

การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อหาสมบัติของสารกึ่ง  
ตัวนำควมคุมด้วยคอมพิวเตอร์

IMPROVEMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR  
DETERMINATION OF SEMICONDUCTOR PROPERTIES  
BY HALL EFFECT MEASUREMENT



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อหาสมบัติของสารกึ่ง  
ตัวนำควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์  
IMPROVEMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR  
DETERMINATION OF SEMICONDUCTOR PROPERTIES  
BY HALL EFFECT MEASUREMENT



T149461

ฉัตรลัดดา เกิดแย้ม

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **149461**  
วันเดือนปี... **8 ส.ค. 2561**

b. 12884595  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในห้องสมุด ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR  
DETERMINATION OF SEMICONDUCTOR PROPERTIES BY  
HALL EFFECT MEASUREMENT



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  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก **ACADEMIC YEAR 2016** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อหาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ  
 ความคุมด้วยคอมพิวเตอร์  
 Improvement of Computer-Based System for Determination of  
 Semiconductor Properties by Hall Effect Measurement

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวฉัตรลัดดา เกิดแย้ม รหัสนักศึกษา 56051124

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

**ภาควิชา** ฟิสิกส์

**ปีการศึกษา** 2559

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
 ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.สุรชาติ กมลติลก ประธานกรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ดร.ภาณุพล ไชลนกระโทก กรรมการ	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

**ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อหาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวฉัตรลัดดา เกิดแย้ม รหัสนักศึกษา 56051124
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เภาลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญญี

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ ใช้ร่วมกับวิธีของเวนเดอร์เพาว์ซึ่งควบคุมการวัดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น ระบบการวัดทั้งหมดประกอบด้วย เครื่องควบคุมการสับขั้วไฟฟ้า สนามแม่เหล็กถาวรความเข้มขนาด 5500 G เครื่องกำเนิดกระแส เครื่องวัดแรงดันทางไฟฟ้า พร้อมด้วยโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งสามารถควบคุม การสับขั้วไฟฟ้า การทำงานของเครื่องกำเนิดกระแส บันทึกค่าแรงดันทางไฟฟ้า พร้อมด้วยหน้าต่างการทำงานติดต่อกับผู้ใช้งาน และ แสดงผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ได้แก่ สภาพต้านทานทางไฟฟ้า ชนิด ความหนาแน่น และ สภาพคล่องของพาหะ สภาพต้านทานของวัสดุจะถูกทำการวัดด้วยวิธีการของเวนเดอร์เพาว์เพื่อป้องกันการเกิดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความต้านระหว่างรอยต่อของขั้วไฟฟ้ากับตัวอย่าง และ แรงดันฮอลล์ ทั้งหมด 8 ค่า เกิดจากการบ่อนย้อนกลับของทิศการไหลของกระแส และ กลับทิศทางของสนามแม่เหล็ก จะถูกนำมาเฉลี่ยค่า กล่องควบคุมการสับขั้วไฟฟ้า ทำหน้าสับขั้วไฟฟ้าในขณะที่ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและแรงดันฮอลล์นั้น ผลการวัดตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ทราบค่า ซึ่งได้แก่ ซิลิกอนที่มีการโด๊ปด้วยโบรอนที่สภาพต้านทานทางไฟฟ้า 30-50 โอห์ม - เซนติเมตร โปรแกรมแสดงผลการวัดพบว่าค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ และ สภาพคล่อง มีค่าสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่ได้จาก American Society for Testing and Materials.

**คำสำคัญ** : การคายประจุ ปรากฏการณ์ฮอลล์ วิธีการวัดแบบเวนเดอร์เพาว์ สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Title** Improvement of Computer-Based System for Determination of Semiconductor Properties by Hall Effect Measurement

**Students** Miss.Chatladda Kerdyam Student ID 56051124  
**Degree** Bachelor of Science (Applied Physics)  
**Department** Physics  
**Faculty** Science  
**University** King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang (KMITL)  
**Academic Year** 2015  
**Advisor** Asst.Prof.Dr. Warawoot Thowladda  
**Co-Advisor** Dr. S.Tipawan Khlayboonme

### Abstract

This special project focused on the development of an automatic measurement system under van der Paw and Hall effect measurement. This system was used to determine electrical properties of semiconductor materials. It consists of a switching control box, a permanent magnet with a constant magnetic field of 5500 G, a current source, a voltmeter and software. In this special, the software was developed with LabVIEW software for 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, two silicon wafers were used: p-type B-doped Si with resistivity of 30-50 W-cm. The values of resistivity, carrier concentration and mobility agreed well with those from American Society for Testing and Materials.

**Keywords :** Hall effect, Van der Pauw Method, Discharge electron, Semiconductor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุน ช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

รศ.ดร. วรารุณี เถลัดดา ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้และให้คำปรึกษาในการสร้างเครื่องมือ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำโครงการพิเศษนี้และยังเป็นประโยชน์ในการนำความรู้และเทคนิคต่างๆไปใช้ในหน้าที่การงานในอนาคตได้อีกด้วย อีกทั้งยังอดทนให้คนไม่ชำนาญได้ทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จนเกิดความรู้ความสามารถในด้านใหม่ๆ จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ผู้ซึ่งคอยแนะนำและสนับสนุนการทำโครงการพิเศษนี้ในทุกๆ ด้าน ทั้งด้านทักษะความรู้ความสามารถในการทำงานและสนับสนุนเครื่องมือต่างๆการใช้เครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

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

ฉัตรลัดดา เกิดแย้ม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 สารกึ่งตัวนำ	5
2.1.1 แถบพลังงานในของแข็ง (Energy Bands in Solids)	5
2.1.2 การแบ่งประเภทของแข็ง (Classification of Solids)	8
2.1.3. การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	10
2.1.4. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors)	11
2.1.5. ความหนาแน่นของพาหะ (Carrier Concentrations)	16
2.2 ความต้านทานไฟฟ้า	19
2.3 van der Pauw Method	20
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)	21
2.5 วิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.5.1 ระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีการวัดแบบฮอลล์และ four point probes	22
2.5.2 การศึกษาอิทธิพลของข้อบกพร่องของชิ้นในการวัดความต้านทานของฟิล์มบาง โดยใช้วิธีของ แวน เดอร์ พาว	23
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 Hardware	24
3.1.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร	24
3.1.2 วงจรควบคุมการสลับขั้ว	24
3.1.3 Source Meter	26
3.1.4 แผ่นวาง sample	27
3.2 Software	27
3.2.1 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล	27

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการทดลองวัด	39
3.3.1 การวัดด้วยมือ	39
3.3.2 การวัดด้วยระบบอัตโนมัติ	39
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	
4.1 ผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม	40
4.2 ผลการทดลอง	47
4.3 อภิปรายผล	55
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E-k$ ของอิเล็กตรอนตามแบบจำลองของ Kronig-Penney และโครงสร้างของแถบพลังงานที่สอดคล้องกัน	7
2.3 First Brillouin Zone	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E-k$ ของของแข็งในความเป็นจริง	8
2.5 แผนภาพแสดงแถบพลังงานของของแข็งชนิดต่างๆ	9
2.6 สารกึ่งตัวนำชนิด Intrinsic	12
2.7 สารกึ่งตัวนำชนิด n-type	13
2.8 สารกึ่งตัวนำชนิด p-type	14
2.9 แบบจำลองของ exciton	16
2.10 (a) density of states function, (b) Fermi Dirac function ที่ $T=0K$ และ $T>0K$	17
2.11 (a) density of states function , (b) Fermi Dirac function	17
2.12 (a) density of states function ของแถบวาเลนซ์และแถบนำกระแส	18
2.13 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิด n-type type ( $N_d$ คือความหนาแน่นของสารเจือ)	19
2.14 จุดบนหน้าสัมผัสในการวัดของ van der Pauw	20
2.15 การวัดฮอลล์ที่กำหนด	21
3.1 สนามแม่เหล็กถาวร	24
3.2 Model 7012-S 4x10 Matrix Cards	25
3.3 วงจรที่อยู่ใน Model 7012-S 4x10 Matrix Cards	25
3.4 ด้านหน้าของ 7001 Switch/Control Mainframe	25
3.5 ด้านหลังของ 7001 Switch/Control Mainframe	26
3.6 Keithley 2602A Source Meter	26
3.7 (a) สาย GPIB และ (b)สาย 408JE	26
3.8 ไดอะแกรมแสดงการรับค่าจากปุ่ม	28
3.9 ไดอะแกรมแสดงการรับค่าจากKeyboard	29
3.10 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ	30
3.11 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ	31
3.12 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ	32
3.13 ไดอะแกรมแสดงการคำนวณของระบบ	33
3.14 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	34

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW เลือกตำแหน่งในการติดตั้งโปรแกรม	34
3.16 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	35
3.17 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	35
3.18 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	36
3.19 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	36
3.20 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	37
3.21 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	37
3.22 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	38
3.23 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	38
3.24 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW	39
4.1 หน้าต่างSetting ใช้สำหรับเชื่อมต่อ Source meter และ switching การเลือกรูปแบบการวัดและป้อนค่าต่างๆที่ใช้ในการวัด	40
4.2 หน้าต่างSetting เมื่อเราทำการเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว,เลือกรูปแบบในการวัดเป็นการวัดแบบแวนเดอร์พาว,ป้อนค่าต่างๆครบถ้วน ต้องทำการกดปุ่ม Measurement แล้วกด Ctrl R เพื่อ Run Program	40
4.3 หน้าต่างการวัดแวนเดอร์พาว เป็นหน้าต่างที่แสดงค่าการวัดในแต่ละครั้งของการสับขั้วไฟฟ้า	41
4.4 หน้าต่างรวมของการวัดแวนเดอร์พาว เป็นหน้าต่างที่แสดงค่าเฉลี่ยของการวัดและทำการคำนวณค่าที่เราต้องการทราบให้เรียบร้อยแล้วพร้อมทั้งแสดงค่าที่คำนวณได้	41
4.5 หน้าต่างการบันทึกผลที่เราทำการวัดได้จากโปรแกรม	42
4.6 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการบันทึกค่าจากโปรแกรม	42
4.7 โปรแกรมสามารถทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ได้โดยการกดเลือกรูปแบบของการวัดเป็นปรากฏการณ์ฮอลล์,กดปุ่มMeasurementและกด Ctrl R เพื่อ Run Program	43
4.8 หน้าต่างวัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ การวัดนอกสนามแม่เหล็ก,การวัดภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น และการวัดภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	43
4.9 เมื่อทำการวัดค่าปรากฏการณ์ฮอลล์นอกสนามแม่เหล็กแล้วจะมี pop-up ให้ทำการตรวจสอบว่าเราทำการใส่แผ่น sample ด้านไหนเพื่อที่โปรแกรมจะได้มีการปรับรูปแบบของการวัดให้มีความสอดคล้องกับแผ่น sample ที่นำมาวัด	44
4.10 หน้าต่างเมื่อทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้นเสร็จแล้วจะมี pop-up ให้เราทำการเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็ก	44
4.11 หน้าต่างรวมเมื่อการวัดครบทั้ง 3 ช่วงก็จะมีการแสดงค่าที่หาได้จากการคำนวณและบอกชนิดของสสารกึ่งตัวนำนั้นที่เรานำมาวัดด้วยว่าเป็นชนิดใด	45

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 หน้าต่างบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม	45
4.13 หน้าต่างบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม	46
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample1[B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	47
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	49
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีแบบ Auto	50
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับ แรงดันไฟฟ้าของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega.cm$ ] ด้วยเครื่องมือระบบอัตโนมัติ	52



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	3
4.1	45
4.2	46
4.3	47
4.4	47
4.5	48
4.6	49
4.7	50
4.8	50
4.9	51
4.10	52

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Si	ซิลิคอน
Ge	เจอร์มาเนียม
$E_g$	ช่องว่างพลังงาน
$E_c$	พลังงานต่ำสุดของแถบพลังงานไฟฟ้า
$E_v$	พลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
$E_A$	ระดับผู้รับ
$E_D$	ระดับผู้ให้
$E_H$	สนามไฟฟ้าฮอลล์
$F_B$	แรงสนามแม่เหล็ก
$R_H$	สัมประสิทธิ์ฮอลล์
$V_H$	ความต่างศักย์ฮอลล์
$n_s$	ความเข้มของพาหะที่ผิวหน้า
$\mu_m$	ความคล่องตัวของพาหะ
$\rho$	สภาพต้านทานไฟฟ้า
$R_s$	ความต้านทานที่ผิวหน้า
I	กระแสไฟฟ้า
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า
J	ความหนาแน่นของกระแส
B	สนามแม่เหล็ก
n	ความหนาแน่นของพาหะ
$\Omega$	โอห์มหน่วยของความต้านทาน
K	เคลวินหน่วยอุณหภูมิ
R	ความต้านทาน
N-type	สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
P-type	สารกึ่งตัวนำชนิดพี
USB	Universal Serial Bus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) หรือฮอลล์เอฟเฟค เป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่ค้นพบโดย เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ในปีพ.ศ.2422 สิ่งที่เขาค้นพบมีหลักการโดยสรุปดังนี้ แผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านเมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) มากระทำในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นตัวนำจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าหรือเกิดแรงดันโดยเรียกว่าแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) ขึ้นที่ตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อจ่ายกระแสคงที่ให้แก่แผ่นตัวนำจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านแผ่นตัวนำอย่างคงที่โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวก

การวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำ เช่น ความต้านทาน ความหนาแน่นของพาหะ สภาพความคล่องของพาหะ เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยการวัดส่งผลให้ทราบถึงคุณสมบัติ รวมทั้งสามารถทำให้ปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อกระบวนการผลิตจะได้สมบัติของต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำได้หลายค่าด้วยการวัดเพียงครั้งเดียว เช่น ความต้านทานที่ผิวหน้า

(Sheet Resistance :  $R_s$ ) ความหนาแน่นของพาหะที่ผิวหน้า (Sheet Carrier Concentration :  $n_s$ ) ความคล่องตัวของพาหะข้างมาก (Majority Carrier Mobility :  $\mu_m$ ) สภาพต้านทานไฟฟ้า (Bulk Electrical Resistivity :  $\rho$ ) เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดได้อย่างง่ายอีกด้วย จึงทำให้การวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์นี้เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ในห้องปฏิบัติการที่เราใช้ส่วนใหญ่เป็นการวัดมือ ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการจดบันทึกผลและทำการคำนวณผล

สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างกระบวนการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์แบบอัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัด การบันทึกค่า รวมไปถึงลดระยะเวลาในการวัด โดยรวมไปถึงการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นคือค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นลบ ซึ่งอาจเกิดจากการสับขั้วของแผ่น 4 relay module ประจุที่ค้างอยู่ในวงจรอาจทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนได้ เมื่อเราทำการใช้งานระบบการวัดซึ่งถ้าเราสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้นี้อาจจะทำให้ระบบการวัดที่เราสร้างขึ้นมานั้นเกิดความเสถียรมากขึ้นและมีความแม่นยำในการวัดค่าอีกด้วยเพื่อนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการในงบประมาณที่ไม่มากจนเกินไป โดยการประยุกต์จากการวัดมือที่ใช้อยู่เข้ากับวงจรเพื่อทำการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และการเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานให้สามารถใช้งานได้และประมวลผลได้อย่างสะดวกสบายมากขึ้นและมีความเหมาะสมกับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ และเรายังสามารถนำโปรแกรมที่เราได้ทำการเขียนขึ้นเพื่อนำไปพัฒนาต่อในงานอื่นๆได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์
- 2) เพื่อทำการออกแบบและสร้างระบบวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
- 3) เพื่อสร้างเครื่องมือวัดที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริงในห้องปฏิบัติการ
- 4) เพื่อการสอบเทียบการทำงานของเครื่องมือกับชิ้นสารที่ได้มาตรฐาน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาประวัติความเป็นมาของปรากฏการณ์ฮอลล์
- 2) ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
- 3) ทำการวัดชิ้นงานที่ทราบค่าสภาพความต้านทานและความหนาแน่นของพาหะด้วยระบบที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้น
- 4) ทำวิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 วิธีดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนในการดำเนินงาน
สิงหาคม - กันยายน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ศึกษาประวัติความเป็นมาของปรากฏการณ์ฮอลล์</li> <li>- ศึกษาหลักการการทำงานของระบบการวัดวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์</li> <li>- ศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ</li> <li>- ศึกษาการเขียนโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างระบบการวัด</li> </ul>
ตุลาคม - พฤศจิกายน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการใช้ในการทำการวิจัย</li> <li>- ออกแบบชุดวางแม่เหล็กของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์</li> <li>- วางแผนการสร้างระบบ เขียนโปรแกรม และรวมไปถึงการวิเคราะห์</li> </ul>
ธันวาคม - มกราคม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำการทดลองการวัดสารกึ่งตัวนำกับเครื่องมือที่มีโดยการวัดด้วยมือ</li> <li>- วัดความสม่ำเสมอของค่าของสนามแม่เหล็ก</li> <li>- สร้างระบบการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์</li> <li>- ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการควบคุมการทำงานของระบบเครื่องมือวัด</li> <li>- ทำการทดลองใช้ระบบที่ได้สร้างขึ้นมาว่าสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพหรือไม่</li> </ul>
กุมภาพันธ์ - เมษายน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำการวัดชิ้นงานที่ทราบค่า</li> <li>- วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองเพื่อทำการปรับปรุงให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในการเขียนโปรแกรมเพื่อนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมอื่นๆ พร้อมทั้งเข้าใจหลักการต่างๆของการเขียนโปรแกรม
- 2) ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฮอลล์ รวมไปถึงหลักการทำงานของระบบการวัดผล
- 3) ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ
- 4) รู้และสามารถทำการออกแบบระบบของการวัดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจากระบบการวัดด้วยมือไปเป็นการวัดแบบอัตโนมัติ
- 5) สามารถนำเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนั้นไปทดลองใช้งานได้ในห้องปฏิบัติการจริง
- 6) สร้างความสะดวกสบายในการวัดผลการทดลองมากขึ้นและยังทำให้ผลที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

