



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและการสร้างระบบวัดกึ่งอัตโนมัติเพื่อใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ
สารกึ่งตัวนำด้วยวิธีแวนเดอเพาว์และปรากฏการณ์ฮอลล์

Design and Construction Semi-Automation System for Electrical
Properties of Semiconductor Material by van der Pauw and Hall
Effect Measurement

ดร.อาภาภรณ์ สกุกการะเวก

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและการสร้างระบบวัดกึ่งอัตโนมัติเพื่อใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ
สารกึ่งตัวนำด้วยวิธีแวนเดอพาวยและปรากฏการณ์ฮอลล์

Design and Construction Semi-Automation System for Electrical
Properties of Semiconductor Material by van der Pauw and Hall
Effect Measurement

Dr.Aparporn Sakulkalavek

สาขา.....
เลขทะเบียน 145202
รับเดือนปี 31 ส.ค. 2560

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการการออกแบบและการสร้างระบบวัดกึ่งอัตโนมัติเพื่อใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีแวนเดอเพาว์และปรากฏการณ์ฮอลล์

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้.....

ประจำปีงบประมาณ 2558..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 350,000..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2558.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ... อภาภรณ์ สกุลกระเวก สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมวิจัย... ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบ สร้าง และการเขียนโปรแกรม เพื่อควบคุมระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติสำหรับวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ เช่น สภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของพาหะสภาพคล่องของพาหะ และชนิดของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีของแวนเดอเพาว์และปรากฏการณ์ฮอลล์ อุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นได้ถูกออกแบบและควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW ซอฟต์แวร์ของระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติยังสามารถแสดงผลในรูปแบบของกราฟ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่น และสภาพคล่องของพาหะ ได้มีการสอบเทียบระบบโดยใช้สารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่า ซึ่งเป็นผลการวัดจาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133 โดยสารตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสอบเทียบระบบวัดคือ GaSb:Te เป็นสารตัวอย่างชนิด n (certificate measurements temperature 300 K) และ GaSb:Si เป็นสารตัวอย่างชนิด p (certificate measurements temperature 77 K) นอกจากนี้ได้มีการนำสารตัวอย่าง CuAl_{0.9}Fe_{0.1}O₂ มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย ผลการวัดพบว่าระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติมีความเที่ยงตรงสูงและความแม่นยำเป็นที่ยอมรับได้

คำสำคัญ : สารกึ่งตัวนำ, แวนเดอเพาว์ , ระบบฮอลล์, โปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Design and Construction Semi-Automation System for Electrical Properties of Semiconductor Material by van der Pauw and Hall Effect Measurement

Researcher:.....Aparporn Sakulkalavek.....

Faculty: Science **Department:** Physics

Abstract

In this work, we design, construct, and program a semi-automatic system for electrical properties measurement such as resistivity, carrier concentration, mobility and carrier type by van der Pauw and Hall effect methods. All the apparatus were controlled by LabVIEW program to acquire the measurement data. Furthermore, the programming software of the semi-automatic system can show a real-time graphical measurement and converse to the resistivity, carrier concentration and mobility. The system was calibrate by using standard samples that have electrical parameters by certificate measurements from Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul.WÓlczyńska 133. Standard samples are GaSb:Te (n-type)(certificate measurements temperature 300 K) and GaSb:Si (p-type)(certificate measurements temperature 77 K). In addition, the system was used to measure and calculate electrical properties of CuAl_{0.9}Fe_{0.1}O₂. It was found that the semi-automatic system has high the precision and acceptable accuracy.

Keywords : Semiconductor, Van der Pauw, Hall system, LabVIEW

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบคุณ นายพิจิตร คชชา และนายชานนท์ ททโยทัย ผู้คอยสนับสนุนในด้านซอฟต์แวร์ให้ความรู้และคำแนะนำในด้านการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมระบบ และในด้านฮาร์ดแวร์ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ออกแบบ ซ่อมแซม อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ จึงขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

อภรณ์ สุกุลกระเวก
ราชศักดิ์ ศักดานภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	I
บทคัดย่อภาษาไทย	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีและหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.1.1 การเกิดสนามแม่เหล็ก	4
2.1.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก	8
2.1.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	9
2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	9
2.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.	10
2.2.2 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	11
2.2.3 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	12
2.2.4 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าโดยด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	14
2.3 ปรากฎการณ์ฮอลล์	17
2.3.1 แรงลอเรนซ์.	18
2.3.2 สัมประสิทธิ์ฮอลล์,ความหนาแน่น และสภาพคล่องของพาหะ	20
2.4 โปรแกรมLabVIEW	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ และฟังก์ชันการใช้งาน	28
3.1.1 Gauss/Tesla Meter	28
3.1.2 Regulated DC Power Supply	29
3.1.3 Keithley 2410 Current source	30
3.1.4 Keithley 2100 Digital Multimeter	31
3.1.5 Magnetic Core	32
3.1.6 Chiller	33
3.1.7 Relays	34
3.1.8 National instruments 9472 (NI 9472)	41
3.1.9 Change over switch	42
3.1.10 Sample holder	44
3.1.11 Sample board	45
3.2 การเตรียมอุปกรณ์	46
3.3 วิธีการทดลอง	48
3.3.1 การวัด Van der Pauw	48
3.3.2 การวัด Hall.	49
3.4 โปรแกรม LabVIEW	51

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การสอบเทียบสนามแม่เหล็ก	57
4.2 การสอบเทียบระบบวัด Van der Pauw	59
4.2.1 ขั้นตอนการวัด R_A และ R_B ด้วยวิธีของ Van der Pauw	59
4.3 โปรแกรม LabVIEW	62
4.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล	68
4.5 สอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐาน GaSb:Te และ GaSb:Si	69
4.6 ทดสอบสารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$	78

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ	81
------------	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก	84
ก การติดตั้งโปรแกรม LabVIEW	
ข ฟังก์ชันที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม	
ค Keithley Model 2400 Series Source Meter User's Manual	
ง Keithley Model 2100 6 1/2-Digit Resolution Digital Multimeter User's Manual	
จ Block diagram การเขียนโปรแกรม LabVIEW	
ฉ วิธีการเตรียมมาตรฐานที่นำมาใช้ในการสอบเทียบระบบวัด	
ช ตารางการสอบเทียบ	



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน	2
3.1 ความละเอียดของการจ่ายกระแส	30
3.2 Specifications DC characteristics: accuracy \pm (% of reading + % of range)	32
4.1 ผลการวัด GaSb:Te (n-type) ด้วยระบบการวัดอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K	72
4.2 Certificate measurements temperature 300 K ของ GaSb:Te (n-type) จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133	73
4.3 ผลการวัด GaSb:Si (p-type) ด้วยระบบการวัดอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K	77
4.4 Certificate measurements temperature 77 K ของ GaSb:Si (n-type) จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133	77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้	4
2.2	การหาทิศของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดตรง . ก. กระแสไฟฟ้าและทิศของสนามแม่เหล็ก ข. ใช้กฎมือขวาหาทิศทางของสนามแม่เหล็ก	5
2.3	สนามแม่เหล็กภายในทอรรอยด์	6
2.4	การหาขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์ ก. ขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์ ข. การหาขั้วแม่เหล็ก โดยใช้กฎมือขวา	7
2.5	สนามแม่เหล็กที่ใส่แท่งเหล็กอ่อน ไว้ที่แกนกลางของโซลินอยด์	7
2.6	ฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีค่ามากและน้อย	8
2.7	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	10
2.8	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	11
2.9	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	12
2.10	ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนสารตัวอย่าง	14
2.11	การจัดเรียงขั้วสัมผัสเพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์	15
2.12	กราฟแฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์	16
2.13	การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด	17
2.14	การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์	17
2.15	แรงลอเรนซ์มีทิศทางไปในแกน $-y$ มีขนาด qv	19
2.16	ประจุต่างชนิดกันเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันผ่านสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับ. ทิศทางของการเคลื่อนที่ของประจุทั้งสอง	20
2.17	ประจุ $+q$ และ $-q$ วิ่งเข้าสู่สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกัน	20
2.18	ไอคอนโปรแกรม LabVIEW	21
2.19	ลักษณะหน้า Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW	22
2.20	Control Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel	23
2.21	Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel	24
2.22	Block Diagram ของเครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW	24
2.23	ตัวอย่างหน้า Block Diagram.	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 เครื่องมือสำหรับ Dam – Data Acquisition	26
2.25 เครื่องมือ Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Block Diagram.	26
3.1 5180 Gauss/Tesla Meter	28
3.2 2Regulated DC Power Supply	29
3.3 Current source Keithley Model 2410	30
3.4 $\frac{1}{2}$ digital multimeter Keithley model 2100	31
3.5 Magnetic Core	32
3.6 Chiller	33
3.7 Relays	34
3.8 การต่อรีเลย์สำหรับวัด Van der Pauw	37
3.9 NI 9472	41
3.10 การกำหนดขาของ NI 9472	41
3.11 การต่อ National instruments กับรีเลย์	42
3.12 12Change over switch	42
3.13 คู่มือการต่อสับสวิตช์ของ Change over switch	42
3.14 การต่อขั้วของ Change over switch เข้ากับ Regulated DC Power Supply และขดลวด	43
3.15 Sample holder	45
3.16 Sample board	46

ก. ลายวงจรและองค์ประกอบของ Sample board

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. Sample board ที่เสร็จสมบูรณ์

3.17	ระบบการวัดแวนเดอร์เพาว์	46
3.18	ระบบการวัดฮอลล์	47
3.19	การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ R_A	48
3.20	การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ R_B	48
3.21	การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_{BD, CA}$	49
3.22	การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_{AC, BD}$	50
3.23	โปรแกรมLabVIEW สำหรับการวัด Van der Pauw และ Hall measurement	52
3.24	การเทียบขั้วที่กล่องรีเลย์ 1, 2, 3 และ 4 สำหรับวัด Van der Pauw	53



สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25	53
3.26	54
3.27	54
3.28	55
3.29	55
3.30	56
4.1	57
4.2	58
4.3	59
4.4	60
4.5	61
4.6	63
4.7	63
4.8	64
4.9	65
4.10	65
4.11	66
4.12	66
4.13	67
4.14	67
4.15	68
4.16	69
4.17	69
4.18	70
4.19	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ผลการวัด Hall measurement ของGaSb:Teครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	71
4.21 ผลการวัดVan der Pauw ของGaSb:Teครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	71
4.22 ผลการวัด Hall measurement ของGaSb:Teครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	72
4.23 สารตัวอย่าง GaSb:Siที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact	73
4.24 ผลการวัดVan der Pauw ของGaSb:Siครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	74
4.25 ผลการวัด Hall measurement ของGaSb:Siครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ.	74
4.26 ผลการวัดVan der Pauw ของGaSb:Siครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	75
4.27 ผลการวัด Hall measurement ของGaSb:Siครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ.	75
4.28 ผลการวัดVan der Pauw ของGaSb:Siครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	76
4.29 ผลการวัดHall measurement ของGaSb:Siครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	76
4.30 สารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ ที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact	78
4.31 ค่า R_A , R_B และ Resistivity จากการวัด Van der Pauw ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	78
4.32 ค่า R_H , n และ n จากการวัด Hall measurement ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	79

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ

ความหมาย

B	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
μ_0	สภาพซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ
I	กระแสไฟฟ้า
Φ	ฟลักซ์แม่เหล็ก
A	พื้นที่หน้าตัด
ρ	สภาพต้านทานทางไฟฟ้า
f	แฟกเตอร์ค่าแก้มของแวนเดอร์เพาว์
d	ความหนาของสารตัวอย่าง
q	ค่าประจุของอิเล็กตรอน
E_H	สนามไฟฟ้าฮอลล์
F_{Lorentz}	แรงลอเรนซ์
R_H	สัมประสิทธิ์ฮอลล์
μ	สภาพคล่องของพาหะ
n	ความหนาแน่นของพาหะ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน โลกเรามีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มนุษย์ต้องการความสะดวกสบายมากขึ้น สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจึงเป็นที่นิยมและรู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในการที่จะพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำหรือสร้างสารกึ่งตัวนำใหม่ๆ ขึ้นมานั้น การตรวจสอบคุณสมบัติของสารเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะจะทำให้ทราบถึงชนิด ลักษณะ และคุณสมบัติต่างๆ ของสารนั้น รวมไปถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานว่าเป็นไปตามที่เราต้องการหรือไม่ เพื่อให้เกิดการใช้งานที่เหมาะสมและยาวนานขึ้น

วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ คือ วิธีของแวนเดอร์เพาว์ เนื่องจากสามารถตรวจสอบสารที่มีรูปร่างใดๆ ได้ และค่อนข้างมีความแม่นยำ หากเป็นไปตามเงื่อนไขของการตรวจสอบ ซึ่งสิ่งที่สามารถตรวจสอบได้จากวิธีของแวนเดอร์เพาว์ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) สามารถบอกได้ถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้น เนื่องจากต้องการทราบคุณสมบัติของสารมากขึ้นดังนั้นจึงนำวิธีการวัดฮอลล์มาใช้ในการทดสอบด้วยซึ่งผลที่ได้จากการวัดฮอลล์สามารถนำไปคำนวณค่าต่างๆ ได้ซึ่งค่าเหล่านั้นจะบอกถึงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอาทิเช่น สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H : Hall coefficient) ความหนาแน่นของพาหะ (n : Carrier concentration) สภาพคล่องของฮอลล์ (μ : Hall mobility) และชนิดของพาหะ ในการวัดส่วนใหญ่เป็นการวัดแบบไม้อัด โนมิตีการบันทึกผลและคำนวณค่าจึงใช้เวลาค่อนข้างมาก งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการสร้างระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติขึ้นมาเพื่อประหยัดเวลา และสามารถให้ค่าจากการวัดที่ถูกต้อง ระบบถูกออกแบบมาสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์ และการวัดฮอลล์ค่าต่างๆ นั้นจะถูกคำนวณอัตโนมัติผ่านทางโปรแกรมที่ออกแบบขึ้นมา แล้วแสดงผลผ่านทางจอคอมพิวเตอร์ ระบบการวัดกึ่งอัตโนมัตินี้ถูกนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อความสะดวกในการทำการวัดและลดปัญหาความผิดพลาดจากการคำนวณ โดยการต่อเครื่องมือวัดเข้ากับคอมพิวเตอร์และควบคุมระบบการวัด โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมพร้อมระบบประมวลผลแสดงค่าต่างๆ ของสาร

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์
3. เพื่อออกแบบและสร้างระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติสำหรับวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และวิธีวัดฮอลล์
4. เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการและการเรียนการสอน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหลักการวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และการวัดฮอลล์
2. ออกแบบและสร้างระบบวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และระบบวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบของการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์
3. สอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่า

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจทฤษฎีและหลักการของการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และการวัดฮอลล์
2. เข้าใจฟังก์ชันและการใช้งานของเครื่องมือวัดในระบบ
3. สามารถใช้เครื่องมือวัดได้อย่างถูกต้องทั้งการวัดแบบไม่อัตโนมัติและการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ
4. สามารถออกแบบและเขียน โปรแกรมเพื่อควบคุมระบบการวัดได้

บทที่ 2

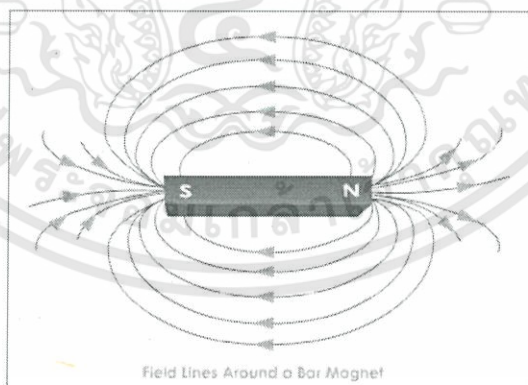
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้วิธีของแวนเดอร์เพอร์ และปรากฏการณ์ฮอลล์ เพื่อศึกษาถึงลักษณะคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ อาทิ เช่น การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นสภาพคล่อง และชนิดของพาหะ ซึ่งวิธีของแวนเดอร์เพอร์ เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้มากวิธีหนึ่ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่จำกัดรูปร่างลักษณะของสารตัวอย่าง สารที่ต้องการวัดจะมีรูปร่างลักษณะใดก็ได้ นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงการวัดฮอลล์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิด n หรือ p ซึ่งถ้าสารกึ่งตัวนำมีพาหะข้างมากเป็นบวก แสดงว่าสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นชนิด p ในทางตรงกันข้ามถ้าสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นมีพาหะข้างมากเป็นลบ แสดงว่าสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นชนิด n ซึ่งรายละเอียดต่างๆจะอธิบายต่อไปนอกจากนี้ยังได้มีการนำโปรแกรม LabVIEW มาใช้ในการออกแบบสำหรับวัดและคำนวณผล เพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการใช้งานด้วย

2.1 ทฤษฎีและหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กเป็นปริมาณเวกเตอร์มีทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่ง ณ ตำแหน่งใดๆมีทิศตามทิศของขั้วเหนือของเข็มทิศ เส้นสนามแม่เหล็กจะเป็นเครื่องบอกทิศของสนามแม่เหล็กซึ่งจะมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ เส้นสนามแม่เหล็กจะวนเป็นวงไม่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด ดังรูปที่

2.1



รูปที่ 2.1 เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้

2.1.1 การเกิดสนามแม่เหล็ก

ในปี ค.ศ. 1820 Hans Christian Oersted นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก พบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆลวดตัวนำนั้น สามารถแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาตามลักษณะของลวดตัวนำได้ดังนี้

1. สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตรง

เมื่อนำเข็มทิศไปวางใกล้เส้นลวดตรงที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน พบว่าแนวของเข็มทิศมีการเปลี่ยนแปลงไปจากแนวเหนือ-ใต้เดิม แสดงว่ารอบๆเส้นลวดมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าการหาทิศของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดตรง สามารถหาได้โดยใช้กฎมือขวา ซึ่งทำได้โดยใช้มือขวาการรอบเส้นลวดตัวนำ ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ในลักษณะให้นิ้วหัวแม่มือชี้ตามทิศของกระแสไฟฟ้า ทิศทางการวนของปลายนิ้วทั้งสองจะแสดงทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆลวดตัวนำนั้น



รูปที่ 2.2 กระแสไฟฟ้าและทิศของสนามแม่เหล็ก รูปที่ 2.3 ใช้กฎมือขวาหาทิศของสนามแม่เหล็ก

สามารถคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้จากสูตร

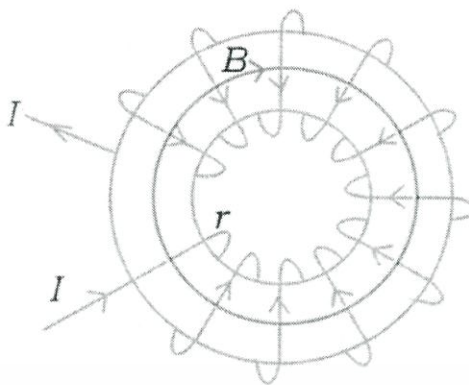
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (2.1)$$

เมื่อ μ_0 คือ สภาพซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศมีค่า $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$

2. สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดวงกลม

เมื่อนำลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็น วงกลมหลายๆรอบเรียงกันเป็นรูปทรงกระบอกแล้วขดเป็นวงกลม ขดลวดที่ได้นี้เรียกว่า ทอรอยด์ (Toroid) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่าน จะเกิดสนามแม่เหล็กภายในทอรอยด์ หาทิศของสนามแม่เหล็กได้โดยการกำมือขวารอบแกนของทอรอยด์ ให้นิ้วทั้งสองนิ้วตามทิศของกระแสไฟฟ้า นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 สนามแม่เหล็กภายในทอรรอยด์

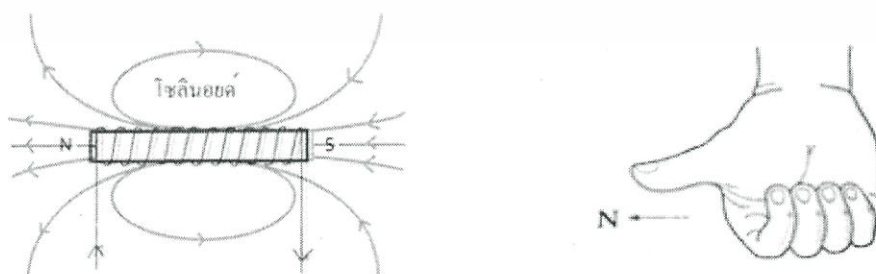
สนามแม่เหล็กภายในทอรรอยด์มีค่าไม่สม่ำเสมอ สนามแม่เหล็กที่ขอบด้านในจะมีค่าสูงกว่าสนามแม่เหล็กที่ขอบด้านนอก ขนาดของสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของขดลวดแปรผกผันกับรัศมีของขดลวดแต่ละแปรผันตามจำนวนรอบของขดลวดและปริมาณกระแสไฟฟ้า ขนาดของสนามแม่เหล็กณจุดศูนย์กลางของขดลวดมีขนาด

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2a} \quad (2.2)$$

เมื่อ μ_0 คือ สภาพซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศมีค่า $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$ n คือจำนวนรอบของขดลวด

3. สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดโซลินอยด์

เมื่อนำลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็นวงกลมหลายๆวงให้เป็นเกลียวคล้ายขดสปริง ขดลวดที่ได้นี้เรียกว่าโซลินอยด์ (Solenoid) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านโซลินอยด์จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นการหาทิศทางของสนามแม่เหล็กใช้วิธีการกำมือขวาแบบเดียวกับการหาทิศทางของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลมปลายขดลวดด้านที่สนามแม่เหล็กพุ่งออกจะเป็นหัวเหนือและอีกปลายหนึ่งซึ่งสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าจะเป็นหัวใต้ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6



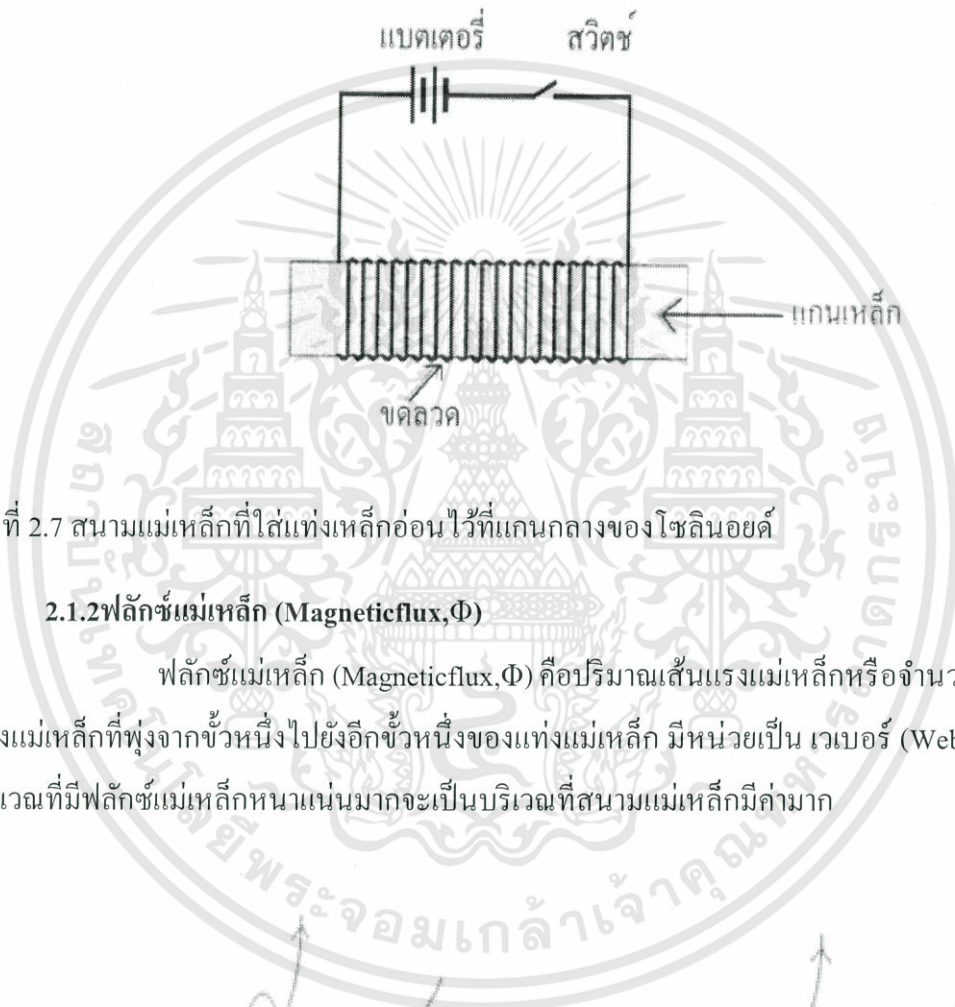
รูปที่ 2.5 ขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์รูปที่ 2.6 การหาขั้วแม่เหล็กโดยใช้กฎมือขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่เกิดจาก โขลินอยด์มีค่าสูงสุดที่บริเวณแกนกลางของ โขลินอยด์ และขนาดของ สนามแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดตั้งสมการ

$$B = \mu_0 nI \quad (2.3)$$

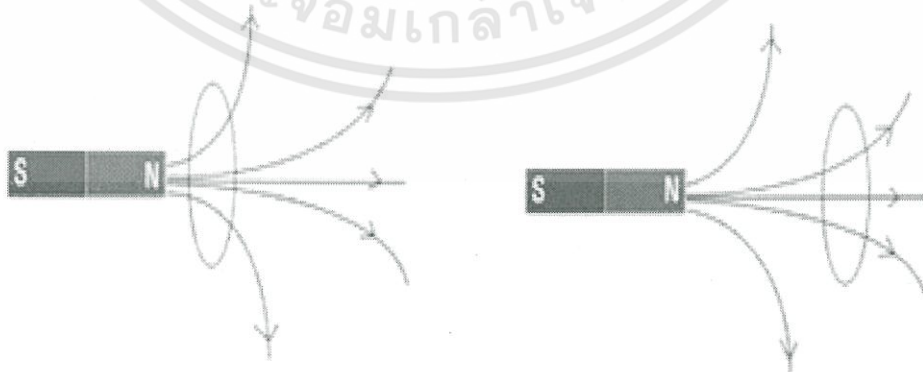
ถ้าใส่แท่งเหล็กอ่อนไว้ที่แกนกลางของ โขลินอยด์เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่าน โขลินอยด์แท่งเหล็กอ่อนจะมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก แม่เหล็กที่เกิดจากวิธีนี้เรียกว่าแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สนามแม่เหล็กที่ใส่แท่งเหล็กอ่อนไว้ที่แกนกลางของ โขลินอยด์

2.1.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux, Φ)

ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux, Φ) คือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งของแท่งแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Weber, Wb) ในบริเวณที่มีฟลักซ์แม่เหล็กหนาแน่นมากจะเป็นบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีค่ามาก

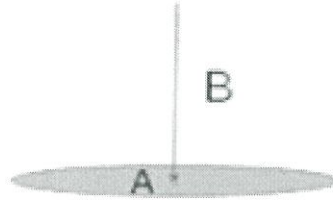


รูปที่ 2.8 ฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีค่ามากและน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

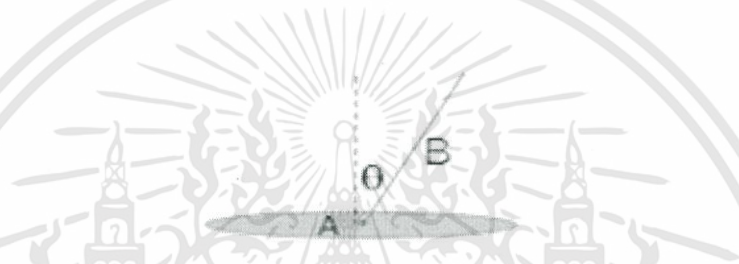
การหาค่าฟลักซ์แม่เหล็ก

1. เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นที่ผิว



$$\Phi = BA \quad (2.4)$$

2. เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กทำมุมกับแนวตั้งฉากกับพื้นที่ผิว



$$\Phi = BA \cos \theta \quad (2.5)$$

3. เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กทำมุมกับแนวระนาบของพื้นที่ผิว



$$\Phi = BA \sin \theta \quad (2.6)$$

เมื่อ B คือความเข้มของสนามแม่เหล็กหน่วยเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2) หรือ เทสลา (T)

Φ คือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กหรือ เรียกว่าฟลักซ์แม่เหล็กหน่วย เวเบอร์ (Wb)

A คือพื้นที่หน่วย ตารางเมตร (m^2)

2.1.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B)

ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งตั้งฉากกับพื้นที่หนึ่ง ตารางหน่วยความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่างๆดังนี้

1. จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำการพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำมากจะเกิดสนามแม่เหล็กมากในทางกลับกันถ้าพันจำนวนรอบน้อยการเกิดสนามแม่เหล็กก็จะน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำหากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก สนามแม่เหล็กก็จะเกิดขึ้นมากและในทางกลับกันหากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยสนามแม่เหล็กก็จะเกิดขึ้นน้อย

3. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าวัสดุต่างชนิดกันจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกันเช่นแกนอากาศจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแกนที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) หรือสารที่สามารถเกิดอำนาจแม่เหล็กได้เช่นเหล็กเฟอร์ไรต์เป็นต้นสารเหล่านี้จะช่วยเสริมอำนาจแม่เหล็กในขดลวดทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากขึ้น

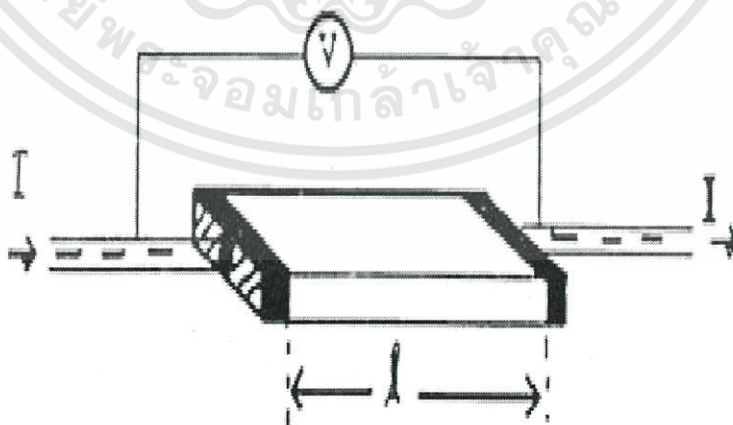
4. ขนาดของแกนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้าแกนที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สนามแม่เหล็กมากส่วนแกนที่มีขนาดเล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กน้อยด้วย

2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้านั้นสามารถวัดได้หลายวิธี ในบทนี้จะอธิบายถึงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีวัดโดยตรง วิธีสองขั้ว วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น และวิธีแวนเดอร์เพาว์ ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีข้อจำกัดในการวัดแตกต่างกันไป ดังต่อไปนี้

2.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (Direct resistivity method)[1,2,4]

การวัดด้วยวิธีนี้จะต้องทำให้สารตัวอย่างที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเพื่อวัดพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้ค่าที่แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไฟฟ้าไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

เมื่อทราบค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าแล้ว สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนดให้ R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะ A คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปและ 1 คือ ระยะระหว่างขั้วของศักย์ไฟฟ้าที่วัด

