

หัววัดฮอลล์ 2 มิติ สำหรับวัดสนามแม่เหล็กชนิดไม่ขึ้นกับทิศทาง

TWO-DIMENSIONAL HALL SENSOR WITH SIMULTANEOUS MAGNETIC
SENSING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-018-169

หัววัดฮอลล์ 2 มิติ สำหรับวัดสนามแม่เหล็กชนิดไม่ขึ้นกับทิศทาง

TWO-DIMENSIONAL HALL SENSOR WITH SIMULTANEOUS MAGNETIC
SENSING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMUTL-2018-EN-D-018-169

TWO-DIMENSIONAL HALL SENSOR WITH SIMULTANEOUS MAGNETIC
SENSING



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
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMUTL-2012-EN-D-018-169



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	หัววัดฮอลล์ 2 มิติ สำหรับวัดสนามแม่เหล็กชนิดไม่ขึ้นกับทิศทาง
นักศึกษา	นายยงยุทธ แก้วจำรัส
รหัสนักศึกษา	58601004
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสำหรับประยุกต์ใช้งานในการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งหัววัดที่ได้ออกแบบขึ้นเป็นการรวมโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวนอนที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานไว้บนโครงสร้างเดียวกัน ซึ่งสามารถตอบสนองความเข้มสนามแม่เหล็กได้เท่ากันโดยไม่ขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มากระทำ โดยโครงสร้างของหัววัดประกอบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าเพียงห้าขั้วบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี ในการวิจัยครั้งนี้ โครงสร้างที่ตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ดีที่สุด มีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่ตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวขนาน 80 μm และระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่ตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก 300 μm และมีความหนาของฐานรอง 225 μm ในการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ ในส่วนแรกเป็นการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกพบว่าทุกรอยสัมผัสมีความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ในส่วนที่สองเป็นการทดสอบความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบสองมิติผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานและในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 0.286 $\mu\text{V}/\text{G}$ และ 0.215 $\mu\text{V}/\text{G}$ ตามลำดับ ที่กระแส 1 มิลลิแอมป์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก -3,000 ถึง 3,000 เกาส์ ในส่วนที่สามเป็นการทดสอบหาอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แต่ละมิติเพื่อที่จะปรับค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองแนวแกนให้มีค่าเพิ่มขึ้นและเท่ากันเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานซึ่งพบว่าต้องปรับอัตราการขยายเท่ากับ 430 และ 580 เท่า สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานและแนวตั้งฉาก ตามลำดับ จะทำให้ค่าความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นและมีค่าเท่ากันเป็น 0.127 mV/G ในส่วนที่สี่การทดสอบเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุมกระทำกับหัววัด 0 - 180 องศา ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮอลล์จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กมากระทำแต่จะแปรผันตามความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากระทำ และในส่วนที่ห้าทดสอบความแม่นยำของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ จะเห็นว่าหัววัดที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด 3,000 เกาส์ โดยทำการสอบเทียบกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน (F.W.Bell5170)

Thesis Title	Two-Dimensional Hall Sensor with Simultaneous Magnetic Sensing
Student	Mr. Yongyut Kaewjumas
Student ID.	58601004
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This research proposes a two-dimensional (2D) Hall sensor capable of simultaneous parallel- and perpendicular-directional magnetic sensing. The Hall sensor was of five-ohmic contact configuration. In the study, experiments were carried out in five stages. In the first-stage experiment, the Ohmic contact properties of the 2D Hall sensor were determined. In the second-stage experiment, the parallel and perpendicular absolute sensitivities of the 2D sensor were examined. In the third-stage experiment, considering the discrepancy between the parallel and perpendicular absolute sensitivities, signal conditioning circuitry was incorporated into the sensor system to compensate, and the rotational angles (0-180°) measured in the four-stage experiment. In the final-stage experiment, the simultaneous magnetic sensing was verified. The results revealed that the I-V curves were dominantly linear, corresponding to Ohm's law. In the second-stage experiment, the absolute sensitivities of the 2D Hall sensor were characterized by applying 1 mA bias current at induction (B) between -3,000 and 3,000 G, the width parallel spacing of 80 μm and the parallel-directional absolute sensitivity of 0.286 μV/G and the width perpendicular spacing of 300 μm and the perpendicular-directional absolute sensitivity of 0.215 μV/G. However, the parallel and perpendicular absolute sensitivities were low and unequal. Thus, signal conditioning circuitry was incorporated into the system to address the discrepancy and improve the performance. Importantly, the 2D Hall sensor exhibited a sine and cosine functions between the measured and reference rotational angles, and simultaneous magnetic sensing given the magnetic flux density of 3000 G, with the error percentage of less than 1%. In essence, the proposed contactless silicon-based 2D Hall sensor possesses high potential for high-precision industrial applications.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ที่คอยให้คำแนะนำต่างๆ และให้คำปรึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ที่คอยให้คำแนะนำและการแก้ไขปัญหาดังกล่าว จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ดร.อธิโรจน์ มะโน คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยให้ความสนับสนุนทางด้านเครื่องมือสำหรับการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็ก

ขอขอบคุณ ดร.จิรวัดน์ ปราบเขต และทีมงานนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยสนับสนุนทางด้านความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างและเทคนิคการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กฮอลล์ รวมถึงคำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอขอบคุณเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยกมา ก่อให้เกิดองค์ความรู้ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งข้าพเจ้าคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจทางด้านการศึกษาสมบัติสนามแม่เหล็ก เพื่อนำไปพัฒนาในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไปข้างหน้าได้

ท้ายที่สุดคุณประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแก่บิดามารดา อันเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ยงยุทธ แก้วจรัส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	5
2.1 ปรัชญาการณียอลล์.....	5
2.2 ปรัชญาการณียอลล์ในโลหะ.....	9
2.3 ปรัชญาการณียอลล์ในวัสดุสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.4 การตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	14
2.4.1 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวนอน (Horizontal Type) หรือแบบเพลตพื้นฐาน.....	14
2.4.2 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (Vertical Type)	14
2.5 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก.....	16
2.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	18
2.6.1 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	18
2.6.2 ปรัชญาการณียอลล์ตามฟังก์ชันตรีโกณมิติ.....	20
2.7 วงจรขยายสัญญาณโดยใช้วงจรอินสตรูเมนต์.....	22
2.7.1 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง.....	22
2.7.2 วงจรขยายอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์3ตัว.....	24
บทที่ 3 การออกแบบโครงสร้างและการประยุกต์ใช้งานของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	26
3.1 การออกแบบและกระบวนการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	26
3.2 โครงสร้างทางการภาพของหัววัดสนามแม่เหล็กและการตอบสนองในสองมิติ.....	30

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 โครงสร้างของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	30
3.3 การทดสอบสมบัติของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	32
3.3.1 การทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิค.....	32
3.3.2 การทดสอบสมบัติความไวการตอบสนองของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	33
3.4 การประยุกต์ใช้งานของห้ววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	35
3.4.1 การทดสอบอัตราการขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แบบสองมิติ.....	35
3.4.2 สมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม.....	35
3.4.3 การทดสอบความแม่นยำของห้ววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติ.....	36
3.4.3.1 การทดสอบโดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งของมุมที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่มากกระทำ.....	36
3.4.3.2 การทดสอบความแม่นยำของห้ววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	38
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	38
4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	38
4.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	41
4.1.2.1 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน.....	41
4.1.2.2 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก.....	45
4.1.2.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	48
4.2 การประยุกต์ใช้งานห้ววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติ.....	49
4.2.1 ผลการทดสอบการปรับปรุงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองมิติ.....	49
4.2.2 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่สนามแม่เหล็กมากกระทำ.....	53
4.2.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของโครงสร้างทั้งหมด.....32
4.1	เปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของ หัววัดสนามแม่เหล็กทั้ง 9 โครงสร้าง.....48



สารบัญรูป

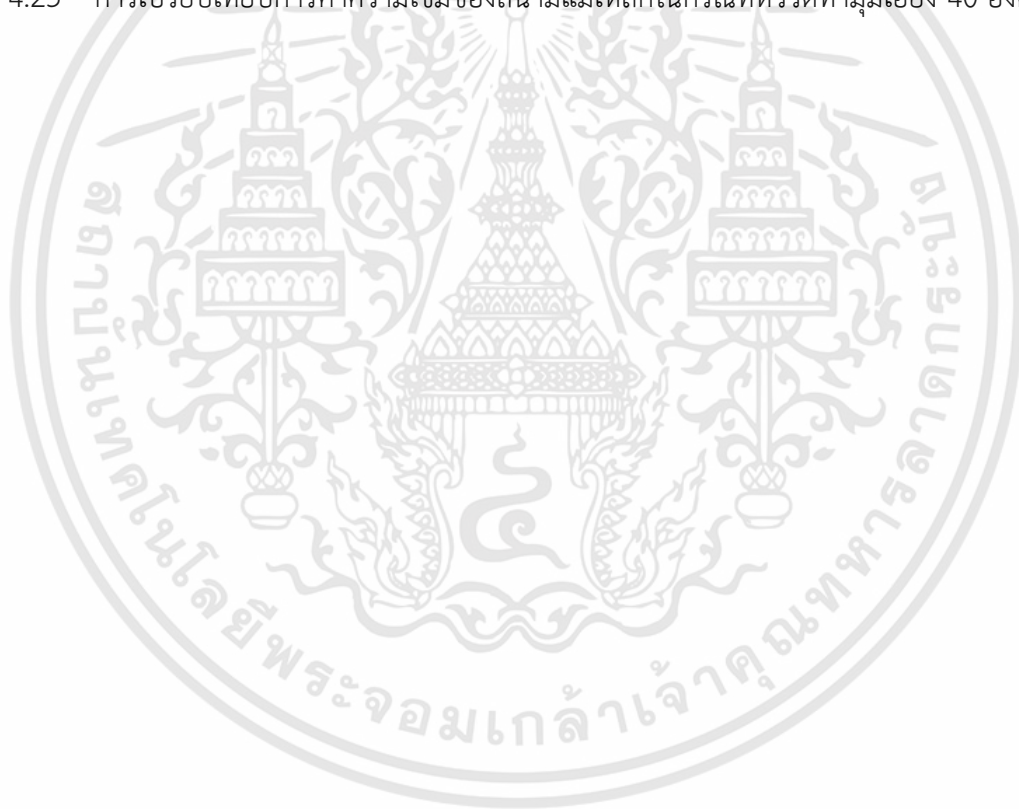
รูปที่		หน้า
1.1	กลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบเพลดพื้นฐาน.....	3
1.2	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวขนาน.....	3
2.1	การทดสอบเกี่ยวปรากฏการณ์ฮอลล์.....	5
2.2	ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในแผ่นตัวนำ.....	6
2.3	ผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับประจุพาหะภายในสารของแข็ง.....	6
2.4	ผลของสนามแม่เหล็กต่อการเคลื่อนที่ของจุดประจุ.....	8
2.5	ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นตัวนำ.....	8
2.6	การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ.....	12
2.7	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวขนาน.....	14
2.8	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวแนวตั้ง.....	15
2.9	ภาพด้านบนโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวขนานและแนวตั้ง.....	15
2.10	โครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	16
2.11	ความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x,y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย.....	18
2.12	กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \cos x$	19
2.13	กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \sin x$	19
2.14	รูปการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ.....	20
2.15	รูปแสดงการเลื่อนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์.....	21
2.16	วงจรขยายสัญญาณผลต่าง.....	22
2.17	วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว.....	25
3.1	ภาพจำลองการสร้างชั้นอะลูมิเนียมบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี.....	27
3.2	ภาพจำลองการเคลือบน้ำยาไวแสงบนชั้นอะลูมิเนียม.....	27
3.3	ภาพจำลองการฉายแสงในกระบวนการลิโทกราฟี.....	27
3.4	ภาพจำลองการเดเวลอปสารไวแสงเพื่อสร้างขั้วโลหะนำไฟฟ้า.....	28
3.5	ภาพจำลองการกัดชั้นโลหะอะลูมิเนียม.....	28
3.6	ภาพจำลองการลอกน้ำยาไวแสง.....	28
3.7	การลดความหนาของฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดโดยสารเคมี.....	29
3.8	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ได้จากกระบวนการสร้าง.....	29
3.9	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติในตัวถังไอซีแบบ MEMS PKG 8 ขา.....	30
3.10	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ (ก) ภาพขั้วโลหะนำไฟฟ้า และ (ข) ภาพตัดขวางของอุปกรณ์.....	31
3.11	พารามิเตอร์ของระยะ W,L, และ S ที่ใช้ในการออกแบบหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....	31
3.12	การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าความเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก (ก), (ข), (ค), และ (ง).....	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	ทิศของสนามแม่เหล็ก (ก) ทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) และ (ข) ทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x).....34
3.14	(ก) ภาพจำลองการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ (ข) อุปกรณ์ในการทดสอบจริง.....34
3.15	การรวมหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติเข้ากับวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์.....35
3.16	การทดสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม.....35
3.17	การทดสอบการปรับมุมเอียงของหัววัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก มากกว่าไป (ก) 10 องศา, (ข) 20 องศา, (ค) 30 องศา, (ง) 40 องศา.....37
4.1	กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C2 ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....39
4.2	กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C5 ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....39
4.3	กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโลหะนำไฟฟ้า C2 และ C5 ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....39
4.4	กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโลหะนำไฟฟ้า C3 และ C4 ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ.....40
4.5	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานของ หัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 1, 2, และ 3 ($t = 625\mu\text{m}$).....42
4.6	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานของ หัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 4, 5, และ 6 ($t = 325\mu\text{m}$).....43
4.7	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานของ หัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 7, 8, และ 9 ($t = 225\mu\text{m}$).....44
4.8	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากของ หัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 1, 2, และ 3 ($t = 625\mu\text{m}$).....45
4.9	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากของ หัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 4, 5, และ 6 ($t = 325\mu\text{m}$).....46
4.10	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากของ หัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 7, 8, และ 9 ($t = 225\mu\text{m}$).....47
4.11	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากกว่าใน แนวขนานของหัววัดสนามแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็ก -3000 ถึง 3000 เกาส์ ของโครงสร้างที่ 9.....50
4.12	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากกว่าใน แนวตั้งฉากของหัววัดสนามแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็ก -3000 ถึง 3000 เกาส์ ของโครงสร้างที่ 9.....50

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก -3000 ถึง 3000 เกาส์ ของโครงสร้างที่ 9.....51
4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มุม 0 – 180 องศา ภายใต้สนามแม่เหล็ก 3,000 เกาส์.....52
4.18	การทดสอบการวัดมุมจาก 0 ถึง 180 องศา ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติภายใต้ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 3,000 เกาส์.....53
4.19	กราฟความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กมากกระทำ.....54
4.20	การเปรียบเทียบการค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทำมุมเอียง 10 องศา.....55
4.21	การเปรียบเทียบการค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทำมุมเอียง 20 องศา.....55
4.22	การเปรียบเทียบการค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทำมุมเอียง 30 องศา.....56
4.23	การเปรียบเทียบการค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทำมุมเอียง 40 องศา.....56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำเอาคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่างๆ มากมาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม รวมถึงทางด้านการศึกษาและงานวิจัย โดยเฉพาะค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถอธิบายถึงลักษณะเฉพาะของวัสดุแม่เหล็กได้ ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวัดคุณสมบัติของแม่เหล็ก ยกตัวอย่างเช่น เกาส์มิเตอร์ (Gauss Meter), Vibrating Sample Magnetometer (VSM) เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ฮอลล์เซนเซอร์ (Hall Sensor) เป็นส่วนประกอบหลัก เพื่อใช้ในการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสำหรับการวัดปริมาณของพารามิเตอร์นี้

สำหรับหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแบนนอนที่ใช้สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กนั้น เป็นการใช้หัววัดสนามแม่เหล็กเพียงตัวเดียวสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดมากกว่าหนึ่งทิศทางนั้นเป็นไปได้ยาก และค่อนข้างมีความลำบากสำหรับการจัดวางหัววัดสำหรับการวัดให้มีตำแหน่งที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นหัววัดสนามแม่เหล็กที่สามารถตอบสนองต่อการกระทำของสนามแม่เหล็กได้มากกว่าหนึ่งทิศทางเพื่อทำให้เกิดความสะดวกในการวัดค่า และสามารถวัดค่าอย่างแม่นยำ นอกจากนี้การศึกษาสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบเพลาสองแนวแกนรวมถึงการประยุกต์ใช้งานสำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจึงเป็นสิ่งสำคัญหลังจากการสร้างหัววัดสำเร็จแล้วเพื่อให้สามารถตอบสนองได้สองมิติ

ดังนั้นในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาและออกแบบหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติโดยรวมเอาโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแบนนอน (Conventional Hall Plate) ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (Vertical Hall Sensor) ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน เข้าด้วยกันเพื่อให้มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติคือ สามารถตอบสนองต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนาน โดยมีการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขึ้นกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ที่มีความต่างเฟสกัน 90 องศาโดยสมบูรณ์ แล้วนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้หัววัดสนามแม่เหล็กสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด เพื่อใช้ในการบ่งชี้ถึงปริมาณค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ปัจจัยสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้สร้างเป็นเครื่องมือวัดที่มีความน่าเชื่อถืออันคือ ความเข้าใจถึงสมบัติและหลักการทำงานของอุปกรณ์ รวมถึงการเชื่อมต่อกับระบบที่เกี่ยวข้องสำหรับการวัดค่าได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาการประยุกต์ใช้หัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

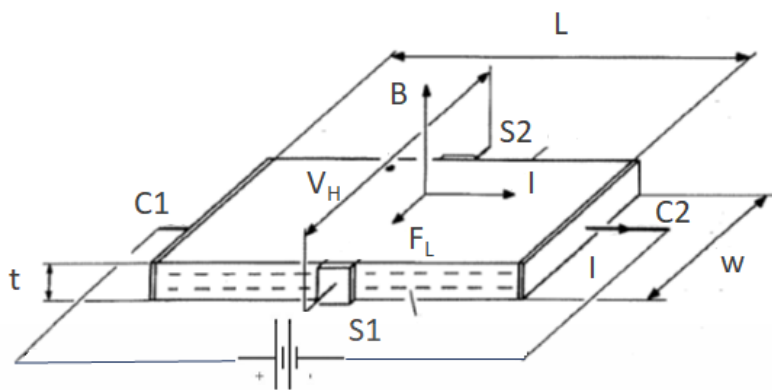
สนามแม่เหล็กแบบสองมิติ โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้น เช่น ทิศทางในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ค่าความไวในการตอบสนอง เพื่อให้สามารถนำเอาสมบัติที่ทำการศึกษาเหล่านี้ไปวิเคราะห์และนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ตลอดจนการออกแบบระบบการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กทั้งในส่วนการประมวลผลเชิงอนาล็อกที่ได้จากหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

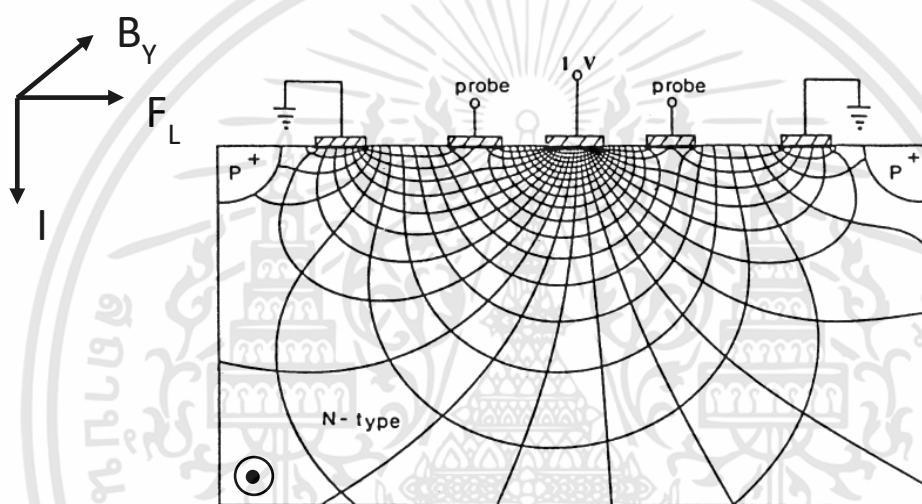
สมมติฐานของการศึกษาเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็กอยู่บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนทั้งในส่วนโครงสร้างของหัววัดและกระบวนการสร้าง ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต อีกทั้งสามารถนำมาเชื่อมต่อเพื่อประยุกต์ใช้ได้ง่าย ภายใต้สนามแม่เหล็กกระทำที่มุมต่างๆเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดสนามแม่เหล็กสัมพันธ์กับทฤษฎีตรีโกณมิติสมมติฐานสำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ อยู่บนพื้นฐานของหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง จึงได้มีการตั้งเป้าของวัตถุประสงค์เพื่อนำหัววัดที่สร้างขึ้นนี้มาศึกษาสมบัติเฉพาะตัว ทำการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างและสมบัติการตอบสนองที่เหมาะสมในการออกแบบวงจร โดยทำการออกแบบวงจรปรับปรุงสภาพสัญญาณอนาล็อก (Signal conditioner) ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองทิศทางในการตอบสนอง เพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองทิศทางที่มีความแม่นยำ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

หัววัดสนามแม่เหล็กที่ใช้กันโดยทั่วไปส่วนใหญ่อาศัยพื้นฐานของปรากฏการณ์สำหรับการอธิบายกลไกการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดในสารของแข็งกึ่งตัวนำจำพวกซิลิคอน ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเกิดได้ดังรูปที่ 1.1 ที่แสดงกลไกการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ โดยปรากฏการณ์สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กที่กระทำกับประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ เมื่อทำการให้กระแสไฟฟ้า (I) ระหว่างขั้ว C1 และ C2 ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในชั้นสารตามแนวแกน x ทำให้เกิดกระแสขึ้น เมื่อทำการสร้างสนามแม่เหล็กตั้งฉากทิศพุ่งขึ้นมากกระทำกับชั้นสารตามแนวแกน z สามารถวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วในแนวแกน y เรียกแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) ซึ่งในกรณีนี้สามารถที่จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากแนวแกน z ได้เพียงทิศทางเดียวโดยหัววัดสนามแม่เหล็กแบบเรียกว่า หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวนอน



รูปที่ 1.1 กลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวขนาน



รูปที่ 1.2 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวขนาน

ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นสำหรับหัววัดแบบแนวขนานแสดงดังรูปที่ 1.2 เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กนอกเหนือจากแนวแกน z แนวทฤษฎีเบื้องต้นของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งสองจึงมีแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างของหัววัดที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้หลายทิศทางขึ้น เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในสองมิติต่อไปได้

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางในแนวระนาบที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างสำหรับระบบการวัดแบบพื้นฐานที่อาศัยหัววัดสนามแม่เหล็กเพียงตัวเดียวเพื่อใช้ในการวัดคุณสมบัติของสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดสำหรับการวัดค่าอันเนื่องมาจากผลของมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำโดยทั่วไปเครื่องมือการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่อาศัยหัววัดเพียงตัวเดียวสำหรับตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กในหลายทิศทางนั้นเป็นไปได้ยาก จึงได้มีการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กสองมิติขึ้นเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อ

สนามแม่เหล็กได้สองทิศทาง โดยทำการออกแบบและสร้างหัววัดตลอดจนใช้เป็นหัววัดค่าความเข้มในสองมิติได้ โดยข้อได้เปรียบในการเปรียบเทียบกับการใช้หัววัดสนามแม่เหล็กแบบธรรมดาคือ สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้สองแนวแกนและทำการสอบเทียบการอ่านค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ถูกต้องในสองทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิธีการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ลดความผิดพลาดในการวัด โดยขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือทำการออกแบบและสร้างหัววัด ในการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดกับทฤษฎีตรีโกณมิติ ในการลดข้อจำกัดที่ขึ้นกับมุมของเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อหาแนวโน้มนำเอาหลักการไปประยุกต์ทำเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กได้อย่างแม่นยำ

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาสมบัติการทำงานของหัววัดฮอลล์สองมิติที่สร้างขึ้นบนเทคโนโลยีซิลิคอนมาประยุกต์ใช้บนโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กที่มีขั้วไฟฟ้าในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสองทิศทางเพียงห้าขั้ว โดยในเบื้องต้นทำการศึกษาการตอบสนองต่อทิศของสนามแม่เหล็กสองแนวแกนที่กระทำกับหัววัด โดยทำการวิเคราะห์ถึงค่าความไวในการตอบสนองแล้วทำการออกแบบวงจรเพื่อทำการปรับระดับสัญญาณให้เหมาะสมกับการอ่านค่าตลอดจนการนำไปประมวลผลคำนวณเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยค่าที่ถูกต้องในที่สุด สามารถนำเอาหลักการจากการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์สร้างเป็นหัววัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในสองทิศทางได้อย่างเหมาะสม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิด และทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของงานวิจัย และขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการสร้างหัววัด โครงสร้างทางกายภาพและการใช้งานของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ การทดสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดสนามแม่เหล็ก และการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ

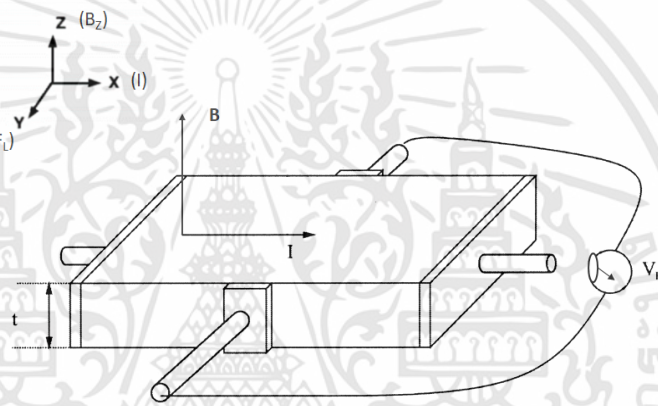
บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของหัววัด

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

2.1 ปรากฎการณ์ฮอลล์

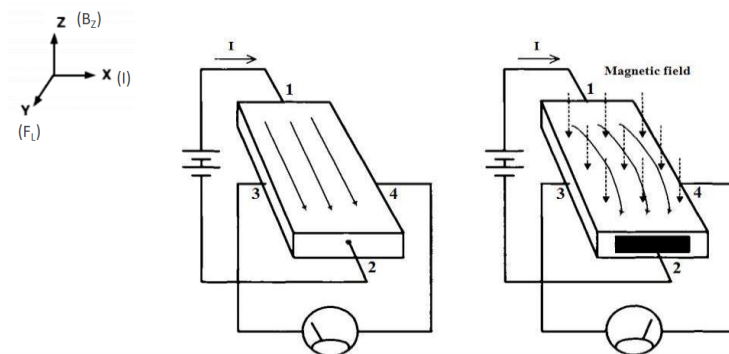
ชื่อของปรากฏการณ์นี้ถูกตั้งมาจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin H Hall) ผู้ซึ่งค้นพบปรากฏการณ์นี้ในปี ค.ศ. 1879 ตอนนั้นเขากำลังศึกษาอยู่ เขาได้พยายามที่จะพิสูจน์ว่าแม่เหล็กมีผลกระทบโดยตรงกับกระแส ซึ่งการทดลองของเขาได้ใช้โลหะตัวนำต่างชนิดกัน เช่น ทองคำ, เงิน และ เหล็ก ฯลฯ มาติดบนแผ่นกระจก ดังรูปที่ 2.1 แสดงการทดสอบเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฮอลล์ [1]



รูปที่ 2.1 การทดสอบเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฮอลล์

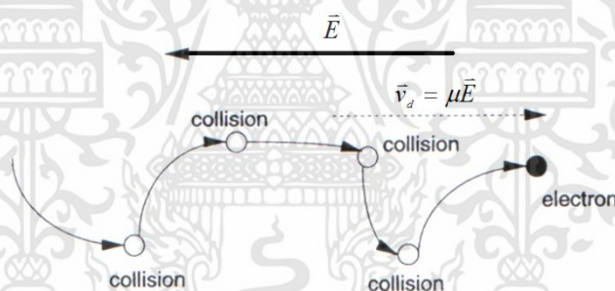
ดังนั้นผลของการทดลองพบว่าภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ผลของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ภายนอกที่กระทำกับชิ้นสารตัวนำขณะที่มีสนามไฟฟ้า (Electric field) ผลของปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงความต่างศักย์ที่ตกคร่อมชิ้นสาร