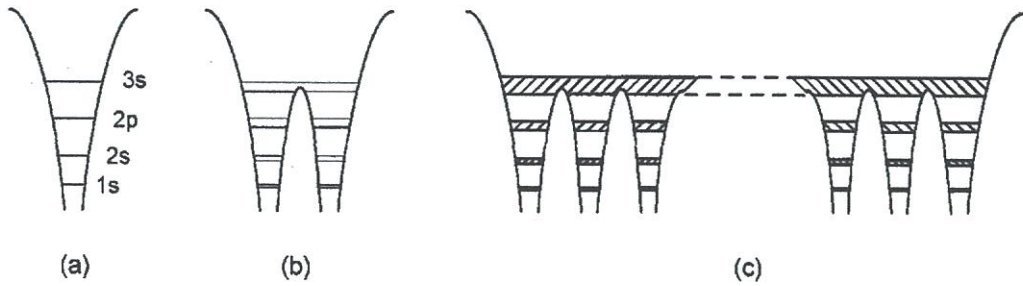
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สารกึ่งตัวนำ[5]

#### 2.1.1 แถบพลังงานในของแข็ง (Energy Bands in Solids)

การอธิบายแบบจำลองแถบพลังงานในเชิงคุณภาพ เริ่มต้นโดยการพิจารณาว่าระดับพลังงานของอะตอมอิสระ (isolated atom) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้น จะเปลี่ยนเป็นแถบพลังงานเมื่ออะตอมจำนวนมากถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกันมากขึ้นจนกลายเป็นของแข็ง ตัวอย่างเช่นอะตอมของโซเดียมอิสระ 1 อะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสและอิเล็กตรอน 11 ตัว อิเล็กตรอนเหล่านี้มีการเรียงตัวเป็นระดับพลังงานคือ  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$  ดังรูปที่ 1(a) หมายความว่าระดับพลังงาน  $1s, 2p$  และ  $2p$  มีอิเล็กตรอนอยู่เต็มในขณะที่ระดับพลังงาน  $3s$  มีอิเล็กตรอนเพียง 1 ตัว ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนที่มีได้ พิจารณาอะตอมของโซเดียม 2 อะตอม ที่อยู่ห่างกันมากจน อิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมไม่ได้รับอิทธิพลของแรงดึงดูดของอีกอะตอมหนึ่ง ดังนั้นระดับพลังงานของแต่ละอะตอมจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง การเรียงตัวของแต่ละอะตอมจะเหมือนอะตอมอิสระ อย่างไรก็ตามถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมทั้งสองสั้นลง ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอน (electrons wave functions) จะซ้อนทับกัน อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มี half-integer spin ซึ่งเรียกอนุภาคเหล่านี้ว่า Fermion จะมีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักของเพาลี (Pauli exclusion principle) ซึ่งกล่าวว่าแต่ละสถานะควอนตัมจะมี Fermion ได้เพียงหนึ่งอนุภาคเท่านั้น หมายความว่าอิเล็กตรอน 2 ตัวในระบบจะมีสถานะควอนตัมเหมือนกันไม่ได้ ระดับพลังงานของแต่ละอะตอมจึงต้องแยกเป็น 2 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 1(b) ยิ่งอะตอมอยู่ใกล้กันระดับพลังงานยิ่งแยกห่างกันมาก นอกจากนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนชั้นใน เช่นระดับ  $1s$  อยู่ใกล้นิวเคลียสมากจะได้รับอิทธิพลจากแรงดึงดูดของนิวเคลียสมาก ในขณะที่อิเล็กตรอนวงนอกได้รับอิทธิพลจากแรงดึงดูดของนิวเคลียสน้อยกว่าเนื่องจากถูกบดบัง (screening) ด้วยอิเล็กตรอนวงใน ดังนั้นแรงกระทำระหว่างอะตอมจึงมีผลต่ออิเล็กตรอนวงนอกมากกว่าอิเล็กตรอนวงใน เป็นต้นเหตุให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนลงในการแยกออกน้อยกว่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอก



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน

(a) อะตอมของโซเดียมอิสระ

(b) อะตอมของโซเดียม 2 อะตอมอยู่ใกล้กัน

(c) อะตอมของโซเดียมหลายอะตอมอยู่ชิดกันเป็นของแข็ง

ถ้าระบบมีอะตอมของโซเดียม 3 อะตอมอยู่ใกล้กัน ระดับพลังงานแต่ละระดับจะแยกออกเป็น 3 ระดับพลังงานย่อย ในทำนองเดียวกันถ้ามี 4 อะตอมก็จะแยกเป็น 4 ระดับพลังงานย่อย เมื่อมีจำนวนอะตอมจำนวนมากอยู่ใกล้กัน เช่นในของแข็งมีประมาณ  $10^{23}$  ถึง  $10^{22}$  eV ซึ่งไม่สามารถแยกเป็นเส้นย่อยๆ ได้ จึงมีลักษณะเป็นแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1(c) ช่วงพลังงานที่อยู่ระหว่างแถบพลังงานเรียกว่า energy gap เป็นบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ เปรียบเทียบได้กับช่องว่างระหว่างระดับพลังงานของอะตอมอิสระ

พิจารณาผลึกของของแข็งในอุดมคติที่ประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากที่เรียงตัวกันอย่างมีระเบียบอิเล็กตรอนในของแข็งจะเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้า,  $V(x)$  ของอะตอมที่มีลักษณะเป็นคาบที่มีการเวียนซ้ำตามระยะของโครงผลึก (lattice spacing) โดย

$$V(x) = V(x + a) = V(x + 2a) = \dots$$

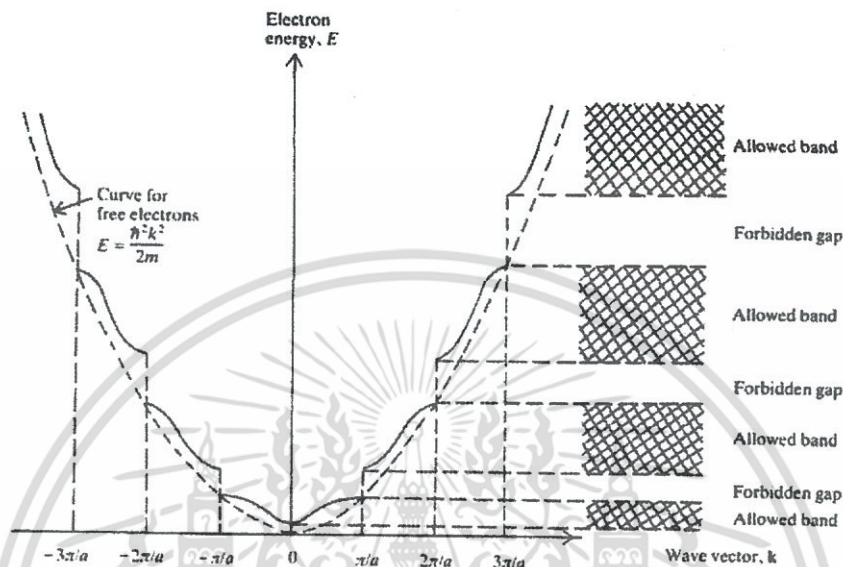
เมื่อ  $a$  ระยะของโครงผลึก

การคำนวณการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในระบบข้างต้นสามารถทำได้โดยใช้สมการชเรอดิงเงอร์ (Schrodinger equation) แต่มีความยุ่งยากมาก จึงต้องใช้การประมาณโดยอาศัยแบบจำลองของ Kronig-Penney (Kronig-Penney mode) ซึ่งพิจารณาว่าระบบประกอบด้วยอิเล็กตรอนเพียง 1 ตัว เคลื่อนที่ผ่านแถวของอะตอมที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบใน 1 มิติ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าของอะตอมแต่ละตัวจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ผลเฉลยของสมการชเรอดิงเงอร์แสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอนไม่สามารถมีพลังงานได้ทุกที่ แต่จะมีพลังงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นช่วงๆ แต่ละช่วงจะแยกจากกันด้วยช่วงพลังงานที่อิเล็กตรอนไม่สามารถมีได้ ช่วงของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ว่า แถบยินยอม (allowed band) และเรียกช่วงของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ว่า แถบต้องห้าม (forbidden band) หรือ แถบช่องว่าง (bandgap) หรือ ช่องว่างพลังงาน (energy gap)

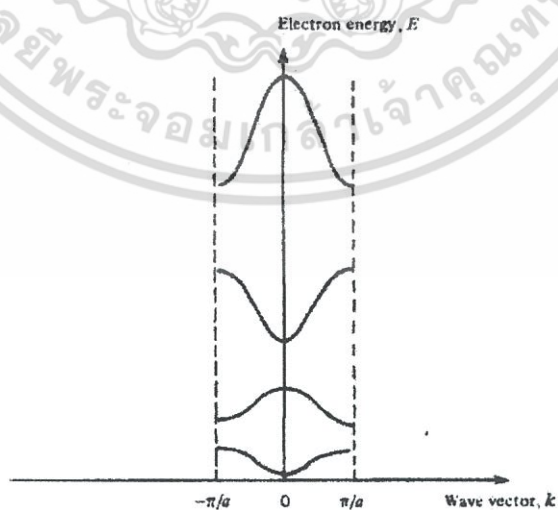
ความไม่ต่อเนื่องของพลังงานระหว่างแถบพลังงานกับช่องว่างจะปรากฏที่ค่าเวกเตอร์คลื่น (wave vector)  $k$  มีค่า  $k = \pm n\pi / a$  เมื่อ  $n$  คือเลขจำนวนเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งต่างจากพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระ ( $V = 0$ ) ที่มีลักษณะต่อเนื่อง (แสดงด้วยเส้นประรูปโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาราโบลา) ความไม่ต่อเนื่องของพลังงานเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับศักย์ไฟฟ้า  $V$  ส่วนโครงสร้างของแถบพลังงานที่สอดคล้องกัน แสดงทางด้านขวาของรูป ช่วง  $-\pi/a < k \leq \pi/a$  ในรูปที่ 2.2 โดยการเลื่อนให้ทุกช่วงของ  $k$  มาอยู่ในช่วงนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.3

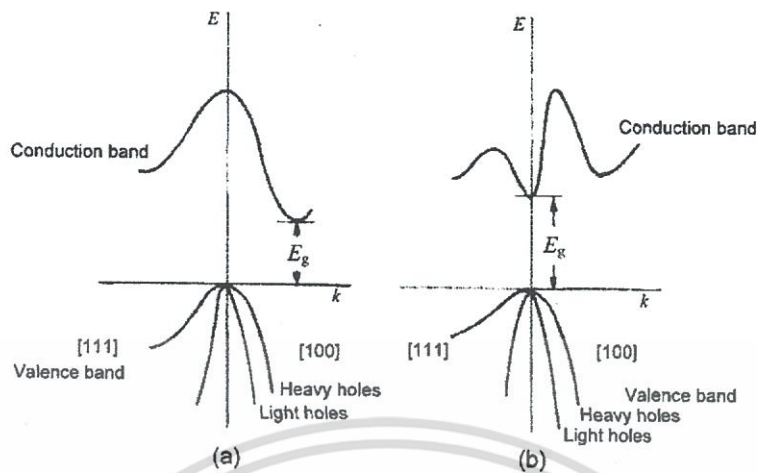


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E-k$  ของอิเล็กตรอนตามแบบจำลองของ Kronig-Penney และโครงสร้างของแถบพลังงานที่สอดคล้องกัน (เส้นประรูปโค้งพาราโบลา คือความสัมพันธ์ระหว่าง  $E-k$  ของอิเล็กตรอนอิสระ)



รูปที่ 2.3 First Brillouin Zone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง E-k ของของแข็งในความเป็นจริง

(a) ซิลิกอน (indirect bandgap)

(b) แกลเลียมเซไนด์ (direct bandgap)

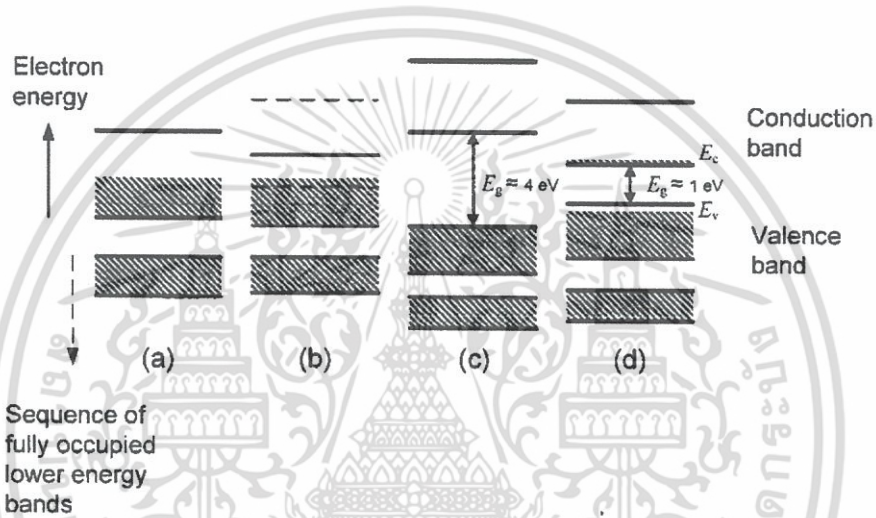
สำหรับผลึกในความเป็นจริงความสัมพันธ์ระหว่าง E-k จะมีความซับซ้อนมาก ดังตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง E-k ของผลึกซิลิกอนและแกลเลียมเซไนด์ ในรูปที่ 4 ลักษณะของแถบพลังงานจะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของเวกเตอร์คลื่นในผลึก เนื่องจากระยะห่างระหว่างอะตอมและพลังงานศักย์ภายในผลึกเป็นค่าที่ขึ้นกับทิศทางในผลึก แต่สิ่งที่น่าสนใจคือค่าของเวกเตอร์คลื่น  $k$  ที่ตรงกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่จำเป็นต้องเป็นค่าเดียวกับค่า  $k$  ที่เป็นจุดต่ำสุดของแถบนำกระแส ผลต่างของพลังงานระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบนำกระแสเรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (energy gap,  $E_g$ ) จากรูปที่ 2.4 ซิลิกอนเป็นผลึกที่มีค่า  $k$  ของจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับจุดต่ำสุดของแถบนำกระแส ไม่ตรงกัน เรียกผลึกลักษณะนี้ว่า indirect bandgap ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า  $k$  ตรงกัน จะเรียกว่า direct bandgap

### 2.1.2 การแบ่งประเภทของแข็ง (Classification of Solids)

เนื่องจากอิเล็กตรอนในของแข็งจะอยู่ในแถบพลังงานที่แยกออกเป็นช่วงๆ โดยอิเล็กตรอนจะถูกบรรจุในแถบพลังงานเริ่มต้นที่พลังงานต่ำสุดก่อน แล้วค่อยๆ บรรจุในแถบพลังงานที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดแล้วแถบพลังงานสุดท้ายอาจมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มแถบพลังงานหรือมีอิเล็กตรอนเพียงบางส่วนก็ได้ (ในที่นี้สมมติว่าอุณหภูมิค่าอิเล็กตรอนทั้งหมดจะอยู่ที่สถานะพื้นเท่านั้น ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเนื่องจากความร้อน) แถบพลังงานสูงสุด 2 แถบ เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบนำกระแส (conduction band) แถบวาเลนซ์ อาจมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มหรือเกือบเต็มหรือเพียงครึ่งเดียวก็ได้ขึ้นกับชนิดของของแข็ง ส่วนแถบนำกระแสจะอยู่เหนือแถบวาเลนซ์ขึ้นไป แถบนำกระแสอาจไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยหรือมีอิเล็กตรอนเพียงบางส่วนเท่านั้น

ของแข็งซึ่งมีแถบกระแสที่มีอิเล็กตรอนอยู่เพียงบางส่วน จะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไป อิเล็กตรอนที่บรรจุเพียงบางส่วนในแถบนำกระแส เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากสนามไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนย้ายไปยังสถานะที่ยังว่างในแถบนำกระแสเดียวกันนั้น อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ตามอิทธิพลของสนามไฟฟ้าเกิดเป็นกระแส เรา

เรียกของแข็งชนิดนี้ว่าตัวนำ (conductor) หรือ โลหะ (metal) ดังรูปที่ 2.5(a) ขบวนการที่อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนย้ายภายในแถบพลังงานเดียวกันนี้เรียกว่า intraband scattering processes ในทางกลับกันการเคลื่อนย้ายในแถบพลังงานเดียวกันจะเป็นไปได้ถ้าแถบพลังงานนั้นมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มแล้ว (แถบวาเลนซ์) สถานะว่างที่อยู่ใกล้ที่สุดซึ่งอยู่ในแถบนำกระแส อิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ energy gap ,  $E_g$  เพื่อข้ามจากแถบวาเลนซ์ไปยัง แถบนำกระแส จึงจะสามารถเคลื่อนที่ให้เกิดกระแสได้ ของแข็งชนิดนี้จะนำกระแสได้ไม่ดีหรือไม่นำกระแสเลยถ้า  $E_g$  มีค่าสูงมาก(เมื่อเทียบกับพลังงานเชิงความร้อนเฉลี่ยของอิเล็กตรอน ,  $kT$ , ที่อุณหภูมิห้อง  $kT \sim 1/40$  eV ในขณะที่  $E_g \sim 4$  eV) เราเรียกของแข็งชนิดนี้ว่า ฉนวน (insulator) ดังรูปที่ 2.5(c) และเรียกการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนในกรณีนี้ว่า interband transition



