

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของชุดเครื่องมือ  
สำหรับวัดปรากฏการณ์ฮอลล์  
SOFTWARE DEVELOPMENT FOR HALL EFFECT  
MEASUREMENT INSTRUMENT



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2560  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR HALL EFFECT  
MEASUREMENT INSTRUMENT



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)

DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ACADEMIC YEAR 2017  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ      การพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของชุดเครื่องมือสำหรับวัด  
 ปรากฏการณ์ฮอลล์  
 Software Development for Hall Effect Measurement Instrument

ชื่อนักศึกษา                      นายณรงค์ฤทธิ์ ฮตถาชา                      รหัสนักศึกษา      57050957  
                                                  นางสาวนันทวัน สิงหาคุณ                      รหัสนักศึกษา      57050988

ปริญญา                                  วิทยาศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชา                                  ฟิสิกส์

ปีการศึกษา                              2560

อาจารย์ที่ปรึกษา                      รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม                      ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์  
 ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิศาล สุขวิสูตร ประธานกรรมการ	พิศาล สุขวิสูตร
ดร.ภาณุพล โขลอนกระโทก กรรมการ	
ดร.พิชานันท์ อีเศรษฐ์โคภาน กรรมการ	พิชานันท์ อี
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของชุดเครื่องมือสำหรับวัดปรากฏการณ์ฮอลล์		
	Software Development for Hall Effect Measurement Instrument		
ชื่อนักศึกษา	นายณรงค์ฤทธิ์ ฮตฤชา	รหัสนักศึกษา	57050957
	นางสาวนันทวัน สิงหาคุณ	รหัสนักศึกษา	57050988
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต		
ภาควิชา	ฟิสิกส์		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมชุดเครื่องมือสำหรับระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ใช้ร่วมกับวิธีของแวนเดอร์เพาว์ ชุดเครื่องมือประกอบด้วย ซอร์ทมิเตอร์ KEITHLEY SourceMeter 2450 ซึ่งมีหน้าที่ในการจ่ายกระแสและวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และ เครื่องควบคุมการสับขั้วไฟฟ้า KEITHLEY 7001 Switch System มีหน้าที่ในการสลับขั้วไฟฟ้าตามหลักการวิธีการวัดสภาพต้านทานตามวิธีการของแวนเดอร์เพาว์ และการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ พร้อมด้วย สนามแม่เหล็กถาวรความเข้มขนาด 0.6 T โดยชุดเครื่องมือดังกล่าวจะถูกควบคุมการทำงานผ่านทางโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วย LabVIEW โดยตัวโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นจะมีหน้าต่างสำหรับติดต่อกับผู้ใช้งาน โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าของกระแสที่ต้องการป้อน และ กรอกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นซึ่งจะปรากฏอยู่บนหน้าต่างต่าง หลังจากทีโปรแกรมทำงานเสร็จสิ้นจะปรากฏหน้าต่างแสดงผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ได้แก่ สภาพต้านทานทางไฟฟ้า ชนิด ความหนาแน่น และสภาพคล่องของพาหะ โดยประสิทธิภาพของชุดเครื่องมือดังกล่าวและการทำงานของโปรแกรมถูกทดสอบด้วยการวัดแผ่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่ทราบค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยกัน 4 ตัวอย่าง ได้แก่ B-doped Si ซึ่งมีสภาพต้านทานทางไฟฟ้า 0.008-0.002, 0.008-0.02, 30-50 โอห์ม.เซนติเมตร ความหนา 2, 500 และ 700 ไมครอนตามลำดับ และ Sb-doped Si สภาพต้านทานทางไฟฟ้า 0.01-0.05 โอห์ม.เซนติเมตร ความหนา 470 ไมครอน โดยผลการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพคล่องพบว่ามีความสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่ได้จาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่่ว่ค่าสำคัญ : ปรากฏการณ์ฮอลล์ วิธีการวัดแบบแวนเดอร์เพาว์ สารกึ่งตัวนำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Software Development for Hall Effect Measurement Instrument	
Students	Mr.Narongrit Hodrucha	Student ID 57050957
	MissNuntawan Singhakun	Student ID 57050988
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2017	
Advisor	Assoc. Pro. Dr. Warawoot Taoladda	
Co-advisor	Asst. Prof. S.Tipawan Khlayboonme	

### Adstract

This special project purposed computer programming based on LabVIEW, which used for control instruments for experimental setup of van der Paw and Hall Effect measurement system with 0.60 T magnet. The instruments for this system consist of a KEITHLEY sourcemeter 2450 that ability to supply current and measure electrical voltage simultaneously and a KEITHLEY 7001 Switch System that used for switching to connect the sourcemeter and device under test, which supports van der Pauw and Hall Effect measurement method. This software capable of relying on automation switching the current source and voltmeter to all side of the sample. It has windows for interfacing with the user and displays resistivity, carrier type, carrier concentration and mobility after complete of the measurement. The resistivity was measured by the four-point probe technique under van der Paw method. The resultant eight values of Hall voltage were measured via the four electrodes under conditions of reverse of the directions of magnetic field and current injected into the sample. To verify the electrical property measurements provided by the developed system, four silicon wafers were used: B-doped Si wafer with 0.008-0.002, 0.008-0.02, 30-50  $\Omega$ -cm resistivity and 2, 500 and 700  $\mu\text{m}$  thickness, respectively, and Sb-doped Si with 0.01-0.05  $\Omega$ -cm resistivity and 470  $\mu\text{m}$  thickness. The values of resistivity, carrier concentration and mobility agreed well with those from American Society for Testing and Materials.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Keywords** : Hall effect, Van der Pauw, Semiconductor

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุน ช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

รศ.ดร. วราวุฒิ เถลัดดา ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้และให้คำปรึกษาในการสร้างเครื่องมือ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำโครงการพิเศษนี้และยังเป็นประโยชน์ในการนำความรู้และเทคนิคต่างๆไปใช้ในหน้าที่การงานในอนาคตได้อีกด้วย อีกทั้งยังอดทนให้คนไม่ขยันได้ทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จนเกิดความรู้ความสามารถในด้านใหม่ๆ จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผศ.ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ผู้ซึ่งคอยแนะนำและสนับสนุนการทำโครงการพิเศษนี้ในทุกๆด้าน ทั้งด้านทักษะความรู้ความสามารถในการทำงานและสนับสนุนเครื่องมือต่างๆ หรือการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่มีความสำคัญที่สุดในชีวิต ได้แก่ บิดา มารดา ปู่ ย่า ตา และยาย ผู้คอยอบรมเลี้ยงดูและสนับสนุนทุกอย่างในทางที่ดี เนื่องจากกำลังใจเหล่านี้จึงทำให้โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงกราบขอบพระคุณท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ณรงค์ฤทธิ์ ฮตถาษา  
นันทวัน สิงหาคุณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 สารกึ่งตัวนำ	4
2.1.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	6
2.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	6
2.2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค Van der Pauw	9
2.3 ค่าความคล่องตัวและสภาพนำไฟฟ้า	12
2.3.1 กลไกการกระเจิงพาหะ	12
2.3.2 ความเร็วพัดพาเฉลี่ยและความคล่องตัวของพาหะ	14
2.3.3 สภาพนำไฟฟ้า	18
2.3.4 การหาความเข้มข้นพาหะข้างมาก ชนิดของสาร และค่าความคล่องตัวด้วยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	20
2.4 โปรแกรม LabVIEW	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	27
3.1 การต่ออุปกรณ์	27
3.2 อุปกรณ์และฟังก์ชันการใช้งาน	28
3.2.1 Gauss/Tesla Meter	28
3.2.2 National instruments GPIB – USB – HS+	29
3.2.3 KEITHLEY 2602A SYSTEM SourceMeter	29
3.2.4 KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM	30
3.2.4.1 แผงควบคุมด้านหน้า	31
3.2.4.2 แผงควบคุมด้านหลัง	33
3.3 วิธีการทดลอง	34
3.3.1 การวัดด้วยทฤษฎี Van der Pauw	34
3.3.2 การวัดด้วยทฤษฎี Hall effect	35
3.4 Software	37
3.4.1 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล	37
3.5 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร	44
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	47
4.1 ผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม	47
4.1.1 หน้าต่าง HOME	47
4.1.2 หน้าต่าง SETTING	49
4.1.3 หน้าต่าง van der Pauw	51
4.1.4 หน้าต่าง Hall Effect	53
4.2 ผลการทดลอง	56
4.2.1 ผลการวัดของ sample 1	
[B-doped Si, p-type, $\rho = 0.008-0.002 \Omega \cdot cm$ ]	56
4.2.2 ผลการวัดของ sample 2	
[Silicon, p-type, $\rho = 0.008-0.02 \Omega \cdot cm$ ]	63
4.2.3 ผลการวัดของ sample 3	
[Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ]	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการวัดของ sample 4	
[Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ]	75
4.2.5 ผลการวัดของผู้ใช้งานจริง sample Mg <sub>2</sub> Si (0 วินาที)	81
4.3 อภิปรายผลการวัด	84
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>85</b>
5.1 สรุปการทดลอง	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
2.1 ตารางพีรอดีคเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุหรือสารประกอบกึ่งตัวนำ	6
2.2 สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุและสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ	6
2.3 ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 300 K	17
4.1 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ทราบค่าแล้ว	56
4.2 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 1 [B-doped Si, p-type, $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	57
4.3 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon - ( $Si - 10^{22}, B - 10^{14}$ ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	58
4.4 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon - ( $Si - 10^{22}, B - 10^{14}$ ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] ในสนามแม่เหล็ก ทิศพุ่งเข้า ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	58
4.5 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon - ( $Si - 10^{22}, B - 10^{14}$ ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] ในสนามแม่เหล็ก ทิศพุ่งออก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	58
4.6 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 1 [Silicon - ( $Si - 10^{22}, B - 10^{14}$ ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	59
4.7 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon - ( $Si - 10^{22}, B - 10^{14}$ ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	60
4.8 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon - ( $Si - 10^{22}, B - 10^{14}$ ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon – (Si – $10^{22}$ , B – $10^{14}$ ) , $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออก ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	61
4.10 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 1 [Silicon – (Si – $10^{22}$ , B – $10^{14}$ ) , $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีการวัดโดยโปรแกรม กับค่าที่ทราบ	62
4.11 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	63
4.12 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega.cm$ ] นอกสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	64
4.13 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega.cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	64
4.14 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega.cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	64
4.15 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	65
4.16 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega.cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการ วัดโดยโปรแกรม	66
4.17 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega.cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	67
4.18 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega.cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.19 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีการวัดโดยโปรแกรม กับ ค่าที่ทราบ	68
4.20 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	69
4.21 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	70
4.22 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	70
4.23 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	70
4.24 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	71
4.25 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	72
4.26 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	73
4.27 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.28 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และ วิธีการวัดโดยโปรแกรม กับค่าที่ทราบ	74
4.29 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	75
4.30 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	76
4.31 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	76
4.32 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	76
4.33 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	77
4.34 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	78
4.35 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	79
4.36 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.37 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีการวัดโดยโปรแกรม กับค่าที่ทราบ	80
4.38 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample $Mg_2Si$ (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม	81
4.39 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample $Mg_2Si$ (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม	82
4.40 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample $Mg_2Si$ (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม	82
4.41 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample $Mg_2Si$ (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม	82
4.42 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample $Mg_2Si$ (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรมกับค่าที่ทราบ	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สภาพนำและสภาพต้านทานของฉนวน ตัวนำ และสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ	5
2.2 แสดงวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	7
2.3 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนสารตัวอย่าง	10
2.4 การจัดเรียงขั้วสัมผัสเพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์	10
2.5 กราฟแฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์	11
2.6 การขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่มี การเติมสารเจือในปริมาณ $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	19
2.7 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดในสารเอ็น ซึ่งมีความหนาแน่นกระแส $J$ ไหลในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก $B$	21
2.8 แสดงตัวอย่างเครื่องมือวัดเสมือนที่สร้างจาก LabVIEW	23
2.9 Block Diagram เครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW	24
2.10 Front Panel ของ LabVIEW	25
2.11 Object ที่อยู่บน Front Panel ของ LabVIEW	25
2.12 Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel	26
2.13 Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel	26
3.1 การเชื่อมต่อสาย GPIB ระหว่างคอมพิวเตอร์กับ 2450 SourceMeter และ 7001 Switch System	27
3.2 การเชื่อมต่อสายระหว่างชุดกล่องสนามแม่เหล็กกับ 2450 SourceMeter และ 7001 Switch System	28
3.3 เครื่อง Tesla Meter	28
3.4 เครื่อง National instruments GPIB to USB	29
3.5 เครื่อง KEITHLEY 2602A SYSTEM SourceMeter	29
3.6 เครื่อง KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM	30
3.7 เครื่อง KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM แผงควบคุมด้านหน้า	31
3.8 เครื่อง KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM แผงควบคุมด้านหลัง	33
3.9 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_A$	34
3.10 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_B$	34
3.11 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_{50,CA}$	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาก็ได้เช่น เมื่อผู้ใช้งานซึ่งใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_{AC}$ , BD	35
3.13 ไดอะแกรมแสดงการรับค่าจากปุ่ม	38
3.14 ไดอะแกรมแสดงการรับค่าจาก Keyboard	39
3.15 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ	40
3.16 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ (ต่อ)	41
3.17 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ (ต่อ)	42
3.18 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ (ต่อ)	43
3.19 สนามแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่บนฐานสำหรับใส่แผ่น sample	44
3.20 แผ่นสำหรับใส่ชิ้น sample	44
3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Layer	45
3.22 กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะแกน XY (mm) กับ ค่าสนามแม่เหล็ก (kG) บน Layer 1	45
3.23 กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะแกน XY (mm) กับ ค่าสนามแม่เหล็ก (kG) บน Layer 2	46
3.24 กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะแกน XY (mm) กับ ค่าสนามแม่เหล็ก (kG) บน Layer 3	46
4.1 หน้าต่าง HOME	48
4.2 แสดงถึงการบันทึกค่าของโปรแกรมเมื่อกดปุ่ม SAVE	48
4.3 แสดงตำแหน่ง A B C และ D บนแผ่นวาง Sample	50
4.4 หน้าต่าง SETTING ใช้สำหรับเชื่อมต่อ Source Meter, SWITCH SYSTEM, การเลือกรูปแบบการวัดและการป้อนค่าต่างๆที่ใช้ในการวัด van der Pauw หรือ Hall Effect โดยเลือกจากสวิตช์ Van der Pauw และ Hall Effect หรือใช้แท็บ TUNER สำหรับหาช่วงการวัด	51
4.5 หน้าต่างแสดงค่าความต่างศักย์และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับค่าความต่างศักย์ของผลการวัด Van der Pauw	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 หน้าต่างแสดงผลค่าการคำนวณค่าความต้านทานเฉลี่ยทั้ง 8 จุด, ค่า Factor, ค่า Sheet Resistance, ค่า Resistivity และค่า Conductivity พร้อมกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งความต้านทานกับค่าความต้านทานของการวัด van der Pauw	52
4.7 หน้าต่างแสดงค่าความต่างศักย์นอกสนามแม่เหล็กในการวัด Hall Effect เพื่อใช้ในการคำนวณหาความต่างศักย์ HALL	53
4.8 หน้าต่างแสดง Pop-up แจ้งเตือนสำหรับการนำ Sample เข้าสู่สนามแม่เหล็ก	54
4.9 หน้าต่างแสดง Pop-up แจ้งเตือนสำหรับการกลับทิศของสนามแม่เหล็ก (เราไม่สามารถกลับสนามแม่เหล็กได้จึงกลับ Sample แทน)	54
4.10 หน้าต่าง MESUREMENT HALL	55
4.11 หน้าต่างแสดง Pop-up แจ้งเตือนสำหรับการดำเนินการโปรแกรมการวัด Hall Effect เสร็จสิ้น	55
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 1 [Silicon-(Si-10 <sup>22</sup> ,B-10 <sup>14</sup> ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	57
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si-10 <sup>22</sup> ,B-10 <sup>14</sup> ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	59
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 1 [Silicon-(Si-10 <sup>22</sup> ,B-10 <sup>14</sup> ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	60
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si-10 <sup>22</sup> ,B-10 <sup>14</sup> ), $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	62
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	63
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	65
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	66
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon, $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	69
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	71
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	72
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 3 sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	74
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	75
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	77
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	78
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 4 sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม	80
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample Mg <sub>2</sub> Si (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม	81
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample Mg <sub>2</sub> Si (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความหนาแน่นและสภาพความคล่องของพาหะในเนื้อวัสดุมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าในวัสดุแต่ละชนิด ดังนั้นการทราบค่าความหนาแน่นและสภาพความคล่องของพาหะจะทำให้ทราบถึงสภาพการนำไฟฟ้าที่บ่งบอกถึงความเป็น ตัวนำไฟฟ้า สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าและฉนวน เพื่อใช้ประโยชน์ในงานวิจัย การเรียนรู้ การตรวจสอบหรือพัฒนาต่อไป โดยความหนาแน่นและสภาพความคล่องของพาหะสามารถหาได้จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) จากหลักการการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ จำเป็นต้องมีการสับขั้วไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการสับขั้วไฟฟ้าจากเครื่องมือที่สามารถทำหน้าที่สับขั้วไฟฟ้าได้

จากการศึกษาทำให้ทราบองค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างเครื่องมือวัดและการเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาการทำงานของเครื่องมือวัดและชุดเครื่องมือวัดนี้สามารถนำไปเป็นชุดการทดลองการศึกษาในแลปปฏิบัติการของภาควิชาเครื่องมือวัด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับการสับขั้วไฟฟ้าของเครื่องมือวัดที่ใช้กับปรากฏการณ์ฮอลล์
2. เพื่อพัฒนาโปรแกรมในการคำนวณความหนาแน่น ( $n$ ) , สภาพความคล่องของพาหะ ( $\mu$ )

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เขียนโปรแกรมสับขั้วไฟฟ้าสำหรับการสับสวิทช์ของเครื่องมือวัดที่ใช้กับปรากฏการณ์ฮอลล์
2. เขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณความหนาแน่น ( $n$ ) , สภาพความคล่องของพาหะ ( $\mu$ )
3. สร้างกล่องติดตั้งสนามแม่เหล็กกระแสไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้ง 4 ขั้วเข้ากับเครื่องมือวัด

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

โครงการมีระยะเวลาในการจัดทำรวมทั้งสิ้น 7 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 ถึง วันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งมีแผนดำเนินงานแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา								
	ก.ย. 2560	ต.ค. 2560	พ.ย. 2560	ธ.ค. 2560	ม.ค. 2561	ก.พ. 2561	มี.ค. 2561	เม.ย. 2561	พ.ค. 2561
1.ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฮอลล์									
2.ศึกษาทฤษฎี van der Pauw									
3.ศึกษาเครื่อง KEITHLEY 2602A SYSTEM Source Meter									
4.ศึกษาเครื่อง KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM									
5.ศึกษาโปรแกรม LabVIEW 2015									
6.สร้างกล่องติดตั้งสนามแม่เหล็กและขั้วไฟฟ้า									
7.เขียนโปรแกรมสับสวิตซ์ปรากฏการณ์ฮอลล์									
8.เขียนโปรแกรมคำนวณค่าความหนาแน่น ( $n$ ), สภาพคล่องของพาหะ ( $\mu$ )									
9.ทดสอบและแก้ไขการติดตั้งสนามแม่เหล็กและขั้วไฟฟ้าและโปรแกรมการสับสวิตซ์									
10.สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1. โปรแกรมสับขั้วไฟฟ้าอัตโนมัติ
- 2. ชุดข้อมูลที่ให้ค่าความหนาแน่น ( $n$ ) , สภาพความคล่องของพาหะ ( $\mu$ )
- 3. กล้องติดตั้งสนามแม่เหล็กและแผ่นเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้ง 4 ขั้วเข้ากับเครื่องมือวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

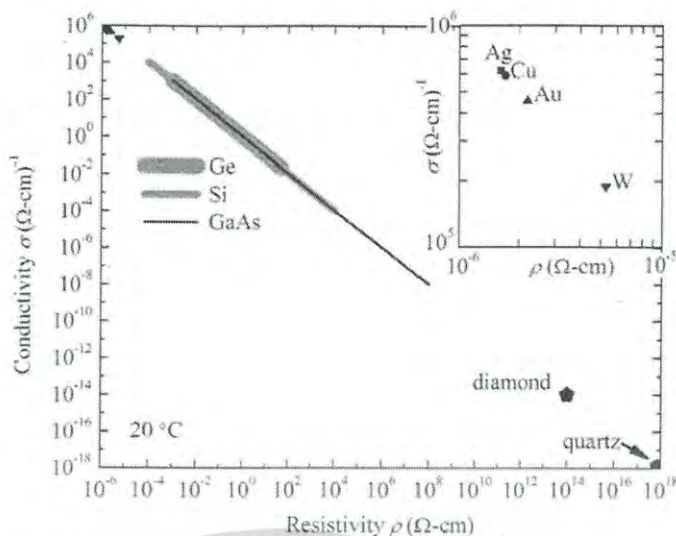
### 2.1 สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำ (semiconductors) นำไฟฟ้าด้อยกว่าตัวนำ (conductors) แต่ดีกว่าฉนวน (insulators) สภาพนำ (conductivity,  $\sigma$ ) และสภาพต้านทาน (resistivity,  $\rho$ ) ของตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนสำคัญที่อุณหภูมิห้องถูกแสดงในรูปที่ 2.1 เงิน (silver, Ag) เป็นตัวนำที่ดีที่สุดมีสภาพต้านทาน  $1.63 \mu\Omega \cdot cm$  ควอตซ์ (quartz) เป็นฉนวนที่ดีที่สุดมีสภาพต้านทาน  $10^{14} - 10^{16} \Omega \cdot cm$  ส่วนซิลิคอน (silicon, Si) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำไปใช้งานมากที่สุดมีสภาพต้านทาน  $10^4 - 10^4 \Omega \cdot cm$  ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือ โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำมีสภาพนำที่ครอบคลุมช่วงกว้าง เนื่องจากเป็นวัสดุที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยภายนอก เช่น ความเข้มข้นของสารเจือและปัจจัยภายนอก

สารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียม (germanium, Ge) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดแรกที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ต่อมาซิลิคอนได้เข้ามาแทนที่เจอร์เมเนียม เนื่องจากทรานซิสเตอร์ที่ถูกสร้างจากซิลิคอนสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิที่สูงกว่ามีความเสถียรมากกว่าและใช้พลังงานต่ำกว่า ในปัจจุบันวงจรรวม (integrated circuit: IC) ส่วนใหญ่และไมโครโพรเซสเซอร์ในคอมพิวเตอร์ ถูกสร้างจากผลึกซิลิคอนส่งผลให้ซิลิคอนครองตลาดสูงสุดในบรรดาวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด ส่วนสารกึ่งตัวนำที่สำคัญรองจากซิลิคอนคือ GaAs และ InP ซึ่งสามารถเปล่งและตรวจจับแสงได้ ขณะที่ซิลิคอนตรวจจับแสงได้ แต่ไม่สามารถเปล่งแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สารกึ่งตัวนำจะถูกกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพ ทุกครั้งที่คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำถูกปรับปรุงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องจะมีประสิทธิภาพ และขีดจำกัดที่เปลี่ยนไปตามสภาพการปรับปรุงของสารกึ่งตัวนำบ่อยครั้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีการเปลี่ยนแปลงแบบก้าวกระโดดจากการพัฒนาการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำขึ้นมาใหม่ การวิจัยและการพัฒนาวัสดุและสารกึ่งตัวนำต่างได้รับแรงผลักดันจากผู้บริโภคที่ต้องการคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ ให้มีประสิทธิภาพสูง ประมวลผลได้เร็ว รับ-ส่งข้อมูลได้รวดเร็ว แสดงภาพได้ละเอียด ฯลฯ วัสดุสารกึ่งตัวนำในปัจจุบันจึงมีมากมายหลายชนิด และจะมีมากขึ้นอีกต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 สภาพนำและสภาพต้านทานของฉนวน ตัวนำ และสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ

### 2.1.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ

หากใช้จำนวนธาตุที่ประกอบกันเป็นเนื้อสารกึ่งตัวนำเป็นเกณฑ์ เราอาจจำแนกสารกึ่งตัวนำออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุ (elemental semiconductor) และที่เป็นสารประกอบ หรือสารประกอบกึ่งตัวนำ (compound semiconductor) สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุมีองค์ประกอบเป็นธาตุเพียงธาตุเดียวจากหมู่ IV ของตารางพีริออดิก ได้แก่ Si และ Ge ส่วนสารประกอบกึ่งตัวนำเกิดจากการผสมธาตุในหมู่ II ถึง VI ในตารางธาตุที่ 2.1 ตั้งแต่ 2 ธาตุขึ้นไป เรียงลำดับตามจำนวนธาตุจากน้อยไปหามากดังนี้ สารประกอบธาตุคู่ (binary compound) ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (gallium arsenide; GaAs), สารประกอบสามธาตุ (ternary compound) เช่น อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (aluminium gallium arsenide; AlGaAs), สารประกอบสี่ธาตุ (quaternary compound) เช่น แกลเลียมอินเดียมอาร์เซนิคฟอสไฟด์ (gallium indium arsenic phosphide; GaInAsP) และสารประกอบห้าธาตุ (quinary compound) เช่น อะลูมิเนียมแกลเลียมอินเดียมอาร์เซนิคแอนติโมนด์ (aluminium gallium indium arsenic antimonide; AlGaInAsSb)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางพีริออดิกเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุหรือสารประกอบกึ่งตัวนำ

II(A)	II(B)	III(A)	IV(A)	V(A)	VI(A)
		B	C	N	O
Mg		Al	Si	P	S
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Cd	In	Sn	Sb	Te
	Hg		Pb		

ตารางที่ 2.2 สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุและสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

	IV-IV	III-V	II-VI	IV-VI
elemental	Si, Ge	-	-	-
binary	SiC, SiGe	AlP, GaP, InP AlAs, GaAs, InAs AlSb, GaSb, InSb	ZnO ZnS, CdS, HgS ZnSe, CdSe ZnTe, CdTe	PbS PbSe PbTe
ternary	SiGeC	AlGaAs, AlInAs, GaSAsP, GaInAs, GaInP, GaInN	HgCdTe	-
quarternary	-	AlGaAsSb, GaInAsP	-	-
quarternary	-	AlInGaAsSb	-	-

## 2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

### 2.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกระทำได้ง่ายและสะดวกเมื่อเทียบกับการวัดพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ หลักการวัดกระทำโดยขั้วโลหะ 4 ขั้ว ทำผิวสัมผัสกับชั้นสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) ผิวสัมผัสด้านนอก 2 จุด เป็นส่วนที่ให้กระแสที่ทราบค่า  $I$  ไหลผ่าน (ซึ่งไหลมาจากแหล่งจ่ายกระแสค่าคงที่) ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าด้านใน 2 ขั้ว ใช้ในการวัดความต่างศักย์  $V$  จากโวลต์มิเตอร์ โดยที่โวลต์มิเตอร์ที่ใช้ต้องเป็นชนิดอิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าที่จะวัด ทั้งนี้เพื่อช่วยป้องกันผลของไม่ว่างจรใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ติดตั้งแรงดันสูงและต้องป้องกันแรงจลน์ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไป

ความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่อาจมีค่าสูงและอาจมีความไม่เป็นเชิงเส้นตลอดจนช่วยป้องกันผลการขึ้นอยู่กัทิศทางกระแสของค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัสนี้ ซึ่งอาจเข้ามาเกี่ยวข้องกับผลการวัดได้ สำหรับความต้านทานผิวสัมผัสที่จุด A และ B ในรูปที่ 2.4(ก) นั้นจะไม่มีผลต่อการวัด เนื่องจากค่าความต้านทานนี้ไม่มีส่วนเข้ามาควบคุมกระแสที่ถูกบังคับให้ไหลคงที่ตลอดชิ้นสาร และความต้านทานผิวสัมผัสที่จุด C และ D ก็ไม่มีผลต่อการวัดเช่นกัน เนื่องจากใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าสูง ดังนั้นจึงดึงกระแสเข้าสู่มิเตอร์ในปริมาณน้อยมากจนตัดทิ้ง จากรูปที่ 2.4(ก) จะได้

$$V = \rho \frac{L}{Wd} I$$

ดังนั้น

$$\rho = \frac{Wd V}{L I}$$

(2.2)



รูปที่ 2.2 แสดงวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

(ก) วิธีสัมผัส 4 จุด

(ข) โพรบ 4 เข็ม

(ค) วิธี Van der Pauw

(ง) วิธี Van der Pauw ที่ประยุกต์ใช้วัดชิ้นสารที่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวสัมผัสจุด C และ D ในทิศที่กระแสไหล ควรทำให้แคบที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อว่าความกว้างของผิวสัมผัสจะได้ไม่ครอบคลุมความกว้างของเนื้อสารกึ่งตัวนำที่อยู่ข้างใต้จนทำให้ค่า  $L$  สั้นมากเกินไปยังผลให้การวัดเกิดความผิดพลาดง่าย นอกจากนี้ผิวสัมผัสด้านข้างทั้งสองที่ให้กระแสผ่านควร จะมีความสม่ำเสมอเพื่อทำให้ความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านเนื้อสารมีค่าสม่ำเสมอจริงๆ

ในทางปฏิบัติ จะใช้วิธีที่ง่ายขึ้นเพื่อให้ได้ผลการวัดที่เหมือนกันซึ่งกระทำโดยการใช้โพรบ 4 เข็ม ซึ่งมีบริษัทผู้ผลิตจำหน่ายเข็มในเชิงการค้า ลักษณะของหัวโพรบเป็นเข็มเล็กๆ ที่ทำจากโลหะที่สปริงตัวได้ 4 เข็ม ซึ่งเรียงอยู่ในแนวเดียวกันเป็นเส้นตรง ปรกติระยะห่างระหว่างเข็มจะน้อยกว่า 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข) เมื่อโพรบถูกกดให้ต่ำลงจนสัมผัสกับผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ เข็มด้านนอก 2 เข็ม จะถูกใช้เพื่อผ่านกระแสคงที่ไปยังสาร ในขณะที่เข็มด้านใน 2 เข็ม ใช้เป็นขั้ววัดความต่างศักย์ ในกรณีนี้ค่าความหนาแน่นกระแสจะไม่สม่ำเสมอ เว้นเสียแต่ถ้าป้อนกระแสจำนวนพอเหมาะให้ไหลผ่าน ปัญหาเรื่องสนามไฟฟ้าบนชิ้นสารก็จะหมดไป และได้มีการหามาแล้วว่า สำหรับการวัดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความหนาเป็น  $d$  โดยที่  $d \gg s$  เมื่อ  $s$  คือระยะระหว่างเข็มแต่ละคู่ และการวัดกระทำห่างจากขอบของแวนผลึกเพียงพอ จะได้สภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} (\Omega - cm) \quad \text{เมื่อ } s \ll d$$

ถ้าความหนาแน่นของแวนผลึก  $d$  หรือชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ต้องการวัดมีค่าน้อยกว่า  $s$  มาก ดังนั้น

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} d = 4.53 \frac{V}{I} d (\Omega - cm) \quad \text{เมื่อ } s \ll d$$

และถ้าเงื่อนไขในการวัดอยู่ระหว่างข้อกำหนดทั้งสองข้างต้น จะต้องนำค่าแฟกเตอร์ความถูกต้อง (correction factor) เข้ามาคูณกับค่า  $\rho$  ที่วัดได้

วิธีโพรบ 4 เข็มนี้มีประโยชน์มากต่อการวัดชิ้นสารกึ่งตัวนำที่บาง อย่างเช่น ในกรณีเมื่ออะตอมสารเจือของสารชนิดหนึ่งถูกแพร่ซึมด้วยกระบวนการทางความร้อน (thermal diffusion process) ลงไปในชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีสารเจือปนตรงข้าม หลังจากที่มีการแพร่ซึมประมาณ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ  $800 - 1,000^\circ C$ ) ชั้นบางๆ บนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนเป็นชนิดตรงข้ามกันในเนื้อสารนั้น ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมสารเจือใหม่จะมีมากกว่าอะตอมสารเจือเดิมที่บริเวณชั้นผิวหน้า อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ถูกแพร่ซึมจะเปลี่ยนแปลงตามความลึกของชิ้นสาร ดังนั้นแทนที่จะทำการวัดค่าเฉลี่ยของสภาพต้านทานไฟฟ้า เราจึงวัดค่าความต้านทานแผ่น  $R_s$  มีหน่วยเป็น  $\Omega / A$  และถูกกำหนดว่าเป็นความต้านทานของพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดใดๆ ของชั้นนั้นๆคือ

$$R_s = \frac{\rho}{d} = 4.53 \frac{V}{I} (\Omega / A)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ ภายใต้อะไรก็ตาม ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะชั้นที่ถูกแพร์ซิมนี้โดยทั่วไปใช้สร้างเป็นตัวต้านทานในวงจรรวม (integrated circuit) ถ้าต้องการตัวต้านทานที่มีค่า  $R$  ( $\Omega$ ) จะต้องทำการแพร์ซิมชั้นผิวของสารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาว  $L$  และความกว้างเป็น  $W$  ดังนั้นค่า  $R$  จะเป็น

$$R = R_s \frac{L}{W} \quad (\Omega)$$

วิธีที่สองใช้ในการวัดค่า  $\rho$  ของชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีรูปร่างใดๆ และมีความหนาเป็น  $d$  คือวิธีที่เรียกว่า Van der Pauw ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ค) จะเห็นว่าจุดสัมผัสเล็กๆ 4 จุด A B C และ D ถูกจัดเรียงอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ บนเส้นรอบรูป ทั้งนี้เพื่อให้กระแสไหลผ่านและวัดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมชั้นสารเหมือนดังที่กล่าวไว้

$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{AB,CD}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{BC,DA}\right) = 1 \quad (2.4)$$

ในกรณีที่แวนผลึก (ชั้นสาร) มีความสมมาตร อย่างเช่น มีรูปร่างเป็นวงกลม หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 5.1(ง) สมการข้างต้นจะลดรูปลงเป็น

$$\rho = \frac{\pi d V_{CD}}{\ln 2 I_{AB}} \quad (2.5)$$

ทำให้สามารถหาค่า  $\rho$  ได้จากการวัด  $V_{CD}$  และ  $I_{AB}$

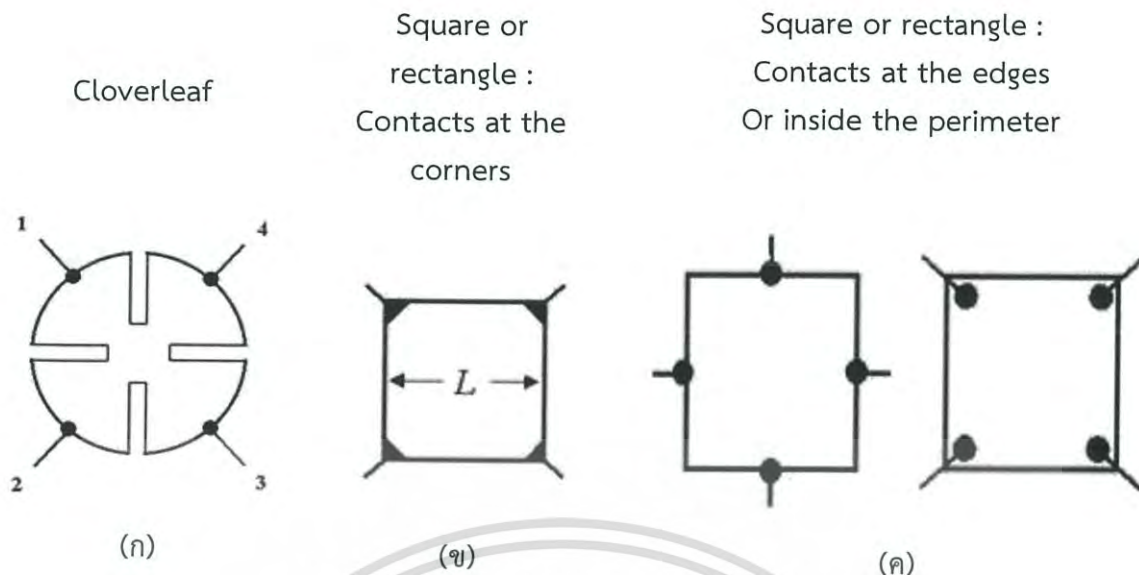
## 2.2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค Van der Pauw

วิธีของแวนเดอร์เพาว์ถูกนำมาใช้ในการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เช่น สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นและสภาพคล่องของพาหะ วิธีนี้ไม่จำกัดรูปร่างลักษณะของสารตัวอย่าง สารที่ต้องการวัดจะมีรูปร่างลักษณะใดก็ได้ เพียงแต่สามารถติดขั้วไฟฟ้าได้ก็จะสามารถวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ การวัดจะได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำต้องเป็นไปตามเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

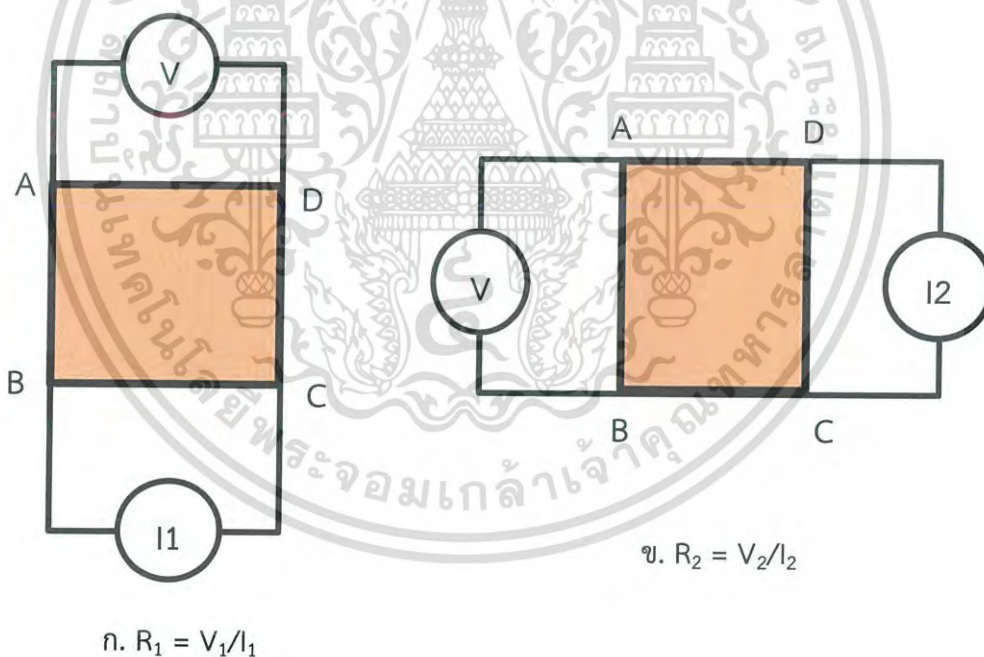
1. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.5
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง
3. สารตัวอย่างจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอ
4. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

วิธีของแวนเดอร์เพาว์เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้สำหรับตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง ซึ่งการวิเคราะห์สภาพคล่องตัวของสารใหม่นั้นมีความจำเป็นสำหรับเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนสารตัวอย่าง  
(ก) Preferred (ข) Acceptable (ค) Not Recommended



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงขั้วสัมผัสเพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์  
(ก) การวัดค่า  $R_A$  (ข) การวัดค่า  $R_B$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว B-C แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว A-D ดังรูปที่ 2.6 (ก.) จะได้ค่า  $R_A$  ดังสมการ

$$R_A = \frac{V_{AD}}{I_{BC}} \quad (2.6ก)$$

หลังจากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A-B แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว D-C ดังรูปที่ 2.6 (ข.) จะได้ค่า  $R_B$  ดังสมการ

$$R_B = \frac{V_{DC}}{I_{AB}} \quad (2.6ข)$$

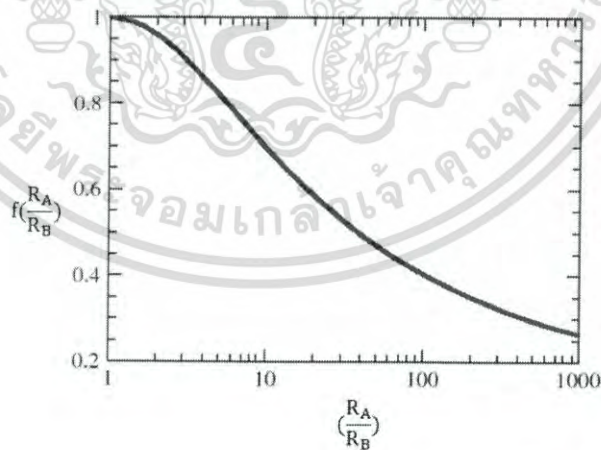
เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  แล้ว สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) ได้ดังนี้

$$R_s = \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_A + R_B}{2} \right) f \left( \frac{R_A}{R_B} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพอร์ โดย

$$f \left( \frac{R_A}{R_B} \right) = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_A - R_B}{R_A + R_B} \right)^2 \quad (2.8)$$

