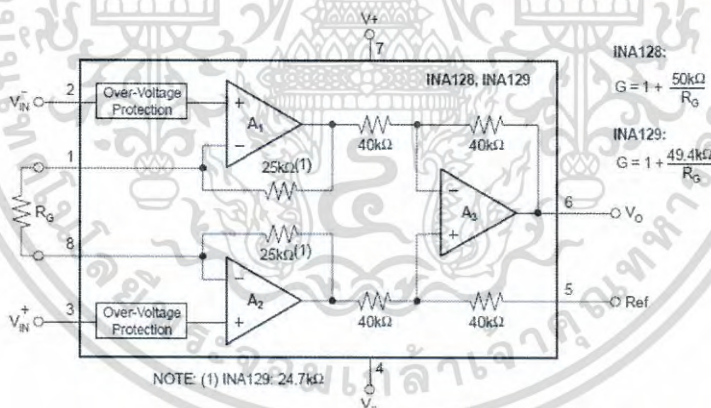
DESCRIPTION

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

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

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

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



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

All trademarks are the property of their respective owners.

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

 **TEXAS
INSTRUMENTS**
www.ti.com

Copyright © 1995–2005, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**INA128
INA129**



SBS051B – OCTOBER 1995 – REVISED FEBRUARY 2005

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

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

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

ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY



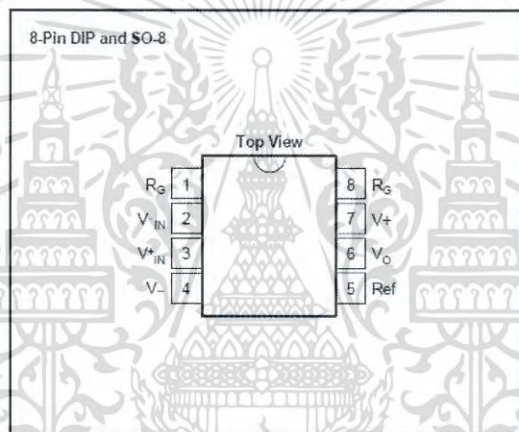
This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

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

ORDERING INFORMATION

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

PIN CONFIGURATION



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

PARAMETER	CONDITIONS	INA128P, U INA129P, U			INA128PA, UA INA129PA, UA			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI								
Initial	$T_A = +25^\circ\text{C}$		$\pm 10 \pm 100/\text{G}$	$\pm 50 \pm 500/\text{G}$		$\pm 25 \pm 100/\text{G}$	$\pm 125 \pm 1000/\text{G}$	μV
vs Temperature	$T_A = T_{\text{MIN}}$ to T_{MAX}		$\pm 0.2 \pm 2/\text{G}$	$\pm 0.5 \pm 20/\text{G}$		$\pm 0.2 \pm 5/\text{G}$	$\pm 1 \pm 20/\text{G}$	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
vs Power Supply	$V_S = \pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$		$\pm 0.2 \pm 20/\text{G}$	$\pm 1 \pm 100/\text{G}$		*	$\pm 2 \pm 200/\text{G}$	$\mu\text{V}/\text{V}$
Long-Term Stability			$\pm 0.1 \pm 3/\text{G}$			*		$\mu\text{V}/\text{mo}$
Impedance, Differential			$10^{10} \parallel 2$			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode			$10^{11} \parallel 9$			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode Voltage Range(1)	$V_O = 0\text{V}$	(V+) - 2 (V-) + 2	(V+) - 1.4 (V-) + 1.7		*	*		V
Safe Input Voltage				± 40		*		V
Common-Mode Rejection	$V_{\text{CM}} = \pm 13\text{V}$, $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$					*		
	G = 1	80	86		73	*		dB
	G = 10	100	106		93	*		dB
	G = 100	120	126		110	*		dB
	G = 1000	120	130		110	*		dB
BIAS CURRENT								
vs Temperature			± 2	± 5		*	± 10	nA
Offset Current			± 30			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
vs Temperature			± 1	± 5		*	± 10	nA
			± 30			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
NOISE VOLTAGE, RTI	$G = 1000$, $R_S = 0\Omega$							
f = 10Hz			10					$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 100Hz			8					$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 1kHz			8					$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			0.2					μV_{pp}
Noise Current								
f = 10Hz			0.9					$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 1kHz			0.3					$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			30					pA_{pp}
GAIN								
Gain Equation, INA128			$1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$					V/V
INA129			$1 + (49.4\text{k}\Omega/R_G)$					V/V
Range of Gain		1		10000	*			V/V
Gain Error	G = 1		± 0.01	± 0.024	*		± 0.1	%
	G = 10		± 0.02	± 0.4	*		± 0.5	%
	G = 100		± 0.05	± 0.5	*		± 0.7	%
	G = 1000		± 0.5	± 1	*		± 2	%
Gain vs Temperature(2)	G = 1		± 1	± 10	*		*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
50k Ω (or 49.4k Ω) Resistance(2)(3)			± 25	± 100	*		*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Nonlinearity	$V_O = \pm 13.6\text{V}$, G = 1		± 0.0001	± 0.001	*		± 0.002	% of FSR
	G = 10		± 0.0003	± 0.002	*		± 0.004	% of FSR
	G = 100		± 0.0005	± 0.002	*		± 0.004	% of FSR
	G = 1000		± 0.001	(4)	*		*	% of FSR

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

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

(2) Specified by wafer test.