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงแถบพลังงานของของแข็งชนิดต่างๆ

- (a) พลังงานของโลหะที่มีอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์บางส่วน เช่น โลหะที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 1 ตัว  
 (b) พลังงานของโลหะที่มีอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์บางส่วน และมีการซ้อนทับกับแถบนำกระแส เช่น โลหะที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 2 ตัว  
 (c) แถบพลังงานของฉนวน  
 (d) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ในกรณีที่ฉนวนมี energy gap ระหว่างแถบวาเลนซ์กับนำกระแสแคบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5(d)จะเรียกว่าสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) โดยขีดแบ่งระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำจะไม่ค่อยชัดเจนนัก เช่นถ้าสารกึ่งตัวนำมี energy gap กว้าง (เช่น 3-4 eV)อาจเรียกว่าฉนวนก็ได้ โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำมี  $E_g$  อยู่ในช่วงพลังงานของแสงในย่านตามองเห็นหรือต่ำกว่าเช่น ซิลิคอน (Si) และเจอร์มาเนียม (Ge) มี  $E_g$  ประมาณ 1 eV และ 0.7 eV ตามลำดับสารกึ่งตัวนำในรูปของสารประกอบเช่น cadmium sulfide (CdS) มี  $E_g$  ประมาณ 2.5 eV ในขณะที่เพชรซึ่งเป็นฉนวนที่ดีมี  $E_g$  ประมาณ 6 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

อิเล็กตรอนในของแข็งจะมีการเคลื่อนที่อยู่เสมอเนื่องจากผลของพลังงานความร้อน ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะมีทิศทางแบบสุ่มเนื่องจากเกิดการกระเจิงการชนกับโครงผลึก (lattice) สารเจือ (impurities) และ defect ในผลึก ทำให้ไม่เกิดการกระจัดสุทธิของอิเล็กตรอนเป็นผลให้ไม่เกิดกระแสไหลสุทธิ

เมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้า  $E_x$  ให้แก่ผลึกในทิศทาง  $+x$  อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะได้รับแรงกระทำ เนื่องจากสนามไฟฟ้า  $-e E_x$  (เมื่อ  $e$  คือขนาดของประจุของอิเล็กตรอน) ทำให้อิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่โดยเฉลี่ยในทิศทาง  $-x$  ถ้าให้โมเมนตัมรวมของอิเล็กตรอนในแนวแกน  $x$  มีค่า  $p_x$  จะได้ว่า

$$-neE_x = \frac{dp_x}{dt} \quad (1)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน จากสมการ (1) ดูเสมือนว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการสูญเสียพลังงานไปจากการชนกับโฟตอน (lattice vibration หรือ phonon) และสารเจือในผลึก ที่สภาวะคงตัวจะมีความสมดุลกันระหว่างพลังงานจากสนามไฟฟ้ากับการสูญเสียพลังงานจากการชน อิเล็กตรอนจึงมีความเร็วคงที่  $V_D$  (constant drift velocity) ถ้า  $n_0$  คือจำนวนอิเล็กตรอนที่เวลา  $t = 0$  และเวลา  $t$  มีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปโดยยังไม่เกิดการชนจำนวน  $n(t)$  จะได้ว่า

$$-\frac{dn(t)}{dt} \alpha n(t) = -\frac{1}{\tau} n(t) \quad (2)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ ค่าคงที่ของการแปรผกผัน

ผลเฉลยของสมการ (2) คือ  $n(t) = n_0 e^{-t/\tau}$  เมื่อ  $\tau$  ซึ่งเรียกว่า mean free time หรือ relaxation time คือ เวลาเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปก่อนที่เกิดการชน และความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะเกิดการชนในช่วงเวลา  $dt$  คือ  $dt/\tau$  ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมช่วงเวลา  $dt$  คือ  $dp_x = p_x dt / \tau$  หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม คือ  $\frac{dp_x}{dt} = p_x / \tau$  และจากสมการ (1) จะได้ว่า

$$\frac{p_x}{\tau} = -neE_x \quad (3)$$

ถ้าให้  $p_x/n$  คือ ค่าเฉลี่ยของโมเมนตัมต่ออิเล็กตรอน  $\overline{p_x}$  ดังนั้น

$$\overline{p_x} = -e\tau E_x \quad (4)$$

จากสมการ (4) จะได้ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าคือ

$$V_D = \frac{\overline{p_x}}{m^* e} = \frac{-e\tau E_x}{m^* e} \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในชั้นเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $m_e^*$  คือ effective mass ของอิเล็กตรอน

ถ้าอิเล็กตรอนมีความหนาแน่น  $n$  ความหนาแน่นของกระแส (current density)  $J$  คือ

$$J = neV_D = \frac{ne^2\tau}{m_e^*} E_x = \sigma E_x \quad (6)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของวัสดุโดย

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m_e^*} = ne\mu_e \quad (7)$$

ปริมาณ  $\mu_e = (e\tau / m_e^*)$  เรียกว่า electron mobility เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุ ซึ่งเป็นปริมาณที่มีความสำคัญในการบอกสมบัติของสารกึ่งตัวนำ เมื่อพิจารณาสมการ (5) อาจกล่าวว่า mobility ของอิเล็กตรอน คือ ความเร็วอิเล็กตรอนต่อสนามไฟฟ้าหนึ่งหน่วยและสามารถเขียนได้ว่า

$$J = ne\mu_e E_x \quad (8)$$

ในสารกึ่งตัวนำพาหะที่มีประจุที่เคลื่อนที่ได้ นอกจากอิเล็กตรอนแล้วยังมีโฮล (hole) อีกด้วย ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสรวมในสารกึ่งตัวนำคือ

$$J = (ne\mu_e + pe\mu_h) E_x = \sigma E_x \quad (9)$$

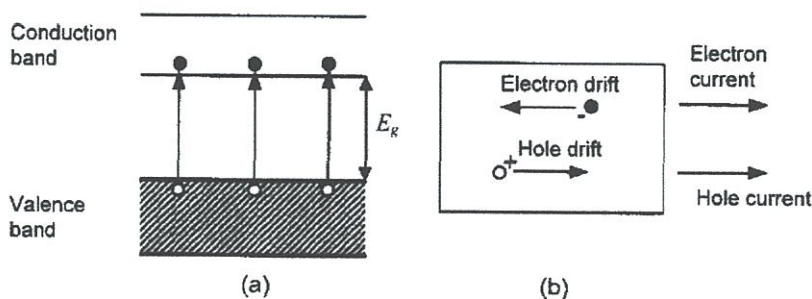
เมื่อ  $\mu_h$  คือ mobility ของโฮล โดย  $\mu_h = e\tau / m_h^*$  เมื่อ  $m_h^*$  คือ effective mass ของโฮล

#### 2.1.4 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductors)

สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ปราศจากสารเจือและ lattice defect เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด Intrinsic สารกึ่งตัวนำชนิดนี้จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มในแถบวาเลนซ์ และที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์จะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยในแถบนำกระแส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ จะขึ้นไปอยู่ในแถบนำกระแส เหลือช่องว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (hole) ไว้ในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pairs) ดังแสดงในรูปที่ 2.6(a) โฮลถือว่าเป็นอนุภาคที่มีประจุเท่ากับอิเล็กตรอนแต่มีเครื่องหมายตรงข้าม นั่นคือมีประจุ  $+e$

เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนกับโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า ในขณะที่โฮลเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนจะมีทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นกระแสที่ไหลทั้งหมดจึงเป็นผลรวมของกระแสอิเล็กตรอนและกระแสโฮล ดังแสดงในรูปที่ 2.6(b)



รูปที่ 2.6 สารกึ่งตัวนำชนิด Intrinsic

(a) การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

(b) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในสนามไฟฟ้า

เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลมีประจุตรงข้ามจึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนในแถบนำกระแสกับโฮลในแถบวาเลนซ์ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ยึดติดกันและโคจรรอบจุดศูนย์กลางของมวลรวมกันเรียกว่า exciton ประหนึ่งเป็นอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า exciton อาจอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ไปอย่างอิสระในผลึกก็ได้ exciton จะมีบทบาทเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพลังงานของแสงมีค่าน้อยกว่า energy gap ของสาร

เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิด Intrinsic มีการเกิดเป็นคู่เสมอและมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดังนั้นถ้าอิเล็กตรอนในแถบนำกระแสมีความหนาแน่น  $n$  ก็จะมีโฮลในแถบวาเลนซ์ที่มีความหนาแน่นเท่ากันคือ  $p$  โดย  $n = p = n_i$  เมื่อ  $n_i$  คือ ความหนาแน่นของพาหะ (Intrinsic carrier concentration)

ถึงแม้ว่า  $n_i$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่ที่อุณหภูมิห้องก็ยังมีค่าไม่สูงนัก เช่น ซิลิคอนมีความหนาแน่นของพาหะ  $n_i \sim 1.6 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  เมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนอิสระในโลหะซึ่งมีค่าประมาณ  $10^{29} \text{ m}^{-3}$  ดังนั้น สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิด *intrinsic* จึงมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับโลหะ ( $\sigma_{Cu} \sim 6.4 \times 10^7 \text{ } \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,  $\sigma_{Si} \sim 4.7 \times 10^{-4} \text{ } \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ )

ที่อุณหภูมิคงที่ หนาแน่นของคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะมีค่าคงที่เนื่องจากมีการรวมตัว (recombination) ของคู่อิเล็กตรอน-โฮลในอัตราที่เท่ากับอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเนื่องจากความร้อน การรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในแถบนำกระแส ตกกลับสู่แถบวาเลนซ์ แล้วคายพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือความร้อน ขึ้นกับกลไกของการรวมตัว ถ้ามีการคายพลังงานในรูปของแสงจะเรียกขบวนการนี้ว่า radiative recombination และถ้าคายพลังงานในรูปของโฟนอนจะเรียกขบวนการนี้ว่า nonradiative recombination

ถ้าอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเนื่องจากความร้อนคือ  $g_i$  และอัตราการรวมตัวกันคือ  $r_i$  แล้วที่สภาวะสมดุล จะได้ว่า  $g_i = r_i = Bnp$  เมื่อ  $B$  เป็นค่าที่ซึ่งขึ้นกับกลไกของขบวนการของการรวมตัว ทั้งอัตราการเกิดและอัตราและอัตราการรวมตัวเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น  $g_i$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นของคู่อิเล็กตรอน-โฮลสูงขึ้น เป็นผลให้มี  $r_i$  สูงขึ้นตามด้วยเพื่อคงสภาวะสมดุล สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด *intrinsic* จะมี  $r_i = Bn_i^2$

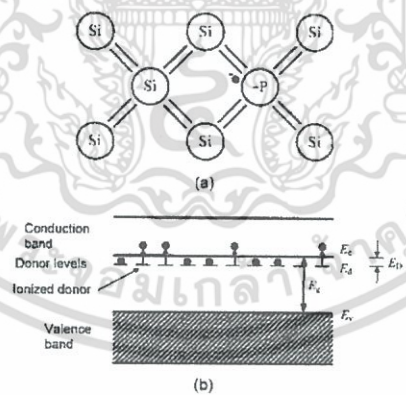
สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic Semiconductors)

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำชนิด *intrinsic* ที่กล่าวข้างต้นมีจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลน้อยทำให้มีการนำไฟฟ้าต่ำมากหรือมีความต้านทานสูงมากจนมีสภาพคล้ายฉนวนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

มากนักการเพิ่มจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้โดยการเติมสารเจือที่เหมาะสมลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ขบวนการนี้เรียกว่าการโด๊ป (doping) การโด๊ปจะให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำกระแสกับความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ไม่เท่ากัน (ในสารกึ่งตัวนำชนิด intrinsic จะมีความหนาแน่นเท่ากัน) การโด๊ปสามารถทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีมากหรือน้อยกว่าโฮลได้ สารกึ่งตัวนำชนิดนี้เรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิด extrinsic สารกึ่งตัวนำชนิด extrinsic ที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากกว่าโฮล เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด n-type และเรียกสารกึ่งตัวนำชนิด extrinsic ที่มีความหนาแน่นของโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนว่า สารกึ่งตัวนำชนิด p-type

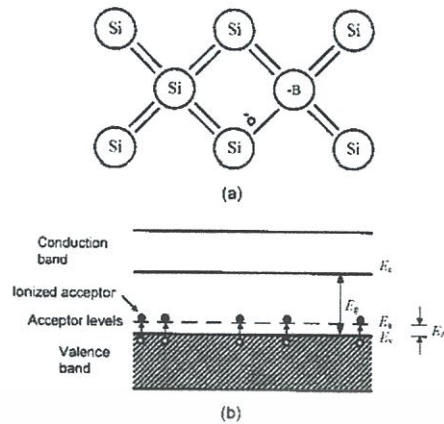
การโด๊ปสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม IV ของตารางธาตุ (มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 4 ตัว) เช่น ซิลิคอนด้วยสารเจือจากกลุ่ม V ของตารางธาตุ (มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 5 ตัว) เช่น ฟอสฟอรัส (P) และ อาร์เซนิก (As) และกลุ่ม III ของตารางธาตุ (มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตัว) เช่น โบรอน (B) และ อินเดียม (In) จะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิด n-type และ p-type ตามลำดับ

เมื่อซิลิคอนบริสุทธิ์ถูกโด๊ปด้วยฟอสฟอรัส อะตอมของฟอสฟอรัสจะเข้าแทนที่อะตอมของซิลิคอนดังแสดงในรูปที่ 2.7(a) เนื่องจากอะตอมของซิลิคอนมีอิเล็กตรอนวงนอก 4 ตัว ดังนั้นจึงมีการเกาะเกี่ยวกับอิเล็กตรอนของฟอสฟอรัสเพียง 4 ตัวจากทั้งหมด 5 ตัว ด้วย covalent band เหลืออิเล็กตรอนอีก 1 ตัวที่ยึดเหนี่ยวกับอะตอมของฟอสฟอรัสอย่างหลวมๆ อิเล็กตรอนตัวนี้สามารถถูกกระตุ้นขึ้นไปบนแถบนำกระแสได้ง่ายเมื่อได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจากแบบจำลองแถบพลังงานจะพบระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากสารเจือ  $E_D$  อยู่ด้านใต้ใกล้กับแถบนำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.7(b) สารเจือชนิดนี้เรียกว่า donor (เนื่องจากอิเล็กตรอนแถบกระแส) และเรียกระดับพลังงาน  $E_D$  ว่าระดับพลังงาน donor (donor level)



รูปที่ 2.7 สารกึ่งตัวนำชนิด n-type

- (a) อะตอมของซิลิคอนถูกแทนด้วยอะตอมของสารเจือที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัว เช่น ฟอสฟอรัส
- (b) ระดับพลังงานของ donor



รูปที่ 2.8 สารกึ่งตัวนำชนิด p-type

- (a) อะตอมของซิลิคอนถูกแทนด้วยอะตอมของสารเจือที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 3 ตัว เช่น โบรอน  
 (b) ระดับพลังงานของ acceptor

พลังงานที่ต้องใช้ในกระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับพลังงาน donor ไปยังแถบนำกระแสมีค่า  $E_D$  โดย  $E_D = E_C - E_d$  เมื่อ  $E_C$  คือพลังงานต่ำสุดของแถบนำกระแส โดยทั่วไปมักถือว่า  $E_V$  พลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น  $E_g = E_C$  และดังนั้น  $E_D = E_g - E_d$  ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ที่ระดับพลังงาน donor จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม แต่เนื่องจาก  $E_D$  มีค่าน้อย (0.04 eV) ดังนั้นถึงแม้อุณหภูมิจะต่ำ อิเล็กตรอนทั้งหมดที่ระดับพลังงาน donor จะถูกกระตุ้นไปยังแถบนำกระแส จึงเป็นการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำกระแสขึ้นเป็นปริมาณเท่ากับจำนวนอะตอมของสารเจือ จึงเป็นการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำกระแสขึ้นเป็นปริมาณกับจำนวนอะตอมของเจือ (แต่ไม่เพิ่มจำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์) เป็นผลให้การนำไฟฟ้าของสารดีขึ้น โดยเราเรียกอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ว่าพาหะข้างมาก (majority carrier) และเรียกโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ว่าพาหะข้างน้อย (minority carrier)