หรือ สามารถหาได้จากกราฟแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 กราฟแฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพอร์  $f\left(\frac{R_A}{R_B}\right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_s \times d$$

เมื่อ  $d$  คือความหนาของสารตัวอย่าง

ข้อจำกัดวิธีของแวนเดอร์เพาว์

1. ขั้วสัมผัสต้องมีคุณสมบัติที่ดี มิฉะนั้นจะทำให้เส้นความสม่ำเสมอของศักย์ไฟฟ้าไม่ถูกต้อง
2. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จากสมมติฐานที่ว่า สารตัวอย่างมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดใหญ่ และบางมาก คิดว่าเมื่อมี กระแสไฟฟ้าไหล ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้บนชิ้นสารตัวอย่างจะเสมือนอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน
3. จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับเหตุผลตามข้อ 1. และข้อ 2.
4. สารตัวอย่างต้องมีความหนาสม่ำเสมอ
5. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ
6. ต้องไม่ออกแรงกดที่ขั้วสัมผัสมากเกินไป เพราะอาจจะทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างเสียหาย เช่น แตกกร้าว เป็นต้น
7. ไม่ควรป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าผิดไป นอกจากนี้โวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูงด้วย
8. รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี
9. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารกึ่งตัวนำจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

## 2.3 ค่าความคล่องตัวและสภาพนำไฟฟ้า

ในงานนี้จะกล่าวถึงกลไกการกระเจิงหลักๆ 2 ประเภท ที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าความคล่องตัวของพาหะ นั่นคือ การกระเจิงอันเนื่องมาจากการสั่นของโครงผลึก และการกระเจิงด้วยสารเจือ จากนั้นจะแสดงวิธีหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วพัดพาของพาหะและสนามไฟฟ้า หัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำทั้งแบบบริสุทธิ์และแบบเจือปนรวมทั้งกล่าวถึงปริมาณความหนาแน่นกระแสพัดพา (drift current density) ในสารและหัวข้อสุดท้ายจะอธิบายถึงความเร็วอิมพัลส์ของพาหะและอิเล็กตรอนที่มีค่าความคล่องตัวสูงในสาร

### 2.3.1 กลไกการกระเจิงพาหะ

หากมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าค่าคงที่ตกคร่อมชิ้นสารกึ่งตัวนำ จะทำให้มีการสร้างสนามไฟฟ้า

$\xi_z$  ( $\text{Vcm}^{-1}$ ) เกิดขึ้นภายในชิ้นสารและสนามนี้ทำให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะประจุอิสระให้พัดพา (drift) ไปในทิศของแรงกระทำนั้นๆ อย่างเช่น ถ้าพาหะประจุอิสระเป็นอิเล็กตรอน แรงที่กระทำต่อไม่ปรากฏใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดกระแสไหลในชั้นสารและเรียกกระแสนี้ว่า กระแสพัดพา (drift current)

เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าคงที่กระทำต่อพาหะประจุในสุญญากาศ ในที่นี้ สมมติว่า พาหะคืออิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะมีความเร่ง  $a$  เป็นไปตามกฎของนิวตัน (Newton) นั่นคือ

$$a = q / m_e \quad (2.9)$$

โดยคิดว่าอิเล็กตรอนเริ่มเคลื่อนที่จากสภาพนิ่ง ดังนั้น ที่เวลา  $t$  ใดๆ อิเล็กตรอนจะมีความเร็ว  $v$  เป็น

$$v = \int_0^t a dt = qt / m_e \quad (2.10)$$

จะเห็นว่าความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นตามเวลา

อย่างไรก็ตามหากในขณะที่พาหะประจุเคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำแล้วมีการวิ่งชนกับสิ่งกีดขวางต่างๆทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การกระเจิงพาหะ (carrier scattering) และโดยทั่วไปกลไกการกระเจิงพาหะที่สำคัญๆ มีอยู่ 2 ชนิดคือ

(ก) การกระเจิงที่เกิดจากการสั่นของโครงผลึก (lattice scattering) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการชนของพาหะที่กำลังเคลื่อนที่กับโครงผลึกที่สั่นไหวอันเนื่องมาจากความร้อนการสั่นไหวของโครงผลึกเหล่านี้จะทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของสนามพลังงานศักย์ภายในของแข็งและทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานระหว่างพาหะและโครงผลึกได้

การมีอันตรกิริยา (interaction) กับการสั่นของโครงผลึกในลักษณะนี้ สามารถมองได้เป็นการชนกับอนุภาคที่มีพลังงาน ซึ่งเรียกอนุภาคนี้ว่า โฟนอน อนุภาคโฟนอนก็เหมือนกับอนุภาคโฟตอนที่ มีพลังงานเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (quantize) โดยมีค่าเป็น  $h\nu$  โดยที่  $\nu$  คือความถี่ของโครงผลึกที่สั่นและ  $h$  คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck) นอกจากนี้ พลังงานและโมเมนตัมของโฟนอนยังมีความสัมพันธ์กันด้วย โดยที่สามารถหาค่าปริมาณทั้งสองนี้ได้โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของอะตอมในโครงผลึกซึ่งแรงกระทำของอะตอมแต่ละอะตอมที่อยู่ข้างเคียงกันเป็นแบบยืดหยุ่น

ในการชนกันระหว่างพาหะที่เคลื่อนที่และโฟนอนจะต้องเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์ทั้งพลังงานและโมเมนตัมก่อน และหลังการชนเสมอ นั่นคือต้องไม่มีการสูญหายทั้งพลังงานและโมเมนตัม เพียงแต่ขนาดและทิศทางความเร็วของพาหะก่อนและหลังการชนจะมีเปลี่ยนแปลงซึ่งลักษณะนี้ทำให้พาหะเกิดการกระเจิง ดังนั้นจึงสูญเสียพลังงานจนที่ได้สะสมไว้จากการที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกตั้งแต่การกระเจิงครั้งก่อนจากนั้นพาหะก็จะถูกเร่งต่อไปอีกในทิศทางสนามไฟฟ้า

และการชนก็เกิดขึ้นอีกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ด้วยเหตุนี้พาหะจึงเกิดการกระเจิงซ้ำแล้วซ้ำอีก จะเห็นได้ว่าหากอุณหภูมิเพิ่มการกระเจิงอันเนื่องจากการสั่นของโครงผลึกจะเกิดรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ไม่วากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) การกระเจิงด้วยสารเจือปน (impurity scattering) มีสาเหตุมาจากการที่อะตอมสารเจือปนซึ่งแตกตัวเป็นไอออนแล้วกระจายอยู่ ณ ตำแหน่งต่างๆในโครงผลึก เนื่องจากการมีประจุสุทธิอยู่กับอะตอมสารเจือที่แตกตัวแล้ว จึงทำให้ไอออนเหล่านี้มีแรงกระทำกับพาหะอิสระที่วิ่งผ่านเข้ามาใกล้ เป็นเหตุให้พาหะนั้นมีการเปลี่ยนทิศทางที่เคลื่อนที่ (เหมือนกับดาวหางที่เข้าสู่สนามโน้มถ่วงของดวงดาว) กลไกการกระเจิงแบบนี้จะมีความรุนแรงน้อยลง หากพาหะอิสระเคลื่อนที่เร็วขึ้น (นั่นคือ ที่สภาวะอุณหภูมิสูงขึ้น) และพาหะจะใช้เวลาที่น้อยลงที่จะอยู่ใกล้กับอะตอมสารเจือที่แตกตัวเป็นไอออน

### 2.3.2 ความเร็วพาหะเฉลี่ยและความคล่องตัวของพาหะ

การหาค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะประจุที่เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนาม  $\xi$  ในที่นี้คิดว่าการเคลื่อนที่ของพาหะมีกลไกการกระเจิงรวมอยู่ด้วยในลักษณะที่เมื่อเริ่มต้นที่เวลา  $t=0$  จะมีจำนวนพาหะเป็น  $n_0$  ซึ่งเป็นการวัดมีการชนของพาหะครั้งสุดท้ายและแล้วในเวลา  $t$  ต่อมาจะยังคงมีจำนวนพาหะ  $n(t)$  ที่ยังไม่มีการชน (กระเจิง) ครั้งที่สองเกิดขึ้นและยังคงถูกเร่งในทิศทางสนามไฟฟ้าต่อไปในช่วงระหว่างเวลา  $t$  และ  $t+dt$  จะมีจำนวนพาหะ  $dn$  เกิดการชนครั้งที่สองและพาหะจำนวนนี้จะสูญเสียโมเมนตัมในทิศทางสนามไฟฟ้า ดังนั้นจำนวนพาหะที่ยังคงถูกเร่งอยู่ในสนามจะลดลงด้วยปริมาณ  $dn$  และเมื่อใช้การประมาณอันดับที่หนึ่งจะได้  $dn$  เป็นสัดส่วนกับจำนวนพาหะที่ยังไม่ถูกชน  $n$  และเป็นสัดส่วนกับเวลา ส่วนที่เปลี่ยน  $dt$  ใช้ค่า  $1/\tau$  เป็นค่าคงที่ของสัดส่วน ดังนั้น

$$-dn = \frac{1}{\tau} n dt \quad (2.11)$$

โดยใช้วิธีแยกตัวแปร จะได้ผลเฉลยของสมการ (2.11) เป็น

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.12)$$

โดยที่  $\tau$  มีมิติเป็นเวลาและคือค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการชน 2 ครั้งที่ติดกัน (หรือเรียกว่า เวลาเฉลี่ยปลอดการชน) ในการวิเคราะห์ค่า  $\tau$  นี้ จะต้องหาความน่าจะเป็นสำหรับการชนระหว่างช่วงเวลา  $dt$  ซึ่งก็คือ  $dn/n_0$  จากสมการ (2.11) และ (2.12) จะได้

$$-\frac{dn}{n_0} = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) dt \quad (2.13)$$

ทางด้านขวามือของสมการ (2.13) เป็นฟังก์ชันการกระจายเวลาแบบปัวส์ซอง (Poisson distribution) ซึ่งพาหะจะเคลื่อนที่จนกระทั่งเกิดการชน และจะเห็นว่าสัดส่วนของพาหะในขณะเริ่มต้น  $n_0$  ส่วนใหญ่จะมีการชนอีกครั้งที่เวลาใกล้ๆ  $t=0$  ทั้งนี้เนื่องจากที่เวลา  $t=0$  ทางขวามือของสมการ (2.13) จะมีความมากที่สุดอย่างไรก็ตาม จะมีพาหะเพียงส่วนน้อยที่เคลื่อนที่โดยใช้เวลานาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเนาเบเซประเยนชดานการค้ำ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่จะเกิดการชนครั้งต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $\exp(-\frac{t}{\tau})$  จะไม่เข้าสู่ค่าศูนย์ในเวลาจำกัด ดังนั้นจะมีอิเล็กตรอนหรือโฮลเพียงบางตัวเท่านั้นที่ถูกเร่งจนกระทั่งมีความเร็วสูงมาก ในขณะที่พาหะส่วนใหญ่จะมีค่าความเร็วต่ำก่อนการชน และตามด้วยการกระเจิงของพาหะอีก ดังนั้นในการหาค่าความเร็วเฉลี่ยหรือเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนต้องทำการบอกเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการชนครั้งที่สองของพาหะทุกตัวพร้อมกับทำการกำหนดน้ำหนักที่เหมาะสมให้กับแต่ละค่าเวลา  $t$  โดยที่ค่า  $t$  นี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะที่เกิดการชนในเวลาเดียวกันและค่าฟังก์ชันน้ำหนักนี้จะถูกกำหนดเป็น  $|dn/n_0|$  ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.13) นอกจากนี้ ยังสมมติว่าความเร็วของพาหะ  $v_0$  (ทั้งขนาดและทิศทาง) ในทันทีทันใดหลังการชนครั้งหนึ่งๆจะเปลี่ยนเป็นแบบสุ่ม

สมมติให้  $r$  เป็นเวกเตอร์รัศมี ดังนั้นที่เวลา  $t$  ใดๆ พาหะที่ถูกเร่งภายใต้อิทธิพลสนามไฟฟ้า  $\xi$  จะมีเวกเตอร์รัศมีเป็น

$$r = r_0 + v_0 t + q t^2 / 2m^*$$

โดยที่  $r_0$  คือตำแหน่งตั้งต้นและพจน์  $q/m^*$  คือความเร่งของพาหะเมื่อ  $m^*$  คือมวลประสิทธิผลของพาหะที่เคลื่อนที่ในผลึก ฉะนั้นระยะทางเฉลี่ยที่พาหะเดินทางในช่วงเวลา  $t$  เป็น

$$r - r_0 = v_0 t + [q/2m^*] t^2$$

เนื่องจากความเร็วตั้งต้น  $v_0$  เป็นแบบสุ่มและเวลาก่อนการชนครั้งต่อไป  $t$  จะไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ดังนั้นค่าเฉลี่ยของผลคูณ  $v_0$  และ  $t$  จึงเท่ากับผลคูณของค่าเฉลี่ย  $v_0$  และค่าเฉลี่ย  $t$  แต่เนื่องจากค่าเฉลี่ยของปริมาณสุ่ม  $v_0$  มีค่า = 0 ดังนั้นพจน์แรกของทางขวามือของสมการข้างต้นนี้จึงมีค่า = 0 ด้วยเหตุนี้ความเร็วพัคพาเฉลี่ยของพาหะ  $v_d$  เป็นไปตามสมการ

$$v_d = \frac{r - r_0}{t} = [q/2m^*] [t^2/t] \quad (2.14)$$

ค่าเฉลี่ยของ  $t^2$  และ  $t$  สามารถคำนวณได้โดยการใช้ฟังก์ชันน้ำหนักที่เหมาะสม นั่นคือ  $|dn/n_0|$  ดังได้กล่าวไว้แล้ว ดังนั้น

$$t = \int_0^{n_0} t \frac{dn}{n_0} = \int_0^\infty t \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} dt = \tau$$

$$t^2 = \int_0^{n_0} t^2 \frac{dn}{n_0} = \int_0^\infty t^2 \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} dt = 2\tau^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทิกรัลของสองสมการข้างต้นสามารถแก้ได้โดยการใช้การอินทิเกรตแบบแยกส่วน จะเห็นได้ว่าค่า  $\tau$  เป็นค่าเฉลี่ยของ  $t$  จริง ซึ่งเรียกว่า เวลาเฉลี่ยปลอดการชน (mean free time) แทนค่า  $\langle t \rangle$  และ  $\langle t^2 \rangle$  ลงในสมการ (2.14) ดังนี้

$$v_d = q\tau / m^* \quad (2.15)$$

จะเห็นว่าความเร็วพัดพาเป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามไฟฟ้าและถ้าสนามไฟฟ้ามีค่าคงที่  $v_d$  จะมีค่าคงที่ด้วยค่าแฟกเตอร์สัดส่วนในสมการ (2.15) ถูกเรียกว่า ความคล่องตัวของพาหะและเขียนแทนด้วยตัวอักษร  $\mu$  นั่นคือ

$$\mu_{e,h} = \frac{q\tau}{m_{e,h}^*} ; v_d = \mu \quad (2.16)$$

ตัวอักษร e และ h ที่ห้อยท้ายค่า  $\mu$  หมายถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ สารกึ่งตัวนำส่วนมากจะมีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูงกว่าของโฮล และในสารกึ่งตัวนำบางชนิด อย่างเช่น GaAs หรือ InSb ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงกว่าของโฮลประมาณ 10 เท่าหรือมากกว่าค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่อุณหภูมิห้องของสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์ชนิดต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 2.1 ดังได้กล่าวไปแล้วว่า ความคล่องตัวเป็นผลมาจากการกระเจิงพาหะอันเนื่องจากการสั่นของโครงผลึกและการกระเจิงด้วยสารเจือ การกระเจิงทั้งสองประเภทจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในลักษณะตรงกันข้าม กล่าวคือที่อุณหภูมิ  $T$  พาหะที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำจะมีความเร็วเฉลี่ยเป็นความเร็วเชิงความร้อน  $v_{th}$  และเป็นสัดส่วนกับ  $T^{1/2}$  สำหรับการสั่นไหวของโครงผลึก (lattice vibration) อันเนื่องจากอุณหภูมิจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตาม  $T$  ซึ่งถ้าอุณหภูมิเพิ่มจะทำให้การชนกันระหว่างพาหะและโครงผลึกเกิดบ่อยขึ้น ยังส่งผลให้ระยะทางเฉลี่ยระหว่างเหตุการณ์การชน 2 ครั้งที่ติดกันมีระยะสั้นลงซึ่งเขียนแทนด้วย  $l_L$  และเรียกค่านี้อันว่า ระยะทางเฉลี่ยปลอดการชน (mean free path) ซึ่งในกรณีเกิดการกระเจิงพาหะโดยการสั่นของโครงผลึกค่า  $l_L$  จะเป็นปฏิภาคผกผันกับ  $T$  ดังนั้นถ้าแทนค่า  $\tau = l_L / v_{th}$  ลงในสมการ (2.17) จะได้ค่าความคล่องตัวอันเนื่องจากการกระเจิงด้วยโครงผลึกเพียงอย่างเดียวเป็น  $\mu_L$  นั่นคือ

$$\mu_L \propto T^{-3/2} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 300 K

วัสดุ	$\mu_e (cm^2V^{-1}s^{-1})$	$\mu_h (cm^2V^{-1}s^{-1})$
Ge	3,900	1,900
Si	1,450	500
GaAs	8,500	480
GsP	450	20
InSb	80,000	200
InAs	23,000	100
InGaAs	11,000	210

สำหรับการกระเจิงด้วยสารเจือปนนั้นจะมีผลก็ต่อเมื่อ หากปริมาณพลังงานความร้อน  $kT$  ของพาหะ (ที่เคลื่อนที่ในระยะ  $r$  จากอะตอมสารเจือที่มีการแตกตัวเป็นไอออน) มีปริมาณพอๆกับพลังงานศักย์ของพาหะที่สร้างขึ้น ณ ตำแหน่งนั้นและค่าพลังงานศักย์โดยปรกติจะแปรตาม  $r^{-1}$  ดังนั้นระยะ  $r$  ที่ทำให้เกิดผลการกระเจิงด้วยสารเจืออย่างเด่นชัดจะเป็นสัดส่วน  $T^{-1}$  และเนื่องจากแต่ละอะตอมของสารเจือจะมีพื้นที่ที่ครอบคลุมการกระเจิง (เรียกว่า scattering cross section) ของพาหะที่เคลื่อนที่ผ่านเป็น  $\pi r^2$  ดังนั้นระยะทางเฉลี่ยปลอดการชนอันเนื่องจากการกระเจิงด้วยสารเจือ  $l_j$  จึงเป็นปฏิภาคผกผันกับพื้นที่ที่ครอบคลุมการกระเจิง ดังนั้น  $l_j$  จึงแปรตาม  $T^2$  ถ้าแทน  $\tau = l_j/v_{th}$  ลงในสมการ (2.16) จะได้ค่าความคล่องตัวอันเนื่องจากการกระเจิงด้วยสารเจืออย่างเดียวเป็น  $\mu_j$  ดังนั้น

$$\mu_j \propto T^{3/2} \quad (2.18)$$

ในกรณีที่มีกลไกการกระเจิงพาหะอันเนื่องจากการสั่นของโครงผลึกและสารเจือเกิดขึ้นทั้งสองอย่างจะสามารถแบ่งกลุ่มของพาหะ  $dn$  ที่เกิดการชนในระหว่างเวลา  $t$  และ  $t + dt$  ได้เป็น 2 กลุ่มย่อยที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นจึงสามารถรวมพาหะกลุ่มย่อยได้โดยตรงได้และในที่นี้ สมการ (2.11) สามารถเขียนได้เป็น

$$-dn = -(dn_1 + dn_2) = \frac{n}{\tau_1} dt + \frac{n}{\tau_2} dt = \left( \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) ndt$$

โดยที่  $\tau_1$  คือค่าเวลาเฉลี่ยปลอดการชนอันเนื่องมาจากการกระเจิงด้วยการสั่นของโครงผลึก และ  $\tau_2$  คือค่าเวลาเฉลี่ยปลอดการชนของการกระเจิงด้วยสารเจือ เทียบสมการข้อต้นกับสมการ (2.11) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}$$

เนื่องจาก  $\mu \propto \tau$  ดังนั้น

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} \quad (2.19)$$

จะเห็นได้ว่าการขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของค่า  $\mu$  ถูกกำหนดจากค่า  $\mu$  ที่มีน้อยในจำนวนค่าย่อย 2 ค่า นั่นคือถูกกำหนดด้วยค่า  $\mu_I$  ที่อุณหภูมิต่ำและกำหนดด้วยค่า  $\mu_L$  ที่อุณหภูมิสูงและค่า  $\mu$  จะมีค่าสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิมกกลางๆ นอกจากนี้หากมีการเจือกึ่งตัวนำด้วยสารเจือในปริมาณสูง ค่า  $\mu_I$  (และ  $\mu$ ) จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิต่ำ

สำหรับสารกึ่งตัวนำในความเป็นจริง สามารถประเมินค่า  $\mu$  ได้โดยการคาดคะเนเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากอาจมีกลไกการกระเจิงชนิดอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องอีก ดังนั้นในวัสดุประเภทที่เป็นผลึกกึ่งไอออนิก อย่างเช่น GaAs หมอกอิเล็กตรอนของอะตอม Ga จะถูกดึงเข้ามาใกล้ทางนิวเคลียสของ As ทำให้ตำแหน่งกำหนดของ Ga ในโครงผลึกมีความเป็นบวกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตำแหน่งกำหนดของ As กลายเป็นลบเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างตำแหน่งทั้งสองและเรียกวัดขุ่นชนิดนี้ว่า วัสดุโพลาไรซ์ (polarized) หรือวัสดุมีขั้วและหากมีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ในผลึกมีขั้ว อิเล็กตรอนตัวนี้ก็จะมอันตรกิริยา (interact) กับสนามไฟฟ้าภายใน (polar field) และเกิดการกระเจิงซึ่งอาจทำให้สูญเสียพลังงานและโมเมนตัม ดังนั้นในทางปฏิบัติตัวเลขยกกำลังของ  $T$  มักไม่ใช่ค่า  $3/2$

### 2.3.3 สภาพนำไฟฟ้า

ในหัวข้อที่แล้ว ได้มีการหาความเร็วพัดพาของพาหะประจุในสารกึ่งตัวนำภายใต้อิทธิพลสนามไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติพาหะประจุในสารกึ่งตัวนำจะประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสพัดพาได้เป็น 2 ส่วนคือ

$$J_e(\text{drift}) = -qn(v_d)_e = +qn\mu_e$$

$$J_h(\text{drift}) = +qp(v_d)_h = +qp\mu_h$$

ด้วยเหตุนี้ ความหนาแน่นกระแสพัดพาจริงจะเป็นผลรวมของสมการย่อยข้างต้นถึงแม้ว่าประจุของอิเล็กตรอนและโฮลจะมีทิศตรงกันข้าม แต่ความเร็วของอิเล็กตรอนและโฮลในสนามไฟฟ้า  $\mathcal{E}$  ก็มีทิศตรงกันข้ามด้วย ดังนั้น

$$J(\text{drift}) = J_e + J_h = q(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เพื่อนบ้านที่อยู่ใกล้ๆ ได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนเพื่อทำให้อะตอมสารเจือแตกตัวเป็นไอออน

ความคล่องตัวที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าของสารเรียกว่า ความคล่องตัวของพาหะ (conductivity mobility) ซึ่งหมายถึงการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมาก นั่นคือ อิเล็กตรอนในสารเอ็น และโฮลในสารพีและค่าความคล่องตัวของพาหะข้างน้อยในสารโดยปกติให้ชื่อว่า ความคล่องตัวของพาหะ (drift mobility) โดยทั่วไปค่าความคล่องตัวสามารถวัดได้โดยวิธีปรากฏการณ์ฮอลล์

### 2.3.4 การหาความเข้มข้นพาหะข้างมาก ชนิดของสาร และค่าความคล่องตัวด้วยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

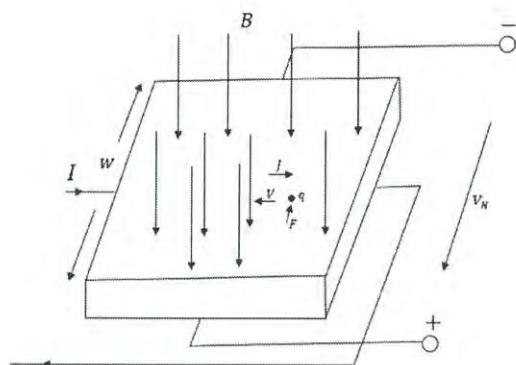
ในปี ค.ศ. 1874 E. H. Hall ได้ค้นพบเทคนิคที่ใช้วัดความเข้มข้นของพาหะที่เคลื่อนที่ รวมถึงบอกให้ทราบว่า พาหะเหล่านั้นเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮล และหากทราบค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร ก็จะสามารถคำนวณหาค่าความคล่องตัวของพาหะได้ด้วย

ปรากฏการณ์ฮอลล์มีผลมาจากแรง  $F$  ซึ่งเกิดจากการให้กระแสไหลผ่านชิ้นสาร (ในที่นี้สมมติเป็นสารเอ็น) ด้วยความหนาแน่น  $J$  โดยที่มีการบ่อนสนามแม่เหล็ก  $B$  ( $Wm^{-2}$ ) ในทิศทางตั้งฉากกับกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.9 แสดงได้ดังสมการ

$$F = q(E + v \times B) \quad (2.23)$$

โดยที่เวกเตอร์  $F$   $J$  และ  $B$  มีทิศทางเป็นไปตามกฎมือขวาในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ดังนั้นทิศของ  $F$  จึงเป็นไปตามที่แสดงดังรูป (ตั้งฉากกับทั้ง  $J$  และ  $B$ ) และแรงนี้คือแรงที่กระทำต่อพาหะประจุซึ่งในที่นี้คืออิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วพดพา  $V$  ในทิศตรงข้ามกับทิศการไหลของกระแสพาหะข้างมาก (conventional current) อย่างไรก็ตาม เวกเตอร์  $F$  ในสมการ (2.23) จะขึ้นอยู่กับกระแส  $J$  แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของพาหะ ดังนั้นเวกเตอร์  $F$  จะยังคงมีทิศทางเหมือนเดิม นั่นคือ มีทิศที่ผลักพาหะให้ไปอยู่ด้านหลังของชิ้นสารโดยไม่คำนึงถึงการนำสารชนิดพีที่มีพาหะข้างมากเป็นโฮล (ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับกระแส) มาแทนสารเอ็นก็ตาม เมื่อพาหะประจุถูกผลักให้ไปอยู่ด้านหลังจะทำให้ด้านหน้าของสารขาดพาหะและสูญเสียความเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้นขณะนี้จะมีพาหะที่เคลื่อนที่ได้เป็นจำนวนมากอยู่ที่ด้านหลังและมีอะตอมสารเจือที่แตกตัวเป็นไอออนซึ่งมีประจุชนิดตรงข้ามอยู่ด้านหน้าของสาร ในกรณีรูปที่ 2.9 อิเล็กตรอนจะถูกผลักไปด้านหลัง ซึ่งจะทำให้ผิวสัมผัสด้านนี้กลายเป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านหน้ายังมีผลให้สามารถวัดแรงดันไฟฟ้า  $V_H$  ตกคร่อมชิ้นสารได้ดังแสดงในรูปและเรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันฮอลล์ (Hall voltage) การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นี้สามารถประยุกต์ใช้วัดพาหะประจุโฮลในสารพีได้เช่นกัน แต่ทิศทางของ  $V_H$  จะกลับกับในสารเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดในสารเอ็น ซึ่งมีความหนาแน่นกระแส  $J$  ไหลในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $B$

ค่าของแรงดันฮอลล์สามารถหาได้จากแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า  $\xi_H$  [เรียกว่า สนามฮอลล์ (Hall field) โดยที่ค่า  $\xi_H \times w = V_H$ ] ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก  $B$  ที่กระทำต่อพาหะ โดยที่แรงทั้งสองนี้มีขนาดเท่ากันและมีทิศตรงกันข้าม ดังนั้นผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงทั้งสองจึงเท่ากับศูนย์

ในกรณีที่  $J$  ตั้งฉากกับ  $B$  สามารถเขียนสมการผลรวมขนาดของแรงดังนี้

$$F \text{ (แม่เหล็ก)} + F \text{ (ไฟฟ้า)} = 0$$

หรือ

$$JB + nq_H = 0$$

$$\therefore R_H = -\frac{1}{nq} JB \quad (2.24)$$

และสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $R_H$  กำหนดจาก

$$R_H \triangleq \frac{V_H}{JB} \quad (2.25)$$

ดังนั้นสำหรับอิเล็กตรอน

$$R_H = -\frac{1}{nq} \quad (2.26ก)$$

และสำหรับโฮลซึ่งแรง  $F$  (ไฟฟ้า) มีทิศตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่  $R_H = +\frac{1}{pq}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.26ข) ราคา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันที่จริงแล้ว ความเร็วพัดพาของพาหะ (ซึ่งมีผลต่อแรงอันเนื่องจากสนามแม่เหล็ก) มีค่าไม่คงที่ หากแต่เป็นค่าเฉลี่ยทางสถิติดังได้กล่าวไปแล้ว และในบางครั้งจะมีผลที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยทั้งนี้ขึ้นกับขนาดของ  $|B|$  ยังผลให้ต้องมีการคูณค่าแฟกเตอร์ความถูกต้อง  $r_H$  (เรียกว่า แฟกเตอร์สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ปกติจะมีค่าระหว่าง 1 และ 1.5 หรือบางครั้งอาจมีค่าน้อยจนถึง 0.5) เข้าไปในส่วนของ  $F$  (แม่เหล็ก) ในสมการที่พิจารณาถึง ทำให้

$$R_H = -\frac{r_H}{nq} \quad \text{หรือ} \quad R_H = +\frac{r_H}{pq} \quad (2.27)$$

เมื่อชั้นสารมีจำนวนอิเล็กตรอนและโฮลพอกกัน  $R_H$  จะหาได้จาก

$$R_H = \frac{p\mu_n^2 - n\mu_p^2}{q(p\mu_n + n\mu_p)^2} \quad (2.28)$$

(ในที่นี้เพื่อความสะดวก สมมติให้  $r_H \sim 1$ )

การวัดค่า  $R_H$  จะทำให้สามารถหาค่าความเข้มข้นพาหะได้โดยตรง ซึ่งสามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิใดๆ ตามต้องการ หากการวัดนั้นกระทำที่อุณหภูมิต่ำมากพอ ซึ่งอะตอมสารเจือบางส่วนยังไม่แตกตัวเป็นไอออน ในสถานะเช่นนี้ผลการวัดจะให้ค่าความเข้มข้นพาหะเฉพาะส่วนของอะตอมสารเจือที่แตกตัวแล้วที่อุณหภูมินั้นๆ ในทำนองเดียวกัน สำหรับผลึกที่มีข้อบกพร่องชนิดดิสโลเคชัน (dislocation) เป็นจำนวนมากจะมีอะตอมสารเจือในปริมาณมากพอควรที่อาจไม่แตกตัวเนื่องจากอาจเกาะอยู่ที่เส้นขอบเม็ดผลึกหรือเกาะอยู่ที่ดิสโลเคชันต่างๆ (ซึ่งอันที่จริงแล้วอะตอมน่าจะอยู่ที่ตำแหน่งโครงผลึกที่เหมาะสม) ดังนั้น  $R_H$  ที่วัดได้จะเป็นของพาหะเฉพาะส่วนที่แอกทีฟเท่านั้น การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นวิธีที่มีความไวในการวัดสูงโดยสามารถใช้วัสดุสารที่มีความเข้มข้นพาหะในปริมาณต่ำถึงระดับ  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  ได้จากค่าจำกัดความของสภาพนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำแบบเจือปนจะได้ว่า

$$\mu_n = \frac{\sigma}{q\bar{p}} \quad \text{หรือ} \quad \mu_p = \frac{\sigma}{q\bar{n}} \quad (2.29)$$

แทนค่าสมการ (2.26) ลงในสมการ (2.29) จะได้

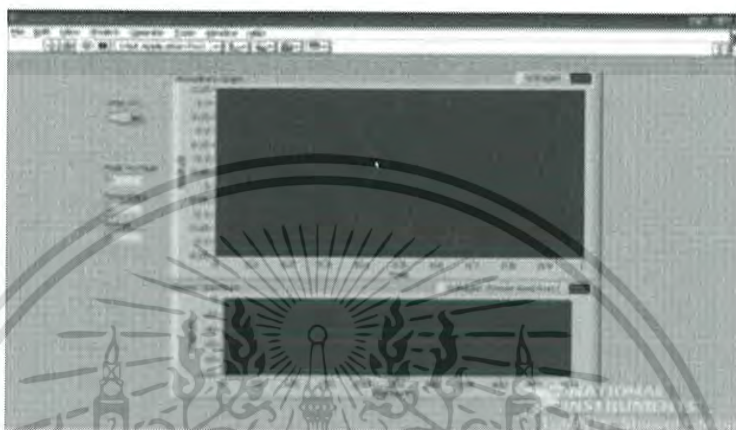
$$\mu_{e,h} = \sigma |R_H|_{e,h} \quad (2.30)$$

การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ มีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกเหนือจากใช้วัดพารามิเตอร์ของสารกึ่งตัวนำ อย่างเช่น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับ

ตำแหน่งเชิงมุมและการตรวจจับปริมาณสนามแม่เหล็กสถิต เป็นต้น  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 โปรแกรม LabVIEW

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LABVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือจะเรียกย่อๆ ว่า VI ซึ่งหมายถึง เครื่องมือวัดเสมือน ดังตัวอย่าง จากรูปนี้เป็น Oscilloscope ที่ได้ทำการสร้างขึ้นบนหน้าจคอมพิวเตอร์



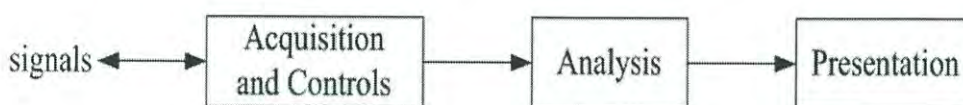
รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างเครื่องมือวัดเสมือนที่สร้างจาก LabVIEW

LabVIEW มีจุดกำเนิดขึ้นในปี 1983 โดยทางบริษัท National Instrument ได้เริ่มการค้นคว้า เพื่อจะหาวิธีการที่จะลดเวลาในการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในงานด้านระบบเครื่องมือวัดซึ่งเป็นจุดเริ่มของแนวความคิดการสร้าง LabVIEW หลังจากการใช้เวลาวิจัยอยู่ 3 ปี ในปี 1986 บริษัทได้ปล่อย LabVIEW Version 1 สู่ตลาดเพื่อใช้กับคอมพิวเตอร์ Macintosh เท่านั้น เพราะแม้ว่าเครื่อง Macintosh จะไม่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านวิศวกรรม แต่ด้วยลักษณะการแสดงผลแบบกราฟฟิกของเครื่อง Macintosh ทำให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับ LabVIEW สำหรับระบบปฏิบัติการอื่นที่ไม่ใช่ GUI นั้นยังไม่มี ความเหมาะสมที่จะใช้กับ LabVIEW ดังนั้นสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล(PC) ทาง NI ต้องรอจนกระทั่งระบบปฏิบัติการ Windows เกิดขึ้น เสียก่อน

ในปี 1990 ทาง NI ได้ประสบผลสำเร็จในการนำ LabVIEW version 2 ออกสู่ตลาด โดยได้ปรับแก้และเขียนระบบควบคุมใหม่ทั้งหมดตามคำแนะนำของผู้ใช้งาน โดยเฉพาะการเขียน Compiler ที่ทำให้เวลาการทำงานของโปรแกรมรวดเร็วขึ้น ทัดเทียมกับการเขียนด้วยภาษาขั้นพื้นฐาน เช่น C และต่อมาเมื่อเทคโนโลยีด้านระบบปฏิบัติของ PC มีความพร้อมใช้งานกับ GUI ทางบริษัทจึงได้ผลิต LabVIEW for Windows และ LabVIEW for SUN เข้าสู่ตลาดในปี 1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุมทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบตามผู้ใช้ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ



รูปที่ 2.9 Block Diagram เครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW

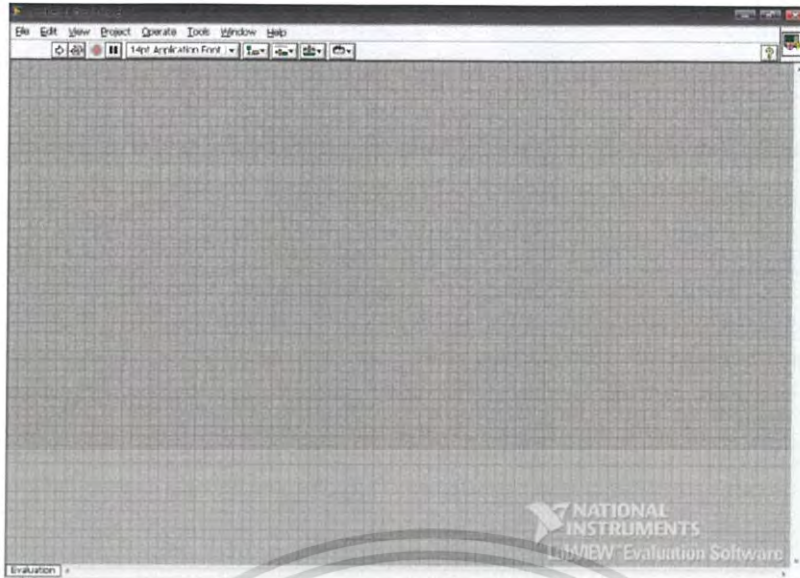
1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบในที่นี้คือคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจมาจากการ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า)
2. Analysis หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วอาจจะผ่านฟังก์ชันในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสื่อที่วัดได้และใช้งานได้
3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลเฉพาะที่วัดได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์กับเวลา หรือ Spectrum Analysis จะแสดงสัญญาณในรูปแบบการพิมพ์ออกมาเป็นรายงานหรือเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์

ส่วนประกอบต่างๆ ใน LabVIEW โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดย LabVIEW เราจะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) เพราะ ลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้งานจะเหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรมในขณะเดียวกันหลังจากของอุปกรณ์เสมือนจริงเหล่านั้นจะเป็นการทำงานของ ฟังก์ชัน, Subroutines และโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป สำหรับ VI หนึ่งๆ จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ 1.Front Panel 2.Block Diagram 3.Icon และ Connector

ทั้งสามส่วนนี้จะประกอบกันขึ้นมาเป็นอุปกรณ์เสมือนจริง ลักษณะและหน้าที่ของส่วนประกอบทั้ง สามมีดังต่อไปนี้

1. Front Panel หรือหน้าปัด จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (หรือที่นิยมเรียก User Interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัดของของเครื่องมือหรือ อุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดต่างๆ ไป โดยทั่วไปจะประกอบด้วย สวิตช์ปิดเปิด, ปุ่มบิด, ปุ่มกด จอแสดงผลหรือแม้แต่ค่าที่ผู้ใช้สามารถกำหนด สำหรับผู้ที่คุ้นเคยกับการเขียนโปรแกรมประเภท Visual ทั้งหลายคงเข้าใจกันดีว่า Front Panel นี้จะเปรียบเสมือนเป็น GUI ของโปรแกรมหรือ VI นั้นเอง