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

INA128
INA129


SBOS051B – OCTOBER 1995 – REVISED FEBRUARY 2005

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

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

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

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

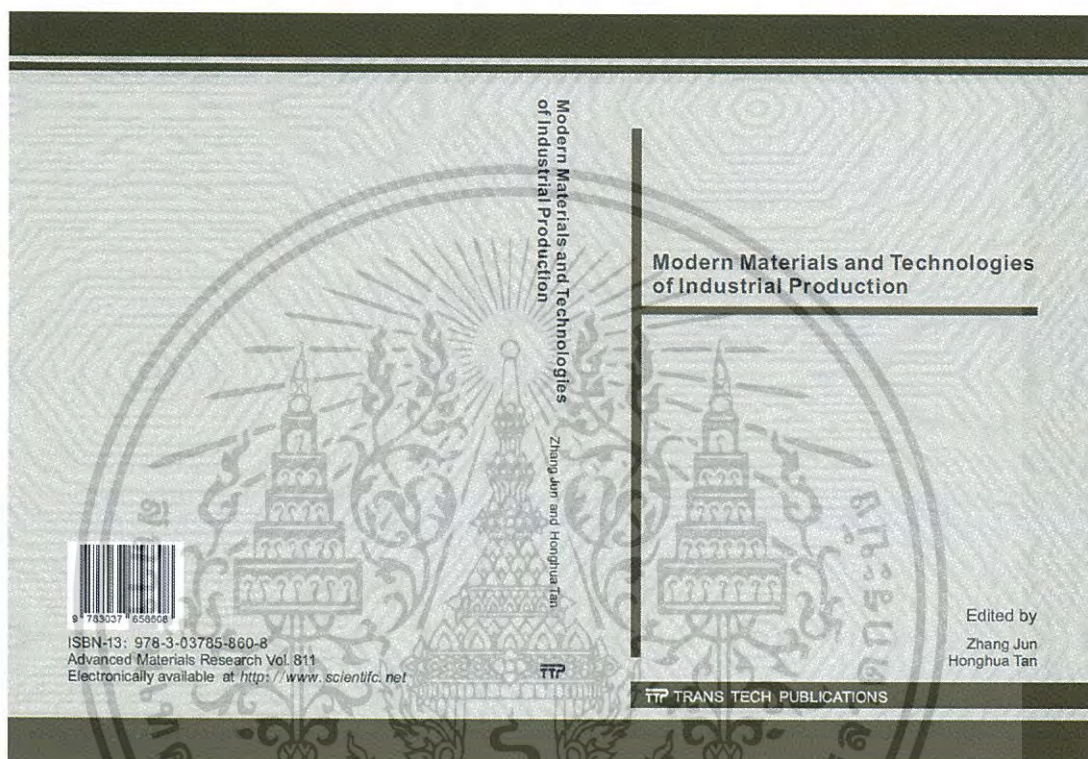
(2) Specified by wafer test.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. “Improvement of Independent Directional Magnetic field Measurement Technique with Hall sensors” Journal of Advanced Materials Research, Vol. 811, pp. 347-352, 2013.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Improvement of Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique with Hall Sensors

Athirot Mano^a, Narin Atiwongsangthong^b and Wisut Titiroongruang^c

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok 10520, Thailand

^amanoathirot@yahoo.com, ^bkanarin@kmitl.ac.th, ^cktwisut@kmitl.ac.th

Keywords: Magnetic flux density measurement, Hall effect sensor, Trigonometric function.

Abstract. The independent directional magnetic field measurement is a new technique for magnetic flux density measurement with high accuracy. This technique can reduce the limitation in term of angle that magnetic flux lines interact with Hall sensors. However, the original system limits the uniformity and symmetry of magnetic field patterns, which can cause an error for measurement system. Therefore, the aim of this research is to present the method to increase measurement accuracy of system, by improve magnetic field uniformity which can be done by using electromagnet instead of permanent magnet. The system is also improved the mechanical circle motion by using stepping motor, it is used to rotate Hall sensors in magnetic field which is generated by electromagnet. The result from experiment has shown of this method that can reduce the error percentage as 5% compare with original system. This method is shown 0.99997 of coefficient of determination, which represents to accuracy in magnetic flux density measurement range 0-1350 Gauss.

Introduction

In magnetic field measurement system, the importance part of system is a magnetic sensor that is used to response the deviation of magnetic flux density. One of the devices is used widely is Hall sensor. It has characteristic to response the deviation of magnetic flux density and changes to voltage, called "Hall Voltage". The response from Hall sensor depends on an angle that magnetic field interact with the sensor itself as a sinusoidal function. Therefore, to only way to get accurate measurement of magnetic flux density by Hall effect sensor, magnetic flux lines must be perpendicular to Hall sensor. This specific characteristic of Hall sensor, angle dependent, is a disadvantage which affect to accuracy of measurement system.

Recently, the "Independent Directional Magnetic field Measurement Technique" [1], can reduce the limitation in term of angle. In the original system of Independent Directional Magnetic field Measurement Technique uses two Hall Effect sensors located perpendicular to each other and use permanent magnet as a source rotates perpendicular around Hall sensors.

This technique has shown advantage of magnetic field measurement with directional independent between magnetic field itself and Hall sensor. But the original system still has low accuracy measurement due to the system still used permanent magnet and also the motion system around Hall sensor was not fully complete which effect to uniformity of magnetic field that interact to both Hall sensors. Therefore the main purpose of this research is improvement the accuracy of the independent directional magnetic field measurement system on two dimensions. This improvement can be done by using electromagnet as magnetic field source and develop the Hall sensors rotation structure by using stepping motor. As from both improvements, this new system will capable to reduce error from non-uniformity of magnetic field that interacts to both sensors.

The improved system can reduce asymmetrical rotation structure problem and can provide uniformity of magnetic field density that interact with both Hall sensors. Therefore from both improvements, the system will have higher accuracy of magnetic field measurement.

Theory of Hall sensor

Hall sensor is a device which varies its voltage across Hall element in response to changes in magnetic field. This output voltage is called "Hall voltage". The Hall voltage is induced when external magnetic field is applied perpendicularly to Hall sensor. For N-type semiconductor, it can be calculated Hall voltage as [2]

$$V_H = -\frac{IB \sin \theta}{q_e n t} \quad (1)$$

Where I is apply current, B is external magnetic flux density, q_e is the magnitude of electron charge, n is carrier concentration, t is the plate thickness of Hall sensor and θ is the angle between magnetic flux line force to Hall sensor.

From eq. 1, the Hall voltage depends on the angle that magnetic field interacts with Hall sensor as sinusoidal function. Therefore, it can be rewritten as [3]

$$V_{H1} = K_1 \sin \theta \quad (2)$$

when K_1 is constant value of the first Hall sensor under difference magnetic field.

Therefore, two Hall sensors are located perpendicular to each other, can be assumed for other Hall voltage function as

$$V_{H2} = K_2 \cos \theta \quad (3)$$

when K_2 is constant value of the second Hall sensor under difference magnetic field.

Thus, the output voltage of two Hall sensors depend on sine and cosine function, which correspond with trigonometric function of unit circle is given by

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (4)$$

Substituting output of two Hall voltage into eq. 4, when $K_1 = K_2$ can be rewritten as

$$K_1 \sin^2 \theta + K_2 \cos^2 \theta = K_{over} \quad (5)$$

where K_{over} is Hall voltage constant of the system

Therefore, from eq. 5, can also be calculated magnetic flux density that independent directional of magnetic field at any angle which force to Hall sensor.

Experimental

The independent directional magnetic field measurement technique by using Hall effect sensors is a new technique, that is a simply method and measure with high accuracy. Fig. 1 presents the system, consist of three importance parts. In the first part is a magnetic field measurement system, there are two Hall sensors located perpendicular to each other, are situated on the shaft, which stick to 0.9 step/degree stepping motor for circular motion in magnetic field that is generated by electromagnet as shows in Fig.2. For the second part is a analog to digital converter 12 bit (ADC 12 Bit) and stepping motor driver, it is controlled by 18F252 micro-controller. The signals are transmitted to computer by serial communication port, analyze and compute magnetic flux density with Lab-view programming.