ในทำนองเดียวกันถ้าซิลิคอนถูกโด๊ปด้วยโบรอน อะตอมของโบรอนจะเข้าแทนที่ตำแหน่งของซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.8(a) เนื่องจากโบรอนมีอิเล็กตรอนวงนอกเพียง 3 ตัว จึงขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัวในการเกาะเกี่ยวแบบ covalent bond กับอิเล็กตรอนทั้ง 4 ของซิลิคอน ที่อุณหภูมิสูงกว่า ศูนย์องศาสัมบูรณ์ อิเล็กตรอนจากอะตอมซิลิคอนข้างเคียงสามารถเคลื่อนที่มายังอะตอมโบรอนเพื่อเกิดเป็น covalent bond ที่สมบูรณ์ แต่การกระทำเช่นนี้จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในแถบวาเลนซ์ของซิลิคอน นั่นคือเกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ ของซิลิคอนนั่นเอง (โดยไม่เพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำกระแส) เราเรียกสารเจือชนิดว่า acceptor (เนื่องจากรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์)

พลังงานที่ต้องการกระตุ้นอิเล็กตรอนไปยังระดับพลังงาน acceptor คือ  $E_A$  เมื่อ  $E_A = E_g - E_V$  ดังแสดงในรูปที่ 2.8(b) ซึ่งสำหรับซิลิคอนมีค่าประมาณ 0.032 eV ดังนั้นถึงแม้อุณหภูมิจะต่ำ สารเจือทุกอะตอมจะรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์และเกิดโฮลเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนอะตอมของสารเจือในแถบวาเลนซ์ จึงเป็นการเพิ่มจำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์ เป็นผลให้การนำไฟฟ้าของสารดีขึ้นเช่นกัน โดยเราเรียกโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิด p-type ว่าพาหะข้างมาก (majority carrier) และเรียกอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ว่าพาหะข้างน้อย (minority carrier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากสารกึ่งตัวนำจะเป็นธาตุในกลุ่ม IV ซึ่งอิเล็กตรอนวงนอก 4 ตัว เช่น ซิลิคอนและเจอร์มาเนียมแล้ว สารกึ่งตัวนำอาจอยู่ในรูปของสารประกอบได้ด้วย เช่น gallium arsenide (GaAs) โดยแกลเลียมเป็นธาตุในกลุ่ม III ของตารางธาตุ ขณะที่อาร์เซนิกเป็นธาตุในกลุ่ม V ของตารางธาตุ สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มักเรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบกลุ่ม III-V (group III-V compound) สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้ได้แก่ GaAs, GaP, InP และ AlSb เป็นต้น

ในการโด๊ปให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบกลุ่ม III-V เช่น GaAs เป็นชนิด n-type และ p-type สามารถทำได้หลายวิธี เช่น โด๊ปด้วยธาตุกลุ่ม II เช่น สังกะสี (zinc, Zn) เมื่ออะตอมของสังกะสีเข้าแทนที่อะตอมของแกลเลียมจะได้สารกึ่งตัวนำชนิด p-type แต่ถ้าโด๊ปด้วยธาตุกลุ่ม VI เช่น เทลลูเรียม (tellurium, Te) เมื่ออะตอมของเทลลูเรียมเข้าแทนที่อะตอมของอาร์เซนิกจะได้สารกึ่งตัวนำชนิด n-type ธาตุในกลุ่ม IV ก็สามารถใช้เป็นสารเจือได้เช่นกัน แต่จะได้สารกึ่งตัวนำชนิด p-type และ n-type ขึ้นกับว่าสารเจือเข้าแทนที่อะตอมของอาร์เซนิกหรือแกลเลียม

นอกจากนี้ยังสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบกลุ่ม II-VI เช่น CdS และ ZnSe เป็นต้น และสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบของธาตุ 3 และ 4 ชนิด เช่น GaInAs และ GaInAsP เป็นต้น

#### Exciton

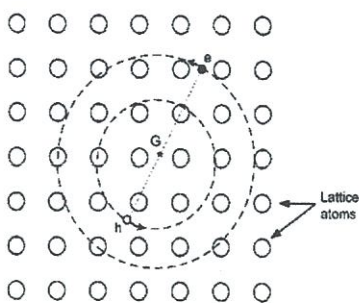
จากที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อมีการเจือสารที่เหมาะสมลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ สามารถทำให้เกิดสถานะหรือระดับพลังงานอิเล็กตรอนนำกระแส อย่างไรก็ตาม ระดับพลังงานอิเล็กตรอนลักษณะนี้สามารถเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ไม่ได้มีการเจือสารได้เช่นกัน ระดับพลังงานอิเล็กตรอนนี้เกิดได้เนื่องจากแรงดึงดูดของอิเล็กตรอนและโฮลเข้าไว้ด้วยกัน คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ยึดกันด้วยแรงดึงดูดนี้เรียกว่า exciton จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลางของมวล ด้วยรัศมีวงโคจรเป็นสัดส่วนผกผันกับมวลยังผล (effective mass) ของอิเล็กตรอนและโฮล ดังรูปที่ 2.9 สถานะภาพของ exciton สามารถอธิบายได้คล้ายกับแบบจำลองอะตอมของบอร์ (Bohr mode) แต่แทนมวลของอิเล็กตรอนด้วยมวลลดทอน (reduced mass)  $m_r^*$  ของอิเล็กตรอนและโฮล โดย

$$\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \quad (10)$$

พลังงานยึดเหนี่ยวของ exciton  $E_e$  คือ

$$E_e = 13.6 \frac{m_r^*}{m_e^*} \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^2 eV \quad (11)$$

เนื่องจาก  $m_r^*$  มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของ  $m_e^*$  และ  $m_h^*$  จะเห็นว่าระดับพลังงาน exciton จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของผู้ให้ (donor level) ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่มีการเจือสาร



รูปที่ 2.9 แบบจำลองของ exciton

Exciton สามารถเคลื่อนที่ผ่านโครงผลึกของสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้และมีบทบาทสำคัญในกระบวนการแปลงแสงของสารกึ่งตัวนำ

### 2.1.5. ความหนาแน่นของพาหะ (Carrier Concentrations)

ในการคำนวณและวิเคราะห์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์หรือเซลล์แสงอาทิตย์ สิ่งที่ต้องทราบอย่างหนึ่งก็คือความหนาแน่นของพาหะ ได้แก่อิเล็กตรอนและโฮลในอุปกรณ์นั้น ในโลหะเราสามารถประมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้อย่างแม่นยำจากการคำนวณจำนวนอะตอมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (คำนวณจากความหนาแน่นและเลขมวลของโลหะนั้น) คูณด้วยจำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valency) ในขณะที่สารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปด้วยสารเจือจำนวนมาก จะสามารถประมาณได้ว่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากจะมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของสารเจือ แต่การประมาณนี้จะไม่ถูกต้องในกรณีที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากจะมีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์จำนวนมากและมีจำนวนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด

ในการคำนวณความหนาแน่นของสารเจือมีสิ่งที่จะต้องคำนึง 2 ประการ ได้แก่

1. การกระจายของสถานะพลังงาน (energy state) ในแถบพลังงาน
2. ความน่าจะเป็นที่จะมีอิเล็กตรอนอยู่ในแต่ละสถานะพลังงานเหล่านั้น

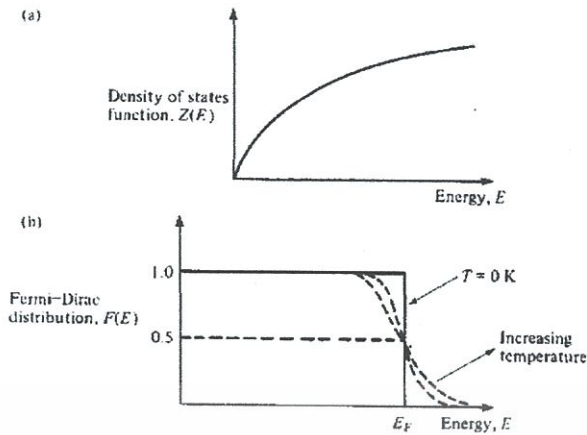
การกระจายของสถานะพลังงานในแถบพลังงานกำหนดโดย density of state function,  $Z(E)$  ซึ่งบอกถึงจำนวนของสถานะพลังงาน (ระดับพลังงานที่พาหะสามารถอยู่ได้) ต่อหนึ่งหน่วยพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร โดย

$$Z(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*_e)^{3/2} E^{1/2} \quad (12)$$

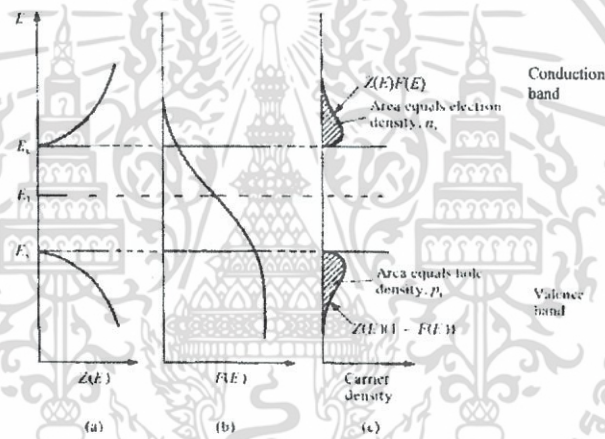
เมื่อ  $E$  คือพลังงานที่วัดเทียบกับจุดต่ำสุดของแถบพลังงาน รูปแบบของฟังก์ชันนี้ แสดงรูปที่ 2.10(a) ส่วนความน่าจะเป็นที่จะมีอิเล็กตรอนอยู่ในแต่ละสถานะพลังงานเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิซึ่งเป็นไปตาม Fermi-Dirac distribution function,  $F(E)$  โดย

$$F(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (13)$$

เมื่อ  $E_F$  คือระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy) รูปแบบของฟังก์ชันนี้แสดงดังรูปที่ 10(b) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยบริษัททรานซิสเตอร์ จำกัด เมื่อผู้ซื้อเห็นข้อบกพร่องในเอกสารนี้ กรุณาแจ้งให้เราทราบทันทีโดยไม่ต้องแจ้งชื่อผู้ซื้อ หรือแจ้งชื่อของพนักงานขายของเรา ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 (a) density of states function  
(b) Fermi Dirac function ที่  $T = 0\text{ K}$  และ  $T > 0\text{ K}$



รูปที่ 2.11 (a) density of states function  
(b) Fermi Dirac function  
(c) ความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำ intrinsic

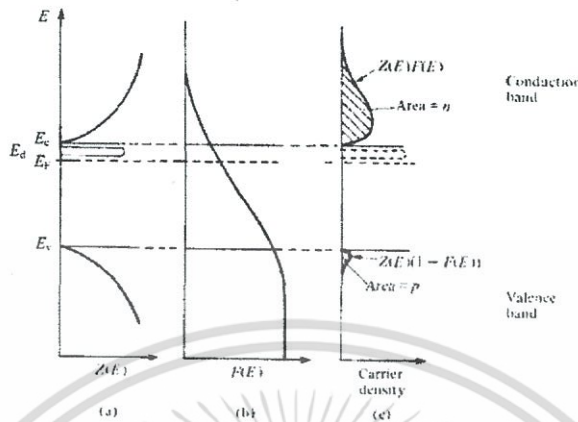
จากรูป 2.10 (b) แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ  $0\text{ K}$   $F(E)$  มีค่าเป็น 1 ที่พลังงานต่ำกว่า  $E_F$  และมีค่าเป็นศูนย์ที่พลังงานสูงกว่า  $E_F$  หมายความว่าอุณหภูมิ  $0\text{ K}$  จะไม่พบว่ามีอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า  $E_F$  เลยและที่อุณหภูมิเหนือระดับ  $0\text{ K}$  จะมีโอกาสเท่ากับ 0.5 ที่จะพบอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_F$  จากรูปยังแสดงถึงความน่าจะเป็นที่จะพบว่ามีสถานะว่างที่ระดับพลังงานต่ำกว่า  $E_F$

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิด intrinsic ส่วนของกราฟที่อยู่เหนือค่า  $E_F$  จะยื่นเข้าไปใน แถบนำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.11(b) density of state function และความหนาแน่นของพาหะแสดงดังรูปที่ 2.11(a) และ 2.11(c) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากันและมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ที่กึ่งกลางของ energy gap

ในสารกึ่งตัวนำชนิด *n-type* มีอิเล็กตรอนในแถบนำกระแสมากกว่าโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นระดับพลังงานเฟอร์มิจึงอยู่ใกล้ระดับพลังงาน *donor* ในทำนองเดียวกัน สารกึ่งตัวนำ

ชนิด *p-type* ระดับพลังงานเฟอร์มิจะอยู่ใกล้ระดับพลังงาน *acceptor* ระดับพลังงานเฟอร์มิค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มี density of state function และความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำชนิด *n-type* แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 (a) density of states function ของแถบวาเลนซ์และแถบนำกระแส (b) Fermi Dirac function (c) ความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำชนิด *n-type*

ความหนาแน่นของพาหะสามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรตผลคูณระหว่าง density of state กับความน่าจะเป็นที่จะพบพาหะนั้นตลอดช่วงพลังงานที่สนใจ เช่น ความหนาแน่น *n* ของอิเล็กตรอนในแถบนำกระแส คำนวณโดย

$$n = \int_{band} Energy F(E) Z(E) dE \tag{14}$$

$$= N_G \exp\left(\frac{E_G - E_F}{kT}\right) \tag{15}$$

เมื่อ

$$N_G = 2\left(\frac{2\pi m^*_e kT}{h^2}\right)^{3/2} \tag{16}$$

ในทำนองเดียวกันความหนาแน่น *p* ของโฮลในแถบวาเลนซ์ คำนวณโดย

$$p = \int_{band} Valence [1 - F(E)] dE \tag{17}$$

$$= N_v \exp\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \tag{18}$$

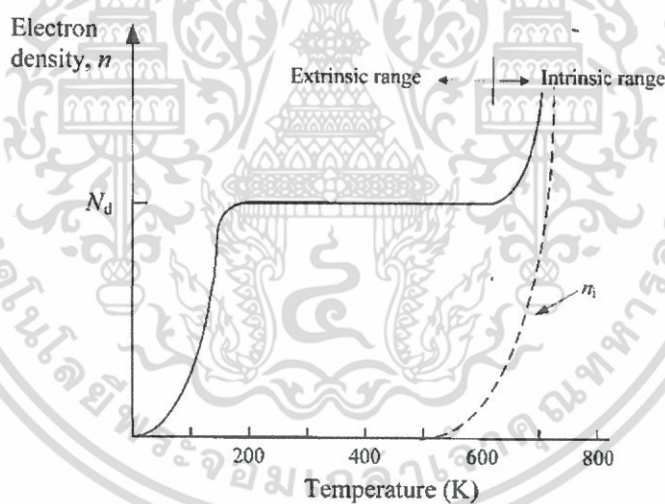
เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (19) คร่ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อนำสังเกตจากสมการ (12) และ (13) คือผลคูณระหว่าง  $n$  และ  $p$  จะมีค่าคงที่ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิคงที่ นั่นคือ

$$np = n_i p_i = n_i^2 = N_G N_V \exp(-E/kT) \quad (20)$$

จากสมการ (14) แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียล โดย  $n_i \propto \exp(-E_g / 2kT)$  ในทำนองเดียวกัน สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$ -type อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากระดับพลังงาน donor ไปยังแถบนำกระแสด้วยปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลเช่นกัน โดย  $n_i \propto \exp(-E_D / kT)$  แต่  $E_D$  มีค่าน้อยกว่า  $E_g$  มากดังนั้นที่อุณหภูมิเหนือ 100 K อิเล็กตรอนในระดับพลังงาน donor เกือบทั้งหมดจะถูกกระตุ้นไปยังแถบนำกระแส โดยในช่วงอุณหภูมินี้คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะไม่มี ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจึงมีค่าคงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องมากพอสมควร ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากคู่อิเล็กตรอน-โฮลเริ่มเกิดจากอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปยังแถบกระแส ตามสมการ (14) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$ -type ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินี้แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิด  $n$ -type ( $N_d$  คือความหนาแน่นของสารเจือ)

## 2.2 ความต้านทานไฟฟ้า [6]

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลหมาย ถึงมีการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนในลวดสายไฟและ อิเล็กตรอนจะวิ่งชนกับอะตอมของ เส้นลวด เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น เราเรียกว่า ความต้านทาน (Resistance) ความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm ใช้สัญลักษณ์  $W$ ) ความต้านทานเกิดขึ้นทุก ๆ ที่ที่มีกระแสไฟฟ้าไหล ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในสายไฟเท่านั้น ตัวอย่าง ความ ต้านทานต่าง ๆ มีดังนี้

1. ความต้านทานของตัวนำ ได้แก่ ความต้านทานของลวดสายไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
2. ความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้แก่ความต้านทานของสารละลายของกรดเกลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
กรุดก้ามะถัน นำเกลือ เป็นต้น  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

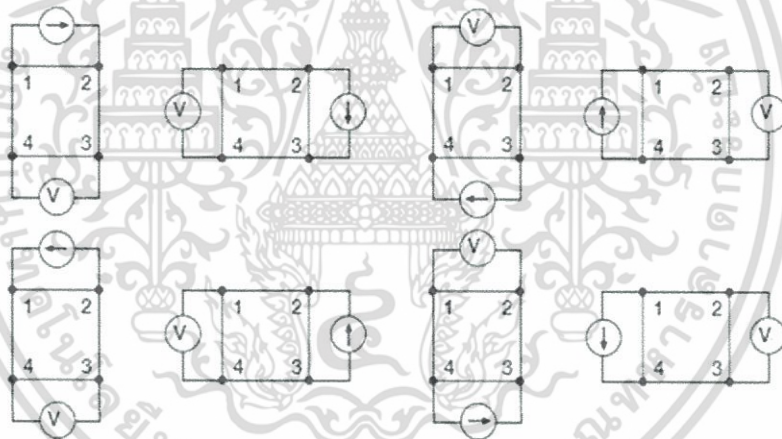
3. ความต้านทานของจุดสัมผัส ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสของสวิตช์หรือรอยเชื่อมต่อระหว่างสายไฟ ที่จุด สัมผัสนี้กระแสจะไหลได้ยากเพราะมีความต้านทานสูงความต้านทานของจุดสัมผัสนี้จะเป็นปัญหามากเมื่อให้กระแสไหลผ่าน เป็นจำนวนมากค่าความต้านทานนี้จะลดลงโดยการขัดผิวที่จุดสัมผัสให้เรียบหรือเพิ่มแรงกดที่จุดสัมผัส หรือบัดกรีเชื่อมต่อ ระหว่างสายไฟเสีย