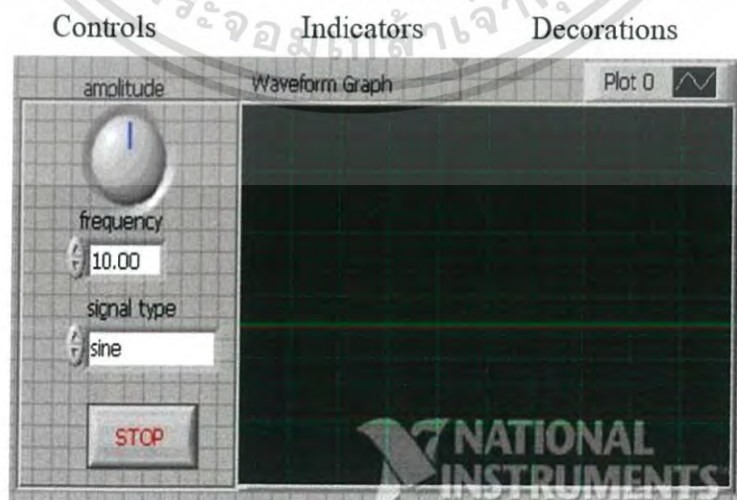
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 Front Panel ของ LabVIEW

Object ที่อยู่บน Front Panel จะมีอยู่สามประเภท คือ

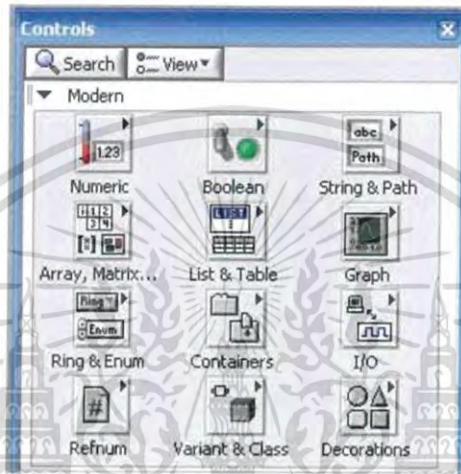
- 1) Control คือประเภทที่รับค่าจากผู้ใช้งาน (Input) ซึ่งผู้ใช้งานสามารถพิมพ์ค่าลงไป หรือใช้เมาส์คลิกเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าได้ เช่น ปุ่มหมุน ปุ่มเลื่อน สวิตช์ เป็นต้น
- 2) Indicators คือประเภทที่ใช้แสดงค่าต่างๆเท่านั้น (Output) ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น กราฟ มิเตอร์ LED
- 3) Decorations เป็น Object ที่ไม่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมและ code บน Block Diagram เลย แต่มีไว้เพื่อความสวยงามเป็นระเบียบของ Front panel เท่านั้นนั่นเอง ลักษณะของ Front Panel แสดงดังรูปต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.11 Object ที่อยู่บน Front Panel ของ LabVIEW  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ออกแบบ Front Panel

เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel จะประกอบไปด้วย Control Palette และ Tools Palette ซึ่ง LabVIEW มี Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel แสดงดังรูป 2.11 ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) โดยจะจัดเป็นกลุ่มต่าง ๆ เช่น กลุ่มของตัวเลข (Numeric) ซึ่งภายในกลุ่มจะมี Control และ Indicator ต่างๆ ที่เกี่ยวกับตัวเลข



รูปที่ 2.12 Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

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



รูปที่ 2.13 Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

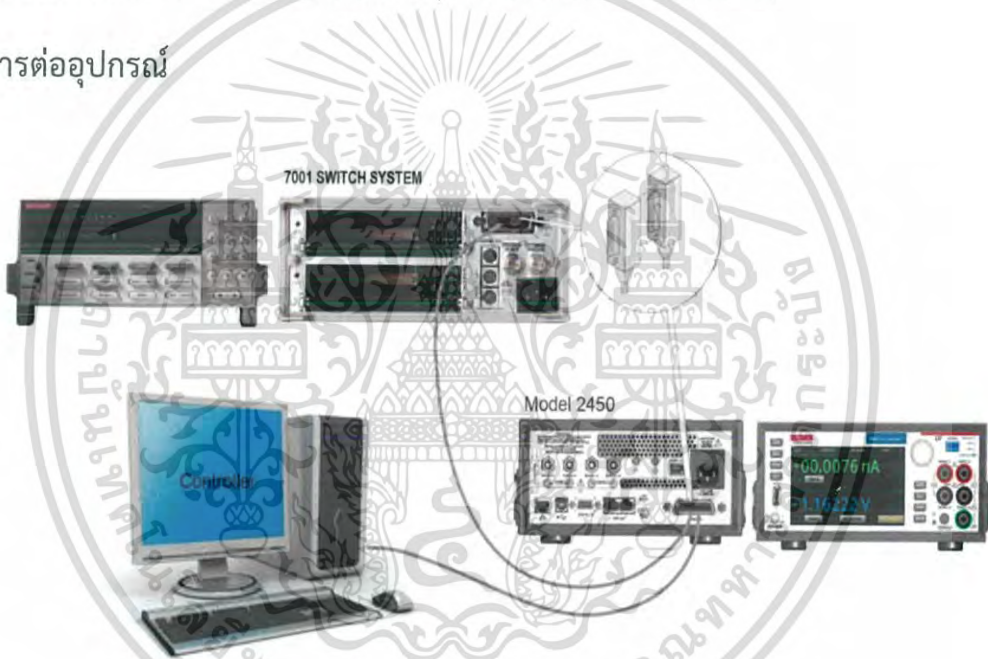
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

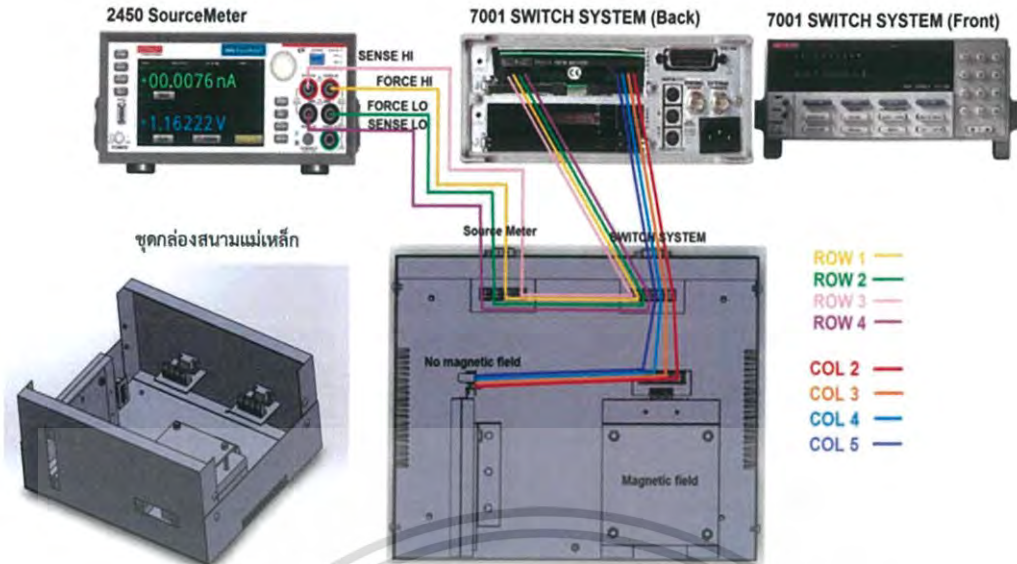
ในบทนี้จะประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 4 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นการเตรียมอุปกรณ์ ส่วนที่สองเป็นส่วนของอุปกรณ์จะมีฟังก์ชันการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในโครงงานพิเศษนี้ อาทิเช่น KEITHLEY 2602A SYSTEM SourceMeter, KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM, Gauss/Tesla Meter, National instruments GPIB to USB เป็นต้น ส่วนที่สามวิธีการวัดแวนเดอร์เพอร์กับการวัดฮอลล์ และในที่สุดท้ายเป็นส่วนของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมระบบการวัดฮอลล์ ซึ่งโปรแกรมจะถูกออกแบบด้วยการเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานการวัดและการคำนวณ ซึ่งจะประมวลผลการวัดและนำมาคำนวณสมบัติต่างๆได้โดยผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

#### 3.1 การต่ออุปกรณ์



รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อสาย GPIB ระหว่างคอมพิวเตอร์กับ 2450 SourceMeter และ 7001 Switch system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อสายระหว่างชุดกล่องสนามแม่เหล็กกับ 2450 SourceMeter และ 7001 Switch system

### 3.2 อุปกรณ์และฟังก์ชันการใช้งาน

#### 3.2.1 Gauss/Tesla Meter



รูปที่ 3.3 เครื่อง Tesla Meter

เครื่องวัดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ Gauss / Tesla Meter คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ประกอบด้วย โพรบวัด และตัวเครื่องมือวัด แสดงดังรูปที่ 3.1 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้จะอยู่ในหน่วย Gauss หรือ Tesla แสดงผลการวัดด้วยจอ LCD ซึ่ง 5180 Gauss/Tesla Meter ถูกเลือกมาใช้ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กเนื่องจากมีช่วงของการวัดตั้งแต่ 1 kG ถึง 30 kG มีความละเอียด 1 mG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 National instruments GPIB – USB – HS+



รูปที่ 3.4 เครื่อง National instruments GPIB to USB

National instruments GPIB to USB ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ (USB) กับ KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM (GPIB)

### 3.2.3 KEITHLEY 2602A SYSTEM SourceMeter



รูปที่ 3.5 เครื่อง KEITHLEY 2602A SYSTEM SourceMeter

ความสามารถและคุณสมบัติต่างๆ

- Models 2601/2602 System SourceMeters:
  - Source  $\pm$ DC voltage from  $1\mu\text{V}$  to 40.4V
  - Source  $\pm$ DC current from 1pA to 3.03A
  - Measure  $\pm$ DC voltage from  $1\mu\text{V}$  to 40.8V
  - Measure  $\pm$ DC current from 1pA to 3.06A

● ฟังก์ชันการวัดค่าความต้านทานและกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

● ช่องสัญญาณ SourceMeter สองช่อง (รุ่น 2602, 2612 และ 2636 เท่านั้น)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกพิมพ์ใหม่เพื่อเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องยี่ นองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถตั้งค่าการใช้งานได้ 5 รายการ
- Embedded Test Script Processor (TSP) สามารถเข้าถึงได้จากอินเทอร์เฟซสำหรับโฮสต์ตอบสนองสคริปต์ทดสอบที่มีความเร็วสูงประกอบด้วยคำสั่งควบคุมอุปกรณ์
- การจัดเก็บบัพเฟอร์และการเรียกคืนการอ่านแหล่งที่มาอย่างน้อย 100,000 ครั้ง
- อินเทอร์เฟซระยะไกลที่สนับสนุน: IEEE-488 (GPIB) และ RS-232
- TSP-Link: อนุญาตให้อุปกรณ์ที่ใช้ TSP สามารถเรียกใช้และสื่อสารกันได้
- พอร์ต I / O ดิจิทัล: อนุญาตให้ซีรีส์ 2600 ควบคุมอุปกรณ์อื่น ๆ

### 3.2.4 KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM



รูปที่ 3.6 เครื่อง KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM

คุณลักษณะที่สำคัญของ KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM ประกอบด้วย

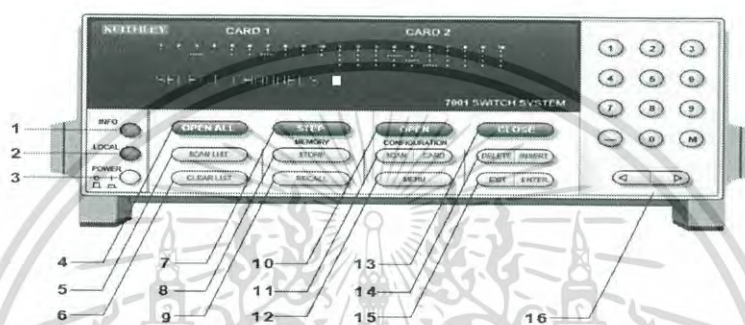
- การสลับความหนาแน่น - สูงสุด 80 ช่องต่อเมนเฟรมโดยใช้การ์ดสลับ
- การเปลี่ยนการ์ด - นอกเหนือจากการ์ดแบบสวิตช์ที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับรุ่น 7001 (เช่น รุ่น 7011, 7012 และ 7013) คุณสามารถใช้การ์ดสวิตช์ที่ออกแบบมาสำหรับเครื่องสแกนเนอร์ Keithley Models 705 และ 706
- Backplane แบบอะนาล็อก - สามารถใช้เชื่อมต่อสายหรือเบงค์ของการ์ดรุ่น 701X ได้ภายในช่องเดียวกับแถวหรือเบงค์ของการ์ดรุ่น 701X ชุดที่สองที่ติดตั้งในช่องอื่น ๆ
- ปิด / เปิดหรือสแกน - โมเดล 7001 สามารถปิดและ / หรือเปิดช่องหนึ่งหรือหลายช่องหรือสแกนผ่านรายการเฉพาะของช่องได้
- แสดงสถานะของช่อง - การแสดงสถานะแบบเรียลไทม์ตรวจสอบสถานะ (ปิดหรือเปิด) ของช่องสัญญาณทั้งหมดที่มีอยู่
- หน่วยความจำ - สามารถบันทึกรูปแบบช่องได้สูงสุด 100 รูปแบบ (รูปแบบของช่องเปิดและปิด) และสามารถบันทึกการตั้งค่าอุปกรณ์ที่กำหนดเองได้ 10 แบบในหน่วยความจำเพื่อเรียกคืนในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในภายหลัง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- IEEE-488 Bus - การดำเนินการของบัสเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE-488.2 และ SCPI
- การเชื่อมโยง Trigger - แนวคิดทริกเกอร์ใหม่เพื่อให้สามารถเรียกใช้ภายนอกได้หลากหลายและแม่นยำยิ่งขึ้น นอกเหนือจากเทคนิคการเรียกใช้ภายนอกภายนอก BNC แล้ว

### 3.2.4.1 แผงควบคุมด้านหน้า

ตัวควบคุมแผงด้านหน้าของรุ่น 7001 เอกสารฉบับนี้ประกอบด้วยข้อมูลสำคัญที่ควรได้รับการทบทวนก่อนใช้เครื่องมือ สังเกตเห็นว่าตัวควบคุมบางตัวเป็นปุ่มแบบสองฟังก์ชันปุ่มชนิดโยก ซึ่งรวมถึง SCAN / CARD CONFIGURATION, DELETE / INSERT, EXIT / ENTER และ </>



รูปที่ 3.7 เครื่อง KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM แผงควบคุมด้านหน้า

1. INFO แสดงข้อมูลวิธีใช้ออนไลน์ กดอีกครั้ง (หรือ EXIT) เพื่อยกเลิกข้อความ
2. LOCAL ยกเลิกการรีโมทและคืนค่าแผงควบคุมด้านหน้า
3. POWER 0 = ปิด 1 = เปิด
4. OPEN ALL เปิดช่องทั้งหมดของช่องทั้งสองช่อง นอกจากนี้จะยกเลิกการสแกนที่กำลังดำเนินการอยู่ และวางตำแหน่ง 7001 ไว้ในสถานะว่าง
5. SCAN LIST สลับระหว่างรายการสแกนและรายการช่อง
6. CLEAR LIST เคลียร์รายการช่องที่แสดงหรือรายการสแกน
7. STEP เอา 7001 จากสถานะว่างและขั้นตอนผ่าน Scan List
8. STORE จัดเก็บรูปแบบช่องสัญญาณไว้ที่ตำแหน่งหน่วยความจำที่ระบุ
9. RECALL เรียกคืน 7001 เป็นรูปแบบช่องที่จัดเก็บไว้ในตำแหน่งหน่วยความจำที่ระบุ
10. OPEN เปิดช่องที่ระบุ (แสดง) ในรายการช่อง
11. SCAN CONFIGURATION เปิดใช้งาน CONFIGURE SCAN

เมนู : CHAN-CONTROL

SCAN-CONTROL

ARM-CONTROL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CHAN-RESTRICTIONS

## CARD CONFIGURATION เปิดใช้งาน CARD CONFIG

เมนู : TYPE  
 #-OF-POLES  
 CARD-PAIR  
 DELAY  
 READ-I/O-CARD

## 12. MENU เปิดใช้งานเมนูหลัก:

SAVESETUP  
 GPIB  
 DIGITAL-I/O  
 TEST  
 LANGUAGE  
 GENERAL

## 13. CLOSE ปิดช่องที่ระบุ (แสดง) ในรายการช่อง

## 14. DELETE ลบรายการที่เลือกออกจากรายการสถานีหรือรายการสแกน

INSERT แทรกรายการถัดไปที่ตำแหน่งที่เลือกในรายการช่องหรือรายการสแกน

## 15. EXIT กลับไปที่การเลือกเมนูก่อนหน้าหรือออกจากเมนู

ENTER ดำเนินการกระบวนการที่รอดำเนินการ และแยกช่องและยุติรายการช่องหรือรายการสแกน

## 16. KEYPAD

0 - 9; ใช้เพื่อป้อนตัวเลข

-; ใช้ระบุช่วงของช่อง (เช่น 1! 1 - 1! 40)

M; ใช้เพื่อนำหน้าหมายเลขตำแหน่งหน่วยความจำที่ระบุ.

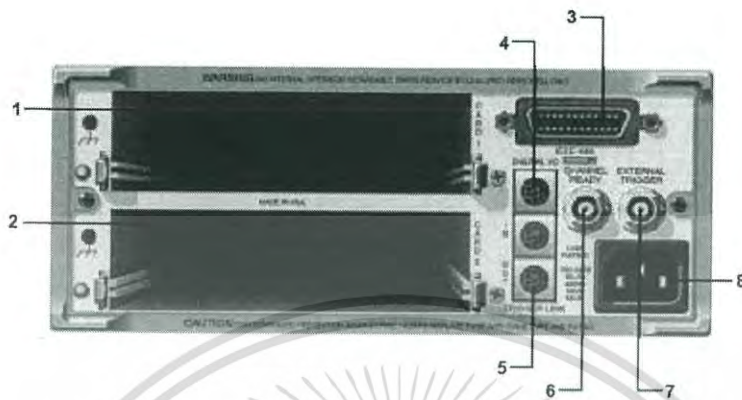
<; ใช้เพื่อเลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้ายหรือ

>; ใช้เพื่อเลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา นอกจากนี้ใช้เพื่อแยกช่องและยุติรายการช่องบนรายการสแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4.2 แผงควบคุมด้านหลัง

แผงด้านหลังของรุ่น 7001 ข้อมูลนี้รวมถึงข้อมูลย่อที่สำคัญซึ่งควรได้รับการทบทวนก่อนที่จะใช้เครื่องมือ



รูปที่ 3.8 เครื่อง KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM แผงควบคุมด้านหลัง

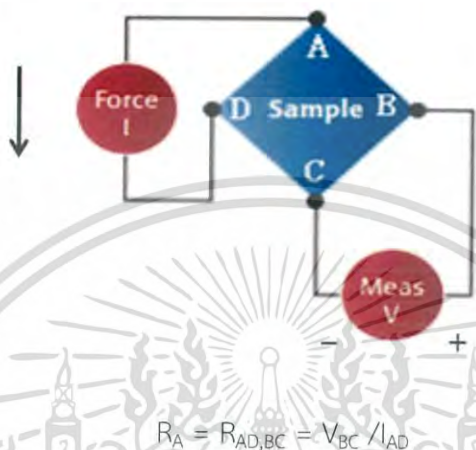
1. CARD 1 สล็อต 1 สำหรับการ์ดสวิตช์ สอดคล้องกับการแสดงสถานะการ์ด 1 ช่อง
2. CARD 2 สล็อต 2 สำหรับการ์ดสวิตช์ สอดคล้องกับการแสดงสถานะการ์ด 2 ช่อง
3. IEEE-488 CONNECTOR ใช้สาย IEEE-488 มาตรฐาน
4. DIGITAL I/O ขั้วต่อ DIN ขนาด 8 พิน พอร์ตประกอบด้วยสี่สายเอาต์พุต TTL และสายอินพุต TTL หนึ่งบรรทัด (สายเดียว)
5. TRIGGER LINK IN AND OUT ช่องเสียบ DIN แบบ 8 พินขนาดเล็ก 2 ช่อง
6. CHANNEL READY ขั้วต่อ BNC สำหรับเทอร์มินัล TTL output trigger
7. EXTERNAL TRIGGER ขั้วต่อ BNC สำหรับเทอร์มินัล TTL input trigger
8. LINE POWER INPUT คำเตือน: เชื่อมต่อกับเต้าเสียบสายดินโดยใช้สายไฟสามสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

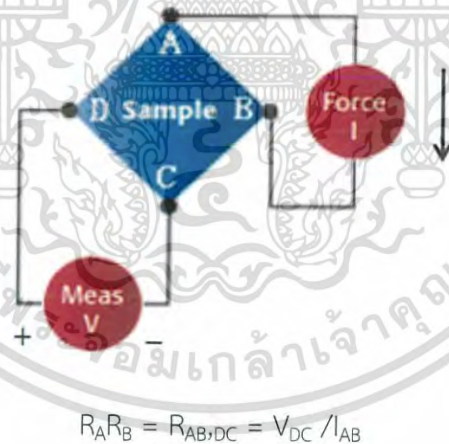
### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 วิธีการวัดด้วยทฤษฎี Van der Pauw

การวัดด้วยวิธีของ Van der Pauw นั้นจะมี Contact ที่ใช้ในการวัด 4 จุด หรือ 4 ขั้ว โดย 2 ขั้วใช้ในการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า - ออก และอีก 2 ขั้วที่เหลือใช้วัดความต่างศักย์ตกคร่อมการวัด ประกอบด้วย การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า  $R_A$  และ  $R_B$  แสดงดังรูปที่ 3.19 และ รูปที่ 3.20 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ  $R_A$



รูปที่ 3.10 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ  $R_B$

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

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

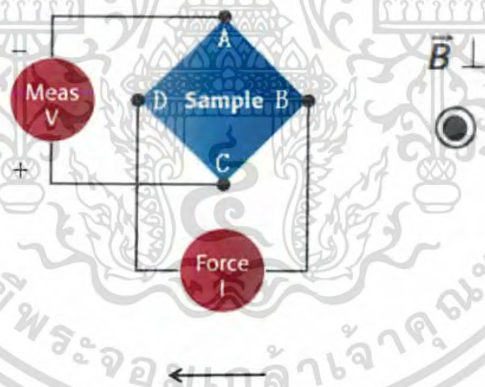
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำการวัด  $R_A$  จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปที่ 3.19
2. จ่ายกระแสไฟฟ้า  $I$  ค่าต่างๆ เข้าที่ขั้ว A และ D ด้วยเครื่อง KEITHLEY 2602A SYSTEM SourceMeter เครื่องนี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง  $\pm 1 \mu\text{A}$  ถึง  $\pm 3 \text{ A}$  ในการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะปรับที่ด้านหน้าของเครื่อง แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ C ด้วยเครื่อง KEITHLEY 2602A SYSTEM SourceMeter มีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $\pm 1 \mu\text{V}$  ถึง  $\pm 40 \text{ V}$  ก่อนการทดลองต้องคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดก่อน สามารถคำนวณได้จากสูตร

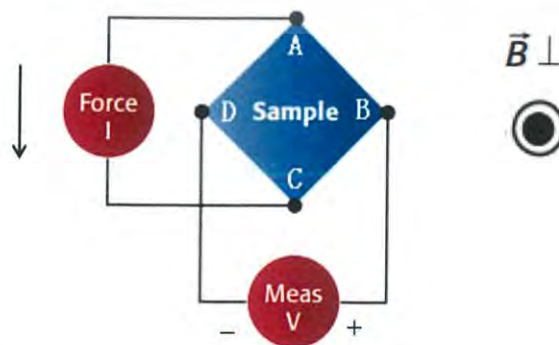
$$I = \frac{V}{R} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสไฟฟ้า (A)  
 $V$  คือ แรงดันไฟฟ้า (V)  
 $R$  คือ ความต้านทานของวงจรถ (Ω)

3. วัด  $R_B$  ดังรูปที่ 3.20 ทำการทดลองตามข้อ 1 – 2
  4. คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์
- 3.3.2 วิธีการวัดด้วยทฤษฎี Hall effect



รูปที่ 3.11 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ  $R_{BD, CA}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.12 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ  $R_{AC, BD}$  นำไปใช้

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

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

1. จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปที่ 3.21
  2. นำสารตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็กความเข้ม B
  3. จ่ายกระแสไฟฟ้า I ค่าต่างๆด้วยเครื่อง KEITHLEY 2602A SYSTEM Source Meter เครื่องนี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ใน ช่วง  $\pm 1$  ถึง  $\pm 3$  A ในการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะปรับที่ด้านหน้าของเครื่องแล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว C และ A (กำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นบวก (B+)) ด้วยเครื่อง KEITHLEY 2602A SYSTEM Source Meter มีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $\pm 1 \mu V$  ถึง  $\pm 40$  V ก่อนการทดลองต้องคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดก่อน 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 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก  
 $d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เมตร
7. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $cm^2$  จากสูตร

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

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

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

$V_H$  คือ ความต่างศักย์ตกคร่อมฮอลล์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

$B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา (T)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

$d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เมตร (m) ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ความหนาแน่นของพาหะ ( $n$ ) คำนวณได้จาก

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

9. สภาพคล่องตัวของพาหะ ( $\mu$ ) 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  $p$

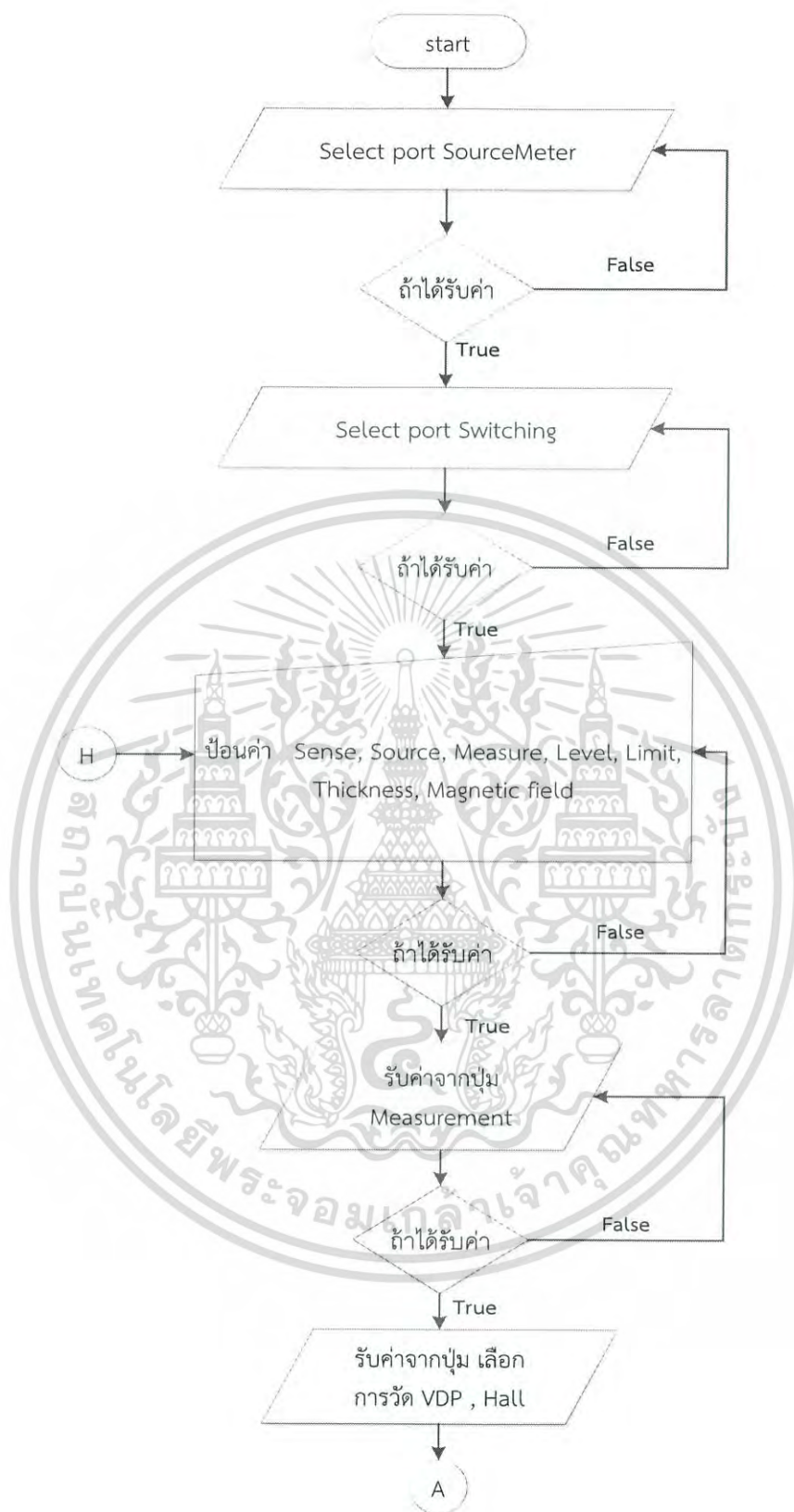
### 3.4 Software

โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการทำงานของระบบจากนั้นจึงนำส่วนประกอบเหล่านี้มาใช้งานร่วมกันโดยรายละเอียดในการสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ มีดังนี้

#### 3.4.1 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล

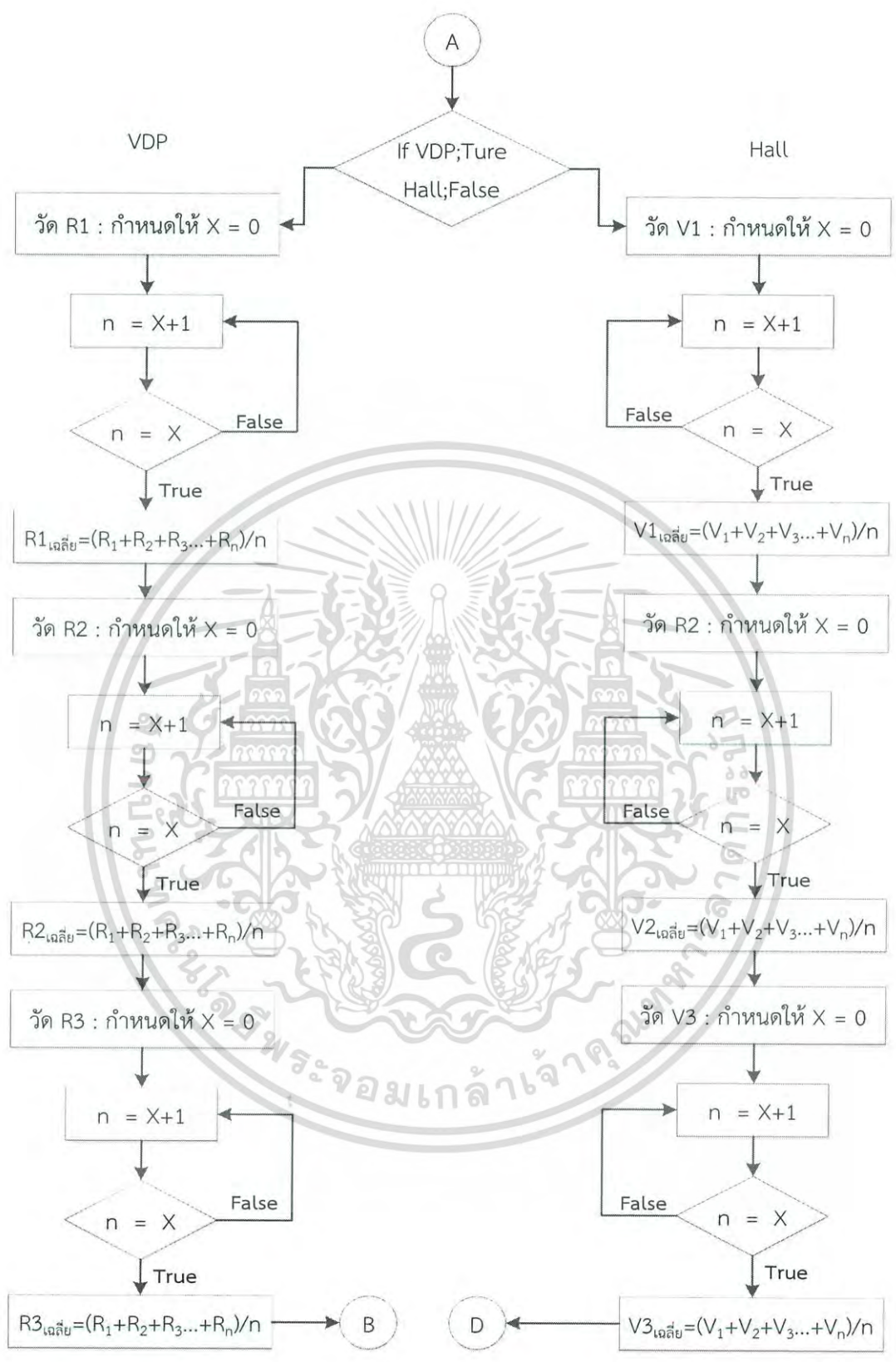
เนื่องจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้นมานี้มีความต้องการที่จะให้เป็นระบบอัตโนมัติ ดังนั้นเราจำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานและบันทึกผล โดยมีกระบวนการทำงานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



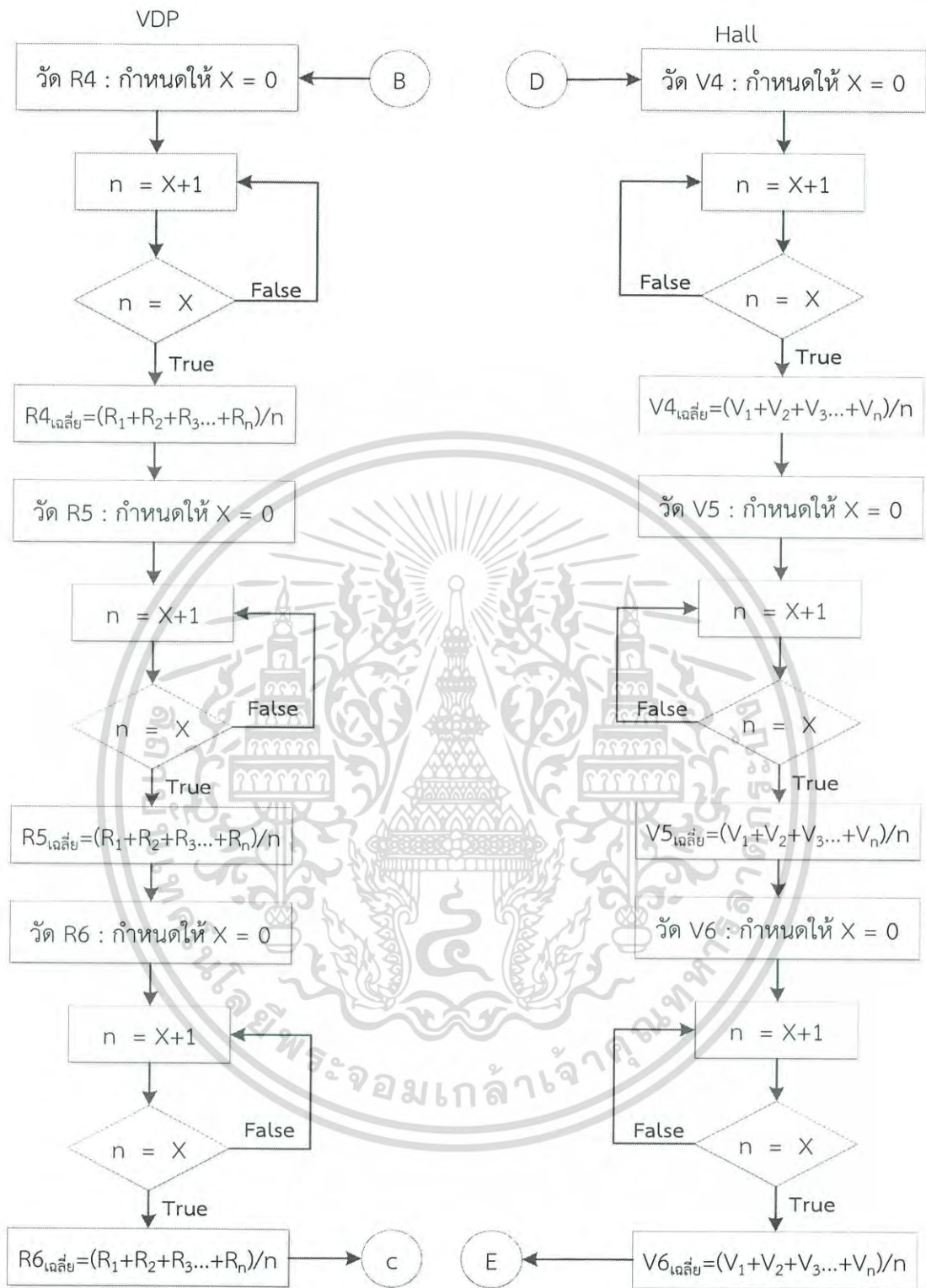
รูปที่ 3.13 ไตอะแกรมแสดงการรับค่าจากปม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



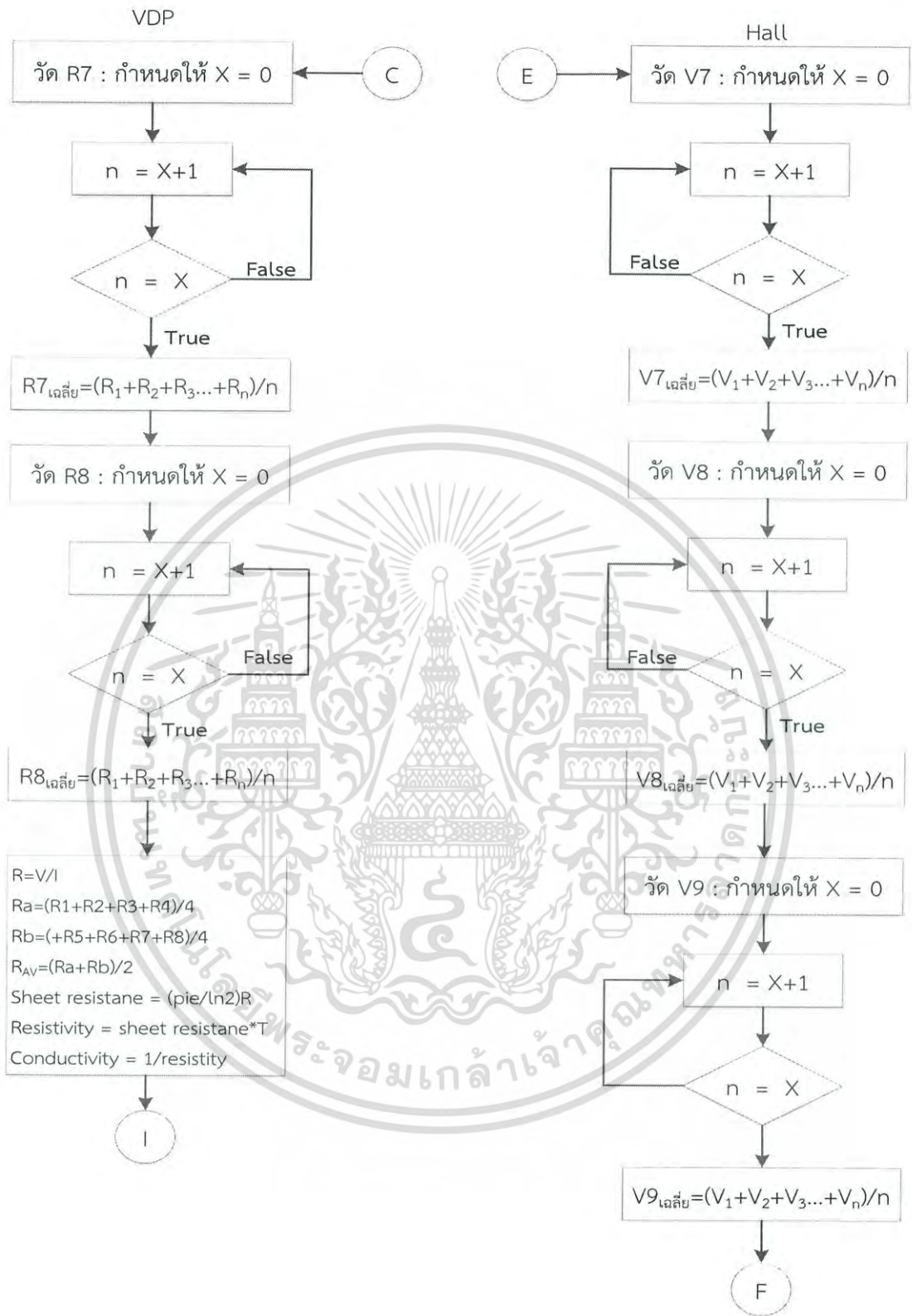
รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมแสดงการรับค่าจาก Keyboard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