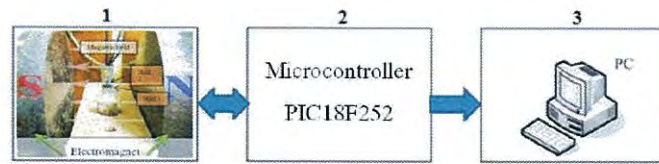


Fig.1. A system of experiment

In the experiment, perpendicular Hall sensors are rotated 0-360 degree (400 steps) with 0.9 degree/step stepping motor in magnetic field 0, 450, 900 and 1350 Gauss respectively that are measured by gauss meter (F.W.BELL 5170). The Hall voltages are recorded at each step of magnetic flux density and analyzed using eq. 5, with Lab-view programming.

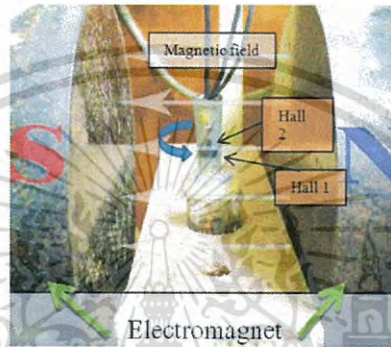


Fig. 2 A magnetic field measurement system

Result and discussion

In this technique, both Hall sensors must be selected, which have a similar of sensitivity. Therefore, Fig. 3 shows the measure result in sensitivity characteristic of both Hall sensors that are similar. For sensitivity of the first Hall is equal to 0.00131 V/G and the second Hall is 0.00134 V/G.

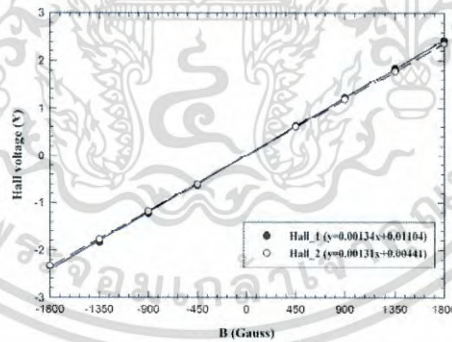


Fig. 3 Sensitivity of Hall sensors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 4 presents the response of perpendicular Hall sensors. It is rotated as 0-360 degree in magnetic field 900 Gauss. To measure voltage vs. the angle of rotation are shown the characteristic of two Hall sensors as sine and cosine function, correspond to eq. 2 and eq. 3.

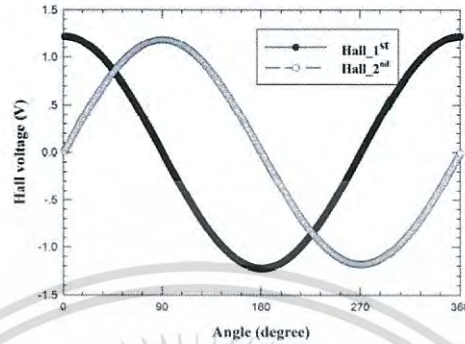


Fig. 4 The relations of Hall voltage vs. Angles

The characteristic's voltage of both Hall sensors, depend on an angle interact with magnetic flux lines as sine and cosine function, that corresponds well to trigonometric equation in unit circle. Therefore, we can calculate the voltage constant with independent directional magnetic field. At flux density as 0. 450, 900 and 1350 Gauss, the Hall voltage constant can be calculated by eq. 5, which various angles as 0-360° and the plot is shown in Fig. 5, 6, 7 and 8

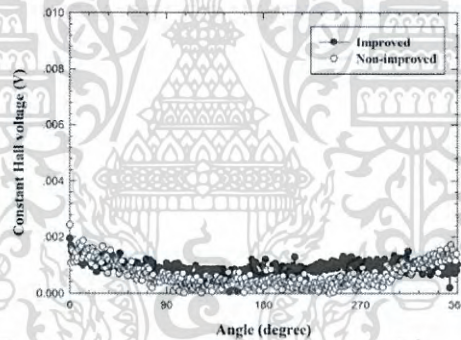


Fig. 5 Constant Hall voltage in flux density 0 Gauss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

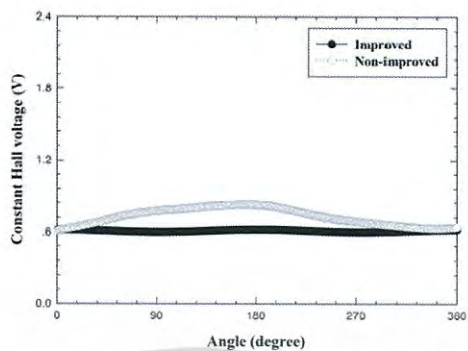


Fig. 6 Constant Hall voltage in flux density 450 Gauss

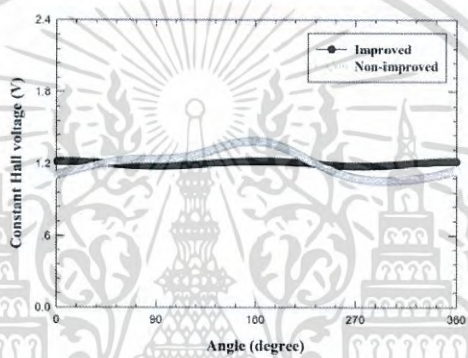


Fig. 7 Constant Hall voltage in flux density 900 Gauss

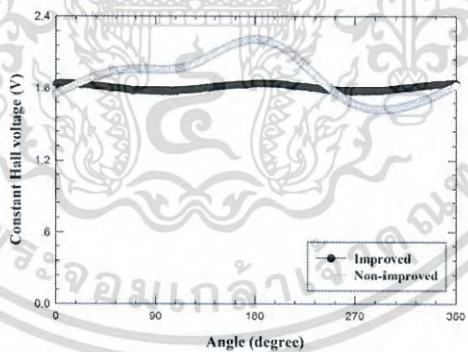


Fig. 8 Constant Hall voltage in flux density 1350 Gauss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Result of Hall voltage constant at flux density as 0, 450, 900 and 1350 Gauss equal to 0.000897, 0.610099, 12.01900 and 1.806891 volt respectively, for a new system as 0.000714, 0.726773, 1.206183 and 1.904421 volt for original system.