4. ความต้านทานของสายดิน ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินและแผ่นโลหะฝังลงดิน

5. ความต้านทานของฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วจากสายไฟจะใช้ไวโนลหรือยางซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความ ต้านทานจำเพาะ สูงหุ้มสายไฟนั้นไว้ เราเรียกรูปการป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วนี้ว่าการฉนวน และวัสดุที่ใช้ในการฉนวนนี้ว่า ฉนวน แต่การฉนวนนั้นมิได้หมายความว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไม่ได้เลย

### 2.3 van der Pauw Method [13]

การวัดแบบ van der โดยจะจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขอบของชิ้นสารตัวอย่าง และทำการวัดแรงดันไฟฟ้า โดยใช้วิธีวัดความต้านทานจาก 8 ตัวอย่างที่มีการกำหนดค่าที่แสดงในรูปที่ 14 วัดความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่าง ( $\rho$ )



รูปที่ 2.14 จุดบนหน้าสัมผัสในการวัดของ van der Pauw จากวิธีวัดแบบ van der Pauw จะได้  $R_A$  และ  $R_B$

$$R = V / I \quad (21)$$

$$R_A = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) / 4, \quad (22)$$

$$R_B = (R_5 + R_6 + R_7 + R_8) / 4 \quad (23)$$

$$R_{avg} = (R_A + R_B) / 2 \quad (24)$$

นำค่า ความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยที่หาได้มาคำนวณหาความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

$$R_S = \frac{\pi}{\ln 2} R_{avg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (25) ราคาไม่ต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)

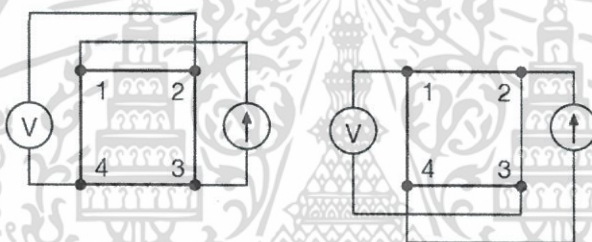
$$\rho = R_s d \quad (26)$$

จะได้การนำไฟฟ้า (Conductivity)

$$\text{conductivity} = \frac{1}{\rho} \quad (27)$$

## 2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall Effect) [8]

ปรากฏการณ์ฮอลล์คำนวณหาค่าพารามิเตอร์วัสดุได้หลากหลายเช่น แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) ความเข้มข้นของพาหะ (N), ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์( $R_H$ ) และชนิดของการนำไฟฟ้า (N หรือ P) ซึ่งทั้งหมดได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ เพื่อสามารถประเมินความคล่องตัวของพาหะ( $\mu$ ) ปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถวัดได้โดยกำหนดตามรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 การวัดฮอลล์ที่กำหนด

สนามแม่เหล็กขวก B โดยป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไประหว่างขั้ว 1 และ 3 และวัดแรงดัน ( $V_{2-4+}$ ) ระหว่างขั้ว 2 และ 4 โดยการป้อนกระแสย้อนกลับแล้ววัดแรงดันไฟฟ้า ถัดไป ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไประหว่างขั้วที่ 2 และ 4 และวัดแรงดันไฟฟ้า ( $V_{1-3+}$ ) ระหว่างขั้ว 1 และ 3 ป้อนกระแสย้อนกลับและวัดแรงดัน ( $V_{3-1+}$ ) อีกครั้ง

ให้สนามแม่เหล็กเป็นลบ B และทำซ้ำขั้นตอนอีกครั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่สี่: ( $V_{2-4-}$ ), ( $V_{4-2-}$ ), ( $V_{1-3-}$ ) และ ( $V_{3-1-}$ )

จากวัดแรงดันไฟฟ้าทั้ง 8 ค่า จะหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์เฉลี่ยได้ดังนี้

$$R_{HC} = \frac{d(V_{42+} - V_{24+} + V_{24-} - V_{42-})}{4BI} \quad (28)$$

$$R_{HD} = \frac{t_s(V_{31+} - V_{13+} + V_{13-} - V_{31-})}{4BI} \quad (29)$$

เมื่อ :  $R_{HC}$  และ  $R_{HD}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ ( $cm^3 / C$ )

$t_s$  คือ ความหนาของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$B$  คือ สนามแม่เหล็ก

$V_{42+}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากจุดที่4ไปจุดที่2 ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากจุดที่3 ไปจุดที่1 โดยมีทิศสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า

$-V_{24+}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากจุดที่2ไปจุดที่4 ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากจุดที่3 ไปจุดที่1 โดยมีทิศสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า

$V_{24-}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากจุดที่2ไปจุดที่4 ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากจุดที่3 ไปจุดที่1 โดยมีทิศสนามแม่เหล็กพุ่งออก

$-V_{42-}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากจุดที่4ไปจุดที่2 ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากจุดที่3 ไปจุดที่1 โดยมีทิศสนามแม่เหล็กพุ่งออก

$V_{31+}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากจุดที่4ไปจุดที่2 ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากจุดที่3 ไปจุดที่1 โดยมีทิศสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า

$-V_{13+}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากจุดที่2ไปจุดที่4 ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากจุดที่3 ไปจุดที่1 โดยมีทิศสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า

$V_{13-}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากจุดที่2ไปจุดที่4 ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากจุดที่3 ไปจุดที่1 โดยมีทิศสนามแม่เหล็กพุ่งออก

$V_{31-}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากจุดที่4ไปจุดที่2 ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากจุดที่3 ไปจุดที่1 โดยมีทิศสนามแม่เหล็กพุ่งออก

เมื่อทราบค่า  $R_{HC}$  และ  $R_{HD}$  ก็จะทำค่าเฉลี่ย  $R_{HAVG}$

$$R_{HAVG} = \frac{R_{HG} + R_{HD}}{2} \quad (30)$$

$$n = \frac{1}{R_H q} \quad (31)$$

จากค่า  $\rho_{AVG}$  และ  $R_{HAVG}$  หาค่า *mobility*

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} \quad (32)$$

## 2.5 วิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีการวัดแบบฮอลล์และfour point probes (MEASUREMENT SYSTEM WITH HALL AND A FOUR POINT PROBES FOR CHARACTERIZATION OF SEMICONDUCTORS) [8]

บทความนี้อธิบายถึงการออกแบบการสร้างและการควบคุมโปรแกรมของระบบการวัดอัตโนมัติ (AMS) ซึ่งได้รับการออกแบบมาสำหรับวัดความต้านทานแผ่นและสภาพความคล่องตัว โดยใช้วิธี van der Pauw และ 4-point probe สามารถนำมาคำนวณหาความเข้มข้นและความคล่องตัว

1 ระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีการวัดแบบฮอลล์และfour point probes ปรากฏ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำฮออล์ล์วัตต์มีลักษณะของคุณสมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำ เช่น Si,GaAs, ZnO และรวมทั้งวัสดุอิเล็กทรอนิกส์และแม่เหล็กอื่น ๆ

2.5.2 การศึกษาอิทธิพลของข้อบกพร่องของชิ้นในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางโดยใช้วิธีของ แวน เดอร์ พาว (Study of quantitative influence of sample defects on measurements of resistivity of thin films using van der Pauw method) [15]

ในสัมมนาจะทุ่มเทให้กับวิธีการวัดความต้านทานของฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคแวนเดอร์พาว (VDP) โดยเฉพาะผลกระทบทั่วไปในตัวอย่างซึ่งเรียกว่า " ข้อบกพร่อง " ซึ่งในระดับหนึ่งก็จะสามารถสรุปได้จากกรวัดไม่ว่าจะเป็นข้อบกพร่องและตัวอย่างมีการแยกออกจากผลการทดลอง (ข้อบกพร่องที่ไม่สามารถแก้ไขได้) หรือว่าข้อผิดพลาดสามารถแก้ไขได้ในภายหลังจากตัวเลข (ข้อบกพร่องแก้ไขได้) โดยเฉพาะ ultrathin films ที่มีขีดจำกัดให้การเชื่อมต่อ ผลกระทบของข้อบกพร่องเหล่านี้ สามารถจะเข้าใจผิดได้ง่ายสำหรับพฤติกรรมที่ผิดปกติที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นเราจึงจำลองตัวอย่างที่มีข้อบกพร่องในการทดลองเพื่อดูผลกระทบ

โดยใช้เทคนิคการ photolithography การจำลองตัวอย่างที่มีข้อบกพร่องทั่วไป โดยจำลองตัวอย่างสมมาตรทางเรขาคณิตของ thin Cu foil ข้อบกพร่องเหล่านี้อยู่ระหว่างหน้าสัมผัสที่ไม่สมมาตรกัน รอยแตกที่อยู่โดดเดี่ยวและ รอยแตกและหลุมที่ไม่ได้อยู่แบบโดดเดี่ยว ซึ่งมีอิทธิพลต่อขนาดและตำแหน่งภายในของตัวอย่าง ผลกระทบของข้อบกพร่องเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงในวงจรการที่วัดระดับหนึ่งในวิธีการที่ VDP และการเปรียบเทียบกับค่าของตัวอย่างที่สมบูรณ์แบบ จากนั้นเราจะสรุปอาการและผลกระทบของข้อบกพร่อง และแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติของการแก้ไขตัวเลข เป้าหมายของการศึกษาครั้งนี้คือการแสดงผลการทดลองประเภทของข้อบกพร่องที่สามารถนำไปสู่ความไม่สมดุลทางไฟฟ้าของตัวอย่างสมมาตร ซึ่งการแก้ไขเป็นไปตามทฤษฎี และที่ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีนี้ มันเกิดขึ้นประจำในการทดลองวัด ที่ " การเชื่อมต่อ " ตัวอย่างโดยทั่วไปจะไม่สามารถแก้ไขได้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นี้ มีส่วนประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันได้แก่

### 3.1 Hardware

#### 3.1.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร

ชุดสนามแม่เหล็กถาวรมันเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการสร้างเครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ดังนั้นการสร้างชุดสนามแม่เหล็กถาวรขึ้นมาต้องมีความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และต้องการทราบค่าที่แท้จริงของสนามแม่เหล็กที่ใช้ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เราใช้มีความแข็งแรงถึง 5500 G จึงต้องนำมาวัดอย่างหนาแน่นโดยการออกแบบชุดในการนิตของแม่เหล็ก

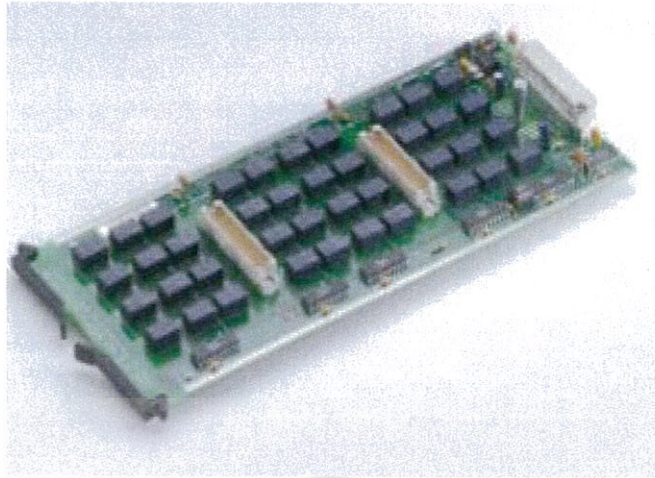


รูปที่ 3.1 สนามแม่เหล็กถาวร

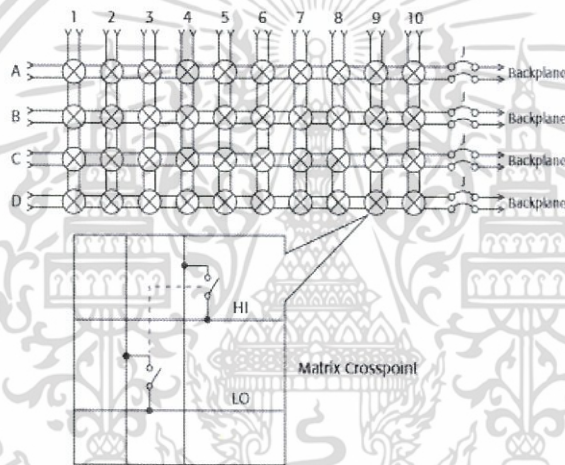
#### 3.1.2 วงจรควบคุมการสลับขั้ว

การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ในที่นี้จะใช้เทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ ร่วมกับเทคนิคแวนเดอร์พาว ซึ่งระบบการควบคุมการสลับสวิทซ์ คือ Model 7012-S 4x10 Matrix Cards แสดงดังรูปที่ 3.3 ก. และวงจรของโมเดล แสดงดังรูปที่ 3.3 ข. โดยจะต่อ Model Model 7012- S 4x10 Matrix Cards กับ 7001Switch/Control Mainframe ดังรูปที่ 3.4 ก. และดังรูปที่ 3.4 ข ตัวควบคุมการสลับสวิทซ์จึงสำคัญมากสำหรับการวัดเพราะสามารถควบคุมการสลับสวิทซ์ด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 Model 7012-S 4x10 Matrix Cards

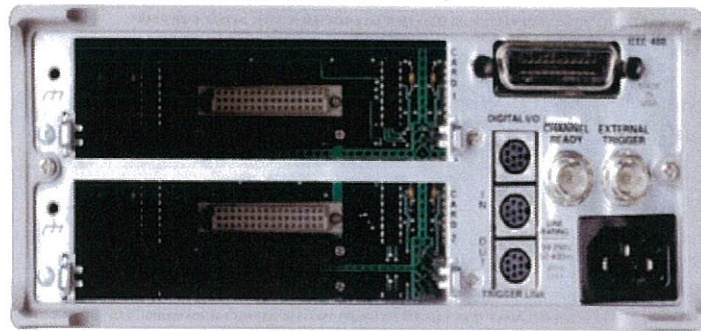


รูปที่ 3.3 วงจรที่อยู่ใน Model 7012-S 4x10 Matrix Cards



รูปที่ 3.4 ด้านหน้าของ 7001 Switch/Control Mainframe

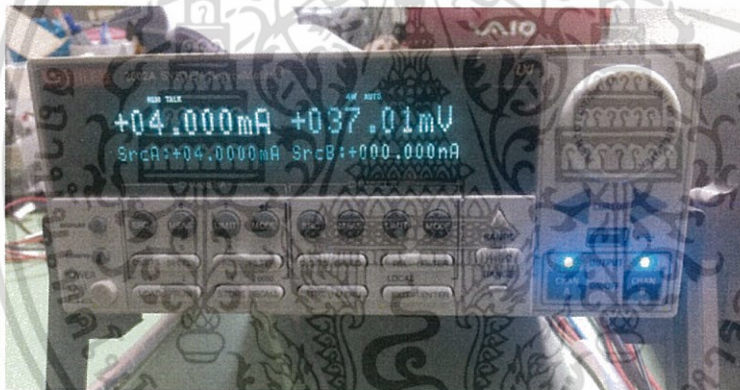
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ด้านหลังของ 7001 Switch/Control Mainframe

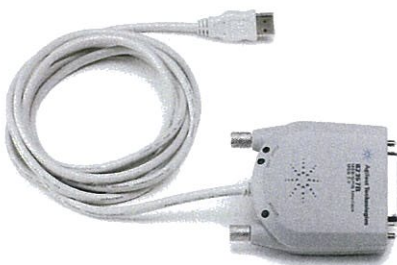
### 3.1.3 Source Meter

เนื่องจากการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ จะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องมี Source Meter เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้างดรูป 3.6



รูปที่ 3.6 Keithley 2602A Source Meter

Source Meter สามารถควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่าน GPIB/USB โดยการ Interface และเราจะใช้สาย 408JE ดังรูป 3.8 เพื่อควบคุมทั้งสองเครื่องพร้อมกัน โดยต่อแบบขนานระหว่างเครื่องทั้งสองเครื่อง เพื่อที่จะเพิ่มความเสถียรในการใช้เครื่องวัดมากขึ้น



(a)



(b)

รูปที่ 3.7 (a) สาย GPIB และ (b) สาย 408JE (ขาว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 แผ่วาง Sample

การวัดหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว และเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ จำเป็นต้องสร้างแผ่วาง Sample ด้วยโปรแกรม Altium designer เพื่อนำไปกัดแผ่นพีซีบี เพื่อที่จะวาง Sample และต่อขั้วของ Sample เข้ากับ Digital multimeter เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ Sample และ Current source เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ Sample และในการออกแบบแผ่ sample นั้นจะต้องคำนึงถึงการใช้งานในการวัดด้วยเนื่องจากการวัดนั้นจะต้องมีการกลับทิศทางของสนามแม่เหล็กเพื่อช่วยในการวัดแต่ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยากเราจึงต้องทำการกลับแผ่ sample แทนการกลับสนามแม่เหล็ก แต่เราจะต้องมี Connector ที่สามารถใช้งานได้ทั้งสองด้านเพื่อใช้ในการวัด