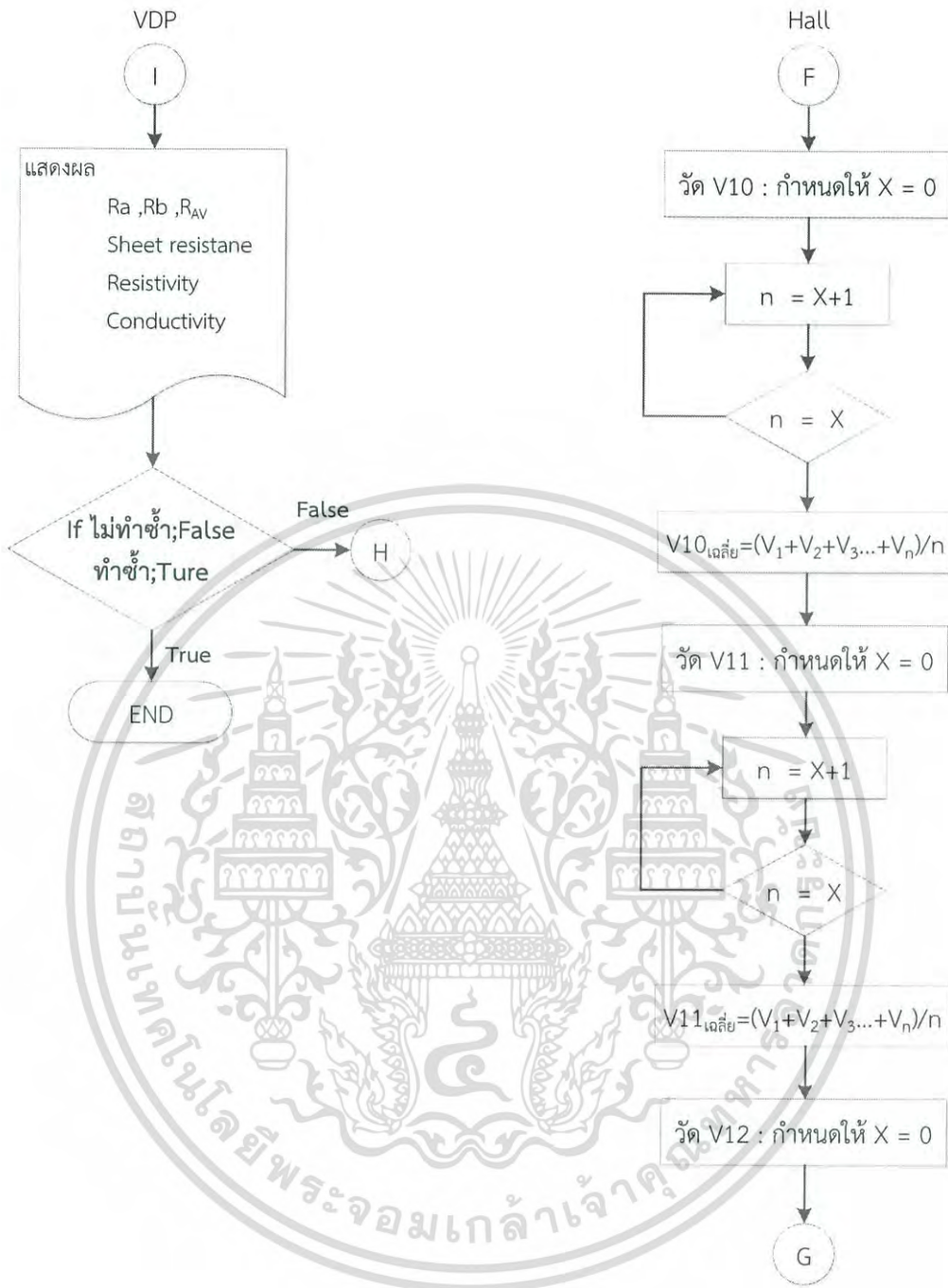
รูปที่ 3.15 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



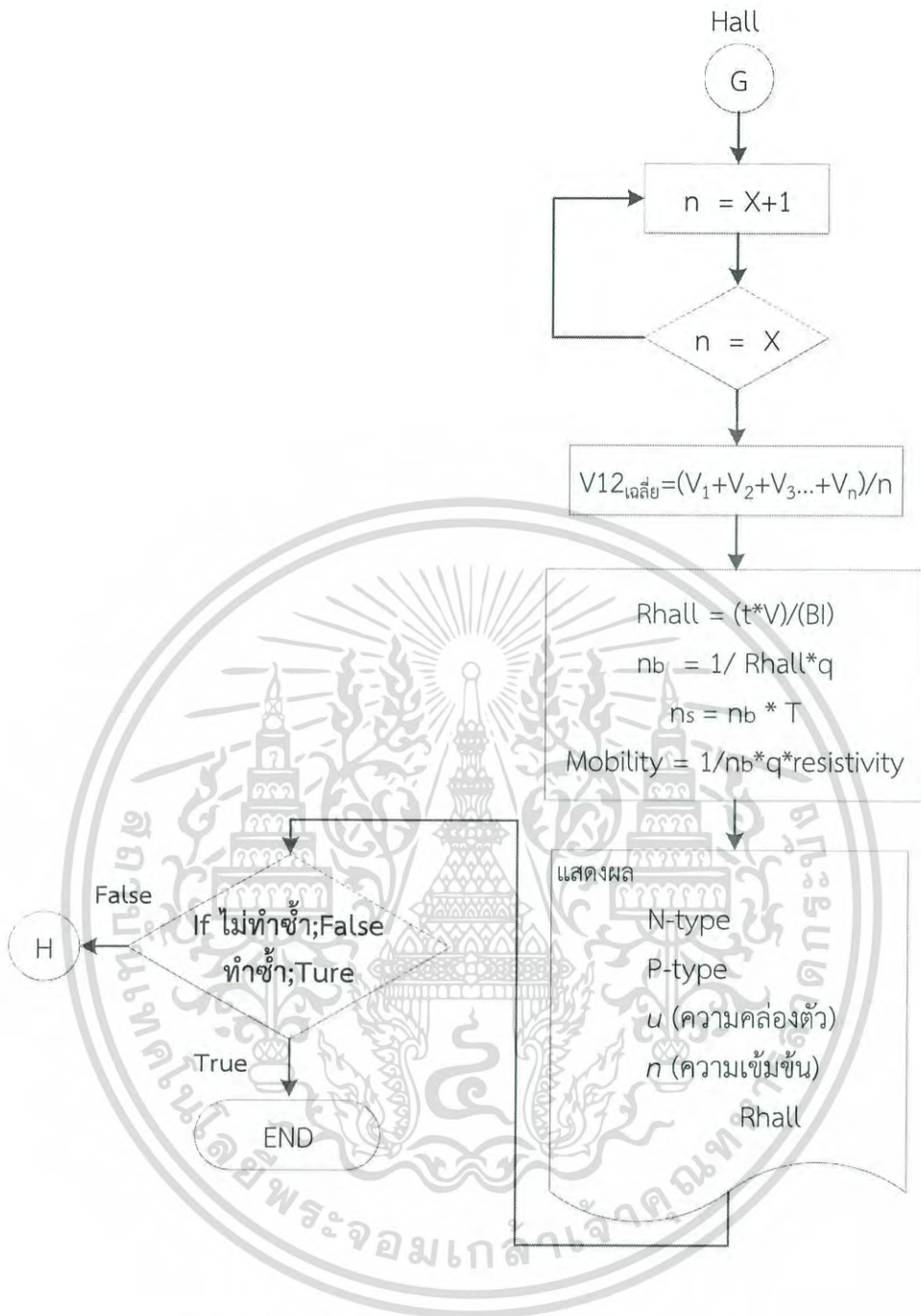
รูปที่ 3.16 ไตอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

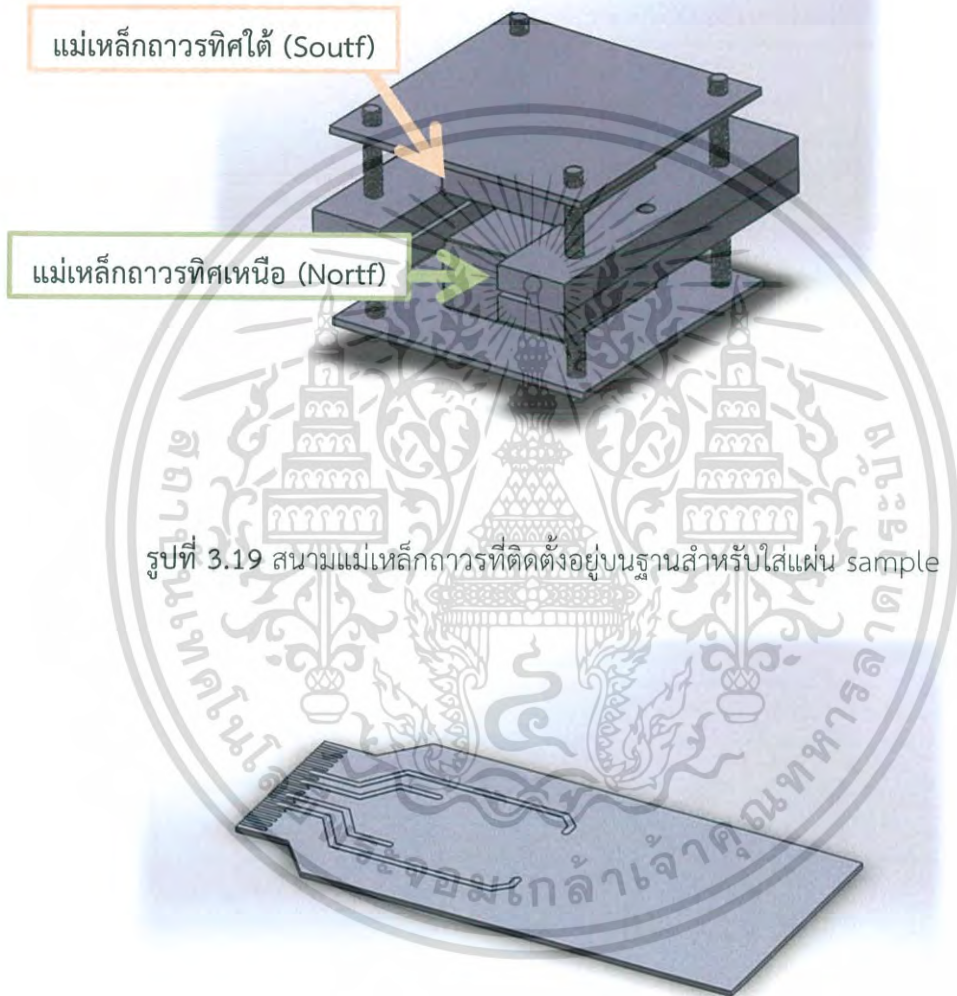


รูปที่ 3.18 ไตอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร

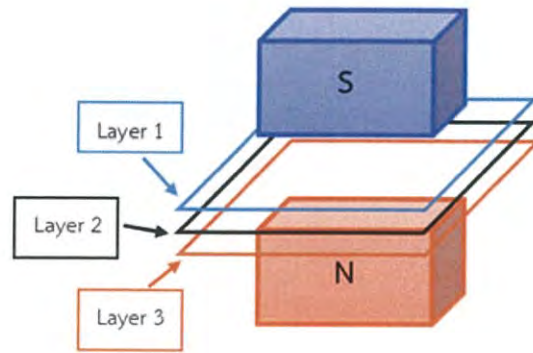
ชุดสนามแม่เหล็กถาวรเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการสร้างเครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ดังนั้นชุดแม่เหล็กถาวรจะต้องมีความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็ก และต้องทราบค่าสนามแม่เหล็กที่แท้จริง โดยเราต้องวัดค่าสนามแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กถาวรนี้มีระยะห่างระหว่างแม่เหล็กสองทิศเท่ากับ 15 mm เริ่มจากนำแม่เหล็กติดตั้งกับฐานสำหรับใส่แผ่นชิ้นงานดังภาพ



รูปที่ 3.19 สนามแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่บนฐานสำหรับใส่แผ่น sample

รูปที่ 3.20 แผ่นสำหรับใส่ชิ้น sample

จากนั้นทำการวัดสนามแม่เหล็กโดยติดตั้งเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก Gauss meter ยี่ห้อ F.W. Bell รุ่น 5180 บนแท่นเลื่อนแกน XYZ โดยนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะ (mm) กับ ค่าสนามแม่เหล็ก (kG) ได้ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

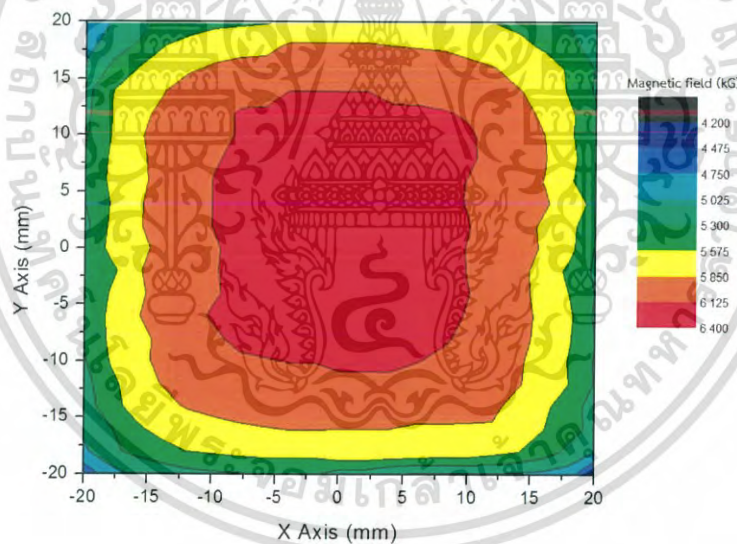


รูปที่ 3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Layer

Layer 1 คือระยะนาบที่อยู่ห่างจากขอบแม่เหล็กถาวรขอบบน 4.5 mm

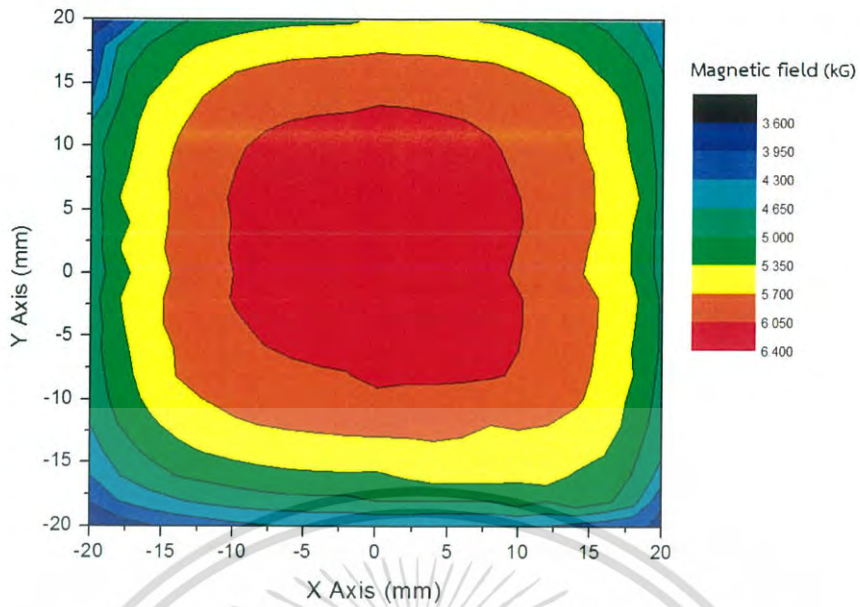
Layer 2 คือระยะนาบที่อยู่ห่างจากขอบแม่เหล็กถาวรขอบบน 7.5 mm

Layer 3 คือระยะนาบที่อยู่ห่างจากขอบแม่เหล็กถาวรขอบบน 11.5 mm

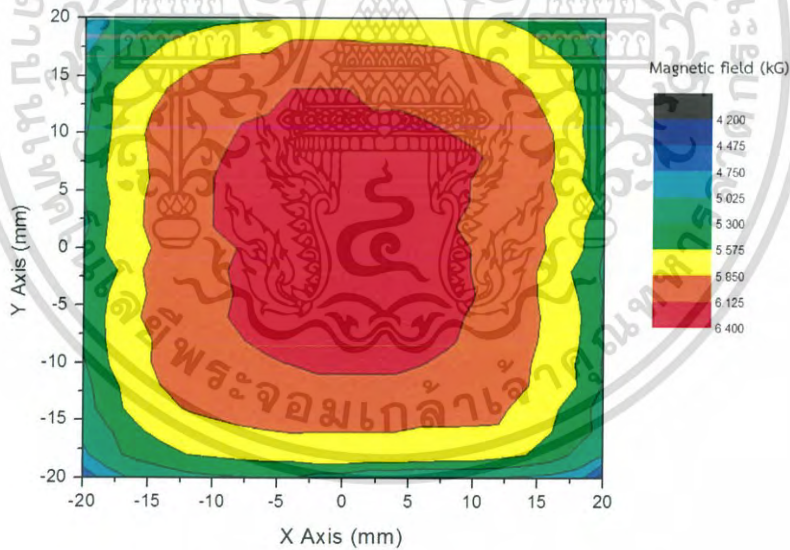


รูปที่ 3.22 กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะแกน XY (mm) กับ ค่าสนามแม่เหล็ก (kG) บน Layer 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะแกน XY (mm) กับ ค่าสนามแม่เหล็ก (kG) บน Layer 2



รูปที่ 3.24 กราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะแกน XY (mm) กับ ค่าสนามแม่เหล็ก (kG) บน Layer 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม

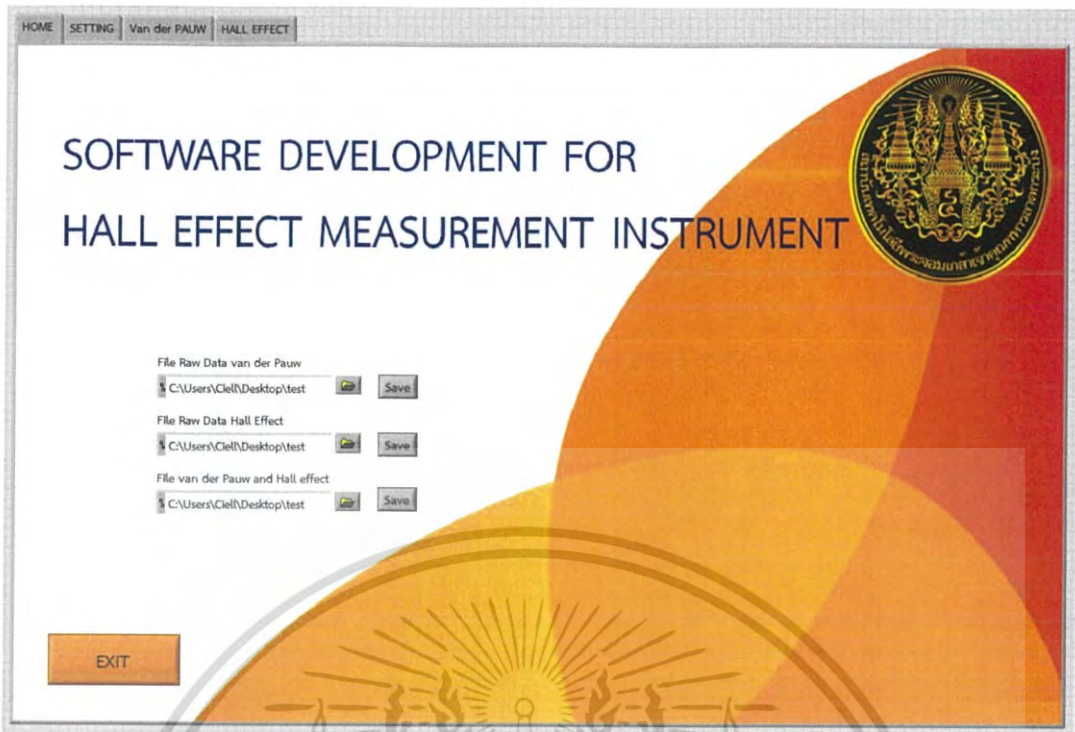
โปรแกรมที่สร้างขึ้นเป็นโปรแกรมที่ใช้วัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ โดยใช้วิธีการวัดแบบ van der Pauw และ Hall Effect โดยวิธีการวัดที่กล่าวมานั้นต้องควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดค่าความต่างศักย์ในแต่ละมุมของ sample การจ่ายกระแสไฟฟ้าและการวัดค่าความต่างศักย์จะเปลี่ยนตำแหน่งไปตามขั้นตอนการวัดในบทที่ 3 ( หัวข้อ 3.3 วิธีการทดลอง ) ในส่วนดังต่อไปนี้จะเป็นรูปโปรแกรมที่เขียนผ่านโปรแกรม LabVIEW ดังนี้

##### 4.1.1 หน้าต่าง HOME

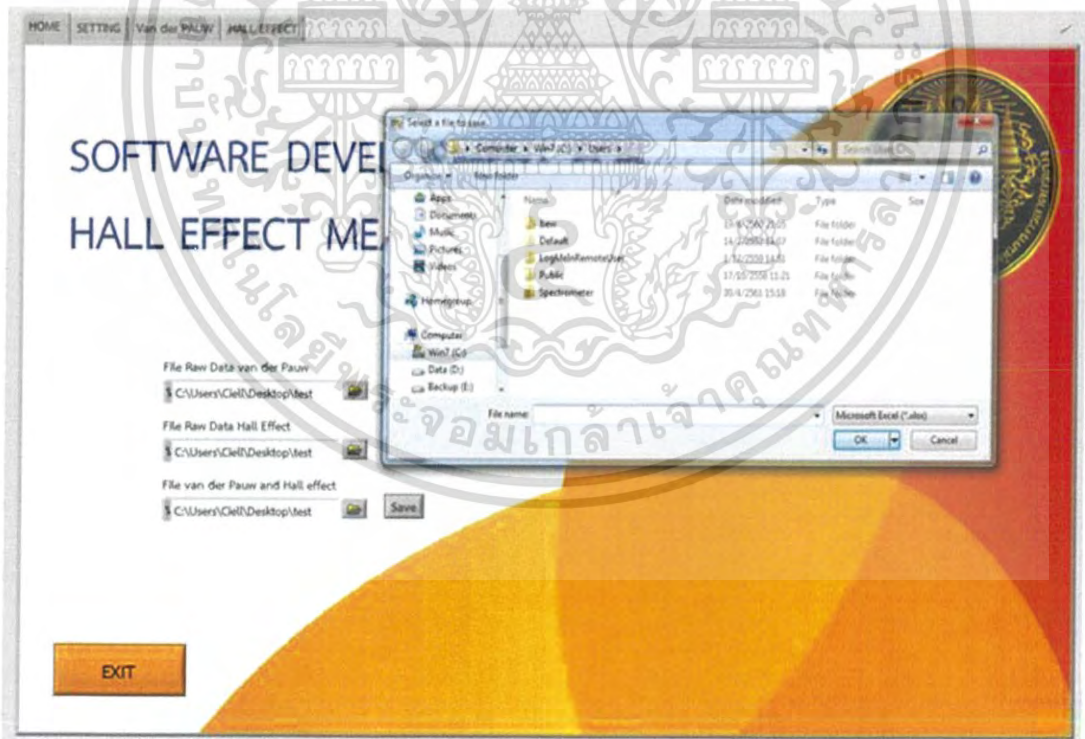
เป็นหน้าต่างแรกในการเริ่มต้นโปรแกรม (รูปที่ 4.1) ภายในประกอบด้วย

1. File Raw Data van der Pauw เป็นการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับการวัด van der Pauw โดยมีการบันทึก ค่าช่วงกระแส(A) ของแหล่งจ่าย, ช่วงโวลต์ที่วัดได้ตั้งแต่ V1-V8 (V), ค่าความต้านทาน  $R_a$  (ohm)  $R_b$  (ohm) และ  $R_{avg}$  (ohm), แฟกเตอร์แก้ค่า Factor, ค่า Sheet Resistance (ohm), ความหนาของชั้นงาน Thickness (cm), ค่า Resistivity (ohm.cm) และ ค่า Conductivity  $\sigma$  (1/ohm.cm)
2. File Raw Data Hall Effect เป็นการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับการวัด Hall Effect โดยมีการบันทึก ค่าช่วงกระแส (A) ของแหล่งจ่าย, ช่วงโวลต์ที่วัดนอกสนามแม่เหล็ก V1-V4 (V), ช่วงโวลต์ที่วัดในสนามแม่เหล็กโดยหันด้านหน้าของ Sample เข้าสู่แม่เหล็กขั้วใต้ S โดยแสดงสัญลักษณ์เป็น VS1-VS4 (V), ช่วงโวลต์ที่วัดในสนามแม่เหล็กโดยหันด้านหน้าของ Sample เข้าสู่แม่เหล็กขั้วเหนือ N โดยแสดงสัญลักษณ์เป็น VN1-VN4 (V), ค่าความต้านทานนอกสนามแม่เหล็ก  $R_{out}$  (ohm), ค่าความต้านทานในสนามแม่เหล็ก  $R_{in}$  (ohm), ค่าความต้านทานของ Hall Effect  $R_{hall}$  (ohm), ค่า  $1/R_{hall}$  (ohm), ค่า Bulk carrier ( $1/cm^3$ ), ค่า sheet carrier ( $1/cm^2$ ) และ ค่า Mobility ( $cm^2/V.s$ )
3. File van der Pauw and Hall Effect เป็นการบันทึกข้อมูลเฉพาะสมบัติของสารนั้นๆ ได้แก่ ค่าความต้านทาน  $R_a$  (ohm)  $R_b$  (ohm) และ  $R_{avg}$  (ohm), แฟกเตอร์แก้ค่า Factor, ค่า Sheet Resistance (ohm), ค่า Resistivity (ohm.cm), ค่า Conductivity  $\sigma$  (1/ohm.cm), ค่าความต้านทานนอกสนามแม่เหล็ก  $R_{out}$  (ohm), ค่าความต้านทานในสนามแม่เหล็ก  $R_{in}$  (ohm), ค่าความต้านทานของ Hall Effect  $R_{hall}$  (ohm), ค่า  $1/R_{hall}$  (ohm), ค่า Bulk carrier ( $1/cm^3$ ), ค่า sheet carrier ( $1/cm^2$ ) และ ค่า Mobility ( $cm^2/V.s$ )
4. EXIT ปุ่มปิดโปรแกรม ใช้สำหรับปิดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 หน้าต่าง HOME



รูปที่ 4.2 แสดงถึงการบันทึกค่าของโปรแกรมเมื่อกดปุ่ม SAVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 หน้าต่าง SETTING

หน้าต่างที่ใช้ในการกรอกข้อมูลเพื่อใช้ในการกำหนดขอบเขตการวัด ประกอบด้วย

1. VISA SourceMeter ปุ่มที่ใช้สำหรับการเลือก VISA ของเครื่อง 2450 SourceMeter KEITHLEY โดยมีชื่อ VISA ได้หลายชื่อเปลี่ยนตามตำแหน่ง USB ที่เสียบ
2. VISA Switch ปุ่มที่ใช้สำหรับการเลือก VISA ของเครื่อง 7001 SWITCH SYSTEM KEITHLEY โดยมีชื่อ VISA ได้หลายชื่อเปลี่ยนตามตำแหน่ง USB ที่เสียบ
3. Sense คือ ตัวแสดงการวัดแบบ 4-wire
4. Source คือ ตัวแสดงการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยการจ่ายกระแสที่ตัวเลือก Start เพิ่มการจ่ายกระแสเป็นขั้นที่ตัวเลือก Step และหยุดจ่ายกระแสที่ตัวเลือก Stop
5. Measure คือ ตัวแสดงการวัดความต่างศักย์
6. Limit คือ ตัวแสดงการ limit voltage โดยการ limit voltage ที่ตัวเลือก Level Voltage
7. Thickness คือ ตัวเลือกที่ใช้ในการรับค่าความหนาของ sample
8. Magnetic field คือ ตัวเลือกที่ใช้ในการรับค่าสนามแม่เหล็ก (หน่วยเป็น T)
9. Repetition number คือ ตัวรับค่าในการกำหนดจำนวนการวัดซ้ำในแต่ละจุด
10. สวิตช์ Van der Pauw หรือ Hall Effect คือ ตัวเลือกก่อน run โปรแกรมว่าจะเลือก run โปรแกรมการวัด van der Pauw หรือ Hall Effect
11. Clear คือ ปุ่มลบข้อมูลทั้งหมดที่แสดงบนหน้าโปรแกรมก่อนการ run โปรแกรมครั้งใหม่ (หากต้องจากลบข้อมูล)
12. แท็บ TUNER เป็นแท็บที่ใช้ในการวัดเพื่อหาช่วงการจ่ายของกระแส หรือเพื่อตรวจสอบการเชื่อม Sample ในแต่ละจุด โดยภายในประกอบด้วย
  - 12.1 สวิตช์ V1 AD/BC เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสับสวิตช์ของเครื่อง Switch System ให้จ่ายกระแสจาก A ไป D และวัดโวลต์จาก B ไป C
  - 12.2 สวิตช์ V2 DA/BC เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสับสวิตช์ของเครื่อง Switch System ให้จ่ายกระแสจาก D ไป A และวัดโวลต์จาก B ไป C
  - 12.3 สวิตช์ V3 BC/AD เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสับสวิตช์ของเครื่อง Switch System ให้จ่ายกระแสจาก B ไป C และวัดโวลต์จาก A ไป D
  - 12.4 สวิตช์ V4 CB/AD เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสับสวิตช์ของเครื่อง Switch System ให้จ่ายกระแสจาก C ไป B และวัดโวลต์จาก A ไป D
  - 12.5 สวิตช์ V5 BA/CD เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสับสวิตช์ของเครื่อง Switch System ให้จ่ายกระแสจาก B ไป A และวัดโวลต์จาก C ไป D
  - 12.6 สวิตช์ V6 AB/CD เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสับสวิตช์ของเครื่อง Switch System ให้จ่ายกระแสจาก A ไป B และวัดโวลต์จาก C ไป D

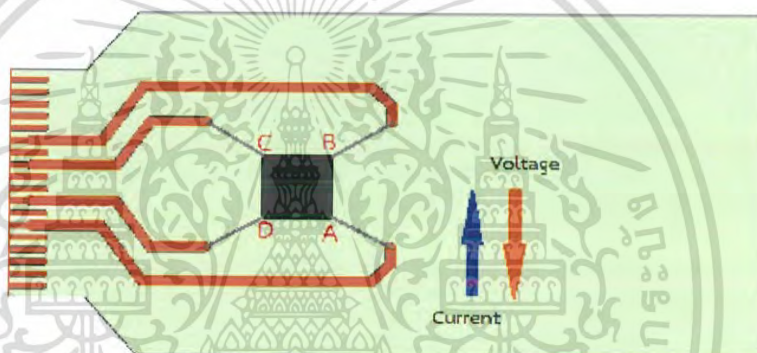
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.7 สวิตช์ V7 CD/BA เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสับสวิตช์ของเครื่อง Switch System ให้จ่ายกระแสจาก C ไป D และวัดโวลต์จาก B ไป A

12.8 สวิตช์ V8 DC/BA เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสับสวิตช์ของเครื่อง Switch System ให้จ่ายกระแสจาก D ไป C และวัดโวลต์จาก B ไป A

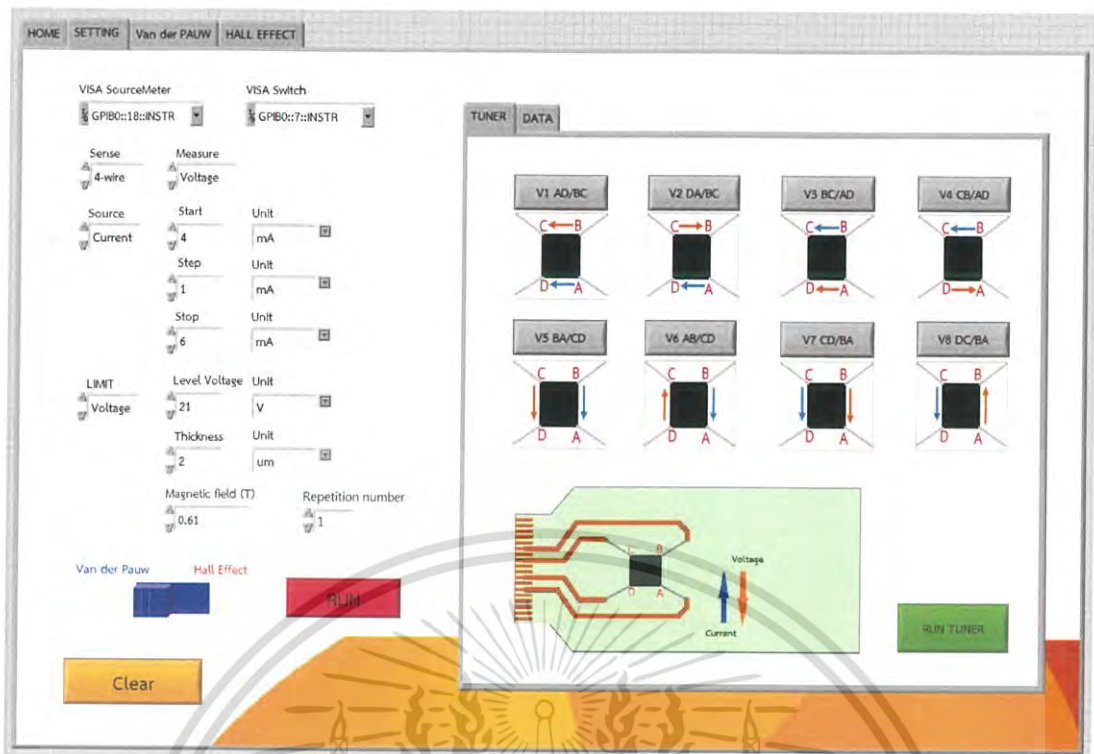
12.9 สวิตช์ RUN TUNER เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการ RUN ของ TUNER โดยสวิตช์ RUN TUNER จะทำงานก็ต่อเมื่อมีการกดปุ่ม สวิตช์ V ปุ่มใดปุ่มหนึ่งเท่านั้น

13. แท็บ DATA เป็นแท็บแสดงข้อมูลการ RUN ของแท็บ TUNER โดยภายในประกอบด้วยช่วงของกระแสการจ่าย ค่าโวลต์ที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่ง กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับโวลต์ และ ค่าความชันของกราฟ



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่ง A B C และ D บนแผ่นวาง Sample

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



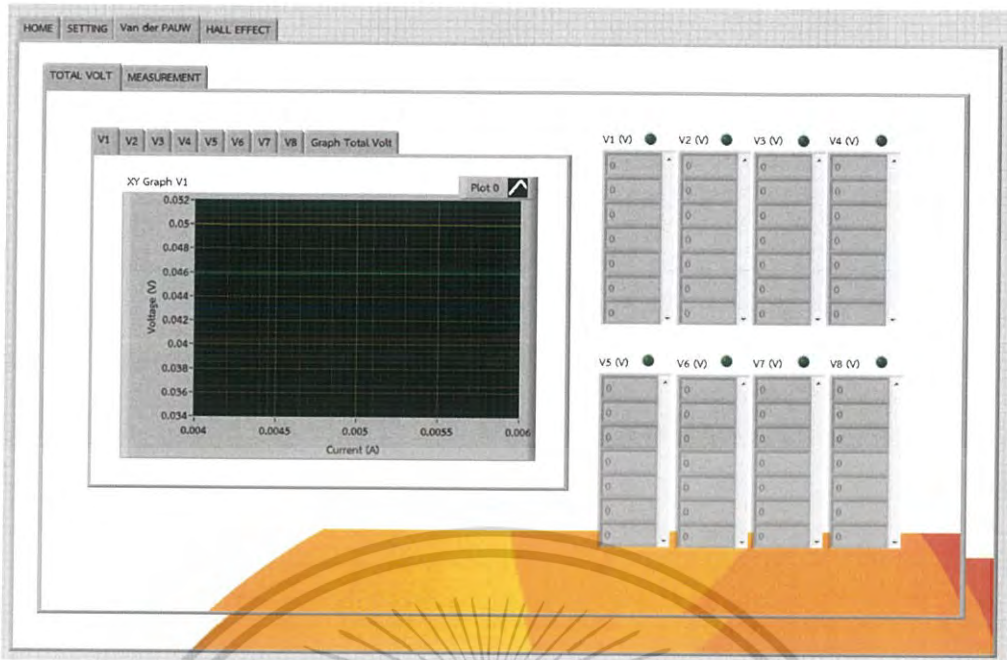
รูปที่ 4.4 หน้าต่าง SETTING ใช้สำหรับเชื่อมต่อ Source Meter, SWITCH SYSTEM, การเลือกรูปแบบการวัดและการป้อนค่าต่างๆที่ใช้ในการวัด van der Pauw หรือ Hall Effect โดยเลือกจากสวิตช์ Van der Pauw และ Hall Effect หรือใช้แท็บ TUNER สำหรับหาช่วงการวัด

#### 4.1.3 หน้าต่าง van der Pauw ประกอบด้วย

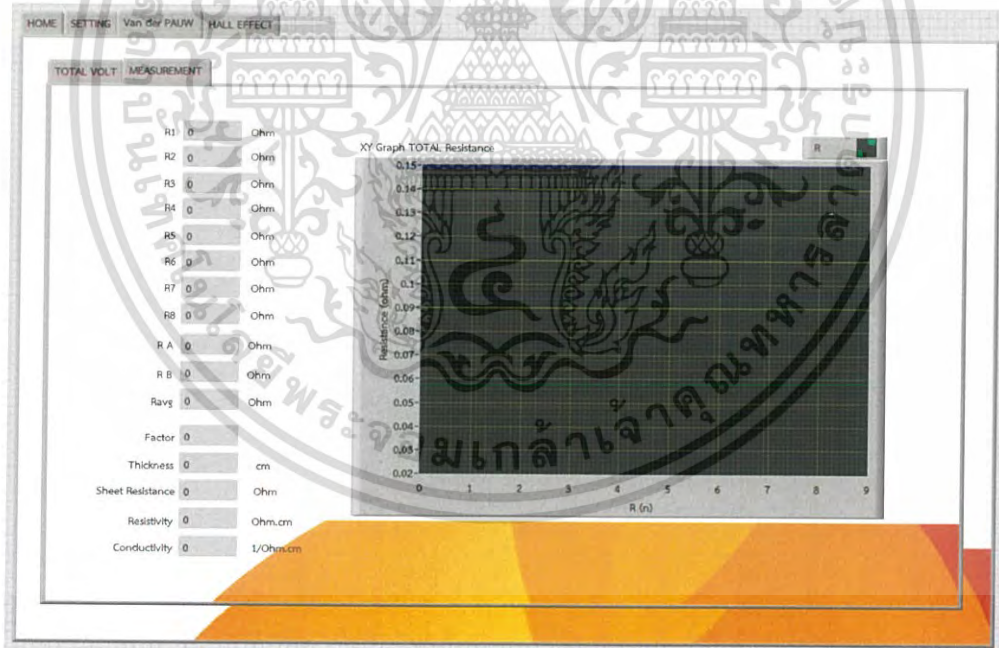
1. หน้าต่าง TOTAL VOLT คือ หน้าต่างแสดงผลการวัดค่าความต่างศักย์ทั้ง 8 จุด พร้อมกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ (รูปที่ 4.5) โดยความต่างศักย์จุดที่ 1 คือ V1 AD/BC , จุดที่ 2 คือ V2 DA/BC , จุดที่ 3 คือ V3 BC/AD , จุดที่ 4 คือ V4 CB/AD , จุดที่ 5 คือ V5 BA/CD , จุดที่ 6 คือ V6 AB/CD , จุดที่ 7 คือ V7 CD/BA และจุดที่ 8 คือ V8 DC/BA

2. หน้าต่าง MESUREMENT คือ หน้าต่างแสดงผลค่าการคำนวณค่าความต้านทานเฉลี่ยทั้ง 8 จุด, ค่า Factor, ค่า Sheet Resistance, ค่า Resistivity และค่า Conductivity พร้อมกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งความต้านทานกับค่าความต้านทาน (รูปที่ 4.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 หน้าต่างแสดงค่าความต่างศักย์และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับค่าความต่างศักย์ของผลการวัด Van der Pauw