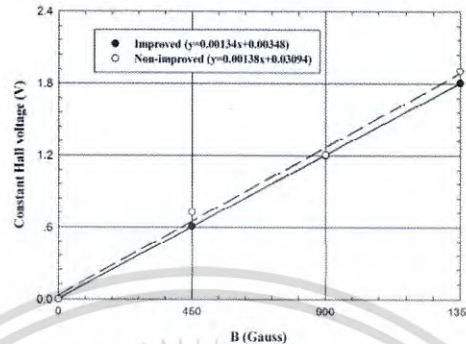


Fig. 9 Constant Hall voltage in flux density 1350 Gauss

Average constant Hall voltage for all angles at magnetic flux density 0-1,350 Gauss are shown in Fig. 9. This graph shows the relation between average constant Hall voltage and angles, as a linear function of both systems. Dashed line is a response of original system, which has linear equation as $y=0.00138x+0.03094$ and the Coefficient of Determination is $R^2=0.99428$. And solid line is a response of new system, which has linear equation, equal to $y=0.00134x+0.00348$ the Coefficient of Determination is $R^2=0.99997$.

Conclusions

The independent directional magnetic field measurement technique with improved a uniformity of magnetic field by using electromagnet and developed the circle movement of Hall sensors in magnetic field by using stepping motor instead of the original system, which uses permanent magnet move around Halls. The result of this method is shown 0.99997 of coefficient of determination and can reduce the error percentage as about 5% compare with original system. Therefore, the results demonstrate a high accuracy of magnetic field measurement technique.

Acknowledgment

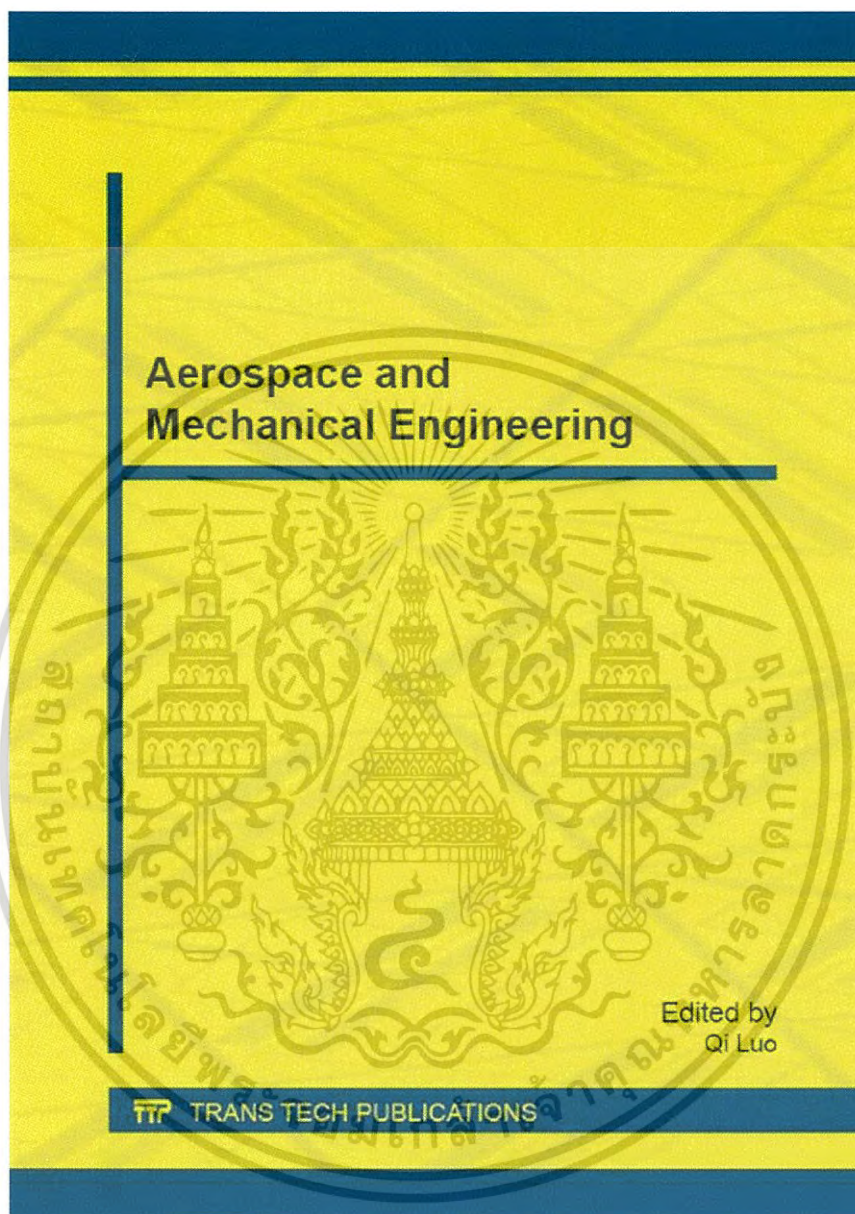
The authors would like to thank the staffs from Electronic Research Center (ERC) that have been helpful for this research, which was funded by Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST)

References

- [1] Athirot Mano, Santi Chatrprachewin, Laddawan Supadee, Chaba Suriyaammaranon and Wisut Titiroongruang, Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique, Proceeding of the 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33)(2010), (in Thai), pp. 1369-1372, 2010.
- [2] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins. Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley&Sons, New York, Inc., 1986.
- [3] Ramsden E. Hall-Effect Sensors Theory and Applications, 2nd ED. Elsevier, Oxford, Inc. 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. "A High Accuracy of Magnetometer by Using Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique" Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 565, pp. 133-137, 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A High Accuracy of Magnetometer by Using Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique

Athirot Mano^a and Wisut Titiroongruang^b

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok 10520, Thailand

^amanoathiroat@yahoo.com, ^bktwisut@kmitl.ac.th

Keywords: Hall effect sensor, Measurement Technique, Magnetometer

Abstract. In a measurement of magnetic flux density with high accuracy by using Hall effect sensor must be considered position of Hall sensor. that perfect perpendicular with magnetic flux line for measurement. Only one Hall element can cause measuring error. Therefore, this paper presents an application of independent directional magnetic field measurement technique on two dimensions for high accuracy magnetometer. It is presented by using two Hall sensors locate perpendicular to each other and use the relation of the two voltage output signal from both Hall sensors to calculate constant Hall voltage and Magnetic flux density with high accuracy by using trigonometric function with Lab-View programming. And as the result of experiment, this technique can reduce the limitation in term of this angle in the range magnetic flux density can be measured 0-1800 gauss. A calibration curve of this system compare with standard Gauss meter shows the coefficient of determination (R^2) equal to 1 and has the accuracy percentage as less than 0.5%.

Introduction

Due to the current, measurement system need to very high accuracy. Particularly, in magnetic flux density measurement, that can be used to several applications. In the instrument for magnetic flux density measurement such as Vibrating Sample Magnetometer (VSM), Gauss meter etc., importance part for response to magnetic flux density deviation is magnetic sensor. For magnetic sensor, which use widely as Hall effect sensor. It has characteristic to response and change from the magnetic field to voltage output signal is called Hall voltage.