เบื้องต้นจะทำการอธิบายเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฮอลล์อย่างง่ายที่เกิดขึ้นกับโลหะชนิดตัวนำ โดยจะยกตัวอย่างเป็นทองแดงแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยทำการจ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply) ให้กับชิ้นสารในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำกับชิ้นสารนั้น เมื่อทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมชิ้นสารทางด้านข้างพบว่ามีความต่างศักย์เป็นศูนย์ จากนั้นให้สนามแม่เหล็กในทิศพุ่งกระทำกับชิ้นสารดังกล่าว ทำให้ทิศการไหลของกระแสเปลี่ยนไปซึ่งมาจากการเบี่ยงเบนของประจุไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.2 เกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างด้านทั้งสองของชิ้นสาร



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในแผ่นตัวนำ

ในการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นต้องมีความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับ ทฤษฎีของ สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า รวมถึงสมบัติของวัสดุ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ลำดับแรกจะกล่าวถึง สนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในสารของแข็งก่อน เมื่อเกิดความต่างศักย์ระหว่าง สองตำแหน่งบนชิ้นสารของแข็งซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศจากศักย์มากพุ่งไปยังศักย์น้อยแสดงดัง รูปที่ 2.3 โดยแรงที่กระทำกับจุดประจุนั้นเป็นผลเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก สมการ (2.1) [2]



รูปที่ 2.3 ผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำกับจุดประจุพาหะภายในชิ้นสารของแข็ง

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

ซึ่งการเคลื่อนที่ของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า การดริฟท์ (Drift) โดยความเร็วของ พาหะเกิดจากการชนกับพาหะนั้นๆ เรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วดริฟท์ (Drift Velocity) ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นความเร็วดริฟท์เฉลี่ย หรือ ความเร็วเฉลี่ยของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้าในสารของแข็งมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.2)

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

สำหรับในกรณีของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของประจุโดยจะขึ้นกับฟังก์ชันความเร็วของประจุพาหะ ความเข้มสนามแม่เหล็ก และทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับประจุ สามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ (2.3)

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

การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ต้องมีความเข้าใจถึงอนุภาค เช่น อิเล็กตรอน ที่มีการเคลื่อนที่ภายใต้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้านี้ส่งผลต่อจุดประจุสามารถอธิบายได้จากสมการ (2.4)

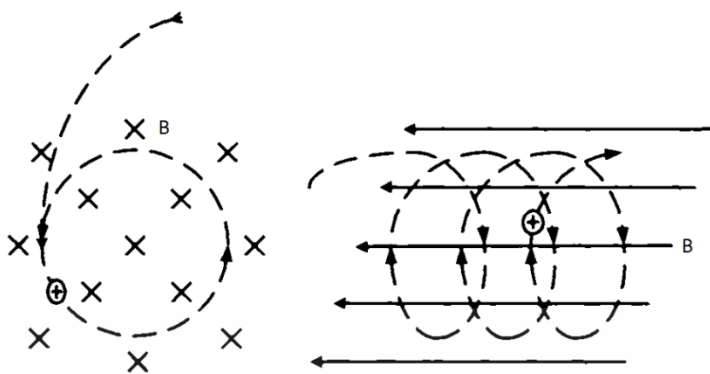
$$F = -qE + qvB \sin \theta \quad (2.4)$$

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

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

ในกรณีของสนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดแรงทางไฟฟ้ากระทำกับจุดประจุ เกิดการเคลื่อนที่ของประจุพาหะและเกิดกระแสภายในชิ้นสารขึ้น ซึ่งแรงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดของประจุไฟฟ้าและปริมาณความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า

สำหรับในส่วนที่สองเป็นการแสดงการตอบสนองของประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้การเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงเป็นแนวโค้งหรือหมุนเป็นเกลียว แสดงให้เห็นดังรูป 2.4 ซึ่งขึ้นกับความสัมพัทธ์ระหว่างความเร็วกับสนามแม่เหล็ก



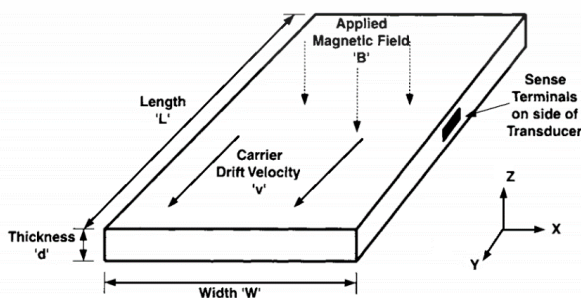
รูปที่ 2.4 ผลของสนามแม่เหล็กต่อการเคลื่อนที่ของจุดประจุ

ในกรณีของประจุพาหะที่เคลื่อนที่ในชั้นสารฮอลล์ ความเร็วของประจุพาหะจะมีความหนาแน่นไปในทิศทางหนึ่งของวัสดุดังรูปที่ 2.5 โดยขั้วที่ใช้ต่อกันมาเพื่อวัดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กนี้ จะถูกต่อคร่อมขึ้นสารโดยกำหนดให้พาหะมีความเร็วเคลื่อนที่ไปในแนวแกน x ($v_y = 0$ m/s, $v_z = 0$ m/s) และผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เกิดขึ้นในแนวแกน x แสดงถึงแรงสนามแม่เหล็กที่กระทำกับจุดประจุในแนวแกน x ดังสมการ (2.5)

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

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

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



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 สามารถหาสนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field) จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กดังสมการ (2.6)

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

โดยที่ E_H คือสนามไฟฟ้าฮอลล์ ที่เกิดในชิ้นสาร E_H จะมีค่าตามสมการ

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

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

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

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

1. ความเร็วของจุดประจุสำหรับชิ้นสารใด ๆ
2. ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้กับชิ้นสาร
3. ระยะของขั้วต่อที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก

2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในโลหะ

ค่าความไว (Sensitivity) ของวัสดุฮอลล์ เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้รู้ถึงความเร็วเฉลี่ยของพาหะสภาวะของอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ เป็นผลมาจากพลังงานความร้อน (Thermal Velocity) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) เป็นความเร็วอันเนื่องมาจากความร้อนมีผลเป็นอย่างมากต่ออิเล็กตรอน การเคลื่อนที่แบบสุ่มนี้จะนำไปเฉลี่ยเป็นความเร็วสุทธิ ค่าความเร็วรวมที่ได้จึงเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จะทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน เมื่อมีค่าสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นให้กับวัสดุฮอลล์ที่เป็นโลหะ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งไปในแนวทิศของสนามไฟฟ้า ที่มีค่ามากกว่าการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากพลังงานความร้อน ดังนั้นอัตราการเคลื่อนที่ของพาหะที่เกิดจากสนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า “ความเร็วดริฟท์” ในกรณีที่เป็นโลหะนำไฟฟ้าอย่างดีสามารถที่จะประมาณค่าได้ ในขั้นแรกจะทำการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับกรณีของโลหะ เช่น ทองแดงสามารถประมาณได้ว่าอะตอมของทองแดงมีอิเล็กตรอนชั้นวงนอกสุดที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสซึ่งความหนาแน่นของประจุพาหะมาจากผลของปริมาณอะตอมของทองแดงต่อหน่วยน้ำหนักสามารถคำนวณได้จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ สามารถประมาณค่าความเร็วดริฟท์ของพาหะได้จาก กระแสที่อยู่ในหน่วยแอมแปร์ สมมุติให้ค่าความหนาแน่นของพาหะเป็นค่าคงที่ และเพิ่มปริมาณพาหะ ในระบบได้ ความเร็วของพาหะจะแปรผันกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ยิ่งพื้นที่หน้าตัดมีค่ามาก ค่า ความเร็วเฉลี่ยของพาหะลดลง ดังนั้นความเร็วดริฟท์ของพาหะสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.10)

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

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

เมื่อพิจารณาถึงความเร็วของพาหะดังตัวอย่างพบว่าจะมีความเร็วช้ากว่าความเร็วแสง เมื่อ ทำการรวมสมการ (2.8) และ (2.10) สามารถที่จะพิสูจน์เพื่อใช้ในการอธิบาย ค่าความไวในการ ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับพื้นที่หน้าตัด กระแสและความหนาแน่นของพาหะหาได้ตามสมการ (2.11)

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

โดยที่	d	คือ ความหนาของชั้นสารตัวนำ
--------	-----	----------------------------

ซึ่งในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้ โลหะเพื่อสร้างเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่อยู่บนพื้นฐานของ ปรากฏการณ์ฮอลล์เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในวัสดุสารกึ่งตัวนำ

สำหรับวัสดุศาสตร์ที่จำแนกประเภทตามคุณสมบัติทางไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็นสาม ประเภท คือ ตัวนำ ฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในกรณีที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นิยมใช้สารกึ่งตัวนำ เป็นหลักวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ เช่น ซิลิกอน (Si) ,เยอรมันเนียม(Ge), แกลเลียม(Ga) เนื่องจากวัสดุ ชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวนำและฉนวนอย่างชัดเจน กล่าวคือ ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

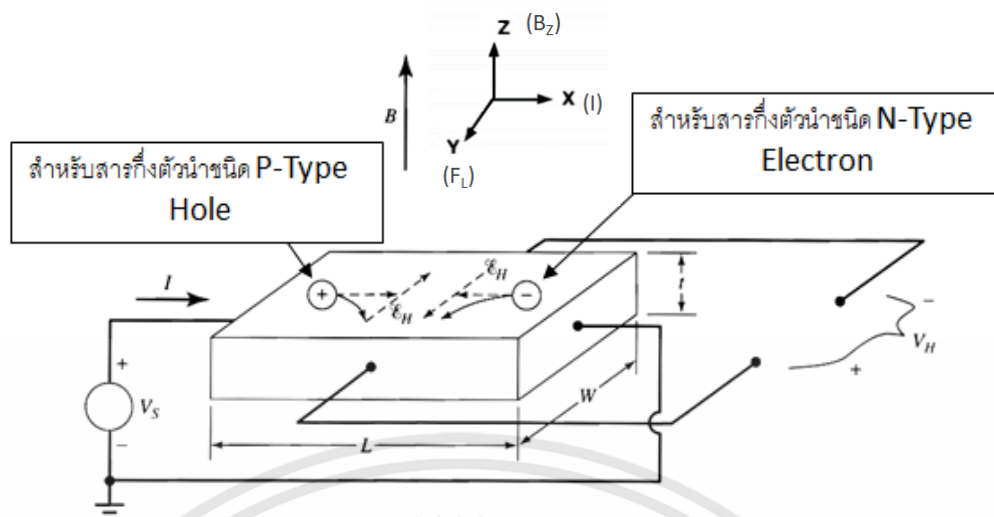
การเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าขึ้นกับอุณหภูมิและแสงจากภายนอกที่มากระทำในวัสดุ โดยวัสดุชนิดนี้เมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือที่เหมาะสมคุณสมบัติการนำไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คุณสมบัติดังกล่าวที่มีความเหมาะสมสำหรับทำการสร้างเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางฟิสิกส์ในธรรมชาติ เช่น แสง อุณหภูมิ เป็นต้น รวมถึงการวัดปริมาณความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็ก ที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์มาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดสนามแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิค (Intrinsic semiconductor) และสารกึ่งตัวนำเอ็กทรีนซิค (Extrinsic Semiconductor) ด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันนี้ ซึ่งสารกึ่งตัวนำเอ็กทรีนซิคมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่า และสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) และ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) โดยจะทำการวิเคราะห์ในเรื่องของความหนาแน่นของพาหะที่มีผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเป็นหลัก

ปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของแรงภายนอกกระทำกับจุดประจุ (Charge) ที่เคลื่อนที่โดยแรงที่กระทำนี้เนื่องจากสนามแม่เหล็ก โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของจุดประจุ เขียนได้ตามสมการ (2.3) โดยผลของเวกเตอร์ที่เกิดขึ้น เกิดจาก Cross product ซึ่งปริมาณเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามทิศทางของมุมสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ตามฟังก์ชันไซน์

ผลของปรากฏการณ์ฮอลล์แสดงให้เห็นตามแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 2.6 สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมธาตุอื่น ซึ่งจะประกอบไปด้วยพาหะส่วนใหญ่หนึ่งชนิด ตามอะตอมธาตุสารเจือที่ใช้ โดยจะทำการพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือ พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนกับโฮล ดังรูปที่ 2.6

จากสมการ (2.3) แสดงให้เห็นถึงผลของกระแสต่อประจุพาหะโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสาร โดยมีแรงจากสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของประจุพาหะทั้งสอง ในสภาวะคงตัว ด้วยแรงจากสนามแม่เหล็กที่สมดุลนี้เป็นผลทำให้จุดประจุเคลื่อนที่อีกทิศทางหนึ่ง การกระจายตัวของพาหะจึงเปลี่ยนไป เกิดเป็นการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งขึ้น โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field; \mathcal{E}_H) [4] เมื่อทำการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของความกว้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ผลที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากพื้นผิวรอยสัมผัสตรงกันข้ามกันของชั้นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ขึ้นกับรูปแบบของชั้นสารและสนามแม่เหล็กที่กระทำเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์และความกว้างของชั้นสาร (W) ;

$$V_H = \mathcal{E}_H W$$



รูปที่ 2.6 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

ในรูปที่ 2.6 กระแสที่ไหลในชั้นสารแนวแกน x ที่เกิดจากความต่างศักย์ V_s เป็นผลทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกับกระแส ในกรณีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทางตรงกันข้าม โดยที่พาหะทั้งสองมีค่าประจุที่ต่างกันทำให้เกิดทิศของความเร็วที่ตรงกันข้าม เมื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้กับชั้นสารในแนว $+z$ แรงแม่เหล็กกระทำกับประจุทั้งสองส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปทิศเดียวกันในแนวแกน y แต่เนื่องจากค่าประจุทั้งสองตรงข้ามกัน ทำให้เกิดแรงดันที่มีขั้วต่างกัน เรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะข้างมากต่างกัน คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

สำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ทฤษฎีอย่างง่ายที่แสดงกลไกการเกิดดังรูปที่ 2.6 โดยแสดงให้เห็นการไปโฮลกระแสให้กับชั้นสารในแนวแกน x แล้วป้อนสนามแม่เหล็กในแนวแกน z สนามไฟฟ้าฮอลล์ จะเกิดขึ้นในแนวแกน y ซึ่งกรณีที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สนามไฟฟ้าฮอลล์จะเกิดในทิศตรงกันข้าม เมื่อพิจารณากระแสพาหะจะทำให้เกิดความเร็วค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ความเร็วดริฟท์ (v_d) โดยความเร็วดริฟท์จะสัมพันธ์กับขนาดของกระแสสำหรับพาหะที่เป็นโฮลแสดงดังสมการ (2.12)

$$v_d = \frac{J_x}{qp} \quad (2.12)$$

สำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนจะได้

$$v_d = \frac{J_x}{qn} \quad (2.13)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าฮอลล์สามารถอธิบายในเทอมของกระแสและสนามแม่เหล็กสำหรับพาหะที่เป็นโฮลตามสมการ (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_H = \frac{J_x B_\perp}{qp} \quad (2.14)$$

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนเขียนได้เป็น

$$\varepsilon_H = -\frac{J_x B_\perp}{qn} \quad (2.15)$$

ส่วนปริมาณของแรงสนามแม่เหล็กกับแรงสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เท่ากันเขียนได้ว่า

$$q\varepsilon_H = qV_d B_\perp \quad (2.16)$$

เขียนใหม่ได้ว่า

$$\varepsilon_H = R_H J_x B_\perp \quad (2.17)$$

เมื่อ R_H คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์(Hall coefficient) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/qp$ สำหรับโฮลและเท่ากับ $-1/qn$ สำหรับอิเล็กตรอน ซึ่งในสมการ (2.17) สามารถที่จะคำนวณการเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ได้อย่างแม่นยำ ถ้าสามารถเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ ได้อย่างเหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ที่มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของประจุพาหะ ซึ่งจะทำให้เกิดพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอีกคือ r เพื่อที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้องสำหรับพาหะที่เป็นโฮลตามสมการ (2.18)

$$R_H = \frac{r}{qp} \quad (2.18)$$

และสำหรับพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนตามสมการ (2.19)

$$R_H = -\frac{r}{qn} \quad (2.20)$$

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

แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) ที่ได้ เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ (ε_H) และระยะความกว้างของชิ้นสาร (w) พิจารณาในเทอมของกระแสรวมได้ดังสมการ (2.21)

$$V_H = \frac{R_H IB_\perp}{t} \quad (2.21)$$

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

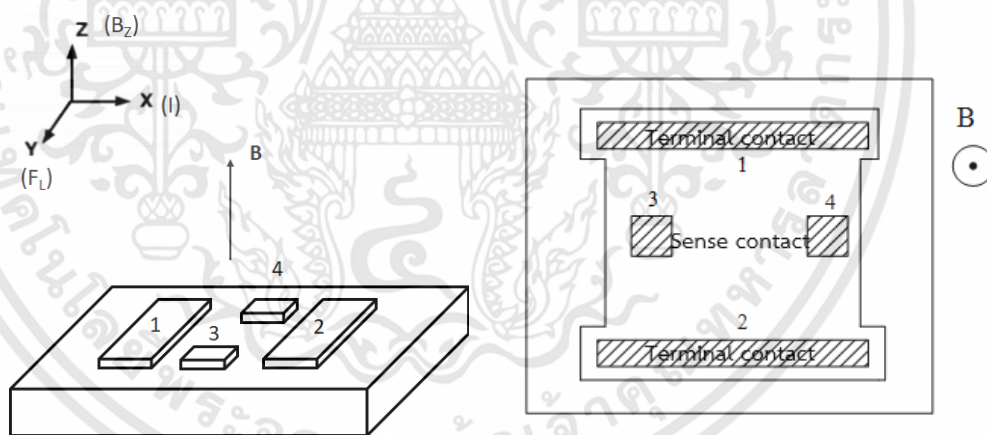
จากสมการ (2.21) สำหรับสารกึ่งตัวนำใด ๆ ที่ไม่ทราบชนิด สามารถทราบค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ที่สนามแม่เหล็กและกระแสค่าหนึ่ง ส่วนชนิดของพาหะและค่าความหนาแน่นของพาหะสามารถรู้ได้เมื่อทราบค่าของกระแส ค่าสภาพความนำไฟฟ้าและค่าความคล่องตัวของฮอลล์ ($\mu = \sigma |R_H|$) เพื่อใช้ในการคำนวณในสมการ (2.18) กับ (2.19) [9-14]

2.4 การตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างพื้นฐานของหัววัดสนามแม่เหล็กนั้นจะมีสองแบบด้วยกันคือ แบบแนวนอนและแบบแนวตั้ง ซึ่งหัววัดสนามแม่เหล็กแต่ละแบบนี้จะมีการตอบสนองต่อทิศของสนามแม่เหล็กที่มากระทำกับหัววัดที่แตกต่างกัน

2.4.1 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวนอน (Horizontal Type) หรือแบบเพลตพื้นฐาน

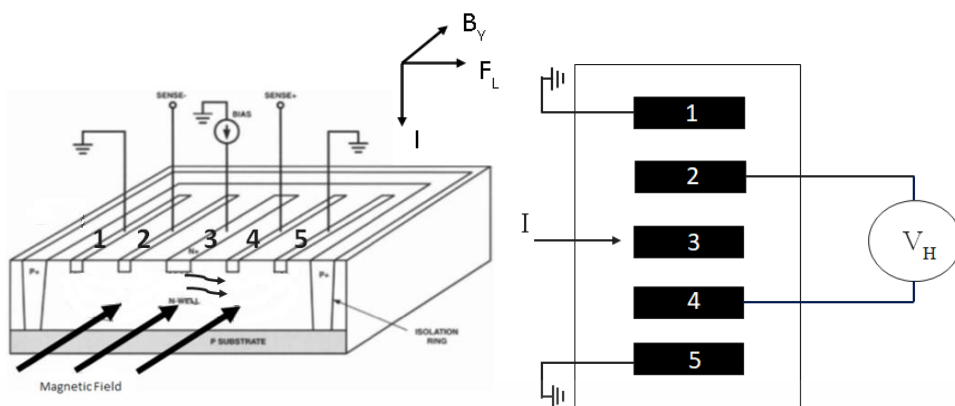
หัววัดชนิดนี้เป็นโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กโดยทั่วไปที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการวัดสนามแม่เหล็กมากที่สุด ซึ่งหัววัดชนิดนี้จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มากระทำตั้งฉากกับหัววัดแสดงดังรูปที่ 2.7 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉาก โดยทำการจ่ายกระแสไปยังขั้วที่ 1 ให้ไหลในเนื้อสารไปยังขั้วที่ 2 จากนั้นทำการวัดค่าความต่างศักย์ฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วที่ 3 และ 4



รูปที่ 2.7 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวนอน

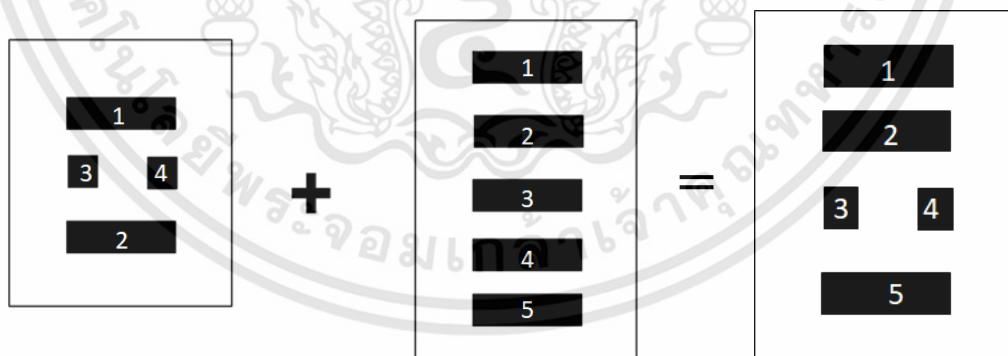
2.4.2 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (Vertical Type)

หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดนี้จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศที่สนามแม่เหล็กมากระทำในทิศขนานเท่านั้นแสดงดังรูปที่ 2.8 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวขนาน โดยทำการจ่ายกระแสไปยังขั้วที่ 3 ให้ลงไปยังเนื้อสารและต่อกราวด์ตรงขั้วที่ 1 และ 5 จากนั้นวัดค่าความต่างศักย์ฮอลล์ระหว่างขั้วที่ 2 และ 4



รูปที่ 2.8 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

ตามหลักการแล้วหัววัดสนามแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ต้องสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage) จึงสามารถที่จะนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาเปรียบเทียบกับวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ แต่เนื่องด้วยแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ขึ้นกับมุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กตามฟังก์ชันไซน์ (Sine function) ดังนั้นการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจะได้ค่าที่ถูกต้องที่สุดเส้นแรงสนามแม่เหล็กต้องกระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กเป็นมุม 90 องศา ซึ่งหากทำการวัดโดยวางหัววัดสนามแม่เหล็กไม่ทำมุมตั้งฉากทำให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กผิดพลาด ปัญหาข้างต้นนี้จึงเป็นข้อจำกัดสำคัญของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ส่งผลให้กับความแม่นยำของหัววัดลดลง ดังนั้นหัวข้อนี้จึงนำโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติมาแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยนำโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้งและแบบแนวขนานมาประยุกต์ใช้งานร่วมกัน แสดงดังรูปที่ 2.9 ภาพด้านบนโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉากและแบบแนวขนาน [1-7]

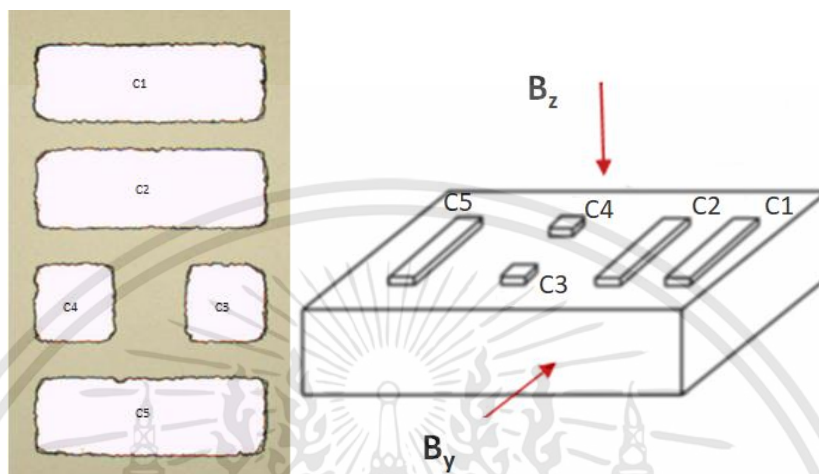


รูปที่ 2.9 ภาพด้านบนโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวขนานและแนวตั้ง

จากนั้นได้นำโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวขนานและแนวตั้งมาสร้างในระนาบเดียวกันบนฐานรอง แสดงดังรูปที่ 2.10 โครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ โดยหลักการทำงานของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ คือ ทำการจ่ายกระแสไปยังขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1, C2 และกราวด์ C5 เป็นผลทำให้ประจุไหลเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกับกระแสในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และในกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เป็นสารเอ็นประจุพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ไปในทิศตรงกันข้ามกับกระแส เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศ B_x สามารถวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นได้ตรงระหว่างขั้ว C1 และ C2 และอีกกรณีสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศ B_z สามารถวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นได้ตรงระหว่างขั้ว C3 และ C4 โดยสามารถวัดสนามแม่เหล็กที่มากระทำได้ทั้งสองแนวแกนในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

2.5 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อบ่งบอกประสิทธิภาพของหัววัดสนามแม่เหล็กสามารถหาค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ 2 แบบคือ ค่าความไวสัมบูรณ์ (absolute sensitivity) และ ค่าความไวสัมพัทธ์ (relative sensitivity) [1] ค่าความไวสัมบูรณ์ของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถหาได้โดยสมการที่ 2.22

$$S_A = \left. \frac{V_H}{B_{\perp}} \right|_C \quad (2.22)$$

โดยที่ V_H คือ แรงดันฮอลล์
 B คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
 C คือ เงื่อนไขการทำงาน เช่น อุณหภูมิ, ความถี่ และ กระแสไบอัส

สำหรับหัววัดสนามแม่เหล็กค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับกระแสและค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเป็นสิ่งที่น่าสนใจในศึกษา โดยค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับกระแส (current-related sensitivity) ของอุปกรณ์สามารถหาได้โดย

$$S_I = \frac{S_A}{I} = \left| \frac{1}{I} \cdot \frac{V_H}{B_{\perp}} \right| \quad V_H = S_I B_{\perp} \quad (2.23)$$

โดยที่ I คือกระแสไบอัสของหัววัดสนามแม่เหล็กหน่วยของ SI คือ $VA^{-1}T^{-1}$ สามารถแสดงสมการได้โดย

$$S_I = G_H \frac{|R_H|}{t} \quad (2.24)$$

ในกรณีที่ฐานรองเป็นเอ็กทรินซิคอย่างมาก สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและสัมประสิทธิ์ได้โดย

$$S_I = G_H \frac{r_H}{qnt} \quad (2.25)$$

โดยที่ G_H คือ พารามิเตอร์โครงสร้าง
 r_H คือ แฟคเตอร์ฮอลล์ของพาหะส่วนมาก
 n คือ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในหัววัดสนามแม่เหล็ก
 t คือ ความหนาของเพลท

ค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับกระแสแทบจะไม่ขึ้นกับวัสดุของเพลท ตั้งแต่ $r_H \approx 1$ นั่นคือไม่คำนึงถึงวัสดุ ค่าความไว S_I ระหว่าง 50 ถึง 500 $VA^{-1}T^{-1}$ ค่าความไวสูงสุด S_I ที่มีการศึกษาคือ $S_I = 3100 VA^{-1}T^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับค่า $N_s = 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ อย่างเช่นความหนาแน่นของประจุพาหะมีค่าต่ำในชั้นแอ็คทิฟของอุปกรณ์ฮอลล์จะไม่มีผลเพราะว่าความแข็งแรงภายในของประจุพาหะที่อยู่บนพื้นผิวและผลของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ

ค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าสามารถหาได้โดยสมการที่ 2.34

$$S_V = \frac{S_A}{V} = \left| \frac{1}{V} \cdot \frac{V_H}{B_{\perp}} \right| = \frac{S_I}{R_m}; V_H = S_V V B_{\perp} \quad (2.26)$$

โดยที่ หน่วยของ S_V คือ ต่อเทสลาร์ ($VV^{-1}T^{-1} = T^{-1}$) สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความไม่บริสุทธิ์สูง โดยจะได้สมการที่ 2.27

$$S_V = \mu_H \frac{w}{l} G_H \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ μ_H คือสภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอนของพาหะส่วนมาก $\frac{W}{l}$ เป็นอัตราส่วนความกว้างและความยาวของเพลทที่เคลือบพื้นผิว และ G_H คือพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับโครงสร้างของแรงดันฮอลล์