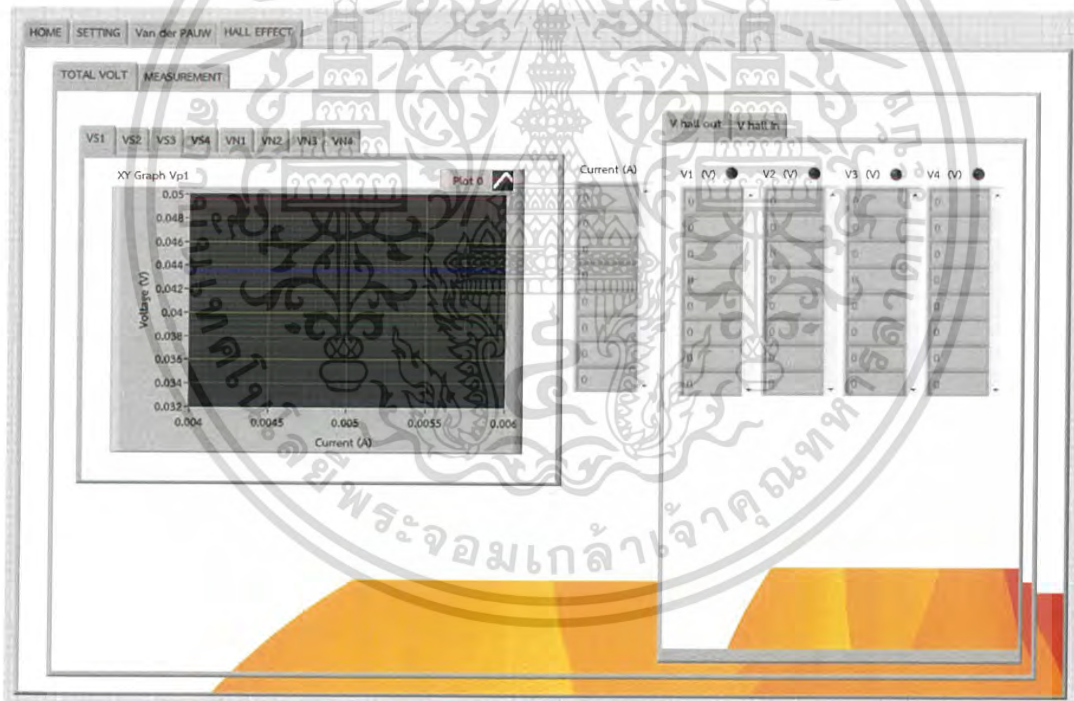
รูปที่ 4.6 หน้าต่างแสดงผลค่าการคำนวณค่าความต้านทานเฉลี่ยทั้ง 8 จุด, ค่า Factor, ค่า Sheet Resistance, ค่า Resistivity และค่า Conductivity พร้อมกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งความต้านทานกับค่าความต้านทานของการวัด van der Pauw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 หน้าต่าง Hall Effect ประกอบด้วย

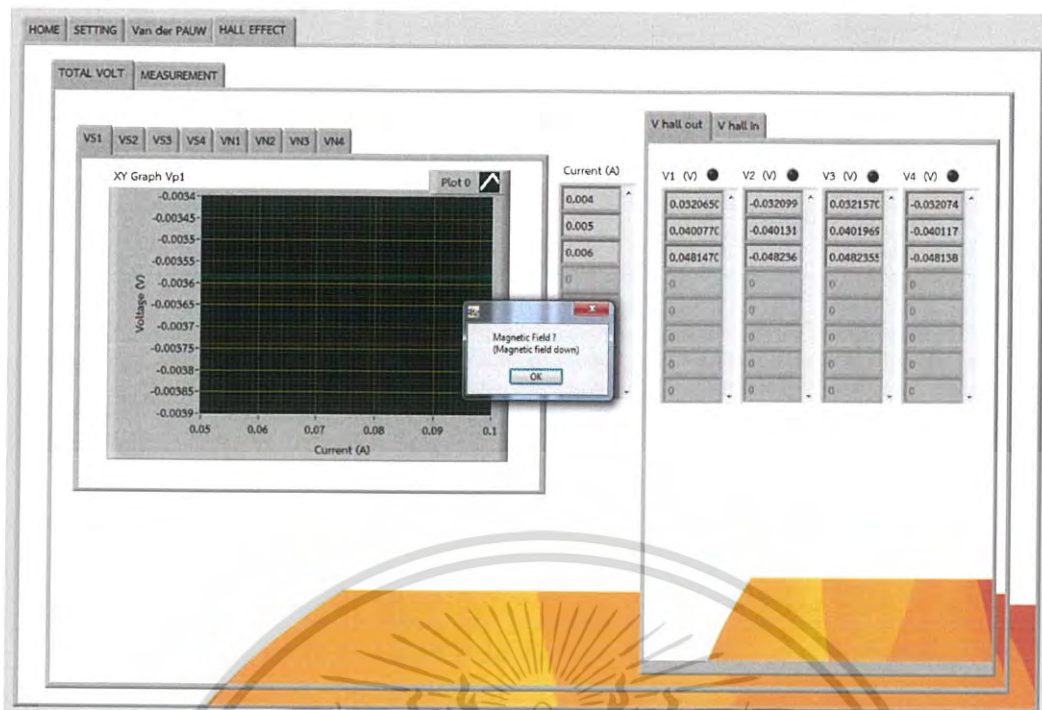
1. หน้าต่าง TOTAL VOLT HALL คือ หน้าต่างแสดงผลการวัดค่าความต่างศักย์นอกสนามแม่เหล็กที่ชื่อว่า V hall out และหน้าต่างแสดงผลการวัดค่าความต่างศักย์ในสนามแม่เหล็กที่ชื่อว่า V hall in พร้อมกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ ( รูปที่ 4.7 )

2. หน้าต่าง MEASUREMENT HALL คือ หน้าต่างแสดงผลค่าการคำนวณค่าความต่างศักย์เฉลี่ยทั้ง 12 จุด, ค่าความต้านทานนอกสนามแม่เหล็กเฉลี่ย :  $R_{out}$ , ค่าความต้านทานนอกเฉลี่ย :  $R_{in}$ , ค่าสนามแม่เหล็กความต้านทาน hall :  $R_{hall}$ , ค่า sheet carrier concentration :  $n_s$ , ค่า Bulk electrical resistivity :  $n_b$  และค่า Majority carrier mobility :  $\mu$  พร้อมกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ ( รูปที่ 4.10 )

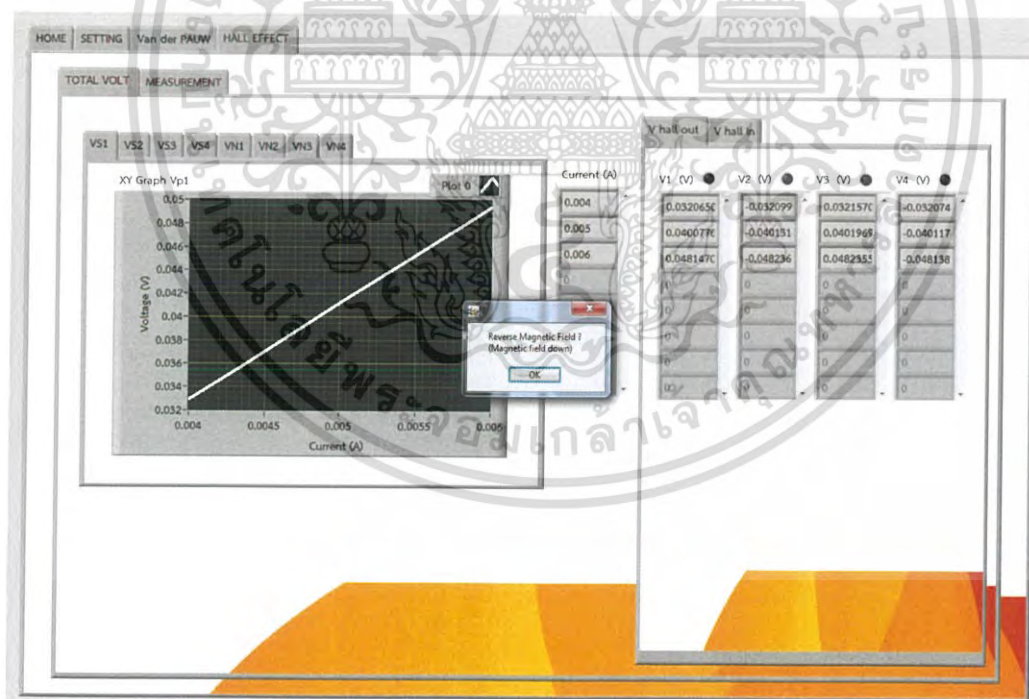


รูปที่ 4.7 หน้าต่างแสดงค่าความต่างศักย์นอกสนามแม่เหล็กในการวัด Hall Effect เพื่อใช้ในการคำนวณหาความต่างศักย์ HALL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

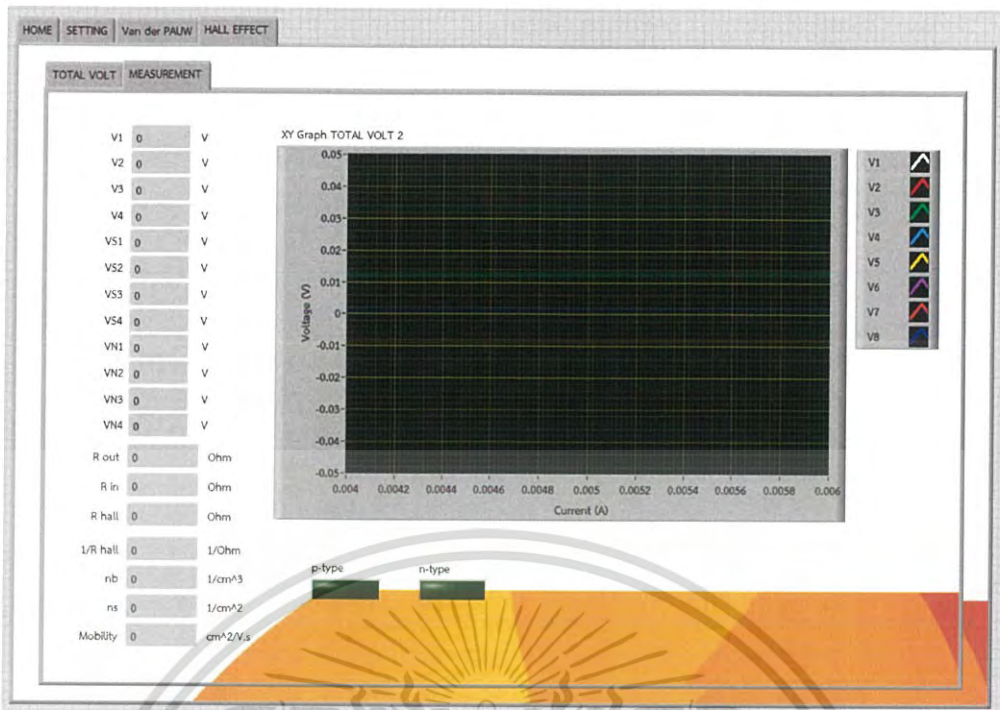


รูปที่ 4.8 หน้าต่างแสดง Pop-up แจ้งเตือนสำหรับการนำ Sample เข้าสู่สนามแม่เหล็ก

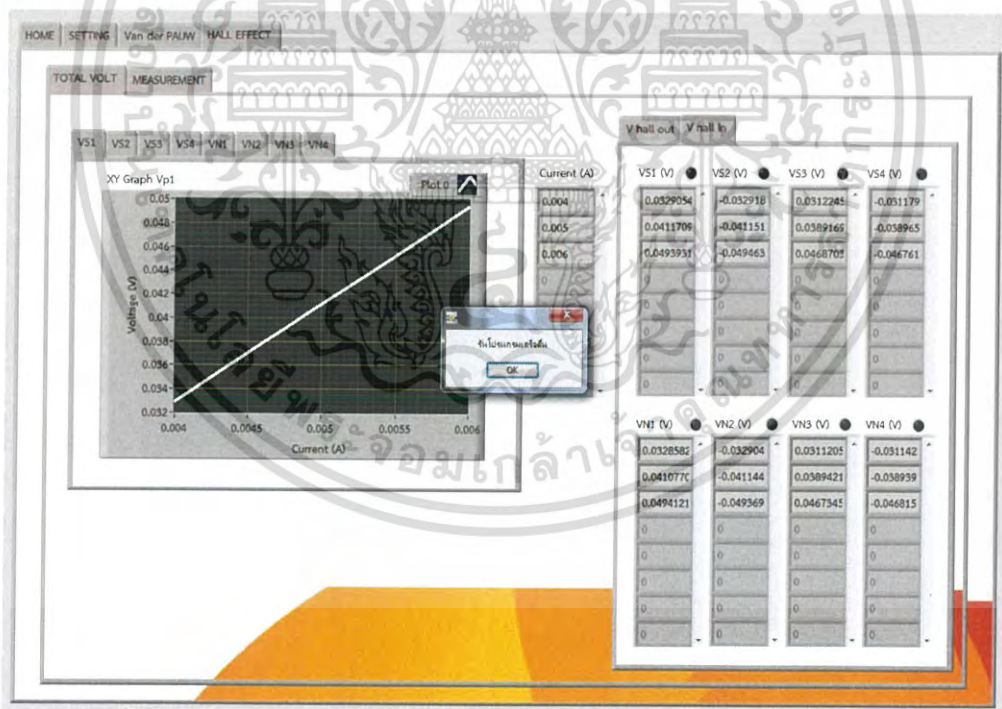


รูปที่ 4.9 หน้าต่างแสดง Pop-up แจ้งเตือนสำหรับการกลับทิศของสนามแม่เหล็ก (เราไม่สามารถกลับสนามแม่เหล็กได้จึงกลับ Sample แทน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 หน้าต่าง MESUREMENT HALL



รูปที่ 4.11 หน้าต่างแสดง Pop-up แจ้งเตือนสำหรับการดำเนินการโปรแกรมการวัด Hall Effect เสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลอง

เนื่องจากเรามีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของแวนเดอร์พาว และปรากฏการณ์ฮอลล์ เราจึงทำการวัดค่าของแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยเทียบจากค่ามาตรฐาน American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่เราสร้างขึ้นว่า ระบบที่เราสร้างนั้นมีความน่าเชื่อถือได้และมีค่าใกล้เคียงกัน ในการทดลองเราใช้ชิ้นงานในการทดลอง 5 ชิ้นได้แก่

sample 1 [B-doped Si, p-type,  $\rho = 0.008-0.002 \Omega \cdot cm$ ]

sample 2 [Silicon, p-type,  $\rho = 0.008-0.02 \Omega \cdot cm$ ]

sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ]

sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ]

sample 5 [ $Mg_2Si$  (0 วินาที), n-type,  $\rho = 0.07 \Omega \cdot cm$ ]

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ทราบค่าแล้ว

No.	Doping	Type	Resistivity ( $\Omega \cdot cm$ )	ความหนา ( $\mu m$ )	Bulk carrier Concentration ( $cm^{-3}$ )
ชิ้นที่ 1	Silicon ( $Si-10^{22}, B-10^{14}$ )	P	0.002 - 0.008	2	$5 \times 10^{18} - 2 \times 10^{19}$
ชิ้นที่ 2	Silicon	P	0.008 - 0.02	500	$1 \times 10^{17} - 2 \times 10^{19}$
ชิ้นที่ 3	Silicon (Sb)	N	0.01 - 0.05	470	$2 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18}$
ชิ้นที่ 4	Silicon	P	30 - 50	700	$1.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{14}$
ชิ้นที่ 5	$Mg_2Si$ (0 วินาที)	N	-	-	-

(ที่มา : American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services)

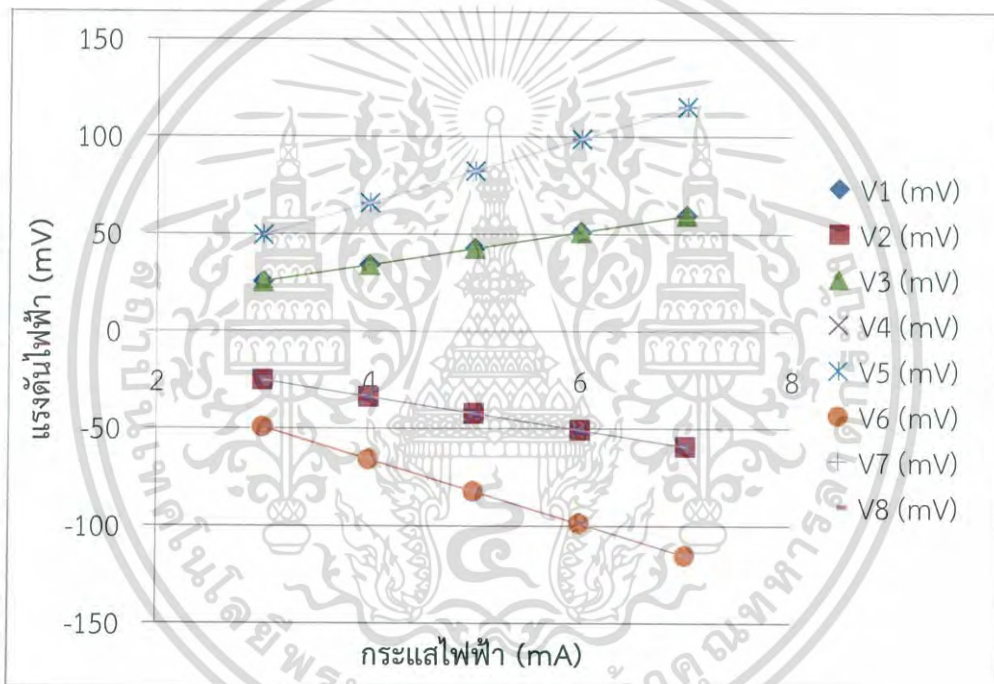
### 4.2.1 ผลการวัดของ sample 1 [B-doped Si, p-type, $\rho = 0.008-0.002 \Omega \cdot cm$ ]

โดยวิธีการวัดแบบ Manual และ วิธีการวัดด้วยโปรแกรม เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับสมบัติของซิลิกอนที่มีแหล่งอ้างอิงจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ , B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
3	25.553	-25.376	25.515	-25.415	49.390	-49.365	49.449	-49.309
4	34.048	-33.864	34.010	-33.904	65.858	-65.833	65.918	-65.779
5	42.545	-42.354	42.500	-42.393	82.330	-82.305	82.385	-82.291
6	51.045	-50.856	50.993	-50.886	98.819	-98.776	98.854	-98.772
7	59.544	-59.347	59.466	-59.383	115.325	-115.278	115.333	-115.258



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ , B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si-10<sup>22</sup>,B-10<sup>14</sup>) ,  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$  ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
3	23.900	-23.829	23.918	-23.816
4	31.856	-31.789	31.886	-31.802
5	39.811	-39.887	39.856	-39.763
6	47.764	-47.709	47.830	-47.762
7	55.789	-55.674	55.847	-55.692

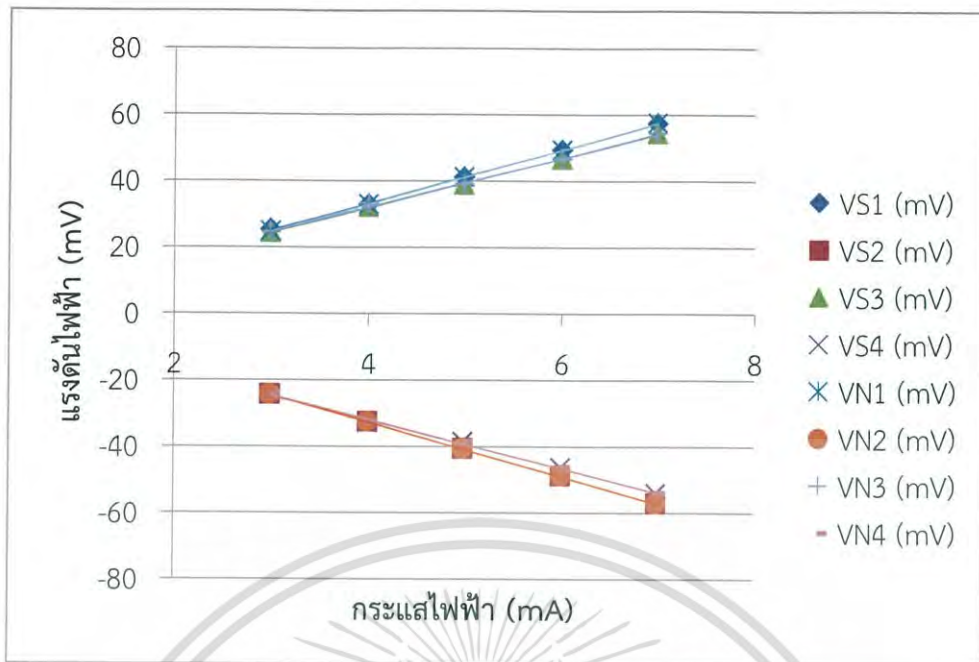
ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si-10<sup>22</sup>,B-10<sup>14</sup>) ,  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$  ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
3	25.120	-24.489	24.289	-24.617
4	32.732	-32.668	32.023	-32.903
5	40.907	-40.846	38.779	-38.684
6	49.080	-49.024	46.567	-46.432
7	57.256	-57.208	54.321	-54.186

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si-10<sup>22</sup>,B-10<sup>14</sup>) ,  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega.cm$  ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
3	24.577	-24.477	24.253	-24.183
4	32.765	-32.647	32.994	-32.926
5	40.955	-40.863	38.836	-38.670
6	49.172	-49.046	46.480	-46.418
7	57.365	-57.231	54.225	-54.167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่ควรออกตีพิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

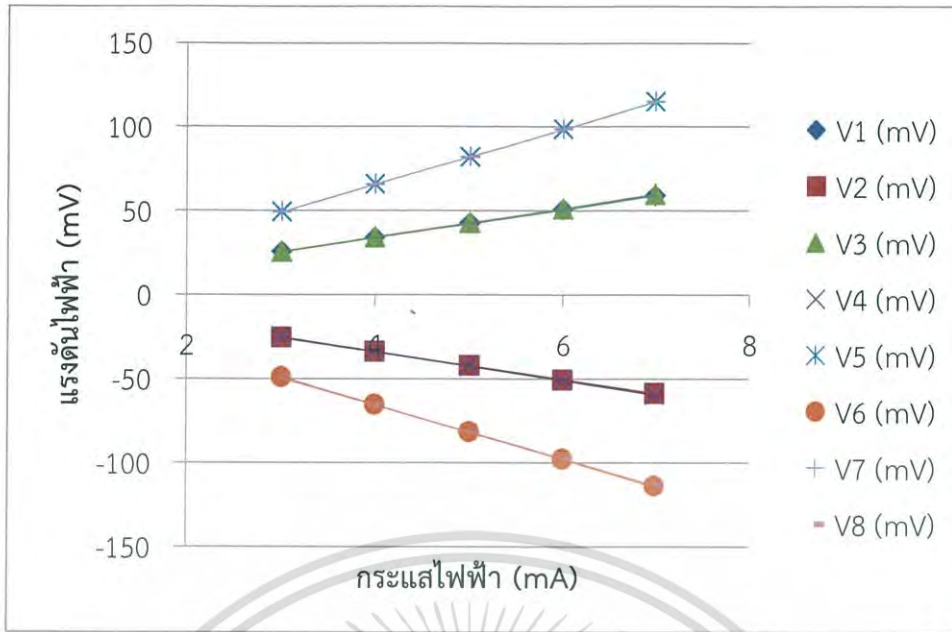


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ ,B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ ,B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
3	25.539	-25.605	25.764	-25.460	49.249	-49.150	49.080	-49.332
4	34.005	-34.057	34.279	-33.984	65.645	-65.452	65.546	-65.683
5	42.396	-42.341	42.782	-42.467	82.039	-81.715	82.005	-81.712
6	50.866	-50.678	51.257	-50.948	98.499	-97.880	98.550	-97.430
7	59.154	-58.781	59.781	-59.431	114.786	-114.001	114.855	-113.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ ,B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ ,B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
3	23.682	-23.490	23.749	-23.732
4	31.493	-31.325	31.540	-31.706
5	39.298	-39.161	39.162	-39.730
6	46.710	-47.028	46.920	-47.774
7	54.031	-54.609	54.561	-55.782

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

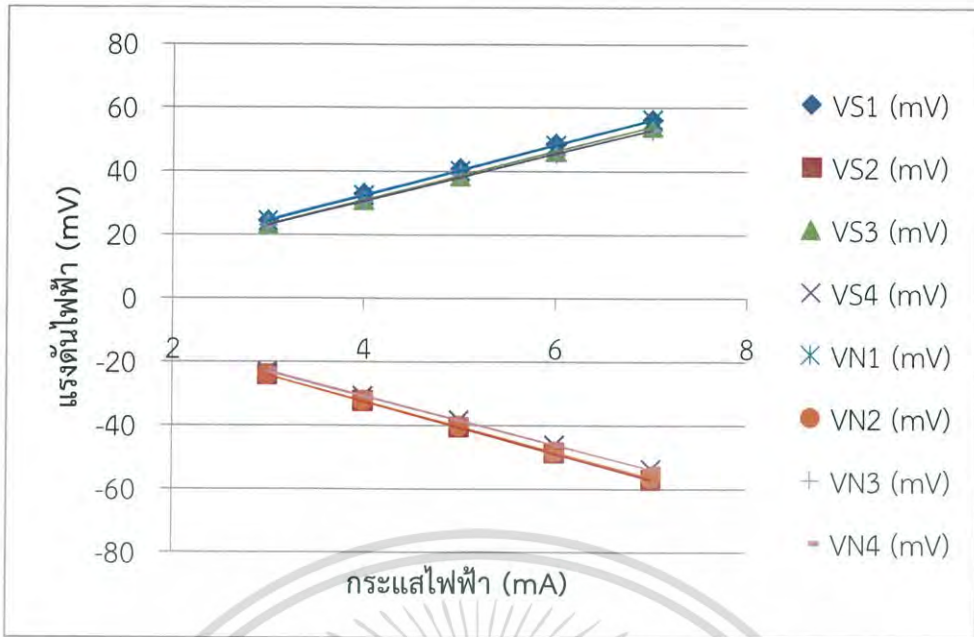
ตารางที่ 4.8 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ ,B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออก จาก sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
3	24.275	-24.238	23.142	-23.195
4	32.769	-32.511	30.861	-30.895
5	40.699	-40.629	38.540	-38.544
6	48.364	-48.851	46.194	-46.178
7	56.079	-57.166	53.903	-53.790

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ ,B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
3	24.159	-24.251	22.829	-22.792
4	32.192	-32.308	30.302	-30.526
5	39.999	-40.314	38.568	-38.404
6	48.037	-48.378	45.409	-46.268
7	56.133	-56.468	52.773	-53.744

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ , B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 1 [Silicon-(Si- $10^{22}$ , B- $10^{14}$ ),  $\rho = 0.008 - 0.002 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีการวัดโดยโปรแกรม กับค่าที่ทราบ

ตัวแปร	ค่าที่ทราบ	วิธีวัดแบบ Manual	วิธีวัดด้วยโปรแกรม
$R_A$		8.48 $\Omega$	8.42 $\Omega$
$R_B$		16.46 $\Omega$	16.26 $\Omega$
$R_{avg}$		12.47 $\Omega$	12.34 $\Omega$
Sheet resistance		54.55 $\Omega$	53.98 $\Omega$
Resistivity	0.008 – 0.002 $\Omega \cdot cm$	0.011 $\Omega \cdot cm$	0.011 $\Omega \cdot cm$
Conductivity		91.6587 $1/\Omega \cdot cm$	92.63 $1/\Omega \cdot cm$
$R_{hall}$		0.21 $\Omega$	0.19 $\Omega$
Sheet carrier Concentration		$1.75 \times 10^{15} cm^{-2}$	$1.96 \times 10^{15} cm^{-2}$
Bulk carrier Concentration	$5 \times 10^{18} - 2 \times 10^{19} cm^{-3}$	$8.75 \times 10^{18} cm^{-3}$	$9.81 \times 10^{18} cm^{-3}$
Mobility	73.62 – 122.71 $cm^2/V \cdot s$	65.56 $cm^2/V \cdot s$	59.95 $cm^2/V \cdot s$
Type	P	P	P

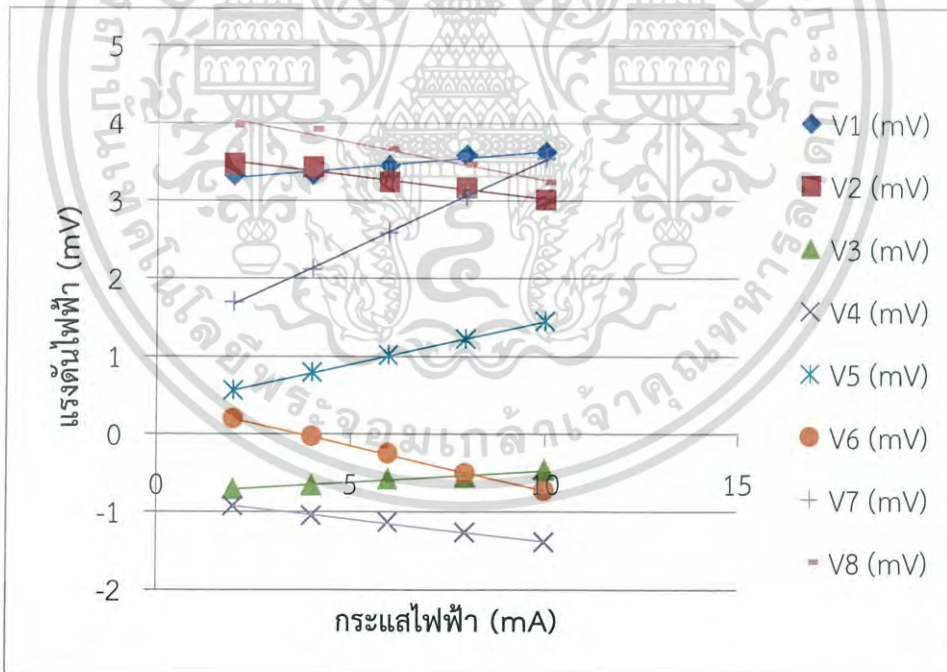
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการวัดของ sample 2 [Silicon, p-type, $\rho = 0.008-0.02 \Omega \cdot cm$ ]

โดยวิธีการวัดแบบ Manual และ วิธีการวัดด้วยโปรแกรม เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับสมบัติของซิลิกอนที่มีแหล่งอ้างอิงจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
2	3.327	3.471	-0.708	-0.926	0.557	0.190	1.694	3.966
4	3.338	3.430	-0.660	-1.051	0.790	-0.036	2.111	3.917
6	3.450	3.238	-0.578	-1.138	1.014	-0.253	2.589	3.662
8	3.583	3.161	-0.553	-1.267	1.217	-0.506	3.057	3.46
10	3.628	3.007	-0.463	-1.390	1.449	-0.731	3.543	3.234



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2  
[Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

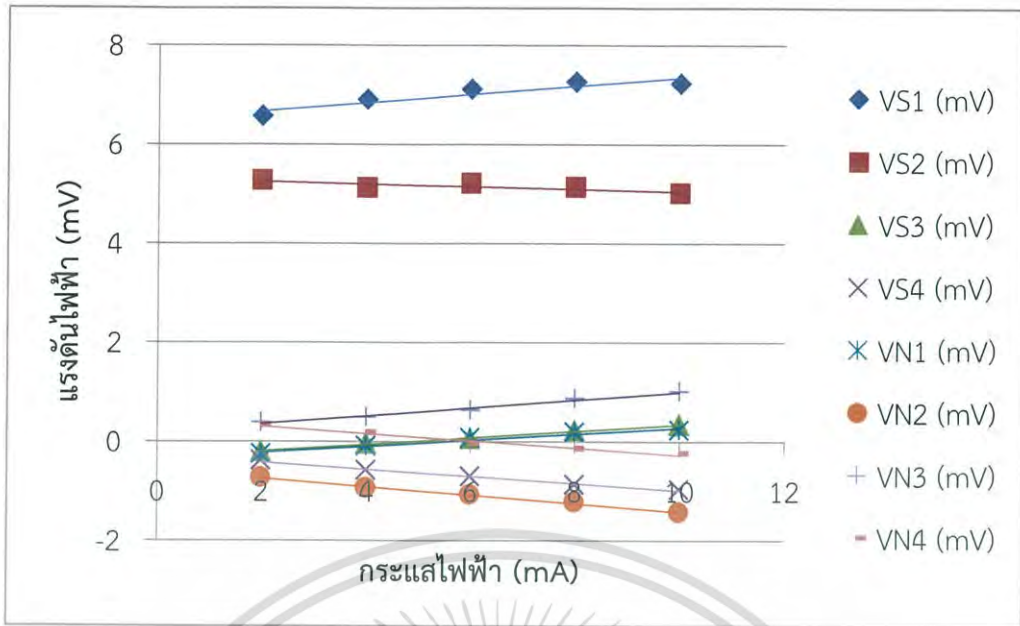
I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
2	4.699	4.423	0.215	-0.264
4	5.026	4.332	0.367	-0.421
6	5.015	4.316	0.520	-0.564
8	5.293	4.148	0.661	-0.699
10	5.469	4.036	0.779	-0.866

ตารางที่ 4.13 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2  
[Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
2	6.558	5.260	-0.206	-0.392
4	6.894	5.112	-0.048	-0.582
6	7.098	5.193	0.054	-0.715
8	7.252	5.123	0.216	-0.870
10	7.213	4.998	0.333	-0.972

ตารางที่ 4.14 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2  
[Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
2	-0.255	-0.735	0.383	0.324
4	-0.097	-0.936	0.490	0.169
6	0.060	-1.080	0.630	-0.039
8	0.180	-1.232	0.865	-0.156
10	0.222	-1.436	1.004	-0.249

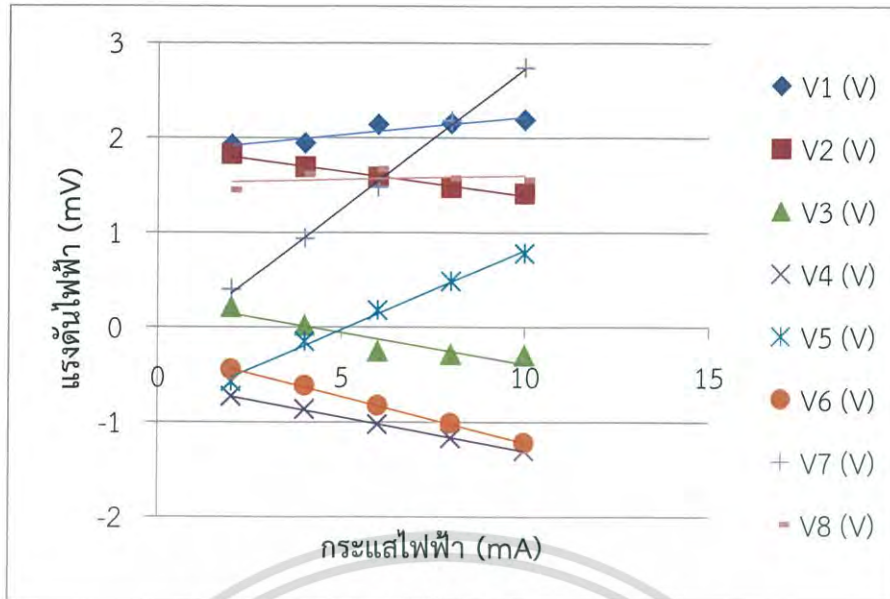


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

ตารางที่ 4.15 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
2	1.919	1.817	0.206	-0.736	-0.586	-0.451	0.393	1.436
4	1.936	1.679	0.016	-0.869	-0.153	-0.623	0.932	1.608
6	2.135	1.575	-0.256	-1.03	0.175	-0.832	1.472	1.656
8	2.144	1.467	-0.289	-1.178	0.478	-1.019	2.175	1.565
10	2.186	1.404	-0.301	-1.304	0.77	-1.227	2.733	1.546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.16 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
2	3.423	4.076	0.081	-0.347
4	3.654	2.669	0.161	-0.488
6	3.842	3.092	0.266	-0.622
8	4.075	3.008	0.384	-0.829
10	4.186	2.876	0.506	-0.936

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

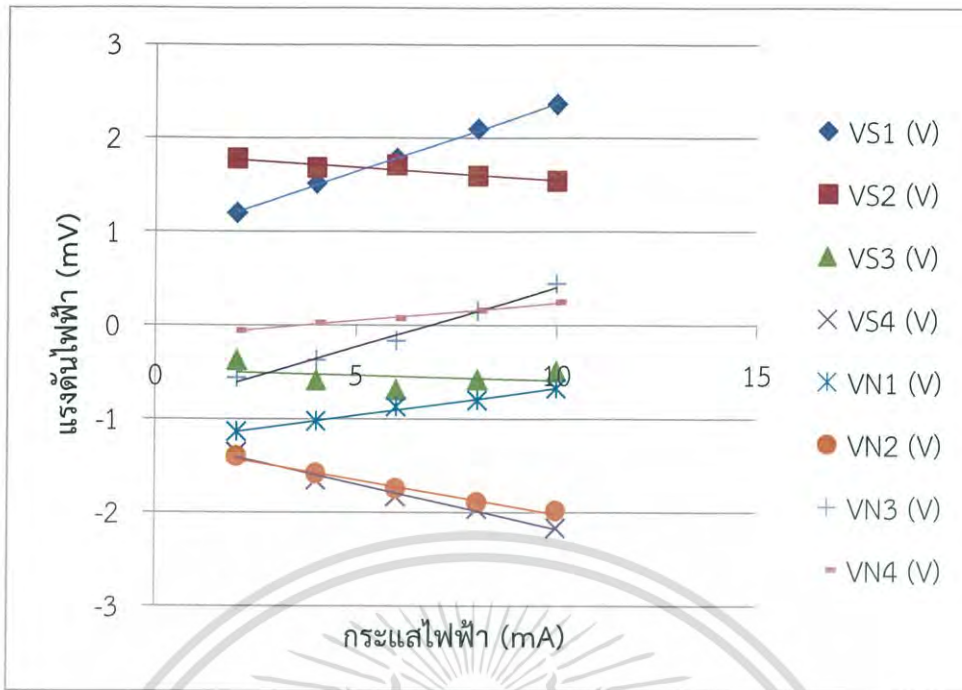
ตารางที่ 4.17 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการ วัดโดยโปรแกรม

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
2	1.194	1.775	-0.377	-1.362
4	1.511	1.678	-0.588	-1.655
6	1.778	1.707	-0.691	-1.834
8	2.094	1.593	-0.58	-1.966
10	2.357	1.535	-0.496	-2.170

ตารางที่ 4.18 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัด โดยโปรแกรม

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
2	-1.140	-1.408	-0.565	-0.060
4	-1.028	-1.591	-0.377	0.021
6	-0.875	-1.751	-0.168	0.072
8	-0.803	-1.898	0.144	0.158
10	-0.679	-1.989	0.441	0.239

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.19 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 2 [Silicon,  $\rho = 0.008 - 0.02 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีการวัดโดยโปรแกรม กับค่าที่ทราบ

ตัวแปร	ค่าที่ทราบ	วิธีวัดแบบ Manual	วิธีวัดด้วยโปรแกรม
$R_A$		0.13 $\Omega$	0.14 $\Omega$
$R_B$		0.06 $\Omega$	0.05 $\Omega$
$R_{avg}$		0.07 $\Omega$	0.09 $\Omega$
Sheet resistance		0.25 $\Omega$	0.42 $\Omega$
Resistivity	0.008 – 0.02 $\Omega \cdot cm$	0.013 $\Omega \cdot cm$	0.021 $\Omega \cdot cm$
Conductivity		78.55 1/ $\Omega \cdot cm$	47.33 1/ $\Omega \cdot cm$
$R_{hall}$		0.01 $\Omega$	0.01 $\Omega$
Sheet carrier Concentration		$5.81 \times 10^{16} cm^{-2}$	$3.54 \times 10^{16} cm^{-2}$
Bulk carrier Concentration	$2 \times 10^{17} - 7 \times 10^{18} cm^{-3}$	$1.16 \times 10^{18} cm^{-3}$	$7.09 \times 10^{17} cm^{-3}$
Mobility	111.61 – 298.34 $cm^2/V \cdot s$	422.55 $cm^2/V \cdot s$	417.31 $cm^2/V \cdot s$
Type	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>