However, the output signal of Hall sensor depends on an angle between magnetic flux line and active area of Hall sensor as sinusoidal function. This limitation is dependent on direction of magnetic field, which must be perpendicular to the sensor. Therefore, using only one Hall sensor can cause an error to measurement of magnetometer system. That is a problem affect to accuracy of the measurement.

“Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique” [1,2] is a new technique, which is a choice to reduce the limitation in term of an angle. Therefore, the aim of this research is a high accuracy of magnetic flux density measurement by using independent directional magnetic field measurement technique on two dimensions. We use two similar commercial Hall sensors, are located perpendicular and use relation of trigonometric function analyze and calculate a high accuracy of flux density value.

Experimental

The magnetic measurement system consist of three main part as magnetic sensors part, micro-controller (PIC-18F252) for controlled rotation of stepping motor and convert data from analog Hall voltage signals to digital signals and the last part is flux density computation. The first step, we select to Hall sensor, that have sensitivity be similar to each other. For the first and second Hall has sensitivity 0.00131 and 0.00134 mV/G respectively. That is situated perpendicular to each other shows in Fig. 1. In the experiment, perpendicular Hall is rotated 0-360 degree by 3.6 degree/step in

different magnetic flux density as 0, 450, 900, 1,350 and 1,800 Gauss. Stepping motor is controlled by microcontroller all different steps, analog voltage of two Hall sensors are converted to digital signals by analog to digital converter (ADC 12 bit). The measurement data are transmitted to computer and analyzed Hall voltage constant. All Hall voltage constant are calculated Flux density by Eq.1 [2] in Lab-View programming.

$$k_1 \sin^2 \theta + k_2 \cos^2 \theta = k_{\text{constant}} \quad (1)$$

Finally, calibration of this instrument compare with standard Gauss meter model F.W.BELL5170. In the calibration, we use the five point test method [3] at 0, 25, 50, 75 and 100 percent of magnetic flux range 0-1,800 Gauss for ability testing of the magnetometer system.

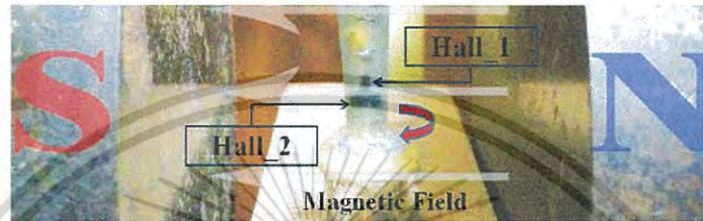


Fig. 1 The part of Magnetic flux density measurement

Result and discussion

The result of this experiment, perpendicular Hall are rotated in circle motion as 0-360 degree in magnetic field 450 G. Fig.2 shows the response of two Hall sensors. For Hall voltage of the first Hall is response to changes an angle corresponds to sinusoidal function. And as the result of second Hall voltage, which is situated perpendicular with the first Hall. Therefore, response of second Hall can be implied as cosine function. Both Hall voltage signals for all angles have phase shift as 90 degrees that shows perpendicular perfectly of two Hall sensors.

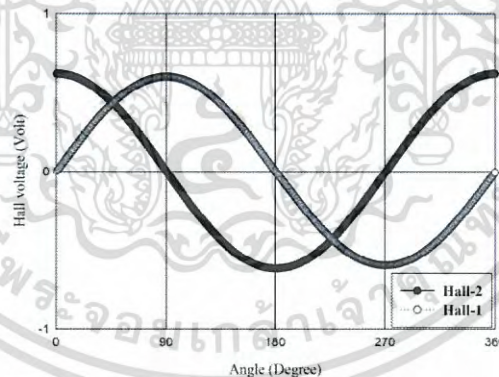


Fig. 2 The response of Hall sensors at angles 0-360 degree (B=450 G)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

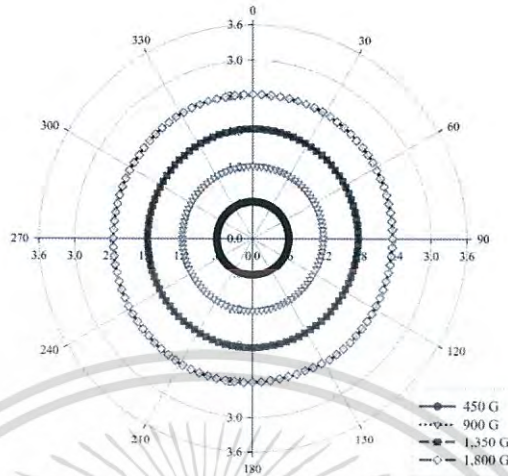


Fig. 3 Polar plot of Constant Hall voltage in flux density 450-1,800 Gauss

The sin and cosine function of two Hall voltage signal correspond to a unit circle of trigonometric equation, which can be calculated for constant Hall voltage independent directional magnetic field by using Eq.1. Fig. 3 shows polar graph of constant Hall voltage at flux density as 450, 900, 1,350 and 1,800 Gauss for all angle 0-360 degree.

The result of average constant Hall voltage as 0.000897, 0.6101, 1.2019, 1.8069 and 2.3867 respectively, that can be plotted linear curve relation versus flux density as shows in Fig.4 and the linear curve presents equation as $y=0.00133x+0.00763$.

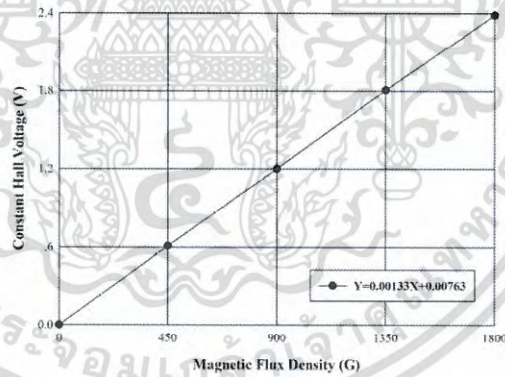


Fig. 4 Linear curve of average constant Hall voltage of the system

Finally, we use linear equation of average constant Hall voltage curve to calculate magnetic flux density by using Lab-View programming at 0, 25, 50, 75 and 100 percent of the magnetic flux density range 0-1800 Gauss. From the result, average magnetic flux density that are measured by using this technique, are compared with the calibration of magnetometer shows in Table 1. All magnetic flux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

density value present in Gauss unit. Calibration to compare with F.W.BELL5170 standard Gaussmeter. The calibration curve has shown in Fig.5.

Table 1. The five point test of average magnetic flux density.