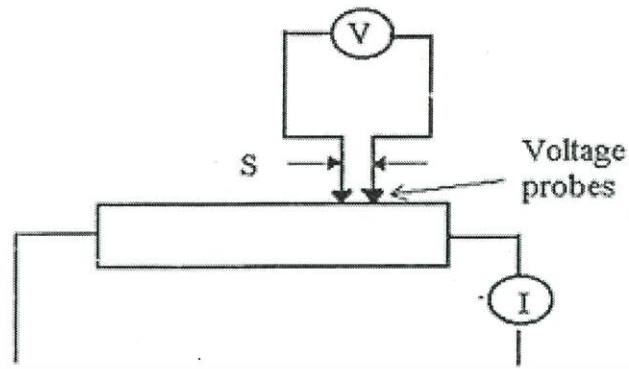
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.7)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I}\right) \left(\frac{A}{l}\right) \quad (2.8)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ความถูกต้องในการวัดด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีความต้านทานเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (Impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆเท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.2.2 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว (Two point probes)[4]

การวัดด้วยวิธีนี้จะกำจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อออกไปได้และกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วยการวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีการวัดโดยตรงแต่แตกต่างกันที่การวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง วิธีการวัดทำได้โดยวางขั้วสัมผัสของโวลต์มิเตอร์ไปบนสารตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ โดยห่างจากรอยต่อของโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าพอสมควรเพื่อหลีกเลี่ยงจากการบิดเบี้ยวของเส้นสมศักย์ (Equipotential Line) บริเวณปลายทั้งสองข้างของสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ

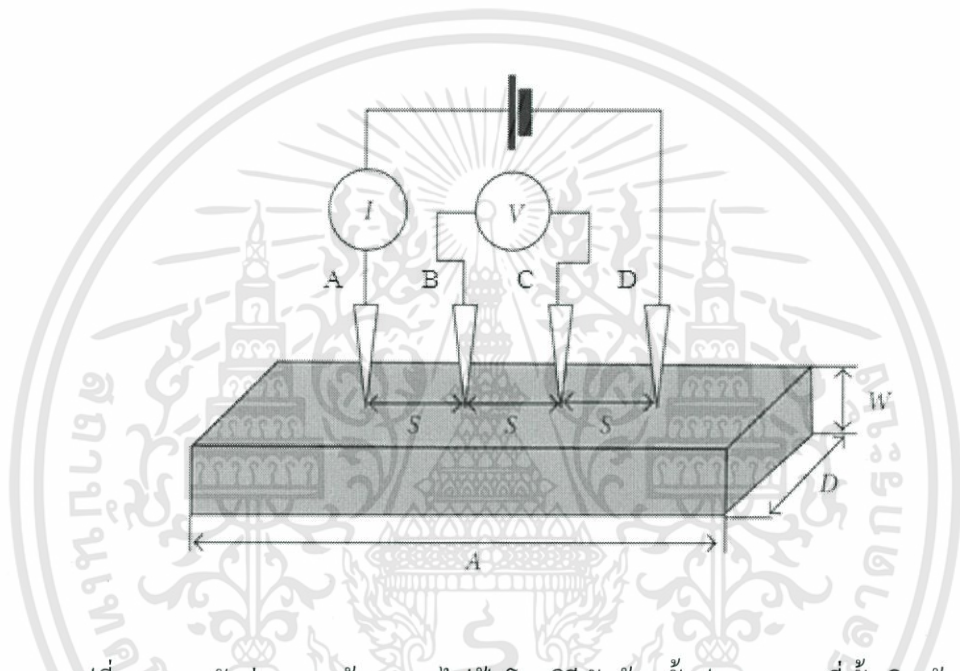
1. จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอ
2. สารตัวอย่างต้องมีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
3. ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนขึ้นภายในสารตัวอย่างเพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง
4. การวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง
5. จุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่างจากจุดที่ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า-ออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเชื่อมเข้าไปทำการรวมตัวกันบริเวณที่วัด ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (Minority Carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง

ข้อดีของการวัดด้วยวิธีนี้ คือสามารถกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกรปรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ นอกจากนี้ยังสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

2.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (Linear four point probe method)[3-6]

เป็นวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่นิยมมากที่สุดในการอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ดี ไม่ยุ่งยาก ทำการวัดได้ง่ายสะดวก สามารถวัดสารได้ทุกขนาด ไม่ว่าจะมึขนาดรูปร่างอย่างไรและที่สำคัญคือไม่ทำลายชิ้นงานที่นำมาวัด อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการวัดประกอบด้วยขั้วปลายแหลมจำนวน 4 ขั้ว อาจมีสปริงช่วยทำให้ปลายของขั้วถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าของสารตัวอย่างได้เป็นอย่างดี โดยวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรงนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในการให้กระแสไฟฟ้าเข้า-ออก และอีก 2 ขั้วที่เหลือจะใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วจะอยู่บนผิวหน้าของสารตัวอย่าง เป็นโลหะแข็ง โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตนมี ลักษณะเส้นเล็กและแหลมเป็นแนวเส้นตรงในระนาบเดียวกัน วางด้วยระยะห่างเท่ากันทั้งหมดในบางกรณีอาจจะวางห่างไม่เท่ากันแต่ต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน จากรูปที่ 2.11 ถ้าให้ขั้วทั้ง 4 คือ A, B, C และ D การวัดเริ่มจากป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่เข้าที่ขั้วด้านนอกสุด ซึ่งก็คือขั้ว A และ D ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อของสารตัวอย่างไปยังขั้ว D จึงเกิดแรงดันตกคร่อมเนื้อสารตัวอย่างและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ I และแรงดันตกคร่อม V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 2.11 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดในการวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น คือ

1. ขั้วทั้ง 4 ต้องมีลักษณะแหลม มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันทั้งหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าน้อย
2. สารตัวอย่างตรงบริเวณที่ขั้วทั้ง 4 วางอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณไม่เกิดรูกลวงค้ำใน และจะคิดว่าการกระจายของกระแสไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะครึ่งทรงกลม (Hemisphere) โดยอาศัยหลักไฟฟ้าสถิต

ข้อเสีย ในการวัดด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น คือ อาจทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างมีริ้วรอยและเสียหายได้ เพราะถูกปลายแหลมของเข็มจี้ทับ

ข้อผิดพลาดที่ควรระวัง ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของวิธีวัดแบบสี่ขั้วเชิงเส้น คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขนาดของสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับขนาดของสารตัวอย่างนี้จะรวมถึงรูปร่างของสารตัวอย่างด้วย ควรจะวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่พอที่จะวางหัววัดได้และสารตัวอย่างควรมีรูปทรงทางเรขาคณิตเพราะความยาวและพื้นที่หน้าตัดมักจะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

2. การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า

การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณขอบและบริเวณฐานอันเกิดจากมีสิ่งสกปรกที่มีความต้านทานน้อยกว่าสารตัวอย่างมาเกาะติด ทำให้เกิดการลัดวงจรศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริงจึงได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าน้อยกว่าความเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้การเกิดกระแสรั่วไหลอาจเกิดจากความผิดปกติของผลึกภายในอีกด้วย

3. อุณหภูมิ

สารตัวอย่างแทบทุกชนิด ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิทั้งสิ้น อาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง ดังนั้นในการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าทุกครั้ง ควรจะมีการบันทึกอุณหภูมิขณะทำการวัดไว้ด้วยเสมอ หากนำมาวัดซ้ำหรือตรวจสอบอีกครั้งควรทำการวัดที่อุณหภูมิเดียวกัน

4. แสง

ขณะทำการวัดควรจะมีส่วนป้องกันแสงตกกระทบสารตัวอย่าง เพราะแสงเป็นพลังงานสามารถกระตุ้นทำให้เกิดพาหะอิสระขึ้นได้ ส่งผลให้เกิดแรงดันทางแสงร่วมกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสารตัวอย่าง ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าที่วัดได้เกิดความผิดพลาด

5. ปรากฏการณ์ความร้อนทางไฟฟ้า

ปรากฏการณ์หลักที่เกี่ยวข้องได้น้อยมาก สำหรับการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง การเกิดแรงดันขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสารตัวอย่างจะมีค่าน้อยสำหรับสารตัวอย่างจำพวกโลหะ แต่จะมีค่ามากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวน ดังนั้นควรวัดในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง

6. ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นกับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำมักจะมีความต้านทานสูงมาก บริเวณผิวสัมผัสจะเกิดแรงดันตกคร่อมเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส แรงดันนี้มักจะต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิด

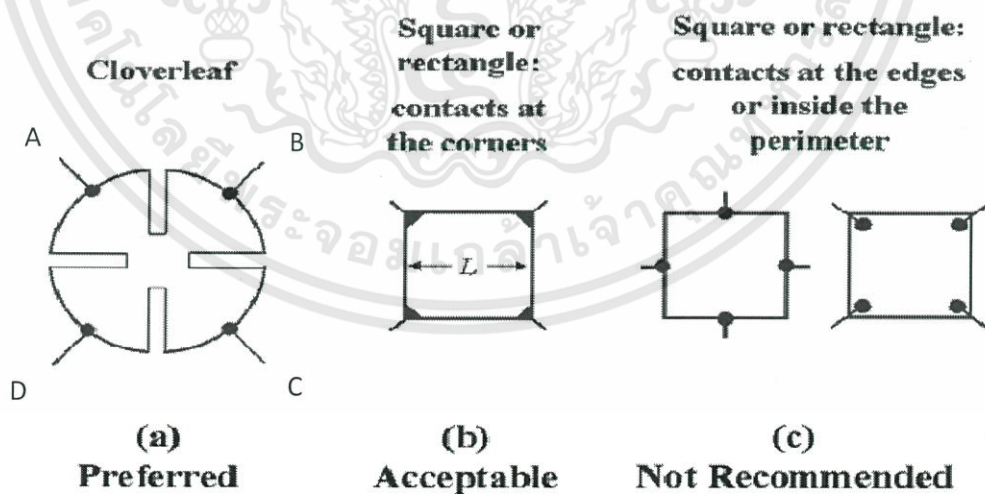
ข้อผิดพลาดในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นควรมีการทดสอบหรือเลือกชนิดของโลหะที่นำมาใช้ทำเป็นขั้วสัมผัสเสียก่อน

2.2.4 วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์(Van der Pauw method)[7-10]

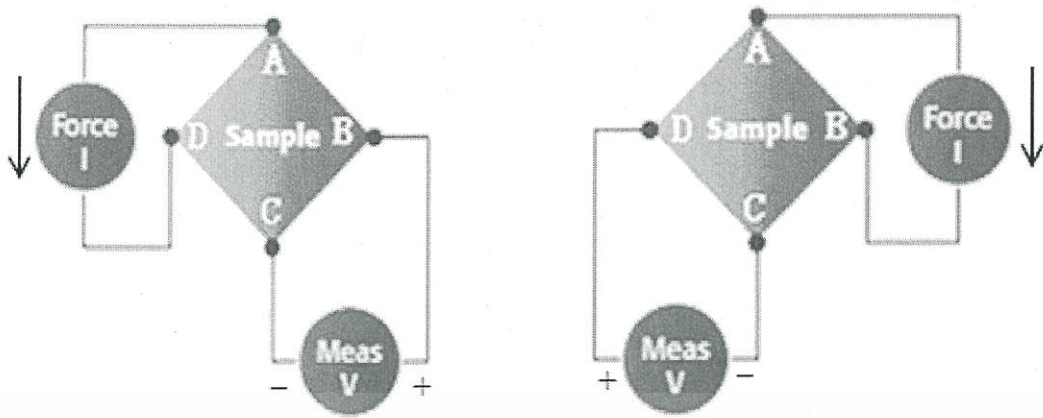
วิธีของแวนเดอร์เพาว์ถูกนำมาใช้ในการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เช่น สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นและสภาพคล่องของพาหะ วิธีนี้ไม่จำกัดรูปร่างลักษณะของสารตัวอย่าง สารที่ต้องการวัดจะมีรูปร่างลักษณะใดก็ได้ เพียงแต่สามารถติดขั้วไฟฟ้าได้ก็จะสามารถวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ การวัดจะได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.12
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง
3. สารตัวอย่างจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอ
4. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

วิธีของแวนเดอร์เพาว์เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้สำหรับตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง ซึ่งการวิเคราะห์สภาพคล่องตัวของสารใหม่นั้นมีความจำเป็นสำหรับเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนสารตัวอย่าง



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 2.13 การจัดเรียงขั้วสัมผัสเพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A-D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B-C ดังรูปที่ 2.13 (ก.) จะได้ค่า R_A ดังสมการ

$$R_A = \frac{V_{BC}}{I_{AD}} \quad (2.9)$$

หลังจากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A-B แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว D-C ดังรูปที่ 2.13 (ข.) จะได้ค่า R_B ดังสมการ

$$R_B = \frac{V_{DC}}{I_{AB}} \quad (2.10)$$

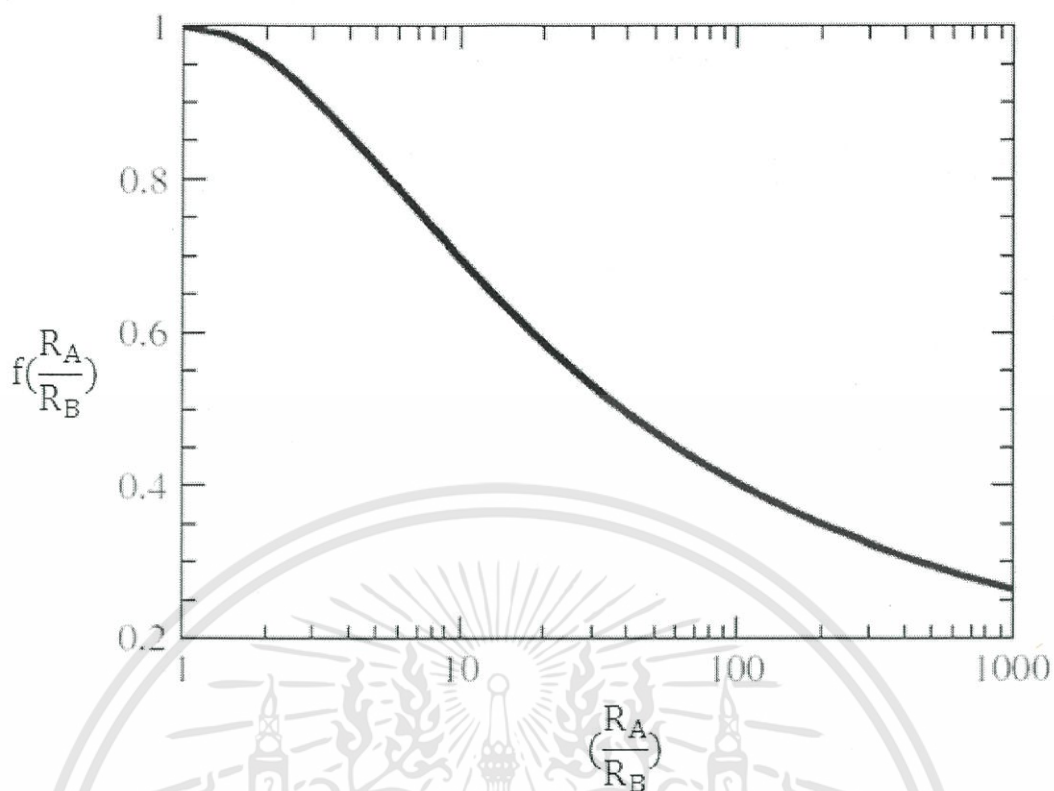
เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 แล้ว สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_S) ได้ดังนี้

$$R_S = \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \left(\frac{R_A + R_B}{2}\right) f\left(\frac{R_A}{R_B}\right) \quad (2.11)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก๊งของแวนเดอร์เพาว์ โดย

$$f\left(\frac{R_A}{R_B}\right) = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2}\right) \left(\frac{R_A - R_B}{R_A + R_B}\right)^2 \quad (2.12)$$

หรือ สามารถหาได้จากกราฟแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟแฟกเตอร์ค่าแก้มของแวนเดอร์เพาฟ์ $f\left(\frac{R_A}{R_B}\right)$

ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_S \times d \quad (2.13) \quad \text{เมื่อ } d \text{ คือความหนาของสาร}$$

ตัวอย่าง

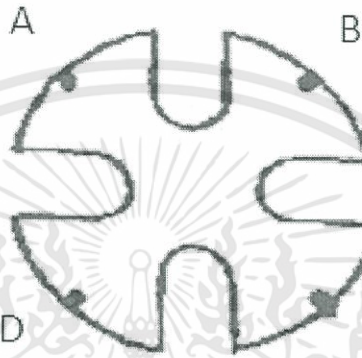
ข้อจำกัดวิธีของแวนเดอร์เพาฟ์

1. ขั้วสัมผัสต้องมีคุณสมบัติที่ดี มิฉะนั้นจะทำให้เส้นความสม่ำเสมอของศักย์ไฟฟ้าบิดเบี้ยวไป
2. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จากสมมติฐานที่ว่า สารตัวอย่างเป็นแผ่นใหญ่และบางมาก คิดว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลค่าความต่างศักย์ที่วัดได้บนชิ้นสารตัวอย่างจะเสมือนอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน
3. จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับเหตุผลตามข้อ 1. และข้อ 2.
4. สารตัวอย่างต้องมีความหนาสม่ำเสมอ
5. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ
6. ต้องไม่ออกแรงกดที่ขั้วสัมผัสมากเกินไป เพราะอาจจะทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียหาย เช่น แตรกร้าว เป็นต้น

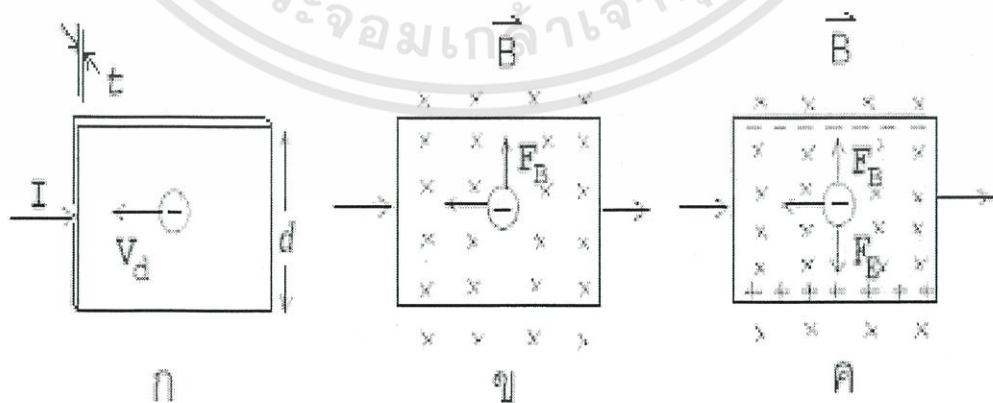
7. ไม่ควรป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าผิดไป นอกจากนี้โวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูงด้วย
8. รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี
9. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารกึ่งตัวนำ จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูป เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall Effect)[11-14]

ปรากฏการณ์ฮอลล์คือปรากฏการณ์ที่ประจุเคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ประจุจะเคลื่อนที่ไปออกกันอยู่ที่ฝั่งใดฝั่งหนึ่งของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง เรียกความต่างศักย์นี้ว่าความต่างศักย์ฮอลล์(Hall Voltage)



รูปที่ 2.16การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อธิบายได้ดังรูป 2.16 ก ถึง 2.16 ค ดังนี้

รูปที่ 2.16ก แสดงสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้าง d หนา และมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในทิศทางจากด้านซ้ายไปด้านขวามีพาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน v_d ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า I คือเคลื่อนที่จากด้านขวาไปด้านซ้าย

รูป 2.16ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B ในทิศพุ่งเข้าและตั้งฉากกับระนาบของสารกึ่งตัวนำจะเกิดแรงแม่เหล็ก F_B กระทำกับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนบนของสารกึ่งตัวนำ

รูป 2.16ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนบนจำนวนมากส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน

การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสองด้านทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Field, E_H) ในสารกึ่งตัวนำมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบนบนสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า F_E กระทำกับอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่างเมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบนสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลเตจ V ดังนี้

$$E_H = \frac{V}{d} \quad (2.14)$$

ความต่างศักย์หรือโวลเตจที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall Potential Difference หรือ Hall Voltage, V_H) หากสารกึ่งตัวนำที่วัดได้เป็นชนิด p แสดงว่ามีพาหะข้างมากคือโฮล ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟก็จะผลักให้โฮล (Hole) เคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นไปด้านบนคือเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กตรอน และในทางตรงกันข้ามหากสารกึ่งตัวนำที่วัดได้เป็นชนิด n แสดงว่ามีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน ขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟก็จะผลักให้อิเล็กตรอน (Electron) เคลื่อนที่จากด้านบนลงด้านล่าง คือเคลื่อนที่เข้าหาโฮล

2.3.1 แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)

แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากประจุไฟฟ้าผ่านสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการดังนี้

$$F_{\text{Lorentz}} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.15)$$

จะเห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นบนประจุ q วิ่งด้วยความเร็ว v ผ่านสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B พบว่าทิศทางของแรงนี้กระทำบนประจุ q จะเป็นไปตามกฎมือขวา เนื่องจากปรากฏการณ์ของฮอลล์จะสามารถพิจารณาได้ง่ายขึ้น โดยพยายามจัดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของประจุ q ดังนั้นค่าของแรงลอเรนซ์นี้จึงคำนวณได้ ดังนี้

$$F = qvB\sin 90$$

$$= qvB(2.16)$$

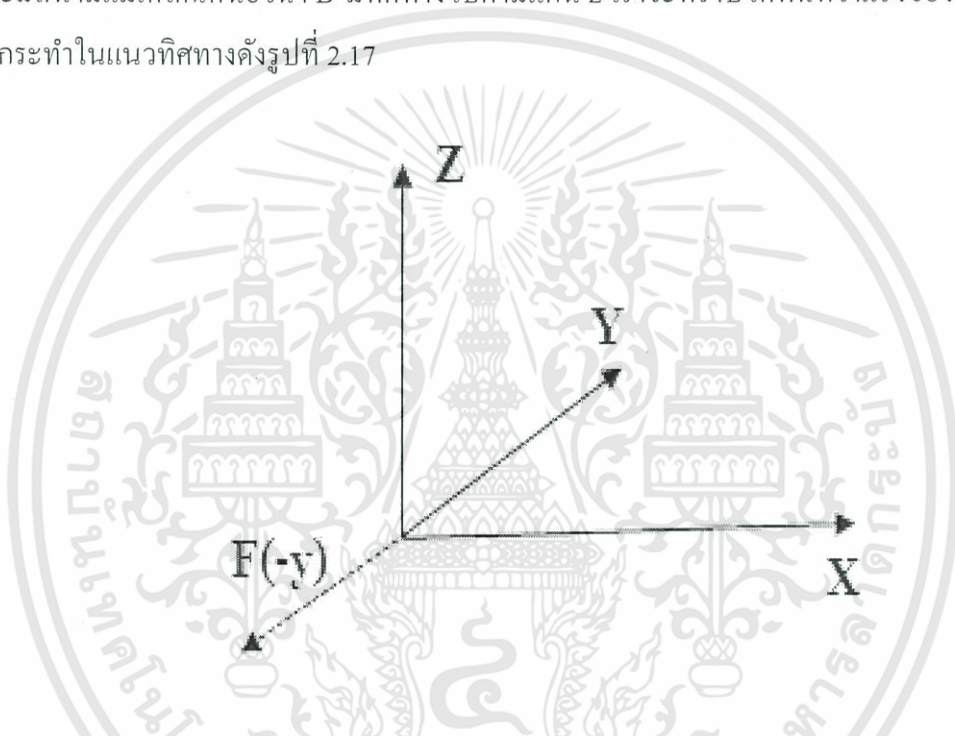
เมื่อ q คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน

v คือ ทิศทางของประจุ

B คือ ทิศทางของสนามแม่เหล็ก

θ คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็กกับทิศทางของประจุ (โดยทั่วไปจะพิจารณาที่มุมตั้งฉาก)

แต่สำหรับทิศทางนั้นให้ถือหลักกฎมือขวาไว้เป็นสำคัญ เช่น ถ้าประจุ $+q$ วิ่งไปทางแกน x และมีสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B มีทิศทางไปตามแกน z เราจะทราบได้ทันทีว่าแรงของลอเรนซ์นี้จะกระทำในแนวทิศทางดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แรงลอเรนซ์มีทิศทางในแกน $-y$ มีขนาด qvB

ในทำนองเดียวกันถ้าประจุ $-q$ วิ่งเหมือนเดิมในทิศทางแกน x และมีสนามแม่เหล็ก B เหมือนเดิมคือไปในทิศทางแกน Z ดังนั้นแรงลอเรนซ์ที่กระทำบนประจุ $-q$ จะมีทิศทาง $+y$ และมีขนาดเท่ากันคือ qvB เพียงแค่ทิศทางตรงข้ามกับประจุ $+q$ ข้อสังเกตคือ ถ้าวิ่งไปในทิศทางเดียวกันผ่านสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการวิ่งของประจุลบและประจุบวกจะเห็นได้ว่าแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำบนประจุทั้งสองนี้จะทำให้ประจุทั้งสองเบี่ยงเบนไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกันดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ประจุต่างชนิดกันเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันผ่านสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของประจุทั้งสอง



รูปที่ 2.19 ประจุ +q และ -q วิ่งเข้าสู่สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกัน

ถ้าทิศทางการวิ่งเข้าสู่สนามแม่เหล็กมีทิศทางในลักษณะตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.19 พบว่าประจุทั้งสองจะ โต้่ง ไปในทิศทางเดียวกัน สิ่งนี้เองที่พบในสารกึ่งตัวนำทั่วไปที่นำมาวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

2.3.2 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ความหนาแน่น และสภาพคล่องของพาหะ

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) สำหรับสารกึ่งตัวนำ n-typeสามารถหาได้จาก

$$R_H = \frac{-1}{qn} \quad (2.17)$$

เช่นเดียวกันสำหรับสารกึ่งตัวนำ p-typeสามารถหาสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) ได้จาก

$$R_H = \frac{1}{qp} \quad (2.18)$$

ดังนั้นสภาพคล่องของพาหะหาได้จาก

$$\mu = \frac{|R_H|}{\rho} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพคล่องและความหนาแน่นของพาหะแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

- สารกึ่งตัวนำชนิด n

$$\mu_n = \frac{1}{qn\rho} \quad (2.20)$$

- สารกึ่งตัวนำชนิด p

$$\mu_p = \frac{1}{qp\rho} \quad (2.21)$$

เมื่อ q คือ ประจุของอิเล็กตรอน

ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า

n หรือ p คือ ปริมาณของพาหะต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.4 โปรแกรม LabVIEW [15-16]



รูปที่ 2.20 ไอคอน โปรแกรม LabVIEW

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench หมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LABVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือจะเรียกย่อๆ ว่า VI ดังนั้น จุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรมนี้ก็คือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ โปรแกรมนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่างๆ

สิ่งที่ LabVIEW แตกต่างจากโปรแกรมอื่นคือ LabVIEW เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) คือไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใดๆ ทั้งสิ้นและภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้ เรียกว่า ภาษารูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่าภาษา G (Graphical Language) หากต้องการที่จะนำข้อมูลจากภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาในเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลประมวลค่าแสดงผล หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ก็สามารถทำได้ กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าโปรแกรม LabVIEW คือการพยายามทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ของเราเมื่อรวมกับ LabVIEW และอุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Card) แล้วสามารถเปลี่ยนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลของเราให้กลายเป็นเครื่องมือวัดในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น Oscilloscope, Multi-meter, Function Generator, Strain meter Thermometer หรือเครื่องมือวัดอื่นๆตามที่เรากำลังต้องการ จึงเป็นที่มาของชื่อเครื่องมือวัดเสมือนจริง (Virtual Instrument) โดยการเชื่อมต่อโปรแกรม LabVIEW เข้ากับฮาร์ดแวร์ภายนอกทำได้โดยผ่านทางการ์ด DAQ (data acquisition) การเชื่อมต่อสามารถเชื่อมต่อกับพอร์ต (port) ได้หลายชนิด เช่น พอร์ตขนาน (parallel port) พอร์ตอนุกรม (Serial port) GPIB และ HPIB เป็นต้น

โปรแกรม LabVIEW ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. Front Panel หรือหน้าจอแสดงผล จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (หรือที่นิยมเรียก User Interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าจอแสดงผลของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัด โดยจะประกอบด้วย สวิตช์เปิดปิดปุ่มบิดปุ่มกดจอแสดงผลหรือค่าคงที่ ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้ หน้า Front Panel แสดงดังรูปที่ 2.21



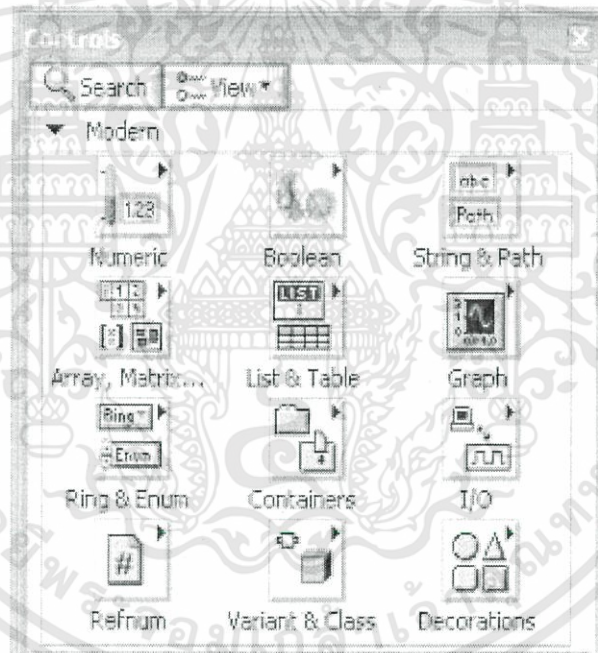
รูปที่ 2.21 หน้า Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Object ที่อยู่บน Front Panel มีอยู่สามประเภท คือ

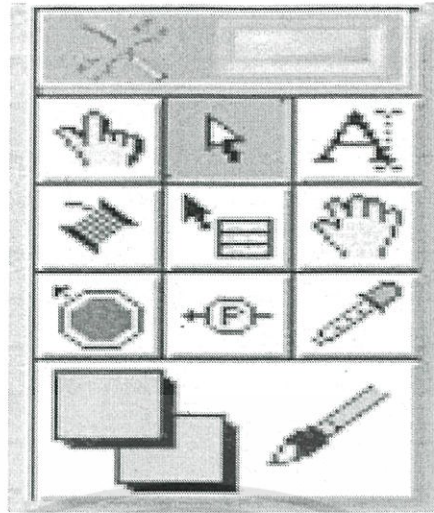
1. Control คือ ประเภทที่รับค่าจากผู้ใช้ (Input) ซึ่งผู้ใช้สามารถพิมพ์ค่าลงไป หรือใช้เมาส์คลิกเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าได้ เช่น ปุ่มหมุน ปุ่มเลื่อนสวิตช์ เป็นต้น
2. Indicators คือ ประเภทที่ใช้แสดงค่าต่างๆเท่านั้น (Output) ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น กราฟ มิเตอร์ LED
3. Decorations เป็น Object ที่ไม่เกี่ยวข้องกับ โปรแกรม และ code บน Block Diagram เลย แต่มีไว้เพื่อความสวยงามเป็นระเบียบของ Front panel เท่านั้น

เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel ประกอบด้วย Control Palette และ Tools Palette ซึ่ง LabVIEW มี Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel แสดงดังรูปที่ 2.22 เป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) โดยจะจัดเป็นกลุ่มต่างๆ เช่น กลุ่มของตัวเลข (Numeric) ซึ่งภายในกลุ่มจะมี Control และ Indicator ต่างๆที่เกี่ยวกับตัวเลข



รูปที่ 2.22 Control Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

Tools Palette คือ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งจะใช้ทั้งการออกแบบ Front Panel และ Block Diagram ในส่วนนี้จะกล่าวถึง Tools Palette สำหรับออกแบบ Front Panel แสดงดังรูปที่ 2.23



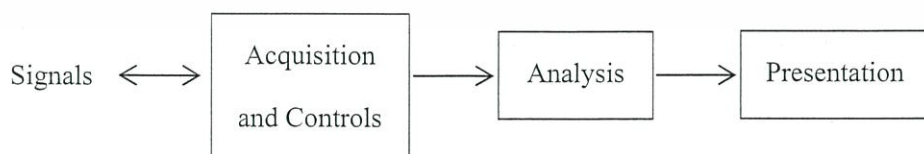
รูปที่ 2.23 Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

2. Block Diagram เปรียบเสมือนกับ Hardware ภายในเครื่องมือวัด ซึ่งจะเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปภาพ LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุมทำให้สามารถออกแบบตามที่ต้องการได้ หลักการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.24 แบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบในที่นี้ คือ คอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจมาจากการ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า)

2. Analysis หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วอาจจะผ่านฟังก์ชันในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสิ่งที่วัดได้และใช้งานได้

3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานโดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลเฉพาะที่วัดได้โดยไม่ต้องรู้ความสำคัญกับเวลา หรือ Spectrum Analysis จะแสดงสัญญาณในรูปแบบความถี่หรือการพิมพ์ออกมาเป็นรายงานหรือเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 2.24 Block Diagram ของเครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW

หรืออาจมอง Block Diagram นี้เป็นเสมือนกับ Source Code หรือโปรแกรมของ LabVIEW ซึ่งปรากฏว่าอยู่ในรูปของภาษา G (Graphical Language) ซึ่ง Block Diagram นี้ถือว่าเป็น Executable Program คือ สามารถที่จะทำงานได้ทันที และข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ LabVIEW จะมีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ทำให้โปรแกรมจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาดในโปรแกรมเท่านั้น โดยสามารถที่จะดูรายละเอียดของความผิดพลาดแสดงให้เห็นได้ ส่วนประกอบภายใน Block Diagram จะประกอบด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงาน หรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนเหล่านี้ ซึ่งจะปรากฏในรูปของ Block แต่ละ Block จะถูกต่อสาย (Wire) เข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block เหล่านี้ ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการและแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ตัวอย่างหน้า Block Diagram แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างหน้า Block Diagram

Functions Palette เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมบน Block Diagram ซึ่งจะมี Function และ SubVI ต่างๆ ให้ผู้ใช้เลือกใช้โดย Function และ SubVI จัดเป็นกลุ่มๆ เช่น Numeric Function จะมี Function ต่างๆ เกี่ยวกับตัวเลข เช่น บวก ลบ คูณ และหาร เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

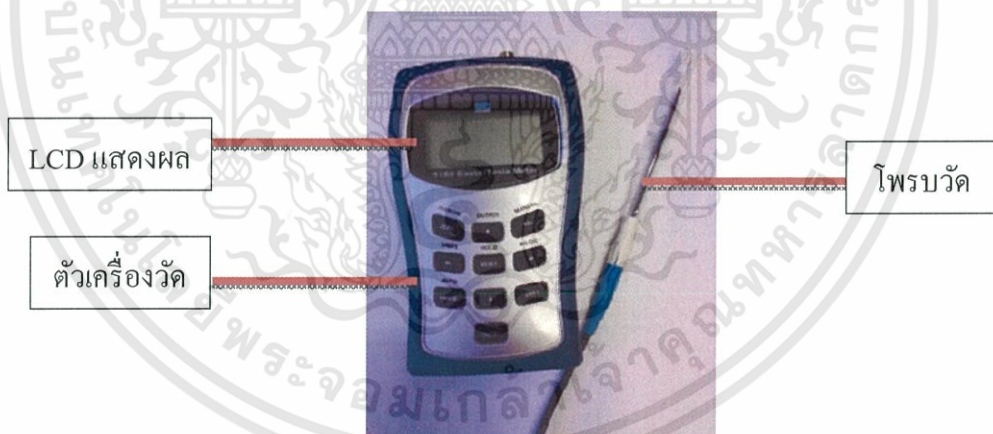
บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้ประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของอุปกรณ์ และฟังก์ชันการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญสำหรับระบบการวัดฮอลล์อาทิ เช่น Gauss/Tesla Meter, Regulated DC Power Supply, Current source, DMM, Magnetic Core และ Chiller เป็นต้น ส่วนที่สองเป็นส่วนของการจัดเตรียมอุปกรณ์และวิธีการวัดแวนเดอร์เพาว์และการวัดฮอลล์ และในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของโปรแกรมควบคุมระบบการวัดฮอลล์ ถูกออกแบบและเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW นำมาใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อความสะดวกในการทำการวัดและลดปัญหาความผิดพลาดจากการคำนวณ ซึ่งจะประมวลผลการวัดและคำนวณคุณสมบัติต่างๆของสารตัวอย่างผ่านทางจอคอมพิวเตอร์

3.1 อุปกรณ์ และฟังก์ชันการใช้งาน

3.1.1 Gauss/Tesla Meter



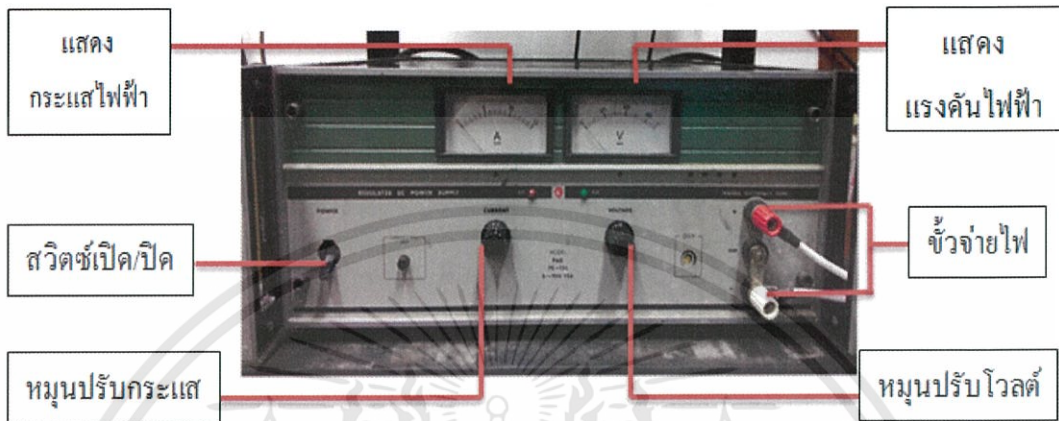
รูปที่ 3.15180 Gauss/Tesla Meter

เกาส์มิเตอร์หรือเทสลามิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Density) หรือใช้วัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) ประกอบด้วย โพรบวัดและตัวเครื่องวัด แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะต่อเข้าด้วยกันที่บริเวณด้านบนของตัวเครื่องวัดเนื่องจากโพรบวัดมีขนาดเล็กจึงสามารถนำไปวัดในจุดที่ทึบหรือในซอกมุมต่างๆได้ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้จะอยู่ในหน่วย Gauss หรือ Tesla แสดงผลการวัดด้วยจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง 5180 Gauss/Tesla Meter ถูกเลือกมาใช้ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กเนื่องจากมีช่วงของการวัดตั้งแต่ 1 kG ถึง 30 kG มีความละเอียด 1 mG

3.1.2 Regulated DC Power Supply



รูปที่ 3.2 Regulated DC Power Supply

Regulated DC Power Supply คือเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบควบคุมได้ สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มีค่าที่แน่นอนได้ มีโวลุ่มสำหรับหมุนปรับค่า สามารถปรับกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-15 A และปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-70 V แสดงผลแบบอนาล็อก มีส่วนแสดงผล 2 ส่วน คือ ส่วนของกระแสไฟฟ้า และส่วนของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า แสดงในหน่วย แอมแปร์ (A) และ โวลต์ (V) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การปรับกระแสไฟฟ้าหรือปรับแรงดันไฟฟ้าต้องค่อยๆปรับหากปรับเกินขีดจำกัดอาจทำให้เข็มหักเกิดความเสียหายได้ ในส่วนของการหมุน โวลุ่มเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะมีไฟสีแดงสว่างขึ้นเมื่อปรับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหากไฟสีเขียวในส่วนของแรงดันไฟฟ้าสว่างขึ้นให้หยุดหมุน โวลุ่มทันทีเนื่องจากแรงดันถึงขีดจำกัดแล้ว และการหมุน โวลุ่มเพื่อจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าจะมีไฟสีเขียวสว่างขึ้นเมื่อปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นหากไฟสีแดงทางด้านของกระแสไฟฟ้าสว่างขึ้นให้หยุดปรับทันทีเนื่องจากกระแสไฟฟ้าถึงขีดจำกัดแล้ว เครื่อง Regulated DC Power Supply นี้มีความละเอียดของกระแสไฟฟ้า 1A และความละเอียดของแรงดันไฟฟ้า 1V ซึ่งเครื่องนี้ถูกนำมาใช้งานในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเพื่อปรับความเข้มของสนามแม่เหล็ก

3.1.3 Keithley 2410 Current source



รูปที่3.3 Current source Keithley Model 2410

แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current source, Keithley 2410) นำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่างเครื่อง Keithley 2410 แสดงดังรูปที่3.3 ความละเอียดของการจ่ายกระแสไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งมีขอบเขตของการจ่ายกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $\pm 1\mu\text{A}$ ถึง $\pm 1\text{ A}$ สามารถเลือกช่วงของการวัดได้โดยการปรับที่ด้านหน้าของเครื่องหรือควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่อง Current source นั้นจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยใช้ General Purpose Interface Bus (GPIB)

ตารางที่ 3.1 ความละเอียดของการจ่ายกระแส

Model 2410 Source range	Model 2410 output Current setting	Output current limits (1 year, 18°C-28°C)
1μA 10μA 100μA 1mA 20mA 100mA 1A	1.00000μA 10.0000μA 100.000μA 1.00000mA 20.0000mA 100.00mA 1.00000A	0.99905 to 1.00095μA 9.9947 to 10.0053μA 99.949 to 100.051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		$\mu\text{A}0.99946$ to 1.00054mA 19.9870 to 20.0130mA 99.914 to 100.086 $\text{mA}0.99640$ to 1.00360 A
--	--	---

3.1.4 Keithley 2100 Digital Multimeter



รูปที่ 3.46 $\frac{1}{2}$ digitalmultimeterKeithley model 2100

Digital Multimeter (DMM) นำมาใช้ในการวัดความต่างศักย์ตกรวมที่ผิวของชิ้นงาน เครื่อง Keithley 2100 Digital Multimeter แสดงดังรูปที่ 3.4 มีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง ± 100 mV ถึง ± 1 kV มีความละเอียดสูงสุดถึง $0.1\mu\text{V}$ สามารถเลือกช่วงของการวัดได้โดยปรับที่ด้านหน้าของเครื่องหรือควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่อง DMM นั้นจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยใช้ USB

ตารางที่ 3.2 Specifications DC characteristics: accuracy \pm (% of reading + % of range)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Function	Range	Resolution	Input Resistance	1 Year, 23°C ± 5°C
DC Voltage	100.0000 mV	0.1 μV	>10 GΩ	0.0055 + 0.0040
	1.000000 V	1.0 μV	>10 GΩ	0.0045 + 0.0008
	10.00000 V	10 μV	>10 GΩ	0.0038 + 0.0006
	100.0000 V	100 μV	10 MΩ	0.0050 + 0.0007
	1000.000 V	1 mV	10 MΩ	0.0055 + 0.0010

3.1.5 Magnetic Core



รูปที่ 3.5 Magnetic Core

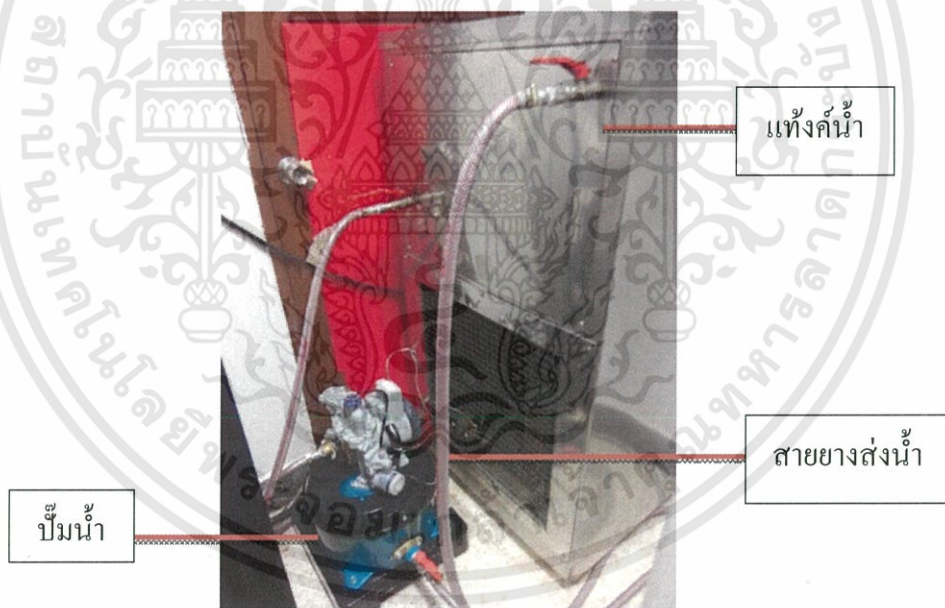
Magnetic Core คือแกนแม่เหล็ก หรือวงแหวนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นรูปวงแหวนทำด้วยเหล็กออกไซด์หรือเฟอร์ไรต์ มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นมีความจำเป็นต้องทราบค่าของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิในการทดลองนี้มีขดลวดทั้งหมด 6 ขด โดยแบ่งขดลวดออกเป็นปฐมภูมิ 3 ขด และทุติยภูมิ 3 ขด ขดลวดแต่ละขดนั้นมีความต้านทานขดละ 12 โอห์ม นำขดลวดทั้ง 3 ขดต่อขนานกัน แล้วจึงนำขดลวดทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิมาต่ออนุกรมกันขดลวดแต่ละขดที่ต่อขนานกันมีความต้านทานขดละ 4 โอห์ม ดังนั้นขดลวดทั้ง 6 ขด มีความต้านทานรวม 8 โอห์มดังรูปที่ 3.5 สามารถเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็กได้โดยการเปลี่ยนขั้วของแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้า ความเข้มของสนามแม่เหล็กเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปสามารถวัดได้โดยใช้ Gauss/Tesla Meter ในตำแหน่งที่วัดสารตัวอย่างเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่อง Regulated DC Power Supply สามารถปรับกระแสสูงสุดได้ 8A และพบว่าสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ทิศมีความเข้มเท่ากัน คือ 0.53T ซึ่งค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กนั้นนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์, ความหนาแน่นและสภาพคล่องของพาหะต่อไป

3.1.6 Chiller

Chiller คือ เครื่องทำความเย็นมีหน้าที่ในการผลิตน้ำเย็นเพื่อส่งไปยังขดลวด เนื่องจากเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเป็นเวลานานจะทำให้ขดลวดเกิดความร้อนขึ้น มีผลให้ความต้านทานของขดลวดเพิ่มขึ้นจึงสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดได้ลดลง ซึ่งการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดนั้นมีผลโดยตรงต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดเกิดความร้อนมากเกินไป จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนเพื่อปรับอุณหภูมิของขดลวดให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ภาพของ Chiller แสดงดังรูปที่ 3.6

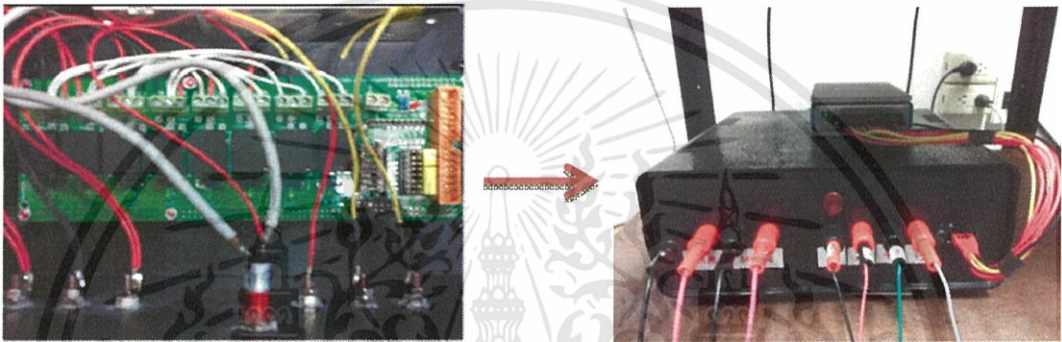


รูปที่ 3.6 Chiller

หลักการการทำงานของ Chiller คือ จะนำสารทำความเย็น (ก๊าซเย็นความดันต่ำ) โดยอยู่ในสถานะไออิ่มตัวมาอัดที่ Compressor จากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดโดยเครื่องอัด จนมีสถานะเป็นไอร้อน (Superheated Vapor) มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นสารทำความเย็นจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อถ่ายเทความร้อนออกทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยน

สถานะเป็นของเหลวอิมตัวที่มีความดันสูง จากนั้นของเหลวอิมตัวความดันสูงจะเคลื่อนที่ผ่าน อุปกรณ์ขยายตัว (อุปกรณ์ลดแรงดัน) สารทำความเย็นจะมี 2 สถานะ คือของเหลวและก๊าซที่มี อุณหภูมิต่ำและความดันต่ำหลังจากนั้นจะผ่านเข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) ทำให้สารทำความเย็นรับความร้อนจากการไหลคั้นๆ และกลายเป็นไออิมตัว ซึ่งวัฏจักรการทำความเย็น จะดำเนินเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ หมุนเวียนเป็นวงจรเช่นนี้ตลอดเวลา จึงทำให้ Chiller สามารถผลิตน้ำ เย็นได้อย่างต่อเนื่อง

3.1.7 Relays



รูปที่ 3.7 Relays

รีเลย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัด-ต่อวงจรโดยใช้หลักการทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้าและการที่จะให้รีเลย์ทำงานต้องจ่ายไฟให้กับรีเลย์ตามที่กำหนด เพราะเมื่อจ่ายไฟให้กับรีเลย์จะทำให้หน้าสัมผัสติดกัน กลายเป็นวงจรปิด และตรงกันข้ามหากไม่มีการจ่ายไฟให้กับรีเลย์จะกลายเป็นวงจรเปิด ไฟที่เราใช้ป้อนให้กับรีเลย์เป็นไฟที่มาจาก Current Source (Keithley 2410) ในการทดลองนี้ใช้รีเลย์ในการสลับ Configure ในการวัดสารตัวอย่างซึ่งจะถูกควบคุมผ่าน National Instruments 9472 (NI 9472) ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ที่สั่งการและประมวลผล การเชื่อมต่อรีเลย์เข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกนั้นจะมีจุดเชื่อมต่อที่เกี่ยวข้องอยู่ 3 จุด คือ Normally Closed (NC), Normally Open (NO) และ Common (C) ในการใช้งานจะต้องขอทางด้านหนึ่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าเข้ากับขา C เสมอ ส่วนอีกขาหนึ่งจะต่อเข้ากับ NO หรือ NC นั้นขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้อุปกรณ์อยู่ในสถานะที่ทำงานหรือไม่ในการทริกรีเลย์นั้นจะใช้ความต่างศักย์ในการทริค ซึ่งในการทดลองนี้ใช้รีเลย์ 8 ตัว ทำหน้าที่ในการสลับ Configure 8 แบบแสดงดังรูปที่ 3.7

Configure ทั้ง 8 แบบ คือ

$$1. R_{BA,CD} = V_{CD}/I_{BA}$$

$$2. R_{AB,DC} = V_{DC}/I_{AB}$$

$$3. R_{DC,AB} = V_{AB}/I_{DC}$$

4.

$$R_{CD,BA} = V_{BA}/I_{CD}$$

$$5. R_{CB,DA} =$$

$$V_{DA}/I_{CB}$$

$$6. R_{BC,AD} =$$

$$V_{AD}/I_{BC}$$

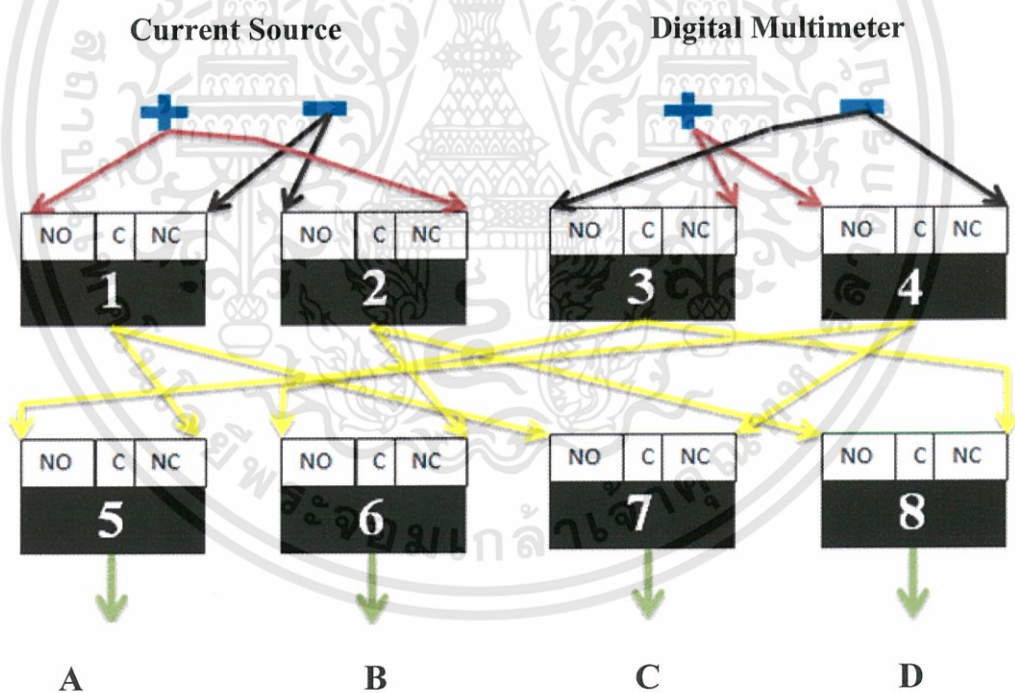
$$7. R_{AD,BC} =$$

$$V_{BC}/I_{AD}$$

$$8. R_{DA,CB} =$$

$$V_{CB}/I_{DA}$$

Configure ทั้ง 8 แบบ นั้นเป็นการวัดด้วยวิธีของ Van der Pauw การต่อรีเลย์สำหรับวัด Van der Pauw แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การต่อรีเลย์สำหรับวัด Van der Pauw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบาย

Current Source ขาบวกต่อกับ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 1 และ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 2

Current Source ขาลบต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 1 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 2

DMM Meter ขาบวกต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 3 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 4

DMM Meter ขาลบต่อกับ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 3 และ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 4

Output ของรีเลย์ตัวที่ 1 ต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 5 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 7

Output ของรีเลย์ตัวที่ 2 ต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 6 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 8

Output ของรีเลย์ตัวที่ 3 ต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 6 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 8

Output ของรีเลย์ตัวที่ 4 ต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 5 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 7

Output ของรีเลย์ตัวที่ 5 ต่อกับขาที่ 1

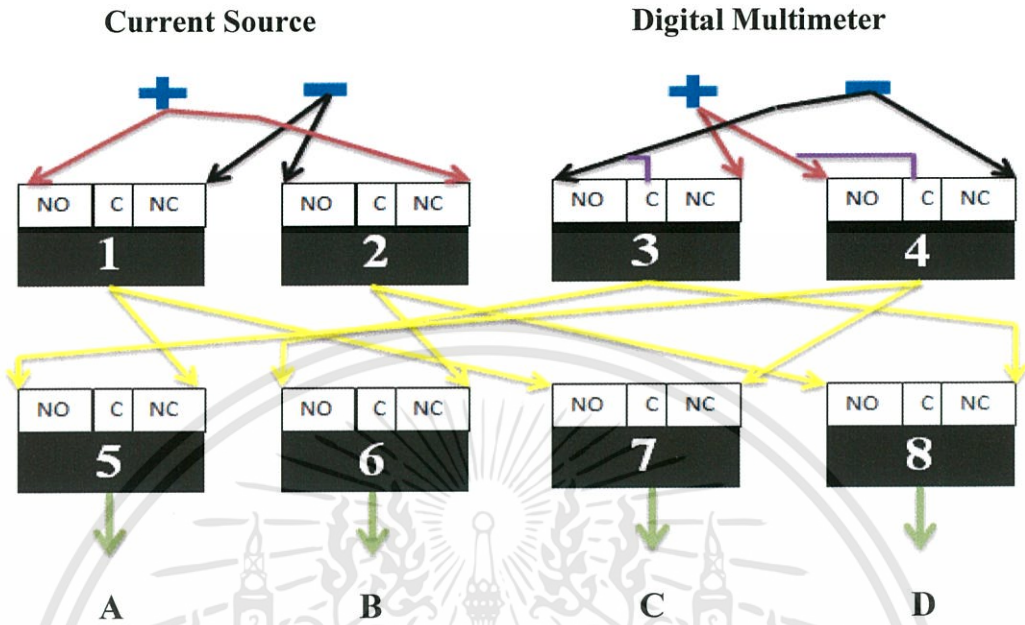
Output ของรีเลย์ตัวที่ 6 ต่อกับขาที่ 2

Output ของรีเลย์ตัวที่ 7 ต่อกับขาที่ 3

Output ของรีเลย์ตัวที่ 8 ต่อกับขาที่ 4

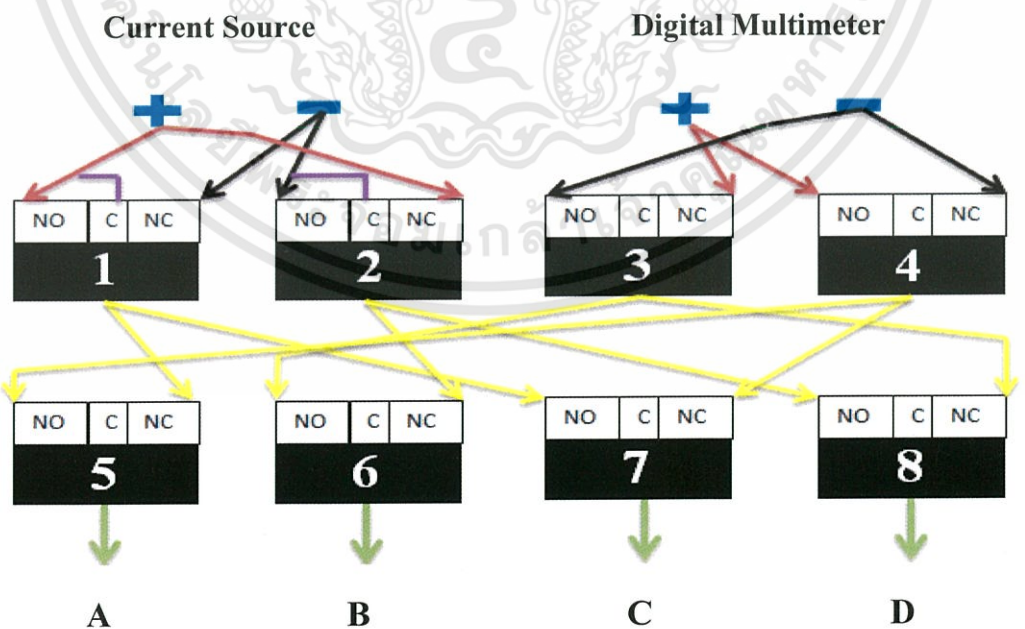
การทริกรีเลย์สำหรับวัด Van der Pauw ทั้ง 8 Configure แสดงดังนี้

1. $R_{BA,CD} = V_{CD}/I_{BA}$



จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลย์หมายเลข 3 และ 4 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure! แบบที่ 1 ได้

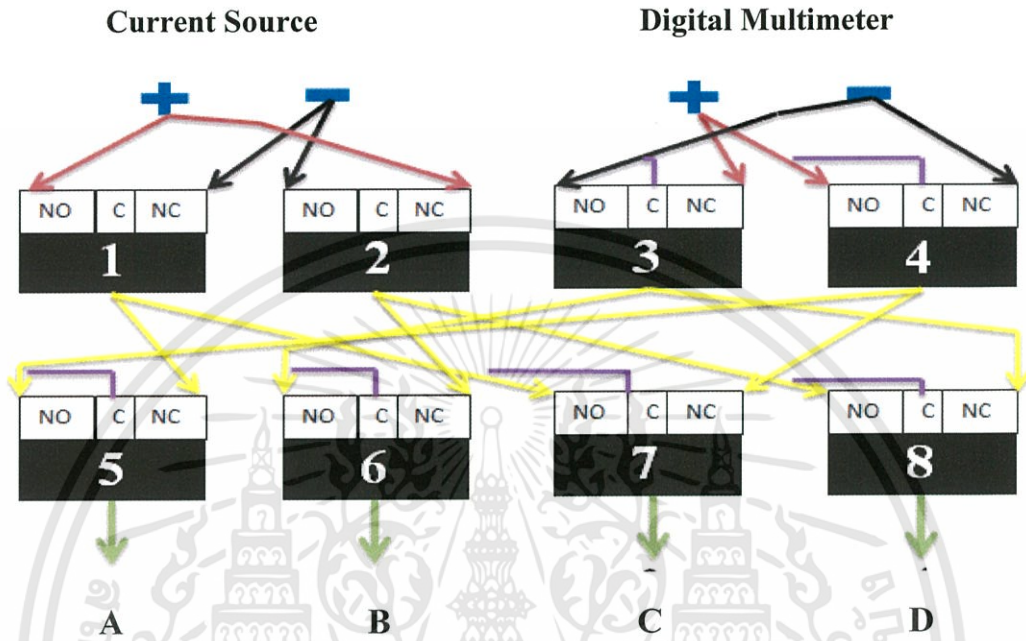
2. $R_{AB,DC} = V_{DC}/I_{AB}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