ค่าของความไวที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าคือ $S_V = 0.07 T^{-1}$ สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอน, $S_V = 0.2 T^{-1}$ สำหรับแกเลียมอาร์เซไนด์ และ $S_V = 3 T^{-1}$ สำหรับอินเดียมอาร์เซไนด์ ค่าความไวสูงขึ้นตามการลดลงในความยาวของอุปกรณ์

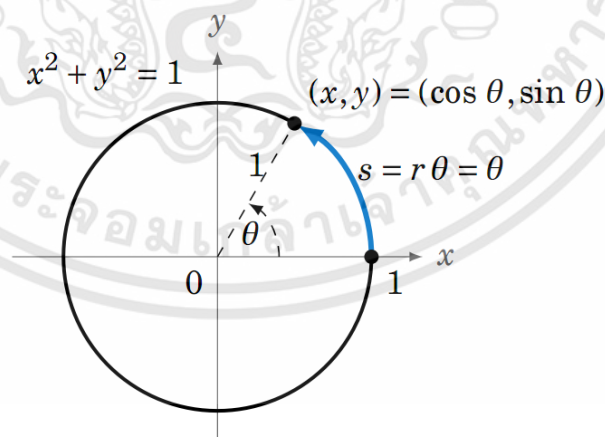
2.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ

2.6.1 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ฟังก์ชันตรีโกณมิติ [18] คือ ฟังก์ชันของมุม ซึ่งมีความสำคัญในการศึกษารูปสามเหลี่ยมและปรากฏการณ์ในลักษณะเป็นคาบ โดยสามารถอธิบายฟังก์ชันตรีโกณมิติได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x,y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย (Unit circle) ดังแสดงไว้ในสมการที่ (2.28)

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

จากสมการที่ 2.28 คือสมการของวงกลมหนึ่งหน่วย ซึ่งรัศมีของวงกลมยาวเท่ากับ 1 หน่วย และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด สมการของวงกลมหนึ่งหน่วยแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของจุดที่อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยซึ่งมีพิกัดเป็น $(x, y) = (\cos \theta, \sin \theta)$ โดยขึ้นอยู่กับมุมจากจุดกำเนิดกระทำกับแกน x ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ในระบบพิกัด (x,y) ของวงกลมหนึ่งหน่วย

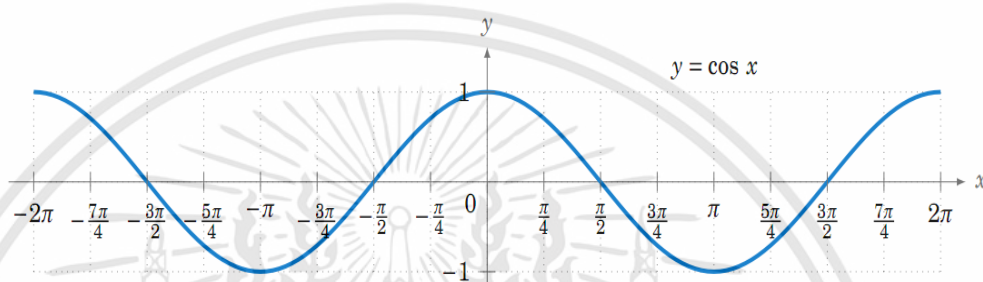
จากรูปที่ 2.11 จะพบว่า จุดใด ๆ บนวงกลมหนึ่งหน่วยจะมีพิกัดในแกน x เป็น $\cos \theta$ และมีพิกัดในแกน y เป็น $\sin \theta$ โดยจะแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 พิกัดในแกน x เป็น $\cos \theta$ จะสามารถเขียนพิกัดของจุดบนวงกลมหนึ่งหน่วยสำหรับแกน y ได้ โดยใช้สมการฟังก์ชันโคไซน์ $y = f(\theta) = \cos \theta$ โดยที่ θ เป็นความยาวส่วนโค้งหรือมุมที่จุดศูนย์กลางของวงกลมหนึ่งหน่วย

สำหรับฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine Function) เมื่อทำการเขียนกราฟในระบบพิกัด (x,y) โดยให้แกน x แทนมุมที่กระทำอยู่ในช่วง $(-2\pi, 2\pi)$ จะได้สมการฟังก์ชันโคไซน์เป็น $y = \cos x$ ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.29 และรูปที่ 2.12 ดังนี้

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

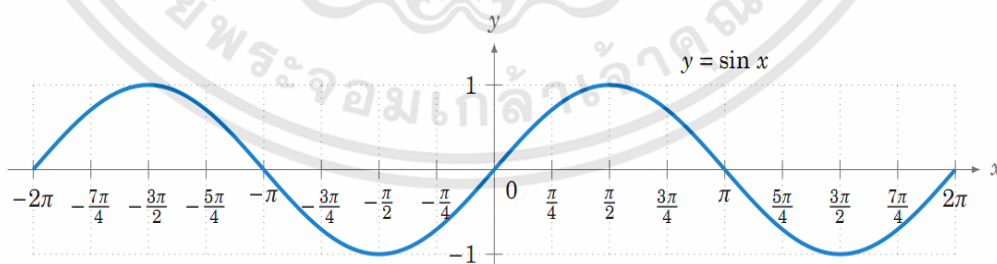


รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันโคไซน์ $y = \cos x$

กรณีที่ 2 พิกัดในแกน y เป็น $\sin \theta$ จะสามารถเขียนพิกัดของจุดบนวงกลมหนึ่งหน่วยสำหรับแกน x ได้ โดยใช้สมการฟังก์ชันไซน์ $y = f(\theta) = \sin \theta$ โดยที่ θ เป็นความยาวส่วนโค้งหรือมุมที่จุดศูนย์กลางของวงกลมหนึ่งหน่วย

สำหรับฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) เมื่อทำการเขียนกราฟในระบบพิกัด (x,y) โดยให้แกน x แทนมุมที่กระทำอยู่ในช่วง $(-2\pi, 2\pi)$ จะได้สมการฟังก์ชันไซน์เป็น $y = \sin x$ ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.30 และรูปที่ 2.13 ดังนี้

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



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ของฟังก์ชันไซน์ $y = \sin x$

เมื่อนำสมการฟังก์ชันโคไซน์ (2.43) และสมการฟังก์ชันไซน์ (2.44) แทนค่าลงในสมการวงกลมหนึ่งหน่วย (2.31) จะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.31 จะพบว่า ค่ามุม (θ) มีค่าเป็นจำนวนใด ๆ ได้ทุกค่า

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.12 และ 2.13 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง $\cos 0^\circ$ จะมีค่าเท่ากับ $\sin 90^\circ$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันโคไซน์กับฟังก์ชันไซน์มีความต่างเฟสกันอยู่ 90° โดยอธิบายความสัมพันธ์ได้ตามสมการ (2.32)

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

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค่ามุมของครึ่งวงกลมเท่านั้น นั่นคือ ศึกษาค่าของมุมตั้งแต่ 0° ถึง 180°

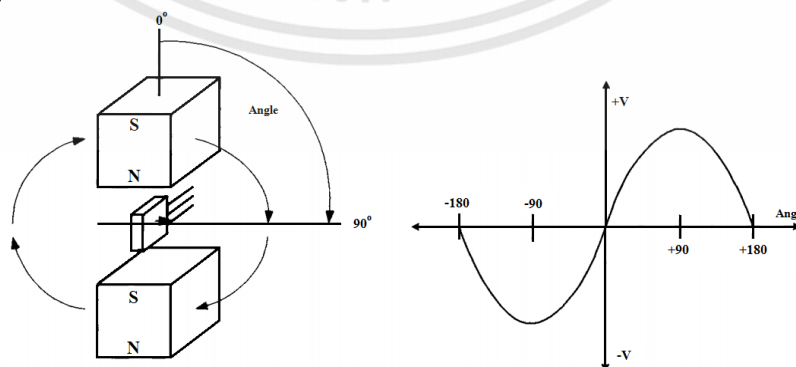
2.6.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ตามฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ผลของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อจุดประจุในสารกึ่งตัวนำนั้นสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.3) ซึ่งปริมาณเวกเตอร์ของแรงที่เกิดขึ้นนี้จะแปรผันตามมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับจุดประจุเป็นฟังก์ชันไซน์ เมื่อทดลองการเปลี่ยนตำแหน่งโดยการหมุนสนามแม่เหล็กรอบหัววัดฮอลล์ที่อยู่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการหมุน ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์ในมุมต่างๆพบว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ดังสมการ (2.33)

$$V_H = k_1 \sin \theta \quad (2.33)$$

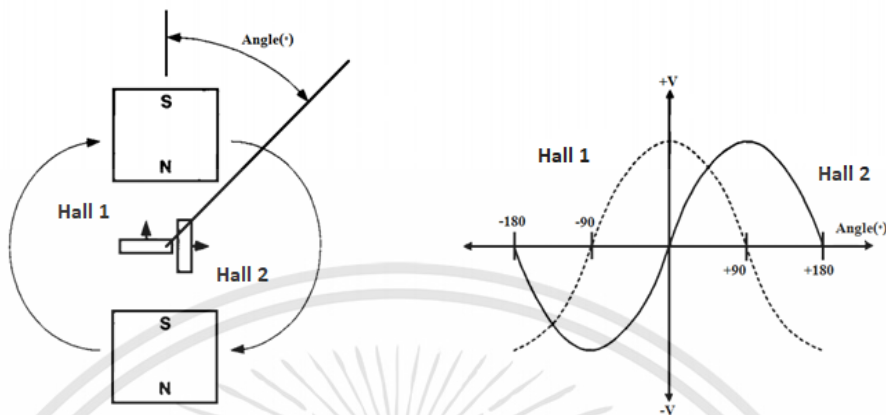
โดยค่า k_1 เป็นค่าคงที่

เมื่อพิจารณาในรูป 2.14 แสดงการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เปลี่ยนเป็นมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำในวัสดุฮอลล์ ดังนั้นตำแหน่งแรกที่ศูนย์กลางคือที่ศูนย์กลางของวง วัสดุฮอลล์ถูกวางให้ด้านกระทำ (active area) ไว้ที่ตำแหน่งขนานกับแนวเส้นแรงสนามแม่เหล็กนั่นคือ เส้นแรงแม่เหล็กทำมุมศูนย์กลางกับวัสดุฮอลล์ ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้จึงมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งให้เส้นแรงแม่เหล็ก กระทำเป็นมุมตั้งฉาก (90°) กับวัสดุฮอลล์ ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นจะได้ค่าสูงสุด [15]



รูปที่ 2.14 รูปการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำกับฮอลล์ที่มุมต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเมื่อนำฮอลล์เซนเซอร์สองตัวมาวางแนวตั้งฉากในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มเท่ากัน มุมของเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำตรงตำแหน่งแรกของฮอลล์เซนเซอร์ต่างกันว่า 90° ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 รูปแสดงการเลื่อนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับฮอลล์

นั่นคือ เส้นแรงแม่เหล็กกระทำในฮอลล์เซนเซอร์ตัวแรกที่มีมุม 90° ส่วนฮอลล์เซนเซอร์ตัวที่สองทำมุม 0° จึงประมาณได้ว่าที่ตำแหน่งแรก ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เซนเซอร์ตัวที่หนึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ ดังสมการ (2.33) และค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เซนเซอร์ที่ตำแหน่งแรกของตัวที่สองเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ตามสมการ (2.34)

$$V_{H2} = k_2 \cos\theta \tag{2.34}$$

โดยที่ค่า k_2 เป็นค่าคงที่ของฮอลล์ตัวที่ 2

จากสมการ (2.33) และ (2.34) ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ จะขึ้นกับมุมของเส้นแรงที่แม่เหล็กกระทำกับวัสดุฮอลล์ โดยมีความสอดคล้องกับฟังก์ชันตรีโกณมิติ แต่สำหรับการวัดความเข้มที่สนามแม่เหล็ก สามารถที่จะอธิบายในรูปแบบของวงกลมหนึ่งหน่วยได้ตามสมการ (2.34) ดังนั้นการแก้สมการตรีโกณมิติเพื่อหาค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ความเข้มแม่เหล็กค่าต่างๆ เมื่อ $k_1 = k_2 = k$ จะได้ตามสมการ (2.35)

$$\sqrt{(V_{H1})^2 + (V_{H2})^2} = k \tag{2.35}$$

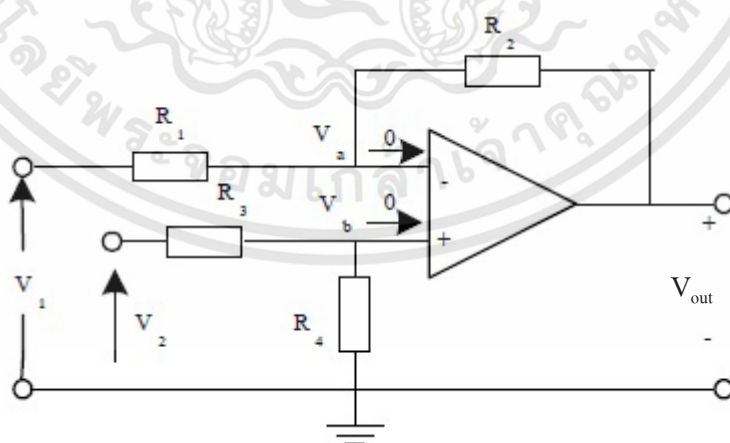
โดยที่ค่า k เป็นค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในระบบการวัด

2.7 วงจรขยายสัญญาณโดยใช้วงจรรวมอินสตรูเมนต์

ออปแอมป์ (Operational Amplifier : INA333) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกพัฒนามาจาก ทรานซิสเตอร์โดยจะถูกผลิตอยู่ในรูปของวงจรรวม (Integrated Circuit) หรือที่เรียกสั้นๆว่า ไอซี ในปัจจุบันออปแอมป์ [10] ได้รับความนิยมในการใช้งานมาก เนื่องจากวงจรหนึ่งๆนั้นจะใช้อุปกรณ์ภายนอกต่อร่วน้อยมาก ด้วยจุดประสงค์ในการสร้างออปแอมป์ คือ ต้องการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยายสูงและสามารถใช้ขยายแรงดันได้ทั้งไฟตรงและไฟสลับ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ง่ายต่อการทำงานทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Operation) เช่น การบวก การลบ การคูณ หรือการหาร เป็นต้น สามารถขยายขอบเขตการใช้งานออปแอมป์ไปใช้งานด้านอื่น เช่น วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรรักษาแรงดัน วงจรกรองความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรตั้งเวลาและอื่นๆอีกมากมาย วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก วงจรขยายสัญญาณในรูปแบบต่างๆนี้เป็นวงจรพื้นฐานสำคัญที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งในระบบประมวลผลสัญญาณต่างๆมากมาย เช่น ทำหน้าที่ขยายสัญญาณในภาคอินพุตของระบบวัด ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณอนาล็อกในระบบสื่อสารหรือแม้กระทั่งทำหน้าที่ปรับแต่งสภาพสัญญาณ เชื่อมต่อสัญญาณ และควบคุมกระบวนการในระบบควบคุม เป็นต้น

2.7.1 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

การขยายผลต่าง คือ วงจรที่ใช้ในการขยายความแตกต่างของสัญญาณระหว่างขาต้านเข้าทั้งสอง ซึ่งจะตรงข้ามกับหัวข้อการขยายแบบรวมสัญญาณที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังมีลักษณะคล้ายหรือเกี่ยวข้องกับการขยายสำหรับเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier) อันเป็นวงจรรขยายที่มีประโยชน์และนิยมใช้มาก [12],[13]



รูปที่ 2.16 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูปที่ 2.16 และใช้ข้อกำหนดของออปแอมป์ที่กล่าวว่ามีกระแสไหลเข้า ขั้วด้านขาเข้าของออปแอมป์ เช่น เดิมเราประยุกต์ใช้กฎกระแส KCL (Kirchhoff current law) ที่จุด a เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{V_1 - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_{out}}{R_2} \quad (2.36)$$

หรือ

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_a - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) V_1 \quad (2.37)$$

ที่จุด b ใช้กฎกระแส KCL จะได้

$$\frac{V_2 - V_b}{R_3} = \frac{V_b - 0}{R_4} \quad (2.38)$$

หรือ

$$V_b = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \quad (2.39)$$

เมื่อ $V_a = V_b$ แทนสมการ (2.38) ลงในสมการ (2.37) จะได้สมการ

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.40)$$

หรือ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{\frac{R_2}{R_1} + 1}{\frac{R_3}{R_4} + 1} \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.41)$$

เมื่อแรงดัน $V_1 = V_2$ วงจรขยายต้องให้แรงดันด้านขั้วขาออก $V_0=0$ ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของวงจรที่ขจัดสัญญาณร่วม (Reject a Signal Common) ที่ขาต้านเข้าทั้งสอง ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวและเมื่อ

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.42)$$

นั่นคือเมื่อวงจรเป็นการขยายผลต่างสมการ (2.40) จะกลายเป็น

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.43)$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (2.44)$$

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

$$V_{out} = V_2 - V_1 \quad (2.45)$$

2.7.2 วงจรขยายอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว

วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrument Amplifier) หรือเรียกย่อๆว่า วงจร IA นั้นเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณอินพุตแบบผลต่างซึ่งพัฒนามาจากหลักการของวงจรขยายสัญญาณผลต่างพื้นฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้น จากรูปที่ 2.16 เพื่อปรับปรุงให้สมรรถนะของวงจรดีขึ้น โดยแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะมีความสัมพันธ์เป็นไปดังสมการ 2.44 ดังนี้คือ

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (2.46)$$

โดยที่ A คือ อัตราการขยายแรงดันของวงจร วงจร IA ซึ่งถูกปรับปรุงขึ้นนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับวงจรขยายสัญญาณผลต่างพื้นฐานในรูปที่ 2.16 ก็คือ มีค่าอิมพีแดนซ์สูง อัตราการขยายแรงดันของวงจรสูง และมีคุณสมบัติในการตัดสัญญาณรบกวน (CMRR) สูง ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของวงจร IA ให้ผลใกล้เคียงกับวงขยายสัญญาณผลต่างในทางอุดมคติวงจรหนึ่ง

วงจรขยายอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว [16-19] และสัญลักษณ์ของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.17 โดยที่ออปแอมป์ A₁ และ A₂ ทำหน้าที่เป็นวงจรภาคอินพุตส่วนหน้า ขณะที่วงจรส่วนที่สองคือ ออปแอมป์ A₃ จะทำหน้าที่เป็นวงจรภาคเอาต์พุตของวงจร ถ้ากำหนดให้ V_{out1} และ V_{out2} คือแรงดัน เอาต์พุตของออปแอมป์ A₁ และ A₂ ตามลำดับ ดังนั้นจากสมการ 2.44 แรงดันเอาต์พุตของ A₃ หรือ แรงดันเอาต์พุตของวงจร V_{out} จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{out2} - V_{out1}) \quad (2.47)$$

เนื่องจากคุณสมบัติของออปแอมป์ทำ ให้กระแสที่ไหลผ่าน R₃ และ R_G มีค่าเท่ากัน ($i_{R_3} \cong i_{R_G}$) อาศัยกฎของโอห์มทำให้ได้

$$V_{out1} - V_{out2} = (2R_3 + R_G)i_{R_G} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

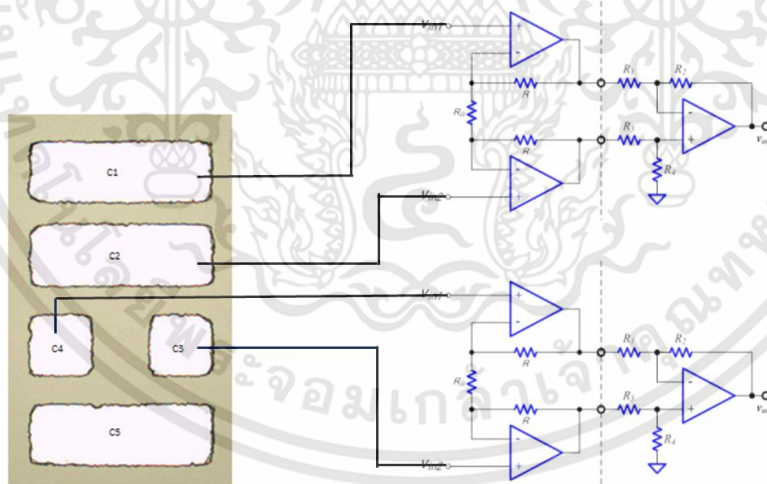
แทนค่าสมการ 2.48 ลงในสมการ 2.47 และ 2.46 จะได้

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (2.50)$$

โดยที่

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

เนื่องจากแรงดันอินพุต V_1 และ V_2 ของวงจรนั้นถูกป้อนโดยตรงเข้าทางอินพุตไม่กลับเฟสของ ออปแอมป์จึงทำให้วงจร IA นี้มีค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของวงจรสูงมาก (ประมาณเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของออปแอมป์) นอกจากนี้อัตราขยายแรงดัน A ของวงจรยังสามารถปรับแต่งค่าได้อย่างสะดวกและอิสระด้วยการปรับค่าของ R_G



รูปที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบโครงสร้างและการประยุกต์ใช้งานของหัววัด สนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

สำหรับบทนี้กล่าวถึงการออกแบบและกระบวนการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ เพื่อที่จะสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กได้ในสองมิติ สิ่งที่สำคัญสำหรับหัววัด คือ การออกแบบให้หัววัดสนามแม่เหล็กสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ในสองมิติและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้วัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม หัวข้อหลักสำหรับงานวิจัยประกอบไปด้วย 1. การออกแบบโครงสร้างและกระบวนการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติบนพื้นฐานเทคโนโลยีซิลิกอน 2. อธิบายลักษณะทางกายภาพของหัววัดสนามแม่เหล็กและการตอบสนองในสองมิติได้ 3. การทดสอบสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็ก โดยจะทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะการทำงานและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้เหมาะสม และ 4. การประยุกต์ใช้งานของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ในหัวข้อนี้นุ่งเน้นการประยุกต์ใช้หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสำหรับการวัดมุมและการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กได้อย่างแม่นยำ

3.1 การออกแบบและกระบวนการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

การออกแบบโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กเพื่อที่จะสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ในสองมิติโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กนั้นต้องสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มากกระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กได้ในสองทิศทาง คือ สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (Perpendicular Direction) และ สนามแม่เหล็กในแนวขนาน (Parallel Direction) โดยการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง และสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุมเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) สำหรับโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบเพลดพื้นฐาน และ โคไซน์ (Cosine Function) สำหรับโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้งตามลำดับ

ในงานวิจัยจึงทำการออกแบบโดยการเอาสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบเพลดพื้นฐานที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานมารวมไว้บนหนึ่งตัวชิ้นงาน โดยโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานเทคโนโลยีซิลิกอนที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center : TMEC) สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสร้างขึ้นโดยใช้ฐานรองซิลิกอนชนิดพี (P-Type Silicon) ระบาย <100> ที่มีความหนา 625 ไมโครเมตร ขนาด 6 นิ้ว และมีค่าสภาพความต้านทานประมาณ 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร ($\Omega\cdot\text{cm}$)

ซึ่งในกระบวนการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิตินั้นจะเริ่มจากขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่น (Cleaning Process) ด้วยสารละลายฟิรริยา ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$) และสารละลายไฮโดรฟลูออริก (HF) เพื่อทำการกำจัดสารอินทรีย์ (Organic Contamination) และซิลิกอนไดออกไซด์ (Native Silicon Dioxide) ที่อยู่บนพื้นผิวหน้าแผ่นซิลิกอนออก และทำการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Deionized Water) ตามลำดับ โดยในขั้นตอนถัดไปแผ่นซิลิคอนจะถูกเตรียมเพื่อไปสู่กระบวนการปลูกชั้นอะลูมิเนียมต่อไป



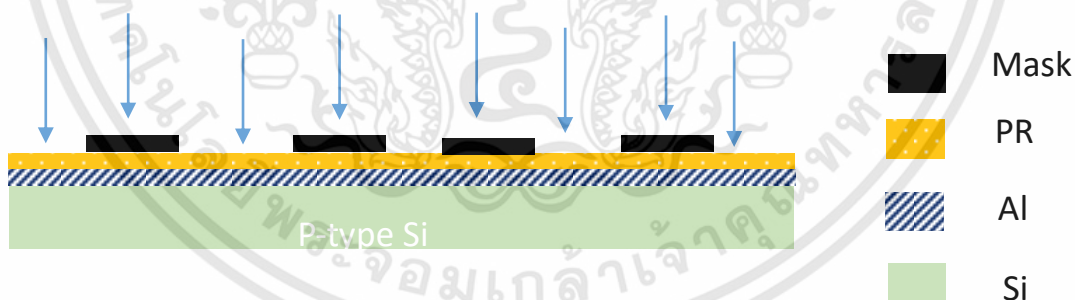
รูปที่ 3.1 ภาพจำลองการสร้างชั้นอะลูมิเนียมบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสร้างชั้นอะลูมิเนียมบนผิวหน้าแผ่นซิลิคอนซึ่งใช้เทคนิคสปีเตอร์ริงสร้างชั้นรอยต่อสัมผัสโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิกบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี โดยชั้นอะลูมิเนียม (Aluminum : Al) มีความหนา 1 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ภาพจำลองการเคลือบน้ำยาไวแสงบนชั้นอะลูมิเนียม

ขั้นตอนที่ 3 เป็นส่วนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) โดยเริ่มจากการทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photoresist : PR) บนชั้นอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin Coating) แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 ภาพจำลองการฉายแสงในกระบวนการลิโทกราฟี

และทำการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet) ผ่านมาสก์ลงบนสารไวแสงที่ถูกเคลือบเพื่อทำการเปิดลวดลายสำหรับทำขั้วโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิกแสดงดังรูปที่ 3.3 หลังจากผ่านกระบวนการฉายแสงแล้วทำการล้างเดเวลอป (Develop) ส่วนที่ถูกแสงออก ในกระบวนการนี้สารไวแสงที่คงเหลืออยู่บนชั้นโลหะอะลูมิเนียมคือส่วนที่ถูกมาสก์บดบังแสงไว้ แสดงดังรูปที่ 3.4 เหลือไว้เฉพาะส่วนที่ต้องการสร้างเป็นขั้วโลหะนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมหลังจากกระบวนการกัดโลหะ



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองการเคลือบสารไวแสงเพื่อสร้างขั้วโลหะนำไฟฟ้า

กระบวนการถัดมา คือกระบวนการกัดชั้นโลหะอะลูมิเนียมแบบแห้ง (Dry Etching) ด้วยพลาสมาในกระบวนการนี้ชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมที่ไม่มีสารไวแสงบดบังถูกกัดกร่อนออกจนหมด คงเหลือไว้เฉพาะส่วนของฟิล์มอะลูมิเนียมที่ต้องการสำหรับทำเป็นขั้วโลหะนำไฟฟ้า โดยแสดงแบบจำลองกระบวนการกัดชั้นโลหะนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาพจำลองการกัดชั้นโลหะอะลูมิเนียม

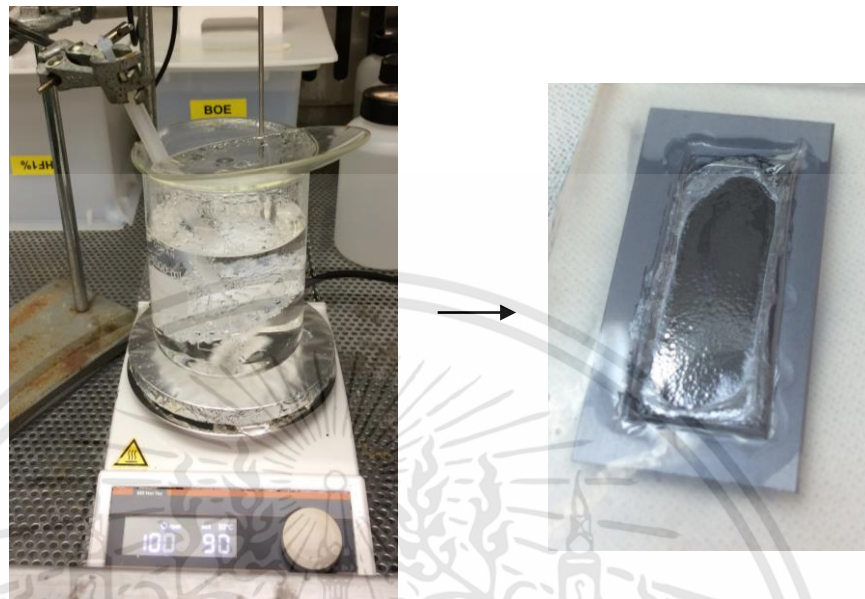
กระบวนการลอกเอาสารไวแสง (Strip Resist) ที่เหลืออยู่บนขั้วโลหะนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมออกหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการนี้สามารถสังเกตเห็นถึงขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่อยู่บนฐานรองซิลิคอนแสดงดังรูปที่ 3.6 เพื่อการใช้งานเป็นขั้วโลหะนำไฟฟ้าหน้าสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ



รูปที่ 3.6 ภาพจำลองการล่อน้ำยาไวแสง

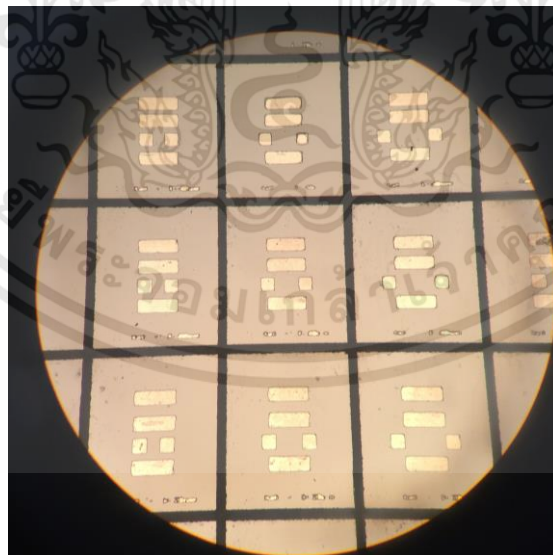
หลังจากทำการล่อน้ำยาไวแสงเสร็จแล้วนำชิ้นงานไปทำการซินเตอร์ริง (Sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกที่ดี ด้วยวิธีการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งในกระบวนการนี้จะทำให้ได้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างโดยเทคโนโลยีซิลิคอน จากนั้นก็นำชิ้นงานไปลดขนาดความหนาของฐานรองซิลิคอนด้วยวิธีการกัดโดยสารเคมี (Wet Etching) เพื่อปรับปรุงสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กให้ดีขึ้นโดยทำการกัดความหนาของฐานรองซิลิคอนให้เหลือ 325 และ 225 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งใช้สารเคมี Tetramethylammonium Hydroxide: TMAH ผสมกับ น้ำปราศจากเอกซารีนเป็นเอกซารีนที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออน อัตราส่วน 1:1 อัตราการกัดอยู่ที่ 1 ไมโครเมตรต่อนาที ($\mu\text{m}/\text{min}$) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การลดความหนาของฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดโดยสารเคมี

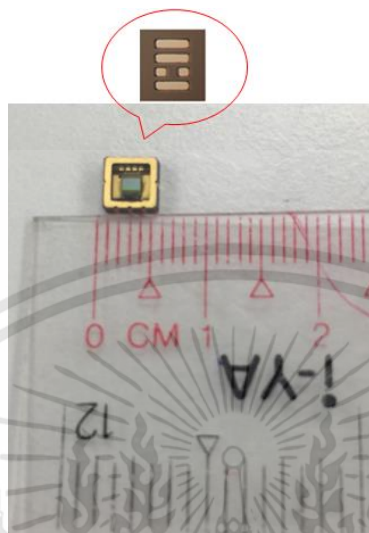
หลังจากที่ผ่านกระบวนการการกัดโดยสารเคมีเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 3.8 แสดงถึงภาพชิ้นงานหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ได้ทำการสร้างขึ้นจริง



รูปที่ 3.8 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ได้จากกระบวนการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ผ่านกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติถูกบรรจุในตัวถังไอซีแบบ Surface Mount Ceramic Packages: MEMS PAG) แบบ 8 ขา ดังรูปที่ 3.9 เพื่อนำไปทดสอบและศึกษาพฤติกรรมของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้งาน



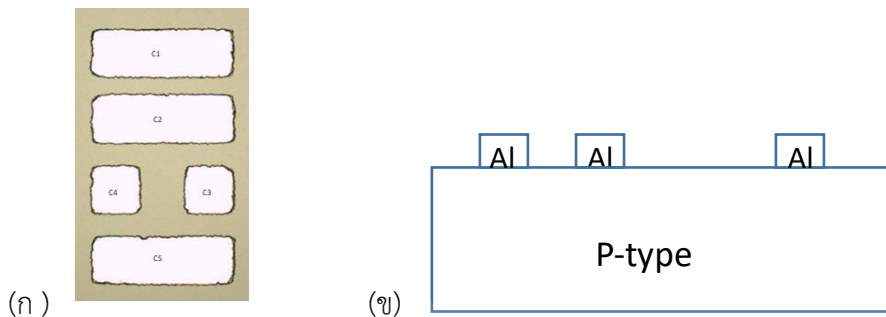
รูปที่ 3.9 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติในตัวถังไอซีแบบ MEMS PKG 8 ขา

3.2 โครงสร้างทางกายภาพของหัววัดสนามแม่เหล็กและการตอบสนองในสองมิติ

3.2.1 โครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

โดยลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ถูกสร้างขึ้น โดยใช้ฐานรองซิลิคอนชนิดพี (P-Type Silicon) ระบาย <100> ที่มีความหนา 625, 325, และ 225 ไมโครเมตรและมีค่าสภาพความต้านทานเท่ากับ 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยทำการสร้างขั้วโลหะนำไฟฟ้าอะลูมิเนียม (Ohmic Contact) บนฐานรองทั้งหมดห้าขั้วคือ C1, C2, C3, C4 และ C5 ซึ่งมีขนาดพื้นที่ของขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันสองขนาดสำหรับขนาดของขั้วโลหะนำไฟฟ้า C3 และ C4 มีขนาดเท่ากับ $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ส่วนขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1, C2 และ C5 มีขนาดเท่ากับ $100 \times 300 \mu\text{m}^2$ แสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) โดยมีพื้นที่สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองมิติเท่ากับ $300 \times 600 \mu\text{m}^2$ สำหรับรูปที่ 3.10 (ข) แสดงถึงภาคตัดขวางของอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิคที่ถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี

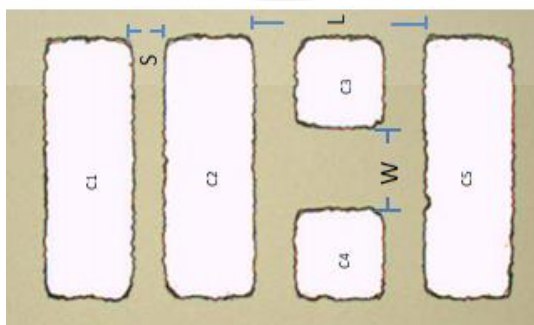
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ (ก) ภาพขั้วโลหะนำไฟฟ้า และ (ข) ภาพตัดขวางของอุปกรณ์

โดยพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์นั้น หนึ่งในปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบเพลตคือระยะของขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ผู้ทำการออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาเพื่อให้หัววัดที่ออกแบบขึ้นมีการตอบสนองที่ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ส่วนของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ได้สร้างขึ้นจึงถูกออกแบบให้มีระยะของขั้วโลหะนำไฟฟ้าในการตอบสนองที่แตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าและการเลือกใช้โครงสร้างของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้หัววัดสนามแม่เหล็กที่มีการตอบสนองอย่างดีที่สุด

หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ออกแบบขึ้นมีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพประกอบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิกทั้งหมดห้าขั้วซึ่งมีหน้าที่ที่แตกต่างกัน โดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้ว C2 ไปยัง C5 คือระยะ $L = 300$ ไมโครเมตร สำหรับขั้วโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก C1 และ C2 ใช้สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hx}) ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนาน (Parallel Direction : B_x) ของโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งโดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้ว C1 และ C2 คือระยะ S ทำการออกแบบไว้สามเงื่อนไขคือ 40, 60, และ 80 ไมโครเมตร ส่วนขั้วโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก C3 และ C4 กำหนดเป็นระยะ W โดยทำการออกแบบไว้ทั้งหมดสามเงื่อนไขคือ 100, 200, และ 300 ไมโครเมตร ใช้สำหรับการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hz}) ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (Perpendicular Direction : B_z) ซึ่งเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบเพลตพื้นฐาน แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์ของระยะ W , L , และ S ที่ใช้ในการออกแบบหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการออกแบบให้มีสมบัติตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็ก เพื่อนำไปทดสอบสมบัติและทำการวิเคราะห์ให้ทราบถึงค่าความไวในการตอบสนองที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในการวัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอถึงลักษณะโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ทำการออกแบบมีทั้งหมด 9 โครงสร้างบนความหนาที่แตกต่างกัน 3 ค่า โดยมีโครงสร้างทั้งหมดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของโครงสร้างทั้งหมด

ฐานรองชนิด	สภาพความต้านทาน	ความหนา (t)	โครงสร้าง	ระยะห่างระหว่างขั้ว C1 และ C2 (S)	ระยะห่างระหว่างขั้ว C3 และ C4 (W)
พี	5 – 10 Ω -cm	625 μ m	1	40 μ m	100 μ m
			2	60 μ m	200 μ m
			3	80 μ m	300 μ m
		325 μ m	4	40 μ m	100 μ m
			5	60 μ m	200 μ m
			6	80 μ m	300 μ m
		225 μ m	7	40 μ m	100 μ m
			8	60 μ m	200 μ m
			9	80 μ m	300 μ m

โดยหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติทั้ง 9 โครงสร้างจะถูกนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็ก เพื่อแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของแต่ละโครงสร้างและสามารถเลือกไปประยุกต์ใช้งานในการวัดความสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้อย่างเหมาะสม

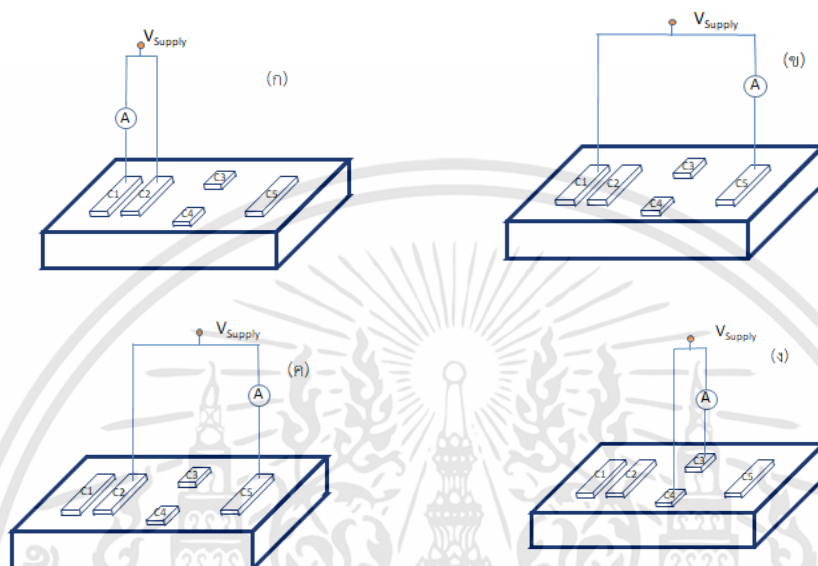
3.3 การทดสอบสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

3.3.1 การทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

การทดสอบสมบัติความเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก เพื่อยืนยันว่ากระแสสามารถไหลผ่านได้สองทิศทางและไม่เป็นตามรอยสัมผัสแบบขอตที่ที่กระแสสามารถไหลผ่านได้เพียงทิศทางเดียว การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า -2 ถึง 2 volts จากแหล่งจ่ายรุ่น BK precision 1735 ผ่านขั้วโลหะนำไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งหมด 4 กรณี ในกรณีแรกจะจ่ายแรงดันผ่านระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C2, ในกรณีที่สองจ่ายผ่านขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C5, ในกรณีที่สามจ่ายผ่านขั้วโลหะนำไฟฟ้าขั้ว C2 และ C5, ส่วนในกรณีสุดท้ายจ่ายผ่านขั้วโลหะนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าขั้ว C3 และ C4 ดังรูปที่ 3.12 (ก), (ข), (ค), และ (ง) แสดงภาพการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าความเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วโลหะนำไฟฟ้า โดยใช้มัลติมิเตอร์รุ่น Fluke 8808A เพื่อจะพิจารณาลักษณะเฉพาะของรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำซึ่งจะสอดคล้องตามกฎของโอห์ม

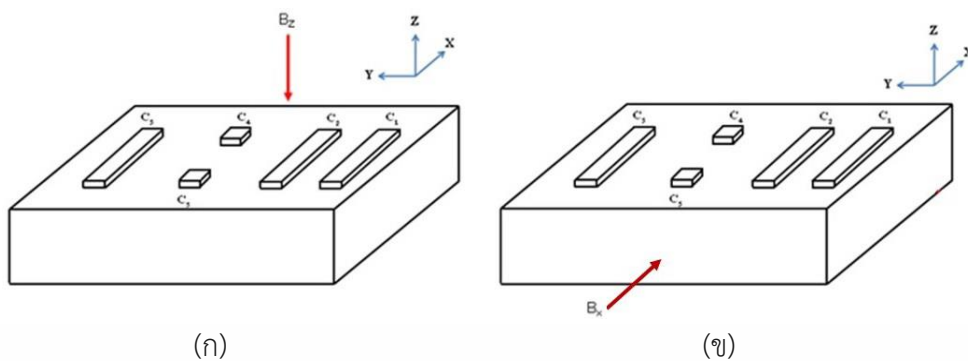


รูปที่ 3.12 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าความเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก (ก), (ข), (ค), และ (ง)

3.3.2 การทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

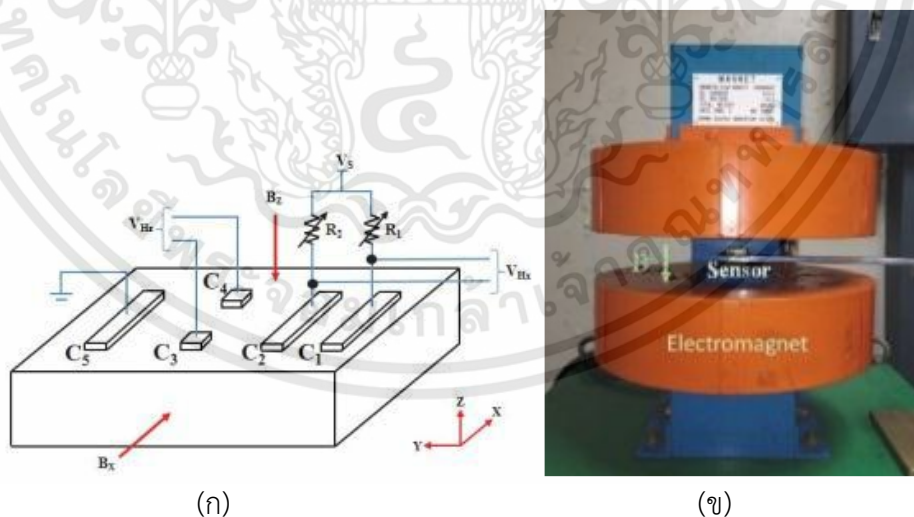
สมบัติเฉพาะของหัววัดที่ต้องการทดสอบเพื่อสามารถระบุถึงศักยภาพในการตอบสนองต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กได้นั้นคือความไวในการตอบสนองของหัววัด ซึ่งมีความสำคัญที่ส่งผลให้การวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติให้มีความเหมาะสมและถูกต้อง

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาและทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ได้สร้างขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงความไวในการตอบสนองได้ทั้งสองทิศทาง กล่าวคือสามารถตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและในแนวขนานกับหัววัด สำหรับการทดสอบค่าความไวของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสามารถแบ่งการทดลองได้สองกรณีตามทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด คือ ทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) และทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_y) แสดงดังรูปที่ 3.13 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.13 ทิศของสนามแม่เหล็ก (ก) ทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) และ (ข) ทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_y)

การทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนานดังรูปที่ 3.14 (ก) แสดงภาพจำลองการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติและ (ข) แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบจริง โดยจ่ายกระแส 1 mA ผ่านตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ที่ถูกต่ออยู่กับขั้ว C_1 และ C_2 โดยกระแสจะไหลผ่านเนื้อสารไปยังขั้ว C_5 ส่วนขั้ว C_3 และ C_4 ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก สำหรับขั้ว C_1 และ C_2 จะถูกใช้ในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศขนาน เมื่อทำการจ่ายสนามแม่เหล็ก -3,000 ถึง 3,000 เกาส์ จากเครื่อง Electromagnetic จะสามารถวัดค่าความต่างศักย์ฮอลล์ได้จากขั้ว $C_3 - C_4$ และ ขั้ว $C_1 - C_2$ ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ฮอลล์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กก็คือความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กนั่นเอง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงสามารถวิเคราะห์หาการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวนอนและในแนวตั้งแยกกันได้



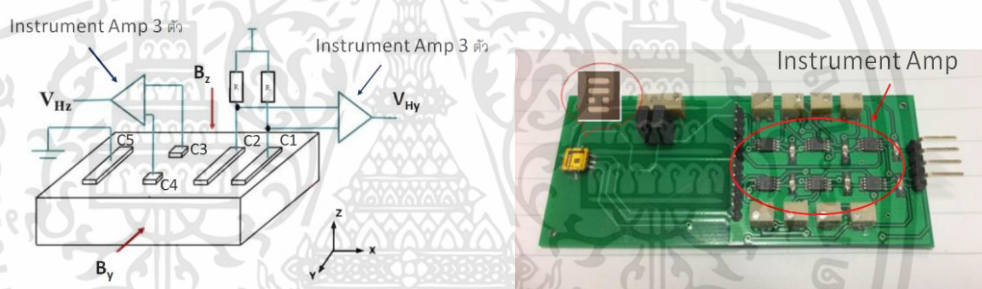
รูปที่ 3.14 (ก) ภาพจำลองการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ (ข) อุปกรณ์ในการทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การประยุกต์ใช้งานของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

3.4.1 การทดสอบหาอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แบบสองมิติ

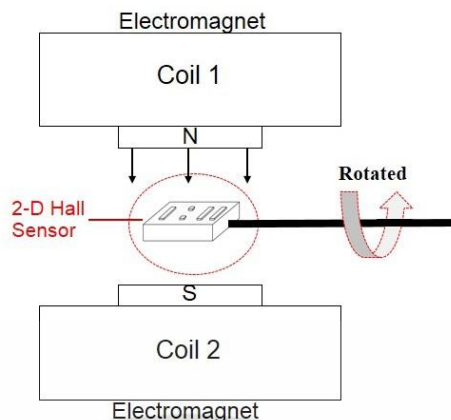
วงจรการปรับปรุงสภาพแรงดันเอาต์พุตของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิตินั้นอาศัยวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ เพื่อทำการขยายผลต่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กแต่ละแนวแกนของหัววัดให้เห็นสัญญาณความแตกต่างที่ชัดเจนขึ้น รวมถึงการปรับออฟเซตของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ในการทดลองใช้ไอซีเบอร์ INA333 ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์จำนวน 6 ตัว เพื่อใช้ในการทดสอบหาอัตราการขยายของหัววัดและเพื่อทำการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แต่ละทิศทางให้มากขึ้นตามที่ต้องการ โดยทำการปรับอัตราขยายให้มีค่า 580 เท่า สำหรับทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดในแนวตั้งฉาก (B_z) และ อัตราขยาย 430 เท่า สำหรับทดสอบความไวในการตอบสนองของหัววัดในแนวขนาน (B_y) เพื่อให้การตอบสนองของฮอลล์ทั้งสองทิศทางมีค่าเท่ากัน แบบแผนการต่อหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติเข้ากับวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การต่อหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติเข้ากับวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์

3.4.2 สมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม

เพื่อแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัด โดยพิจารณาจากแรงดันฮอลล์เอาต์พุตและความสอดคล้องกับทฤษฎีของฮอลล์ซึ่งจะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของแรงดันฮอลล์เอาต์พุตกับมุม θ ที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดในรูปฟังก์ชันของ $\sin\theta$ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงการทดสอบการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติต่อการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำ โดยการหมุนหัววัดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงมุม ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา โดยปรับไปครั้งละ 10 องศา ภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นจากความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในมุมต่างๆกันจากเอาต์พุต C1 – C2 และ เอาต์พุต C3 – C4 ภาพจำลองการทดสอบแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ภาพจำลองการทดสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม

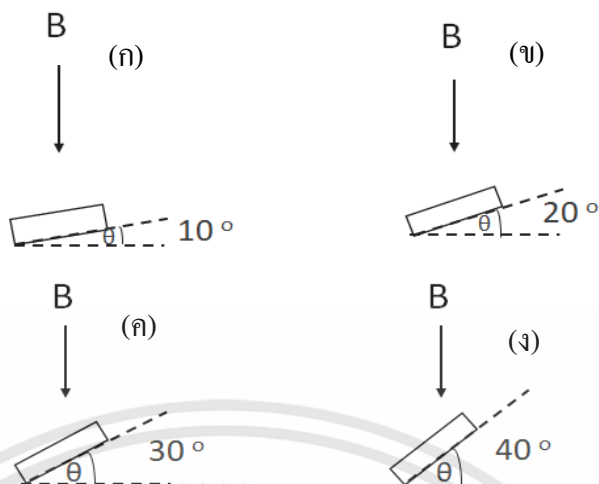
3.4.3 การทดสอบความแม่นยำของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติ

3.4.3.1 การทดสอบโดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งของมุมที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่มากที่สุด

โดยการทดสอบปรับเปลี่ยนตำแหน่งของมุมที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่ 7 ค่า ได้แก่ 0, 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500, และ 3,000 เกาส์ ตามลำดับ มากกระทำกับหัววัดโดยจะปรับเปลี่ยนตำแหน่งของหัววัดสนามแม่เหล็กตั้งแต่มุม 0 ถึง 180 องศา ภาพจำลองการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.16 แล้วเอาข้อมูลค่า V_H ของแกน y และ แกน z มาเข้าโปรแกรมคำนวณโดยอ้างอิงจากสมการที่ (2.35) ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 และ k_2 จาก สมการ (2.33) และ (2.34) จะถูกปรับให้มีค่าเท่ากันดังการทดลองที่ 3.4.2

3.4.3.2 การทดสอบความแม่นยำของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง

ในการทดสอบความแม่นยำของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่ได้ออกแบบขึ้นได้ทำการทดสอบโดยทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติกับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐานรุ่น (F.W. Bell 5170) ซึ่งทำการปรับมุมเอียงระหว่างสนามแม่เหล็กกับหัววัดที่มุม 10, 20, 30, และ 40 องศา แสดงดังรูปที่ 3.17 การทดสอบการปรับมุมเอียง (ก) 10 องศา, (ข) 20 องศา, (ค) 30 องศา และ (ง) 40 องศา จากนั้นนำผลที่ได้จะไปทำการเปรียบเทียบถึงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างเครื่องมือการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กมาตรฐานกับหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.17 การทดสอบการปรับมุมเอียงของหัววัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมาตรฐานทำไป (ก) 10 องศา, (ข) 20 องศา, (ค) 30 องศา และ (ง) 40 องศา

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลองของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ทราบถึงลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นตามเงื่อนไขในการออกแบบ ตลอดจนสามารถนำคุณสมบัติของห้ววัดมาประยุกต์ใช้งานเป็นห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติโดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่มีความแม่นยำสูง

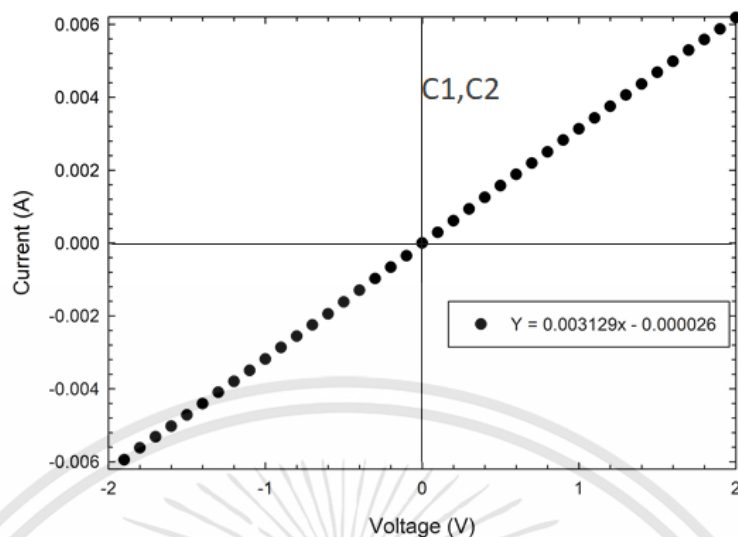
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

การออกแบบและสร้างห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติบนพื้นฐานเทคโนโลยีซิลิคอนที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ห้ววัดมีสมบัติเฉพาะสอดคล้องกับเงื่อนไขของหลักการวัดโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นหลังจากการสร้างและการทดสอบคุณสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก รวมถึงพฤติกรรมในการทำงานของห้ววัดจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ได้เหมาะสม ดังนั้นการทดสอบและการวิเคราะห์สมบัติของอุปกรณ์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทำให้การวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีประสิทธิภาพสูงสุด

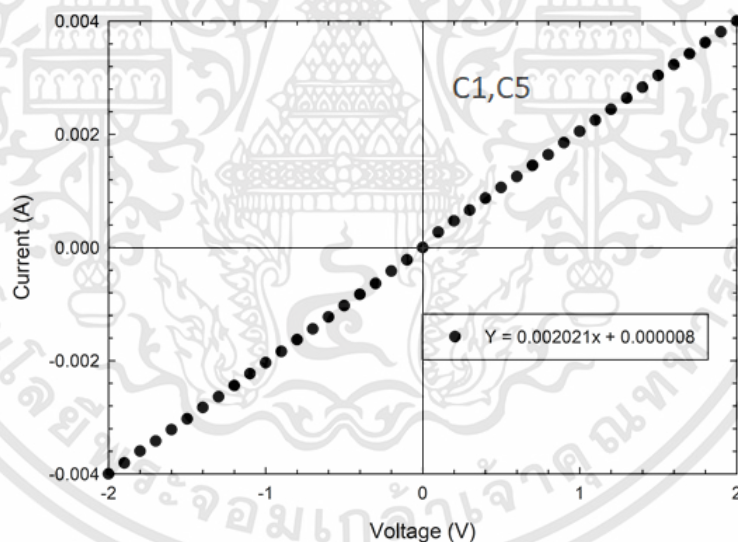
4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

โครงสร้างของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ถูกออกแบบขึ้นมีลักษณะเฉพาะประกอบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าทั้งหมดเพียงห้าขั้วที่ถูกสร้างขึ้นบนฐานรองซิลิคอน ในขั้นแรกต้องทำการทดสอบสมบัติความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกของขั้วโลหะนำไฟฟ้าทั้งหมดหลังจากผ่านกระบวนการสร้างโดยเทคโนโลยีซิลิคอน เพื่อที่จะยืนยันยืนยันความเป็นโอห์มมิกที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

จากผลการทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายให้กับขั้วโลหะนำไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้วโลหะนั้น โดยวัดระหว่างขั้ว C1 กับ C2 ที่มีระยะห่าง 80 ไมโครเมตร, ระหว่างขั้ว C1 กับ C5 ที่มีระยะห่าง 380 ไมโครเมตร, ระหว่างขั้ว C2 กับ C5 ที่มีระยะห่าง 300 ไมโครเมตร และ ระหว่างขั้ว C3 กับ C4 ที่มีระยะ 300 ไมโครเมตร โดยทำการจ่ายแรงดันตั้งแต่ -2 ถึง 2 โวลต์ จากแหล่งจ่าย รุ่น BK precision 1735 แล้วทำวัดกระแสที่ไหลผ่านด้วยมัลติมิเตอร์ รุ่น Fluke 8808A ผลการวัดแสดงดังกราฟในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3, และ 4.4 ตามลำดับ

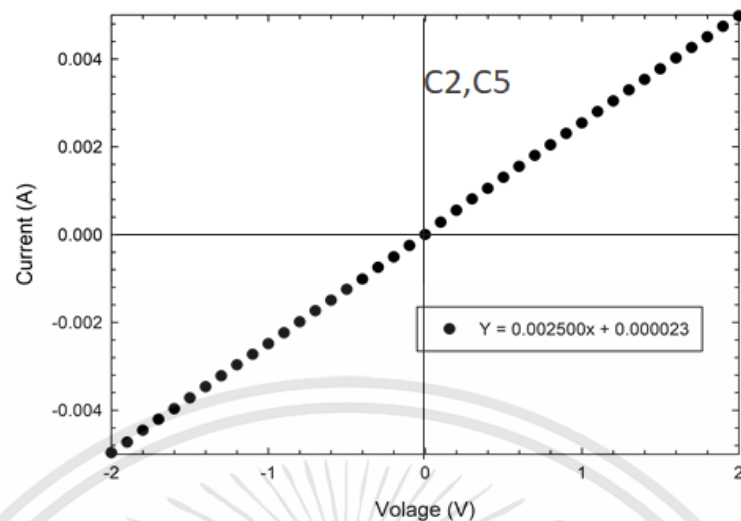


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 กับ C2 ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