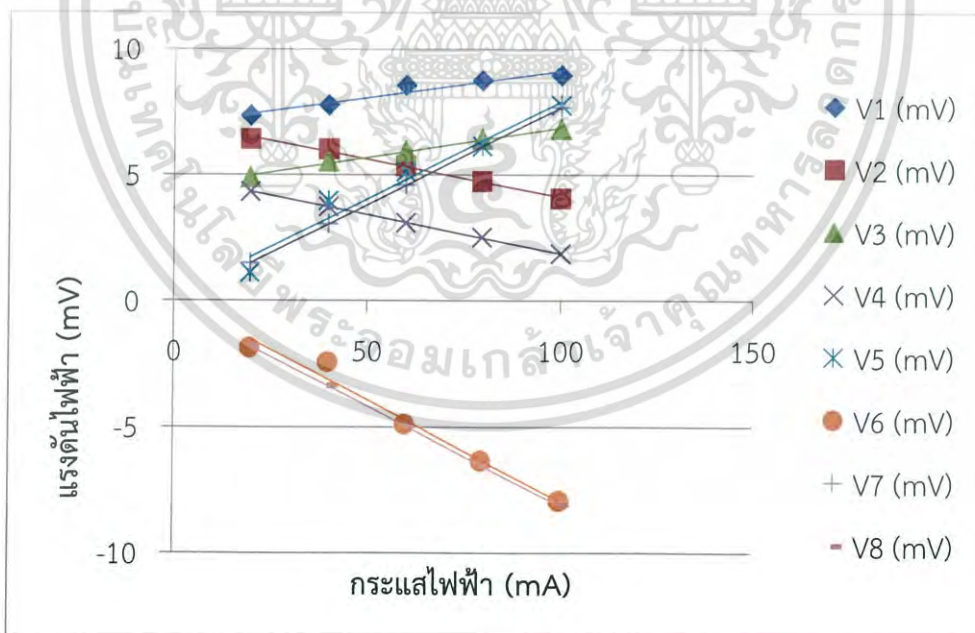
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลการวัดของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type, $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ]

โดยวิธีการวัดแบบ Manual และ วิธีการวัดด้วยโปรแกรม เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับสมบัติของซิลิกอนที่มีแหล่งอ้างอิงจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services

ตารางที่ 4.20 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
20	7.330	6.407	4.892	4.324	1.111	-1.883	1.486	-1.777
40	7.765	6.000	5.537	3.731	3.962	-2.448	3.054	-3.378
60	8.552	5.336	5.958	3.098	5.096	-4.924	4.600	-4.967
80	8.743	4.717	6.419	2.510	6.132	-6.370	6.138	-6.535
100	8.956	4.054	6.815	1.867	7.755	-7.948	7.671	-8.102



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

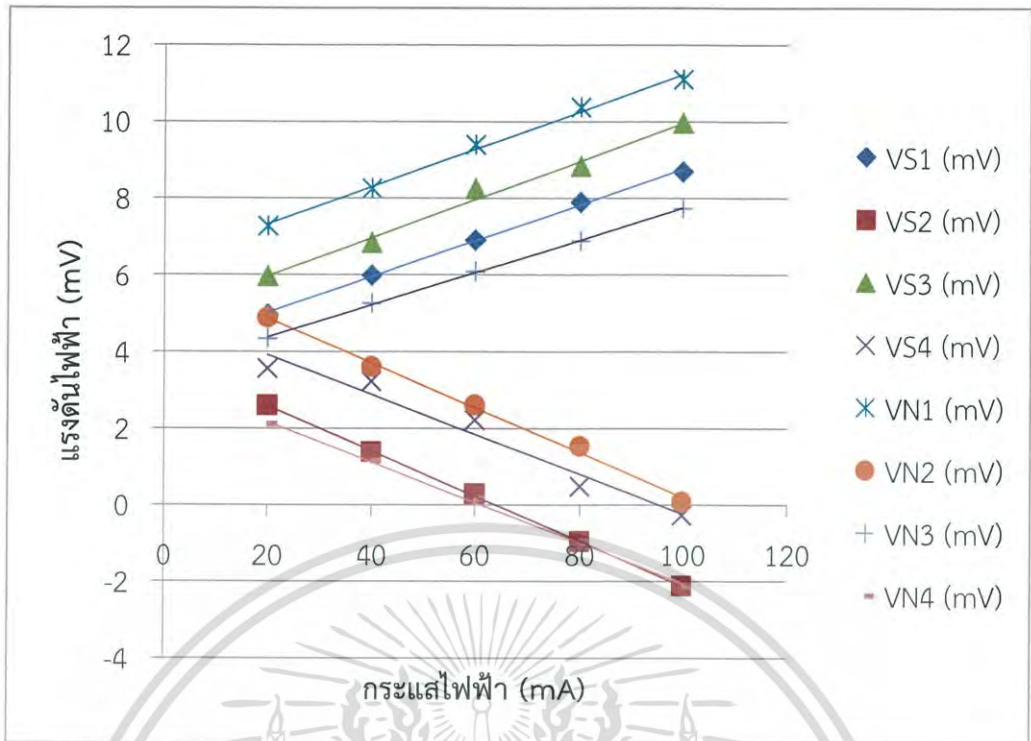
I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
20	4.851	1.239	4.776	2.558
40	5.963	0.684	6.068	1.773
60	6.901	0.601	7.113	0.384
80	6.7243	0.163	7.877	-0.617
100	8.735	0.103	8.722	-1.623

ตารางที่ 4.22 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
20	4.957	2.589	5.963	3.546
40	5.977	1.370	6.824	3.214
60	6.898	0.276	8.242	2.208
80	7.882	-0.961	8.827	0.482
100	8.683	-2.125	9.956	-0.280

ตารางที่ 4.23 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
20	7.261	4.878	4.328	2.097
40	8.238	3.585	5.244	1.129
60	9.385	2.591	6.072	0.158
80	10.360	1.518	6.874	-0.951
100	11.084	-0.067	7.724	-2.116

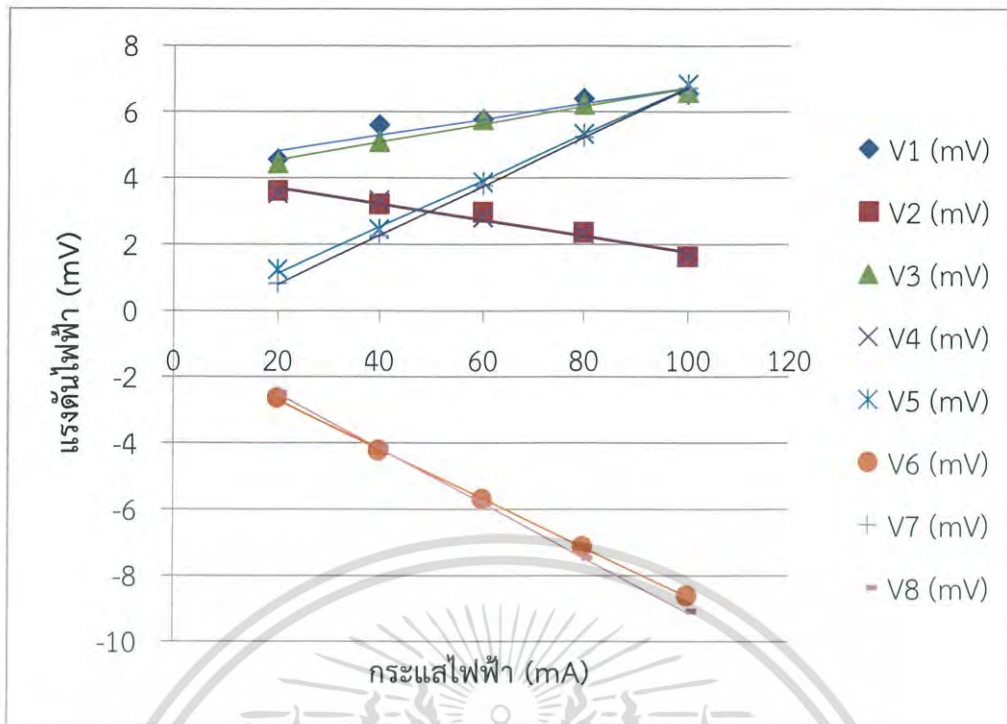


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

ตารางที่ 4.24 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
20	4.546	3.601	4.443	3.519	1.220	-2.658	0.807	-2.520
40	5.584	3.199	5.091	3.308	2.427	-4.238	2.245	-4.158
60	5.769	2.951	5.759	2.806	3.862	-5.708	3.750	-5.822
80	6.378	2.342	6.222	2.304	5.307	-7.156	5.216	-7.487
100	6.545	1.607	6.587	1.610	6.807	-8.634	6.700	-9.099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.25 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
20	4.200	1.398	4.654	3.090
40	5.206	0.659	6.550	2.403
60	5.965	0.618	7.647	1.417
80	6.640	-1.848	8.082	1.286
100	7.270	-3.120	8.714	-1.033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

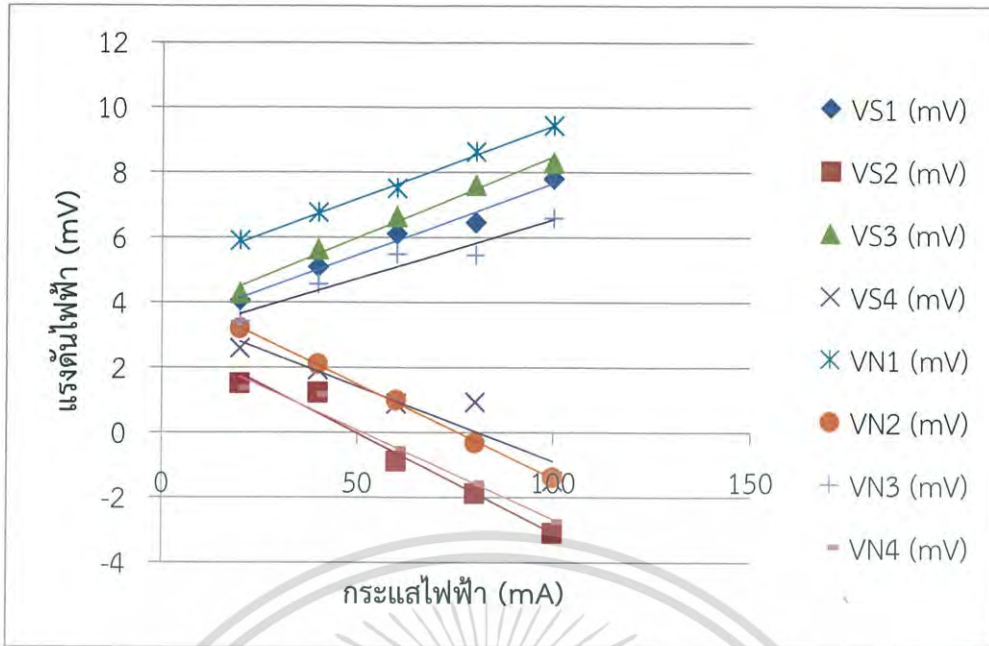
ตารางที่ 4.26 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออก จาก sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
20	4.200	1.398	4.654	3.090
40	5.206	0.659	6.550	2.403
60	5.965	0.618	7.647	1.417
80	6.640	-1.848	8.082	1.286
100	7.270	-3.120	8.714	-1.033

ตารางที่ 4.27 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
20	4.200	1.398	4.654	3.090
40	5.206	0.659	6.550	2.403
60	5.965	0.618	7.647	1.417
80	6.640	-1.848	8.082	1.286
100	7.270	-3.120	8.714	-1.033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.28 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 3 [Silicon (Sb), n-type,  $\rho = 0.01-0.05 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีการวัดโดยโปรแกรม กับค่าที่ทราบ

ตัวแปร	ค่าที่ทราบ	วิธีวัดแบบ Manual	วิธีวัดด้วยโปรแกรม
$R_A$		0.02 $\Omega$	0.02 $\Omega$
$R_B$		0.07 $\Omega$	0.07 $\Omega$
$R_{avg}$		0.05 $\Omega$	0.05 $\Omega$
Sheet resistance		0.21 $\Omega$	0.20 $\Omega$
Resistivity	0.01 – 0.05 $\Omega \cdot cm$	0.01 $\Omega \cdot cm$	0.01 $\Omega \cdot cm$
Conductivity		97.96 1/ $\Omega \cdot cm$	102.86 1/ $\Omega \cdot cm$
$R_{hall}$		0.001 $\Omega$	0.001 $\Omega$
Sheet carrier Concentration		$2.72 \times 10^{17} cm^{-2}$	$2.24 \times 10^{17} cm^{-2}$
Bulk carrier Concentration	$2 \times 10^{18} - 1 \times 10^{19} cm^{-3}$	$3.89 \times 10^{18} cm^{-3}$	$4.57 \times 10^{18} cm^{-3}$
Mobility	137.97 – 775.19 $cm^2/V \cdot s$	157.83 $cm^2/V \cdot s$	134.86 $cm^2/V \cdot s$
Type	N	N	N

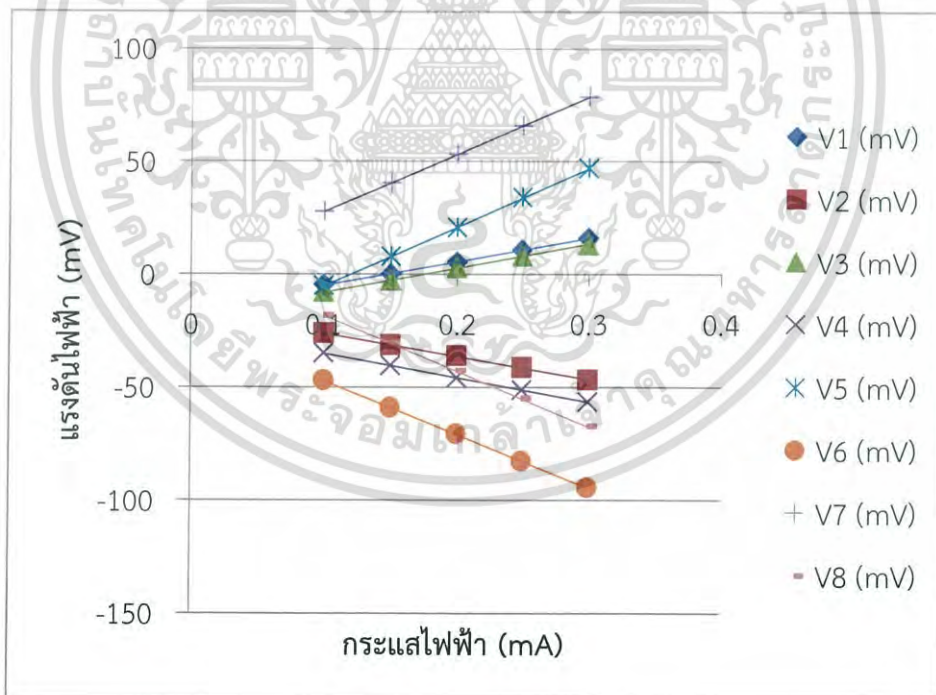
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลการวัดของ sample 4 [Silicon, p-type, $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ]

โดยวิธีการวัดแบบ Manual และ วิธีการวัดด้วยโปรแกรม เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับสมบัติของซิลิกอนที่มีแหล่งอ้างอิงจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services

ตารางที่ 4.29 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
0.10	-4.686	-26.199	-7.839	-35.091	-5.061	-47.071	27.727	-18.308
0.15	0.070	-31.386	-2.760	-40.367	7.997	-59.246	40.374	-30.619
0.20	5.310	-36.299	2.842	-45.791	20.671	-70.914	53.070	-42.896
0.25	10.800	-41.504	8.241	-51.307	33.882	-82.774	65.782	-55.193
0.30	15.918	-46.828	13.173	-56.529	46.904	-94.457	78.428	-67.505



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.30 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
0.10	6.044	-21.588	5.1602	-22.899
0.15	12.944	-28.566	11.7579	-29.822
0.20	19.902	-35.493	16.476	-36.812
0.25	26.696	-42.382	25.900	-43.967
0.30	33.713	-49.516	32.746	-51.177

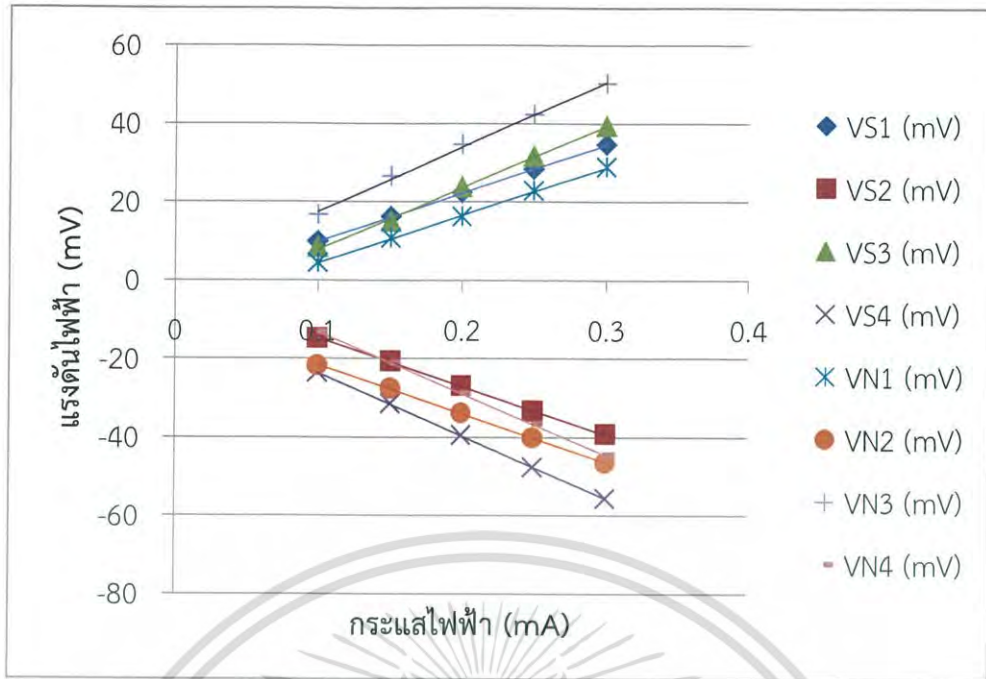
ตารางที่ 4.31 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
0.10	9.798	-14.881	8.253	-23.656
0.15	16.091	-20.792	14.8483	-31.624
0.20	22.218	-27.054	23.721	-39.646
0.25	28.243	-33.442	31.522	-47.797
0.30	34.473	-39.385	39.281	-55.811

ตารางที่ 4.32 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
0.10	4.410	-21.810	16.700	-13.322
0.15	10.595	-27.796	26.519	-21.142
0.20	16.057	-34.023	34.477	-28.910
0.25	22.737	-40.374	42.129	-36.795
0.30	28.773	-46.729	50.087	-44.683

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

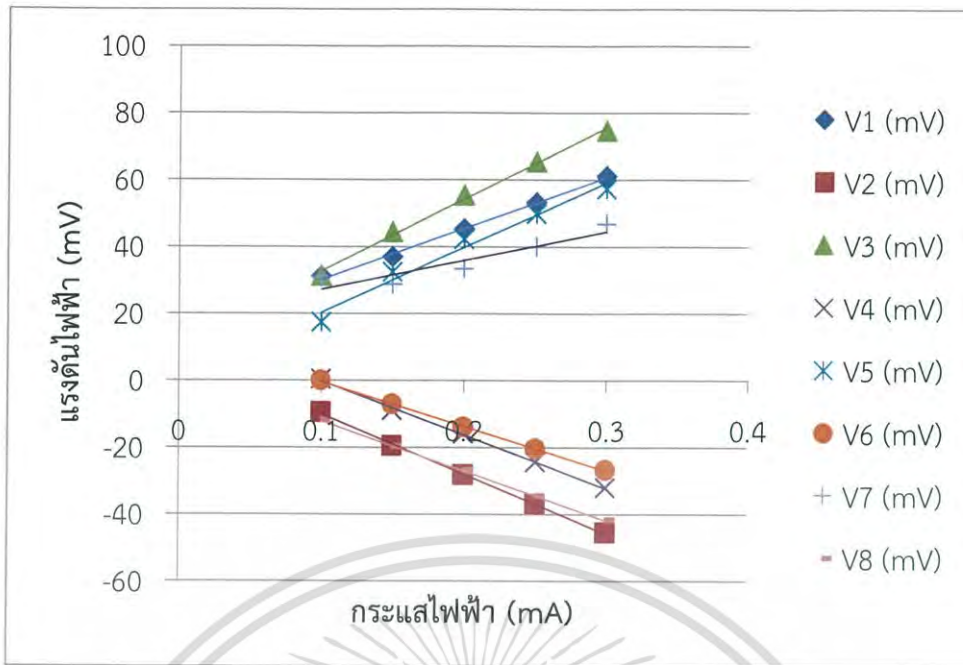


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

ตารางที่ 4.33 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
0.10	30.982	-9.531	31.197	0.330	17.225	-0.225	30.718	-11.898
0.15	36.711	-19.582	44.299	-8.897	32.324	-7.142	28.612	-19.785
0.20	45.164	-28.219	55.146	-15.905	42.037	-14.095	33.263	-26.977
0.25	53.100	-37.058	65.262	-24.474	49.722	-20.402	39.822	-34.513
0.30	60.904	-45.537	74.522	-32.198	57.132	-26.900	46.722	-41.769

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.34 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] นอกสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
0.10	14.834	32.013	-7.197	9.800
0.15	14.684	33.020	-4.749	9.598
0.20	14.474	33.333	-2.985	10.374
0.25	13.926	35.268	-3.883	13.611
0.30	11.865	37.316	-4.985	13.505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

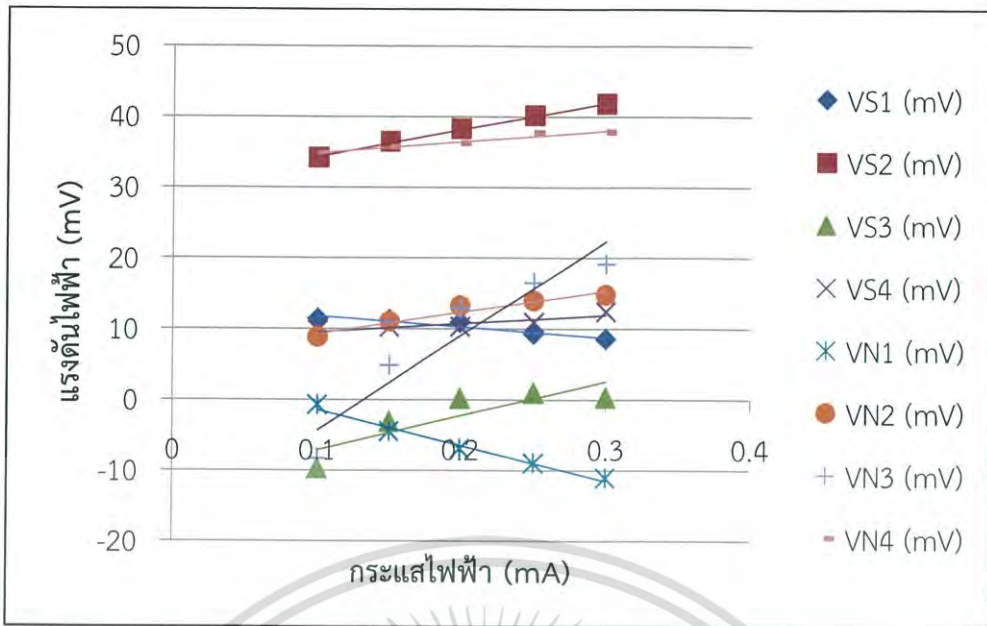
ตารางที่ 4.35 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งออกจาก sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
0.10	11.429	34.103	-9.801	9.737
0.15	11.225	36.313	-3.147	10.213
0.20	10.827	38.188	0.158	10.244
0.25	9.273	40.075	0.907	10.887
0.30	8.531	41.746	0.286	12.394

ตารางที่ 4.36 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot cm$ ] ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งเข้า sample ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
0.10	-0.772	8.728	-8.359	34.717
0.15	-4.559	10.953	4.812	35.625
0.20	-6.984	13.142	12.861	36.119
0.25	-9.018	13.905	16.446	37.633
0.30	-11.137	14.738	19.090	37.688

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30\text{-}50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ด้วยวิธีการวัดโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.37 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 4 [Silicon, p-type,  $\rho = 30\text{-}50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีการวัดโดยโปรแกรม กับค่าที่ทราบ

ตัวแปร	ค่าที่ทราบ	วิธีวัดแบบ Manual	วิธีวัดด้วยโปรแกรม
$R_A$		105.07 $\Omega$	176.98 $\Omega$
$R_B$		248.94 $\Omega$	140.75 $\Omega$
$R_{avg}$		177.01 $\Omega$	158.86 $\Omega$
Sheet resistance		756.36 $\Omega$	716.80 $\Omega$
Resistivity	30 – 50 $\Omega \cdot \text{cm}$	52.94 $\Omega \cdot \text{cm}$	51.17 $\Omega \cdot \text{cm}$
Conductivity		0.0188 1/ $\Omega \cdot \text{cm}$	0.0199 1/ $\Omega \cdot \text{cm}$
$R_{hall}$		20.34 $\Omega$	24.77 $\Omega$
Sheet carrier Concentration		1.87x10 <sup>13</sup> $\text{cm}^{-2}$	1.51x10 <sup>13</sup> $\text{cm}^{-2}$
Bulk carrier Concentration	1.5x10 <sup>14</sup> – 3.0x10 <sup>14</sup> $\text{cm}^{-3}$	2.67x10 <sup>14</sup> $\text{cm}^{-3}$	2.16x10 <sup>14</sup> $\text{cm}^{-3}$
Mobility	466.41 – 480.76 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	440.91 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	576.15 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Type	P	P	P

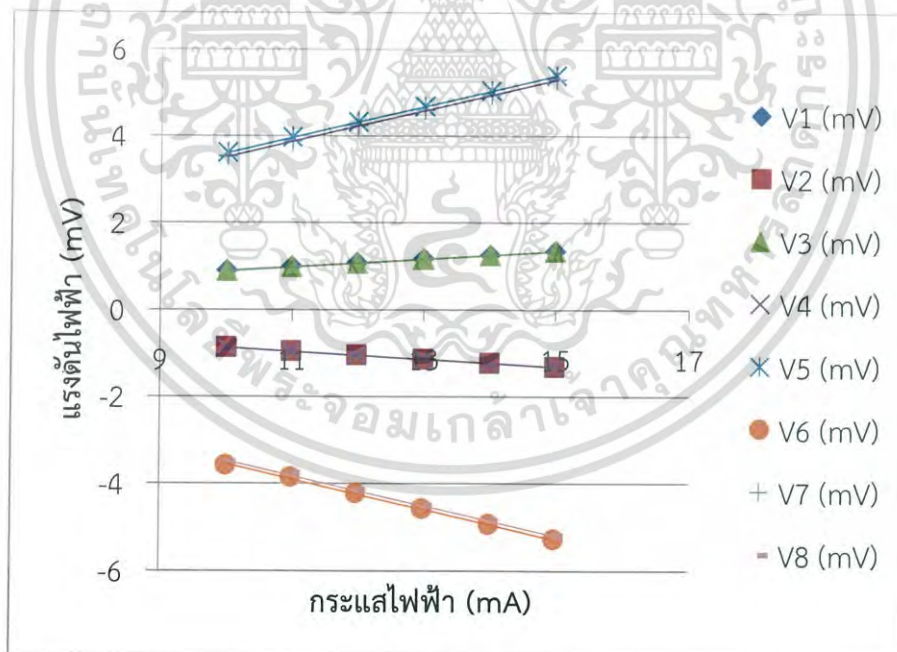
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 ผลการวัดของผู้ใช้งานจริง sample $Mg_2Si$ (0 วินาที)

โดยผู้ใช้งานนำ sample ที่ผู้ใช้งานสังเคราะห์ขึ้นเองมาทดสอบสมบัติของสาร Alloy Thermoelectric วิธีการวัดด้วยโปรแกรม

ตารางที่ 4.38 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ van der Pauw ของ sample  $Mg_2Si$  (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม

I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	V5 (mV)	V6 (mV)	V7 (mV)	V8 (mV)
10	0.896	-0.878	0.876	-0.878	3.610	-3.587	3.515	-3.521
11	0.987	-0.967	0.978	-0.965	3.956	-3.86	3.871	-3.773
12	1.076	-1.057	1.070	-1.054	4.313	-4.234	4.228	-4.158
13	1.164	-1.146	1.160	-1.143	4.673	-4.592	4.584	-4.514
14	1.253	-1.235	1.250	-1.232	5.033	-4.943	4.938	-4.86
15	1.342	-1.325	1.339	-1.321	5.393	-5.295	5.292	-5.205



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ van der Pauw ของ sample  $Mg_2Si$  (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.39 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample  $Mg_2Si$  (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม

I (mA)	V1 (I,CA/V,BD)	V2 (I,AC/V,BD)	V3 (I,DB/V,AC)	V4 (I,BD/V,AC)
10	2.536	-2.572	2.643	-2.697
11	2.826	-2.867	2.981	-2.911
12	3.086	-3.141	3.254	-3.172
13	3.346	-3.400	3.524	-3.442
14	3.605	-3.660	3.795	-3.711
15	3.864	-3.920	4.065	-3.979

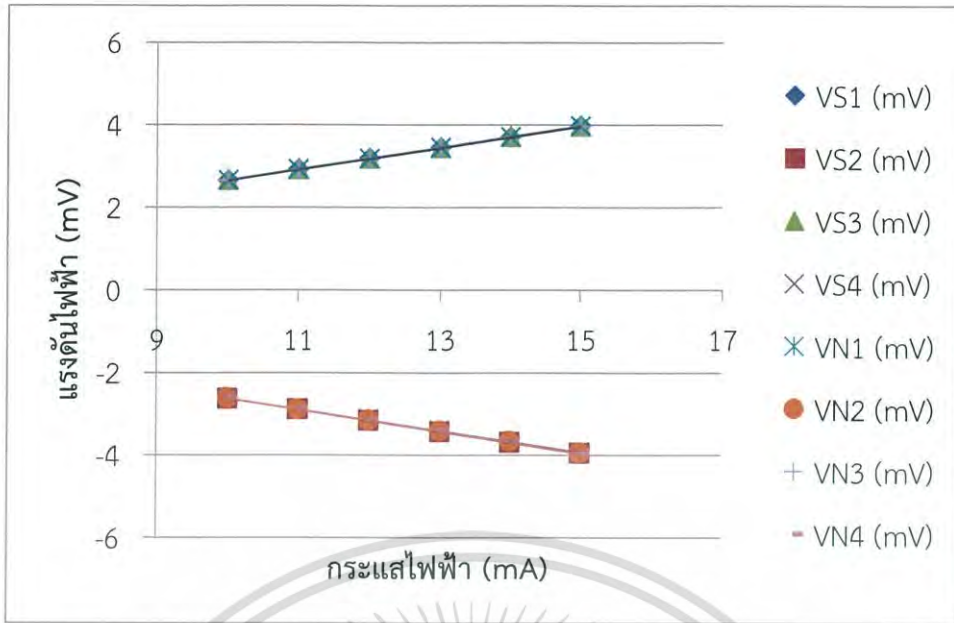
ตารางที่ 4.40 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample  $Mg_2Si$  (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม

I (mA)	VS1 (I,CA/V,BD)	VS2 (I,AC/V,BD)	VS3 (I,DB/V,AC)	VS4 (I,BD/V,AC)
10	2.647	-2.640	2.665	-2.638
11	2.910	-2.899	2.917	-2.881
12	3.174	-3.177	3.179	-3.140
13	3.439	-3.440	3.443	-3.406
14	3.703	-3.702	3.708	-3.672
15	3.968	-3.967	3.973	-3.938

ตารางที่ 4.41 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ของ sample  $Mg_2Si$  (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม

I (mA)	VN1 (I,CA/V,BD)	VN2 (I,AC/V,BD)	VN3 (I,DB/V,AC)	VN4 (I,BD/V,AC)
10	2.644	-2.634	2.646	-2.627
11	2.905	-2.896	2.900	-2.897
12	3.170	-3.154	3.161	-3.170
13	3.435	-3.417	3.423	-3.430
14	3.699	-3.682	3.685	-3.690
15	3.963	-3.947	3.949	-3.953

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบ Hall Effect ของ sample  $Mg_2Si$  (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรม

ตารางที่ 4.42 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample  $Mg_2Si$  (0 วินาที) ของผู้ใช้งานจริง โดยวิธีการวัดด้วยโปรแกรมกับค่าที่ทราบ

ตัวแปร	ค่าที่ทราบ	วิธีวัดด้วยโปรแกรม
$R_A$		0.35 $\Omega$
$R_B$		0.09 $\Omega$
$R_{avg}$		0.22 $\Omega$
Sheet resistance		0.88 $\Omega$
Resistivity	0.07 $\Omega \cdot cm$	0.13 $\Omega \cdot cm$
Conductivity		7.50 $1/\Omega \cdot cm$
$R_{hall}$		0.005 $\Omega$
Sheet carrier Concentration		$8.26 \times 10^{16} cm^{-2}$
Bulk carrier Concentration	$4.30 \times 10^{17} cm^{-3}$	$5.27 \times 10^{17} cm^{-3}$
Mobility	104 $cm^2/V \cdot s$	88.98 $cm^2/V \cdot s$
Type	N	N

(ที่มา : ref [1] Jun-ichi Tani, Hiroyasa kibo. Internetullics 16(2008) 414-423 [2] J-Y

Jung, K-H Park and I-H Kim. Materials science and engineering 18(2011) 142006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 อภิปรายผลการวัด

จากการทดลองผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีการวัดโดยโปรแกรม โดยการวัดชิ้นงานสามารถนำผลการคำนวณเพื่อบ่งบอกสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ sheet resistance :  $R_s$  , Resistivity :  $\rho$  , conductivity :  $\sigma$  , sheet carrier concentration :  $n_s$  , Bulk electrical resistivity :  $n_b$  , และ Majority carrier mobility :  $\mu$  โดยการวัดทั้ง 4 Sample ค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่ตรงกับค่าที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ทำเพื่อพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ที่สามารถใช้ร่วมกับการวัดแบบแวนเดอร์เพาท์ซึ่งควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้โปรแกรม LabVIEW ในการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการวัด โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นมานั้นจะสามารถควบคุมการสับขั้วไฟฟ้าของเครื่อง Switch system กำหนดการทำงานของเครื่อง Source Meter พร้อมด้วยหน้าต่างการทำงานติดต่อกับผู้ใช้งานและแสดงผลของการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ได้แก่ สภาพต้านทาน ชนิด ความหนาแน่น และสภาพคล่องของพาหะ โดยในการวัดค่าของสภาพต้านทานสามารถวัดได้จากการวัดแบบแวนเดอร์เพาท์เพื่อป้องกันการเกิดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้จากความต้านทานของรอยต่อของขั้วไฟฟ้าเป็นการทดลองเพื่อสร้างเครื่องมือวัดที่สามารถใช้งานได้จริง โดยมีขั้นตอนการทดลองระบบการวัดของระบบที่สร้างขึ้นมากับการวัดแบบ Manual เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าระบบที่สร้างขึ้นมีการสับขั้วไฟฟ้าได้ถูกต้องและนำค่าที่วัดได้นั้นมาเปรียบเทียบกับค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services

โดยจากผลจากการทดลองพบว่าโปรแกรมสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับค่าที่วัดด้วยวิธีวัดแบบ Manual และค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services จึงพิจารณาได้ว่าการพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของชุดเครื่องมือสำหรับวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นโปรแกรมที่สามารถใช้วัดสารกึ่งตัวนำที่มีช่วงสภาพต้านทาน  $0.008 \Omega \cdot \text{cm}$  ถึงสภาพต้านทาน  $50 \Omega \cdot \text{cm}$  ได้เป็นอย่างดีและโปรแกรมยังสามารถคำนวณค่าสมบัติของสารกึ่งตัวนำได้อย่างถูกต้องและสามารถตรวจสอบสถานะของพาหะข้างมากได้อย่างถูกต้องอีกด้วย

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียม Sample ที่ใช้ในการทดลองผลทำการทดลองต้องมีความชำนาญในการเตรียมสารทำความสะอาดชิ้นงานตัวอย่างและต่อขั้วไฟฟ้าให้ถูกต้องตามระเบียบของแวนเดอร์เพาท์ถึงจะได้ค่าที่แม่นยำ
2. ควรเลือกช่วงของการจ่ายกระแสให้เหมาะกับชิ้นงาน ตามข้อจำกัดของเครื่อง Source Meter
3. เมื่อมีการกลับชิ้นงานควรมีการพักเครื่องประมาณ 5 นาทีเพื่อให้ประจุอยู่ในสภาพที่สมดุล เอกสารจะทำให้ได้ค่าที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศรี. (2554). LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาาระบบการวัดและควบคุม.

กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น

กรณิศ นาคศิษย์คุณงาม, กิตติทัต บุญธรรมหนัก, ปวีณา เมฆสุกใส. (2557). การพัฒนาระบบแวนเดอร์เพอร์และปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จิรนนท์ เจริญพันธ์, ภัทรพล ศอกจะบก. (2558). การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อหาสมบัติของสาร กึ่งตัวนำควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทรงพล กาญจนชัย. 2559. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IOP Science. 2015. The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems. [Online]. Available :<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/27/22/223201>

KEITHLEY. Switching and Control. [Online]. Available : <http://download.tek.com/datasheet/Switching2.pdf>.