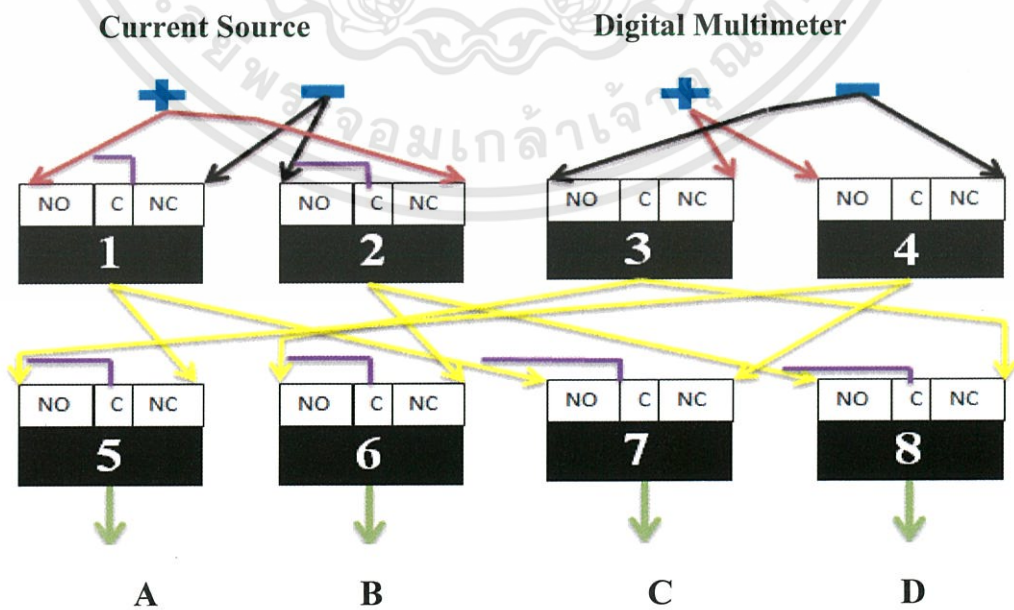
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 1 และ 2 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 2 ได้

$$3. R_{DC,AB} = V_{AB} / I_{DC}$$



จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 3 ได้

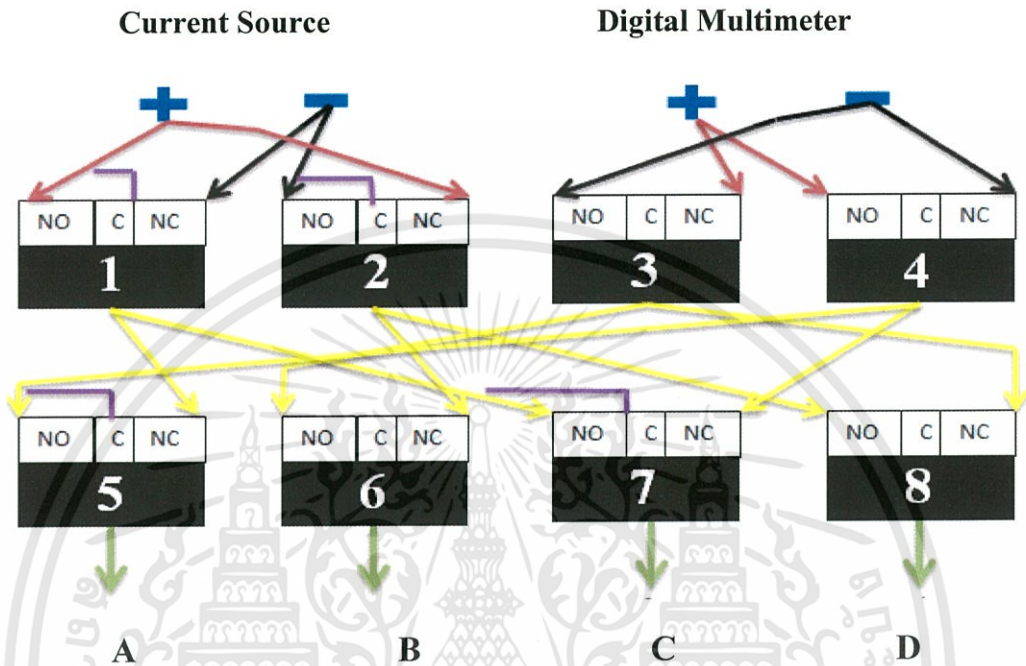
$$4. R_{CD,BA} = V_{BA} / I_{CD}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

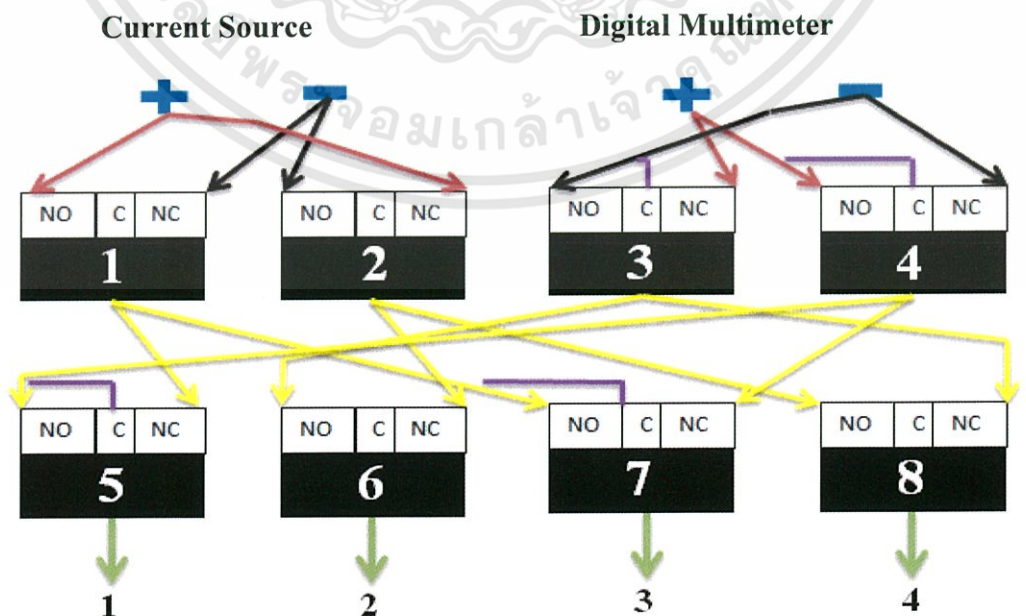
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 1, 2, 5, 6, 7 และ 8 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 4 ได้

$$5. R_{CB,DA} = V_{DA}/I_{CB}$$



จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 1, 2, 5 และ 7 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 5 ได้

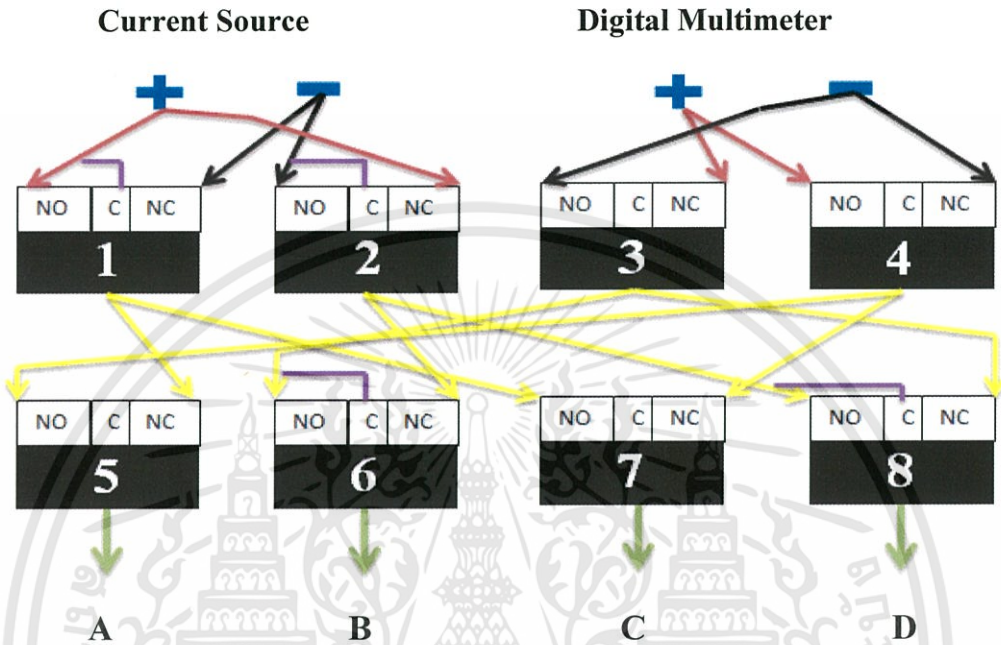
$$6. R_{BC,AD} = V_{AD}/I_{BC}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

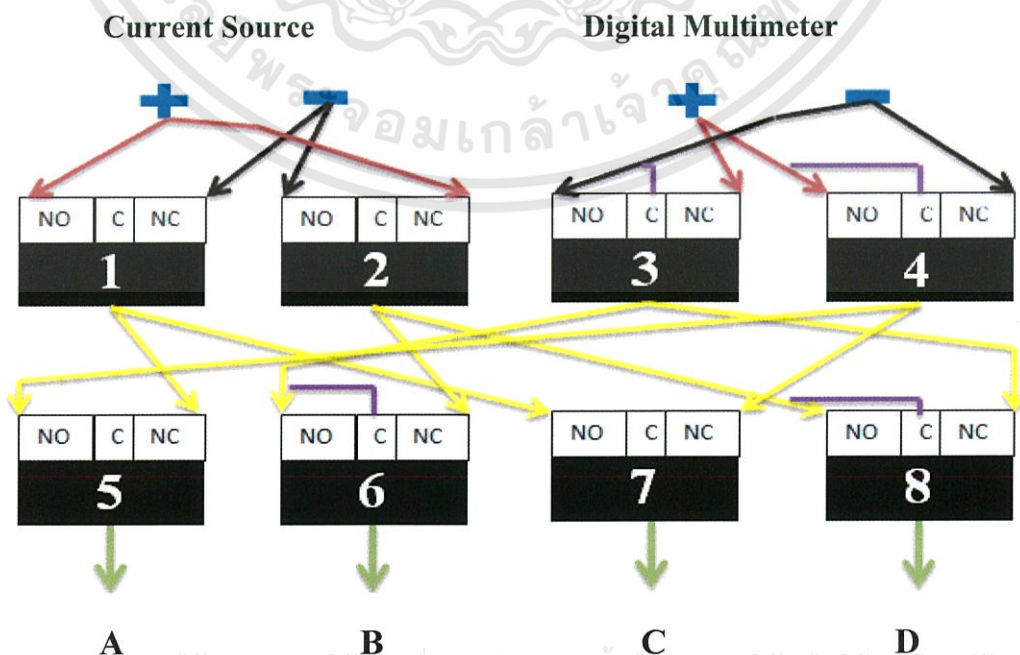
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริกซ์หมายเลข 3, 4, 5 และ 7 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 6 ได้

$$7. R_{AD,BC} = V_{BC} / I_{AD}$$



จากรูปแผงวงจรจะต้องทริกซ์หมายเลข 1, 2, 6 และ 8 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 7 ได้

$$8. R_{DA,CB} = V_{CB} / I_{DA}$$



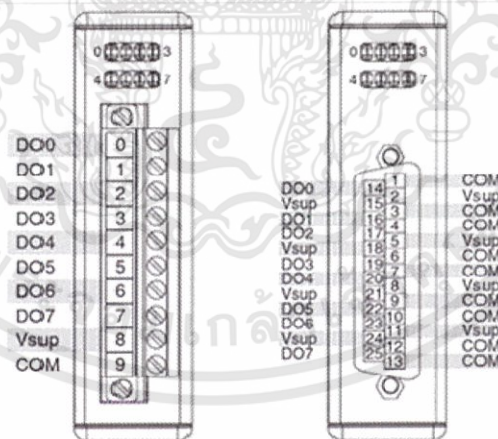
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแผงวงจรจะต้องทริกกรีเลย์หมายเลข 3, 4, 6 และ 8 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 8 ได้

3.1.8 National Instruments 9472 (NI 9472)



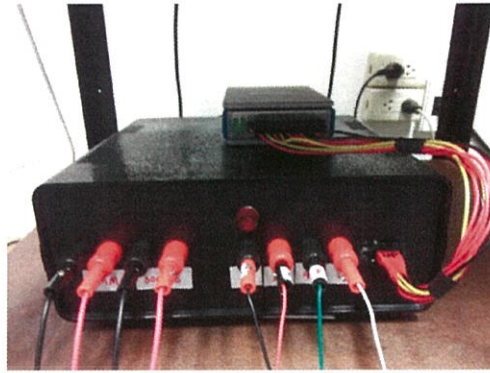
รูปที่ 3.9 NI 9472



รูปที่ 3.10 การกำหนดขาของ NI 9472

National Instruments (NI) ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อข้อมูลจากกรีเลย์เข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง USB โดยขาของ National Instruments ทั้ง 10 ขาถูกเชื่อมต่อกับรีเลย์ดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



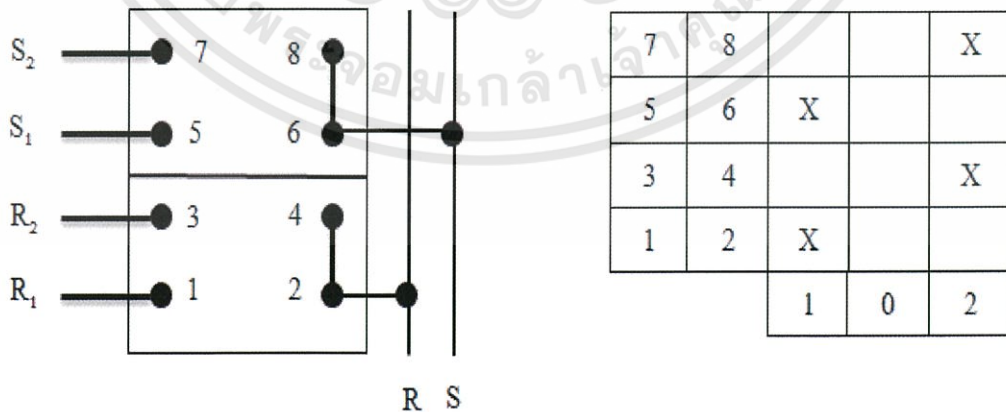
รูปที่ 3.11 การต่อ National instruments กับรีเลย์

3.1.9 Change over switch



รูปที่ 3.12 Change over switch

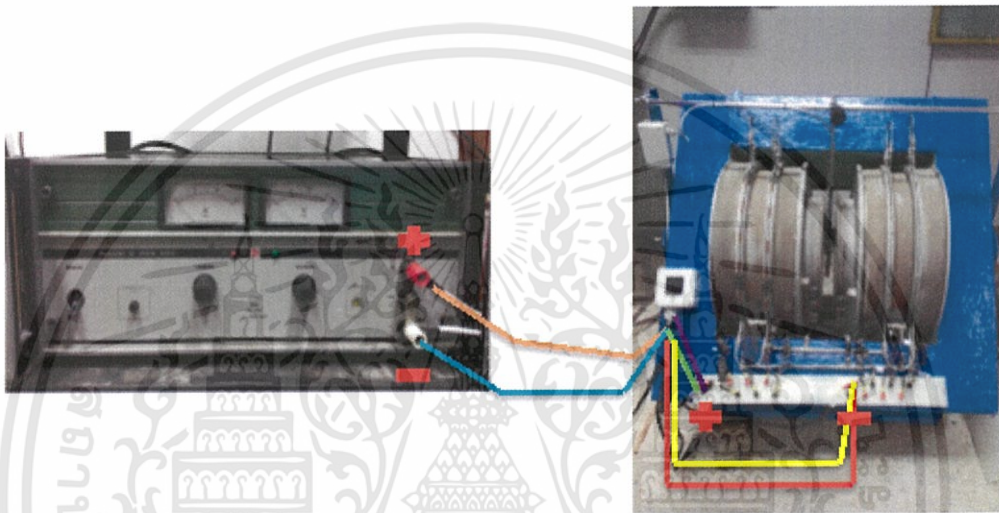
การต่อ Change over switch



รูปที่ 3.13 คู่มือการต่อสับสวิตซ์ของ Change over switch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าขั้ว 2 เชื่อมกับขั้ว 4 และขั้ว 6 เชื่อมกับขั้ว 8 ซึ่งขั้วทั้ง 4 นี้เป็นขั้วสำหรับการต่อเข้าไฟเลี้ยง ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ขั้ว 2 หรือ 4 และขั้ว 6 หรือ 8 ก็ได้ ซึ่งผู้ทดลองได้กำหนดให้ขั้ว 2 เป็นขั้วที่ต่อเข้ากับไฟบวกและขั้ว 6 เป็นขั้วที่ต่อเข้ากับขั้วลบของ DC power supply ส่วนขั้ว 1, 3, 5 และ 7 เป็นขั้วที่ใช้ในการกำหนดสวิตช์ให้บิดไปทางเลข 1 หรือ เลข 2 จากตารางในรูปที่ 3.13 จะเห็นว่า การบิดสวิตช์ไปทางเลข 1 จะทำงานเมื่อมีการรวมขั้ว 1 กับขั้ว 5 เข้าด้วยกัน และการบิดสวิตช์ไปทางเลข 2 จะทำงานเมื่อมีการรวมขั้ว 3 กับขั้ว 7 เข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.14การต่อขั้วของ Change over switch เข้ากับRegulated DC Power Supply และขดลวด

คำอธิบายเพิ่มเติม

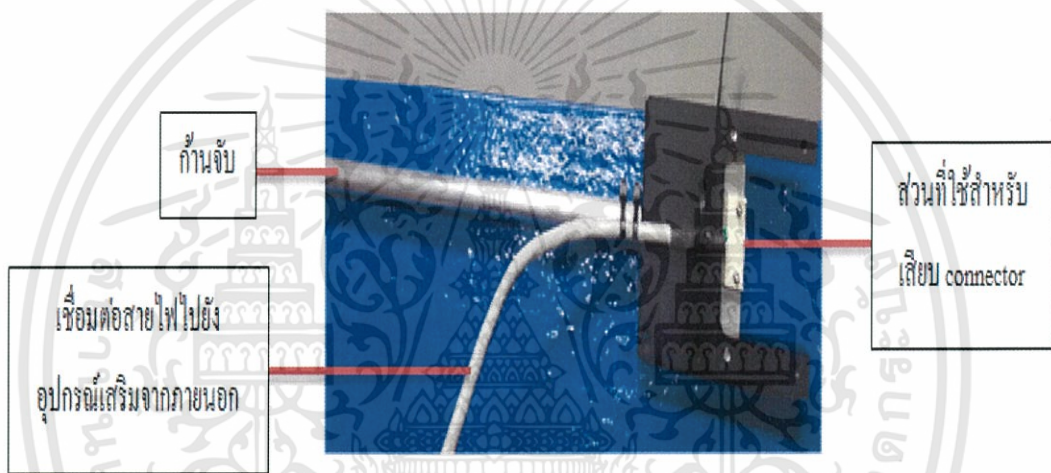


จากรูปที่ 3.14 มีขั้วที่ต่อออกมาจาก Change over switch 6 ขั้ว คือ ขั้ว 1, 2, 3, 5, 6 และ 7 ต่อขั้ว 2 เข้ากับขั้วบวกและต่อขั้ว 6 เข้ากับขั้วลบของ Regulated DC Power Supply จากนั้นรวมขั้ว 1 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกกับขั้ว 7 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเข้าด้วยกันที่ขั้วบวกของขดลวด แล้วรวมขั้ว 5 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบกับขั้ว 3 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเข้าด้วยกันที่ขั้วลบของขดลวด เมื่อบิดสวิตช์ไปทางเลข 1 จะทำให้ไฟบวกจาก Regulated DC Power Supply เข้าไปทรักกับขั้ว 1 ซึ่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก และไหลจาก Regulated DC Power Supply เข้าไปทรिकกับขั้ว 5 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ และเมื่อบิดสวิตช์ไปทางเลข 2 จะทำให้ไฟบวกจาก Regulated DC Power Supply เข้าไปทรिकกับขั้ว 7 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ และไหลจาก Regulated DC Power Supply เข้าไปทรिकกับขั้ว 3 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกัน สามารถตรวจสอบทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ตกคร่อม ซึ่งพบว่าเมื่อบิดสวิตช์ไปทางเลข 1 ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเป็นบวกและเมื่อบิดสวิตช์ไปทางเลข 2 ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเป็นลบ แสดงว่ากระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกันจริง

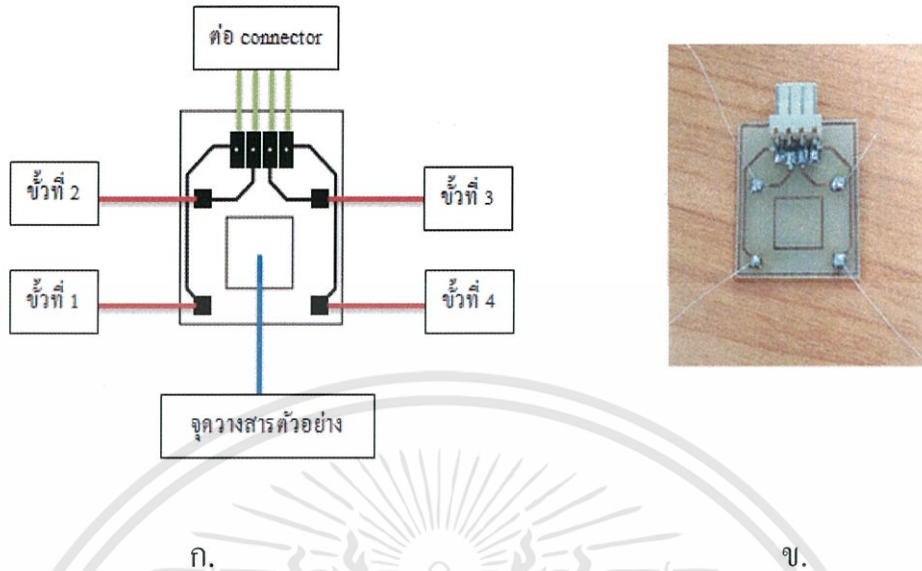
3.1.10 Sample holder



รูปที่ 3.15 Sample holder

Sample holder เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่าง Current Source, DMM และ Sample board แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของกันจ๊ับจะเป็นตัวปรับระดับเพื่อให้ Sample board อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ส่วนที่สองเป็นส่วนที่เชื่อมต่อสายไฟไปยังอุปกรณ์เสริมจากภายนอก คือ เชื่อมต่อไปยัง Current Source และ DMM และส่วนสุดท้ายคือส่วนที่ใช้สำหรับเสียบ Connector ของ Sample board แสดงดังรูปที่ 3.15

3.1.11 Sample board

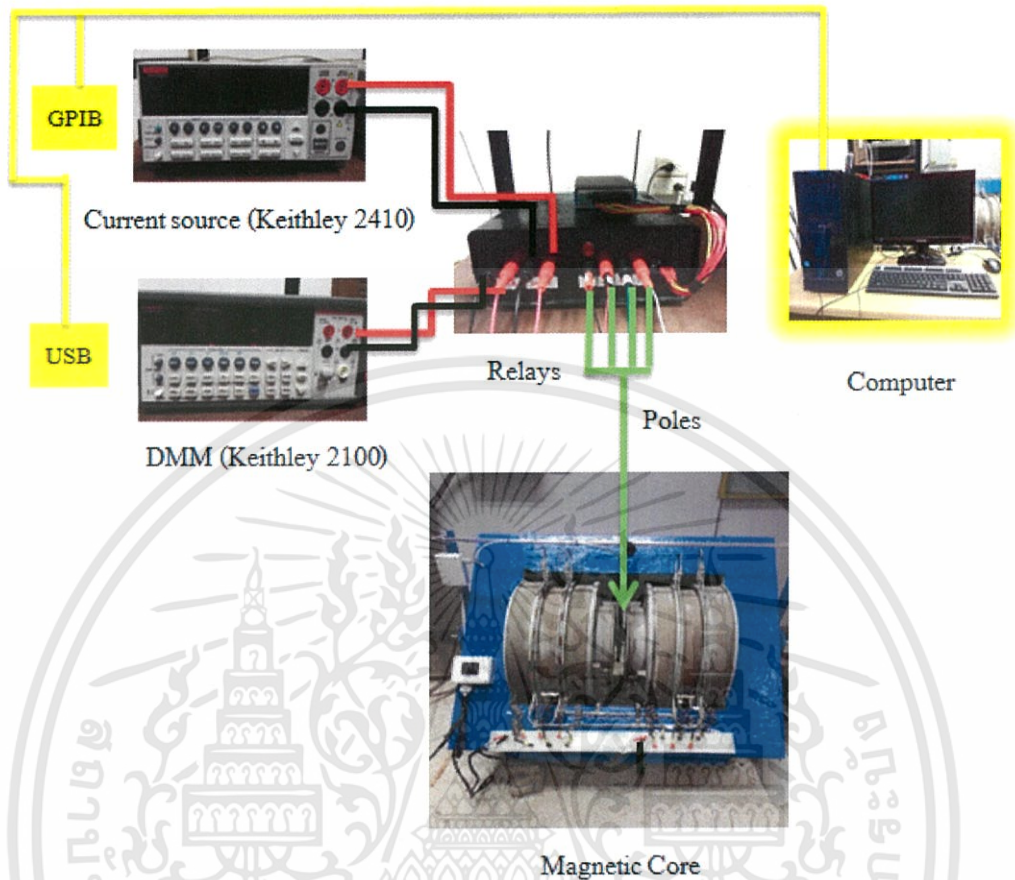


รูปที่ 3.16 ก. ลายวงจรและองค์ประกอบของ Sample board

ข. Sample board ที่เสร็จสมบูรณ์

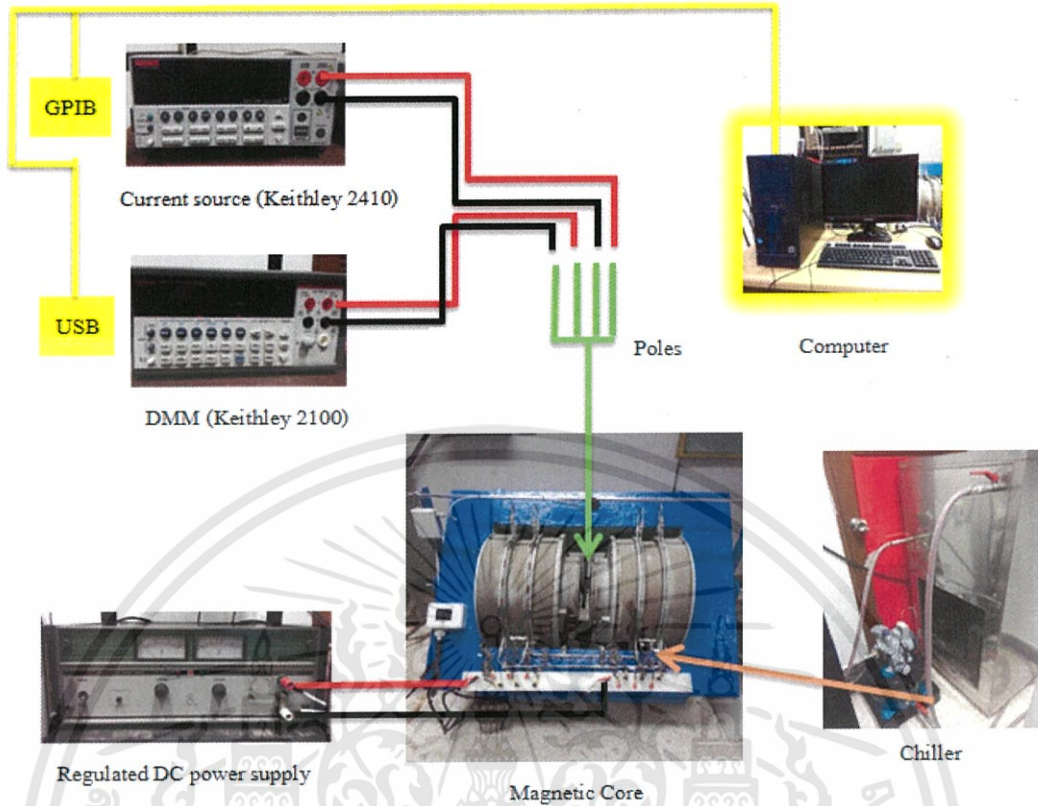
Sample board คือ อุปกรณ์สำหรับวางสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ซึ่งตัว Sample board นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกใช้สำหรับวางสารตัวอย่างคือบริเวณรอบสี่เหลี่ยมตรงกลาง สารตัวอย่างที่นำมาทดสอบควรมีขนาดไม่เกินรอบสี่เหลี่ยม ส่วนที่สองคือขั้ว ประกอบด้วย 4 ขั้ว อยู่บริเวณรอบกรอบสี่เหลี่ยมที่ใช้วางสารตัวอย่าง ซึ่งขั้วทั้ง 4 นั้นจะถูกติดเข้ากับขอบของสารตัวอย่าง และส่วนที่สาม คือ Connector จะอยู่ด้านบนของ Sample board แสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งขั้วที่ติดกับสารตัวอย่างจะเชื่อมกับ Connector และต่อเข้ากับก้านจับเพื่อเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์อื่น โดยที่ 2 ขั้วจะเชื่อมต่อไปยัง Current Source (Keithley 2410) ซึ่งเครื่องนี้จะทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง และอีก 2 ขั้วที่เหลือจะเชื่อมต่อไปยัง DMM (Keithley 2100) เครื่องนี้จะทำหน้าที่ในการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่สารตัวอย่าง ซึ่งขั้วที่ใช้ในการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก และวัดความต่างศักย์ตกคร่อมเป็นไปตามวิธีของแวนเดอร์เพาฟ์และการวัดฮอลล์ ค่าที่ได้ก็นำไปใช้ให้ในการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่อไป

3.2 การเตรียมอุปกรณ์



รูปที่ 3.17 ระบบการวัดแวนเคอร์เพาว์

จากรูปที่ 3.17 ระบบการวัดแวนเคอร์เพาว์ ประกอบด้วย Current Source (Keithley 2410) ใช้ในการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง DMM (Keithley 2100) ใช้วัดความต่างศักย์ตกคร่อม Relays ทำหน้าที่ในการสลับ Configure และเชื่อมต่อ Current Source และ DMM การป้อนกระแสไฟฟ้าและวัดความต่างศักย์จะถูกกระทำผ่าน Sample holder ไปยัง Sample board ที่ใช้สำหรับติดสารตัวอย่างที่ต้องการวัด หลังจากทำการวัดเสร็จแล้วระบบจะประมวลผลการวัดผ่านทางคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลต่อไป



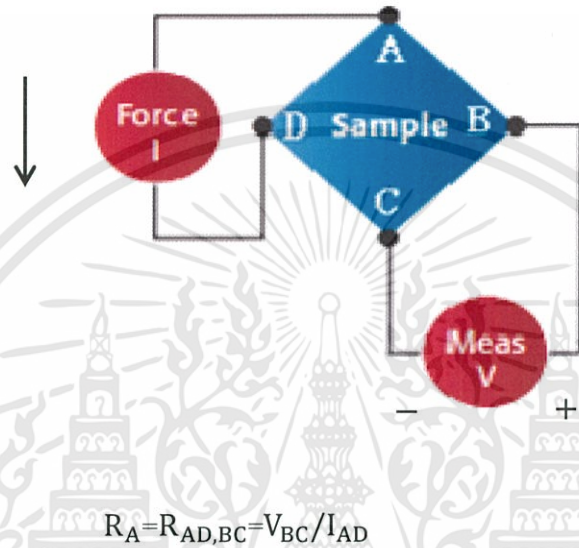
รูปที่ 3.18 ระบบการวัดฮอลล์

สำหรับระบบการวัดฮอลล์ แสดงดังรูปที่ 3.18 มีการจัดเตรียมอุปกรณ์เช่นเดียวกับแวนเดอร์เพาท์แต่ Current Source(Keithley 2410) และ DMM (Keithley 2100) จะต่อเข้ากับ Sample holder โดยตรงไม่ผ่านรีเลย์ และไม่ใช้รีเลย์ในการสลับ Configure มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจาก Regulated DC Power Supply เพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะต่อขั้วบวกของ Regulated DC Power Supply เข้ากับขั้วบวกของ Magnetic Core และต่อขั้วลบของ Regulated DC Power Supply เข้ากับขั้วลบของ Magnetic Core ในการทดลองนี้ ได้กำหนดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตลอดการทดลองเท่ากับ 0.53 เทสลา เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้ Chiller มาหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนให้กับขดลวด และค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง อาทิ เช่น ความหนาแน่นของพาหะสภาพคล่องตัวของพาหะ และชนิดของพาหะ จะแสดงผลออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW ผ่านทาง USB และ GPIB