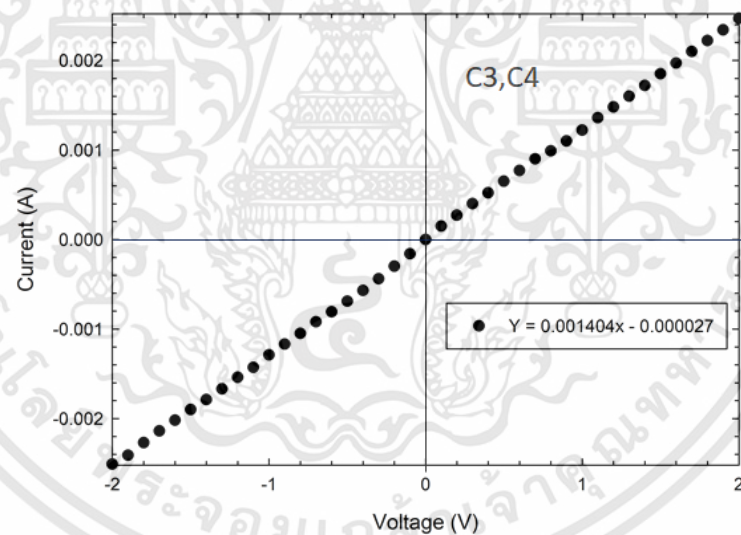


รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 กับ C5 ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C2 กับ C5 ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C3 กับ C4 ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3, และ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าพบว่ามีความเป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทาน โดยถูกอธิบายความเป็นเชิงเส้นได้ตามสมการที่ (4.1) สำหรับขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C2 สำหรับขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C5 แสดงดังสมการที่ (4.2) สำหรับขั้วโลหะนำไฟฟ้า C2 และ C5 แสดงดังสมการที่ (4.3) และสมการที่ (4.4) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C3 และ C4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y = 0.003129x - 0.000026 \quad (4.1)$$

$$Y = 0.002021x + 0.000008 \quad (4.2)$$

$$Y = 0.002500x + 0.000023 \quad (4.3)$$

$$Y = 0.001255x - 0.000024 \quad (4.4)$$

ค่าความต้านทานระหว่างขั้วดังกล่าวจะหาได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ จากทำการวัดระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าทั้งสี่กรณีดังกล่าวจะได้ค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 310 โอห์ม ที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C2, และค่ามี 470 โอห์ม ที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C5, ส่วนระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C2 และ C5 จะมีค่าความต้านทาน 385 โอห์ม, และมีค่า 750 โอห์ม ที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C3 และ C4 โดยค่าความต้านทานที่แตกต่างกันนี้ได้รับอิทธิพลมาจากระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่ทำการวัดค่าและขนาดพื้นที่ของขั้วโลหะนำไฟฟ้าที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามผลจากการทดสอบทั้งหมดนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าทุกรอยสัมผัสมีสมบัติความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำที่ได้สร้างขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองของหัววัดที่สร้างขึ้น

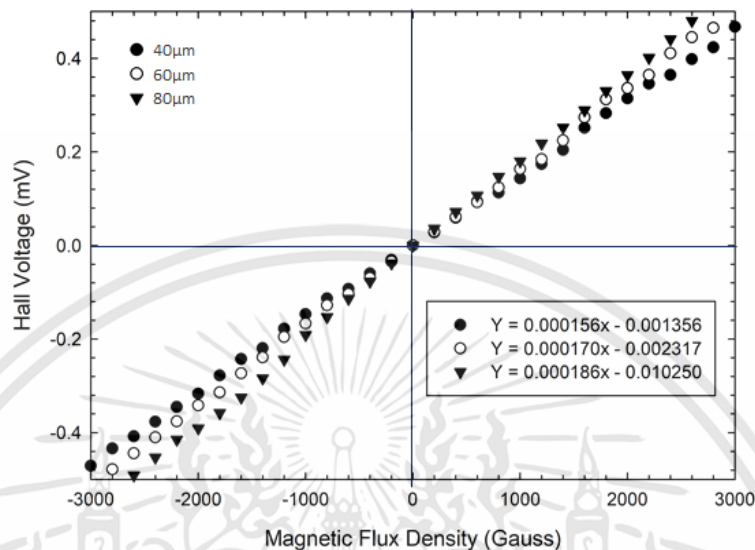
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

หลังจากการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคของขั้วโลหะนำไฟฟ้าทั้งห้าขั้วบนหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติแล้ว ลำดับถัดมาเป็นการทดสอบความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแต่ละโครงสร้างที่ประกอบกันเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ เพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าและการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัววัด ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดในสองทิศทางคือ ในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

4.1.2.1 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนาน

ในการทดสอบหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติทั้งหมด 9 โครงสร้างด้วยกัน ซึ่งแต่ละโครงสร้างมีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า (ระหว่าง C1 กับ C2 แทนด้วย S และระหว่าง C3 กับ C4 แทนด้วย W) และความหนาของฐานรอง (แทนด้วย t) ที่แตกต่างกัน คือ โครงสร้างที่ 1 มีระยะ W = 100µm, S = 40µm, โครงสร้างที่ 2 มีระยะ W = 200µm, S = 60 µm, โครงสร้างที่ 3 มีระยะ W = 300µm, S = 80µm โดยทั้งสามโครงสร้างมีความหนาของฐานรอง t = 625µm ส่วนโครงสร้างที่ 4 มีระยะ W = 100µm, S = 40µm, โครงสร้างที่ 5 มีระยะ W = 200µm, S = 60 µm, โครงสร้างที่ 6 มีระยะ W = 300µm, S = 80µm โดยโครงสร้างที่ 4 – 6 มีความหนาของฐานรอง t = 325µm สำหรับโครงสร้างที่ 7 มีระยะ W = 100µm, S = 40µm, โครงสร้างที่ 8 มีระยะ W = 200µm, S = 60 µm, โครงสร้างที่ 9 มีระยะ W = 300µm, S = 80µm โครงสร้างที่ 7 – 9 มีความหนาของฐานรอง t = 225µm ทั้ง 9 โครงสร้างมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 1 มิลลิแอมป์ และทำการปรับค่าความ

เข็มของสนามแม่เหล็กในช่วง -3000 ถึง 3000 เกาส์ ผลการทดสอบของหัววัดทั้ง 9 โครงสร้างภายใต้ อิทธิพลของสนามแม่เหล็กในแนวนอน แสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6, และ 4.7



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข็มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวนอนของ หัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 1, 2, และ 3 ($t = 625\mu\text{m}$)

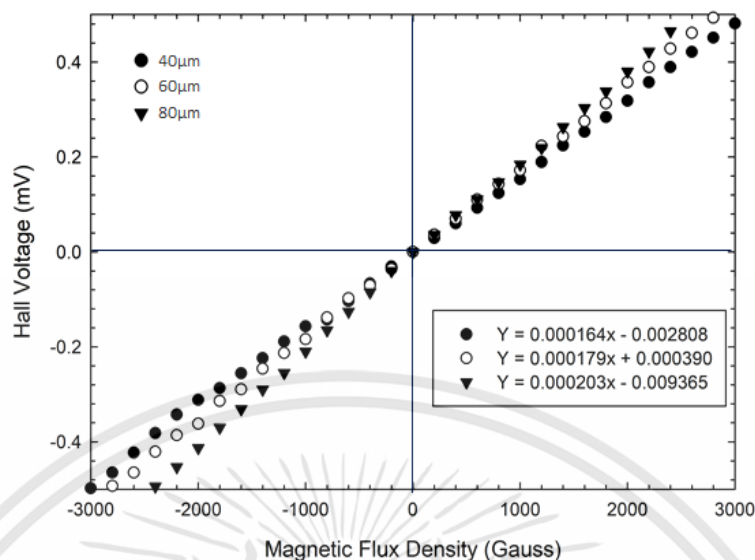
ในรูปที่ 4.5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข็มสนามแม่เหล็กในทิศทางกับหัววัดสนามแม่เหล็กแรงดันเอาต์พุตวัดได้จากแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C1 กับ C2 เท่านั้น ส่วนแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C3 กับ C4 จะมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่ตอบสนอง) ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวนอน (V_{Hy}) ตามค่าความเข็มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการตอบสนองมีความเป็นเชิงเส้นโดยแสดงดังสมการที่ 4.5, 4.6, และ 4.7

$$Y = 0.000156x - 0.001356 \quad (4.5)$$

$$Y = 0.000170x - 0.002317 \quad (4.6)$$

$$Y = 0.000186x - 0.010250 \quad (4.7)$$

จากสมการเชิงเส้นที่ได้สามารถทำการวิเคราะห์หาค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กได้จากความชันของกราฟเส้นตรงแต่ละเส้นโดยที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.156, 0.170, และ 0.186 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานของหัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 4, 5, และ 6 ($t = 325\mu\text{m}$)

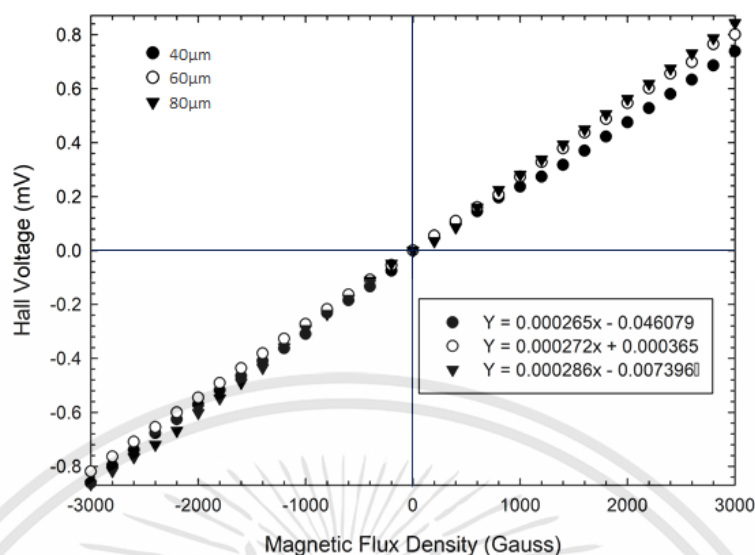
ในรูปที่ 4.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางกับหัววัดสนามแม่เหล็กแรงดันเอาท์พุทวัดได้จากแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C1 กับ C2 เท่านั้น ส่วนแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C3 กับ C4 จะมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่ตอบสนอง) ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวขนาน (V_{Hx}) ตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการตอบสนองมีความเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ 4.8, 4.9, และ 4.10 ตามลำดับ

$$Y = 0.000164x - 0.002808 \quad (4.8)$$

$$Y = 0.000179x + 0.000390 \quad (4.9)$$

$$Y = 0.000203x - 0.009365 \quad (4.10)$$

จากสมการเชิงเส้นที่ได้สามารถทำการวิเคราะห์หาค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กได้จากความชันของกราฟเส้นตรงแต่ละเส้นที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.164, 0.179, และ 0.203 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานของหัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 7, 8, และ 9 ($t = 225\mu\text{m}$)

ในรูปที่ 4.7 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางกับหัววัดสนามแม่เหล็ก จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวขนาน (V_{Hx}) ตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการตอบสนองมีความเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ 4.11, 4.12, และ 4.13 ตามลำดับ

$$Y = 0.000265x - 0.046079 \quad (4.11)$$

$$Y = 0.000272x + 0.000365 \quad (4.12)$$

$$Y = 0.000286x - 0.007396 \quad (4.13)$$

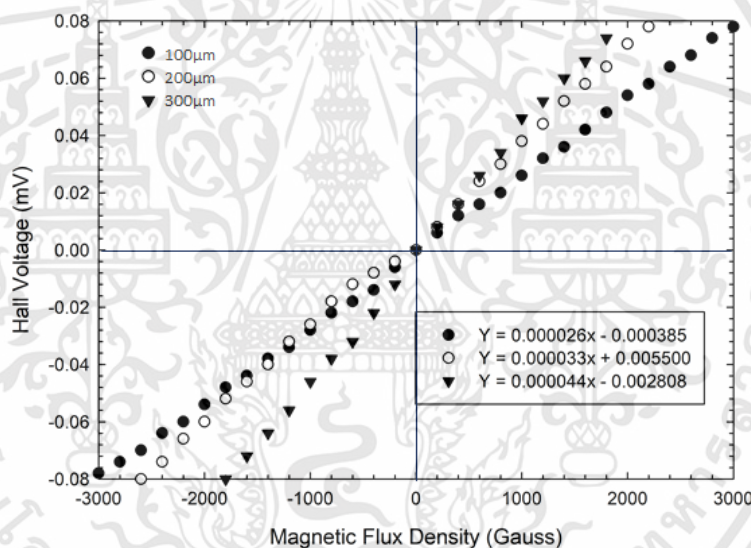
จากสมการเชิงเส้นที่ได้สามารถทำการวิเคราะห์ถึงค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กได้จากความชันของกราฟเส้นตรงแต่ละเส้นที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.265, 0.272, และ 0.286 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เป็นบวก ($+B_y$) และค่าที่เป็นลบ ($-B_y$) แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานทั้งสองทิศทางคือ ทิศพุ่งเข้าหาหัววัด ($+B_y$) และทิศพุ่งออกจากหัววัด ($-B_y$) จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่อ่านได้มีค่าตรงกันข้ามกันคือ เมื่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานพุ่งเข้าหาหัววัด ($+B_y$) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นบวกและจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากขึ้นแสดงให้เห็นในควอดรันต์ที่ 1 ของกราฟทั้ง 3 รูป ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้สนามแม่เหล็กในแนวขนานพุ่งออกจากหัววัด ($-B_y$) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นในควอดรันต์ที่ 3 ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มีค่าบวกและลบนี้สามารถบอกถึงขั้วของสนามแม่เหล็กได้ ลักษณะของกราฟการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งหมดได้แสดงให้เห็นถึงความสมมาตรในการตอบสนองที่ขึ้นกับขั้วของสนามแม่เหล็กที่มากกระทำกับหัววัดได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก

ถัดมาจะทำการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก โดยทำการปรับหมุนหัววัดสนามแม่เหล็กให้อยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กเพื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hz}) ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) แล้วทำการทดสอบแบบเดียวกับการทดสอบในแนวขนาน โดยในการทดสอบทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ให้กับหัววัด แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในช่วง -3000 ถึง 3000 เกาส์ โดยผลการวัดจะนำไปวิเคราะห์เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ได้ออกแบบขึ้นสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงได้ และเลือกโครงสร้างที่ดีที่สุดเพื่อทำการประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติได้อย่างเหมาะสม โดยผลการทดสอบของหัววัดทั้ง 9 โครงสร้างภายใต้ทิศของสนามแม่เหล็กที่มากจะทำให้ทิศตั้งฉาก แสดงดังรูปที่ 4.8, 4.9, และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากของหัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 1, 2, และ 3 ($t = 625\mu\text{m}$)

ในรูปที่ 4.8 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดสนามแม่เหล็กแรงดันเอาต์พุตวัดได้จากแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C3 กับ C4 เท่านั้น ส่วนแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C1 กับ C1 จะมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่ตอบสนอง) ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งฉาก (V_{Hz}) ตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการตอบสนองมีความเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ 4.14, 4.15, และ 4.16 ตามลำดับ

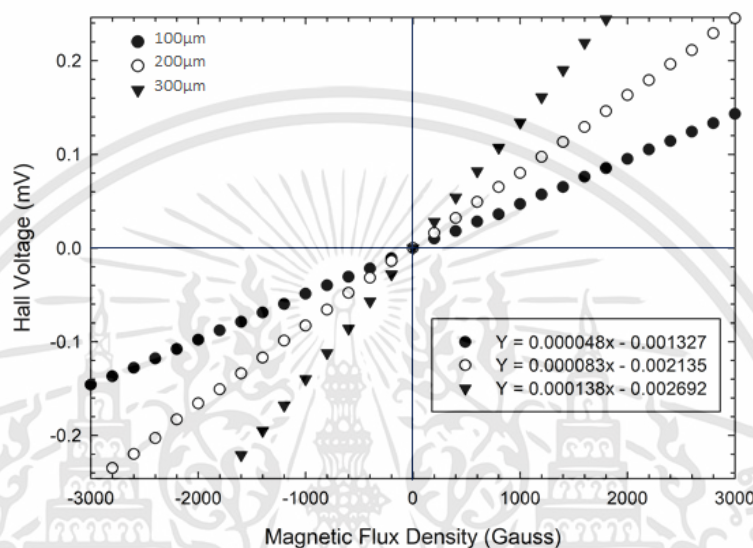
$$Y = 0.000026x - 0.000385 \quad (4.14)$$

$$Y = 0.000033x + 0.005500 \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y = 0.000044x - 0.002808 \quad (4.16)$$

จากสมการเชิงเส้นที่ได้สามารถทำการวิเคราะห์หาค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กได้จากความชันของกราฟเส้นตรงแต่ละเส้นที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.026, 0.033, และ 0.044 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากของหัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 4, 5, และ 6 ($t = 325\mu\text{m}$)

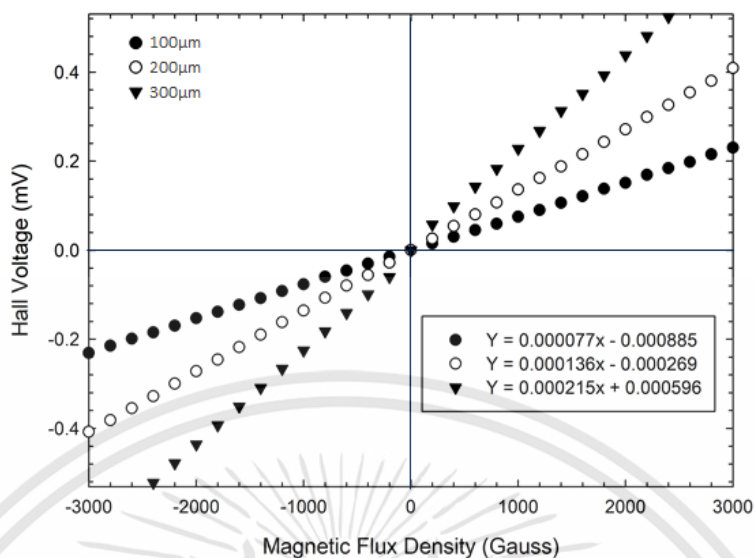
ในรูปที่ 4.9 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดสนามแม่เหล็กแรงดันเอาท์พุทวัดได้จากแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C3 กับ C4 เท่านั้น ส่วนแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C1 กับ C2 จะมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่ตอบสนอง) จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งฉาก (V_{Hz}) ตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการตอบสนองมีความเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ 4.17, 4.18, และ 4.19 ตามลำดับ

$$Y = 0.000048x - 0.001327 \quad (4.17)$$

$$Y = 0.000083x - 0.002135 \quad (4.18)$$

$$Y = 0.000138x - 0.002692 \quad (4.19)$$

จากสมการเชิงเส้นที่ได้สามารถทำการวิเคราะห์หาค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กได้จากความชันของกราฟเส้นตรงแต่ละเส้นที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.048, 0.083, และ 0.138 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากของหัววัดสนามแม่เหล็ก โครงสร้างที่ 7, 8, และ 9 ($t = 225\mu\text{m}$)

ในรูปที่ 4.10 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับหัววัดสนามแม่เหล็กแรงดันเอาท์พุทวัดได้จากแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C3 กับ C4 เท่านั้น ส่วนแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว C1 กับ C2 จะมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่ตอบสนอง) จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งฉาก (V_{Hz}) ตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการตอบสนองมีความเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามสมการที่ 4.20, 4.21, และ 4.22 ตามลำดับ

$$Y = 0.000077x - 0.000885 \quad (4.20)$$

$$Y = 0.000136x - 0.000269 \quad (4.21)$$

$$Y = 0.000215x + 0.000596 \quad (4.22)$$

จากสมการเชิงเส้นที่ได้สามารถทำการวิเคราะห์ถึงค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กได้จากความชันของกราฟเส้นตรงแต่ละเส้นที่มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 0.077, 0.136, และ 0.215 ไมโครโวลต์ต่อเกาส์ ตามลำดับ

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เป็นบวก ($+B_z$) และค่าที่เป็นลบ ($-B_z$) แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากทั้งสองทิศทางคือ ทิศพุ่งเข้าหาหัววัด ($+B_z$) และทิศพุ่งออกจากหัววัด ($-B_z$) จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่อ่านได้มีค่าตรงกันข้ามกันคือ เมื่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากพุ่งเข้าหาหัววัด ($+B_z$) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นบวกและจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากขึ้นแสดงให้เห็นในควอดรันต์ที่ 1 ของกราฟทั้ง 3 รูป ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากพุ่งออกจากหัววัด ($-B_z$) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นในควอดรันต์ที่ 3 ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มีค่าบวกและลบนี้สามารถบอกถึงขั้วของ

สนามแม่เหล็กได้ ลักษณะของกราฟการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งหมดได้แสดงให้เห็นถึงความสมมาตรในการตอบสนองที่ขึ้นกับขั้วของสนามแม่เหล็กที่มากระทำกับหัววัดได้เป็นอย่างดี

4.1.2.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ

ผลของการทดสอบทั้งหมดสามารถนำมาทำการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กทั้งสองแนวแกน เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการเลือกโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กที่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีที่สุดทั้งสองแนวแกนมาประยุกต์ใช้งานร่วมเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มากระทำ โดยพิจารณาจากค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดแต่ละสองมิติของแต่ละโครงสร้างซึ่งสรุปเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็กทั้ง 9 โครงสร้าง

ความหนา (t)	โครงสร้าง	ระยะห่างระหว่างขั้ว C1 และ C2 (S)	ระยะห่างระหว่างขั้ว C3 และ C4 (W)	Sensitivity (B _y)	Sensitivity (B _z)
625 μm	1	40 μm	100 μm	0.156 $\mu\text{V/G}$	0.026 $\mu\text{V/G}$
	2	60 μm	200 μm	0.170 $\mu\text{V/G}$	0.033 $\mu\text{V/G}$
	3	80 μm	300 μm	0.186 $\mu\text{V/G}$	0.044 $\mu\text{V/G}$
325 μm	4	40 μm	100 μm	0.164 $\mu\text{V/G}$	0.048 $\mu\text{V/G}$
	5	60 μm	200 μm	0.179 $\mu\text{V/G}$	0.083 $\mu\text{V/G}$
	6	80 μm	300 μm	0.203 $\mu\text{V/G}$	0.138 $\mu\text{V/G}$
225 μm	7	40 μm	100 μm	0.265 $\mu\text{V/G}$	0.077 $\mu\text{V/G}$
	8	60 μm	200 μm	0.272 $\mu\text{V/G}$	0.136 $\mu\text{V/G}$
	9	80 μm	300 μm	0.286 $\mu\text{V/G}$	0.215 $\mu\text{V/G}$

จากตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติทั้ง 9 โครงสร้าง เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของค่าความไวในการตอบสนองพบว่าระยะห่างระหว่างขั้ว C1 และ C2 (S) ของการตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวนอน พบว่าที่ระยะห่างระหว่าง 80 μm มีค่าความไวในการตอบสนองมากที่สุด สำหรับการทดสอบผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า C3 และ C4 (W) ของการตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก พบว่าที่ระยะห่างระหว่าง 300 μm มีค่าความไวในการตอบสนองมากที่สุด และอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่จะนำมาพิจารณาเกี่ยวกับค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอีกประการหนึ่งคือ ความหนาของฐานรองพบว่าที่ความหนาของฐานน้อยสุดจะทำให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากที่สุดคือที่ความหนา 225 μm

ดังนั้นจากตารางสรุปผลการทดสอบค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กทำให้สามารถเลือกโครงสร้างของหัววัดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง ซึ่งทำการพิจารณาจากค่าความไวในการตอบสนองที่สูงที่สุดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

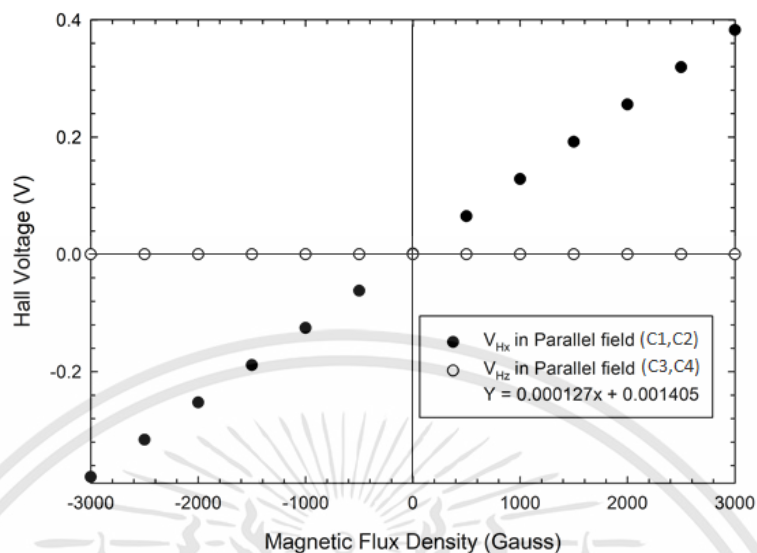
ห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติโครงสร้างที่ 9 มีระยะ $S = 80$ ไมโครเมตร ระยะ $W = 300$ ไมโครเมตร ที่ความหนา 225 ไมโครเมตร โดยมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวนอน $0.286 \mu\text{V/G}$ และค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก $0.215 \mu\text{V/G}$ ซึ่ง ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวนอนสูงกว่าแนวตั้งฉากจึงต้องขยายความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากเพิ่มขึ้นให้ค่าเท่ากับการตอบสนองในแนวนอน ดังนั้นจึงนำห้ววัดสนามแม่เหล็กโครงสร้างนี้มาทดสอบร่วมกับวงจรรีเลย์อินสตรูเมนต์เพื่อที่จะปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และทำให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองมิติเพิ่มขึ้นและเท่ากันจึงจะสามารถนำไปวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางต่อไปได้

4.2 การประยุกต์ใช้งานห้ววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติ

การนำห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้งานเพื่อที่จะวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางให้มีความเหมาะสมได้นั้น ต้องนำผลการทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมาทำการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการตอบสนองของห้ววัดและข้อจำกัดในการทำงานอย่างรอบคอบ ในขั้นตอนถัดมาจึงทำการรวมห้ววัดเข้ากับวงจรรีเลย์อินสตรูเมนต์เพื่อปรับปรุงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ให้มีค่าที่เหมาะสมและค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองมิติมีค่าที่เท่ากัน

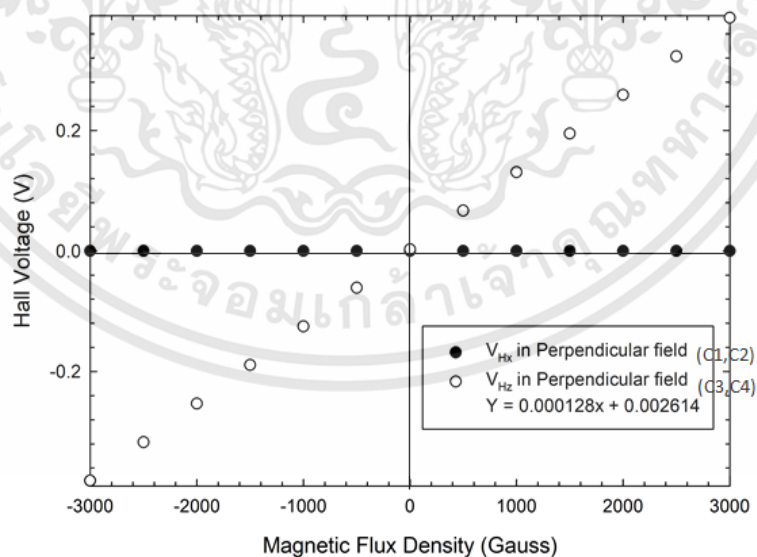
4.2.1 ผลการทดสอบการปรับปรุงค่าของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองมิติ

เนื่องจากห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่สร้างขึ้นนั้นจะมี 2 เอาต์พุต คือ เอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มากกระทำในมิติขนานและเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มากกระทำในมิติตั้งฉาก เมื่อรวม 2 เอาต์พุตเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตเดียวที่มีค่าคงที่ จากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติจึงจำเป็นต้องปรับให้ค่าขนาดแรงดันเอาต์พุตแต่ละมิติมีขนาดเท่ากัน ดังสมการ (2.33)-(2.35) หลังจากการวิเคราะห์ผลและทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติทั้ง 9 โครงสร้าง จึงได้เลือกห้ววัดสนามแม่เหล็กโครงสร้างที่ 9 ซึ่งให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแต่ละมิติมีค่าสูงสุดมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากสัญญาณการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนที่ได้มีขนาดต่ำมากอีกทั้งยังมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ไม่เท่ากัน จึงมีความจำเป็นต้องทำให้การตอบสนองทั้งสองแนวแกนมีค่าสูงขึ้นและมีขนาดเท่ากัน โดยวงจรขยายที่นำมาใช้ขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คือ วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ ดังนั้นในการทดสอบได้ออกแบบวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์เป็นสองชุดโดยมีอัตราขยายที่แตกต่างกันสำหรับการตอบสนองแต่ละแนวแกน เพื่อให้สัญญาณทั้งสองมีค่าความไวในการตอบสนองเท่าเทียมกันมากที่สุด โดยผลการทดสอบการปรับปรุงของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แบบสองมิติแสดงดังรูป 4.11, และ 4.12



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวขนานของหัววัดสนามแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็ก -3000 ถึง 3000 เกาส์ ของโครงสร้างที่ 9

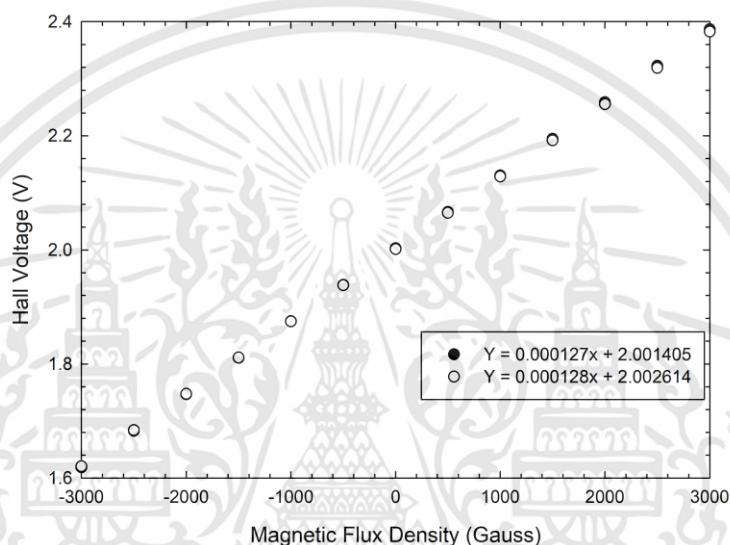
จากรูปกราฟที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดในแนวขนาน มีค่าความไวในการตอบสนองอยู่ที่ 0.127 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ ส่วนเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดในแนวตั้งฉากไม่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแต่อย่างใด



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำในแนวตั้งฉากของหัววัดสนามแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็ก -3000 ถึง 3000 เกาส์ ของโครงสร้างที่ 9

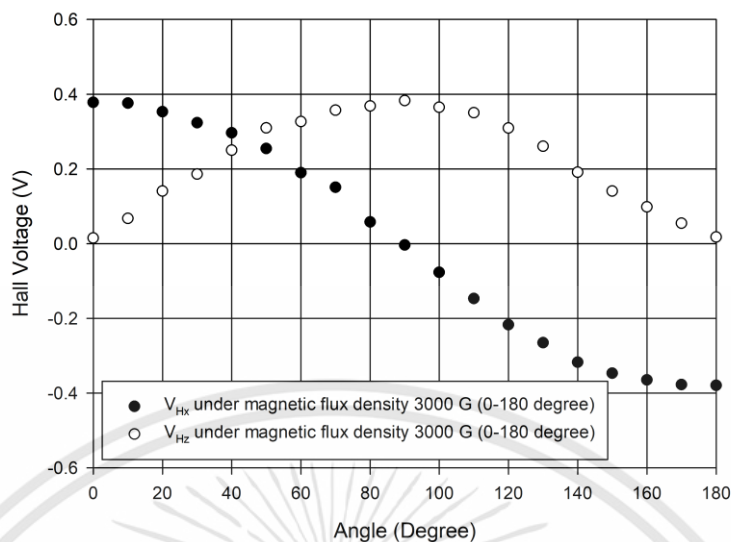
จากรูปกราฟที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงเอาท์พุทที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดในแนวตั้งฉาก มีค่าความไวในการตอบสนองอยู่ที่ 0.128 มิลลิโวลต์ต่อเกาส์ ส่วนเอาท์พุทที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดในแนวขนานไม่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแต่อย่างใด

ซึ่งวงจรถายแบบอินสตรูเมนต์ที่ได้ออกแบบขึ้นได้ทำการปรับระดับสัญญาณออฟเซตมีค่าอยู่ที่ 2 โวลต์ ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำ โดยรูปที่ 4.13 ได้แสดงให้เห็นถึงสัญญาณที่ผ่านการขยายจากวงอินสตรูเมนต์จนมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เท่ากันแล้วรวมกับภาคขยายที่มีสัญญาณออฟเซตด้วย



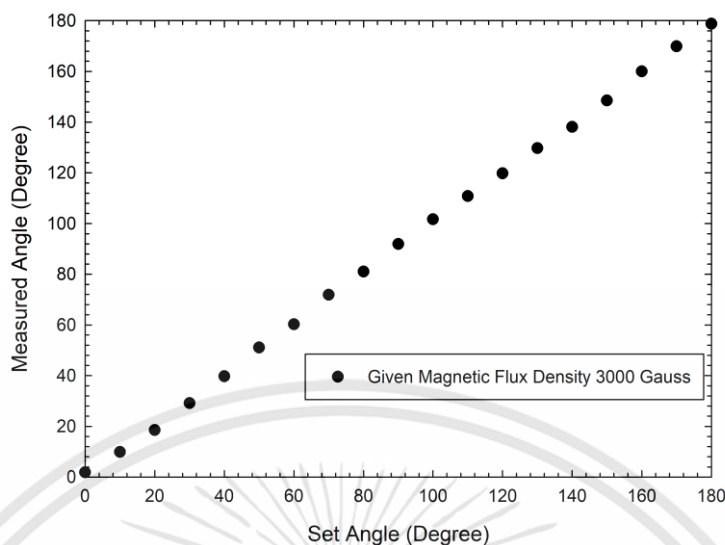
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองแนวแกนกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก -3000 ถึง 3000 เกาส์ ของโครงสร้างที่ 9

กราฟในรูปที่ 4.13 การปรับปรุงสัญญาณให้มีค่าความไวในการตอบสนองให้เพิ่มสูงขึ้นและมีค่าที่เท่าเทียมกันโดยใช้วงจรถายแบบอินสตรูเมนต์ เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดได้อย่างสอดคล้อง โดยการทดลองแสดงให้เห็นค่าความไวในการตอบสนองที่สูงขึ้นและเท่าเทียมกันทั้งในทิศตั้งฉากและทิศขนาน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในเทคนิคการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มุม 0 – 180 องศา ภายใต้สนามแม่เหล็ก 3,000 เกาส์

หลังจากทำการทดสอบหาอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ทำให้การตอบสนองสนามแม่เหล็กทั้งในแนวขนานและแนวตั้งฉากมีขนาดที่เท่ากันแล้ว จากนั้นจึงทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม โดยทำการทดสอบเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กจาก 0 – 180 องศา ปรับมุมครั้งละ 10 องศา ภายใต้ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 3,000 เกาส์ แสดงการตอบสนองดังรูปที่ 4.14 จากรูปแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองสนามแม่เหล็กแต่ละแนวแกน โดยแนวแกนที่มีแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สูงสุดจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มากกระทำในทิศตั้งฉากกับแนวแกนที่ตอบสนองในทิศทางนั้นพอดี ส่วนการตอบสนองอีกแนวแกนนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะมีค่าต่ำสุดจึงทำให้ต่างเฟสกัน 90 องศา เป็นไปตามฟังก์ชันตรีโกณมิติไซน์และโคไซน์แบบสมบูรณ์ จากนั้นได้นำมาประยุกต์ใช้งานในการวัดมุมโดยมีสนามแม่เหล็กมากกระทำแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การทดสอบการวัดมุมจาก 0 ถึง 180 องศา ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติภายใต้ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 3,000 เกาส์

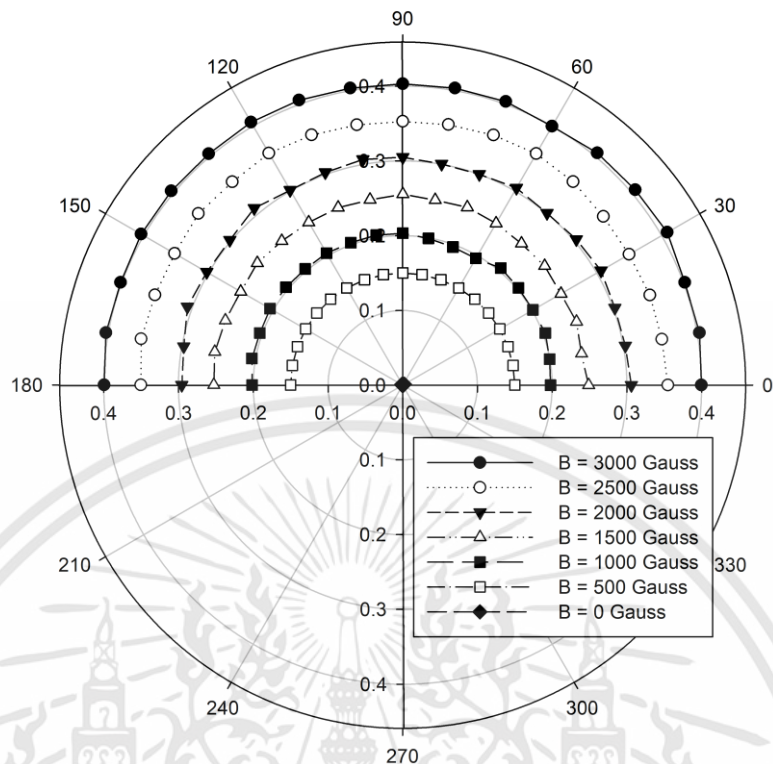
การทดสอบวัดมุมด้วยหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติซึ่งแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งฉาก (V_{Hz}) และแนวขนาน (V_{Hy}) นั้นเป็นไปตามฟังก์ชันอาร์กแทนเจนต์จึงสามารถวัดมุมได้จากสมการ 4.23 ในการทดสอบนั้นได้ใช้ตัวอ้างอิงมุมมาตรฐานเทียบกับค่าที่หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติวัดได้เมื่อทำการเปรียบเทียบกันพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ ± 2 องศา ที่ภายใต้ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 3,000 เกาส์

$$\theta = \tan^{-1}(V_{Hz}/V_{Hy}) \quad (4.23)$$

4.2.2 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่สนามแม่เหล็กมากระทำ

สำหรับหัวข้อนี้จะแสดงถึงการทดสอบสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง โดยนำเอาสมบัติการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองมิติมาคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่สนามแม่เหล็กมากระทำกับหัววัด ซึ่งจากการวิเคราะห์สมบัติการตอบสนองต่อมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็กของโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบเพลตพื้นฐานเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์ และสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวขนานเป็นไปตามฟังก์ชันโคไซน์ ซึ่งเป็นไปตามหลักตรีโกณมิติที่สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่โดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้ดังสมการที่ 2.35 ในการทดสอบโดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งของมุมที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กมากระทำกับหัววัด ทำการปรับหมุนตำแหน่งของหัววัดสนามแม่เหล็กที่มุม 0 – 180 องศา ภายใต้สนามแม่เหล็กคงที่ทั้งหมด 7 ค่า คือ 0, 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500, และ 3,000 เกาส์ เพื่อทำการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คงที่ โดยผลการทดสอบแสดงในรูปแบบของกราฟวงกลม (Polar Plot) ดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

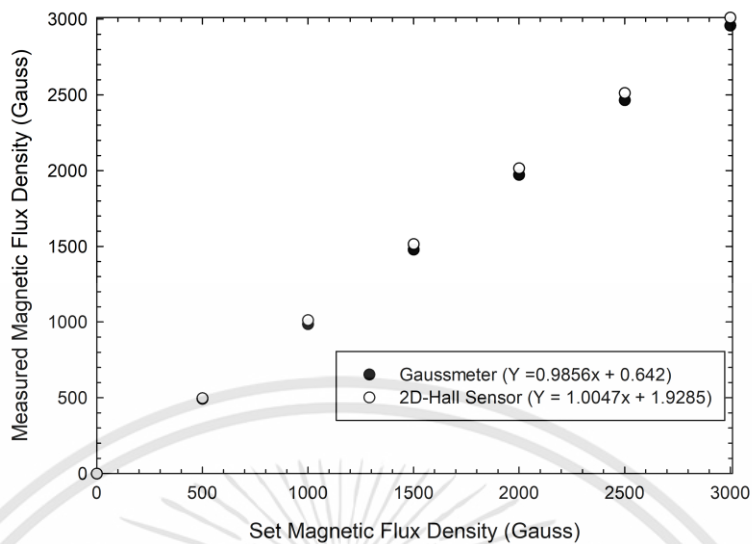


รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คังที่โดยไม่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กมากระทำ

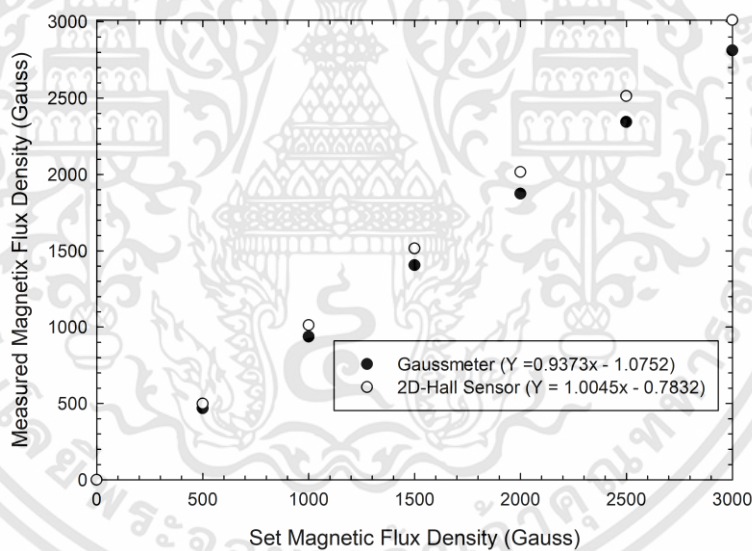
จากวงกลมดังรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คังที่ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามมุม 0 – 180 องศา โดยทำการคำนวณจากสัญญาณเอาต์พุทของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งสองมิติตามสมการที่ 2.35 ภายใต้ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 0, 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500, และ 3,000 เกาส์ ทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คังที่เท่ากับ 0.0034, 0.1503, 0.2023, 0.2517, 0.3076, 0.3532, และ 0.4089 โวลต์ ตามลำดับ โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์คังที่ไม่ขึ้นกับมุมที่สนามแม่เหล็กมากระทำด้วยการวัดนี้จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางได้

4.2.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ

ในการทดสอบการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางนั้นได้ทำการปรับมุมเอียงในการวัดมีค่าดังนี้ 10, 20, 30, และ 40 องศา ตามลำดับ โดยทำการปรับมุมเอียงทั้งหัววัดสนามแม่เหล็กแบบมาตรฐาน (F.W. Bell 5170) และหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ (Two-Dimensional Hall sensor) ซึ่งความชันของกราฟ 2D-Hall Sensor มีค่าเท่ากับ 1.0047, 1.0045, 1.0041, และ 1.0038 แต่สำหรับการวัดด้วยหัววัดสนามแม่เหล็กแบบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.9856, 0.9373, 0.8743, และ 0.7745 ตามลำดับ

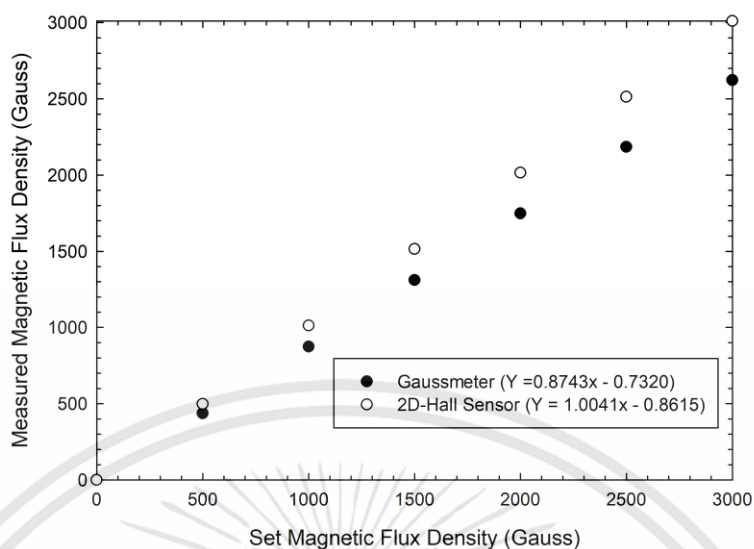


รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบการค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทำมุมเอียง 10 องศา

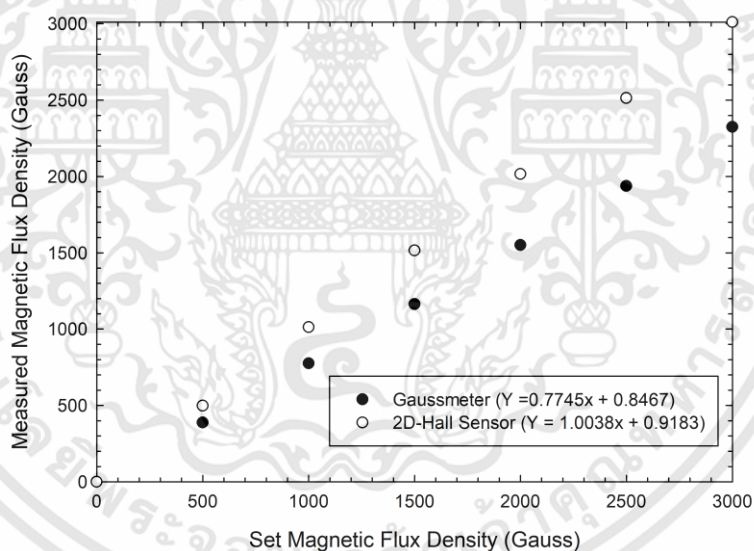


รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบการค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทำมุมเอียง 20 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบการค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทำหม้อเย็บ 30 องศา



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบการค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในกรณีที่ทำหม้อเย็บ 40 องศา

ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติพบว่า หม้อเย็บที่เกิดจากการวางหัววัดไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับการหัววัดสนามแม่เหล็กแบบมาตรฐานในเงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติมีความคลาดเคลื่อนในช่วง 0.33 – 0.74% สำหรับหัววัดสนามแม่เหล็กแบบมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนในช่วง 1.38 – 22.48%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างคุณสมบัติของห้วง
สนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ได้สร้างขึ้น แล้วมาประยุกต์ใช้งานเป็นห้วงสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับ
ทิศทางในสองมิติได้อย่างเหมาะสมและมีความแม่นยำสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอหลักการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติ ซึ่งนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับสมการทางตรีโกณมิติที่สามารถนำมาคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับมุมได้ โดยมีองค์ประกอบสำคัญสองส่วนคือ การออกแบบหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติและหลักการวัดค่า ในลำดับขั้นตอนในงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ในโครงสร้างต่างๆเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ถัดมาก็จะเป็นการทดสอบสมบัติของหัววัดที่ได้ทำการสร้างขึ้น จนสามารถทำการทดสอบการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติที่มีความแม่นยำสูงได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบทั้งหมดได้ดังนี้

หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานเทคโนโลยีซิลิคอนที่ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) โดยลักษณะของหัววัดได้นำข้อดีของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบแนวอน (Conventional Hall Sensor) และการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวขนานของหัววัดสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (Vertical Hall Sensor) มาสร้างรวมกันบนอุปกรณ์ตัวเดียวกันบนแนวระนาบ (Planar Hall Sensor) โดยหัววัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมานี้สามารถตอบสนองต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ทั้งสองแนวแกนในเวลาเดียวกันคือแนวตั้งฉาก (B_z) และแนวขนาน (B_x) หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ออกแบบขึ้นมีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพประกอบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิกทั้งหมดห้าขั้วซึ่งมีหน้าที่ที่แตกต่างกัน โดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้ว C2 ไปยัง C5 คือระยะ $L = 300$ ไมโครเมตร สำหรับขั้วโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก C1 และ C2 ใช้สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hx}) ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง (Parallel Direction : B_x) ของโครงสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง โดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้ว C1 และ C2 คือระยะ S ทำการออกแบบไว้สามเงื่อนไขคือ 40, 60, และ 80 ไมโครเมตร ส่วนขั้วโลหะนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก C3 และ C4 กำหนดเป็นระยะ W โดยทำการออกแบบไว้ทั้งหมดสามเงื่อนไขคือ 100, 200, และ 300 ไมโครเมตร ใช้สำหรับการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_{Hz}) ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก (Perpendicular Direction : B_z) โดยหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ถูกสร้างขึ้นนี้มีข้อเด่นหลายประการ เช่น เป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนในการสร้างต่ำกว่าหัววัดสนามแม่เหล็กโครงสร้างอื่น

ในการทดสอบสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิตินั้นขั้นตอนแรกจะทำการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ขั้นตอนที่สองทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ ขั้นตอนที่สามทดสอบสมบัติอัตราขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฮอลล์แบบสองมิติ ขั้นตอนที่สุดทดสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับมุม ขั้นตอนสุดท้ายทดสอบความแม่นยำของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติ

สำหรับการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติที่ถูกออกแบบขึ้นมีลักษณะเฉพาะประกอบด้วยขั้วโลหะนำไฟฟ้าทั้งหมดเพียงห้าขั้วที่ถูกสร้างขึ้นบนฐานรองซิลิคอน โดยทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะยืนยันความเป็นโอห์มมิกที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ พบว่าการแปรผันของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีความเป็นเชิงเส้นสูงซึ่งมีความสอดคล้องที่เป็นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามกฎของโอห์มทุกการทดลอง แสดงว่าทุกรอยสัมผัสที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

ในขั้นตอนที่สองเป็นการทดสอบสมบัติความไวในการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความไวในการตอบสนองได้ทั้งสองทิศทาง กล่าวคือสามารถตอบสนองต่อทิศสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและในแนวขนานกับหัววัด และสามารถตอบสนองต่อทิศทางของเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับขั้วแม่เหล็กได้สำหรับการทดสอบค่าความไวของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสามารถแบ่งการทดลองได้สองกรณีตามทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด คือ ทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (B_z) และทิศของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดสนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) โดยใช้ขั้ว C1, C2 และ C5 สำหรับจ่ายกระแสโดยจ่ายผ่านตัวต้านทาน R1 และ R2 ที่ถูกต่ออยู่กับขั้ว C1 และ C2 ที่กระแส 1 mA โดยกระแสจะไหลผ่านเนื้อสารไปยังขั้ว C5 ส่วนขั้ว C3 และ C4 ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉาก สำหรับขั้ว C1 และ C2 เป็นขั้วโลหะนำไฟฟ้าใช้ในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศขนาน ภายใต้สนามแม่เหล็ก -3000 ถึง 3000 เกาส์ ที่ถูกสร้างโดย Electromagnet เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าฮอลล์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กพบว่า หัววัดสนามแม่เหล็กแบบสองมิติสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับหัววัด โดยระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C1 และ C2 (S) ที่ 40, 60, และ 80 μm พบว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้การตอบสนองต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น และที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้า C3 และ C4 (W) ที่ 100, 200, และ 300 μm พบว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้การตอบสนองต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเช่นกัน อีกทั้งเงื่อนไขความหนาของฐานรองที่แตกต่างกัน 625, 325, และ 225 μm ยังส่งผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอีกด้วยซึ่งที่ความหนาของฐานรองน้อยลงจะส่งผลให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น จากนั้นจึงเลือกโครงสร้างที่มีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มากที่สุดคือ โครงสร้างที่ 9 มาเพื่อทำการประยุกต์ใช้งานโดยในขั้นตอนที่สามจะเป็นการทดสอบหาอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในแต่ละมิติโดยใช้โครงสร้างที่ 9 หลังจากนำหัววัดสนามแม่เหล็กมาใช้งานร่วมกับวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ที่ทำการขยายแรงดันของแต่ละมิติให้เพิ่มขึ้นและมีค่าเท่ากันแล้ว พบว่ามีค่าความไวที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแต่ละมิติเป็น 0.127 mV/G จากนั้นจึงทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่มากระทำที่มุมต่างๆกับหัววัดซึ่งเป็นขั้นตอนที่สี่ โดยทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำตั้งแต่ 0 – 180 องศา ภายใต้ความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่ 7 ค่า พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าคงที่ในแต่ละค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่มากระทำโดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่สนามแม่เหล็กนั้นมากระทำดังแสดงผลการวัดในรูปแบบกราฟวงกลม (Polar plot) และในขั้นตอนสุดท้ายการทดสอบความแม่นยำของหัววัดสนามแม่เหล็กโดยไม่ขึ้นกับทิศทางแบบสองมิติ โดยเปรียบเทียบกับหัววัดสนามแม่เหล็กแบบมาตรฐานรุ่น (F.W.Bell5170) สำหรับเงื่อนไขของมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับหัววัดเปลี่ยนไป 10, 20, 30, และ 40 องศา ผลที่ได้จากการทดสอบสำหรับหัววัดสนามแม่เหล็กแบบมาตรฐานมีความคลาดเคลื่อนในช่วง 1.38 – 22.48% แต่หัววัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมีความคลาดเคลื่อนในช่วงน้อยกว่า 1 % จากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่น้อยมากนี้สามารถบ่งชี้ว่าหัววัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางในสองมิติมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการวัดของระบบสนามแม่เหล็กต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R S Popovic, **Hall Effect Devices**. 2nd ED. IOP Publishing Ltd, 2004.
- [2] Dieter K.Schroder, **Semiconductor material and device characterization**. John Wiley&Sons, New York, 1990.
- [3] Richard S.Muller and Theodore I.Kamins. “**Device Electronics for Integrated Circuits**”, John Wiley&Sons, New York, Inc., 1986.
- [4] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิลิกส์**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2551.
- [5] Ramsden E. **Hall-Effect Sensors Theory and Applications**. 2nd ED. Oxford: Elsevier, Inc. 2006.
- [6] Fukuda M. **Optical Semiconductor Devices**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1999.
- [7] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สจล. 2549.
- [8] Sze S. M. and Kwok K. Ng. **Physics of Semiconductor Devices**. 3rd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [9] Pavel Ripka. **Magnetic Sensors and Magnetometers**. Boston, London : Artech House, Inc. 2001.
- [10] Jame W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell. **Instrumentation for Engineering Measurement**. 2nd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [11] Kelly S. **Foundamentals of Instrumentation**. 2nd ED. New York: Delmar cengage learning. 2008.
- [12] Clayton R. Paul, Keith W. Whites, Syed A. Nasar. **Introduction to Electromagnetic Fields**. 3rd ED. Massachusetts: McGraw-Hill. 1998.
- [13] Cullity B. D. and Graham C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2nd ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [14] Smith William F. **Principles of Materials Science and Engineering**. 2nd ED. New York: McGraw-Hill. 1990.
- [15] Michael Corral. **Trigonometry**. Scoolcraft College : GNU Free Documentation License. 2009.
- [16] Athirot Mano and Wisut Titiroongruang, “**An application of 2-D Silicon Hall Device for Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique**” International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Vol. 3, June 2015.
- [17] Yongyut Kaewjumras, Athirot Mano, Amporn Poyai and Wisut Titiroongruang “**Effect of different ohmic contact widths and distances on the absolute sensitivity of the two-dimensional Hall sensor**” The 6th KKU International Engineering Conference.
- [18] Mano A, Titiroongruang W. **A Fabrication of low cost two dimensions Hall effect sensor base on silicon technology**. 8th Conference of Electrical

Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016); 2016 May 25-27; Phuket, Thailand. Nakhon Pathom: Rajamangala University of Technology Rattanakosin; 2016.