	Percentage (%)				
	0	25	50	75	100
Average	0.32	447.12	896.67	1346.22	1797.05
Actual	0	450	900	1,350	1,800
Deviation	0.32	2.88	3.33	3.78	2.95

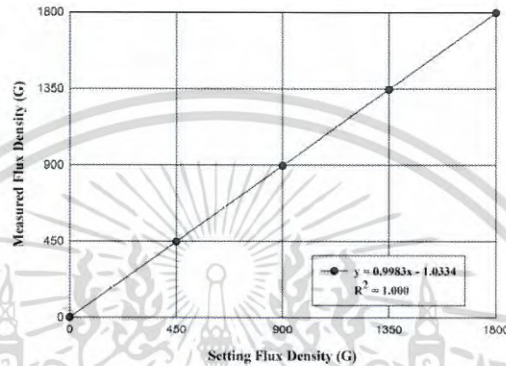


Fig. 5 Calibration curve of the magnetometer.

In Fig.5 presents linear calibration curve that is the relation between flux density measurement value of the magnetometer system and setting flux density value, which can be set by standard magnetometer. The calibration curve shows coefficient of determination (R^2) equal to 1.000.

Conclusions

And as all the result of experiment represent an application of this technique for high accuracy magnetometer that measure magnetic flux density independent angle of magnetic flux line interact with active region Hall element. The accuracy of this system is shown in calibration curve with the coefficient of determination (R^2) equal to 1.000 and has the accuracy percentage less than 0.5% in magnetic measured range 0-1,800 Gauss. Therefore, using this technique, the independent directional magnetic field measurement technique for magnetic flux density measurement can be useful in a high accuracy magnetometer.

Acknowledgment

The authors would like to thank the staffs from Electronic Research Center (ERC) that have been helpful for this research, which was funded by Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

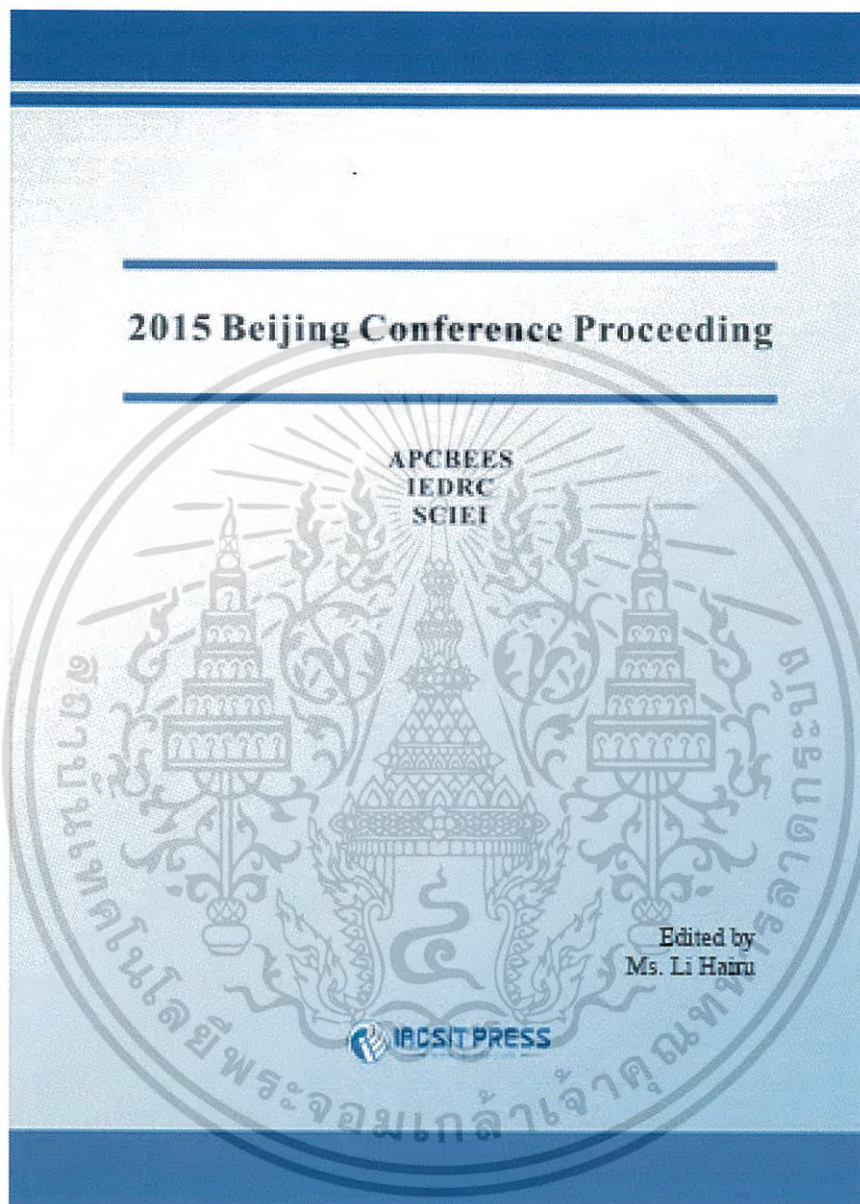
References

- [1] Athirot Mano, Santi Chatrurachewin, Laddawan Supadee, Chaba Suriyaammaranon and Wisut Titiroongruang, Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique. Proceeding of the 33rd Electrical Engineering Conference(EECON-33)(2010), (in Thai), pp. 1369-1372. (2010).
- [2] 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. (2013).
- [3] Kelly S. Fundamentals of Instrumentation. 2nd ED. Delmar cengage leaning, New York, (2008).
- [4] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins. Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley&Sons, New York, Inc., (1986).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. "2-D Magnetometer by using Low Cost Silicon Hall Sensor" Proceedings of the 5th International Conference on Information and Electronics Engineering (ICIEE 2015), pp.141-144, 23-25 October 2015, Beijing, China.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-D Magnetometer by using Low Cost Silicon Hall Sensor

Athirot Mano and Wisut Titiroongruang
 Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok 10520, Thailand
 Email: manoathirot@yahoo.com and ktwisut@kmitl.ac.th

Abstract—This research presents an application of low cost 2-D silicon Hall sensor for 2-D magnetometer that can respond to two direction of magnetic field, perpendicular and parallel field. The magnetic sensor structure is fabricated on p-type silicon substrate that has resistivity as 20-30 ohm.cm by using planar silicon technology. The structure consists of five Aluminum sensitive ohmic contacts on rectangular active area with diameter of $600 \times 300 \mu\text{m}^2$. The response of device was tested for two axis in magnetic flux density range 0-5,000 G. Linear response was found. And as the result, sensitivity of perpendicular field was $85.182 \mu\text{V/G}$ and $29.982 \mu\text{V/G}$ for the parallel field, while the Hall voltage amplification 3,400 times is 0.291 mV/G for perpendicular field and the 10,250 time is 0.307 mV/G for parallel field response that was measured in magnetic flux density between 0-5,000 gauss. After that the 2-D Hall device is used for magnetometer system and was verified the calibration results comparing with standard Gaussmeter. The comparison are presents acceptable agreement. Also the coefficient of determination (R^2) are computed and shown 0.9999 and 0.9998 for two axis of magnetic the response B_z and B_x respectively. Therefore, this implies the 2-D silicon Hall sensor can be developed to be a 2-D magnetometer opportunely.