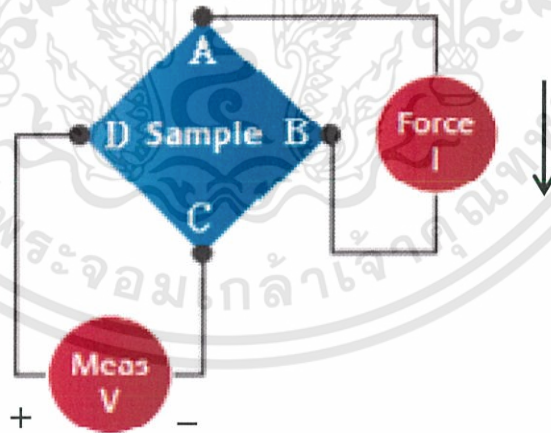
3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การวัด Van der Pauw

การวัดด้วยวิธีของ Van der Pauw นั้นจะมี Contact ที่ใช้ในการวัด 4 จุด หรือ 4 ขั้ว โดย 2 ขั้วใช้ในการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก และอีก 2 ขั้วที่เหลือใช้วัดความต่างศักย์ต่อคร่อมการวัดประกอบด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า R_A และ R_B แสดงดังรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 ตามลำดับ



รูปที่ 3.19 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ R_A



$$R_B = R_{AB,DC} = V_{DC} / I_{AB}$$

รูปที่ 3.20 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ R_B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_{AD, BC}$ คือ การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้ว A และไหลออกทางขั้ว D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ C

$R_{AB, DC}$ คือ การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้ว A และไหลออกทางขั้ว B แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว D และ C

1. ทำการวัด R_A จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปที่ 3.19

2. จ่ายกระแสไฟฟ้า I ค่าต่างๆเข้าที่ขั้ว A และ D ด้วยเครื่อง Keithley 2410 เครื่องนี้สามารถจ่ายกระแสได้ในช่วง $\pm 1 \mu A$ ถึง $\pm 1 A$ ในการจ่ายกระแสนั้นจะปรับที่ด้านหน้าของเครื่อง แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ C ด้วยเครื่อง Digital Multimeter (DMM) มีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $\pm 100 mV$ ถึง $\pm 1 kV$ ก่อนการทดลองต้องคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดก่อน สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.1)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

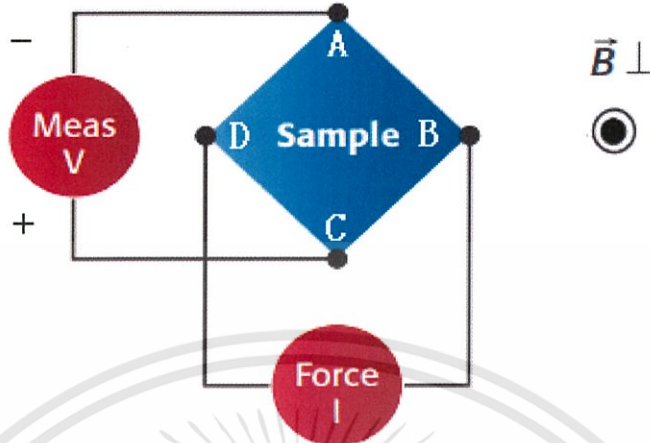
R คือ ความต้านทานของวงจร (Ω)

3. วัด R_B ดังรูปที่ 3.20 ทำการทดลองตามข้อ 1 – 2

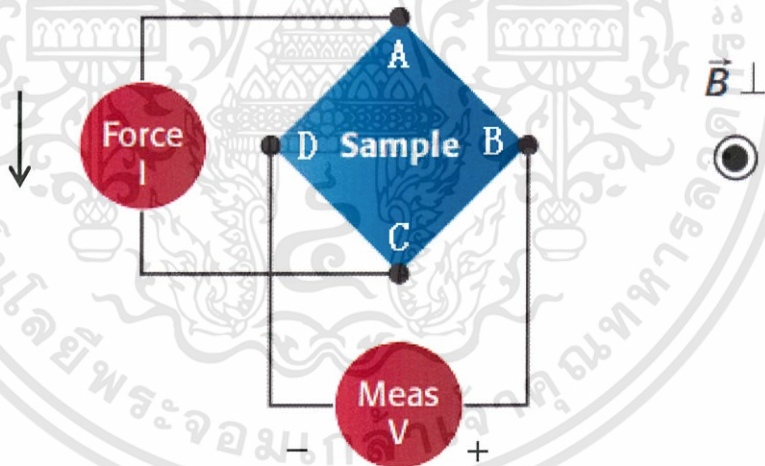
4. คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จากสมการที่ 2.11

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพอร์คำนวณได้จากสมการที่ 2.12 หรือหาได้จากกราฟดังรูปที่ 2.14

3.3.2 การวัด Hall



รูปที่ 3.21 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_{BD,CA}$



รูปที่ 3.22 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_{AC,BD}$

$R_{BD,CA}$ คือ การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้ว B และไหลออกทางขั้ว D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว C และ A

$R_{AC,BD}$ คือ การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้ว A และไหลออกทางขั้ว C แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปที่ 3.21

2. นำสารตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็กความเข้ม B

3. จ่ายกระแสไฟฟ้า I ค่าต่างๆด้วยเครื่องKeithley 2410เครื่องนี้สามารถจ่ายกระแสได้ในช่วง $\pm 1\mu\text{A}$ ถึง $\pm 1\text{ A}$ ในการจ่ายกระแสนั้นจะปรับที่ด้านหน้าของเครื่อง แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว C และ A (กำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นบวก (B+)) ด้วยเครื่อง Digital Multimeter (DMM) มีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $\pm 100\text{ mV}$ ถึง $\pm 1\text{ kV}$ ก่อนการทดลองต้องคำนวณ หาค่ากระแสสูงสุดก่อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

4. กลับขั้วแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า แล้วทำการทดลองตามข้อ 3.(กำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นลบ (B-))

5. นำค่าความต่างศักย์ตกคร่อมเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวกมาลบกับความต่างศักย์ตกคร่อมเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นลบ คือ V_H (เมื่อ B+) - V_H (เมื่อ B-) = V_H (ของ $R_{BD,CA}$)

6. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V_H โดยให้ V_H เป็นแกน y และ I เป็นแกน x ความชันของกราฟคือ $\frac{R_H B}{d}$ (เขียนกราฟทั้งที่สนามแม่เหล็กเป็นบวกและลบ)

เมื่อ B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 0.53 T

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เมตร

7. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์(R_H) จากสูตร

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I}\right) \left(\frac{d}{B}\right) \quad (3.3)$$

หรือ

$$R_H = \frac{\text{slope} \times d}{B} \quad (3.4)$$

เมื่อ R_H คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูอมบ์ (cm^3/C)

V_H คือ ความต่างศักย์ตกคร่อมฮอลล์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา (T)

I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เมตร (m)

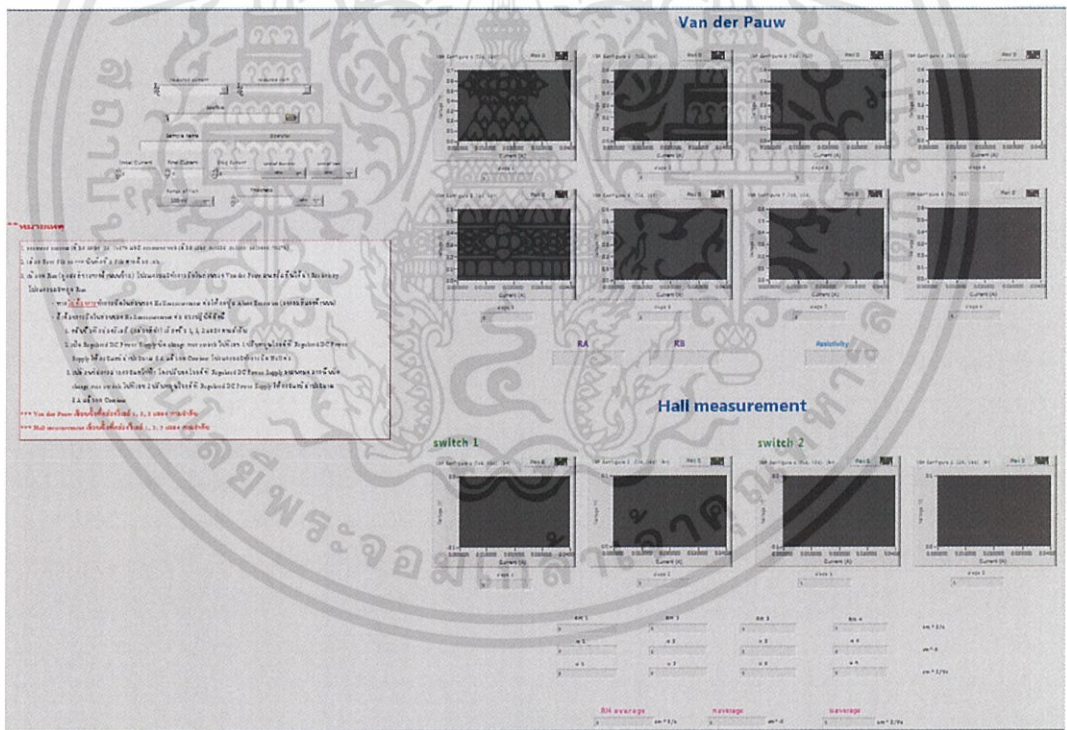
8. ความหนาแน่นของพาหะ (n) คำนวณได้จาก

$$n = \frac{1}{R_H q} \quad (3.5)$$

9. สภาพคล่องตัวของพาหะ (μ) คำนวณได้จากสมการที่ (2.19)
10. จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปที่ 3.22 ทำการทดลองตามข้อ 2 -9 วัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ D เมื่อนำค่า V_H (เมื่อ B+) - V_H (เมื่อ B-) จะได้ V_H (ของ $R_{AC, BD}$)
11. เมื่อนำค่า V_H (ของ $R_{BD, CA}$) + V_H (ของ $R_{AC, BD}$) จะทำให้ทราบชนิดของสารตัวอย่างว่าเป็นชนิด n หรือ p ถ้าผลบวกมีค่าส่วนมากเป็นลบแสดงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n แต่ถ้าผลบวกมีค่าส่วนมากเป็นบวกแสดงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p

3.4 โปรแกรม LabVIEW


การควบคุมระบบการวัดฮอลล์ ถูกออกแบบและเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW นำมาใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อความสะดวกในการทำวัดและลดปัญหาความผิดพลาดจากการคำนวณ ซึ่งจะประมวลผลการวัดและคำนวณคุณสมบัติต่างๆของสารตัวอย่างผ่านทางจอคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.23 โปรแกรม LabVIEW สำหรับการวัด Van der Pauw และ Hall measurement


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โปรแกรม LabVIEW

1. เปิดเครื่อง Current Source และ DMM เชื่อมต่อ Current Source เข้ากับคอมพิวเตอร์โดยใช้ GPIB และเชื่อมต่อ DMM เข้ากับคอมพิวเตอร์โดยใช้ USB จากนั้นเลือกการเชื่อมต่อข้อมูลที่ resource current เลือก GPIB0::24::INSTR และ resource volt เลือก USB0::0x05E6::0x2100::1420944::INSTR)
2. เลือก Save file as บันทึกข้อมูลจากการวัด หากต้องการบันทึกข้อมูลลงใน Microsoft excel ให้บันทึกชื่อ file ตามด้วย .xls
3. บันทึกชื่อสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบใน (Sample name) และบันทึกผู้ทำการทดสอบใน (Operator)
4. กำหนดกระแสไฟฟ้าเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าสุดท้าย และการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า ลงใน Initial Current, Final Current และ Step Current ตามลำดับ
5. เลือกหน่วยของกระแสไฟฟ้า (Unit of Current) และหน่วยของความต่างศักย์ (Unit of Volt) (หน่วยที่เลือกนี้จะแสดงให้เห็นในค่าที่บันทึกไว้ใน file ตามข้อ 2. จากนั้นเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับวัดค่าความต่างศักย์ (Range of Volt)
6. กำหนดความหนาของสารตัวอย่างที่จะทำการวัด (Thickness)
7. เสียบขั้วที่กล่องรีเลย์ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.24 แล้วกด  (Run) โปรแกรมจะทำการวัดในส่วนของ Van der Pauw จนเสร็จสิ้นจะได้ค่า Resistivity โปรแกรมจะหยุด Run



รูปที่ 3.24 การเสียบขั้วที่กล่องรีเลย์ 1, 2, 3 และ 4 สำหรับวัด Van der Pauw

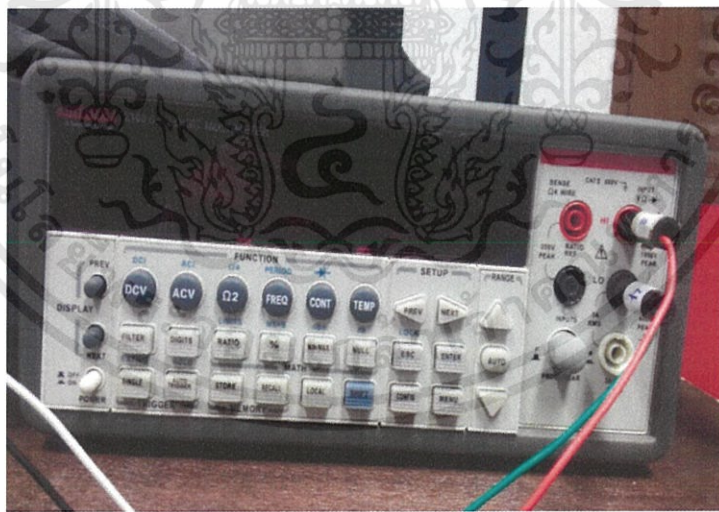
- หาก **ไม่ต้องการ** ทำการวัดในส่วนของ Hall measurement ต่อให้กด  (Abort Execution)

- ถ้าต้องการวัดในส่วนของ Hall measurement ต่อ ควรปฏิบัติดังนี้

1. เสียบขั้วที่เครื่อง Current Source และ DMM ตาม Configure ที่ 1 คือ I_{AC} และ V_{BD} ดังรูปที่ 3.25 และรูปที่ 3.26 ตามลำดับ




รูปที่ 3.25 เสียบขั้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว A ออกขั้ว C



รูปที่ 3.26 วัดความต่างศักย์ขั้ว B และขั้ว D

2. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เริ่มจากเปิด Regulated DC Power Supply จากนั้นหมุน Change over switch ไปที่เลข 1 ดังรูปที่ 3.27 แล้วปรับหมุน โวลต์ที่ Regulated DC Power Supply ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้ามีค่าประมาณ 8 A กด  (Continue) เพื่อทำการวัด Hall โปรแกรมจะทำการวัดแล้ว จะหยุด Run



รูปที่ 3.27 หมุน Change over switch ไปที่เลข 1

3. สลับขั้วที่ current source และ DMM ตาม Configure ที่ 2 คือ I_{BD} และ V_{CA} ตามรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29 ตามลำดับ กด  (Continue) เพื่อทำการวัด Hall ต่อเมื่อวัด Configure ที่ 2 เสร็จ แล้วโปรแกรมจะหยุด Run




รูปที่ 3.28 เสียบขั้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว B ออกขั้ว D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 วัดความต่างศักย์ขั้ว C และขั้ว A

4. เปลี่ยนทิศการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยปรับลดโวลต์ที่ Regulated DC Power Supply ลงจนหมด จากนั้นหมุน Change over switch ไปที่เลข 2 ดังรูปที่ 3.30 แล้วปรับโวลต์ที่ Regulated DC Power Supply ให้กระแสไฟฟ้ามี่ค่าประมาณ 8A ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1. แล้วกด  เพื่อทำการวัด Hall ต่อ

5. ทำการทดลองตามข้อ 3. เมื่อโปรแกรม Run เสร็จ จะแสดงค่า μ average, μ average และ ชนิดของพาหะ



รูปที่ 3.30 หมุน change over switch ไปที่เลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สามารถดูชนิดของพหุหะ (n หรือ p) ได้จากเครื่องหมายที่ชนิดของพหุหะ
- หากเครื่องหมาย เป็นบวก แสดงว่าชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชนิด p
 - หากเครื่องหมาย เป็นลบ แสดงว่าชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชนิด n



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

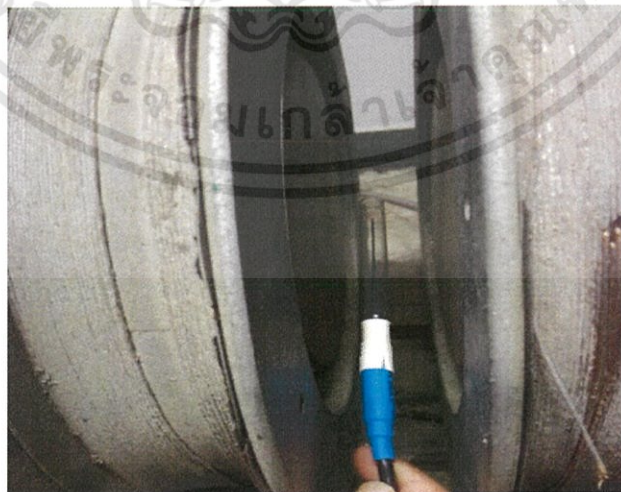
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้ประกอบด้วยเนื้อหา 6 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการสอบเทียบสนามแม่เหล็ก โดยใช้เกาส์มิเตอร์ (5180 Gauss/Tesla Meter) ส่วนที่สองสอบเทียบระบบวัด Van der Pauw โดยนำตัวต้านทานขนาด 1 MΩ จำนวน 4 ตัว ต่อเป็นวงจรบริดจ์ ป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานแล้ววัดความต่างศักย์ ส่วนที่สามเป็นส่วนของการออกแบบและเขียนโปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมระบบการวัด Van der Pauw และ Hall measurement ส่วนที่สี่แสดงแผนภาพขั้นตอนในการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูลของโปรแกรม LabVIEW ส่วนที่ห้าเป็นการสอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และในที่สุดท้ายนั้น ได้นำสารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ มาทดสอบด้วยการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

4.1 การสอบเทียบสนามแม่เหล็ก

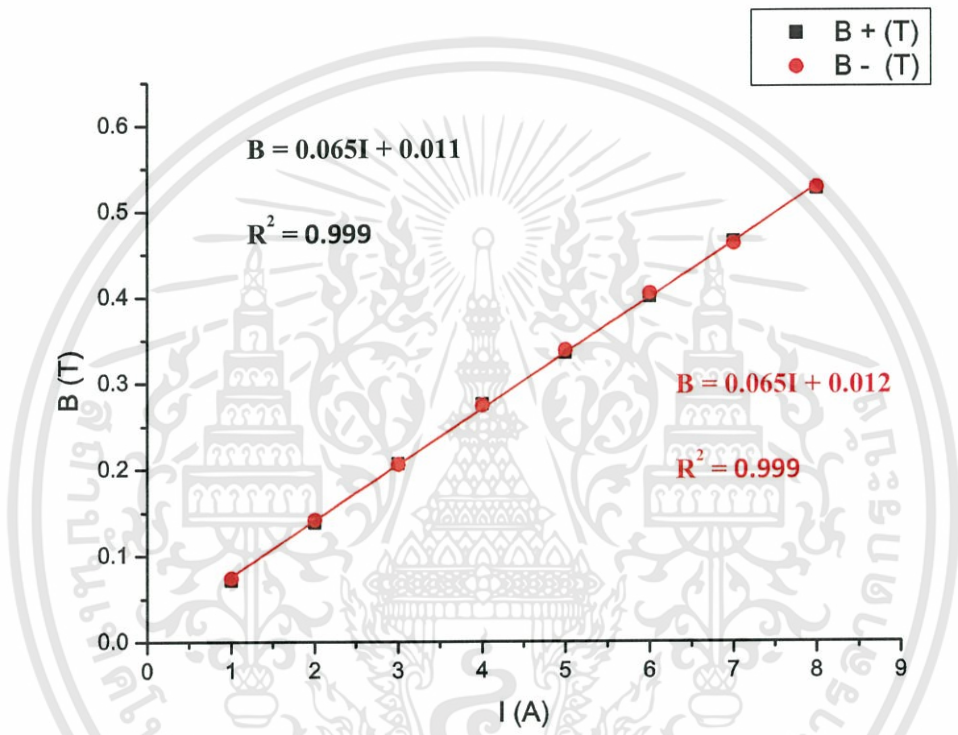
สนามแม่เหล็กเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด ซึ่งมี 6 ขด โดยแบ่งขดลวดออกเป็น 2 ฟังๆ ละ 3 ขด ซึ่งแต่ละขดต่อกันแบบขนาน แล้วจึงนำขดลวดทั้ง 2 ฟังมาต่ออนุกรมกัน ขดลวดแต่ละขดนั้นมีความต้านทานขดละ 12.00 โอห์ม ขดลวดแต่ละฟังที่ต่อขนานกันมีความต้านทานฟังละ 4.00 โอห์ม ขดลวดทั้ง 6 ขด มีความต้านทานรวม 8.00 โอห์ม การสอบเทียบสนามแม่เหล็กนั้นสามารถทำได้โดยใช้เกาส์มิเตอร์ (5180 Gauss/Tesla Meter) ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งการวัดนั้นต้องให้เกาส์มิเตอร์อยู่ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การใช้เกาส์มิเตอร์ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดเริ่มต้นจากการวางเกาส์มิเตอร์ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก เพื่อให้สนามแม่เหล็ก มีความเข้มสูงสุด จากนั้นป้อนกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆด้วย Regulated DC Power Supply ซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0 ถึง 15 A มีความละเอียด 1 A โดยจ่ายให้กับขดลวดแล้วอ่านค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจากเกาส์มิเตอร์ ทำการวัด 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยโดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดครั้งนี้เป็นบวกจากนั้นกลับขั้วการจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้วทำการวัดสนามแม่เหล็ก กำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นลบ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.2

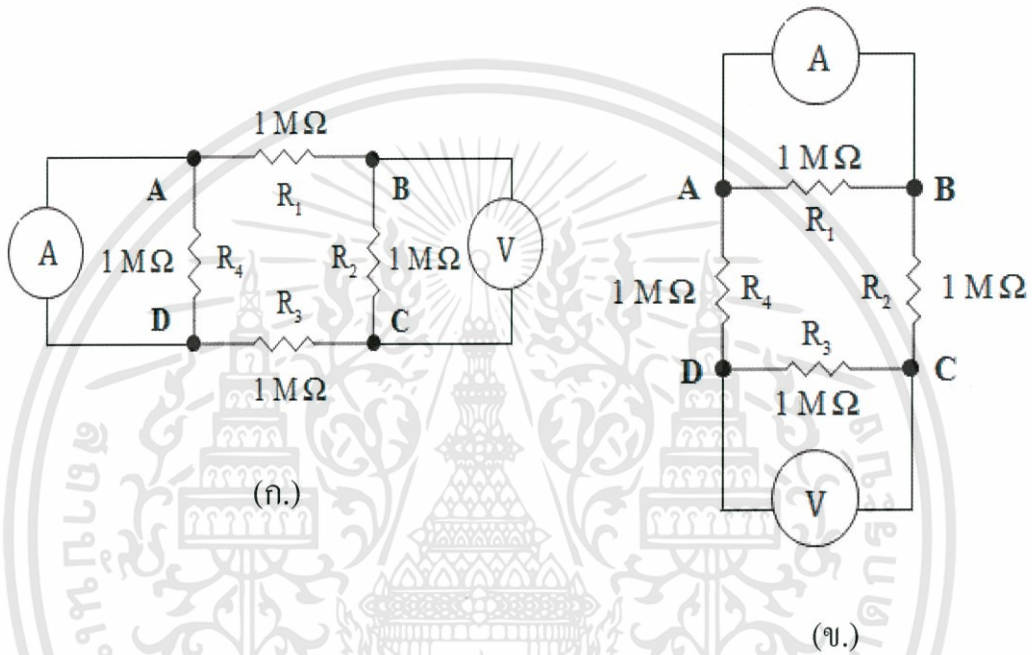


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (T) กับกระแสไฟฟ้า (A)

จากการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ 8.00 A สนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงสุด 0.526T เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวก และ 0.528T เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นลบ นำค่าที่ได้จากการวัดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็ก (T) กับกระแสไฟฟ้า (A) พบว่าค่าที่ได้จากการวัดเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวกและลบมีค่าใกล้เคียงกันมากกราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้น

4.2 การสอบเทียบระบบวัด Van der Pauw

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของ Van der Pauw นั้นจะมีขั้วที่ใช้ในการวัด 4 ขั้ว การสอบเทียบกระทำโดยการนำตัวต้านทานขนาด $1.00\text{ M}\Omega$ จำนวน 4 ตัว ต่อเป็นวงจรบริดจ์ แล้วป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานซึ่งการวัดนั้นสามารถทำได้โดยการใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก และอีก 2 ขั้วที่เหลือจะใช้วัดความต่างศักย์ตกร่วมการวัดประกอบด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า R_A และ R_B แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การวัดตัวต้านทานขนาด $1\text{ M}\Omega$ ที่ต่อเป็นวงจรบริดจ์ด้วยวิธีของ Van der Pauw

(ก.) การวัด R_A

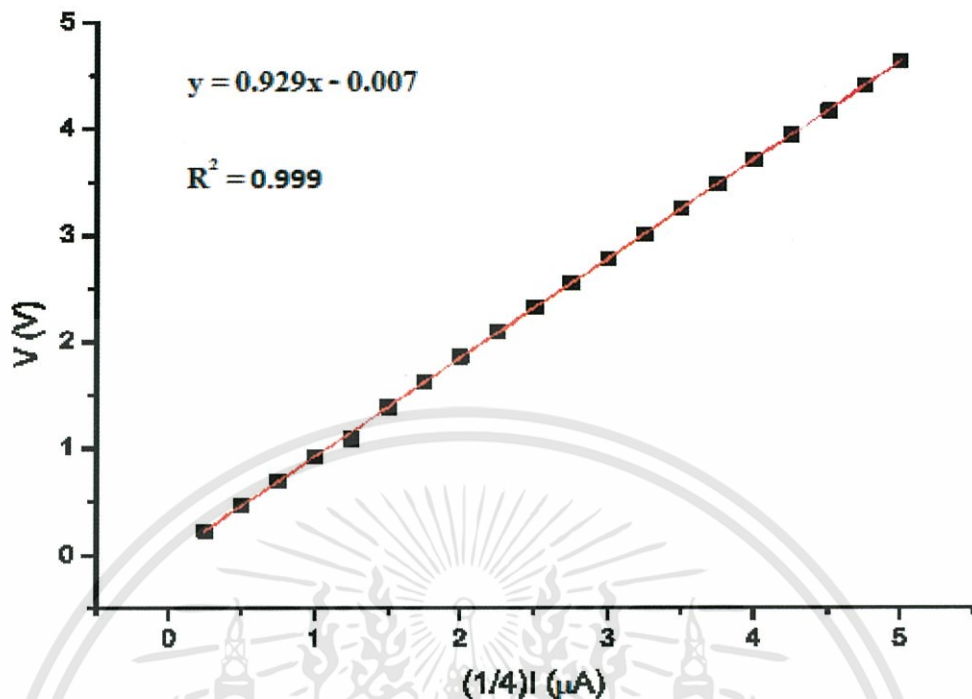
(ข.)