### 3.2 Software

โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการทำงานของระบบจากนั้นจึงนำส่วนประกอบเหล่านี้มาใช้งานร่วมกันโดยรายละเอียดในการสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ มีดังนี้

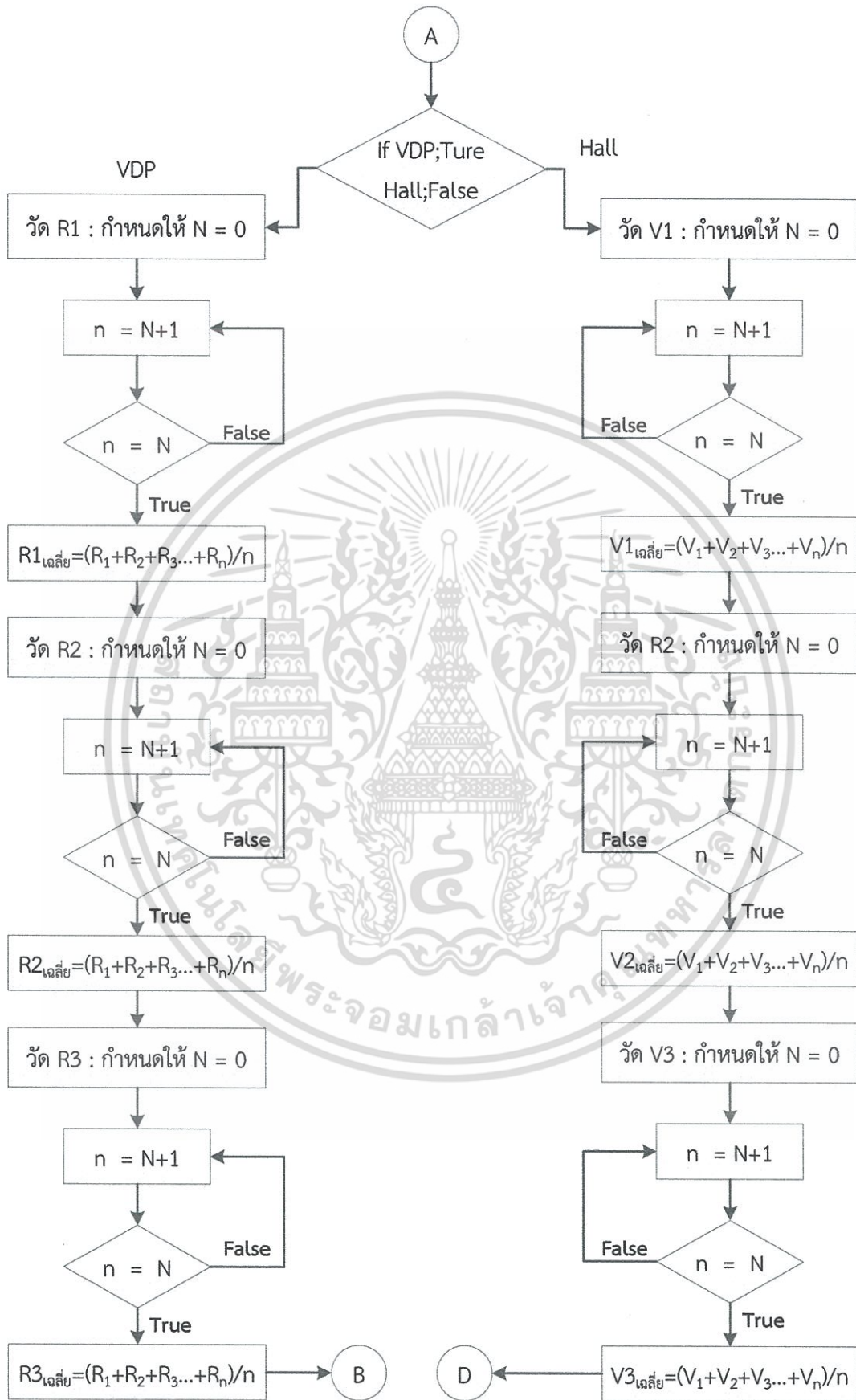
#### 3.2.1 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล

เนื่องจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้นมานี้มีความต้องการที่จะให้เป็นระบบอัตโนมัติ ดังนั้นเราจำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานและบันทึกผล โดยมีกระบวนการทำงานดังนี้



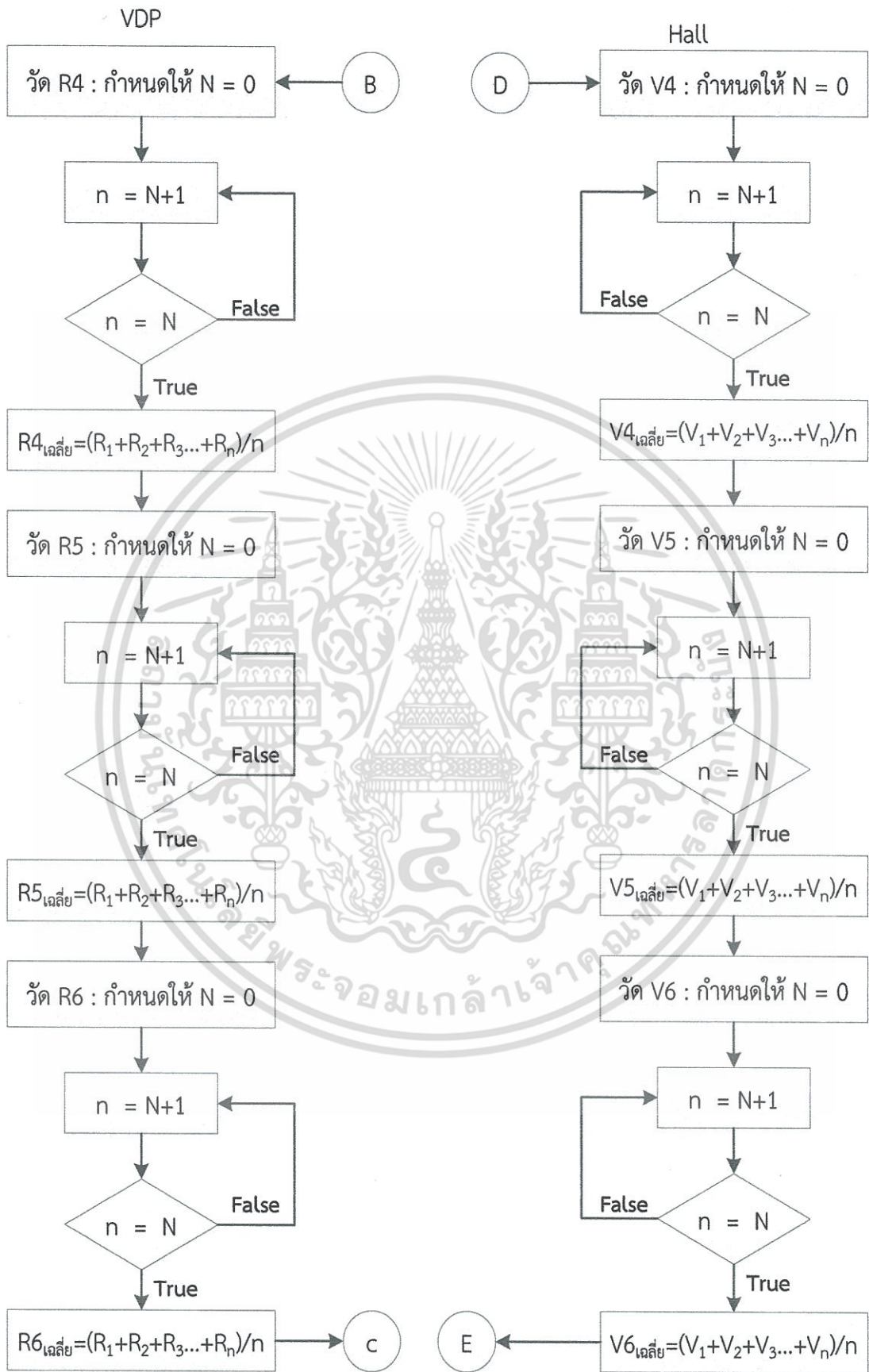
รูปที่ 3.8 ผังงาน(Flowchart)แสดงการรับค่าจากป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



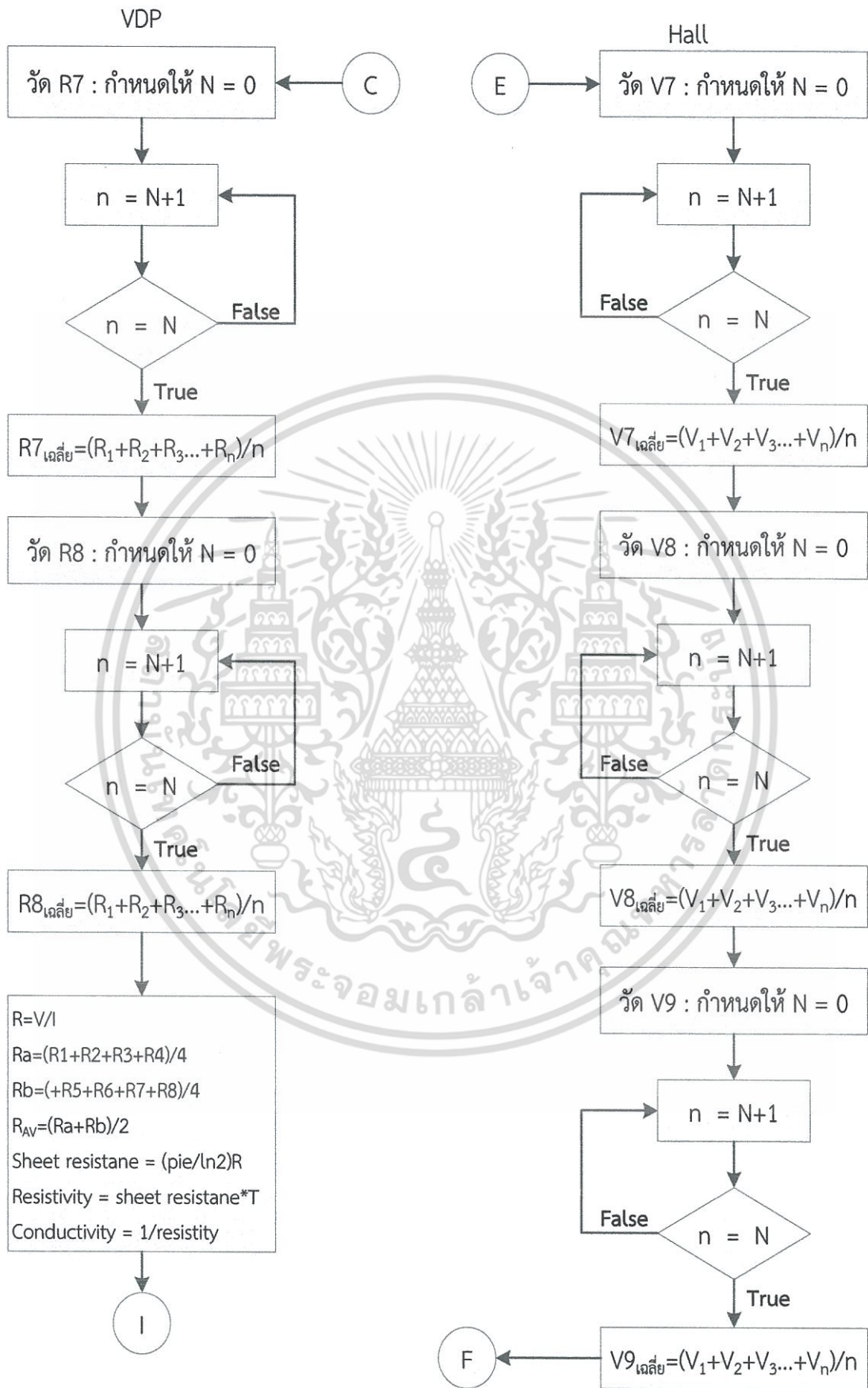
รูปที่ 3.9 ผังงาน(Flowchart)แสดงการรับค่าจากKeyboard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการขังเงินเพื่อการค้าขายเท่านั้น มิใช่อยู่ให้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



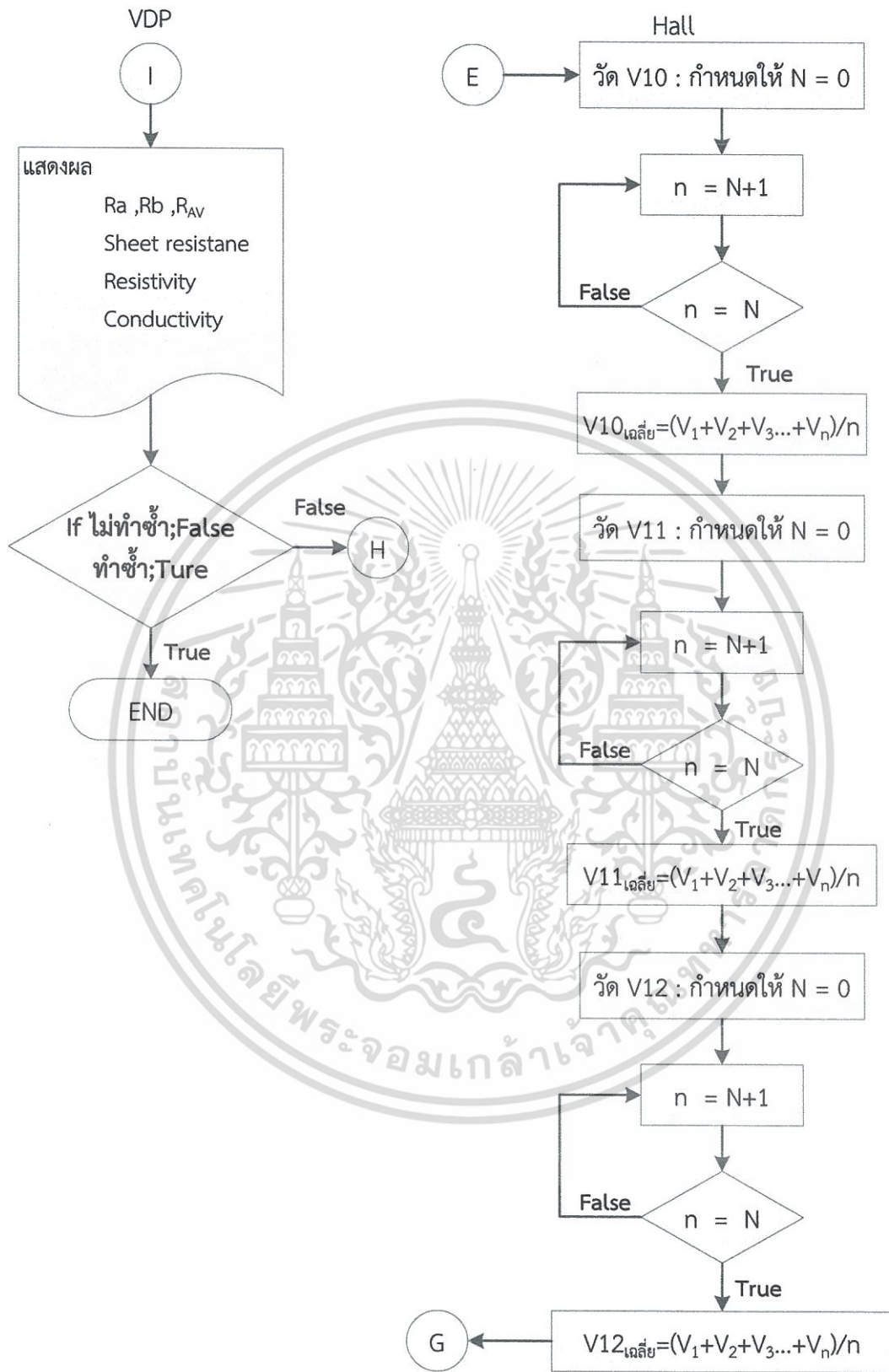
รูปที่ 3.10 ผังงาน(Flowchart)แสดงการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้หาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