Index Terms—Hall sensor, 2-D Hall device, Magnetometer

I. INTRODUCTION

Hall effect [1], [2] is physical phenomena of carrier charge moving in solid-state semiconductor material under magnetic field. The voltage induce between the sensitive contact is called Hall voltage. Hall device are applied for characterization on electrical properties of semiconductor material and used for magnetic sensor device. Therefore, Hall effect are used for several device for magnetic sensing such as Hall plate, magneto-diode and magneto-transistor [3], [4]. One of the structures, which is used for response to magnetic field, is "Hall plate device". This device has several advantages such as high linearity response, uncomplicated structure, it can be connected to the signal conditioner circuit with easily and easy for the further development. Therefore, this device is used for various fields. Especially, an application to magnetometer an improvement for its response more than one dimension.

Generally, conventional Hall plate device can respond to only one magnetic field component, which is sensitive

to perpendicular magnetic field to surface area of device. For magnetometer by using a conventional Hall plate device has a limitation in term of magnetic field direction. Consequently, Hall magnetic sensor is developed for sensitive to parallel field is called Vertical Hall device [4]. The development of magnetic sensor that can be responding to magnetic field more than one direction is importance to increase the capability of magnetic measurement.

Therefore, this research presents 2-D Hall sensor, which can be respond to both magnetic field directions, perpendicular field and parallel field for an application to magnetic flux density measurement. The 2-D Hall sensor device is fabricated base on planar silicon technology with only five ohmic contacts on p-type silicon substrate. In the primary experiment, sensitivity of two magnetic field directions was tested. The Hall voltage signals are amplified in order to increase sensitivity of both magnetic field responses for applied to magnetometer. The 2-D magnetometer is calibrated comparing with standard magnetometer. In this results show the dominant feature of this device are responding to both magnetic field detection (perpendicular field and parallel field), simply structure, low cost and can be applied to 2-D magnetometer opportunely.

II. DEVICE STRUCTURE AND OPERATION

The Hall device is designed in Hall plate structure for two dimensions of magnetic response and is fabricated by using silicon planar technology at Thai Microelectronics Center (TMEC). This structure, the five Aluminum ohmic contacts are made on the p-type silicon substrate that have resistivity as 20-30 $\Omega\cdot\text{cm}$. Fig. 1(a) shows the five ohmic contacts consists of C_1 , C_2 , C_3 , C_4 and C_5 on the active area as $600 \times 300 \mu\text{m}^2$ of this device. Fig. 1(b) is presented cross-section of 2-D Hall device.

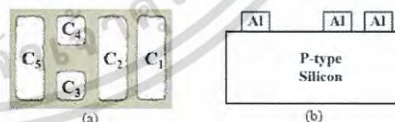


Figure 1. 2-D Hall device structure (a) The five ohmic contacts of 2-D Hall device (b) Cross-section of device.

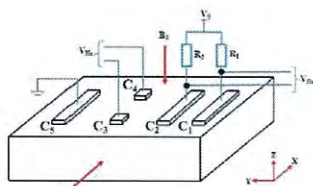


Figure 2. 2-D Hall device operation.

The operation of 2-D Hall device, which shows in Fig. 2. Fix bias current is applied to C_1 , C_2 and C_3 through two resistors (R_1 and R_2) that connect to C_1 , C_2 . For C_3 and C_4 are used to sensitive Hall voltage (V_{Hz}) for perpendicular field (B_z) and the C_1 , C_2 are sensitive contacts of Hall voltage (V_{Hx}) for parallel field (B_x) response.

III. EXPERIMENTAL

In the experiment, the sensitivity characteristic of 2-D Hall device was tested on two directions of magnetic field, perpendicular field and parallel field that interact with active area of this device. The 1 mA constant direct current is applied to C_1 , C_2 and C_3 through two resistors that connect to C_1 , C_2 is shown in Fig. 2 under the two magnetic field direction (B_z and B_x) from 0-5,000 Gauss that are varied by electromagnet. The perpendicular field response is measured cross C_3 to C_4 of Hall voltage ohmic contact and the parallel field response is measured at C_1 and C_2 .

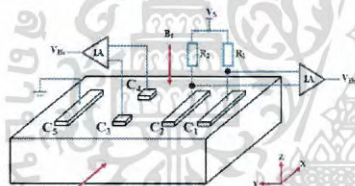


Figure 3. 2-D Hall sensor with amplification



Figure 4. Sensitivity of 2-D Hall sensor testing system.

In the next experiment, the Hall device is connected to instrument amplifier circuit [5] is shown in Fig. 3 for amplify output voltage with two different gain as 3,400 and 10,230 times for B_z and B_x response of 2-D Hall device respectively. the sensitivity response was tested on two directions of magnetic field at magnetic flux density as 0-5,000 Gauss that shows in Fig. 4. Furthermore, this device is introduced to test the response that depend on an angle of magnetic field interact with 2-D Hall device from 0-180 degree in the magnetic flux density as 5,000 Gauss.

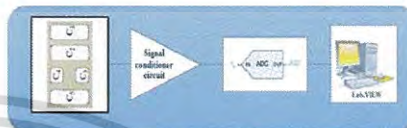


Figure 5. The system of 2-D magnetometer.

The last experiment, this Hall device is applied for magnetic measurement system is shown in Fig. 5 which consist of 2-D Hall device, signal conditioner circuit, micro-controller (PIC-18F252) for convert data from analog Hall voltage signals to digital signals by using ADC 12 bit and the last is flux density computation and monitoring by using Lab-View programming. 2-D magnetometer is tested to demonstrate the accuracy of the measurement system and calibrates compare with standard Gaussmeter (F.W.BELL5170) by using the five point test method [6] at maximum flux density as 4,000 Gauss.

IV. RESULT AND DISCUSSION

From the results of 2-D Hall device response while bias 1 mA constant current to C_1 , C_2 and C_3 through two resistors and apply magnetic perpendicular field and parallel field to active area of this sensor. The perpendicular and parallel field response of this device is presented by solid line and dash line respectively that show in Fig. 6, and can be demonstrated a high linear response of both magnetic field directions.

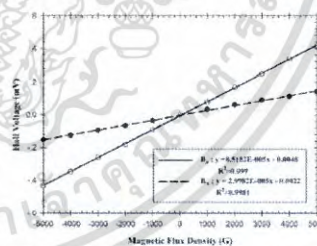


Figure 6. Sensitivity of 2-D Hall device

Furthermore, the sensitivity all both directions respond can be described by slope of linear equation. For perpendicular field response has sensitivity as

85.182µV/G and parallel field response is 29.982µV/G Moreover, the result of perpendicular field response also shows the sensitivity greater than 2 time compare with parallel field response. All of the results are confirmed that the two dimensions response to this Hall device.