การวัด R_B

4.2.1 ขั้นตอนการวัด R_A และ R_B ด้วยวิธีของ Van der Pauw

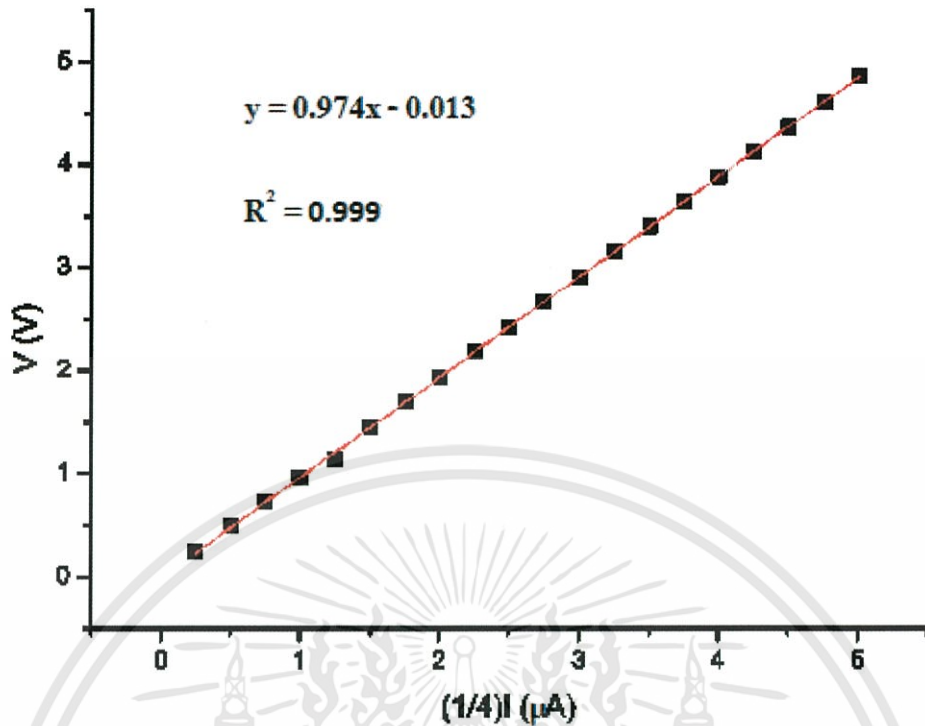
การวัด R_A และ R_B เริ่มด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานที่ต่อเป็นวงจรบริดจ์ ก่อนทำการป้อนกระแสไฟฟ้านั้นต้องคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับวงจรได้ก่อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

จากนั้นวัด R_A โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A และไหลออกที่ขั้ว D แล้ววัดความต่างศักย์ตกร่วมที่ขั้ว B และ C ส่วนการวัด R_B จะป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A และไหลออกที่ขั้ว B แล้ววัดความต่างศักย์ตกร่วมที่ขั้ว D และ C



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ตกคร่อม(V) กับ $1/4$ ของกระแสไฟฟ้า (μA) จากการวัด R_A

วัด R_A โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A และไหลออกที่ขั้ว D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ C เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A กระแสไฟฟ้าจะแยกไหลไปใน 2 ทิศทาง คือ ไหลผ่าน R_4 เพียงตัวเดียว ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_4 คิดเป็น $\frac{3}{4}$ ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป และกระแสไฟฟ้าที่แยกไหลอีกทางหนึ่งจะไหลผ่านตัวต้านทาน 3 ตัว คือ R_1 , R_2 และ R_3 เมื่อคำนวณจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานทั้ง 3 ตัว คิดเป็น $\frac{1}{4}$ ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้ามีค่ามากจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้น้อย ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 จากการทดลองพบว่า เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดคือ $5.00 \mu\text{A}$ ความต่างศักย์ตกคร่อมที่วัดได้มีค่า 4.64V เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{4}I (\mu\text{A})$ และ $V_H (V)$ การนำค่า $\frac{1}{4}I$ มาเขียนกราฟนั้นเนื่องจาก ขั้วที่วัดความต่างศักย์ตกคร่อมนั้น คือ ขั้ว 2 และ 3 ซึ่งเป็นขั้วที่วัดคร่อมตัวต้านทาน R_2 และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพียง $\frac{1}{4}$ ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปได้ค่า Slope ซึ่งก็คือค่า R_A เท่ากับ $0.93 \text{ M}\Omega$



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ตกคร่อม (V) กับ $1/4$ ของกระแสไฟฟ้า (μA) จากการวัด R_B

การวัด R_B กระทำเช่นเดียวกับการวัด R_A โดยเริ่มจากการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A และไหลออกที่ขั้ว B แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว D และขั้ว C เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A กระแสไฟฟ้าจะแยกไหลไปใน 2 ทิศทาง คือ ไหลผ่าน R_1 เพียงตัวเดียว ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_1 คิดเป็น $\frac{3}{4}$ ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป และกระแสไฟฟ้าที่แยกไหลอีกทางหนึ่งจะไหลผ่านตัวต้านทาน 3 ตัว คือ R_4 , R_3 และ R_2 เมื่อคำนวณจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานทั้ง 3 ตัว คิดเป็น $\frac{1}{4}$ ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้ามีค่ามากจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้น้อย จากการทดลองพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดคือ $5.00 \mu\text{A}$ ความต่างศักย์ตกคร่อมที่วัดได้มีค่า 4.87V เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{4}I(\mu\text{A})$ และ $V_H(\text{V})$ การนำค่า $\frac{1}{4}I$ มาเขียนกราฟนั้นเนื่องจาก ขั้วที่วัดความต่างศักย์ตกคร่อมนั้น คือ ขั้ว 4 และ 3 ซึ่งเป็นขั้วที่วัดคร่อมตัวต้านทาน R_3 และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพียง $\frac{1}{4}$ ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ได้ค่า Slope ซึ่งก็คือค่า R_B เท่ากับ $0.97\text{ M}\Omega$

ค่า R_A และ R_B มีค่า 0.93 M Ω และ 0.97 M Ω ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานจริง คือ 1.00M Ω สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการวัดได้จากสมการที่ (4.1)

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าจากการทดลอง} - \text{ค่าจากทฤษฎี}|}{\text{ค่าจากทฤษฎี}} \times 100\% \quad (4.1)$$

เมื่อ R_A ที่ได้จากการทดลองมีค่า 0.93 M Ω และ R_A จากทฤษฎีมีค่า 1.00M Ω สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่า R_A ได้ดังนี้

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อนของค่า } R_A = \frac{|0.93 - 1.00|}{1.00} \times 100\% = 7.00\%$$

เมื่อ R_B ที่ได้จากการทดลองมีค่า 0.97 M Ω และ R_B จากทฤษฎีมีค่า 1.00M Ω สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่า R_B ได้ดังนี้

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อนของค่า } R_B = \frac{|0.97 - 1.00|}{1.00} \times 100\% = 3.00\%$$

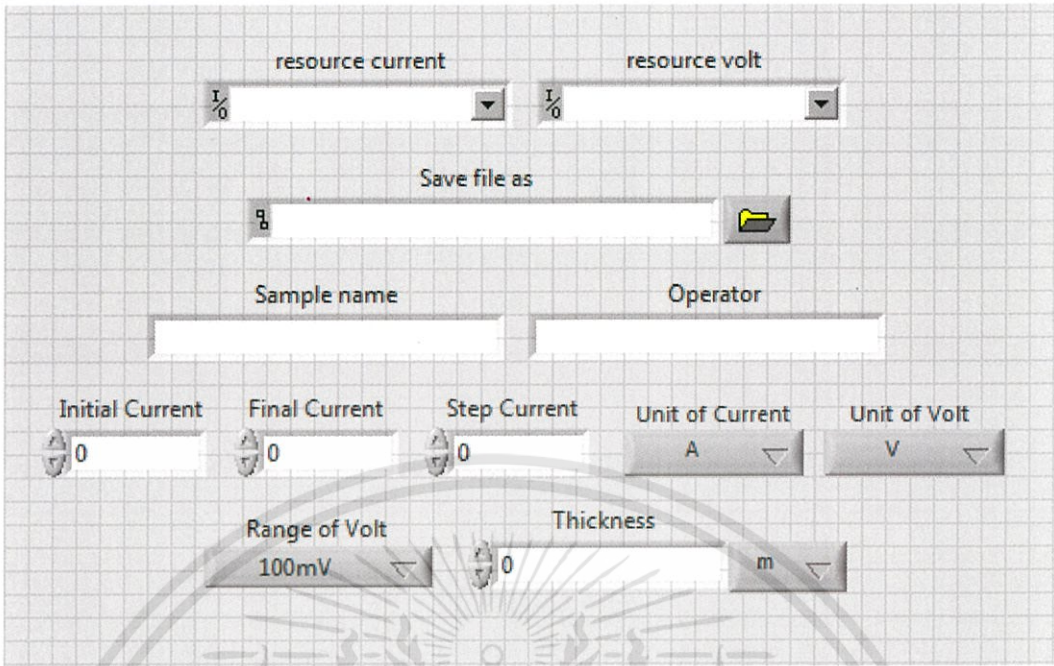
แสดงว่าเครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ค่อนข้างเที่ยงตรง การคำนวณค่าความต้านทานเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆสำหรับการทดลองนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R = \frac{V_H}{(1/4)I} = \frac{4V_H}{I} \quad (4.2)$$

4.3 โปรแกรม LabVIEW

ในส่วนของโปรแกรม LabVIEW ประกอบด้วยหน้าต่างหลัก คือ หน้า Front Panel และ หน้า Block Diagram

หน้า Front Panel เป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม(หรือที่นิยมเรียก User Interface)ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของพารามิเตอร์เป็นส่วนที่สำคัญสำหรับการวัดเป็นการป้อนข้อมูลที่จำเป็น อาทิ เช่น resource current เป็นการเชื่อมต่อระหว่าง Current source กับ Computer ผ่านทาง GPIB, resource volt เป็นการเชื่อมต่อระหว่าง DMM กับ Computer ผ่านทาง USB, Save file as เป็นส่วนสำหรับการบันทึกผลของข้อมูลที่ได้จากการวัด, Sample name, Operator, Initial Current, Final Current, Step Current, Unit of Current, Unit of Volt, Range of Volt และ Thickness แสดงดังรูปที่ 4.6



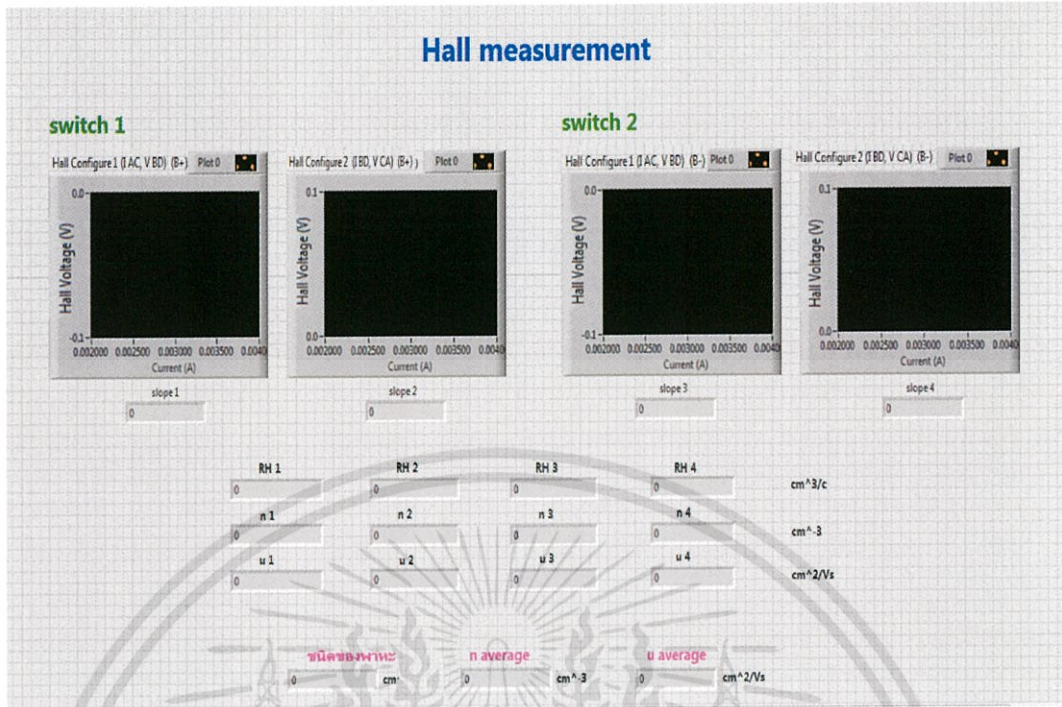
รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ในหน้า Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

ส่วนที่สองเป็นส่วนที่แสดงผลจากการวัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการวัด Van der Pauw และ Hall measurement แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ส่วนการวัด Van der Pauw

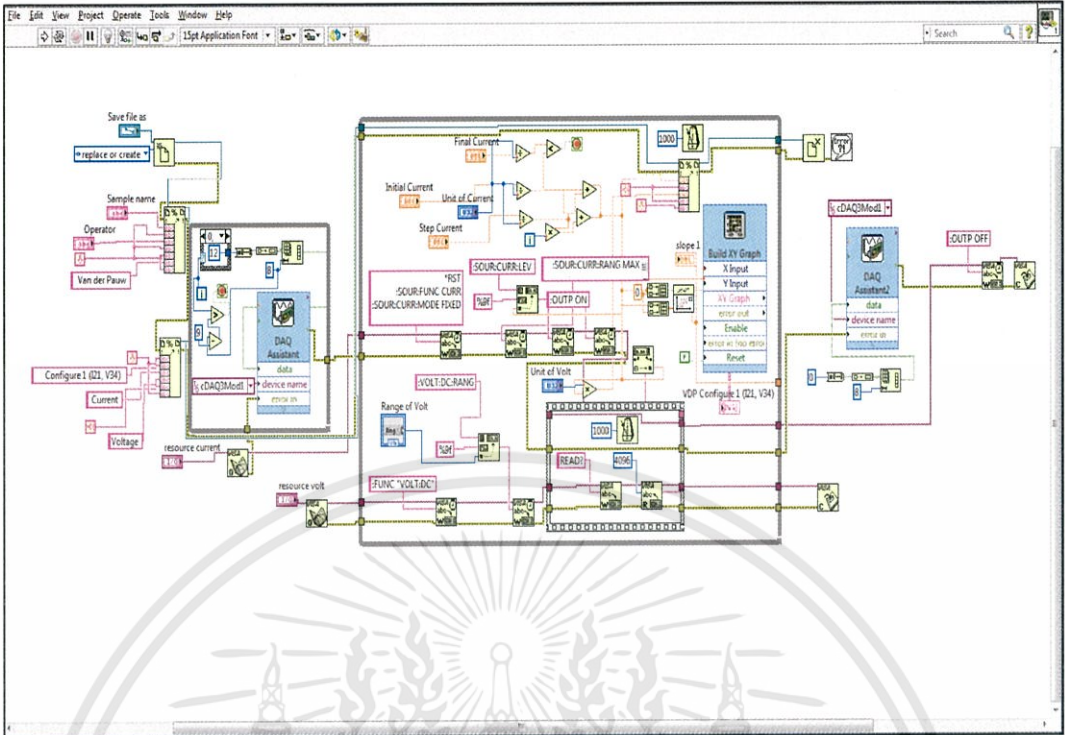
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



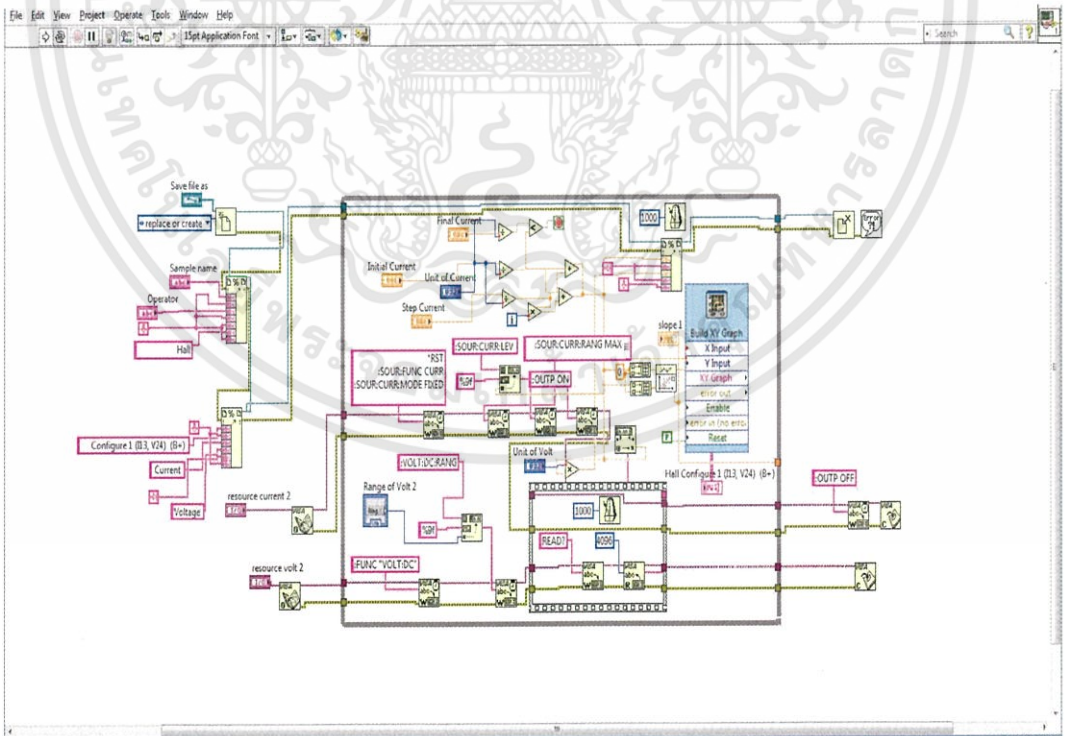
รูปที่ 4.8 ส่วนการวัด Hall measurement

จากรูปที่ 4.7 เป็นส่วนที่แสดงผลจากการวัด Van der Pauw ในรูปของกราฟ I-V เป็นกราฟที่ได้จากการป้อนกระแสไฟฟ้า แล้ววัดความต่างศักย์ ประกอบด้วย 8 กราฟ เนื่องจากมีการวัดทั้งหมด 8 configure ซึ่งกราฟแสดงข้อมูลในรูปของจุด จากนั้นแต่ละกราฟจะประมวลผลแสดงค่าความชันเพื่อนำไปคำนวณหาค่า R_A , R_B และ Resistivity รูปที่ 4.8 เป็นส่วนที่แสดงผลจากการวัด Hall measurement ในรูปของกราฟ I-V ประกอบด้วย 4 กราฟ แสดงผลในรูปของจุดเช่นเดียวกัน ผลจากการวัดจะแสดงค่าความชัน, R_H , n และ μ ของแต่ละกราฟ, ค่าเฉลี่ยของ n , μ และชนิดของพาหะ

หน้า Block Diagram ส่วนประกอบภายใน Block Diagram นี้ประกอบด้วยฟังก์ชันค่าคงที่โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนเหล่านี้ ซึ่งจะปรากฏในรูปของ Block แต่ละ Block นั้นจะถูกต่อสายเข้าด้วยกันเพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block เหล่านั้นทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการและแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ต่อไปหน้า Block Diagram ของระบบการวัด Van der Pauw และระบบการวัด Hall แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 หน้า Block Diagramของระบบการวัด Van der Pauw

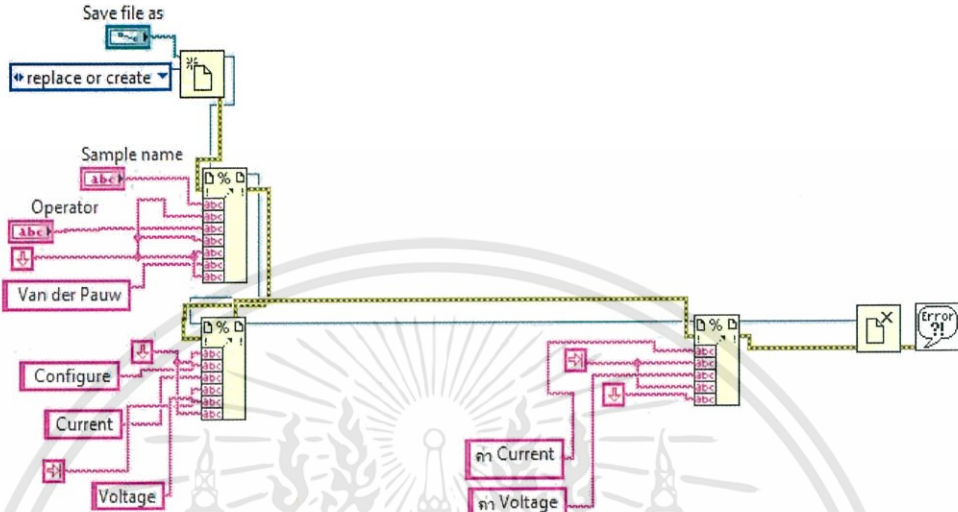


รูปที่ 4.10 หน้า Block Diagramของระบบการวัด Hall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

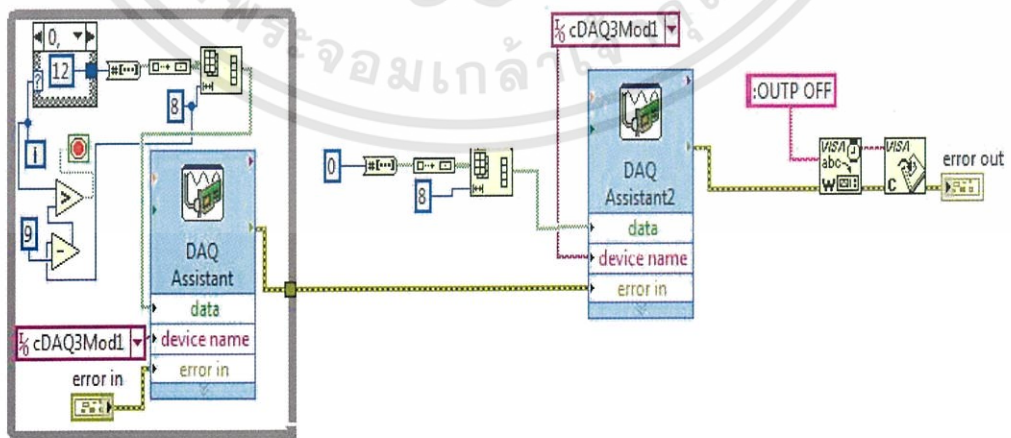
สำหรับตัว โปรแกรมในหน้า Block Diagram แบ่งออกเป็น 4 ส่วน หลักๆ คือ

1. ส่วนของการเก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.11สามารถเลือกที่บันทึกข้อมูลได้ เช่น หากต้องการบันทึกผลไว้ใน Microsoft excel ให้บันทึกชื่อ file ตามด้วย .xls เป็นต้น



รูปที่ 4.11 ส่วนของการจัดเก็บข้อมูลในหน้า Block Diagram

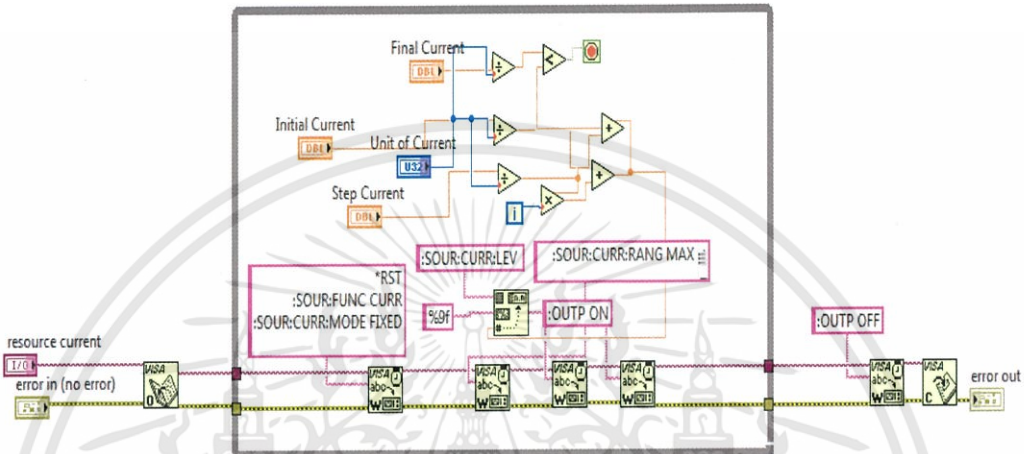
2. รีเลย์ ในส่วนนี้เป็นการใช้รีเลย์สลับขั้วในแต่ละ Configure การเขียนจะป้อนเลขฐานสิบ จากนั้นใช้ Number To Boolean Array เพื่อแปลงค่าให้เป็นเลขฐานสองส่งเข้ารีเลย์ รีเลย์จะทริกตามค่าที่ป้อนเข้าไปทำให้เกิดการสลับขั้ว จึงทำให้มี Configure ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงผลให้เห็นผ่าน National Instruments การเขียนรีเลย์เพื่อเปลี่ยน Configure แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12การเขียนรีเลย์ในหน้าBlock Diagram

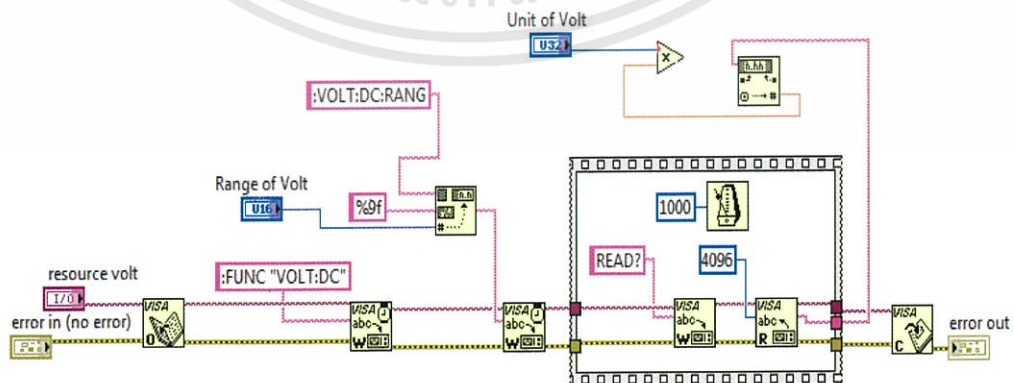
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คำสั่งเครื่อง Current source (Keithley 2410) การเขียนคำสั่งนั้นต้องศึกษาข้อมูลจาก Manual ของอุปกรณ์เนื่องจากแต่ละอุปกรณ์นั้นจะมีคำสั่งในการเชื่อมต่อข้อมูลที่แตกต่างกัน การเขียนเป็นลักษณะของการนำ Command ของอุปกรณ์มาเขียนป้อนผ่าน VISA Write สามารถเขียนคำสั่งเพื่อให้เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วงที่เราต้องการได้ โดยใช้ Format Value เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่าง VISA Write กับช่วงของกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การเขียนคำสั่งเครื่อง Current source (Keithley 2410)

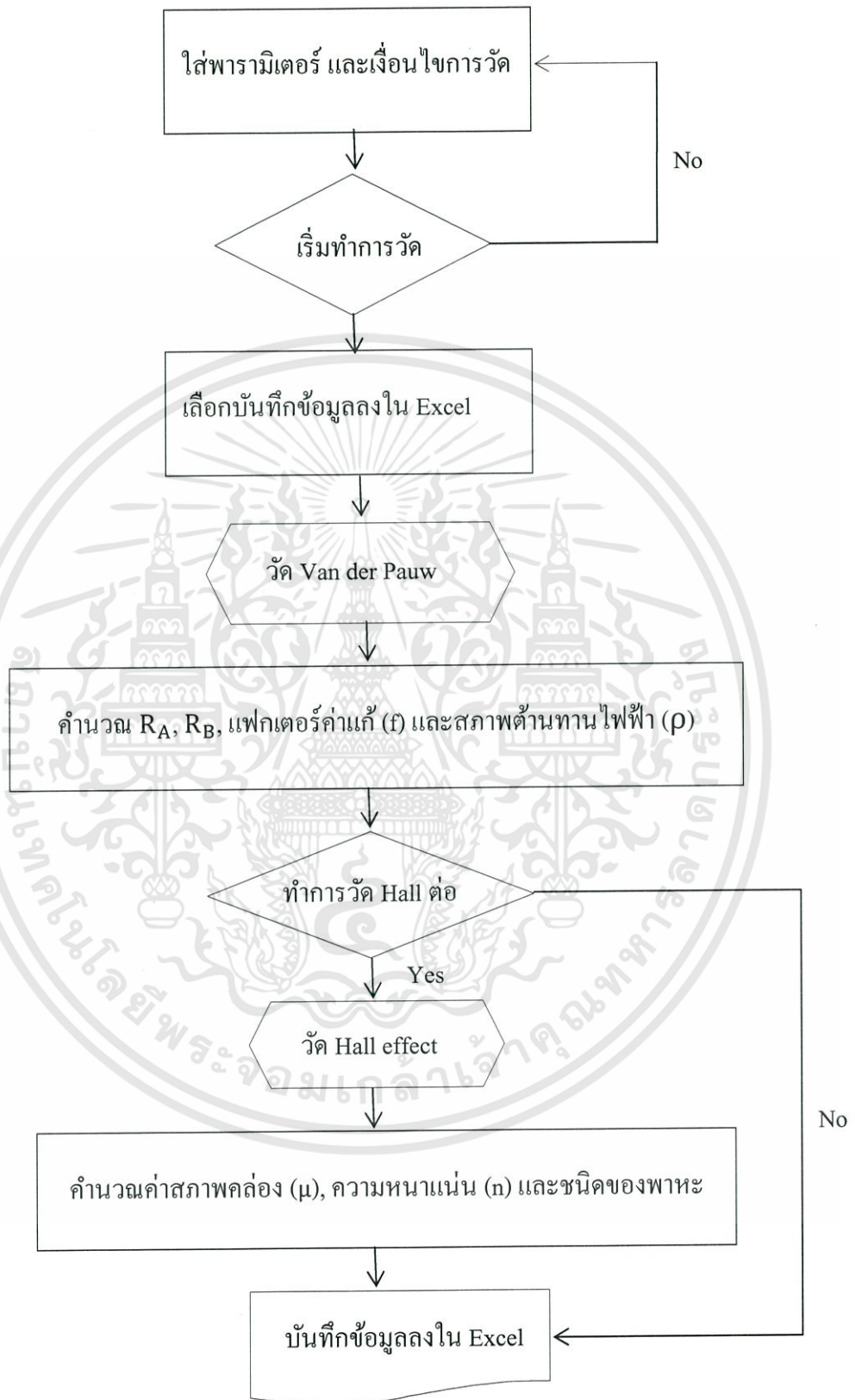
4. คำสั่งเครื่อง DMM (Keithley 2100) การเขียนคำสั่งนั้นต้องศึกษาข้อมูลจาก Manual ของอุปกรณ์เช่นเดียวกับการเขียนคำสั่งเครื่อง Current source สำหรับเครื่อง DMM นั้นต้องมีการหน่วงเวลาในการอ่านค่า โดยใช้ Flat Sequence Structure และ Wait Until Next ms Multiple เนื่องจากต้องรอให้เครื่อง Current source ทำงานครบตามคำสั่งที่เขียนไว้ก่อนจึงจะเริ่มให้เครื่อง DMM อ่านค่าได้ หากไม่มีการหน่วงเวลาค่าที่บันทึกได้จะไม่ใช่ค่าที่แท้จริง การเขียนคำสั่งเครื่อง DMM แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การเขียนคำสั่งเครื่อง DMM (Keithley 2100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

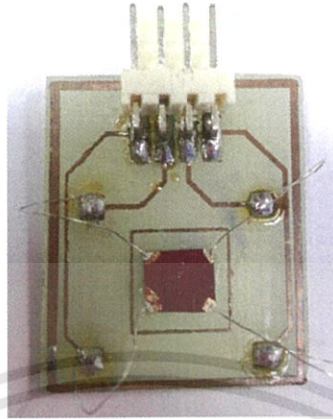
4.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล



รูปที่ 4.15 ขั้นตอนการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล

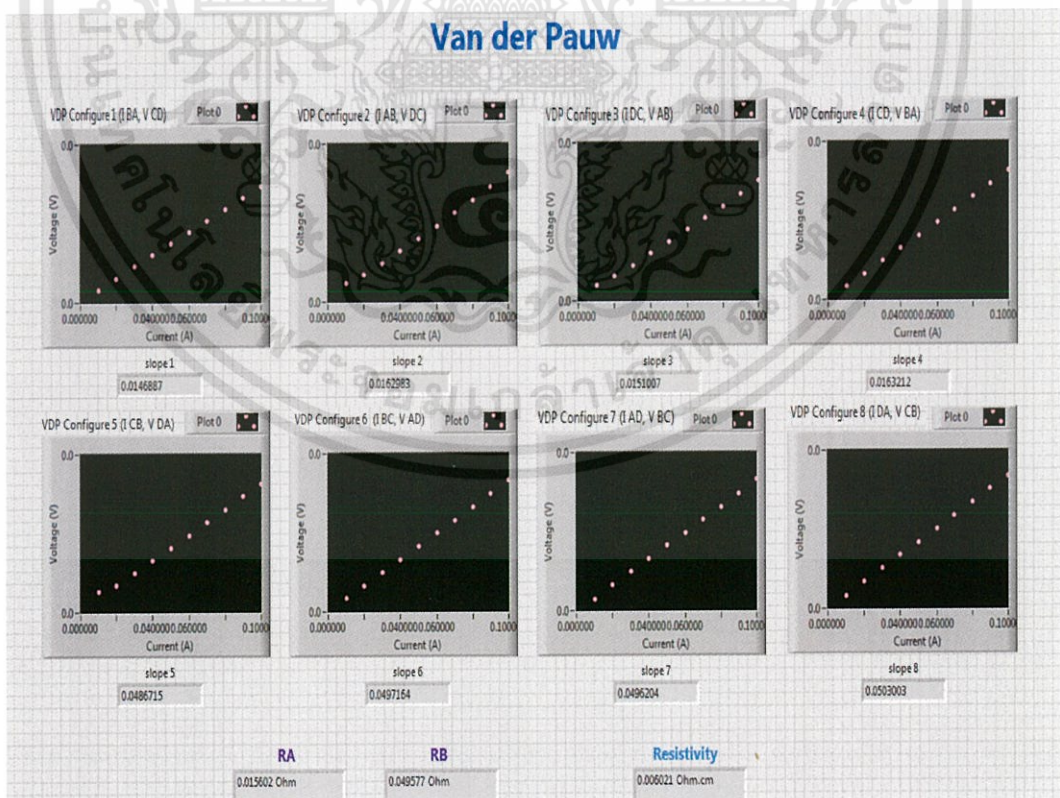
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐาน GaSb:Te และ GaSb:Si