- [19] Yongyut Kaewjumras, Athirot Mano, and Wisut Titiroongruang, **Application of Multi-Dimensional Hall Sensor for Gauss Measurement**, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017 Vol II, IMECS 2017, March 15-17, 2017, Hong Kong



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

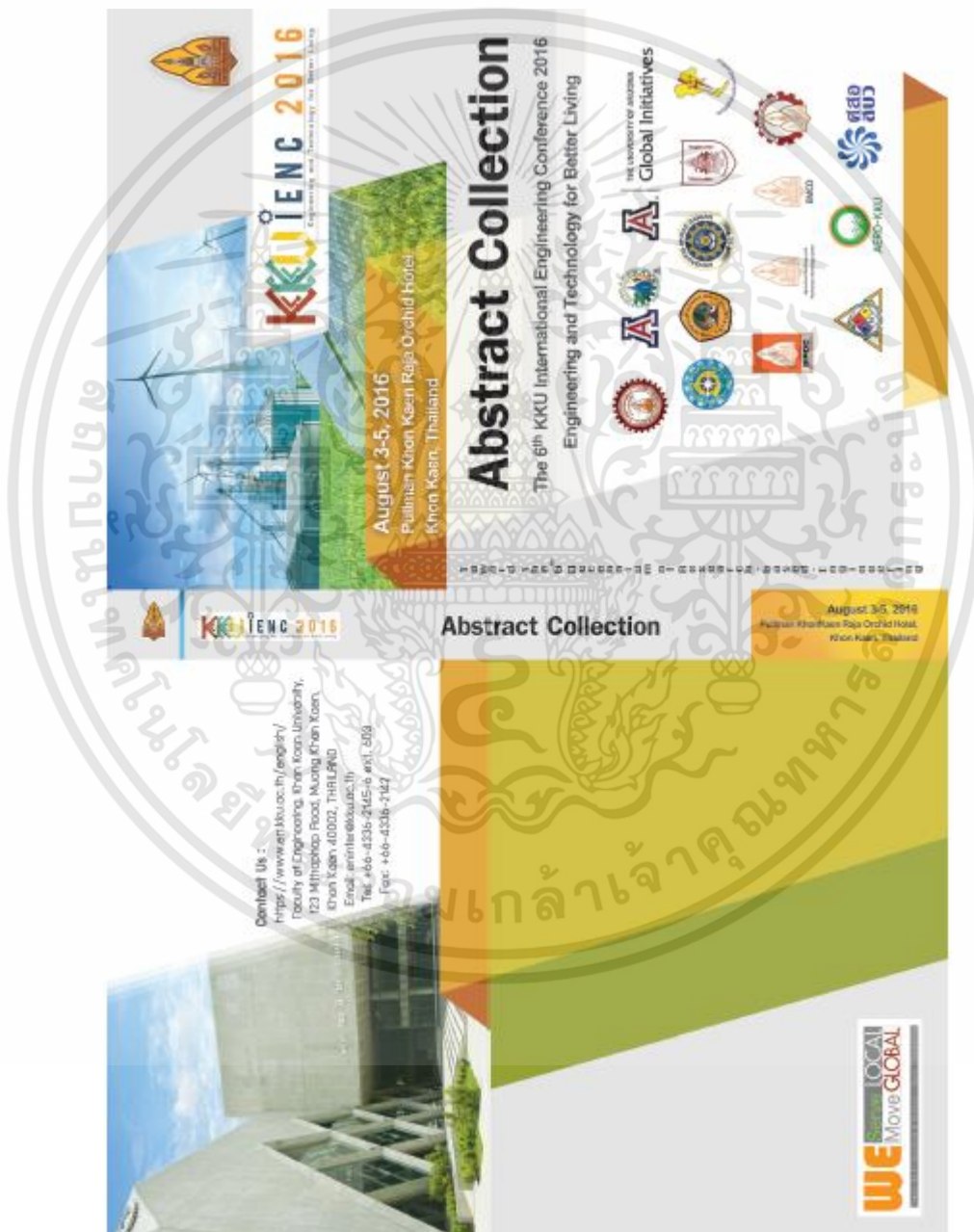


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Yongyut Kaewjumras, Athirot Mano, Amporn Poyai, and Wisut Titiroongruang, Effects of Different Ohmic Contact Widths and Distances on The Absolute Sensitivity of Two-Dimensional Hall Sensor, KKU ENGINEERING JOURNAL 2016; 43(S10): 23-25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Effects of different ohmic contact widths and distances on the absolute sensitivity of two-dimensional hall sensor

Yongyut Kaewjumras¹⁾, Athirot Mano¹⁾, Amporn Poyai²⁾ and Wisut Titiroongruang^{*1)}

¹⁾Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

²⁾Thai Microelectronics Center (TMEC) 51/4 Moo 1, Wang-Takien, Amphur Muang, Chachengsao 24000, Thailand.

Received April 2016
Accepted June 2016

Abstract

This research has investigated the effect of different ohmic contact widths and spacing (distances) on the perpendicular- and parallel-directional absolute sensitivity of silicon-based two-dimensional (2D) Hall sensors. The experimental sensors were of two configurations. The first configuration was of 100 μm and 40 μm in width (W) and spacing (S), while the other configuration was of 300 μm in W and 60 μm in S. The sensors were fabricated on a 20-30 Ωcm -resistivity p-type silicon substrate with five etched aluminum (Al) ohmic contacts. In the experiment, the perpendicular and parallel absolute sensitivity of the sensors were tested by varying the magnetic flux density from -5000 to 5000 Gauss (G). The findings revealed that the proposed sensors were capable of magnetic sensing in both perpendicular and parallel directions. Specifically, the perpendicular absolute sensitivity of the sensor with the 300 μm contact width was 2.08 times higher than that with 100 μm width. Meanwhile, the parallel absolute sensitivity characteristics associated with the two different contact distances (i.e. 40 μm and 60 μm) were similar. Thus, the ohmic contact width plays a more crucial role in the sensitivity enhancement of the Hall sensors.

Keywords: Hall effect, 2D hall, Hall structure, Width space, Sensitivity

1. Introduction

In the magnetic field measurement system, a Hall effect sensor is typically deployed to sense the magnetic flux density. The most common Hall sensor structures include the magnetic field effect transistor (MAGFET), magneto diode, magneto transistor and conventional Hall plate [1]. Of particular interest is the conventional Hall plate which is of straightforward structure and high linear sensitivity. The determinants of the Hall sensor sensitivity encompass its structure, mobility and the carrier concentration [2-3]. Ideally, a Hall sensor should be capable of multi-directional sensing with high magnetic field sensitivity and wider applications.

In [4], a low-cost two-dimensional silicon-based planar Hall effect sensor was proposed and experiments carried out. The author documented that the absolute sensitivity of the Hall device was subject to the width and spacing (i.e. distance) between ohmic contacts.

The aims of this research are to propose two-dimensional (2D) silicon-based Hall sensors capable of perpendicular and parallel magnetic sensing, and to examine the parameters influencing the absolute sensitivity of the sensor. The parameters under investigation consist of the width (W) and spacing (S) between ohmic contacts (C) on the substrate, whereby both parameters were varied and the sensor's

absolute sensitivity measured. The perpendicular- and parallel-directional absolute sensitivity characteristics are respectively correlated to the varying widths and distances between ohmic contacts [1].

2. Devices design and experiment

2.1 Device design

The proposed 2D Hall sensors are of simple structure fabricated using the silicon technology on a p-type silicon wafer with a resistivity range of 20-30 Ωcm . In the sensor fabrication, aluminum (Al) was grown on the substrate using RF-sputtering and subsequently etched for five ohmic contacts (i.e. C1, C2, C3, C4, C5). In the experiment, the drive currents were applied to C1 and C2, while the output Hall voltages were measured at C1, C2 and at C3, C4 for the parallel- and perpendicular-directional sensing, respectively. C5 is the ground contact. The entire sensor has an active area of 600x300 μm^2 .

In this research, the experiments were carried out with two different configurations of 2D Hall sensor and the sensor sensitivity determined. In the first configuration, the spacing (S) between C1 and C2 and the width (W) between C3 and C4 were respectively 40 μm and 100 μm . Meanwhile, in the second configuration, the spacing (S) between C1 and C2

*Corresponding author.

Email address: Yongyutkaewjumras@gmail.com, manoathirot@yahoo.com, Amporn.poyai@nectec.or.th, ktwisut@kmitl.ac.th*
doi: 10.14456/kkuenj.2016.60

and the width (W) between C3 and C4 were 60µm and 300µm. The schematics of both configurations are respectively illustrated in Figures 1(a)-(b).

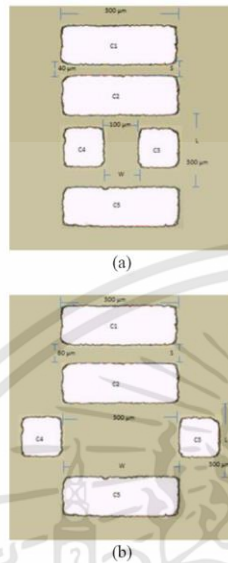


Figure 1 The top view of the proposed 2D Hall sensors: (a) 1st structure, (b) 2nd structure

2.2 Experiment

The perpendicular- and parallel-directional absolute sensitivity characteristics of both configurations of 2D Hall sensors were investigated. In the experiment, a 1mA bias current was applied to C1 and C2 correspondingly through two resistors (R1, R2). In addition, the measurements of the Hall output voltages, using a Fluke 8808A multimeter, in the perpendicular direction were taken at C3 and C4, while those in the parallel direction at C1 and C2. A magnetizer (Ohsumi Electric Manufacture) was deployed to generate the magnetic field for testing the 2D Hall sensors, in which the magnetic flux density was varied between -5000 and 5000 Gauss (G) [5]. Figure 2 illustrates the operating principle of the proposed sensor and the magnetizer.

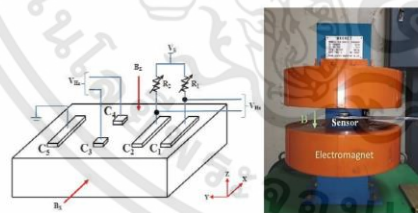


Figure 2 The operating principle of the proposed sensor and the magnetizer

3. Results and discussion

In this research, the perpendicular and parallel-directional absolute sensitivity of the proposed 2D Hall sensors were determined by varying the magnetic flux density between -5000 and 5000 Gauss. In the first configuration (W = 100µm, S = 40µm), the perpendicular-directional absolute sensitivity of C3 and C4 was significantly linear, corresponding to $Y = 0.000074x - 0.000558$, with the perpendicular absolute sensitivity of 0.000074mV/G. On the other hand, the perpendicular-directional absolute sensitivity of C1 and C2 was negligible, as depicted in Figure 3.

In Figure 4, the parallel-directional absolute sensitivity of C1 and C2 was significantly linear, corresponding to $Y = 0.000699x + 0.005385$, with the absolute sensitivity of 0.000699mV/G. Meanwhile, the parallel-directional sensing was inconsequential for C3 and C4.

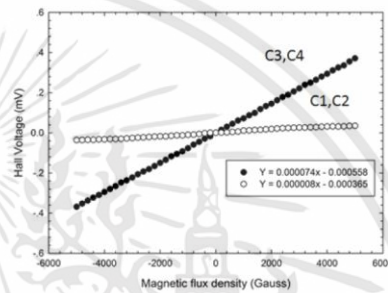


Figure 3 The perpendicular-directional absolute sensitivity of the 2D Hall sensor of the first configuration

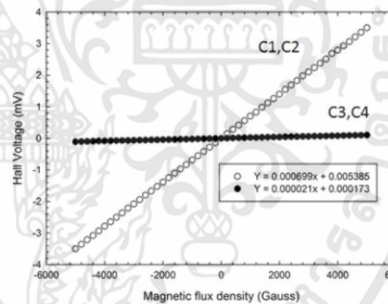


Figure 4 The parallel-directional absolute sensitivity of the 2D Hall sensor of the first configuration

In the second configuration (W = 300µm, S = 60µm), the perpendicular-directional absolute sensitivity of C3 and C4 was significantly linear, corresponding to $Y = 0.000154x + 0.004731$, with the perpendicular absolute sensitivity of 0.000154mV/G. On the other hand, the perpendicular-directional sensing was negligible for C1 and C2, as depicted in Figure 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Yongyut Kaewjumras, Athirot Mano, and Wisut Titiroongruang, Application of Multi-Dimensional Hall Sensor for Gauss Measurement, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017 Vol II, IMECS 2017, March 15-17, 2017, Hong Kong



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application of Multi-Dimensional Hall Sensor for Gauss Measurement

Yongyut Kaewjumras, Athirot Mano, and Wisut Titiroongruang

Abstract—This paper reported on a two-dimensional Hall sensor enabling to measure the two spatial components of the magnetic field and applied for gauss measurement application. The device was operated through only five contacts and tested by varying the magnetic flux density from -5000 to 5000 Gauss (G) and using signal conditioning circuitry for amplifying and adjusting the both similar sensitivity. After that, the output signals were converted to digital signals by ADC for transmitting a computer using LAB-VIEW programming and comparison with the standard gauss meter (F.W.Bell5170). The result of gauss measuring application comparison with the standard gauss meter has done with a precision of 0.04-3.80% including a calibration process.

Index Terms—Hall effect, Two-dimensional Hall sensor, Sensitivity, Signal conditioning circuitry.

I. INTRODUCTION

A Hall effect sensor in silicon (Si) are used for applications in current measurement, angular measurement, and gauss measurement etc. Of particular interest is gauss measurement technique which is a contactless position sensing using a magnetic flux density and a Hall effect sensor. Conventional Hall sensor serves to measure the perpendicular-dimensional magnetic field vector (B_z). One-dimensional may not be able to get accurate in measurement that a Hall sensor should be capable of multi-directional sensing with magnetic field sensitivity. With such multi-directional sensing, the contactless detection can be executed with high accuracy. These two-directional (2D) Hall sensor detects simultaneously two in-axis z-x magnetic field components B_z and B_x [1,2].

In [3], an application of 2-D silicon Hall device for independent directional magnetic field measurement technique was proposed and experiments carried out. The author mentioned that the 2-D silicon hall device was capable of sensing in two-dimensional and independent directional magnetic field.

The present paper aims at making a comparison standard gauss meter and gauss measurement from two-dimensional Hall sensor based on a simple silicon process technology.

Kaewjumras, A. Mano, and W. Titiroongruang are with Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.(email: Yongyutkaewjumras@gmail.com, manoathirot@yahoo.com, ktwisut@kmitl.ac.th).

The advantage of this two-dimensional Hall sensor is that its be capable of sensing a magnetic field one more direction, perpendicular-directional (B_z) and parallel-directional (B_x). Furthermore, signals from the device are coalesced to signal conditioning circuitry for amplifying and adjusting similar sensitivity, and then the output signals were converted to digital signals by ADC for transmitting a computer using LAB-VIEW programming and comparison with the standard gauss meter (F.W.Bell5170). This technique is capable of sensing magnetic flux density with high accurate measurement. Section II briefly the concept and the two-dimensional Hall structure device. The experimental examination of the absolute sensitivity and gauss measurement technique corresponding the two-dimensional Hall sensor are described in Section III. Results and Discussion are presented in Section IV and a conclusion in Section V.

II. CONCEPT AND STRUCTURE OF 2D HALL SENSOR

In [4,5] it has been concluded that ideal conventional and vertical Hall effect sensor were combined. The two-dimensional Hall sensor was fabricated using silicon technology on a p-type silicon wafer with a resistivity range of 20-30 Ω .cm. The aluminum was grown on the substrate using RF-sputtering and consequently etched for five ohmic contacts (i.e.C1,C2,C3,C4,C5). In the experiment, the bias currents were applied to C1 and C2. Meanwhile, the output Hall voltage was measured at C1,C2 and at C3,C4 for parallel- and perpendicular-directional sensing, respectively. C5 is the ground contact. The entire sensor has an active area of 600x300 μ m² as figure 1. Both the two output signals were coalesced to signal conditioning circuitry for amplifying signals and adjusting the similarly absolute sensitivity and comparison with standard gauss meter (F.W.Bell5170).

III. THE OPERATING PRINCIPLE

The magnetic field measurement includes two-dimensional Hall sensor, signal conditioning circuitry, analog to digital converter, and computation stage. The diagram of measurement as depicted in Figure 2.

In the first experiment, A bias current 1 mA was applied to C1 and C2 correspondingly through two resistors (R_1, R_2). C5 is the ground contact. An electromagnet (Ohsumi Electric Manufacture) was deployed to generate the magnetic field for testing, in which the magnetic flux density was varied between -5000 and 5000 Gauss (G). the output signal of both perpendicular- and parallel-field

absolute sensitivity were tested on two-dimensional Hall sensor. The Hall output voltages, in the perpendicular direction were taken at C3 and C4, while in the parallel direction at C1 and C2. Figure 3 illustrates the operating principle of the proposed sensor and the electromagnet.

After that, the both output signals were connected to signal conditioning circuitry for amplifying and adjusting similar absolute sensitivity, then output signals were converted to digital signals by ADC for transmitting a computer using LAB-VIEW programming and comparison with standard gauss meter (F.W.Bell5170).

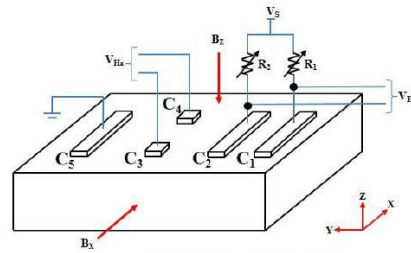


Fig.3 The operating principle of the proposed sensor and the electromagnet.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

As the results, the perpendicular- and parallel-directional absolute sensitivity of the two-dimensional Hall sensor were imposed by varying the magnetic flux density between -5000 and 5000 Gauss. The perpendicular-directional absolute sensitivity of C3 and C4 was highly linear, corresponding to $Y = 0.000146x + 0.001800$, with the perpendicular absolute sensitivity of 0.000146 mV/G. Meanwhile, the perpendicular-directional absolute sensitivity of C1 and C2 was negligible, as illustrated in Figure 4.

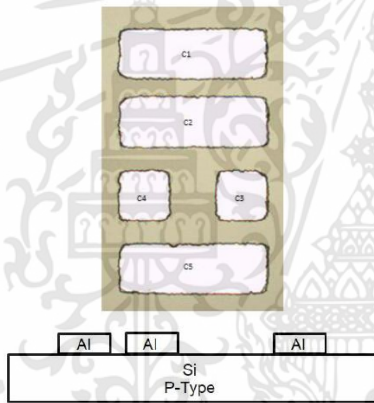


Fig.1 Top-view and cross-section of two-dimensional Hall sensor.

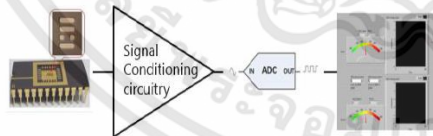


Fig.2 The diagram of gauss measurement.

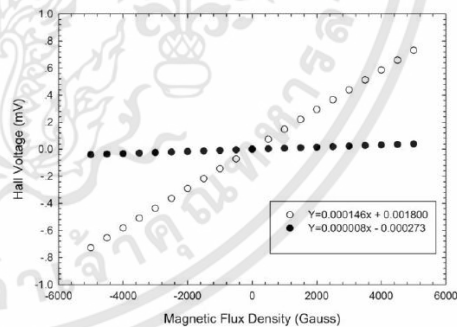


Fig.4 The perpendicular-directional absolute sensitivity of the two-dimensional Hall sensor.

In Figure 5, the parallel-directional absolute sensitivity of C1 and C2 was significantly linear, corresponding to $Y = 0.000703 - 0.005600$, with the absolute sensitivity of 0.000703 mV/G . On the other hand, the parallel-directional sensing was inconsequential for C3 and C4.

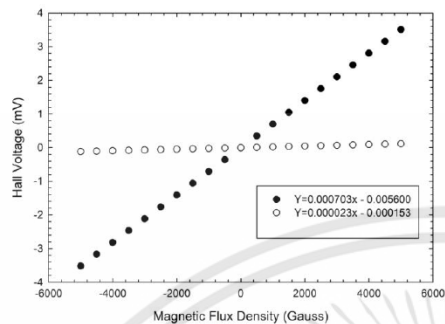


Fig.5 The parallel-directional absolute sensitivity of the two-dimensional Hall sensor.

The output from signal conditioning circuitry was amplified and adjusted the similar absolute sensitivity of both directions. In addition, the perpendicular- and parallel-directional absolute sensitivity of the proposed two-dimensional Hall sensor was determined by varying the magnetic flux density between -5000 and 5000 Gauss and the absolute voltage signal was measured. In Figure 6, the perpendicular- and parallel-directional absolute sensitivity were 0.00102 mV/G and 0.001013 mV/G , respectively. The both of absolute sensitivity was similarly sensing.

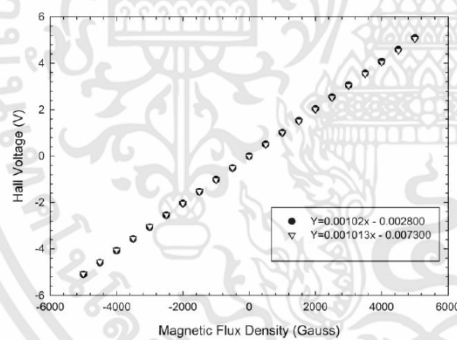


Fig.6 The both of absolute sensitivity of the two-dimensional Hall sensor with signal conditioning circuitry.

The output from signal conditioning circuitry was prepared for the gauss measuring application comparison with standard gauss meter (F.W.Bell5170) by varying the magnetic flux density from 0 to 5000 Gauss. The output result was analyzed and calculated using LAB-VIEW programing. Figure 7 illustrated the gauss measuring

application comparison with a standard gauss meter. The achieved total gauss measuring application accuracy of the laboratory setup of the two-dimensional Hall sensor was $0.04 - 3.80\%$ for the comparison standard gauss meter.

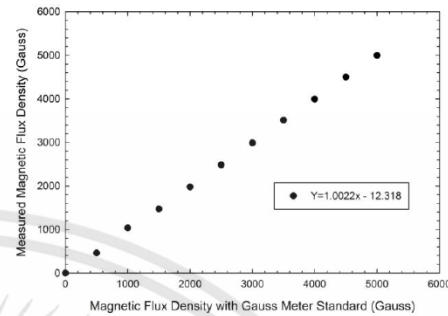


Fig.7 The gauss measuring application comparison with standard gauss meter (F.W.Bell5170).

The experimental results validate the utility of the gauss measuring application comparison with standard gauss meter were listed in Table1.

V. CONCLUSION

This paper has proposed the ideal conventional Hall sensor and vertical Hall sensor by a combination that the two-dimensional Hall sensor was capable of magnetic sensing in both perpendicular and parallel directions. We introduced for this application the two sensitive directions as a first step of amplifying with the signal conditioning circuitry for both similar sensitivities. The result of gauss measuring application comparison with the standard gauss meter has done with a precision of $0.04-3.80\%$ including a calibration process.

TABLE I
TECHNICAL DATA OF GAUSS MEASURING APPLICATION COMPARISON WITH STANDARD GAUSS METER

Setting magnetic flux density with standard gauss meter (Gauss)	Measured magnetic flux density (Gauss)	Error (%)
0	0	0
500	481	3.80
1000	1036	3.60
1500	1472	1.86
2000	1978	1.10
2500	2483	0.68
3000	2989	0.36
3500	3512	0.34
4000	3994	0.15
4500	4503	0.06
5000	4998	0.04

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to extend sincere appreciation to the Thai Microelectronics Center (TMEC) for the technical contributions to this research.

REFERENCES

- [1] R S Popovic, Hall Effect Devices. 2nd ED. IOP Publishing Ltd, 2004.
- [2] Dieter K Schroder, Semiconductor material and device characterization. John Wiley&Sons, New York, 1990.
- [3] Athirot Mano and Wisut Titroongruang, "An application of 2-D Silicon Hall Device for Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique" International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Vol. 3, June 2015.
- [4] Yongyut Kaewjumras, Athirot Mano, Amporn Poyai and Wisut Titroongruang "Effect of different ohmic contact widths and distances on the absolute sensitivity of the two-dimensional Hall sensor" The 6th KKU International Engineering Conference.
- [5] Mano A. Titroongruang W. A Fabrication of low cost two dimensions Hall effect sensor base on silicon technology. 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016); 2016 May 25-27; Phuket, Thailand. Nakhon Pathom: Rajamangala University of Technology Rattanakosin; 2016.

BIOGRAPHIES



Yongyut Kaewjumras was born on 1989, Thailand. He received his B.Sc. degree in Applied physics (2010) and M.Eng. degree in Microelectronics (2013) at the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His scientific focus is on Silicon sensor, Semiconductor materials and characterization, Magnetic material and its application. He is currently studying in Electrical Engineering at the Faculty of Engineering at the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

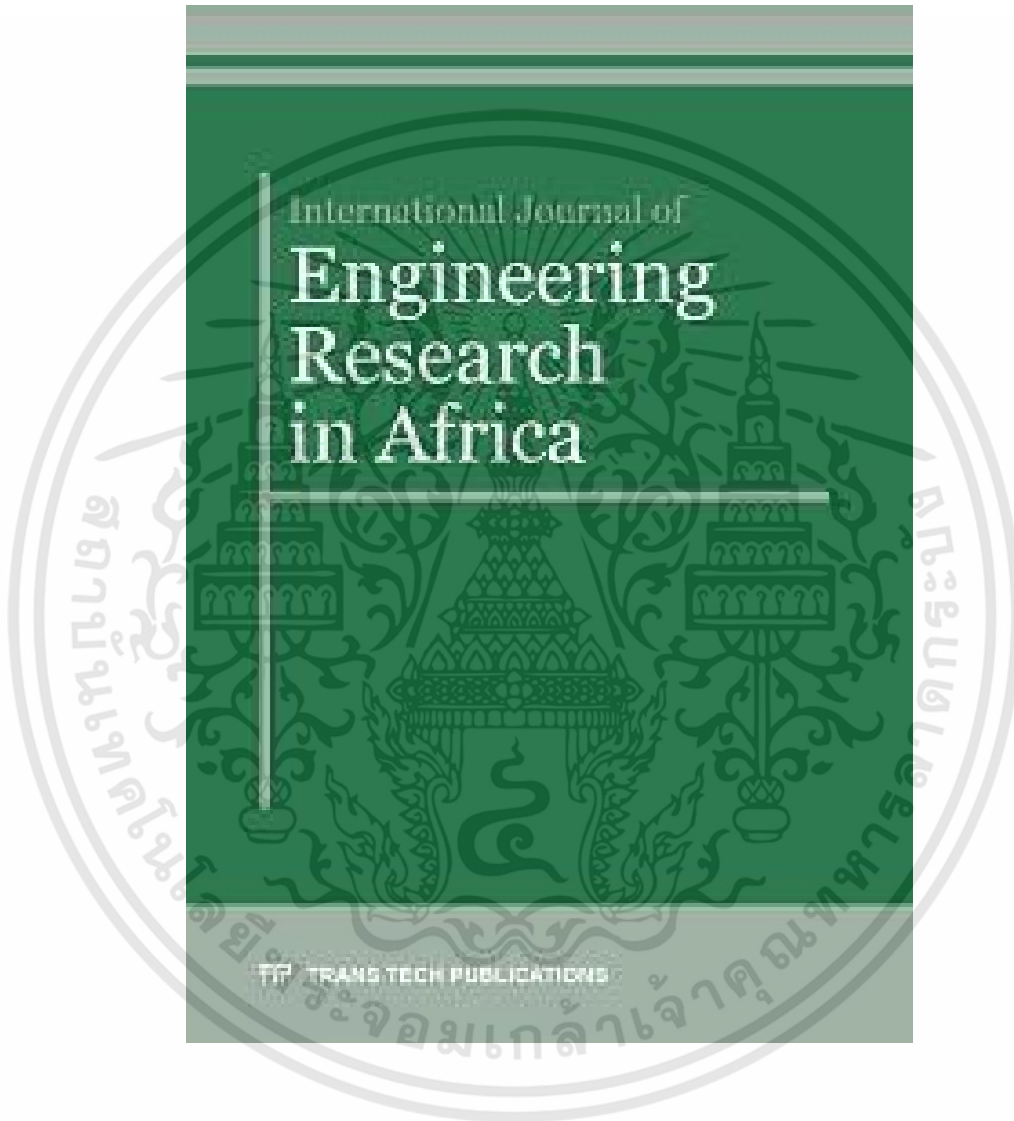


Athirot Mano was born on 1986, Thailand. He received the bachelor's degree major in Applied Physics, Faculty of Science and received the Master's degree major in Microelectronics Engineering at Electronics Engineering Department from King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang (KMITL). His current research interests include Silicon sensor 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 Titroongruang was born on 1957, Thailand. He obtained the B.E and M.E degree in Electronics Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL) and Ph.D. degree from Tokai University in Japan. His current research interests include Superconductor materials, Diamond thin film synthetic, Semiconductor device and its application. He teaches in Electronics at the department of electronics of the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

3. Yongyut Kaewjumras, Jirawat Prabket, Wisut Titiroongruangand Surasak Niemcharoen “Contactless Silicon-based Multi-dimensional Hall Sensor with Simultaneous Magnetic Sensing and Omni-rotational Angle Measurement” International Journal of Engineering Research in Africa (Placed in queue for publication)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contactless Silicon-based Multi-dimensional Hall Sensor with Simultaneous Magnetic Sensing and Omni-rotational Angle Measurement

Yongyut Kaewjumras^{1, a*}, Jirawat Prabket^{2, b}, Wisut Titiroongruang^{3, c} and Surasak Niemcharoen^{1, d}

¹Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Thai Microelectronics Center (TMEC) 51/4 Moo 1, Wang-Takien, Amphur Muang, Chachengsao, 24000, Thailand

³Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

^ayongyutkaewjumras@gmail.com, ^bjirawat.prabket@nectec.or.th, ^cwisut.ti@kmitl.ac.th,

^dsurasak.ni@kmitl.ac.th

Keywords: Hall effect, conventional hall plate, magnetic sensor, angle, contactless

Abstract. This experimental research proposes a contactless silicon-based two-dimensional (2D) Hall sensor capable of simultaneous parallel- and perpendicular-directional magnetic sensing, with a 360° angle measurement. The Hall sensor was of non-symmetrical five-ohmic contact configuration (C1 – C5). In the study, experiments were carried out in three stages. In the first-stage experiment, the current (I) and voltage (V) of the 2D Hall sensor were determined under three schemes: schemes A (C1&C2), B (C2&C5), and C (C3&C4). In the second-stage experiment, the parallel and perpendicular absolute sensitivities of the 2D sensor were examined. Considering the discrepancy between the parallel and perpendicular absolute sensitivities, signal conditioning circuitry was incorporated into the sensor system to compensate, and the rotational angles measured in the final-stage experiment. The results revealed that the I-V curves were dominantly linear, corresponding to Ohm's law. However, the parallel and perpendicular absolute sensitivities were low and unequal. Thus, signal conditioning circuitry was incorporated into the system to address the discrepancy and improve the performance. Importantly, the 2D Hall sensor exhibited a mere ±3° discrepancy between the measured and reference rotational angles, given the magnetic flux density of 1000 G, with the hysteresis error of 2.8%. In essence, the proposed contactless silicon-based 2D Hall sensor possesses high potential for high-precision industrial applications.