KEITHLEY. 2450 SourceMeter® SMU Instrument. [Online]. Available : [https://www.tek.com/sites/default/files/media/media/resources/1KW-60904-02450\\_DataSheet\\_0.pdf](https://www.tek.com/sites/default/files/media/media/resources/1KW-60904-02450_DataSheet_0.pdf)

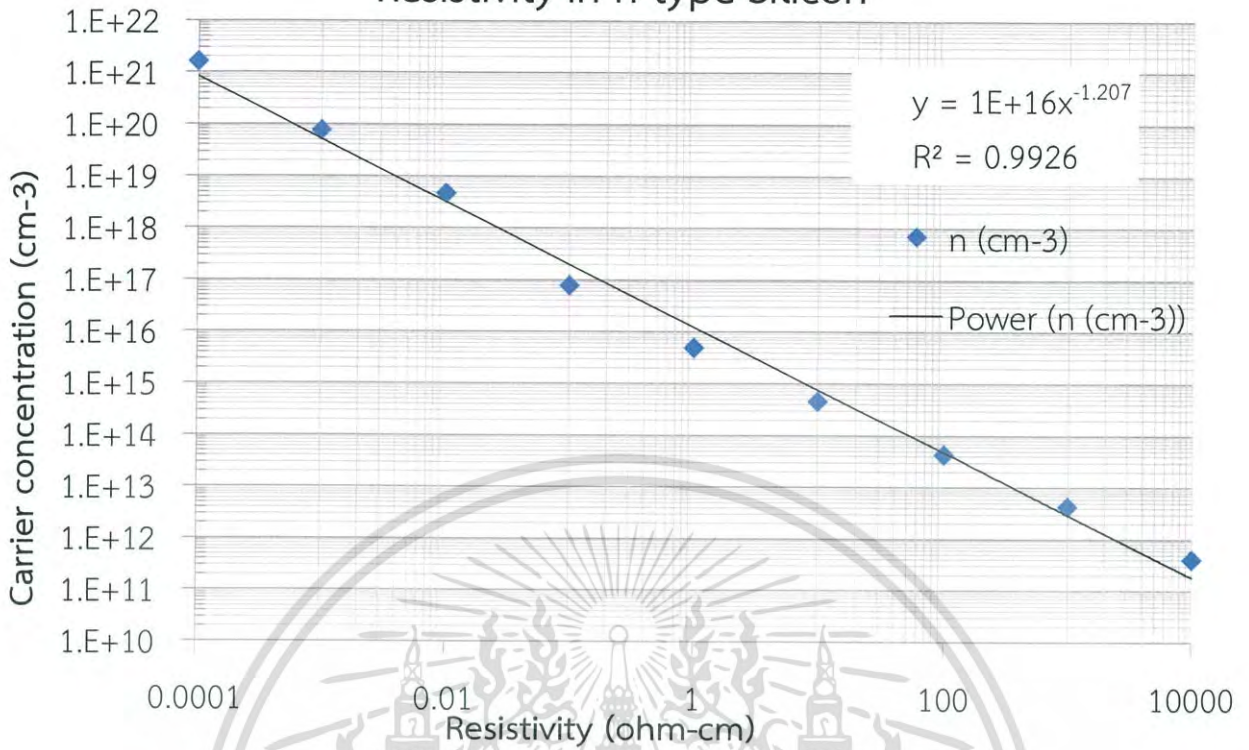
KEITHLEY. Model 2400 Serise SourceMeter User's Manual. [Online]. Available : <http://research.physics.illinois.edu/bezryadin/labprotocol/Keithley2400Manual.pdf#page7>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

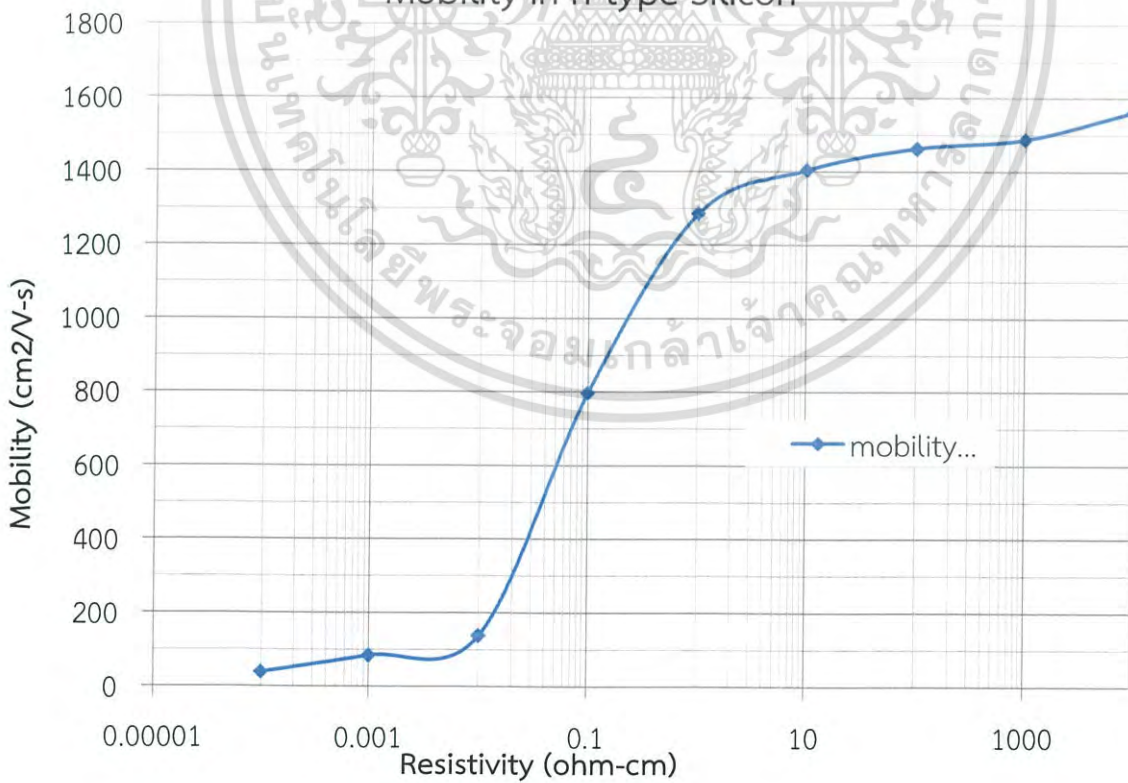


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Resistivity in n-type Silicon

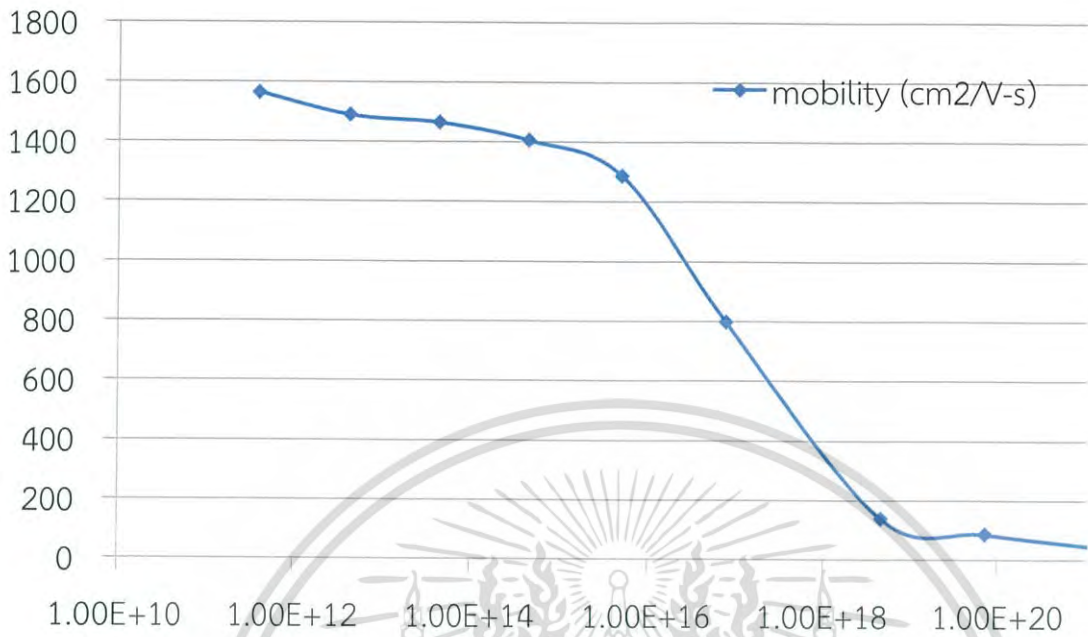


### Mobility in n-type Silicon



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

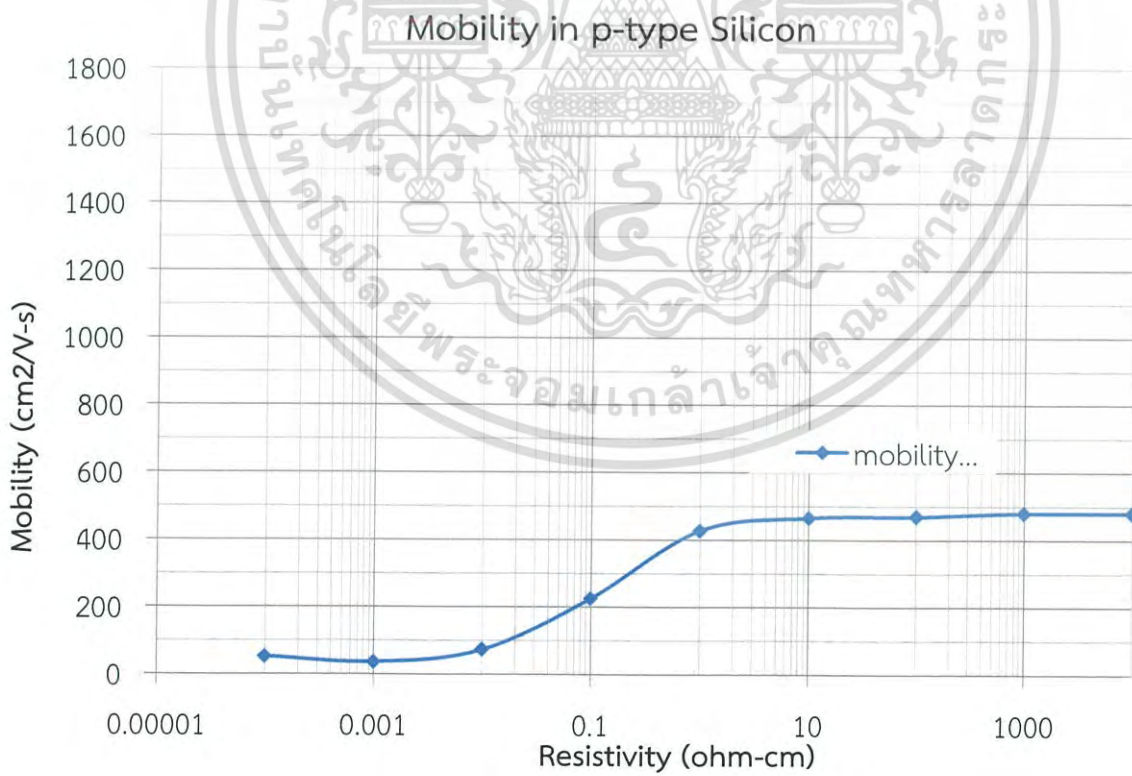
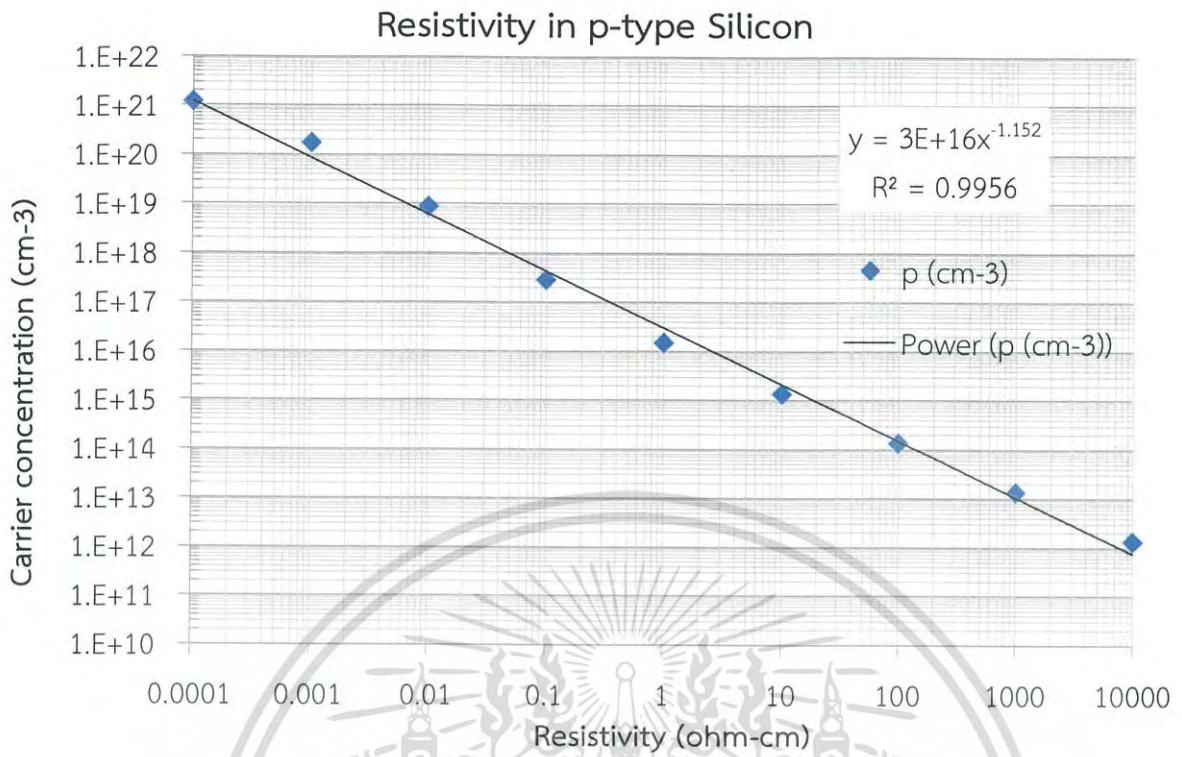
### mobility (cm<sup>2</sup>/V-s) n-type



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_s$  (ohm-cm) กับ mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) sample n-type

$R_s$ (ohm-cm)	$n$ (cm-3)	$n$ (cm-2)		mobility ( $\text{cm}^2/\text{V-s}$ )			
0.0001	1.60E+21	1.60E+21	1.60E+21	39.063	1.011	Cz	39.0625
0.001	7.38E+19	7.38E+19	7.38E+19	84.688	2.191	Cz	84.68835
0.01	4.53E+18	4.53E+18	4.53E+18	137.969	3.57	Cz	137.9691
0.1	7.84E+16	7.84E+16	7.84E+16	797.194	20.627	Cz	797.1939
1	4.86E+15	4.86E+15	4.86E+15	1286.008	33.275	Cz,Fz	1286.008
10	4.45E+14	4.45E+14	4.45E+14	1404.494	36.341	Cz,Fz	1404.494
100	4.27E+13	4.27E+13	4.27E+13	1463.7	37.873	Cz,Fz	1463.7
1000	4.20E+12	4.20E+12	4.20E+12	1488.095	38.504	Fz	1488.095
10000	4.00E+11	4.00E+11	4.00E+11	1562.5	40.43	Fz	1562.5
36	2.50E+14	2.50E+14					694.4444
0.3	1.05E+17	1.05E+17					197.7026
B	3600		Gauss	0.036		4E-05	Vs/cm2
thickness	10000		micron				
	0.01		m	1	cm		
q	1.6E-19		coulomb				
$R_s$	0.3		ohm				
Resistivity	0.3		ohm-cm				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# Switching and Control

## Series 3700A Selector Guide

## 7001 7002 Selector Guide Selector Guide

## 707B 708B Selector Guide

## System 46

## System 46T

Technical Information . . . . .	160
System Switch/Multimeter and Plug-In Cards . . . . .	162
Plug-In Cards and Accessories for Series 3700A . . . . .	172
Plug-In Cards for Series 3700A . . . . .	174–195
80-channel Switch/Control Mainframe . . . . .	198
400-channel Switch/Control Mainframe . . . . .	200
Switch Cards for 7001, 7002 . . . . .	202–203
Switch Card Accessories for 7001, 7002 . . . . .	203
Switch Cards for 7001, 7002 . . . . .	204–213
Six-slot Semiconductor Switching Matrix Mainframe . . . . .	214
Single-slot Semiconductor Switching Matrix Mainframe . . . . .	214
Switch Cards and Accessories for 707B, 708B . . . . .	219
Switch Cards for 707B, 708B . . . . .	219–223
32-channel, Unterminated, RF/Microwave Switch System . . . . .	224
32-channel, Terminated, RF/Microwave Switch System . . . . .	227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1.888.KEITHLEY (U.S. only)

[www.keithley.com](http://www.keithley.com)

A Greater Measure of Confidence

**KEITHLEY**

A Tektronix Company

# Technical Information

# Switching and Control

Achieving required system accuracies and precision requires selection of appropriate instruments, creativity in designing test methods, and careful attention to specifications and error terms. Most test system designs are complex enough that it is in the designer's best interest to minimize the number of uncontrolled variables. To accomplish this, the system switch performance should be tightly specified.

Special consideration should be given to tests that approach the specified limits of accuracy, resolution, or sensitivity of the measurement or sourcing instruments. These generally represent the "most critical test requirements," and switching should be selected to support these tests. A system designed to perform against the "most critical test requirements" will usually satisfy other test requirements as well.

### How Do I Specify a Switch System for My Application?

Whether you are designing your own switching system or preparing to contact Keithley's applications department for assistance, you need to define certain parameters for your test system and understand how you want everything interconnected.

First, define your parameters. This includes:

- Measurements—List all the required measurement types and accuracies.
- Sources—List all the sources required.
- Quantity—List the number of terminals on the DUT and how many devices are involved.
- Signal characteristics—List signal types, levels and frequency, and impedance requirements.
- Speed—What are the speed requirements?

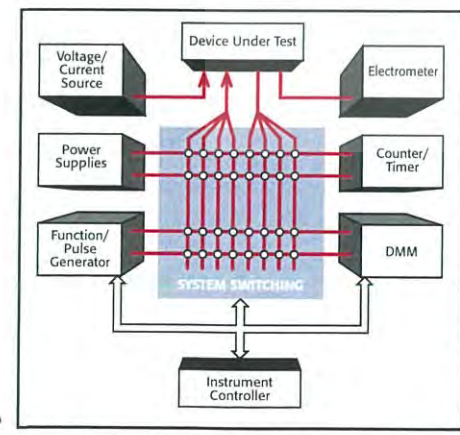


Figure 1. General Purpose Test System

- Environment—Temperature, humidity, etc.
- Communication interface— GPIB, RS-232, Ethernet, USB

Next, sketch the system. Given the number of terminals on the device and the number of instruments (source and measure), develop a picture of what type of switch and configuration will be needed. This is likely to be an iterative process as you identify what types of switching equipment are actually available.

Once you have done the groundwork, you are ready to configure the switching for your test system:

- Determine the appropriate switch and switch card configurations
- Select the appropriate switch system
- Select source and measure equipment
- Select cables and/or other accessories
- Identify need for fuses, limit resistors, diodes, etc.
- Determine the uncertainties and compare them with the required accuracies

### Switching Configurations

The variety and size of switching configurations available determine the efficiency of the final switching design, including the amount and complexity of cabling and interconnect at the time of system integration. These are the basic building blocks of any switching system.

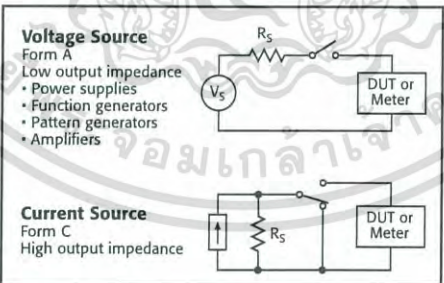


Figure 2. Example Switching Configurations

A switching configuration can be described by the electrical property being switched, its mechanical construction, or its function in the test system (Figure 2). These descriptions of the signal paths or electrical interconnects are necessary for laying out and wiring the test system.

A matrix switch (Figure 3) is the most versatile type of system switching. But first, a word on terminology here — Do not confuse a switch matrix

(often called a switching mainframe) with a matrix switch. With a matrix switch, any input can be connected to any output, singly or in combination. This helps minimize the need for complex wiring and interconnect systems and can simplify the DUT interface. Although a matrix switch will work in virtually any switching application, it should not necessarily be your first choice of switch configuration.

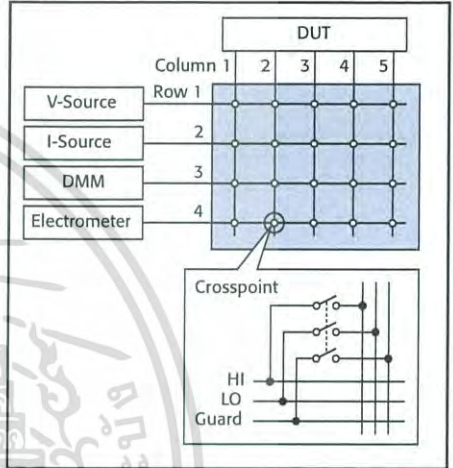


Figure 3. Matrix Switch

Consider an example where you need to connect four different instruments to ten different test points on a device-under-test. If you need to be able to connect any combination of instruments to any combination of test points at any time, then you do need a matrix switch. But, if you only need to connect one instrument to one test point at any time, then you can combine a four-to-one multiplexer with a one-to-ten multiplexer to make your connections. The multiplexer approach only uses 14 relays, while the full matrix uses 40. If you simply choose a matrix switch for the second example, you will end up paying for 26 relay channels you don't need. Careful planning can result in a more compact and economical switch system.

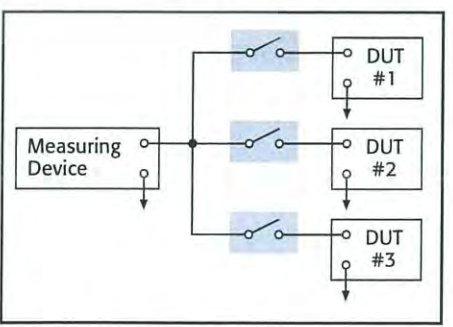


Figure 4. Multiplex Switch

1.888.KEITHLEY (U.S. only)  
www.keithley.com

# Technical Information

# Switching and Control

A multiplex switch (Figure 4) connects one instrument to multiple devices under test or multiple instruments to one device under test. The multiplex switch is useful in combination with matrix or other configurations to expand switching capacity by sharing electrical paths, to provide additional isolation and reduce crosstalk between channels, or to build special configurations.

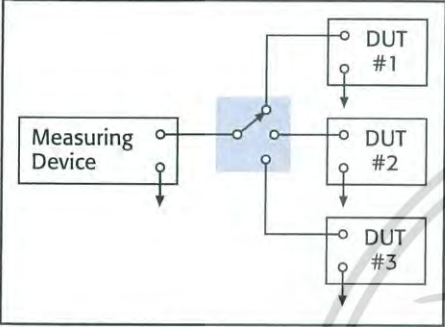


Figure 5. Scanner Switch

A scanner (Figure 5) is a special case of multiplex switching in which switch closures are sequential or serial, sometimes with the capability to skip channels.

The isolated switch configuration consists of individual uncommitted relays, often with multiple poles. Isolated switches are not connected to any other circuit, and are therefore free for building very flexible and unique combinations of input/output configurations with the addition of some external wiring. This type of switch can be useful for creating additional isolation between circuits, providing safety interlock, actuating other relays or circuits, or building special topologies such as binary ladders and tree structures.

### Electrical Specifications

Electrical specifications of the switching cards contribute significantly to the overall performance and signal integrity in the test system. When trying to achieve high accuracy, resolution, and sensitivity or to route high frequency signals, high currents, and high voltages with minimum degradation in the test signal, the electrical performance of the switching card must be known. Match the system's critical test requirements against the specified performance of the switch. If the requirement is to measure a one-volt reference to one microvolt, be certain that the contact potential of the switch is not hundreds of microvolts. If switching of power supply voltage is required, be certain that the switch has sufficient current carrying capacity. When measuring resistances of less than one kΩ, be certain the switch will support four-wire measurements.

CHARACTERISTICS	NECESSARY FOR:
Contact potential (limits low voltage signal switching)	Precision measurement of voltage signals of less than 1V, as in reference testing, drift testing, and temperature coefficient testing.
Current offset (limits low current signal switching)	Measurement of signals of less than 1mA, as in semiconductor characterization and insulation resistance tests.
Characteristic impedance	Signal integrity in RF switching.
Thermocouple cold junction reference	Accurate measurements of thermocouple sensor devices.
Four-wire (automatic pairing of channels to facilitate switching of source and sense leads)	Precision measurement of resistance less than 1kΩ and switching of remote sensing voltage supplies.
Maximum current	Switching of power supplies and high power circuits.
Maximum voltage	Isolation and safety in high voltage systems.
Maximum power	Determining maximum current and/or maximum voltage that a relay can switch to prevent damaging the printed circuit board and relays.
Switch life	Determining maximum switch activations that can be expected under hot or cold switching.

Figure 6. Switching Performance Characteristics

The switching card specifications represent the performance of a single card. If additional cards are connected together, actual performance parameters such as offset current and insertion loss will be a function of the entire system, not just a single card. Each extra card and connecting cable adds some degradation. It may be necessary to characterize the entire system (including switching) in some applications.

Figure 6 describes a few performance characteristics and where they apply to improve system performance. There are many other characteristics to consider, depending on the type and level of signal being switched and the expected performance from the test system. The switching-selector guides group switching cards according to key performance features. Many switches actually fit into multiple categories and you should look carefully at all of the switch card specifications before making a final selection. Refer to Keithley's Switching Handbook for a more in-depth discussion of switching specifications and their effect on measurement performance.

### Mainframe Capabilities

A switching mainframe provides a convenient mechanical and programming environment for Keithley switching cards and can be selected to suit the size of the system. The Model 3706A offers six slots in a full rack 2U high enclosure and is compatible with a growing family of high density and high speed switching cards. For more diverse signal ranges the Models 7001 (two-slot) and 7002 (ten-slot) switch systems are compatible with the full range of more than 30 cards.

For low level semiconductor applications, the Model 707B (six slots) and 708B (one slot) main-

frames are compatible with six specialized high density configurations including high speed, low leakage matrix configurations.

### Switching Density

The high channel capacity Keithley mainframes provide reduces the complexity of a switch application by minimizing the number of mainframes and cards required. The Model 3706A is our highest density switching mainframe offering up to 576 two-wire multiplexer channels in a single 2U high, full rack mainframe. The half-rack 7001 has a capacity of up to 80 two-pole channels, and the ten-slot 7002 can accommodate 400 two-pole channels. The 707B can handle up to 576 channels or matrix crosspoints, while the 708B can accommodate up to 96 channels or crosspoints. The high density cards for each of these mainframes are designed for easy interconnect and wiring.

### Channel Status

The Series 3700A with its LXI class B compliance offers an elaborate embedded web browser interface for intuitive point and click control and monitoring of all switch positions. The Series 7000 and 700 switch mainframes provide a visual display of each switch position on the front panel.

### Expansion

The mainframe Models 3706A, 7001, 7002, and 707B each provide an analog backplane that can be used to make connections between cards when building large matrix or multiplexer configurations that require several cards. The backplane eliminates intercard wiring and increases configuration flexibility.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1.888.KEITHLEY (U.S. only)

www.keithley.com

KEITHLEY

A Greater Measure of Confidence

A Tektronix Company

Technical information: Switching and control

SWITCHING AND CONTROL

# 7001

## Switch/Control Mainframe

### 80-channel



- Supports industry's broadest range of signals
- Integrates easily with DMM and SourceMeter<sup>®</sup> SMU instruments
- Full channel status display
- 2 card slots
- Supports 17 switch/control cards

### Ordering Information

**7001 80-channel Switch/Control Mainframe**

The Model 7001 is a half-rack, high density, two-slot mainframe that supports the widest range of signals in the test and measurement industry. DC switching capabilities from nanovolts to 1100V and femtoamps to 5A, as well as RF and optical switch support, make the Model 7001 a versatile production test tool for a wide array of applications.

Built-in scan control eliminates the need for the computer to control every step of the test procedure. Simply program the 7001 to control channel spacing, scan spacing, and the number of scans. A built-in non-volatile memory stores up to 100 complete switch patterns. You can include these memory locations as part of the scan list.

**Up to 80 channels of 2-pole switching.** Each slot of the 7001 can accommodate up to 40 channels. This means fewer switch cards are required, reducing the amount of switching hardware needed. Higher density also provides extra capacity and flexibility.

**Analog backplane.** The 7001's analog backplane is used by the high density switch cards. The backplane eliminates intercard wiring and increases configuration flexibility. Two cards can be connected through the backplane to create a 1x80 multiplexer, a 4x20 matrix, or a multiplexer/matrix combination that provides matrix row expansion.

**Channel status display.** See the status of every channel simultaneously. The vacuum fluorescent display of the 7001 shows the open/close status of each channel in the mainframe simultaneously. The graphical display pattern makes it much easier to configure a test system, make modifications, or debug an existing program. The status of the cards in both slots is displayed side by side on the same screen.

**Easy to set up and use.** The 7001 has a number of built-in features that make it easy to set up, run, change, or modify. It conforms to IEEE-488.2 and SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments). All aspects of the instrument can be programmed from the front panel and over the IEEE bus.

**Trigger Link.** Trigger Link is a high speed trigger bus that provides simple trigger coordination between the Model 7001 and other instruments. This bus eliminates GPIB communication delays during scanning to increase overall system throughput dramatically.

**17 switch/control cards available.** The 7001 switch cards accommodate a broad range of signals, maintain very high accuracy, and will not degrade signal quality. By minimizing signal errors, these cards will prevent degradation due to offset voltage, isolation resistance, and leakage current.

With its broad range of available cards, the 7001 provides multi-pole switching. Cards such as the 7011 can be used in either 2- or 4-pole configuration. If a card does not have the pole capacity required, the 7001 can still accommodate the application—just select the CARD PAIR function. It allows the channel closures in both slots to be synchronized for up to 8-pole switching.

### ACCESSORIES AVAILABLE

#### COMMUNICATION INTERFACES AND CABLES

7007-1	Double Shielded, Premium GPIB Cable, 1m
7007-2	Double Shielded, Premium GPIB Cable, 2m
KPCI-488LPA	IEEE-488 Interface/Controller for the PCI Bus
KUSB-488B	IEEE-488 USB-to-GPIB Interface Adapter

#### RACK MOUNT KITS

4288-1	Single Fixed Rack Mount Kit
4288-2	Dual Fixed Rack Mount Kit

#### TRIGGERING

8501-1	Trigger Link Cable, DIN-to-DIN, 1m
8501-2	Trigger Link Cable, DIN-to-DIN, 2m
8503	Trigger Link Cable, DIN-to-dual BNC, 1m
8505	Male to 2-Female Y-DIN Cable for Trigger Link

### SERVICES AVAILABLE

7001-3Y-EW	1-year factory warranty extended to 3 years from date of shipment
------------	-------------------------------------------------------------------

Matrix cards are displayed in row-column format. Only the available rows and columns of the card are displayed. Rows are horizontal and columns are vertical.



Matrix crosspoints are entered in row-column format. The first number selects the card, the second is the row, and the third number is the column.



Multiplexer card display. The first row across represents channels 1 to 10. The second row is channels 11 to 20. Only the available channels are displayed.

Scan in any order. A scan does not have to be a contiguous set of channels. Scan forward, backward, or skip channels.

Display indicates scanning. As a scan sequence is executed, the display updates to show the scanning action.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1.888.KEITHLEY (U.S. only)

[www.keithley.com](http://www.keithley.com)

**KEITHLEY**

A Greater Measure of Confidence

A Tektronix Company

# 7001

# Switch/Control Mainframe

## 80-channel

### System

**CAPACITY:** 2 plug-in cards per mainframe.

**MEMORY:** Battery backed-up storage for 100 switch patterns.

**SWITCH SETTling TIME:** Automatically selected by the mainframe for each card. Additional time from 0 to 99999999 seconds can be added in 1ms increments.

**TRIGGER SOURCES:**

- External Trigger (TTL-compatible, programmable edge, 600ns minimum pulse, rear panel BNC).
- IEEE-488 bus (GET, \*TRG)
- Trigger Link
- Manual (front panel)
- Internal Timer, programmable from 1ms to 99999999 seconds in 1ms increments.

**STATUS OUTPUT:** Channel Ready (TTL-compatible signal, rear panel BNC). Low going pulse (10 $\mu$ s typical) issued after relay settling time. For two different switch cards, 7001 will be set to the slowest relay settling time.

**SWITCHING SEQUENCE:** Automatic break-before-make.

**MAINFRAME DIGITAL I/O:** 4 open-collector outputs (30V maximum pull-up voltage, 100mA maximum sink current, 10 $\Omega$  output impedance), 1 TTL compatible input, 1 common.

**RELAY DRIVE:** 700mA maximum for both card slots.

**CARD SIZE:** 32mm high  $\times$  114mm wide  $\times$  272mm long (1 $\frac{1}{4}$  in  $\times$  4 $\frac{1}{2}$  in  $\times$  10 $\frac{3}{4}$  in).

**CARD COMPATIBILITY:** Fully compatible with all 7XXX cards.

### Throughput

#### EXECUTION SPEED OF SCAN LIST<sup>1</sup>:

	7011 Card	7015 Card
Individual Channels:	130/second	500/second
Memory Setups:	125/second	450/second

#### TRIGGER EXECUTION TIME (maximum time from activation of Trigger Source to start of switch open or close):

Source	Latency	Jitter
GET <sup>2</sup>	200 $\mu$ s	<50 $\mu$ s
*TRG <sup>3</sup>	5.0 ms	
Trigger Link	200 $\mu$ s	<13 $\mu$ s
External	200 $\mu$ s	<13 $\mu$ s

#### NOTES

- Rates include switch settling time of cards: 3ms for 7011 and 500 $\mu$ s for 7015 cards.
- Excluding switch settling time.
- Assuming no IEEE-488 commands are pending execution.

### IEEE-488 Command Execution Time

Command	Execution Time <sup>1</sup>	
	Display Off	Display On
OPEN (@I1)	7.5 ms	8.5 ms
CLOS (@I1)	7.5 ms	8.5 ms
MEM:REC M1	5.0 ms	6.0 ms

#### NOTES

- Measured from the time at which the command terminator is taken from the bus to the time at which the relay begins to open or close.

### Analog Backplane

**SIGNALS:** Four 3-pole rows (Hi, Lo, Guard). These signals provide matrix and multiplexer expansion between cards within one mainframe.

**MAXIMUM VOLTAGE:** 250V DC, 250V rms, 350V AC peak, signal path to signal path or signal path to chassis.

**MAXIMUM CURRENT:** 1A peak.

**PATH ISOLATION:**

- >10 $\Omega$ , <50pF path to path (any Hi, Lo, Guard to another Hi, Lo, Guard).
- >10 $\Omega$ , <50pF differential (Hi to Lo or Hi, Lo to Guard).
- >10 $\Omega$ , <75pF path to chassis.

**CHANNEL CROSSTALK:** <-65dB @ 1MHz (50 $\Omega$  load).

**BANDWIDTH:** <3dB loss at 100MHz (50 $\Omega$  load).

### IEEE-488 BUS IMPLEMENTATION

**STANDARDS CONFORMANCE:** Conforms to SCPI-1990, IEEE-488.2, and IEEE-488.1.

**MULTILINE COMMANDS:** DCL, LLO, SDC, GET, GTL, UNT, UNL, SPE, SPD.

**UNLINE COMMANDS:** IFC, REN, EOJ, SRQ, ATN.

**INTERFACE FUNCTIONS:** SH1, AH1,T5, TE0, L4, LE0, SR1, RLI, PPO, DCL, DT1, CO, EI.

### GENERAL

**DISPLAY:** Dual-line vacuum fluorescent.

- 1st line:20-character alphanumeric.
- 2nd line:32-character alphanumeric.

**REAR PANEL CONNECTORS:**

- IEEE-488
- 8-pin micro-DIN connector for digital I/O
- 8-pin micro-DIN for Trigger Link
- 8-pin micro-DIN for Trigger Link expansion
- BNC for External Trigger
- BNC for Channel Ready

**POWER:** 100V to 240Vrms, 50/60Hz, 50VA maximum.

**EMC:** Conforms to European Union Directive 89/336/EEC, EN61326-1.

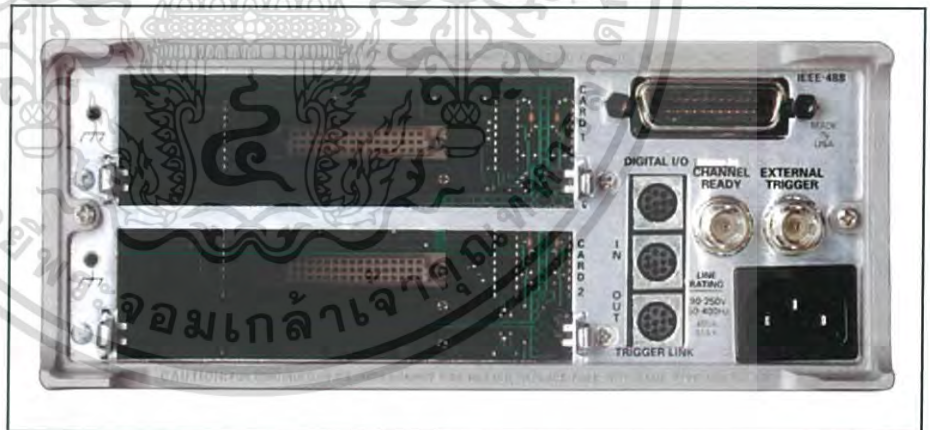
**SAFETY:** Conforms to European Union Directive 73/23/EEC, EN61010-1.

**EMI/RFI:** Meets VDE 0871B and FCC Class B.

**ENVIRONMENT:**

- Operating: 0°-50°C, <80% relative humidity (0°-35°C).
- Storage: -25° to +65°C.

**DIMENSIONS, WEIGHT:** 89mm high  $\times$  216mm wide  $\times$  375mm deep (3 $\frac{1}{2}$  in  $\times$  8 $\frac{1}{2}$  in  $\times$  14 $\frac{3}{4}$  in). Net weight 3.4kg (7 $\frac{1}{2}$  lbs).



Model 7001 rear panel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1.888.KEITHLEY (U.S. only) ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[www.keithley.com](http://www.keithley.com)

**KEITHLEY**

A Greater Measure of Confidence

A Tektronix Company

SWITCHING AND CONTROL



# First-principles and experimental studies of impurity doping into $\text{Mg}_2\text{Si}$

Jun-ichi Tani\*, Hiroyasu Kido

Department of Electronic Materials, Osaka Municipal Technical Research Institute, 1-6-50 Morinomiya, Joto-ku, Osaka 536-8553, Japan

Received 10 September 2007; accepted 3 December 2007

Available online 14 January 2008

## Abstract

The formation energy, structural relaxation, and Mulliken charge of impurities in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  are systematically investigated using first-principles calculations based on the density functional theory. Among the elements in groups Ib, IIIb, and Vb, As, P, Sb, Bi, Al, and N are suggested as n-type dopants, whereas Ga is suggested as a p-type dopant. For In, Ag, Cu, and Au, the conduction type depends on the atomic chemical potentials of Mg and Si. The formation energies of As, P, Sb, and Bi in the Si-site substitution are negative at Mg- and/or Si-rich limits, suggesting that these impurities have good solubility. The transport properties of impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , fabricated by spark plasma sintering, have been characterized by Hall effect measurements at 300 K. The carrier type of impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  is influenced by the types of dopants and the substitution site.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** A. Silicides, various; B. Electrical resistance and other electrical properties; C. Sintering; E. Ab initio calculations; G. Thermoelectric power generation

## 1. Introduction

The intermetallic compounds of  $\text{Mg}_2\text{X}$  ( $\text{X} = \text{Si}, \text{Ge},$  and  $\text{Sn}$ ) and their solid solutions have been considered as candidates for high-performance thermoelectric materials [1,2]. For thermoelectric materials, a large Seebeck coefficient  $S$ , small electrical resistivity  $\rho$ , and small thermal conductivity  $\kappa$ , are required. These parameters determine the so-called thermoelectric figure of merit  $Z = S^2/\rho\kappa$ . Low lattice thermal conductivity and high carrier mobility are desirable for the improvement of the figure of merit. Vining [1] pointed out that the value of the factor  $A'$  of  $\text{Mg}_2\text{X}$  (3.7–14) is larger than that of  $\text{SiGe}$  (1.2–2.6) and  $\beta\text{-FeSi}_2$  (0.05–0.8), where  $A' = (T/300)(m^*/m_e)^{3/2}\mu/\kappa_{\text{ph}}$ , where  $m^*$  is the carrier effective mass,  $\mu$  is the mobility in  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ , and  $\kappa_{\text{ph}}$  is the lattice thermal conductivity in  $\text{mW/cmK}$ . Therefore, an  $\text{Mg}_2\text{X}$  system will achieve a higher  $ZT$  with further development. However, thus far, there have been few systematic studies of  $\text{Mg}_2\text{X}$

compounds and their solid solutions from the perspective of thermoelectric energy conversion.

Impurity doping will drastically affect the thermoelectric properties of the  $\text{Mg}_2\text{X}$  compounds and their solid solutions, and it is essential to obtain good dopants for  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Some experimental works have been attempted in order to dope impurities into  $\text{Mg}_2\text{X}$  to control its semiconducting properties. The conduction types are p-type, produced by doping with Ag and Cu, and n-type, produced by doping with Sb, Al, P, and Bi [2–15]. However, the first-principles calculations of the impurities in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  have not been investigated systematically. To our knowledge, few theoretical data have been reported on the geometrical and electronic structure of impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

In this paper, we report a systematic study of the impurities in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  based on the first-principles calculations using the density-functional-pseudopotential method, by employing a supercell approach with 48 atoms per cell. We consider the following 12 elements as the impurity species: B, Al, Ga, and In from group IIIb; N, P, As, Sb, and Bi from group Vb; and Cu, Ag, and Au from group Ib. We also present the

\* Corresponding author. Tel.: +81 6 6963 8081; fax: +81 6 6963 8099.

E-mail address: [tani@omtri.city.osaka.jp](mailto:tani@omtri.city.osaka.jp) (J.-i. Tani).

experimental data of impurity-doped Mg<sub>2</sub>Si fabricated by spark plasma sintering (SPS), characterized by Hall effect measurements at 300 K.

## 2. Experimental and details of the calculations

The following high-purity powders were used as starting materials: Mg (>99.9%), Si (>99.999%), B (>99%), SiB<sub>6</sub> (>98%), MgB<sub>2</sub> (>99%), Al (>99.9%), Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub> (>99%), Mg<sub>3</sub>P<sub>2</sub> (>99%), Sb (>99.9%), Bi (>99.9%), Cu (>99.9%), Ag (>99.9%), and Au (>99.9%). Constituent Mg, Si, and impurity (X) powders were ground together and then heated at 993–1053 K for 5 min at 20–30 MPa in a graphite die (15 mm in diameter) in vacuum (<4 Pa) by the SPS method at a heating rate of 30–50 K/min. The density of the annealed samples was more than 99% of the theoretical value. The X-ray diffraction of the samples by Cu K $\alpha$  radiation detected only the antifluorite structure. The Hall coefficient ( $R_H$ ) and  $\rho$  of 1.5-cm-diameter, 0.1-cm-thick samples were measured by van der Pauw's technique using the Toyo Corp. Resitest 8320. Contacts between the samples and lead Au wires were formed by soldering with In. The Hall effect was measured at 300 K using an ac magnetic method under an applied magnetic field of 0.39 T at a frequency of 200 mHz. The

carrier concentration ( $n$ ) of the samples was determined by the factor  $1/e|R_H|$ . The error in the Hall coefficient was estimated to be less than  $\pm 7\%$ .