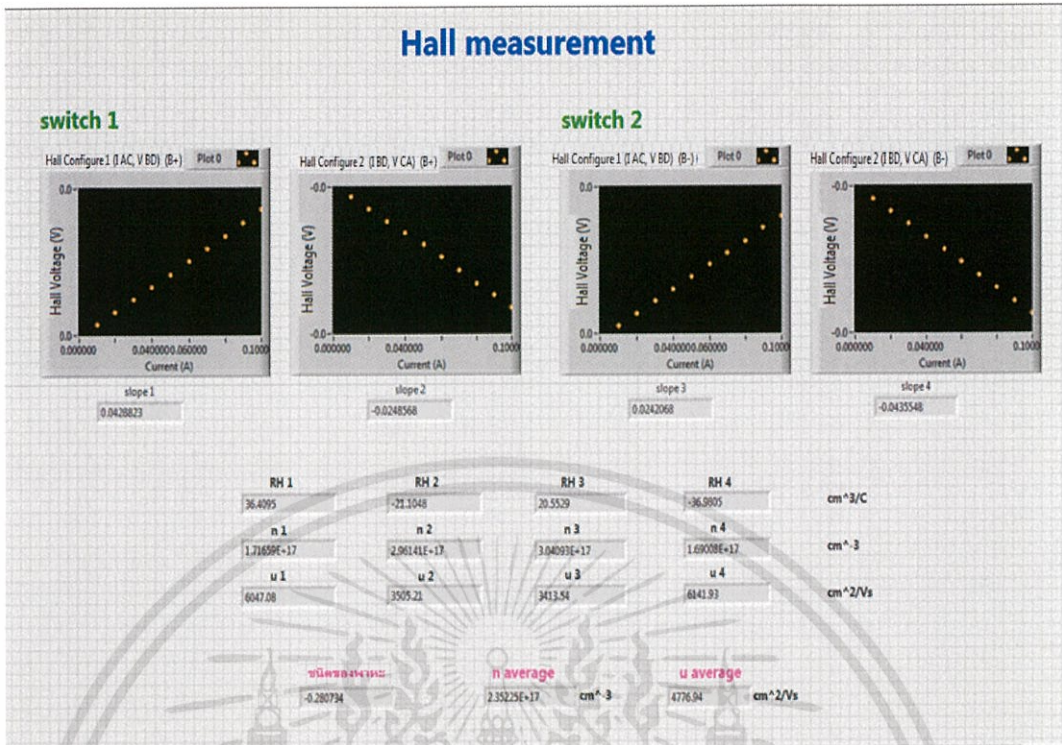
รูปที่ 4.16 สารตัวอย่าง GaSb:Te ที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact

GaSb:Te เป็นสารกึ่งตัวนำ GaSb ที่เจือ Te ซึ่งแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n นำมาวัดด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติที่ถูกออกแบบและเขียนคำสั่งด้วยโปรแกรม LabVIEW สำหรับวัด Van der Pauw และ Hall measurement จากการวัดทั้ง 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 K ได้ผลดังรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.22

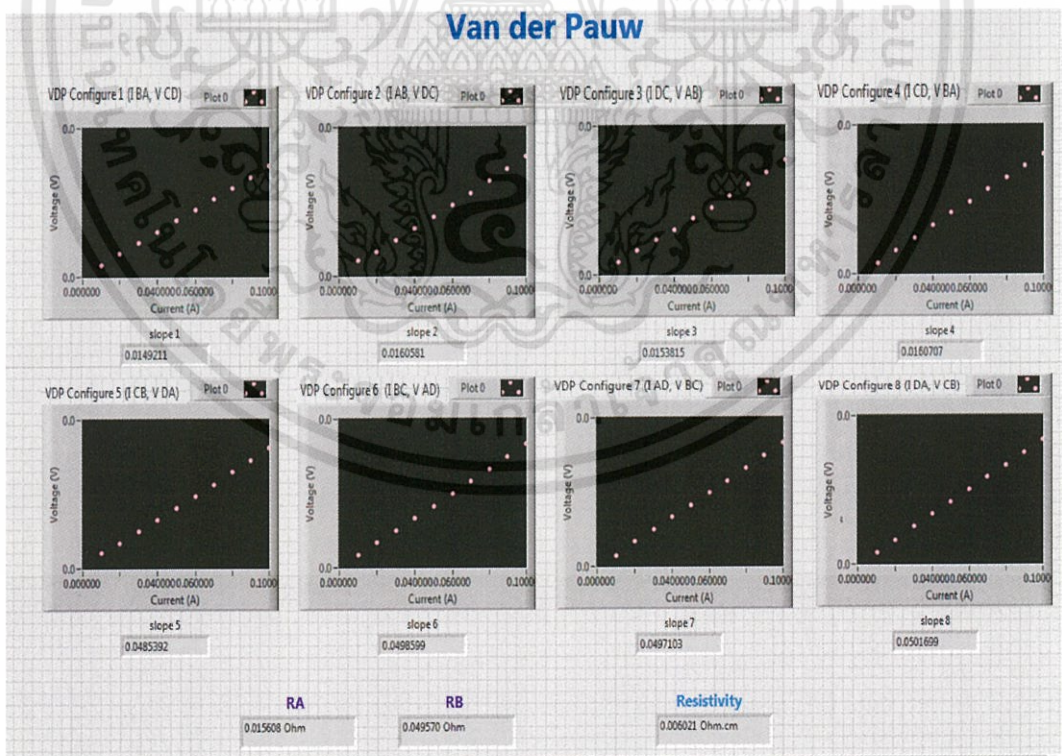


รูปที่ 4.17 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

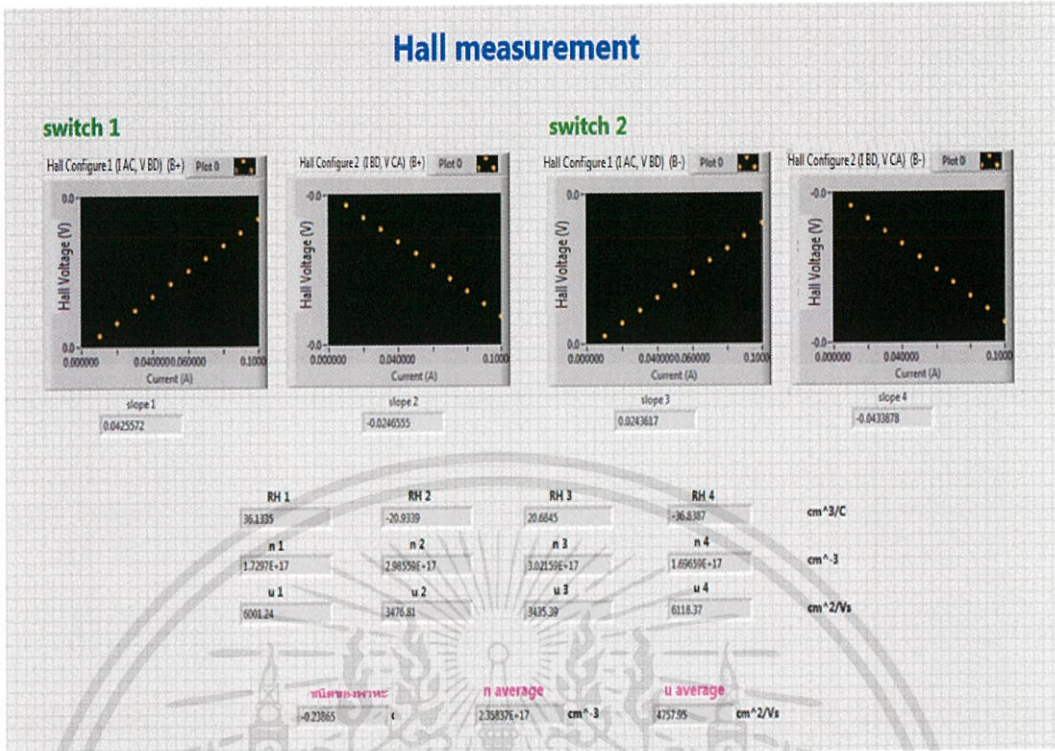


รูปที่ 4.18 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

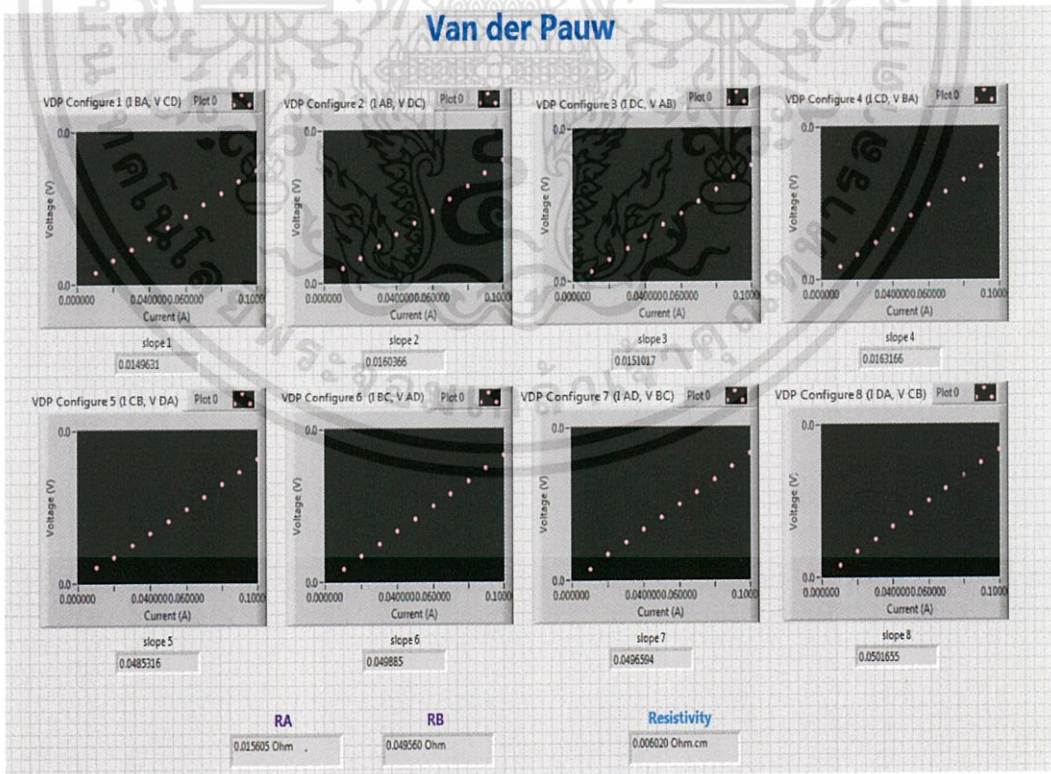


รูปที่ 4.19 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

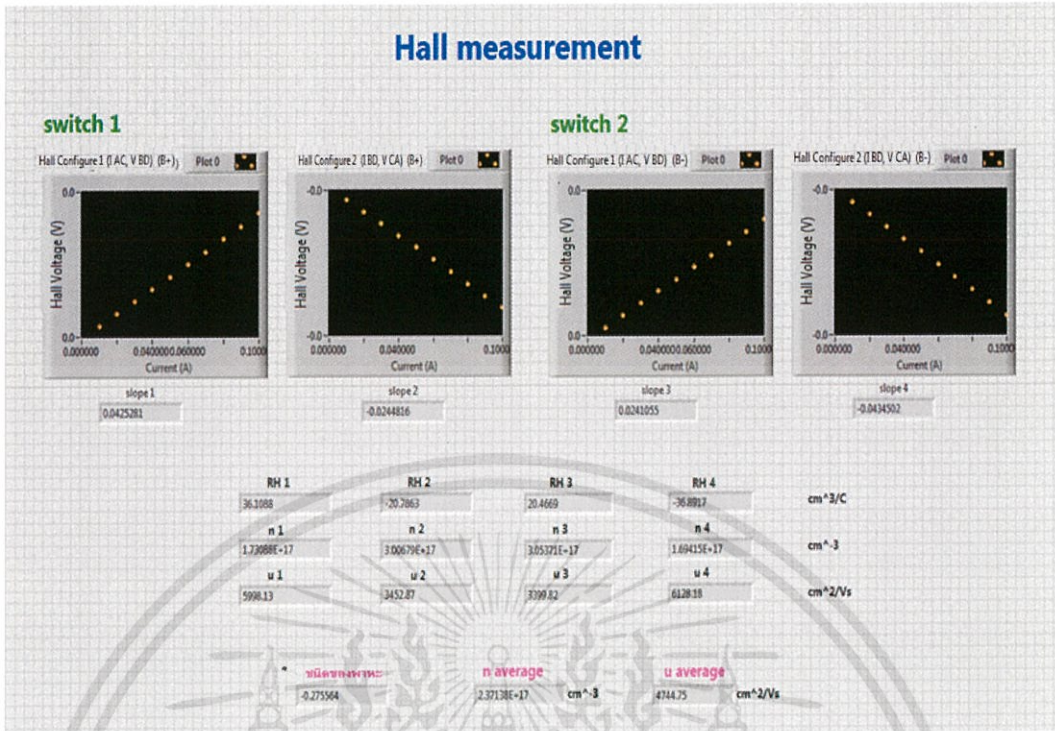


รูปที่ 4.20 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.21 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

รูปที่ 4.17 ถึง 4.22 เป็นผลจากการทดลองวัดสารตัวอย่าง GaSb:Te (n-type) ที่มีความหนา 450 μm จำนวน 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300K ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติด้วยวิธีของ Van der Pauw และ Hall measurement พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V มีความเป็นเชิงเส้น ค่าจากการวัดและการคำนวณ Resistivity, Carrier concentration และ Mobility ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัด GaSb:Te(n-type) ด้วยระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K

วัด	ครั้งที่			เฉลี่ย	S.D.	Uncertainty
	1	2	3			
Resistivity (Ωcm)	6.02×10 ⁻³	6.02×10 ⁻³	6.02×10 ⁻³	6.02×10 ⁻³	0.00	0.00
Carrier concentration (cm ⁻³)	2.352×10 ¹⁷	2.358×10 ¹⁷	2.371×10 ¹⁷	2.360×10 ¹⁷	0.012×10 ¹⁷	0.007×10 ¹⁷
Mobility (cm ² /Vs)	4776.94	4757.95	4744.75	4759.88	16.18	9.34

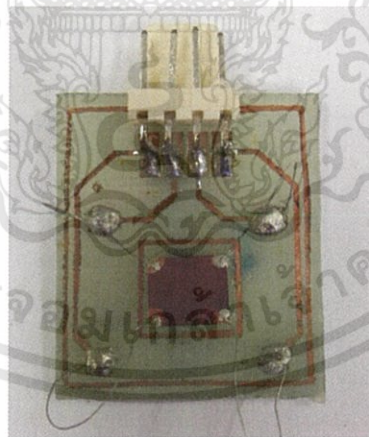
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัด GaSb:Te(n-type) ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ พบว่า มีค่า Resistivity = $6.02 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$, Carrier concentration = $(2.360 \pm 0.007) \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ และ Mobility = $4759.88 \pm 9.34 \text{cm}^2/\text{Vs}$

ตารางที่ 4.2 Certificate measurements temperature 300 K ของ GaSb:Te (n-type) จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul.Wólczyńska 133

Sample	Thickness (μm)	Resistivity (Ωcm)	Carrier concentration (cm^{-3})	Type
GaSb:Te	450	4.40×10^{-3}	4.20×10^{17}	n

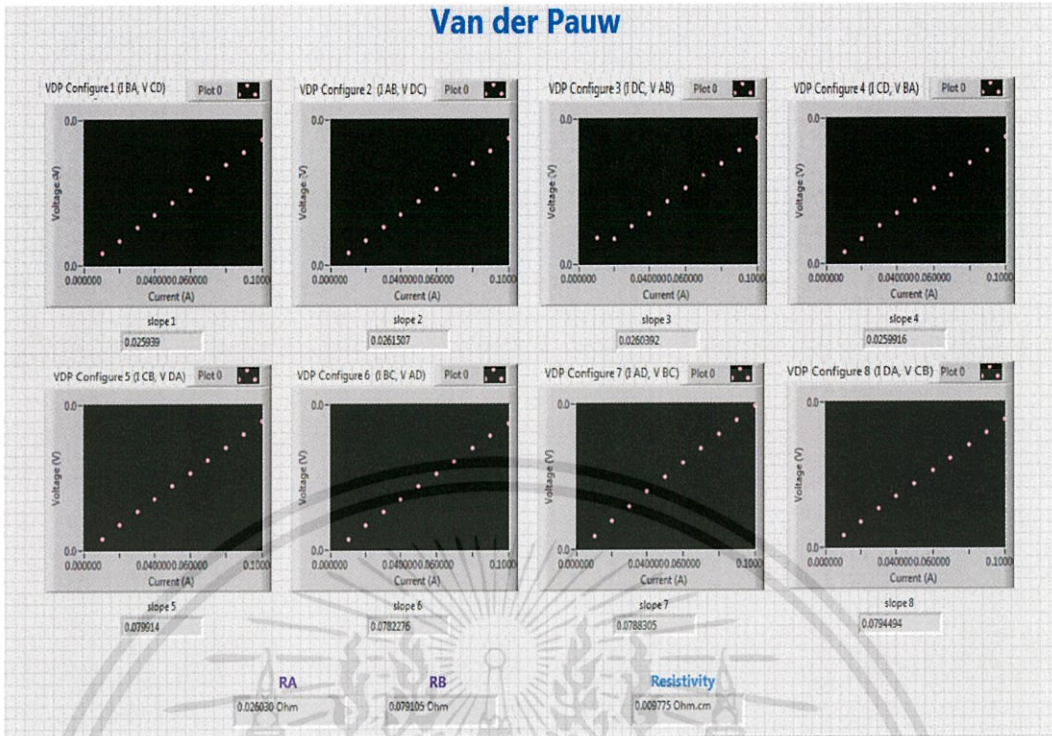
เมื่อเทียบผลจากการวัดด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติกับ Certificate measurements temperature 300 K จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul.Wólczyńska 133 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากการวัดเกิดขึ้น แต่ค่าที่ได้จากการวัดทั้ง 3 ครั้งมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือมีความเที่ยงตรงในการวัดค่อนข้างสูง สำหรับการวัดด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัตินั้นสามารถดูชนิดของพาหะข้างมากได้จากเครื่องหมายที่ชนิดของพาหะ พบว่าเครื่องหมายเป็นลบแสดงถึงพาหะข้างมาก คือ อิเล็กตรอน แสดงว่าเป็นสารชนิด n



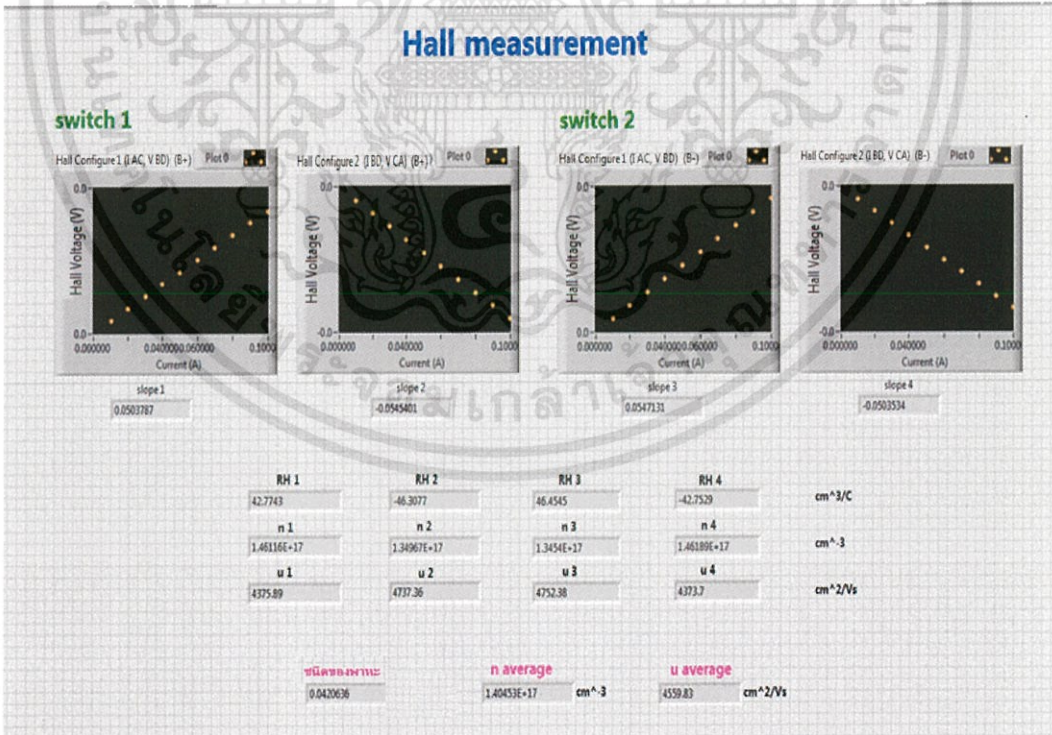
รูปที่ 4.23 สารตัวอย่าง GaSb:Si ที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact

GaSb:Si เป็นสารกึ่งตัวนำ GaSb ที่เจือ Si ซึ่งแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p นำมาวัดด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติที่ถูกออกแบบและเขียนคำสั่งด้วยโปรแกรม LabVIEW สำหรับวัด Van der Pauw และ Hall measurement จากการวัดทั้ง 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 K ได้ผลดังรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

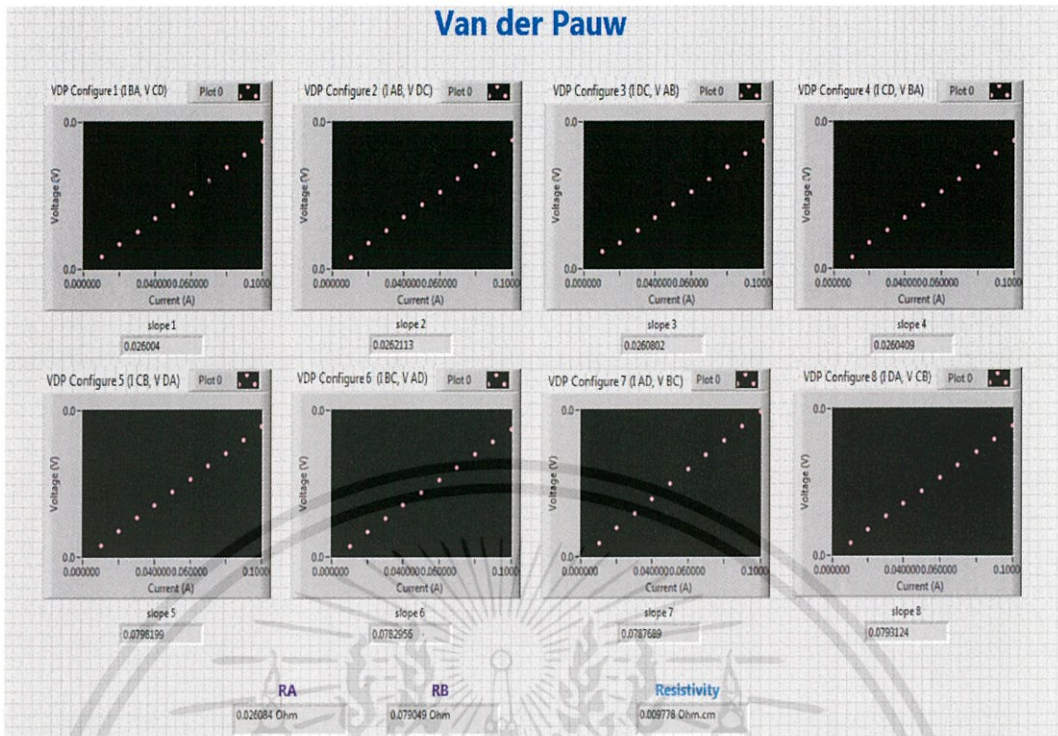


รูปที่ 4.24 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

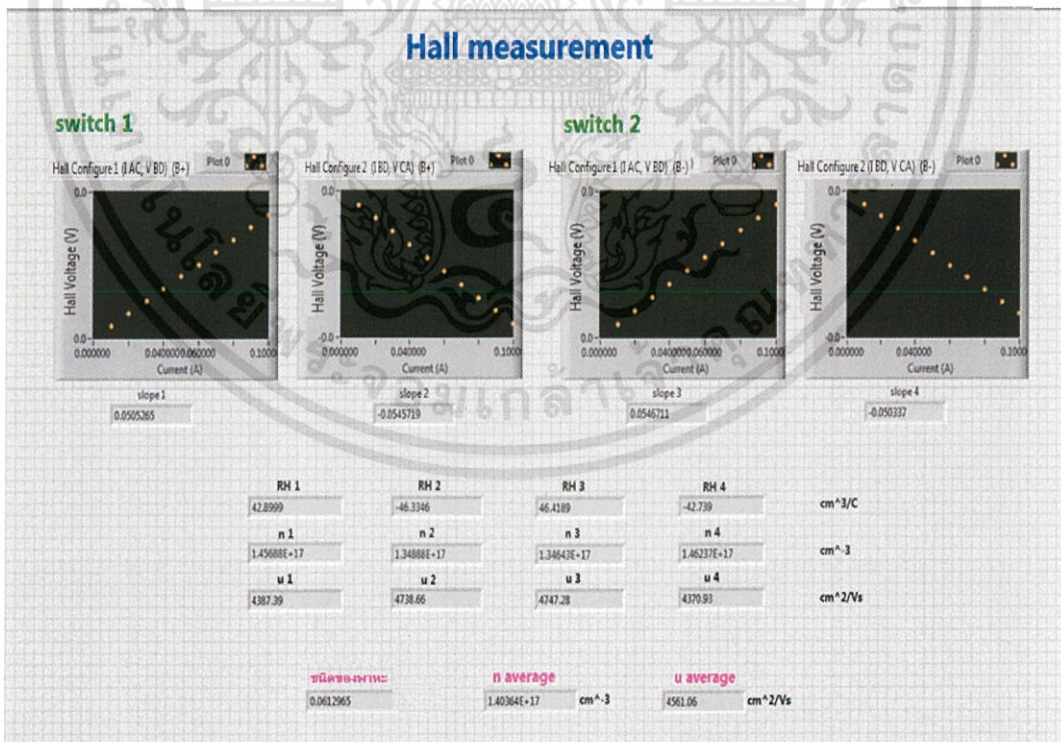


รูปที่ 4.25 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

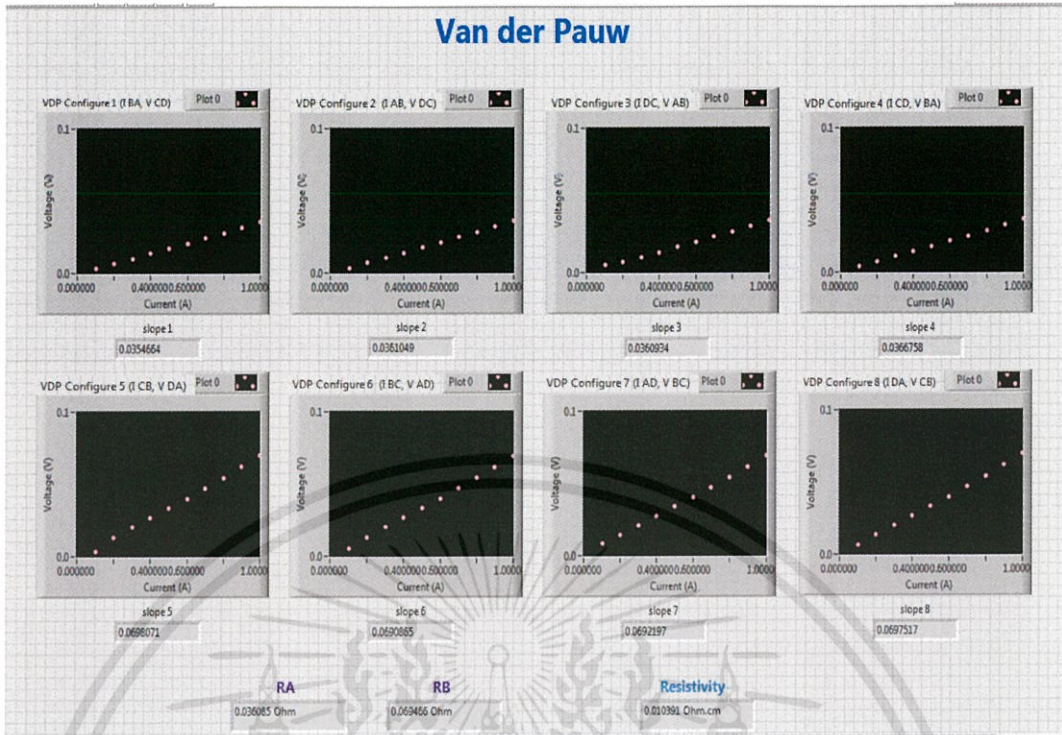


รูปที่ 4.26 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

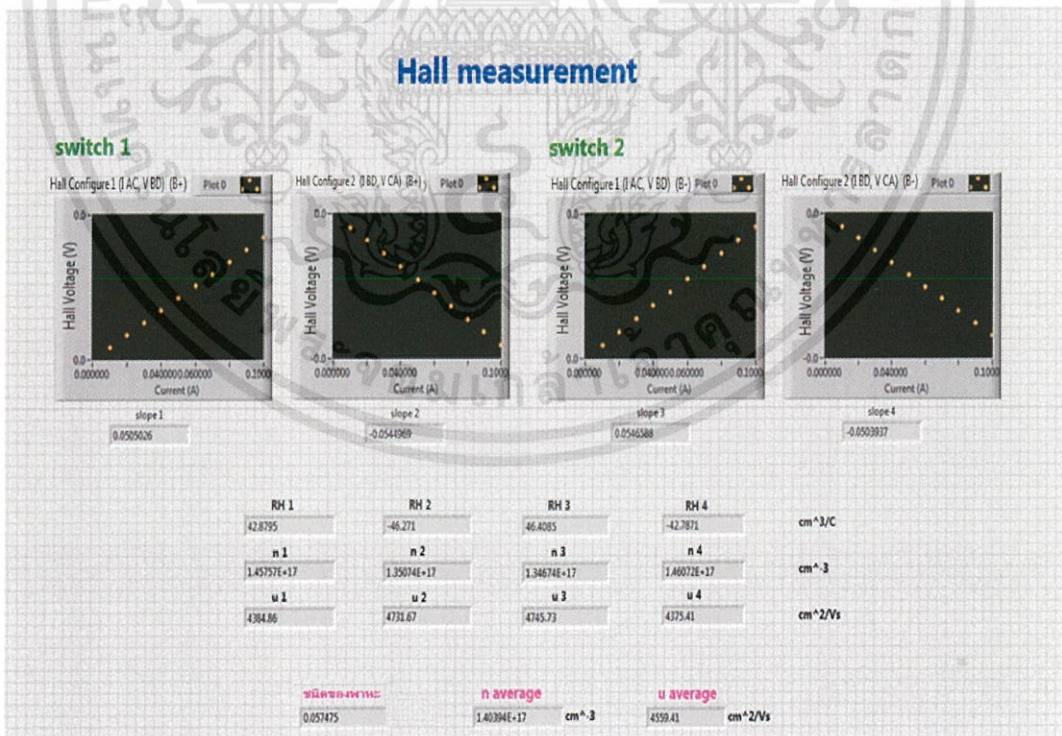


รูปที่ 4.27 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.29 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.29 เป็นผลจากการทดลองวัดสารตัวอย่าง GaSb:Te (n-type) ที่มีความหนา 450 μm จำนวน 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 K ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติด้วยวิธีของ Van der Pauw และ Hall measurement พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V มีความเป็นเชิงเส้น ค่าจากการวัดและการคำนวณ Resistivity, Carrier concentration และ Mobility ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวัด GaSb:Si(p-type) ด้วยระบบการวัดอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K

วัด	ครั้งที่			เฉลี่ย	S.D.	Uncertainty
	1	2	3			
Resistivity (Ωcm)	9.78×10^{-3}	9.78×10^{-3}	9.78×10^{-3}	9.78×10^{-3}	0.00	0.00
Carrier concentration (cm^{-3})	1.405×10^{17}	1.404×10^{17}	1.404×10^{17}	1.404×10^{17}	0.006×10^{17}	0.003×10^{17}
Mobility (cm^2/Vs)	4559.83	4561.06	4559.41	4560.10	0.86	0.50