Introduction

Magnetic field sensors based on the Hall effect in silicon are commonly used in applications with a magnetic flux density between 1 - 10000 Gauss. Apart from the magnetic field measurement, the Hall sensors are deployed in contactless sensor systems for switching, current, and angle measurements. At present, contactless angle measurement based on a magnetic sensor and magnetic flux density has gained wider acceptance due to the high accuracy and robustness. Ideally, a contactless angle measurement system should be of low cost, compact size, and full angle range (0 - 360°) [1-7].

There are three main types of magnetic sensor: the magnetic field effect transistor (MAGFET), magneto diode, and Hall plate. Of particular interest is the Hall plate due to its

straightforward structure with high linear sensitivity. The typical Hall plate is of low-doped p-type silicon with high Hall mobility (μ_H) and symmetrical with four ohmic electrical contacts, in which one pair drive the sensor and the other pair are for sensing, thus capable of only unidirectional magnetic sensing. Ideally, a Hall sensor should possess the multi-directional magnetic sensing characteristic in order to improve the accuracy of contactless angle measurement.

In the angle measurement, the multi-directional (2D) sensor is rotated inside the electromagnetic field, and the Hall voltages of the rotational angles, as a function of the sine and cosine functions, determined. In principle, the amplitudes of the sine and cosine curves are shifted 90° [8-24].

In [7], a 3D Hall sensor was simulated under variable conditions to investigate the input resistance, Hall voltage, and absolute sensitivity. However, no sensor prototype was fabricated. In [8], a 2D Hall sensor, containing eight ohmic electrical contacts, was proposed for magnetic sensing. The sensor nevertheless suffered from excessive electrical contacts, extended response time, and energy inefficiency. Moreover, the excessive ohmic contacts presented the fabrication and miniaturization challenges.

In [9], a multi-directional silicon-based CMOS Hall sensor integrated with analog and digital signal circuitries was proposed to compensate the discrepancy between the parallel and perpendicular absolute sensitivities and amplify the Hall voltages. In [10], the effects of various ohmic contact widths and distances on the absolute sensitivity of 2D Hall sensor were investigated, and the results showed that the contact widths and distances were positively correlated to the absolute sensitivity of the sensor. Nevertheless, the 2D Hall sensor suffered from low absolute sensitivity and large discrepancy, necessitating the implementation of signal conditioning circuitry.

In [11], experiments were carried out on a high-speed CMOS integrated magnetic angle sensor, consisting of two 8-contact circularly-arranged arrays (i.e., inner and outer circles). The results revealed the slow response time and substantial energy consumption of the sensor. Moreover, the angle measurement was narrow ($0-90^\circ$). In [12], an analog x- and y-axis magnetic sensor could achieve a highly linear correlation between the measured and reference rotational angles. Nonetheless, the angle measurement of the sensor was restricted ($0-120^\circ$). In [13], a multi-directional silicon-based Hall sensor could perform parallel- and perpendicular-directional magnetic sensing, with an angle measurement of $0-180^\circ$, still far short of the full angle measurement.

This research thus proposes a contactless silicon-based 2D Hall sensor, consisting five ohmic electrical contacts (C1 – C5), capable of parallel and perpendicular magnetic sensing with 360° angle measurement. Experiments were carried out in three stages. In the first-stage experiment, the current and voltage of the sensor were assessed under three schemes: schemes A (C1&C2), B (C2&C5), and C (C3&C4). In the second-stage experiment, the parallel and perpendicular absolute sensitivities of the 2D sensor were determined. In light of the discrepancy between the parallel and perpendicular absolute sensitivities, signal conditioning circuitry was incorporated into the sensor system to compensate, and the rotational angle (θ) measured in the final-stage experiment.

The organization of this research is as follows: Section 1 is the introduction. Section 2 details the sensor fabrication and experimental methods, and Section 3 discusses the experimental results. The concluding remarks are provided in Section 4.

Sensor Fabrication and Experimental Methods

The contactless 2D Hall sensor was fabricated using silicon technology on a P-type wafer substrate with a resistivity of $5 \Omega \cdot \text{cm}$ and thickness of $625 \mu\text{m}$. The wafer substrate was first piranha-etched to remove inorganics and deposited with silicon-dioxide (SiO_2) using dry chemical. The first marking using positive photoresist (PR) was then carried out for five ohmic electrical contacts (C1, C2, C3, C4, C5), and aluminum (Al) was grown using radio frequency (RF) sputtering. The second marking was undertaken to remove excess aluminum and expose the ohmic

electrical contacts (C1 – C5) prior to sintering at 450 C° for 30 mins. The dimensions of C1, C2, and C5 were 300x100 μm ; and 100x100 μm for C3 and C4. The resulting 2D Hall sensor has a sensing area of 600x300 μm^2 [6].

Figures 1 (a)-(b) respectively illustrate the fabrication process of the 2D Hall sensor and the configuration of ohmic electrical contacts (C1, C2, C3, C4, C5) on the P-type silicon wafer substrate.

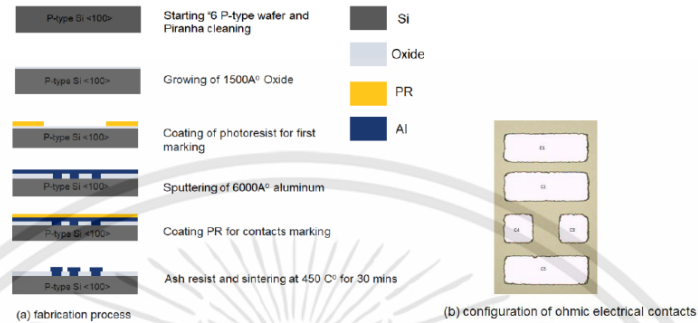


Figure 1 The proposed 2D Hall sensor: (a) fabrication process, (b) configuration of ohmic electrical contacts

In this research, experiments were carried out in three stages. The first-stage experiment investigated the current (I) and voltage (V) of the ohmic electrical contacts (C1 – C5) of the 2D Hall sensor. The second-stage experiment assessed the parallel- (B_x) and perpendicular-directional (B_z) magnetic sensing of the sensor, and the final stage determined the angle measurement of the 2D Hall sensor.

In the first-stage experiment, a bias voltage (V_{supply}) was varied between -2 to 2 V using BK precision 1735a power supply. In the experiment, the bias voltage was applied to the 2D sensor according to schemes A, B, and C, as shown in Figure 2. In scheme A, the bias voltage was fed to C1 and C2; to C2 and C5 for scheme B; and to C3 and C4 for scheme C. The current (I) and voltage output (V_{output}) were measured with a multi-meter (Fluke 8808A). The C1&C5 scheme was omitted due to a close resemblance between the I-V curves of the C1&C5 scheme and scheme B.

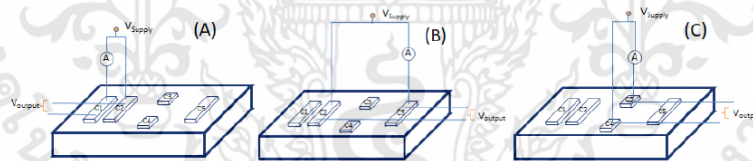


Figure 2 The experimental I-V of ohmic contacts: (a) scheme A, (b) scheme B, (c) scheme C

In the second-stage experiment, a 1 mA bias current was applied through trimmers (R1, R2) to the corresponding C1 and C2, with C5 as ground contact. The trimmers R1 and R2 were used to manipulate the bias current for equal potential. A magnetizer (Ohsumi Electric Manufacture) was deployed to generate the magnetic field to investigate the parallel- (B_x) and perpendicular-directional (B_z) magnetic sensing of the 2D Hall sensor, where the magnetic flux density (B) was varied between -5000 and 5000 G using a standard gauss meter (F.W. Bell 5170).

The Hall voltages (output) were measured using Fluke 8808A multi-meter, whereby the parallel axis was taken at C1 and C2 and the perpendicular axis at C3 and C4. The carrier lines were curvilinear, in which the current paths started at C1 and C2 ($I_{C1, C2}$) and terminated at C5 (ground contact), penetrating to a depth of 625 μm . The initial trajectory of the current was perpendicular to

the sensor surface and shifted to parallel upon contact with magnetic field. The parallel Hall voltage (V_{Hx}) was determined at C1 and C2. The perpendicular Hall voltage (V_{Hz}) across C3 and C4 was measured at their mid-point. The voltage drop in the trimmers (R1, R2) was ignored, given the negligible resistance of R1 and R2 as a result of only a few microamperes of the current passing through the trimmers.

In this research, the 2D Hall sensor is of non-symmetrical five-ohmic contact configuration. The Lorentz force of parallel magnetic field ($F_L(B_x)$) is $\pm q v_x \times B_x$, where q is the charge particle and v_x is the velocity. $F_L(B_x)$ deflects the parallel Hall voltage ($V_H(B_x)$) to the region between C1 and C2, and its proximity to either C1 or C2 is governed by the magnitude of B_x (between -5000 and 5000 G). Specifically, the current densities of C1 and C2 are inversely correlated.

The Lorentz force of perpendicular magnetic field ($F_L(B_z)$) is $\pm q v_y \times B_z$. $F_L(B_z)$ deflects the perpendicular Hall voltage ($V_H(B_z)$) to the region between C3 and C4, and the proximity to either contact (C3 or C4) depends on the magnitude of B_z . The current densities of C3 and C4 are inversely correlated. Figure 3 illustrates the schematic of the parallel- (B_x) and perpendicular-directional (B_z) magnetic sensing of the 2D Hall sensor and the experimental magnetizer.

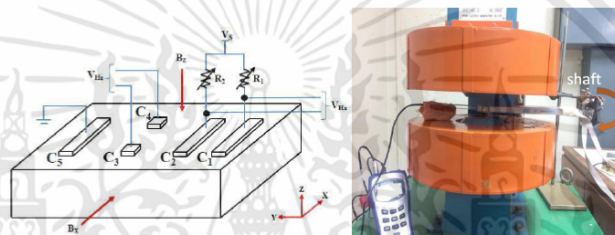


Figure 3 The parallel- (B_x) and perpendicular-directional (B_z) magnetic sensing of the 2D Hall sensor

In the third-stage experiment, signal conditioning circuitry (INA101) was incorporated into the 2D Hall sensor system and the rotational angle measured. The experimental signal conditioning circuitry possesses a low input bias current and high common mode rejection ratio (CMRR). Specifically, the INA101 signal conditioning circuitry is of low cost, with dual-supply operability, low drift ($0.25 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum), low offset voltage ($25 \mu\text{V}$ maximum), low nonlinearity (0.002%), low noise ($13 \text{ nV}/(\text{Hz})^{1/2}$), and high CMRR (106 dB at 60 Hz). In practice, signal conditioning circuitry is deployed to equalize (or compensate) the parallel and perpendicular absolute sensitivities. The output signals were digitally converted using 12-bit analog to digital (ADC) for subsequent angle measurement analysis by LabView program (Figure 4).

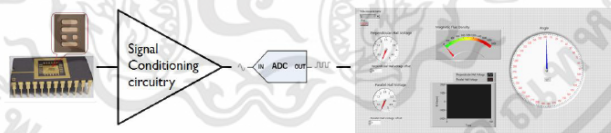


Figure 4 The angle measurement of the 2D Hall sensor with signal conditioning circuitry to equalize the parallel and perpendicular absolute sensitivities

Experimental Results and Discussion

Figure 5 illustrates the current-voltage (I-V) curves of ohmic electrical contacts (C1 – C5) of the 2D Hall sensor under schemes A (C1&C2), B (C2&C5), and C (C3&C4). The I-V curves under schemes A, B, and C exhibited linear behavior due to non-rectifying junction, in accordance with Ohm's law. The ohmic contacts enable particle charges to readily flow in both directions (forward and reverse) between two contacts.

Under scheme A (C1&C2), the resistance was 370 Ω . Meanwhile, the resistance were 243 Ω and 880 Ω under schemes B (C2&C5) and C (C3&C4), respectively.

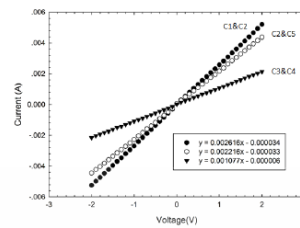


Figure 5 The current-voltage (I-V) curves of ohmic electrical contacts (C1 – C5) of the 2D Hall sensor under schemes A (C1&C2), B (C2&C5), and C (C3&C4)

In the second-stage experiment, the absolute sensitivities of the 2D Hall sensor were characterized by applying 1 mA bias current through trimmers (R1 and R2) to C1 and C2 simultaneously. The result showed the non-linearity below 0.08% at induction (B) between -5000 and 5000 G ($-5000 \leq B \leq 5000$). In Figure 6, the parallel-directional absolute sensitivity of C1 and C2 was dominantly linear, corresponding to $y = 0.000381x + 0.039058$, with the absolute sensitivity of 0.000381 mV/G. Meanwhile, the parallel absolute sensitivity of C3 and C4 was negligible (0.000003 mV/G), approaching zero.

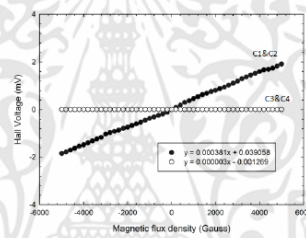


Figure 6 The parallel-directional absolute sensitivities of the 2D hall sensor

In Figure 7, the perpendicular-directional absolute sensitivity of C3 and C4 was dominantly linear, corresponding to $y = 0.000086x + 0.001212$, with the absolute sensitivity of 0.000086 mV/G. Meanwhile, the perpendicular absolute sensitivity of C1 and C2 was negligible (0.000003 mV/G).

The discrepancy between the parallel (C1&C2) and perpendicular (C3&C4) absolute sensitivities (0.000381 vs 0.000086 mV/G) was attributable to the non-symmetrical five-ohmic contact (C1 – C5) configuration. Thus, signal conditioning circuitry was incorporated into the sensor system to compensate (i.e., equalize) the absolute sensitivities.

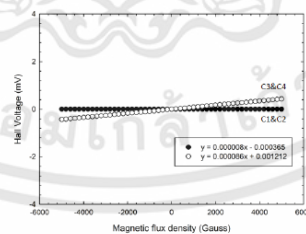


Figure 7 The perpendicular-directional absolute sensitivities of the 2D hall sensor

In the third-stage experiment, the discrepancy between the parallel and perpendicular absolute sensitivities of the 2D Hall sensor was compensated by incorporating signal conditioning circuitry into the sensor system. The signal conditioning circuitry gains of the parallel and perpendicular absolute sensitivities were 350 and 15700 times, respectively. The post-compensation parallel and perpendicular absolute sensitivities were 1.335 and 1.351 mV/G, given B of -1800 to 1800 G, vis-à-vis the pre-compensation absolute sensitivities of 0.000381 and 0.000086 mV/G. Figure 8 depicts the post-compensation parallel and perpendicular absolute sensitivities in which the absolute sensitivities are almost identical.

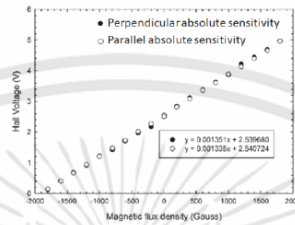


Figure 8 The post-compensation parallel and perpendicular absolute sensitivities of the 2D hall sensor

Figure 9 illustrates the rotational sine (perpendicular axis) and cosine (parallel axis) curves, given 1mA bias current and 1000 G magnetic flux density (B). The parallel (V_{Hx}) and perpendicular (V_{Hz}) Hall voltages are a function of the rotational angle (θ) at any given B (i.e., 1000 G), where $V_{Hz} = |B|\sin\theta$ and $V_{Hx} = |B|\cos\theta$. In the figure, given B = 1000 G, shaft-rotating the axis (x- and z-axis) by 360° resulted in a 90° phase shift between the sine and cosine curves, indicating the compatibility between the parallel and perpendicular absolute sensitivities.

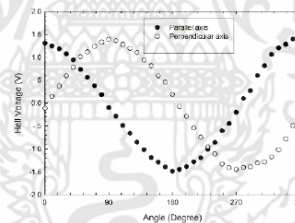


Figure 9 The rotational sine (perpendicular axis) and cosine (parallel axis) curves, given 1mA bias current and 1000 G magnetic flux density (B)

The rotational angle (θ) is a function of arc-tangent and the ratio of perpendicular to parallel hall voltages, i.e., $\theta = \tan^{-1}(V_{Hz}/V_{Hx})$. Figure 10 illustrates the measured and reference rotational angles (θ) of the 2D Hall sensor, given the magnetic flux density (B) of 1000. The comparative results revealed a $\pm 3^\circ$ discrepancy between the measured and reference rotational angles. The low discrepancy suggests the technical and operational viability of the 2D Hall sensor for high-precision industrial applications.

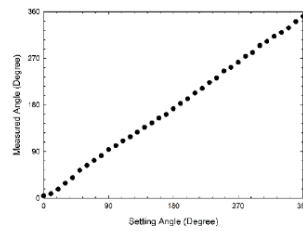


Figure 10 The measured and reference rotational angles (θ) of the 2D Hall sensor given $B = 1000$

Figure 11 compares the hysteresis of the measured and reference rotational angles (θ) of the 2D Hall sensor, given $B = 1000$, where the increasing and decreasing modes denote 0° to 360° and 360° to 0° , respectively. In the figure, the hysteresis error was observed at 180° and onward, equivalent to a 2.8% error. In this research, the hysteresis error could be attributed to the rotating shaft (Figure 3).

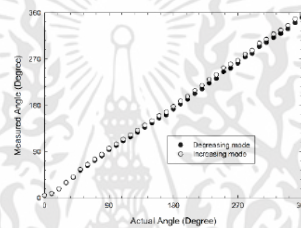


Figure 11 The hysteresis of the measured and reference rotational angles (θ) of the 2D Hall sensor given $B = 1000$, where the increasing and decreasing modes respectively denote 0° to 360° and 360° to 0°

Conclusion

This research proposed a contactless two-dimensional (2D) Hall sensor capable of parallel- and perpendicular-directional magnetic sensing with a 360° angle measurement. The 2D Hall sensor was fabricated based on silicon technology with five ohmic electrical contacts (C1 – C5). In the study, the current (I) and voltage (V) of the sensor were assessed under three schemes: schemes A (C1&C2), B (C2&C5), and C (C3&C4). The parallel and perpendicular absolute sensitivities of the 2D sensor were determined and compared. Given the discrepancy between the parallel and perpendicular absolute sensitivities, signal conditioning circuitry was incorporated into the sensor system to compensate, and the rotational angle (θ) measured. The experimental results indicated that the I-V curves were dominantly linear, corresponding to Ohm's law. Nevertheless, the parallel and perpendicular absolute sensitivities were unequal, i.e., 0.000381 vs 0.000086 mV/G. As a result, signal conditioning circuitry was incorporated to address the discrepancy. The post-compensation parallel and perpendicular absolute sensitivities were 1.335 and 1.351 mV/G, given the magnetic flux density (B) of -1800 to 1800 G. Moreover, the comparison between the measured and reference rotational angles, given $B = 1000$ G, revealed a $\pm 3^\circ$ discrepancy, with the hysteresis error of 2.8%. The experimental results validate the technical and operational viability of the 2D Hall sensor for high-precision industrial applications.

Acknowledgments

The authors would like to extend sincere appreciation to the Thai Microelectronics Center

(TMEC) for technical contributions.

References

- [1] RS Popovic, Hall Effect Devices, 2nd ED. IOP Publishing Ltd, (2004)
- [2] Edward Ramsden, Hall Effect Sensors, 2nd Elsevier, (2006)
- [3] Dieter K.Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization, John Wiley&Sons, New York, (1990)
- [4] Richard S. Muller and Theodore I.Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley&Sons, New York, Inc., (1986)
- [5] C. Sander, R. Raz. P. Ruther and O. Paul, T. Kaufmann, M.C. Vecchi, Fully Symmetric Vertical Hall Devices in CMOS Technology, SENSORS 2013 IEEE
- [6] Yongyut Kaewjumras, Athirot Mano, and Wisut Titiroongruang, Application of Multi-Dimensional Hall Sensor for Gauss Measurement, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017 Vol II, IMECS 2017, March 15-17, 2017, Hong Kong
- [7] Maria-Alexandra Paun, Three-Dimensional Simulations in Optimal Performance Trial between Two Types of Hall Sensors Fabrication Technology, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 391 (2015) 122-128
- [8] M. Paranjape, L.M. Landsberger, M. Kahrizi, A CMOS-compatible 2D vertical Hall magnetic-field sensor using active carrier confinement and post-process micromachining, Sens. Actuators, A 53 (1996) 278-283
- [9] M. Pastre, M. Kayal, H. Blanchard, A Hall Sensor Analog Front End for Current Measurement with Continuous Gain Calibration, IEEE Sens. J. 7 (no. 5) (2007) 860-867
- [10] Yongyut Kaewjumras, Athirot Mano, Amporn Poyai, and Wisut Titiroongruang, Effects of Different Ohmic Contact Widths and Distances on The Absolute Sensitivity of Two-Dimensional Hall Sensor, KKKU ENGINEERING JOURNAL 2016; 43(S10): 23-25
- [11] M. Banjevic, B. Furrer, M. Blagojevic, R.S. Popovic “High-speed CMOS magnetic angle sensor based on miniaturized circular vertical Hall devices”, Sensors and Actuators A 178 (2012) 64– 75
- [12] Christian Sander, Carsten Leube, Taimur Aftab, Patrick Ruther, and Oliver Paul, Monolithic Isotropic 3D Silicon Hall Sensor, Sensors and Actuators A 247 (2016) 587-597
- [13] Athirot Mano and Wisut Titiroongruang, An Application of 2-D Silicon Hall Device for Independent Directional Magnetic Field Measurement Technique, International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, ISSN: 2347-6982 Volume-3, Issue-6, June-2015 Engineering
- [14] S. Lozanova, Ch. Roumenin, Angular Position Device with 2D Low-Noise Hall Microsensor, Sensors and Actuators A 162 (2010) 167-171
- [15] F. Burger, P-A. Besse, RS Popovic, New Fully Integrated 3-D Silicon Hall Sensor for Precise Angular-Position Measurement, Sensors and Actuators A 67 (S98) 72-76
- [16] C. Sander, C. Leube, T. Aftab, P. Ruther and O. Paul, Geometry Study of An Isotropic 3D Silicon Hall Sensor, Procedia Engineering 120 (2015) 112-115
- [17] C.Schott, R. Racz, S. Huber, Novel Analog Magnetic Angle Sensor with Linear Output, Sensors and Actuators A 132 (2006), 165-170

- [18] S.V. Lozanova, S.A. Noykov, A.J. Ivanov, G.N. Velichkov, Ch. S. Roumenin, 3-D Silicon Hall Device with Subsequent Magnetic-Field Components Measurement, *Procedia Engineering* 87 (2014) 1107-1110
- [19] S.V. Lozanova, S.A. Noykov, Ch. S. Roumenin, 2D Silicon Magnetometer, *Procedia Engineering* 168 (2016) 666-669
- [20] Siya Lozanova, Svetoslav Noykov, Chavdar Roumenin, Two-Axis Silicon Hall Effect Magnetometer, *Sensors and Actuators A* 267 (2017) 177-181
- [21] K. Maenaka, M. Tsukahara and T. Nakamura, Monolithic Silicon Magnetic Compass, *Sensors and Actuators*, A21-A23 (1990) 747-750
- [22] Siya Lozanova, Avgust Ivanov, Chavdar Roumenin, A Novel Three-Axis Hall Magnetic Sensor, *Procedia Engineering* 25 (2011) 539-542
- [23] Ch. Roumenin, D. Nikolov, A. Ivanov, 3-D Silicon Vector Sensor Based on a Novel Parallel-Field Hall Microdevice, *Sensors and Actuators A* 110 (2004) 219-227
- [24] Enrico Schurig, Michel Demierre, Christian Schott, Radivoje S. Popovic, A Vertical Hall Device in CMOS High-Voltage Technology, *Sensors and Actuators A* 97-98 (2002) 47-53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายยงยุทธ แก้วจรัส
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 13 เมษายน พ.ศ. 2532
 สถานที่เกิด ตำบลคูหาสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง
 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (โซลิตสเตทอิเล็กทรอนิกส์) ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554
 สำเร็จการศึกษาปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] ยงยุทธ แก้วจรัส อธิโรจน์ มะโน สันติ ชาตรุประชีวิน วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “ การควบคุมขนาดผลึกของวัสดุสารแม่เหล็กเฟอร์โรชนิด CoFe ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีสำหรับหัวอ่านเขียนข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ” งานประชุมวิชาการ ม.อ.ภูเก็ตวิจัย ครั้งที่ 4 (2554), หน้า 27
- [2] ยงยุทธ แก้วจรัส เอกลักษณ์ แฉล้มนงนุช อธิโรจน์ มะโน สันติ ชาตรุประชีวิน และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง “ เทคนิคการควบคุมอัตราส่วนและขนาดผลึกของโลหะผสม CoFe ด้วยวิธีการไฟฟ้าเคมีกระแสต่ำ ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35, หน้า 803 – 806
- [3] ยงยุทธ แก้วจรัส อธิโรจน์ มะโน ปฤษฎาพงศ์ พชระวางกูร สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ” การสร้างและศึกษาคุณสมบัติของเฟอร์โรแมกเนติกชนิดอ่อน CoFe โดยวิธีการไฟฟ้าเคมีแบบพัลส์ที่กระแสต่ำ ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลไฟฟ้าครั้งที่ 5 ” หน้า 577 – 580
- [4] ยงยุทธ แก้วจรัส ณัฐพงษ์ พัชรศาสตร์ อธิโรจน์ มะโน วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ” อิทธิพลของสภาพความต้านทานไฟฟ้าบนฐานรองซิลิกอนที่มีผลกระทบต่อค่าความไวในการตอบสนองของหัววัดฮอลล์แบบสองมิติ ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 8, หน้า 221-224
- [5] Yongyut Kaewjumras Athirot Mano Amporn Poyai Wisut Titiroongruang “Effect of different ohmic contact widths and distances on the absolute sensitivity of two-dimensional hall sensor” The 6th KKU International Engineering Conference 2016, KKU ENGINEERING JOURNAL 2016;43(S1):23-25
- [6] Yongyut Kaewjumras Athirot Mano Wisut Titiroongruang “Application of multi-dimensional hall sensor for gauss measurement” International MultiConference of Engineers and computer scientists 2017 page 648 - 651, Hong Kong

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้