Density functional theory (DFT) calculations within the pseudopotential and generalized gradient approximations (GGAs) were performed using the computer program CASTEP (Cambridge serial total energy package in material modeling, Accelrys Inc.) [16]. We constructed a supercell containing 48 atoms (Mg<sub>32</sub>Si<sub>16</sub>) with the space group  $Fm\bar{3}m$  and replaced one of the 48 sites of the Mg or Si atoms by an impurity atom. We expanded the valence electronic wave functions in a plane-wave basis set to an energy cutoff of 400 eV, which converges the total energy of the unit cell to better than 1 meV/atom. In the total energy calculations, integrations were performed over the Brillouin zone using a  $3 \times 2 \times 2$  Monkhorst–Pack set [17], which produced six symmetrized  $k$  points in the irreducible Brillouin zone of the 48-atom unit cell. The electron–ion interaction was described by Vanderbilt's ultrasoft pseudopotentials [18]. The lattice constant was determined by the calculations of the primitive cell using a plane-wave cutoff energy of 400 eV; the calculated value was 99.9% of the experimental value reported for Mg<sub>2</sub>Si [19]. The positions of the atoms within the second nearest neighbors of the impurity were

Table 1  
Transport properties of impurity-doped Mg<sub>2</sub>Si (Mg<sub>2</sub>Si:X=1; $x$  (0.000  $\leq x \leq$  0.03)) at 300 K

Impurity element	$x$	Conduction type	Carrier concentration (cm <sup>-3</sup> )	Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	Resistivity ( $\Omega$ cm)	Ref.
Nondoped	0.000	N	$4.3 \times 10^{17}$	204	$7.14 \times 10^{-2}$	[13–15]
B	0.01	N	$4.5 \times 10^{18}$	166	$8.43 \times 10^{-3}$	
B	0.03	N	$4.2 \times 10^{18}$	145	$1.03 \times 10^{-2}$	
B <sup>a</sup>	0.01	N	$4.7 \times 10^{18}$	130	$1.01 \times 10^{-2}$	
B <sup>b</sup>	0.005	N	$2.9 \times 10^{18}$	139	$1.53 \times 10^{-2}$	
B <sup>b</sup>	0.01	N	$2.7 \times 10^{18}$	131	$1.77 \times 10^{-2}$	
Al	0.003	N	$4.4 \times 10^{19}$	147	$9.69 \times 10^{-4}$	
Al	0.005	N	$5.3 \times 10^{19}$	163	$7.18 \times 10^{-4}$	
N <sup>c</sup>	0.01	N	$4.7 \times 10^{18}$	140	$9.47 \times 10^{-3}$	
P <sup>d</sup>	0.0005	N	$6.7 \times 10^{18}$	108	$8.67 \times 10^{-3}$	[14]
P <sup>d</sup>	0.002	N	$1.0 \times 10^{19}$	117	$5.21 \times 10^{-3}$	[14]
P <sup>d</sup>	0.005	N	$1.7 \times 10^{19}$	128	$2.94 \times 10^{-3}$	[14]
P <sup>d</sup>	0.01	N	$2.4 \times 10^{19}$	114	$2.31 \times 10^{-3}$	[14]
P <sup>d</sup>	0.03	N	$3.1 \times 10^{19}$	110	$1.83 \times 10^{-3}$	[14]
Sb	0.001	N	$2.2 \times 10^{19}$	91.6	$3.08 \times 10^{-3}$	[15]
Sb	0.003	N	$4.8 \times 10^{19}$	107	$1.23 \times 10^{-3}$	[15]
Sb	0.005	N	$7.6 \times 10^{19}$	98.0	$8.38 \times 10^{-4}$	[15]
Sb	0.01	N	$8.9 \times 10^{19}$	81.0	$8.72 \times 10^{-4}$	[15]
Sb	0.02	N	$1.5 \times 10^{20}$	82.5	$5.04 \times 10^{-4}$	[15]
Bi	0.001	N	$1.8 \times 10^{19}$	85.7	$3.97 \times 10^{-3}$	[13]
Bi	0.003	N	$3.1 \times 10^{19}$	91.5	$2.22 \times 10^{-3}$	[13]
Bi	0.005	N	$4.1 \times 10^{19}$	92.4	$1.64 \times 10^{-3}$	[13]
Bi	0.01	N	$8.5 \times 10^{19}$	63.5	$1.16 \times 10^{-3}$	[13]
Bi	0.02	N	$1.1 \times 10^{20}$	64.0	$8.58 \times 10^{-4}$	[13]
Cu	0.01	N	$3.4 \times 10^{17}$	189	$9.73 \times 10^{-3}$	
Ag	0.005	P	$1.7 \times 10^{19}$	1.3	$2.98 \times 10^{-1}$	
Ag	0.02	P	$1.4 \times 10^{19}$	1.5	$3.08 \times 10^{-1}$	
Au	0.01	N	$7.5 \times 10^{18}$	74.4	$1.12 \times 10^{-2}$	

<sup>a</sup> Using the starting powder SiB<sub>6</sub>.

<sup>b</sup> Using the starting powder MgB<sub>2</sub>.

<sup>c</sup> Using the starting powder Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub>.

<sup>d</sup> Using the starting powder Mg<sub>3</sub>P<sub>2</sub>.

allowed to relax under a constant volume condition by total energy minimization, until the residual forces of the relaxed atoms were  $<0.1 \text{ eV/\AA}$ .

## 2. Results and discussion

Table 1 lists the transport properties of impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  at 300 K in comparison with those of nondoped  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .  $R_H$  of nondoped and B-, Al-, N-, P-, Sb-, Bi-, Cu-, and Au-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  is negative, indicating that the conductivity is mainly due to electrons. However,  $R_H$  of Ag-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  is positive, indicating that the conductivity is mainly due to holes. The carrier concentration strongly depends on the types of dopants and their solubility. The Hall mobility  $\mu_H = R_H/\rho$  of impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ( $63.5\text{--}189 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) at 300 K is lower than that of nondoped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ( $204 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ). The hole mobility of p-type Ag-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  at 300 K is  $\sim 1.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , which is considerably lower than the electron mobility of n-type  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

Table 2 lists the Mulliken charge and the interatomic distances around the impurity of impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  after relaxation. For the Mg-site substitution, the distances between  $\zeta$  and the nearest neighbor Si changed in the range from  $-9.6\%$  to  $+0.8\%$  relative to the Mg–Si distances, whereas those between X and nearest neighbor Mg changed in the

range from  $-3.1\%$  to  $+1.1\%$  relative to the Mg–Mg distances. For the Si-site substitution, the distances between X and nearest neighbor Mg changed in the range from  $-5.0\%$  to  $+5.7\%$  relative to the Mg–Si distances.

The formation energy of impurities in the neutral charge state is given by [20–22]

$$E_{\text{formation}} = E_T - n_{\text{Mg}}\mu_{\text{Mg}} - n_{\text{Si}}\mu_{\text{Si}} - \mu_X \quad (1)$$

where  $E_T$  is the total energy of a supercell containing an impurity atom ( $\text{Mg}_{31}\text{XSi}_{16}$  or  $\text{Mg}_{32}\text{Si}_{15}\text{X}$ );  $n_{\text{Mg}}$  and  $n_{\text{Si}}$  represent the number of Mg and Si atoms, respectively, in the supercell; and  $\mu_{\text{Mg}}$ ,  $\mu_{\text{Si}}$ , and  $\mu_X$  are the chemical potentials of the Mg, Si, and X atoms, respectively.

The chemical potentials of  $\mu_{\text{Mg}}$  and  $\mu_{\text{Si}}$  can be varied within a range that is limited by the following three constraints:

$$\mu_{\text{Mg}} \leq \mu_{\text{Mg}(\text{bulk})}, \quad (2)$$

$$\mu_{\text{Si}} \leq \mu_{\text{Si}(\text{bulk})}, \quad (3)$$

$$2\mu_{\text{Mg}} + \mu_{\text{Si}} = \mu_{\text{Mg}_2\text{Si}(\text{bulk})}, \quad (4)$$

where  $\mu_{\text{Mg}_2\text{Si}(\text{bulk})}$ , the chemical potential of bulk  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , is a constant value that is calculated as the total energy per  $\text{Mg}_2\text{Si}$  unit formula.  $\mu_{\text{Mg}(\text{bulk})}$  and  $\mu_{\text{Si}(\text{bulk})}$  are calculated as

Table 2  
Electronic charges of atoms in nondoped and impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , obtained by Mulliken population analysis, and average interatomic distance between impurity ( $\zeta$ ) and nearest neighbor Si or Mg atoms around impurity after relaxation

Impurity element	Substitution site	Mulliken charge ( $e$ )	Distance ( $\text{\AA}$ )		
			Mg–Si	Mg–X	Mg–Mg X–Mg
Nondoped	Mg	+0.75	2.747		3.172
	Si	–1.50			
B	Mg	–0.44	2.508 (–8.7%)	2.610 (–5.0%)	3.128 (–1.4%)
	Si	–1.32			
Al	Mg	+0.05	2.626 (–4.4%)	2.761 (+0.5%)	3.182 (+0.3%)
	Si	–1.49			
N	Mg	+0.54	2.675 (–2.6%)	2.760 (+0.5%)	3.178 (–0.4%)
	Si	–0.92			
P	Mg	+0.01	2.749 (+0.1%)	2.808 (+2.2%)	3.191 (+0.6%)
	Si	–1.57			
Sb	Mg	–0.63	2.484 (–9.6%)	2.633 (+1.1%)	3.157 (–0.5%)
	Si	–1.12			
Bi	Mg	–0.20	2.625 (–4.4%)	2.769 (+0.8%)	3.181 (+0.3%)
	Si	–1.19			
Cu	Mg	+0.64	2.686 (–2.2%)	2.795 (–0.8%)	3.171 (0.0%)
	Si	–0.75			
Ag	Mg	+0.58	2.813 (+0.6%)	2.898 (+5.5%)	3.206 (+1.1%)
	Si	–0.71			
Au	Mg	+0.78	2.815 (+0.8%)	2.900 (+5.7%)	3.206 (–0.6%)
	Si	–0.64			
Zn	Mg	–0.42	2.672 (–0.4%)	2.720 (–1.0%)	3.075 (–3.1%)
	Si	–2.04			
Fe	Mg	–0.32	2.763 (+0.6%)	2.753 (+0.2%)	3.089 (–2.6%)
	Si	–2.02			
Ni	Mg	–0.65	2.734 (–0.5%)	2.751 (+0.2%)	3.077 (–3.0%)
	Si	–2.17			

Deviations from the Mg–Si and Mg–Mg distances of nondoped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  are shown in parentheses.

the total energy per Si atom of the Si crystal (space group:  $Fd\bar{3}m$ , cubic structure) and total energy per Mg atom of the Mg crystal (space group:  $P6_3/mmc$ , hexagonal structure), respectively.

The formation energies were calculated under two extreme conditions – the Si-rich limit ( $\mu_{Mg} = 1/2(\mu_{Mg_2Si(bulk)} - \mu_{Si(bulk)})$  and  $\mu_{Si} = \mu_{Si(bulk)}$ ) and Mg-rich limit ( $\mu_{Si} = \mu_{Mg_2Si(bulk)} - 2\mu_{Mg(bulk)}$  and  $\mu_{Mg} = \mu_{Mg(bulk)}$ ).

$\mu_x$  can also be varied within a range that the impurity atoms do not segregate. At the solubility limit, when impurity-doped  $Mg_2Si$  is in thermal equilibrium with the X crystals or compounds such as Mg–X and Si–X,  $\mu_x$  is determined by the total energies of the X crystals and compounds, which are calculated after the optimization of the structure. In addition to the X crystals, the following compounds are considered as segregants:  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $Al_{30}Mg_{23}$ ,  $Mg_3Sb_2$ ,  $Mg_3Bi_2$ , SiP,  $SiP_2$ ,  $MgP_2$ ,  $MgP_4$ ,  $InMg_3$ ,  $InMg_2$ ,  $In_3Mg$ ,  $Mg_3N_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $SiAs_2$ ,  $SiAs$ ,  $MgAs_4$ ,  $Mg_3As_2$ ,  $SiB_6$ ,  $MgB_2$ ,  $MgGa_2$ ,  $Mg_2Ga_5$ ,  $MgGa_2$ , and  $Mg_5Ga_2$ .

Fig. 1 shows the formation energies of the group IIIb impurities (B, Al, Ga, and In) as a function of the Mg or Si chemical potential. When the group IIIb impurities are substituted on the Si site, they will act as p-type dopants. However, when the group Vb impurities are substituted on the Mg site, they will act as n-type dopants. In the Mg-site substitution, the formation energies of B, Al, In, and Ga at the Mg-rich limit are 3.59, 0.85, 1.03, and 1.11 eV, respectively, while those at the Si-rich limit are 3.42, 0.32, 0.41, and 0.56 eV, respectively. On the other hand, in the Si-site substitution, the formation energies of B, Al, In, and Ga at the Mg-rich limit are 0.85, 0.78, 0.51, and 0.24 eV, respectively, while those at the Si-rich limit are 1.44, 1.00, 0.65, and 0.40 eV, respectively. The formation energies of B and Ga in the Si-site substitution are lower than those in the Mg-site substitution. Therefore, our calculations predict that B- and Ga-doped  $Mg_2Si$  samples exhibit p-type conduction. However,  $R_H$  of B-doped samples fabricated by the SPS method is negative, indicating that the conductivity is mainly due to the electrons. The n-type conduction does not depend on the type of starting materials such as B,  $SiB_6$ , and  $MgB_2$ . However, Noda et al. [4] have reported that the carrier type of B-doped  $Mg_2Si_{0.6}Ge_{0.4}$  depends on the fabrication process and B is first introduced as an acceptor by using the NaCl flux method. Therefore, this discrepancy between the calculation and our experimental result must be because B is slightly soluble in  $Mg_2Si$  fabricated by the SPS method. The very low solubility of B may be caused by the short duration of the SPS fabrication process at relatively low temperatures. At the Mg-rich limit, the formation energy of In in the Si-site substitution is 0.52 eV lower than that in the Mg-site substitution. However, at the Si-rich limit, the formation energy of In in the Mg-site substitution is 0.24 eV lower than that in the Si-site substitution. Therefore, the conduction type of In-doped  $Mg_2Si$  depends on the atomic chemical potentials of Mg and Si. Under conditions except the Mg-rich limit, the formation energy of Al in the Mg-site substitution is lower than that in the Si-site substitution. At the Mg-rich limit,

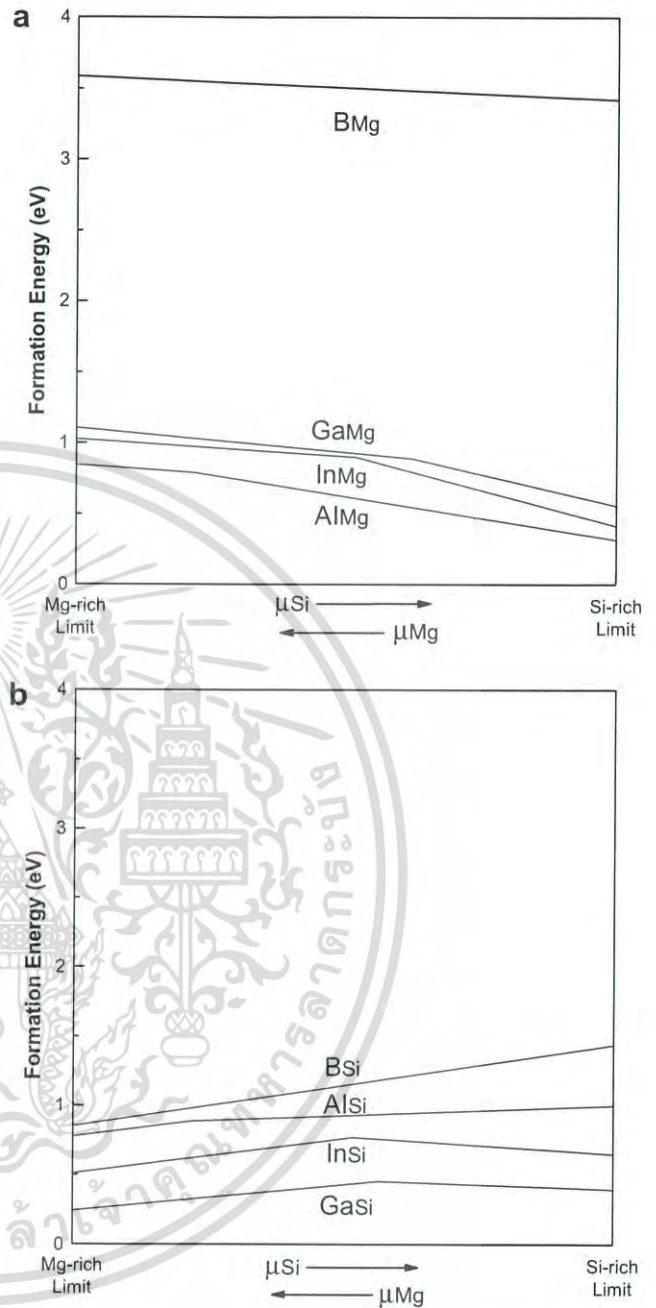


Fig. 1. Formation energy at the solubility limit as a function of the Mg or Si chemical potential for group IIIb impurities (B, Al, Ga, and In). The impurities are substituted on the (a) Mg and (b) Si sites.

the formation energy of Al in the Si-site substitution is 0.07 eV lower than that in the Mg-site substitution. Our calculations predict that Al atoms are primarily substituted on the Mg sites in  $Mg_2Si$  under conditions except the Mg-rich limit. This calculation result is in good agreement with our Hall effect measurements and the previous experimental result of the Seebeck coefficient measurement [12], showing that Al-doped  $Mg_2Si$  exhibits n-type conduction.

Fig. 2 shows the formation energies of the group Vb impurities (N, P, As, Sb, and Bi) in the Mg- or Si-site substitution. The formation energies of these impurities in the

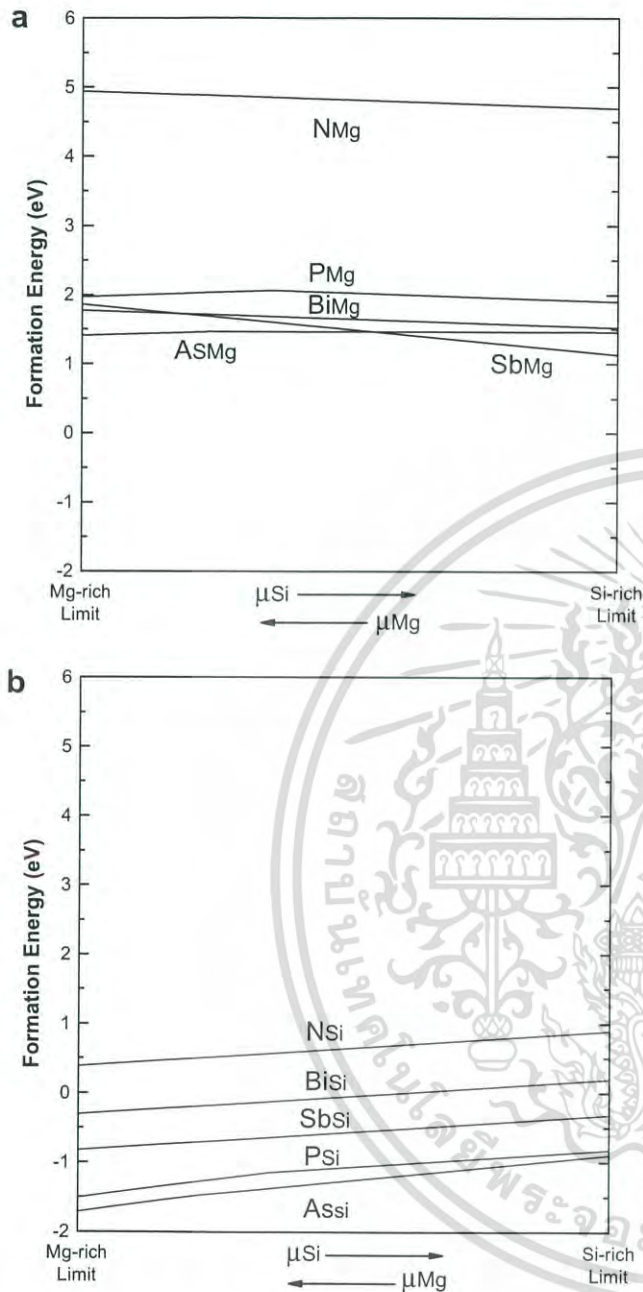


Fig. 2. Formation energy at the solubility limit as a function of the Mg or Si chemical potential for group Vb impurities (N, P, As, Sb, and Bi). The impurities are substituted on the (a) Mg and (b) Si sites.

Si-site substitution are considerably lower than those in the Mg-site substitution. If these impurities are substituted on the Si sites, the impurities will act as n-type dopants. The order of the formation energies of these impurities is  $\text{As} < \text{P} < \text{Sb} < \text{Bi} < \text{N}$ . The formation energies of As, P, Sb, and Bi in the Si-site substitution are negative at the Mg- and/or Si-rich limits, suggesting that these impurities have good solubility. Recently, we reported the thermoelectric properties of Bi-, P-, and Sb-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  [13–15] and established that Bi, P, and Sb atoms are effective n-type dopants of  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . The experimental results are in good agreement with the calculation results of this study.

Fig. 3 shows the formation energies of the group Ib impurities (Cu, Ag, and Au) in the Mg- or Si-site substitution. The formation energy of Au in the Si-site substitution is lower than that in the Mg-site substitution. In our study, Au-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  exhibits n-type conduction, and its electron concentration at 300 K is  $7.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , which is one magnitude greater than the value of  $4.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  for nondoped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  at 300 K. Therefore, Au substituted on the Si site in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  will act as an n-type dopant. On the other hand, the site preference in the case of Ag and Cu depends on the atomic chemical potentials of Mg and Si. At the Si-rich limit, the formation energies of Ag and Cu in the Mg-site substitution are 0.52 and 0.84 eV, respectively, while those in the Si-site substitution are 1.13 and 1.37 eV, respectively. At the Mg-rich limit, the formation energies of Ag and Cu in the Mg-site substitution are 0.78 and 1.20 eV, respectively, while those in the Si-site substitution are 0.63 and 0.97 eV, respectively. When the group Ib impurities are substituted on the Mg sites, the impurities will act as p-type dopants. In fact, in some previous works, Ag and Cu have been reported to be the p-type dopants of  $\text{Mg}_2\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  [4,23]. In our study, Ag-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  exhibits p-type conduction, and its hole concentration at 300 K is  $1.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . However, Cu-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  exhibits n-type conduction, and its electron concentration at 300 K is  $3.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , which is in good agreement with the value of  $4.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  for nondoped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  at 300 K. This result indicates that Cu is slightly soluble in  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . The very low solubility of Cu may be related to the high formation energy of Cu in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  and the short duration of the SPS fabrication process at relatively low temperatures because the melting point of Cu (1358 K) is higher than that of Ag (1235 K) [24].

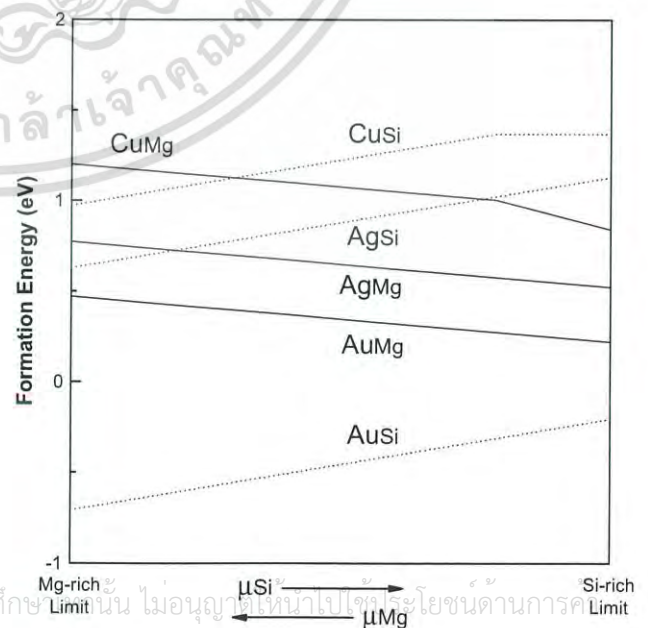


Fig. 3. Formation energy at the solubility limit as a function of the Mg or Si chemical potential for group Ib impurities (Cu, Ag, and Au).

#### 4. Conclusions

The formation energy, structural relaxation, and Mulliken charge of impurities in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  are systematically investigated using first-principles calculations based on the density functional theory. Among the elements in groups Ib, IIIb, and Vb, As, P, Sb, Bi, Al, and N are suggested as n-type dopants, whereas Ga is suggested as a p-type dopant. For In, Ag, Cu, and Au, the conduction type depends on the atomic chemical potentials of Mg and Si. The formation energies of As, P, Sb, and Bi in the Si-site substitution are negative at Mg- and/or Si-rich limits, suggesting that these impurities have good solubility. The transport properties of impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , fabricated by spark plasma sintering, have been characterized by Hall effect measurements at 300 K. The carrier type of impurity-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  is influenced by the types of dopants and the substitution site.

#### Acknowledgement

This research was partially supported by the Ministry of Education, Sports, and Culture, Grant-in-Aid for Young Scientists (B), No. 18760514, 2007.

#### References

- [1] Vining CB. In: Rowe DM, editor. CRC handbook of thermoelectrics. New York: CRC Press; 1995. p. 277.
- [2] Zaitsev VK, Fedorov MI, Eremin IS, Gurieva EA. In: Rowe DM, editor. Thermoelectrics handbook: macro to nano. New York: CRC Press; 2006 [chapter 29].
- [3] Nikitin EN, Bazanov VG, Tarasov VI. *Sov Phys Solid State* 1962;3:2648.
- [4] Noda Y, Kon H, Furukawa Y, Otsuka N, Nishida IA, Masumoto K. *Mater Trans JIM* 1992;33:845.
- [5] Noda Y, Kon H, Furukawa Y, Otsuka N, Nishida IA, Masumoto K. *Mater Trans JIM* 1992;33:851.
- [6] Zaitsev VK, Fedorov MI, Gurieva EA, Eremin IS, Kondtandinov PP, Samunin AYU, et al. *Phys Rev B* 2006;74:045207.
- [7] Morris RG, Redin RD, Danielson GC. *Phys Rev* 1958;109:1909.
- [8] Redin RD, Morris RG, Danielson GC. *Phys Rev* 1958;109:1916.
- [9] Heller MW, Danielson GC. *J Phys Chem Solids* 1962;23:601.
- [10] Kajikawa T, Shida K, Sugihara S, Ohmori M, Hirai T. Proceedings of the 16th international conference on thermoelectrics (ICT'97). IEEE; 1997. p. 275.
- [11] Kajikawa T, Shida K, Shirai K, Ito T, Ohmori M, Hirai T. Proceedings of the 17th international conference on thermoelectrics (ICT'98). IEEE; 1998. p. 362.
- [12] Umemoto M, Shirai Y, Tsuchiya K. Proceedings of the fourth Pacific Rim international conference on advanced materials and processing (PRICM4). The Japan Institute of Metals; 2001. p. 2145.
- [13] Tani J, Kido H. *Physica B* 2005;364:218.
- [14] Tani J, Kido H. *Jpn J Appl Phys Part 1* 2007;46:3309.
- [15] Tani J, Kido H. *Intermetallics* 2007;15:1202.
- [16] Segall MD, Lindan PJD, Probert MJ, Pickard CJ, Hasnip PJ, Clark SJ, et al. *J Phys Condens Matter* 2002;14:2717.
- [17] Monkhorst HJ, Pack JD. *Phys Rev B* 1976;13:5188.
- [18] Vanderbilt D. *Phys Rev B* 1990;41:7892.
- [19] Barlock JG, Mondolfo LF. *Z Metallkd* 1975;66:605.
- [20] Zhang SB, Northrup JE. *Phys Rev Lett* 1991;67:2339.
- [21] Laks DB, Van de Walle CG, Neumark GF, Blöchl PE, Pantelides ST. *Phys Rev B* 1992;45:10965.
- [22] Van de Walle CG, Laks DB, Neumark GF, Pantelides ST. *Phys Rev B* 1993;47:9425.
- [23] Shanks HF. *J Cryst Growth* 1974;23:190.
- [24] Lide DR. *CRC handbook of chemistry and physics*. 84th ed. New York: CRC Press; 2003. p. 4–132.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Thermoelectric Properties of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si Prepared by Solid-State Synthesis

J-Y Jung, K-H Park and I-H Kim<sup>1</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Chungju National University, Chungbuk, 380-702, Korea

E-mail: ihkim@cjnu.ac.kr

**Abstract.** Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si was prepared by solid-state synthesis and thermoelectric properties were examined. All the Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si compounds showed n-type conduction, indicating that the electrical conduction is mainly due to electrons. The electrical conductivity significantly increased and the absolute value of Seebeck coefficient decreased with increasing Sb content because electron concentration considerably increased from  $\sim 10^{16}$  to  $\sim 10^{20}$  cm<sup>-3</sup> by Sb doping. The thermal conductivity did not change significantly by Sb doping. The maximum value of thermoelectric figure-of-merit of 0.62 was obtained for Mg<sub>2</sub>Si:Sb<sub>0.02</sub> at 823 K.

## 1. Introduction

Thermoelectric materials for high energy conversion efficiency should have a large figure-of-merit (ZT) value with a large Seebeck coefficient, a high electrical conductivity and a low thermal conductivity. Semiconducting alkaline-earth metal silicides have attracted much interest for use in thermoelectric applications [1]. Magnesium silicide possessing a face-centered-cubic CaF<sub>2</sub>-type lattice is a narrow band gap semiconductor with an indirect band gap of 0.78 eV. Mg<sub>2</sub>Si has been recognized as a promising material for thermal-to-electric energy conversion at temperatures ranging from 500 to 800 K [2]. Vining [3] pointed out that the value of the factor A' of Mg<sub>2</sub>(Si,Ge,Sn) (3.7-14) is larger than that of SiGe (1.2-2.6) and β-FeSi<sub>2</sub> (0.05-0.8), where  $A' = (T/300)(m^*/m_0)^{3/2}(\mu/\kappa_L)$ , where m\* is the carrier effective mass, μ is the mobility in cm<sup>2</sup>/Vs, and κ<sub>L</sub> is the lattice thermal conductivity in mW/cmK. Therefore, Mg<sub>2</sub>(Si,Ge,Sn) system will improve the ZT.

There have been some attempts to dope additives into Mg<sub>2</sub>Si to control its semiconducting properties. The p-type Mg<sub>2</sub>Si can be produced by doping with Ag and Cu, and the n-type by doping with Bi and Al [4,5]. Tani and Kido [6,7] reported that first-principle calculation revealed that Sb atoms are expected to be primarily located at Si sites in Mg<sub>2</sub>Si, and they proved that Sb performed as a donor for Mg<sub>2</sub>Si prepared by spark plasma sintering with elemental Mg, Si and Sb powders. It is very difficult to prepare the Mg<sub>2</sub>Si by a melting process due to large difference in vapor pressures of the constituent elements and no solubility, and furthermore a small difference between the boiling temperature of Mg (1380 K) and the melting temperature of Mg<sub>2</sub>Si (1358 K) [3]. Therefore, it is difficult to control its composition, mainly due to volatilization and oxidation of Mg. In this study, solid-state reaction with elemental Mg and Si was performed to obtain pre-synthesized Mg<sub>2</sub>Si powders, and they were mechanically alloyed with Sb atom to synthesize the Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si compounds. Thermoelectric and transport properties of Mg<sub>2</sub>Si:Sb<sub>m</sub> compounds were examined.

<sup>1</sup>Corresponding author: ihkim@cjnu.ac.kr, [phone] +82-43-841-5387, [fax] +82-43-841-5380.

ไม่วาทกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

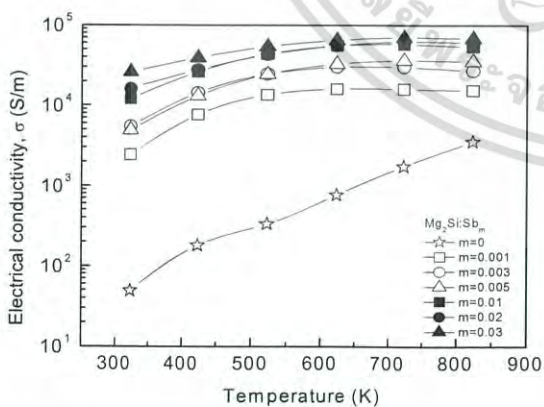


**Table 1.** Transport properties of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si at room temperature.

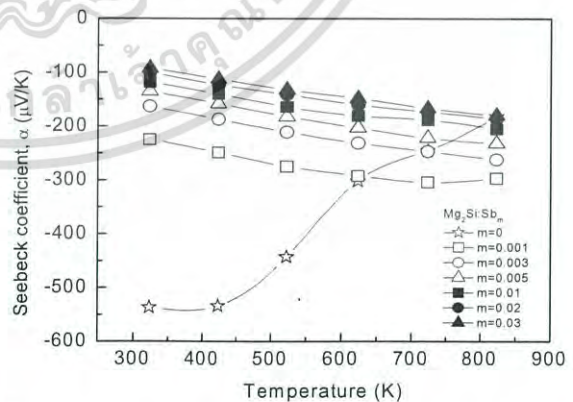
Doping content (m)	Hall coefficient (cm <sup>3</sup> /C)	Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	Carrier concentration (cm <sup>-3</sup> )
0	-210.6	104	3.0×10 <sup>16</sup>
0.001	-0.874	21.2	7.1×10 <sup>18</sup>
0.003	-0.056	3.1	1.1×10 <sup>20</sup>
0.005	-0.052	2.6	1.2×10 <sup>20</sup>
0.01	-0.031	3.8	2.0×10 <sup>20</sup>
0.02	-0.026	4.2	2.4×10 <sup>20</sup>
0.03	-0.017	4.3	3.8×10 <sup>20</sup>

Figure 2 indicates the changes in the electrical conductivity of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si with temperature. The electrical conductivity of intrinsic Mg<sub>2</sub>Si rapidly increased with increasing temperature, which means that intrinsic Mg<sub>2</sub>Si behaves like a non-degenerate semiconductor. The electrical conductivities of Sb-doped samples slight increased with increasing temperature, which indicates that an increase in the carrier concentration was compensated by a decrease in the carrier mobility. As compared with that of intrinsic Mg<sub>2</sub>Si, the electrical conductivity of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si dramatically increased at fixed temperature, and it increases as the Sb content increased. Noda *et al.* [5] reported that the temperature dependence of mobility in Mg<sub>2</sub>Si indicates  $\mu \propto T^{-3/2}$  and the acoustic lattice scattering is the predominant mechanism.

Figure 3 shows the temperature dependence of Seebeck coefficient of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si. The absolute value of Seebeck coefficient of intrinsic Mg<sub>2</sub>Si was drastically reduced as the temperature increased due to an increase in the electron concentration by intrinsic conduction. The sign of Seebeck coefficient was negative, which in good agreement with the sign of Hall coefficient, indicating the intrinsic Mg<sub>2</sub>Si is an n-type semiconductor. The absolute value of Seebeck coefficient was reduced as the Sb doping content increased. This is due to an increase in the electron concentration. The absolute value of Seebeck coefficient for Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si increased with increasing temperature. This resulted from the electron-phonon scattering, which was predominant over an increase in the electron concentration at higher temperatures. The Seebeck coefficient is the competition result between carrier scattering and carrier concentration.



**Figure 2.** Temperature dependence of the electrical conductivity of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si.



**Figure 3.** Temperature dependence of the Seebeck coefficient of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si.

Figure 4 presents the variation of thermal conductivity of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si with temperature. The thermal conductivity decreases with increasing temperature at 323-623 K, and present an almost constant value above 623 K. The thermal conductivity decreased with increasing temperature. The

thermal conductivity slightly increased with by Sb doping, compared with intrinsic Mg<sub>2</sub>Si due to electronic contribution increase by carrier concentration increase.

The dimensionless thermoelectric figure of merit ( $ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa$ ) is shown in figure 5. The ZT value of intrinsic Mg<sub>2</sub>Si increased with increasing temperature but it was as low as 0.04 at 823 K owing to low electrical conductivity (low carrier concentration). However, it was significantly improved by Sb doping and the maximum ZT value of 0.62 was obtained for Mg<sub>2</sub>Si:Sb<sub>0.02</sub> specimen at 823 K. This is mainly due to the high power factor, which is defined as  $\alpha^2 \sigma$  and it can be simply estimated from figures 2 and 3. The power factor of Mg<sub>2</sub>Si:Sb<sub>0.02</sub> was achieved 2.24 mW/mK<sup>2</sup> at 823 K, which is over 20 times larger than that of intrinsic Mg<sub>2</sub>Si (0.12 mW/mK<sup>2</sup>).

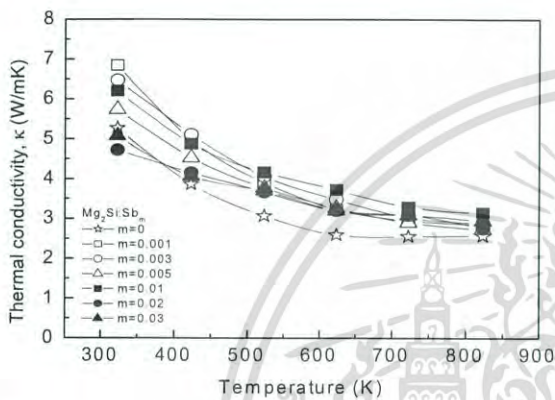


Figure 4. Temperature dependence of the thermal conductivity of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si.

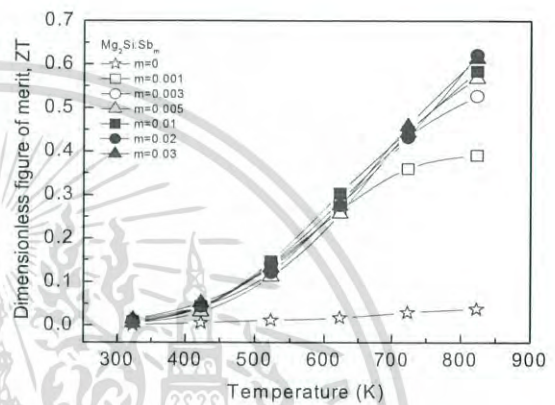


Figure 5. Temperature dependence of the figure-of-merit of Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si.

#### 4. Conclusions

Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si compounds were prepared by solid-state reaction, mechanical alloying and hot pressing, and thermoelectric properties were examined. Solid-state reaction was successfully carried out in the intrinsic Mg<sub>2</sub>Si system. Sb-doped Mg<sub>2</sub>Si powders were synthesized by mechanical alloying and consolidated by hot pressing at 1073 K for 1 h. Mg<sub>2</sub>Si:Sb<sub>m</sub> showed n-type conduction and the temperature dependence of electrical conductivity behaved like a heavily-doped semiconductor. The absolute value of Seebeck coefficient decreased with increasing Sb content which resulted from the increase of carrier concentration. The thermal conductivity decreased with increasing temperature, and the maximum ZT value was obtained as 0.62 at 823 K for Mg<sub>2</sub>Si:Sb<sub>0.02</sub>.

#### Acknowledgments

This study was supported by the Fundamental R&D Program for Core Technology of Materials funded by the Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea and by the Regional Innovation Center (RIC) Program funded by the Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea.

#### References

- [1] Borisenkov V E 2000 *Semiconducting Silicides* (Berlin: Springer-Verlag) p 285
- [2] Harman T C, Taylor P J, Spears D L and Walsh M P 2000 *J. Electron. Mater.* **29** L1
- [3] Vining C B 1995 *Handbook of Thermoelectrics* (New York: CRC) p 277
- [4] Nikitin E N, Bazanov V G and Tarasov V I 1961 *Sov. Phys. Solid State* **3** 2648
- [5] Noda Y, Kon H, Furukawa Y, Otsuka N, Nishida I A and Masumoto K 1992 *Mater. Trans. JIM* **33** 851
- [6] Tani J and Kido H 2008 *Intermetallics* **16** 422
- [7] Tani J and Kido H 2007 *Intermetallics* **15** 1202

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้