จากการวัด GaSb:Si(p-type) ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ พบว่ามีค่า Resistivity = $9.78 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$, Carrier concentration = $(1.404 \pm 0.003) \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ และ Mobility = $4560.10 \pm 0.50 \text{cm}^2/\text{Vs}$

ตารางที่ 4.4 Certificate measurements temperature 77 K ของ GaSb:Si (n-type) จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133

Sample	Thickness (μm)	Resistivity (Ωcm)	carrier concentration (cm^{-3})	Type
GaSb:Si	450	7.2×10^{-3}	1.6×10^{18}	p

เมื่อเทียบผลจากการวัดด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติกับ Certificate measurements temperature 77 K จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133 พบว่ามีค่าที่วัดได้มีความแตกต่างกันเนื่องจากการทดลองนั้นวัดที่อุณหภูมิ 300

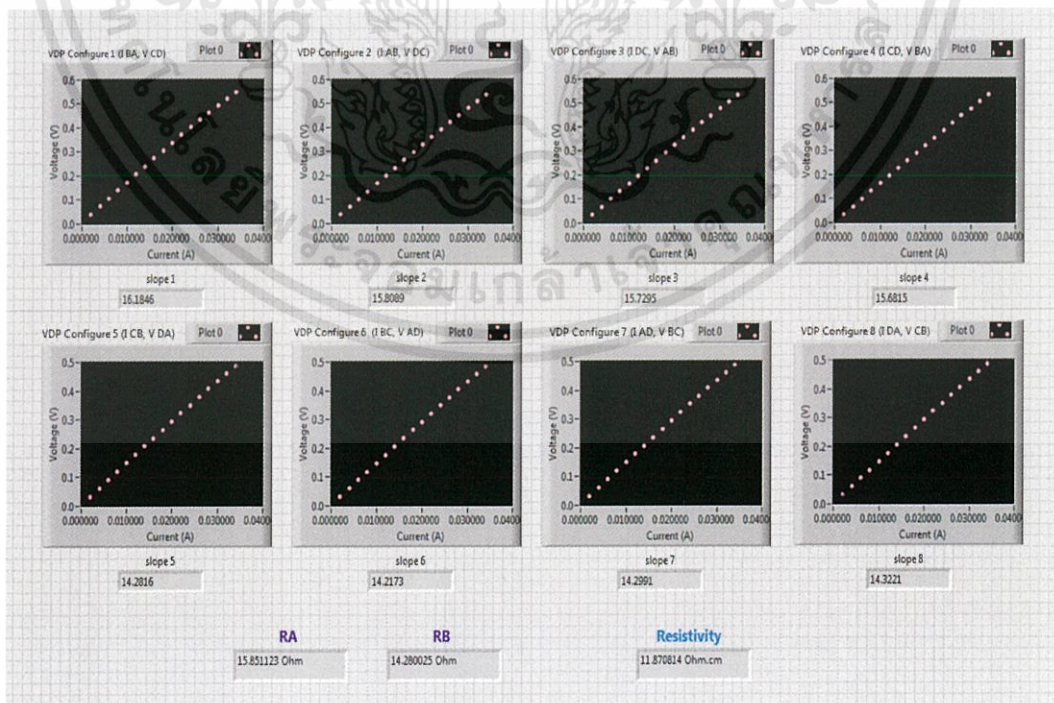
K เป็นการวัดเพื่อตรวจสอบชนิดของพาหะจากการวัดด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติพบว่า เครื่องหมายที่ชนิดของพาหะเป็นบวก แสดงถึงพาหะข้างมาก คือ โฮล แสดงว่าเป็นสารชนิด p

4.6 ทดสอบสารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$



รูปที่ 4.30 สารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ ที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact

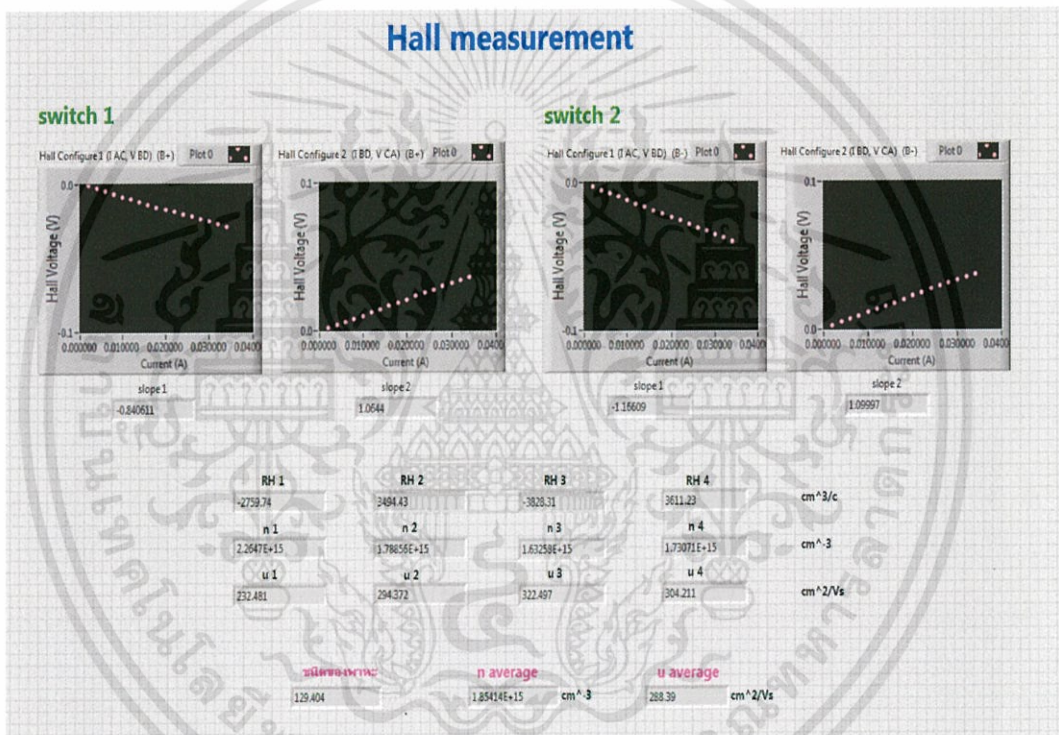
สารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ มีโครงสร้างแบบ Delafossite คือ ABO_2 ซึ่ง $\text{Al}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$ หมายความว่า เจือ $\text{Fe}_{0.1}$ ลงใน $\text{Al}_{0.9}$ สารตัวอย่างที่นำมาวัดอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า bulk มีความหนา 0.174 cm นำมาวัดด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติด้วยวิธีของ Van der Pauw และ Hall measurement ทำการวัดที่ อุณหภูมิ 300 K ได้ผลดังรูปที่ 4.31 ถึงรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 ค่า R_A , R_B และ Resistivity จากการวัด Van der Pauw ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.31 เป็นการวัด Van der Pauw ด้วยระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติ จากภาพประกอบด้วยการวัดทั้งหมด 8 configure โดย 4 configure บนเป็นการวัดเพื่อหาค่า R_A และ 4 configure ล่างเป็นการวัดเพื่อหาค่า R_B ระบบจะประมวลผลการวัดออกมาในรูปแบบของกราฟ I-V แสดงผลในรูปแบบของจุด และแสดงค่า slope ของแต่ละ configure ออกมา จากการวัด 4 configure บนพบว่าได้ค่า slope ของแต่ละ configure ดังนี้คือ $R_{(BA,CD)} = 16.185\Omega$, $R_{(AB,DC)} = 15.809\Omega$, $R_{(DC,AB)} = 15.729\Omega$ และ $R_{(CD,BA)} = 15.682\Omega$ ดังนั้นจะได้ค่า $R_A = 15.851\Omega$ และจากการวัด 4 configure ล่างพบว่าได้ค่า slope ของแต่ละ configure ดังนี้คือ $R_{(AD,BC)} = 14.282\Omega$, $R_{(DA,CB)} = 14.217\Omega$, $R_{(CB,DA)} = 14.299\Omega$ และ $R_{(BC,AD)} = 14.322\Omega$ ดังนั้นจะได้ค่า $R_B = 14.280\Omega$ และค่า Resistivity = $11.871\Omega\text{cm}$



รูปที่ 4.32 ค่า R_H , n และ μ จากการวัด Hall measurement ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

การวัด Hall measurement ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ ระบบจะทำการวัดและประมวลผลออกมาในรูปแบบของกราฟ I-V แสดงค่า slope, R_H , n , μ และค่าเฉลี่ย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.32 ซึ่งพบว่ามีค่า n average = $1.854 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, μ average = $288.39 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ และมีเครื่องหมายที่ชนิดของพาหะเป็นบวก แสดงว่าสารนั้นเป็นชนิด p

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและเขียนโปรแกรมควบคุมระบบการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยโปรแกรมLabVIEW สำหรับวัด Van der Pauw และ Hall measurement เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ อาทิ เช่น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ความหนาแน่นของพาหะสภาพคล่องของพาหะ และชนิดของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดทั้งหมด 6 ขด มีความต้านทานรวม 8 โอห์ม เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าสูงสุด 8 แอมแปร์สามารถให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กได้สูงสุด 0.53 เทสลา การสอบเทียบระบบจะใช้สารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจาก Certificate measurements จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133 สารตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบระบบ คือ GaSb:Te เป็นสารตัวอย่างชนิด n มีความหนาเท่ากับ $450\mu\text{m}$ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $4.40 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ $4.20 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ และสภาพคล่องเท่ากับ $3300.00 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (ค่าจากการวัดที่อุณหภูมิ 300 K) และ GaSb:Si เป็นสารตัวอย่างชนิด p มีความหนาเท่ากับ $450\mu\text{m}$ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $7.20 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ $1.60 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ และสภาพคล่องเท่ากับ $536.00 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (ค่าจากการวัดที่อุณหภูมิ 77 K) นำสารตัวอย่างทั้งสองไปวัดด้วยระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K โดยทำการวัด 3 ครั้ง พบว่า GaSb:Te มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $6.02 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ $(2.360 \pm 0.007) \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ และสภาพคล่องเท่ากับ $4759.88 \pm 9.34 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ และ GaSb:Si มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $9.78 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ $(1.404 \pm 0.003) \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ และสภาพคล่องเท่ากับ $4560.10 \pm 0.50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ จากการวัดพบว่าระบบวัดมีความเที่ยงตรงค่อนข้างสูง แต่ยังคงขาดความถูกต้องบ้างในการวัดเนื่องจากปัจจัยหลายประการ อาทิ เช่น การติด contact ที่ไม่ดี การที่ระบบยังมีสัญญาณรบกวน เครื่องมือวัดมี impedance ต่ำ และสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก power supply ที่ใช้เป็นแบบ analog จึงทำให้การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดแต่ละครั้งอาจมีค่าไม่เท่าเดิม นอกจากนี้ยังได้นำสารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยพบว่า มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $11.87 \Omega\text{cm}$ ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ $1.85 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ และสภาพคล่องเท่ากับ $288.39 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ มีเครื่องหมายที่ชนิดของพาหะเป็นบวก แสดงว่าเป็นสารชนิด p

ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียม sample ที่ใช้ในการทดลอง ผู้ทำการทดลองควรทำ contact ให้ดีเพื่อลดความผิดพลาดจากการวัด
2. ในการทำการทดลองควรให้ sample holder อยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ
3. เลือกใช้เครื่องมือวัดที่มี impedance สูง เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องมือวัดทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ชิ้นงานน้อยลง
4. ออกแบบวงจรกรองสัญญาณเพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวน
5. ออกแบบ power supply ใหม่ให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น เพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก
6. ระบบวัดควรมีเกาส์มิเตอร์สอบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา
7. ผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติก่อนการใช้งานจริง

Optimum sintering temperature for thermoelectric properties of low-cost $\text{CuAl}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_2$ material

Vilailuck Siriwongrungson¹  · Aparporn Sakulalavek² · Rachsak Sakdanuphab¹

Received: 1 April 2016 / Accepted: 20 June 2016
© Springer Science+Business Media New York 2016

Abstract Sintering temperature is a key parameter that affects thermoelectric properties. In this study, a suitable temperature to synthesize thermoelectric properties of low-cost delafossite $\text{CuAl}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_2$ was investigated through the sintering of CuO , Al_2O_3 and Fe_2O_3 mixed powder at 1333, 1423 and 1473 K. The optimum sintering temperature is at 1333 K, where the single-phase CuAlO_2 and the highest dimensionless figure of merit of 0.014 at the measured temperature of 873 K were observed. CuAlO_2 with trace amounts of CuO , and CuAl_2O_4 and CuO were found at the sintering temperature of 1423 and 1473 K, respectively. The highest Seebeck coefficient and thermal conductivity was at the sintering temperature of 1473 K, with the maximum electrical conductivity and power factor at the measured temperature of 873 K of $5.7 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ and $9.81 \times 10^{-5} \text{Wm}^{-1} \text{K}^{-2}$, respectively.

thermoelectric materials depends on the temperature gradient (ΔT) and the figure of merit (Z) and is described by the dimensionless parameter (ZT) and power factor (PF) [1–8]. The PF is the relationship between the Seebeck coefficient and the electrical conductivity, which can be written as $PF = S^2\sigma$, where S is the Seebeck coefficient and σ is the electrical conductivity. When PF is divided by the thermal conductivity, k , the result is Z . The product of Z and absolute temperature (T) is ZT . High electrical conductivity, high Seebeck coefficient and low thermal conductivity result in high Z , which indicates good thermoelectric performance, as the Seebeck coefficient, electrical conductivity and thermal conductivity are interrelated [5–7]. The improvement of the thermoelectric performance requires the compromising of these thermoelectric properties. Yet according to the dimensionless parameter ZT , thermoelectric performance can also be improved by increasing the temperature gradients.

1 Introduction

Thermoelectric materials with high thermal energy conversion efficiency are crucial for thermoelectric power generation, the refrigeration of electronic devices, combustion engines, concentrated solar radiation sources and furnaces. In general, the performance or properties of

Due to poor chemical and physical stability under high temperature in air and a relatively high level of toxicity of thermoelectric materials in the chalcogenides group, thermoelectric oxide materials, including CuAlO_2 , have been investigated as optional thermoelectric materials [4–6, 9–15]. Although thermal and chemical stability at high temperature in air is high, with a low manufacturing cost, the thermoelectric performance is lower than that of semiconductor alloys [4–6, 8].

To date, delafossite CuAlO_2 has been studied by many researchers. Its thermoelectric properties were first studied in 2001 [16]. Conventional processes, such as solid-state reaction and a sintering process at temperatures in the range of 1323–1623 K, were applied to synthesize the delafossite structure of CuAlO_2 with a low cost [2, 5, 17–19]. An approach to increase thermoelectric

✉ Vilailuck Siriwongrungson
vilailuck.si@kmitl.ac.th

¹ College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

² Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

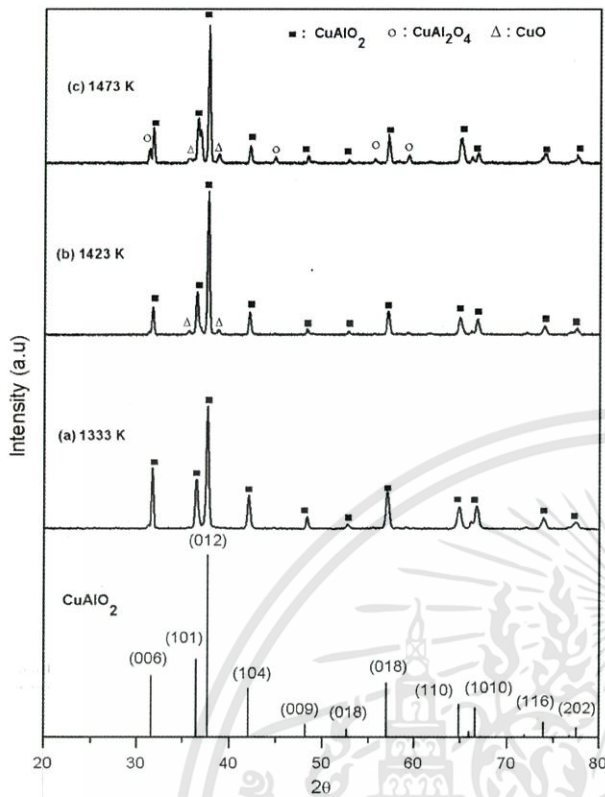
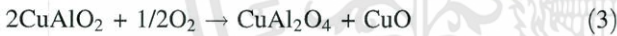


Fig. 2 XRD patterns of the sintered CuO, Al₂O₃ and Fe₂O₃ mixed powder at **a** 1333 K, **b** 1423 K, and **c** 1473 K

and CuAl₂O₄. This change of delafossite CuAlO₂ is the reversed solid-state reaction as written in Eq. (2) [22].



Single phase CuAlO₂ will occur when the sintering temperature is lower than 1353 K. In this study the sintering temperatures where an exothermic reaction occurred are at 1423 and 1473 K yet they depend on the influence of the sintering temperature on the microstructure and thermoelectric properties of sintered CuAl_{0.90}Fe_{0.10}O₂.

3.2 Effects of sintering temperature on grain size and porosity

The SEM images shown the grain size of synthesized CuAl_{0.90}Fe_{0.10}O₂ at various sintering temperatures is illustrated in Fig. 3. The grain size and porosity as a percentage of sintered CuAl_{0.90}Fe_{0.10}O₂ at 1333, 1423 and 1437 K are summarized in Table 1. It can be seen that the grain size increased with the sintering temperature, which agrees with the study of Ashlyn Kirupa et al. [23]. As the grain size increased, the density of the samples increased; hence the porosity decreased. This is because most pores were located at the grain boundaries [1].

3.3 Thermoelectric properties of synthesized CuAl_{0.90}Fe_{0.10}O₂

Considering the Seebeck coefficient of sintered CuAl_{0.90}Fe_{0.10}O₂ samples at 1333, 1423 and 1473 K as shown in Fig. 4a, the Seebeck coefficient of sintered CuAl_{0.90}Fe_{0.10}O₂ as a function of measured temperature decreased from room temperature up to 475 K then started to increase at 873 K. The decrease of the Seebeck coefficient is due to the increase of carrier density while the increase of the Seebeck coefficient is because of the decrease in density of the carrier [1]. The decrease of carrier density is caused by the collision between the carrier and the dopant atom at a higher temperature, in this case at more than 873 K. The changes in the Seebeck coefficient as a function of measured temperature are in accordance with conventional semiconductor theory [24] and the change in the Seebeck coefficient is a function of carrier concentration and scattering factor as reported by Park et al. as follows [1]:

$$S \approx r - \ln n_c \quad (4)$$

where *r* is the scattering factor and *n_c* is the carrier concentration.

The Seebeck coefficient as a function of sintering temperature was found to increase with the sintering temperature. The increase in the Seebeck coefficient is due to the insulating properties of CuO and spinel CuAl₂O₄, which are well-known insulators. The CuO phase lowers the carrier concentration by hindering the transportation of the carrier [25, 26]; hence the Seebeck coefficient is higher, as shown in Eq. (4).

The change in the Seebeck coefficient with the sintering temperature does not affect the pore phase or bulk density. The effective medium theory (EMT) can quantitatively explain the effect of pore phase on the Seebeck coefficient in terms of thermal and electrical conductivities. This EMT of the Seebeck coefficient of a two-phase composite system for the porous Bi₂Te₃ bulk has been recently described by Zhao et al. as follows [27]:

$$S = \frac{6k \langle S_i D_i \rangle}{1 - 3 \langle k_i D_i \rangle} \quad (5)$$

$$\text{with } D_i = \frac{\sigma_i}{(k_i + 2k)(\sigma_i + 2\sigma)}$$

The effective thermal and electrical conductivities of the two-phase composite system can be estimated by the EMT as $\langle \frac{k_i - k}{k + 2k} \rangle = 0$ and $\langle \frac{\sigma_i - \sigma}{\sigma_i + 2\sigma} \rangle = 0$, where the subscript *i* and $\langle \rangle$ denote the *i*th phase and volume average of the property parameters, respectively. Both the thermal and electrical conductivities of the pore phase are considered to be zero. Therefore, it could be implied from Eq. (5) that the pore phase has little or no influence on the Seebeck coefficient compared with the carrier density.

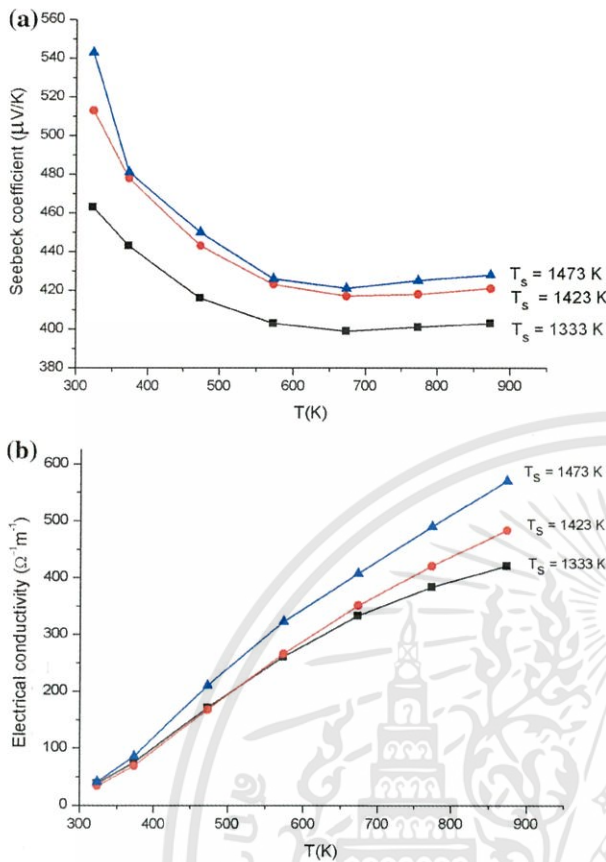


Fig. 4 a Seebeck coefficient of $\text{CuAl}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_2$ samples sintered at various temperatures—1333, 1423 and 1473 K, b Electrical conductivity of $\text{CuAl}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_2$ samples sintered at various temperatures—1333, 1423 and 1473 K

$E_S = E_F - E_V$. Therefore, Eq. (8) can be written as in Eq. (9) below.

$$S = \frac{k_B}{e} \left[\frac{E_S}{k_B T} \right] \quad (9)$$

E_S for one electronic charge constant is the slope of the plot of the Seebeck coefficient as a function of $1000/T$ as shown in Fig. 5a. The E_S is depending on the sintering temperature, which implies that free charge carriers are easier to ionize for the conduction mechanism at a lower sintering temperature, in this case at 1333 K.

Electrical conductivity, which is known to be as Eq. (10)

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_\sigma}{k_B T}\right) \quad (10)$$

with the Arrhenius plot, E_σ can be determined as the slope of the $\ln\sigma$ and $1000/T$ as shown in Fig. 5b. The activation energy for conduction at the three sintering temperatures is in the same range, with an average of 109.43 meV.

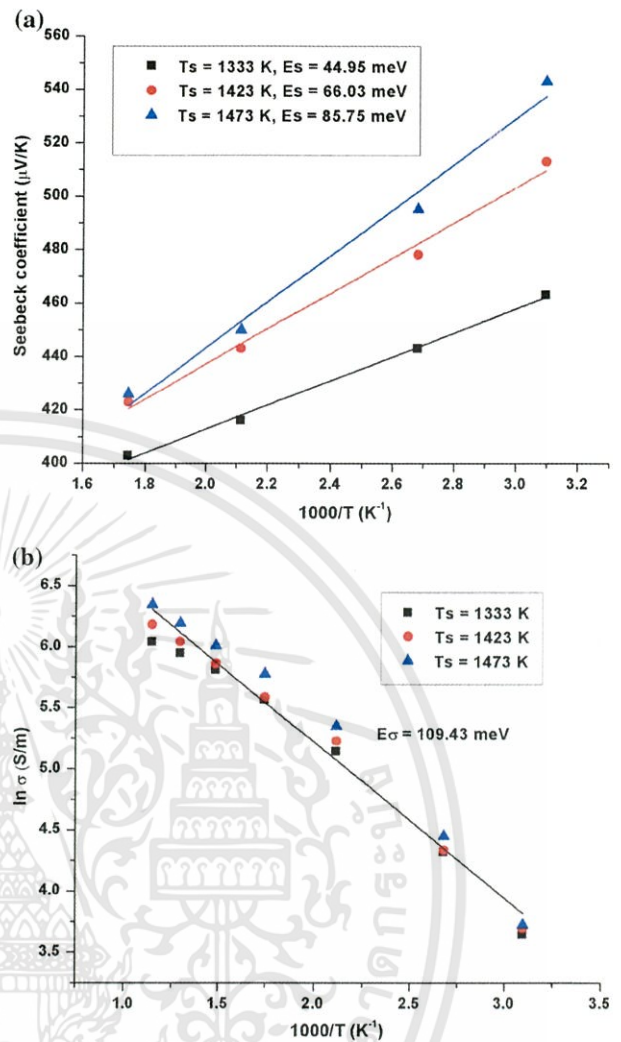


Fig. 5 a Activation energy for the production of free carriers (E_S) at various sintering temperatures of 1333, 1423 and 1473 K, b Activation energy for conduction (E_σ), at various sintering temperatures of 1333, 1423 and 1473 K, shows the average E_σ of 109.43 meV

According to Eq. (7), E_μ can be calculated using the known E_S and E_σ estimated from the slopes of the Seebeck coefficient and $\ln\sigma$ versus $1000/T$. The relationship between E_μ and μ can be written as in Eq. (11) as follows [29, 30]:

$$\mu = A \exp\left(\frac{-E_\mu}{k_B T}\right) \quad (11)$$

where A is a constant.

It can be implied that E_μ is mainly influenced by E_S , rather than E_σ . E_μ tended to decrease with increasing sintering temperatures in the range studied. As E_μ decreased, carrier mobility, μ , increased; hence the electrical

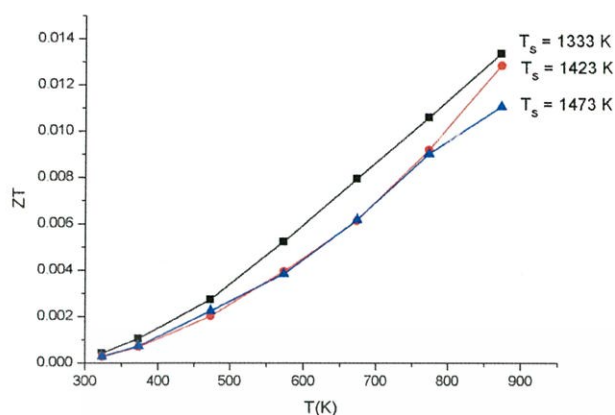


Fig. 8 Dimensionless figure of merit (ZT) of $\text{CuAl}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_2$ samples sintered at various temperatures—1333, 1423 and 1473 K

with the study of Park et al. that the density of sintered CuAlO_2 at 1473 K is higher than that sintered at 1433 K [1].

Porosity, which is a function of sintering temperature, also contributes to thermal conductivity. The relationship of thermal conductivity with porosity can be written as in Eq. (13) below [33]:

$$k = k_0(1 - P) \quad (13)$$

where k_0 is the thermal conductivity at the theoretical density and P is the porosity. The porosity varies inversely with the sintering temperature. Therefore at a higher sintering temperature, thermal conductivity is higher than at a lower sintering temperature. In this study, the sintered sample at 1473 K is observed to have higher thermal conductivity than those at 1423 and 1333 K.

The highest dimensionless figure of merit of 0.014 is at 1333 K, while the lowest dimensionless figure of merit of 0.011 is at 1473 K, as shown in Fig. 8. The dimensionless figure of merit is the multiplication of the figure of merit by the absolute temperature and varies directly with its power factor and inversely with thermal conductivity. Although the highest power factor is at 1473 K, thermal conductivity is also the highest at 1473 K at the measured temperature of 873 K. Consequently, the calculated dimensionless figure of merit increases with decreased sintering temperature. Therefore the optimum synthesized temperature for $\text{CuAl}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_2$ according to this study is 1333 K.

4 Conclusion

An optimum sintering temperature for delafossite $\text{CuAl}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_2$ with good thermoelectric properties at low cost turned out to be 1333 K. Three sintering temperatures of 1333, 1423 and 1473 K were chosen according

to the DSC/TGA analysis. The endothermic reaction occurred due to the solid-state reaction that formed CuAlO_2 . The exothermic reaction, which is the reversed solid-state reaction that was observed, changed the delafossite CuAlO_2 to CuO and CuAl_2O_4 . The grain size of sintered $\text{CuAl}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_2$ increased while the porosity decreased with the sintering temperature. Thermal conductivity reached its maximum at the sintering temperature of 1473 K and measured temperature of 873 K, as the porosity is the lowest for the sintering temperatures in the range studied. The Seebeck coefficient was found to increase as the sintering temperature increased. The Seebeck coefficient increased with the sintering temperature because of the insulating properties of CuO and spinel CuAl_2O_4 from an exothermic reaction at higher sintering temperatures in the range studied. Electrical conductivity and power factors reached the maximum of $5.7 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ and $9.81 \times 10^{-5} \text{Wm}^{-1} \text{K}^{-2}$, respectively, at the sintering temperature of 1473 K and the measured temperature of 873 K. The highest dimensionless figure of merit was estimated to be 0.014 at 1333 K.

Acknowledgments The authors gratefully acknowledge financial support from the Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. We also appreciate the access to SEM imaging at the College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and the DC four-terminal method at the Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi.

References

1. K. Park, K.Y. Ko, W.-S. Seo, J. Eur. Ceram. Soc. **25**, 2219 (2005)
2. Y.-C. Liou, U.-R. Lee, J. Alloy. Compd. **467**, 496 (2009)
3. Y.-C. Liou, L.-S. Chang, Y.-M. Lu, H.-C. Tsai, U.-R. Lee, Ceram. Int. **38**, 3619 (2012)
4. K. Park, K.Y. Ko, J.K. Seong, S. Nahm, J. Eur. Ceram. Soc. **27**, 3735 (2007)
5. K. Park, K.Y. Ko, W.-S. Seo, Mater. Sci. Eng. B **129**, 1 (2006)
6. K. Park, K.Y. Ko, H.-C. Kwon, S. Nahm, J. Alloy. Compd. **437**, 1 (2007)
7. S. Yanagiya, N. van Nong, J. Xu, N. Pryds, Materials **3**, 318 (2010)
8. T. Stöcker, J. Exner, M. Schubert, M. Streibl, R. Moos, Materials **9**, 227 (2016)
9. I. Terasaki, Y. Sasago, K. Uchinokura, Phys. Rev. B **56**, R12685 (1997)
10. A.C. Masset, C. Michel, A. Maignan, M. Hervieu, O. Toulemonde, F. Studer, B. Raveau, J. Hejtmanek, Phys. Rev. B **62**, 166 (2000)
11. M. Ohtaki, T. Tsubota, K. Eguchi, H. Arai, J. Appl. Phys. **79**, 1816 (1996)
12. S. Ohta, H. Ohta, K. Koumoto, J. Ceram. Soc. Jpn. **114**, 102 (2006)
13. I. Terasaki, Phys. B **328**, 63 (2003)
14. K. Fujita, T. Mochida, K. Nakamura, J. Appl. Phys. **40**, 4644 (2001)
15. Y. Ando, N. Miyamoto, K. Segawa, T. Kawata, I. Terasaki, Phys. Rev. B **60**, 10580 (1999)



T145202

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้