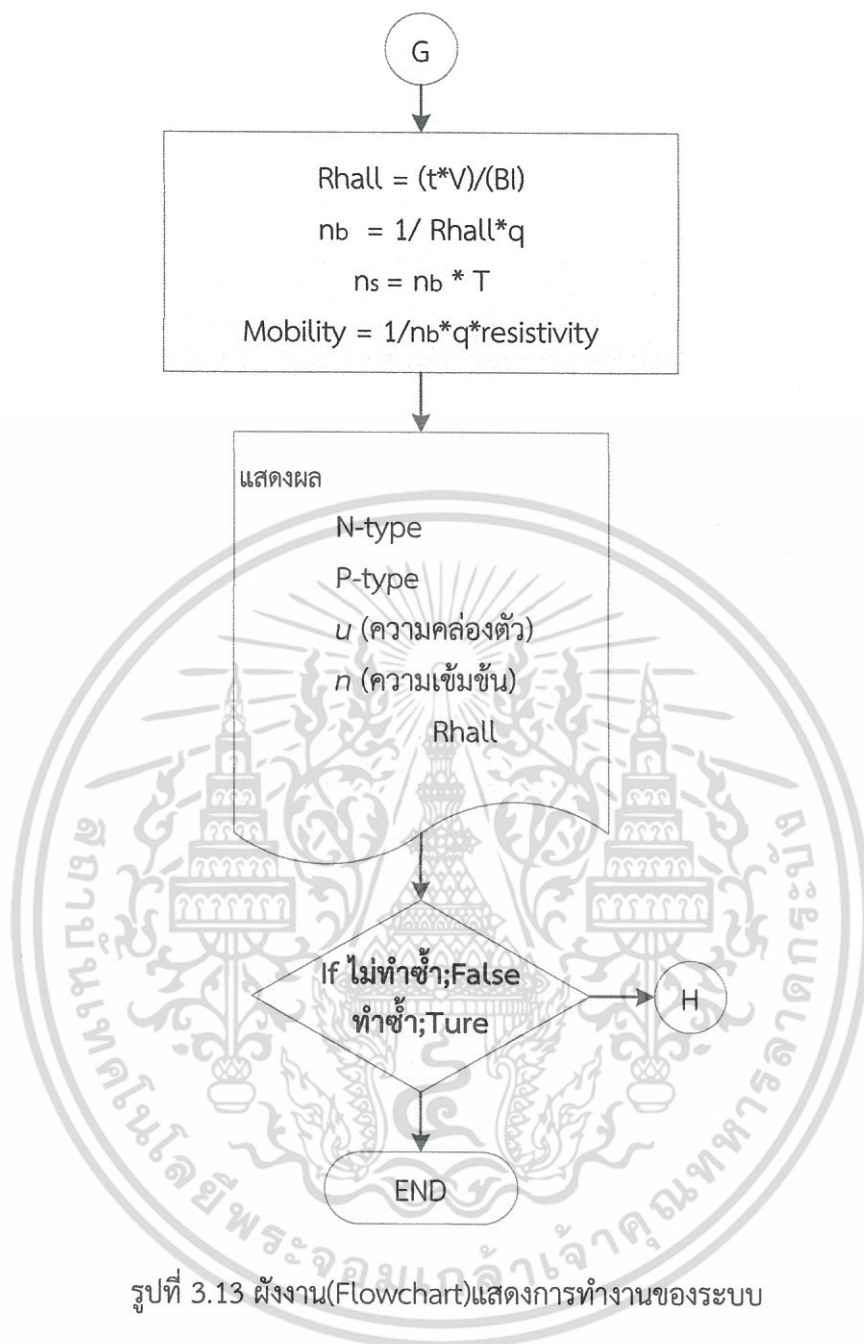
รูปที่ 3.11 ผังงาน(Flowchart)แสดงการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ผังงาน(Flowchart)แสดงการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

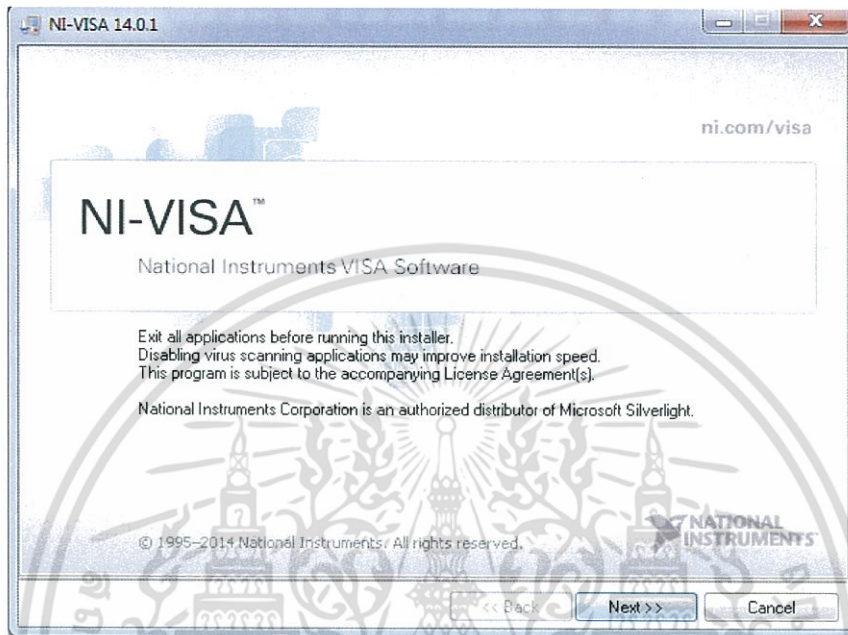


รูปที่ 3.13 ผังงาน(Flowchart)แสดงการทำงานของระบบ

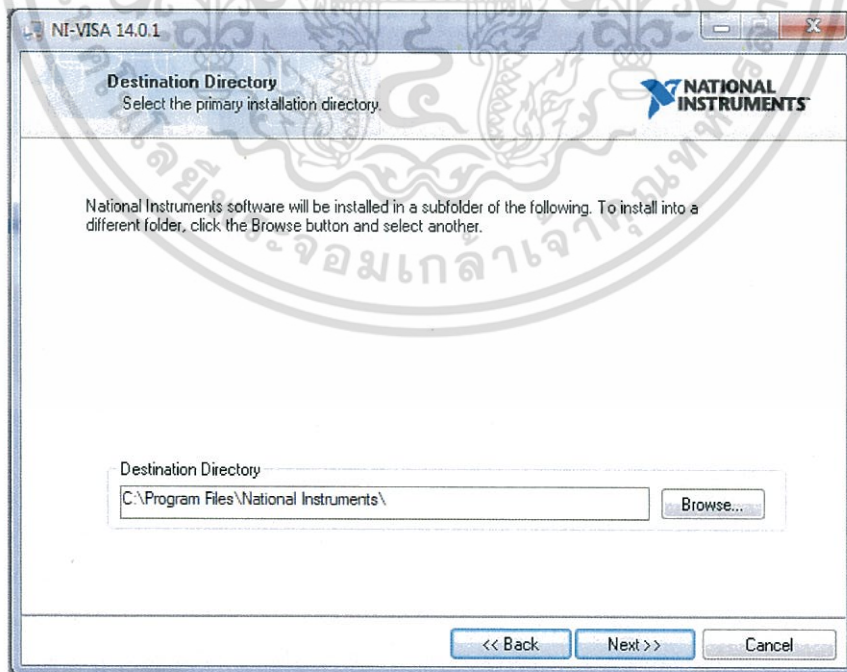
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการพิเศษนี้เรามีการใช้โปรแกรม LabVIEW สั่งการและควบคุมการทำงานของเครื่องมือ มีขั้นตอนดังนี้

### 1. ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW

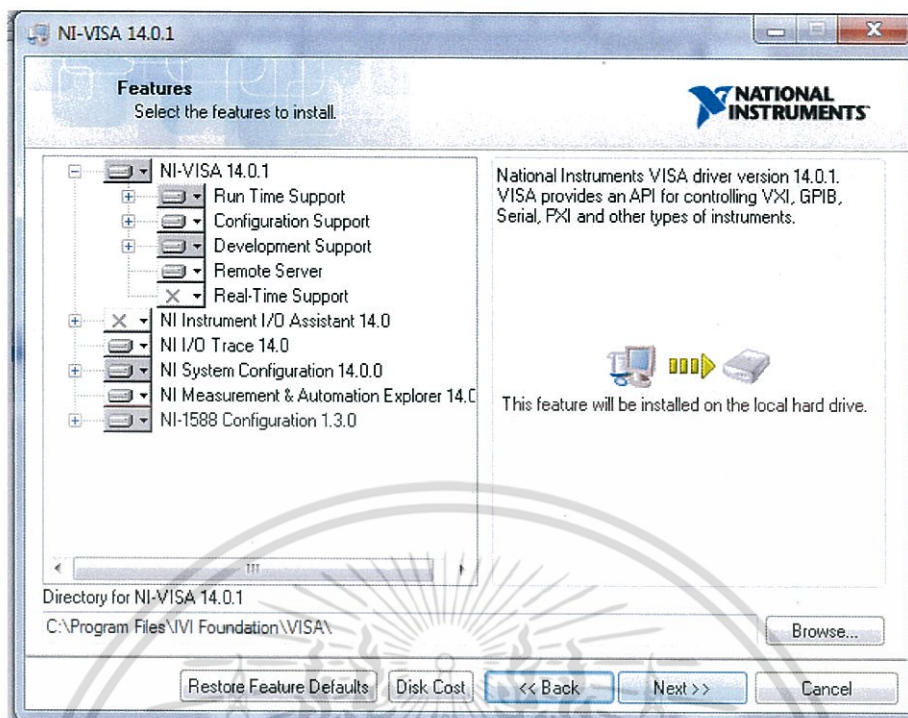


รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

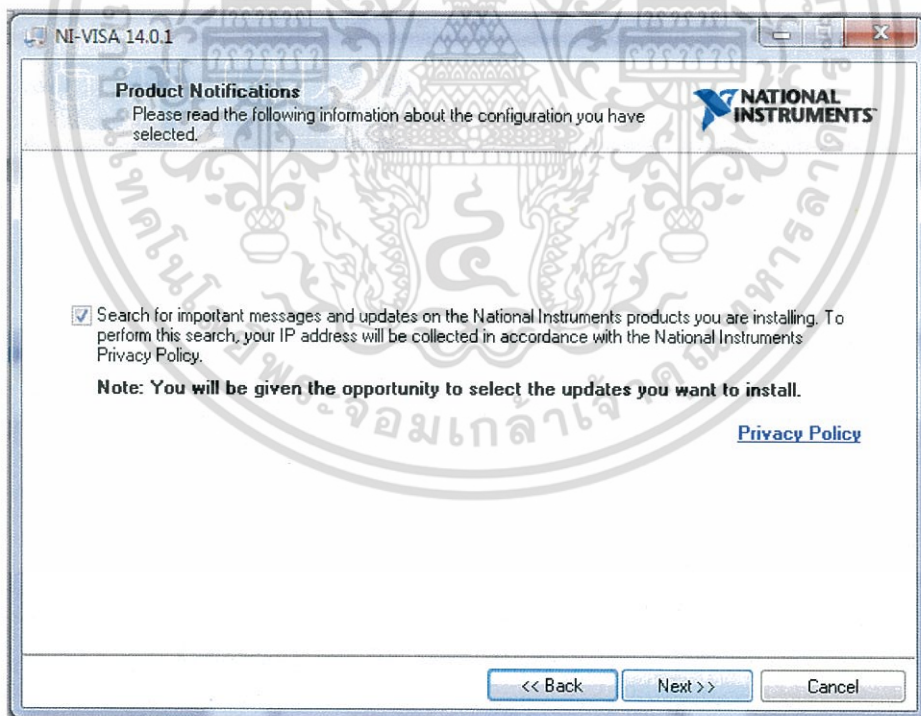


รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW เลือกตำแหน่งในการติดตั้งโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