Generally, the response of analog Hall voltage signal is very small approximated in order of micro-volt per Gauss. This signal must be amplified to be able to use with other application. Therefore, in this experiment, the signals of two magnetic field response are amplified by using instrument amplifier (IA) with two different gain approximately as 3,400 and 10,230 time for B_z and B_x response respectively is shown in Fig. 7 in order to increase the sensitivity response.

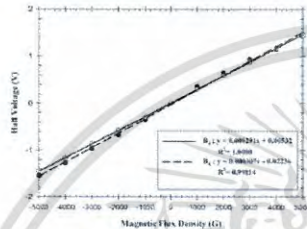


Figure 7. Sensitivity of 2-D Hall device with amplification

For Fig. 7 is presented correspond to linear equation as $y=0.000291x+0.00532$ with the sensitivity increasing as 0.291 mV/G for perpendicular field and the equation as $y=0.000307x-0.02236$ with sensitivity is 0.307 mV/G for parallel field response.

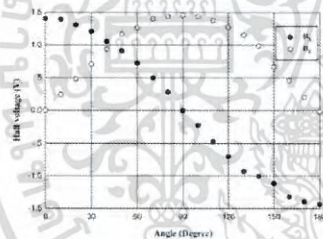


Figure 8. The response of 2-D Hall device depend on an angle 0-180 degree

Fig. 8 has shown the response of 2-D Hall device depend on an angle that magnetic field interact with this sensor. And as the measurement result, the output voltages response of 2-D Hall device has shown 90 degree phase different between perpendicular field and parallel field which can be determined as sine and cosine function.

Finally, this Hall device is applied for 2-D magnetometer by using linear equation of both field responses to calculate magnetic flux density. Therefore, the 2-D magnetometer is calibrated in order to enhance accuracy of the system all two dimensions by using the

five point test method at 0, 25, 50, 75 and 100 percent of maximum magnetic flux density as 4,000 Gauss. And as the result, the value of flux density are measured by using 2-D magnetometer and compared with F.W.BELL5170 standard magnetometer.

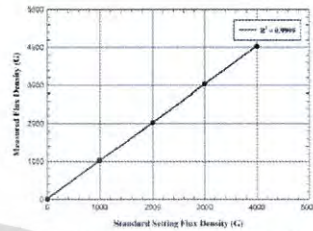


Figure 9. Calibration curves of perpendicular field response

The calibration curve has shown in Fig. 9 and Fig. 10 which is relation between the measurement values of this system and standard setting values. Generally, the precision of instrument can be considered by a coefficient of determination (R^2), which should nearby 1.

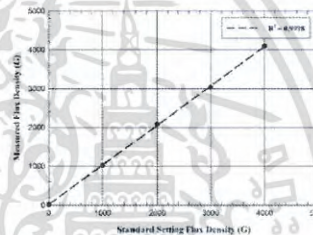


Figure 10. Calibration curves of parallel field response

Therefore, calibration curves that show in Fig. 9 and Fig. 10 are presented the precision of the 2-D magnetometer that can be considered by a coefficient of determination. $R^2=0.9999$ and $R^2=0.9998$ of two dimensions for perpendicular and parallel field response respectively.

V. CONCLUSION

The low cost 2-D Hall device is fabricated by using planar silicon technology on Hall plate structure. This device shows the functional combination of two directions magnetic field response by only five sensitive ohmic contact. All of the results present advantage of the this device, which can be respond to magnetic field more than one direction, perpendicular field (B_z) and parallel field (B_x) by using simply structure and also to connect with signal conditioner circuit by using instrument amplifier for sensitivity response increasing with a high linear response. And as the result of an application for 2-D magnetometer are shown the precision of magnetic flux density measurement with the term of coefficient of determination (R^2). The precision of this system is

demonstrated by calibration curve with coefficient of determination equal to 0.9999 for perpendicular field response and 0.9998 for parallel field response and has the accuracy percentage less than 3% in magnetic measured range 0-4,000 Gauss.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the staffs from Thai Microelectronics Center (TMEC) have been helpful for device fabrication. This research, which was funded by Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST).

REFERENCES

- [1] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins. Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley&Sons, New York, Inc., 1986.
- [2] Dieter K. Schroder. Semiconductor Material and Device Characterization. 3rd ED, John Wiley&Sons, Inc, New Jersey., 2006.
- [3] Sze S. M. and Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ED, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [4] R. S Popovic. Hall Effect Devices. 2nd ED. IOP Publishing Ltd,2004.
- [5] Ramon Pallas-Areny and John G. Webster. Sensors and Signal Conditioning. 2nd ED, John Wiley&Sons, Canada. 2001.
- [6] Kelly S. Fundamentals of Instrumentation. 2nd ED, Delmar cengage learning, New York. 2008.



Athrot Mano was born on 1986, Thailand. He received the bachelor's degree major in Applied Physics, Faculty of Science and received the Master's degree major in Microelectronics Engineering at Electronics Engineering Department from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL). His current research interests include Silicon sensors and signal conditioning, Semiconductor materials and characterization, Magnetic material and its applications. He was served as a teaching assistant at Department of Applied Physics, Faculty of Science (KMITL). For subjects that were served as a teaching assistant are Semiconductor Device Laboratory, Atomic Structures Laboratory and Basic Electronics Laboratory.



Wisut Titiroongruang was born on 1957, Thailand. He received the B.E. and M.E. degree in Electronic Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) and the Ph.D. degree in electrical engineering from the Tokai University, Japan. His current research interests include Superconductor materials, Diamond thin film synthetic, Semiconductor device and its applications. He is currently a lecturer and also Associate Professor at Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering (KMITL).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอธิโรจน์ มะโน
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	ตำบลเกาะยอ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา
ประวัติการศึกษา	-สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (โพลีเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์) ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2552 -สำเร็จการศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2555

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1) ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
- 2) เทคโนโลยีซิลิกอน
- 3) ซิลิกอนเซ็นเซอร์และการปรับแต่งสัญญาณ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- ค.ศ. 2013 “Improvement of Independent Directional Magnetic field Measurement Technique with Hall sensors” Journal of Advanced Materials Research, Vol. 811, pp. 347-352, 2013.
- ค.ศ. 2014 “A High Accuracy of Magnetometer by Using Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique” Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 565, pp. 133-137, 2014.
- ค.ศ. 2015 “2-D Magnetometer by using Low Cost Silicon Hall Sensor” Proceedings of the 5th International Conference on Information and Electronics Engineering (ICIEE 2015), pp.141-144, 23-25 October 2015, Beijing, China.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้