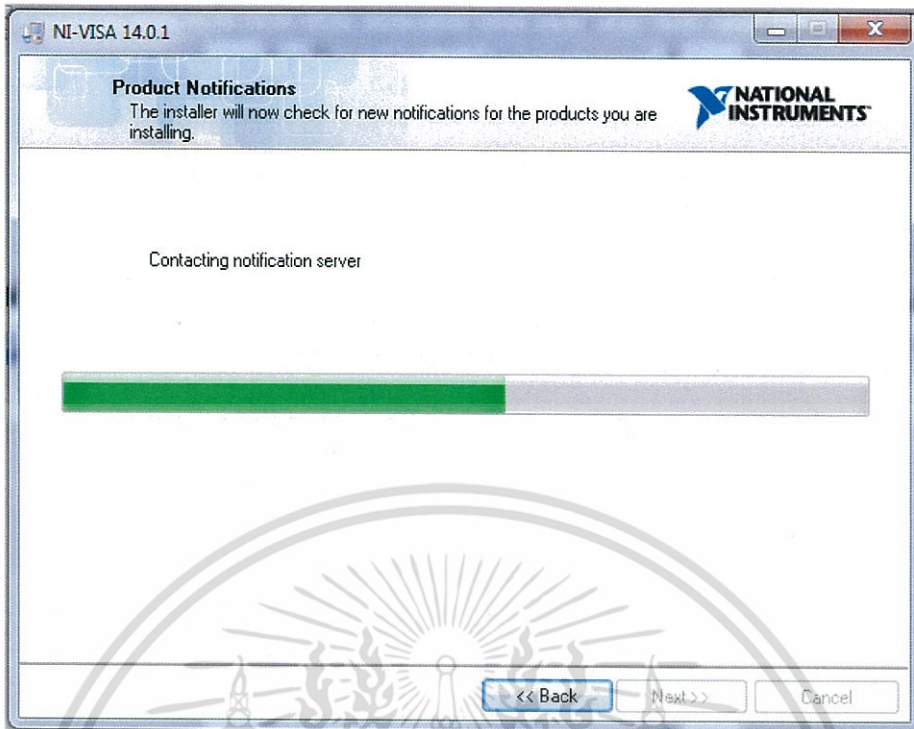


รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

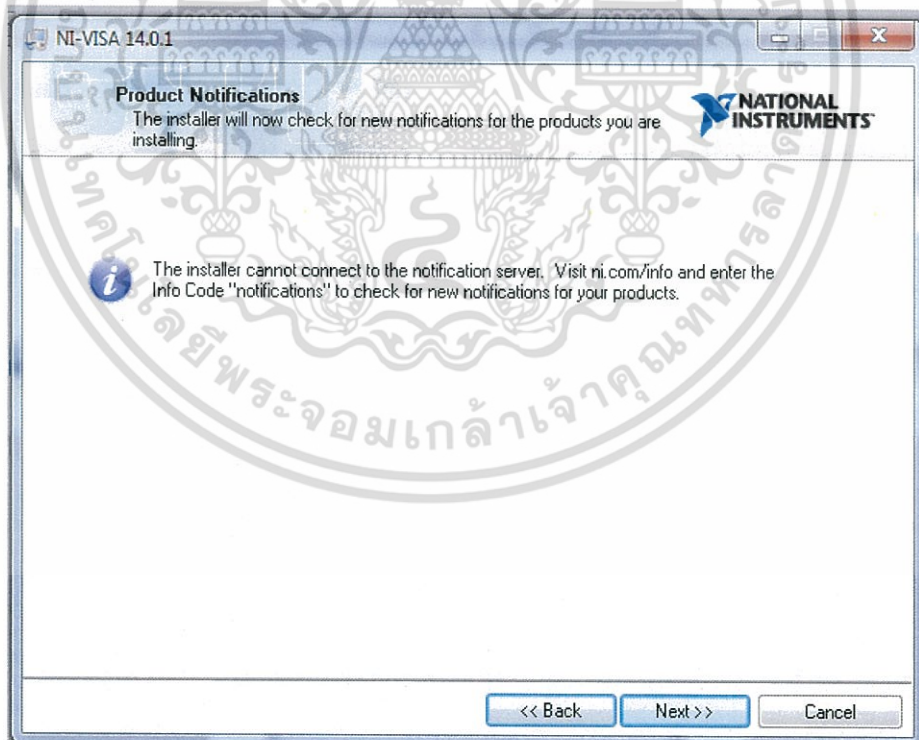


รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

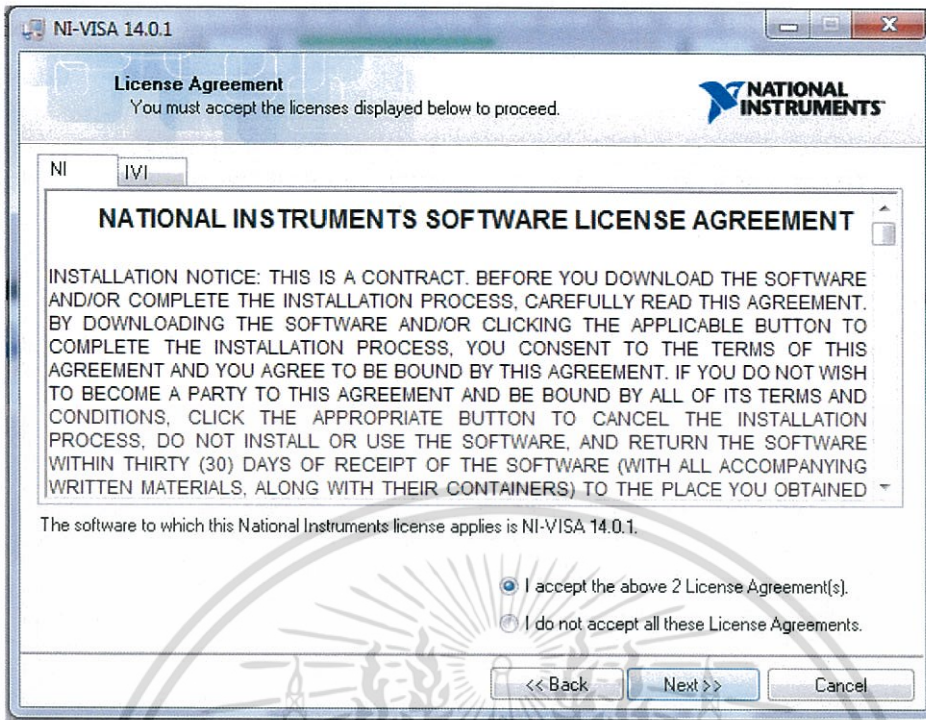


รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

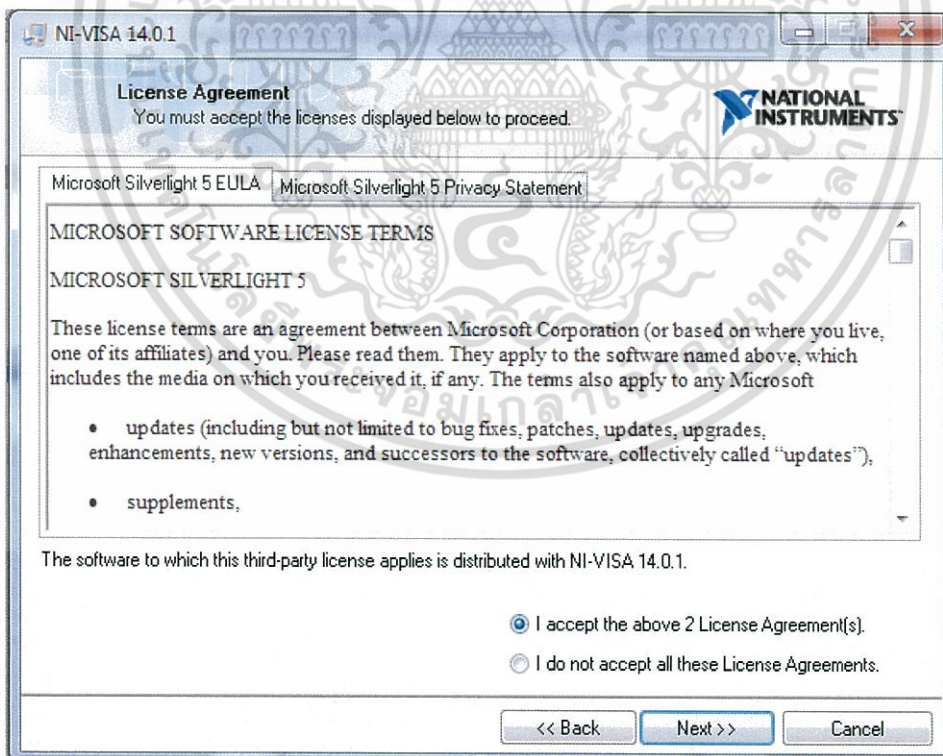


รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

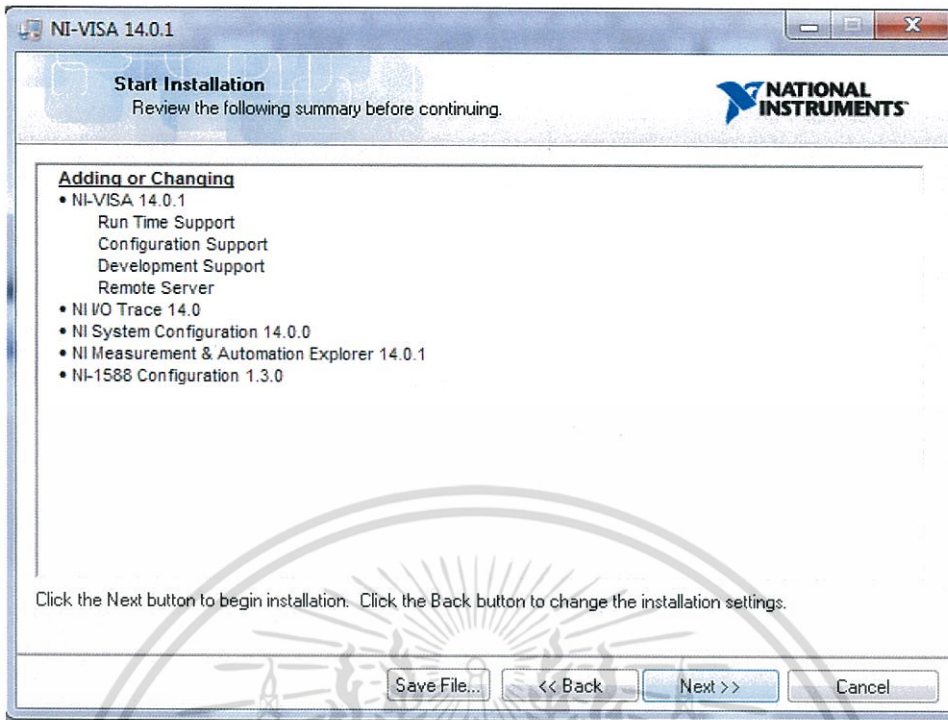


รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

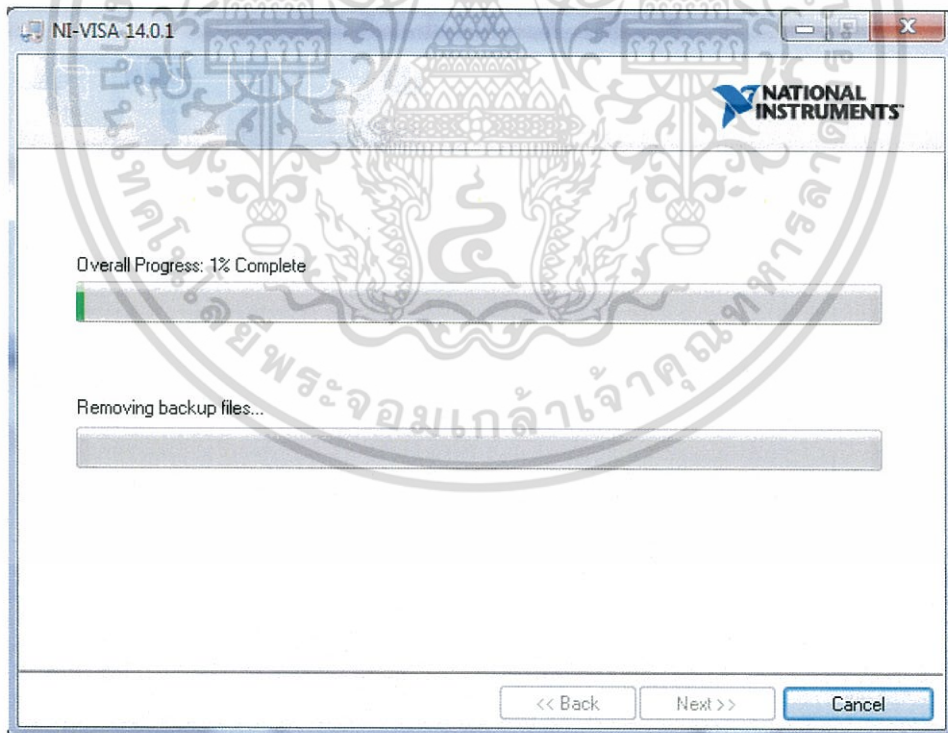


รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

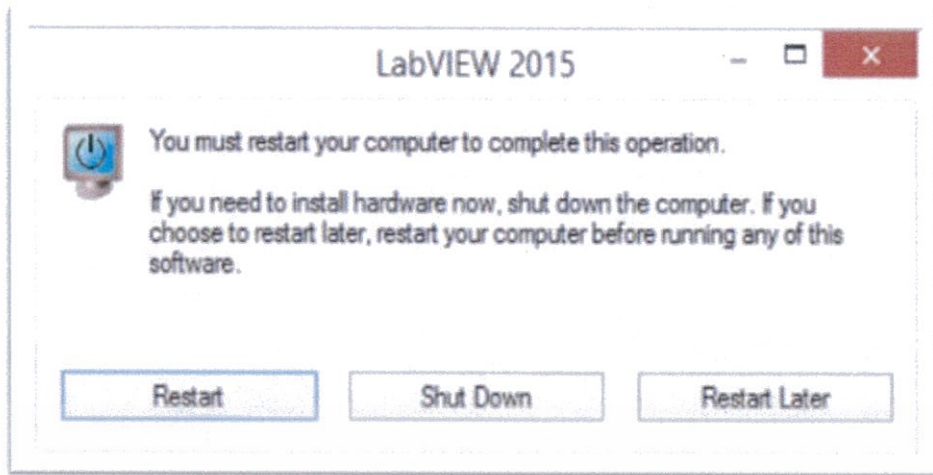


รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW

### 3.3 ขั้นตอนการทดลองวัด

#### 3.3.1 การวัดด้วยมือ

การวัดแบบแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยการต่อขั้วโดยตรง การสัมผัสด้วยมือ และคำนวณหาค่าต่างๆ ในการวัดด้วยมือนั้นเป็นการสอบเทียบเครื่องมือวัดเพื่อต้องการความแม่นยำ ความคลาดเคลื่อนในการวัด และเพื่อเทียบว่าผลการวัดของระบบที่เราพัฒนาขึ้นนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับการวัดด้วยมือหรือไม่ ความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่

#### 3.3.2 การวัดด้วยระบบอัตโนมัติ

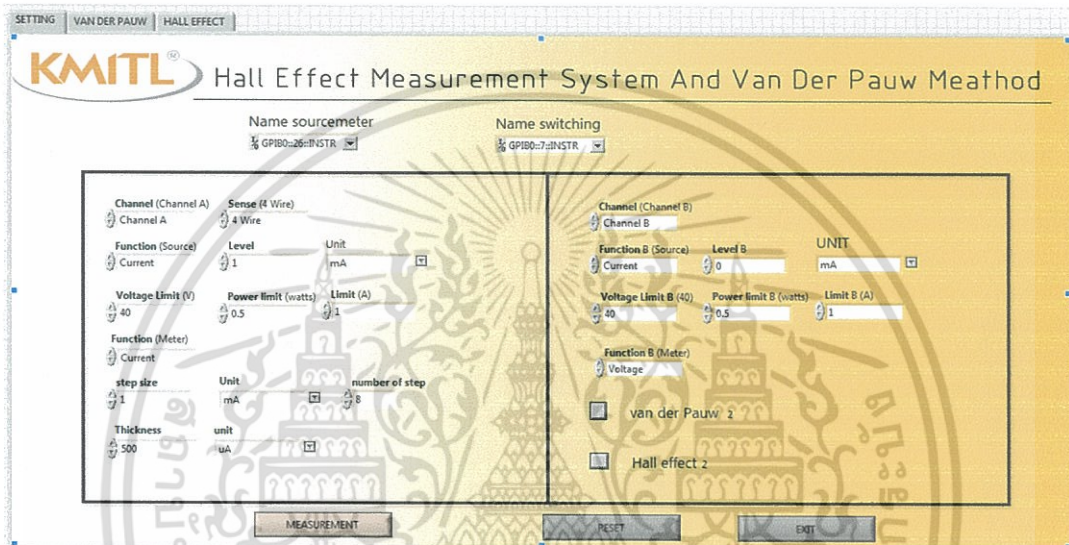
การวัดจากระบบที่เราพัฒนาขึ้นเพื่อให้ในการควบคุม โดยระบบอัตโนมัตินั้นจะทำการวัดเทียบกับค่าที่วัดได้จากการวัดมือ

## บทที่ 4

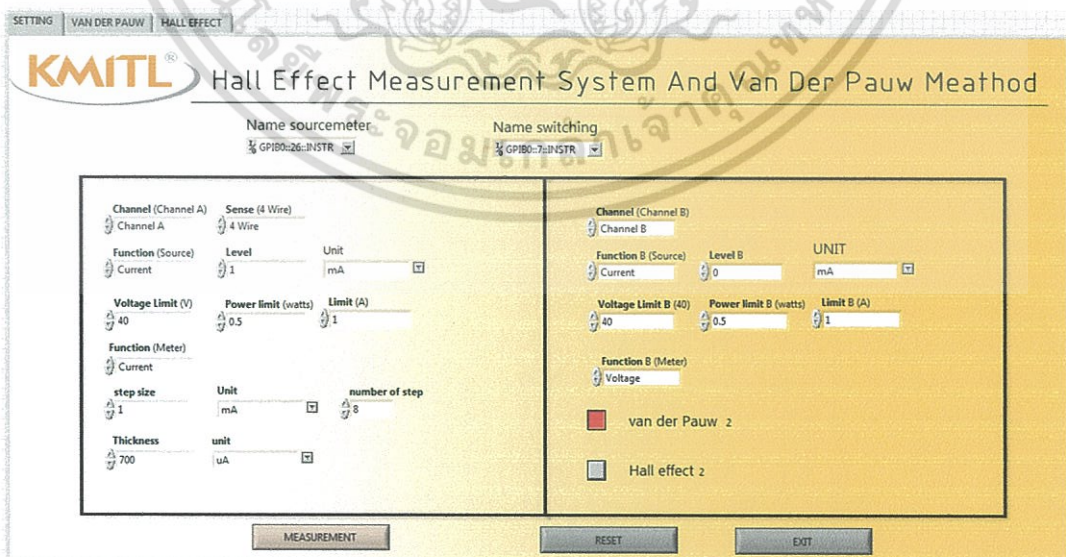
### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม

เนื่องจากการสร้างระบบการวัดนั้นจะต้องมีโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการสับขั้วไฟฟ้า ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยมีรูปแบบของโปรแกรมและกระบวนการทำงานดังนี้



รูปที่ 4.1 หน้าต่างSetting ใช้สำหรับเชื่อมต่อ Source meter และ switching, การเลือกรูปแบบการวัดและป้อนค่าต่างๆที่ใช้ในการวัด

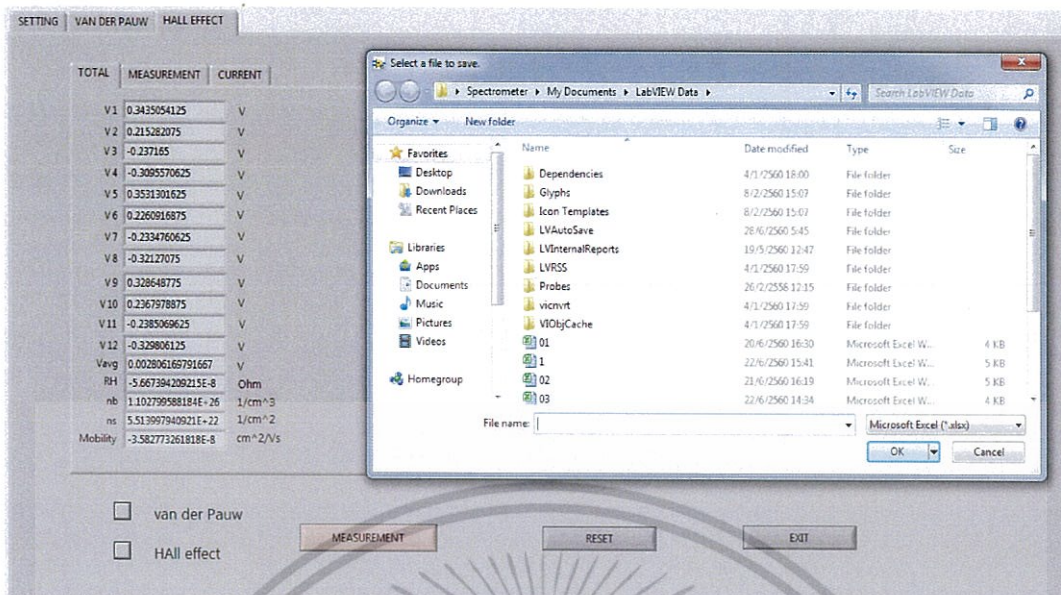


รูปที่ 4.2 หน้าต่างSetting เมื่อเราทำการเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว,เลือกรูปแบบในการวัดเป็นการวัดแบบ

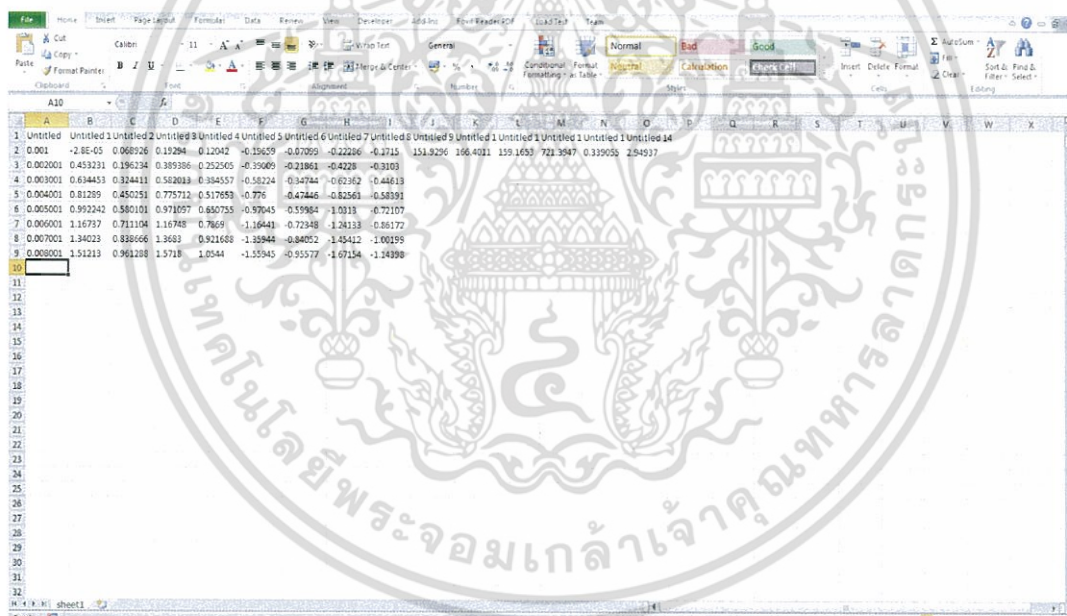
แวนเดอร์พาว,ป้อนค่าต่างๆครบถ้วน ต้องทำการกดปุ่ม Measurementแล้วกด Ctrl R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 หน้าต่างการบันทึกผลที่เราทำการวัดได้จากโปรแกรม

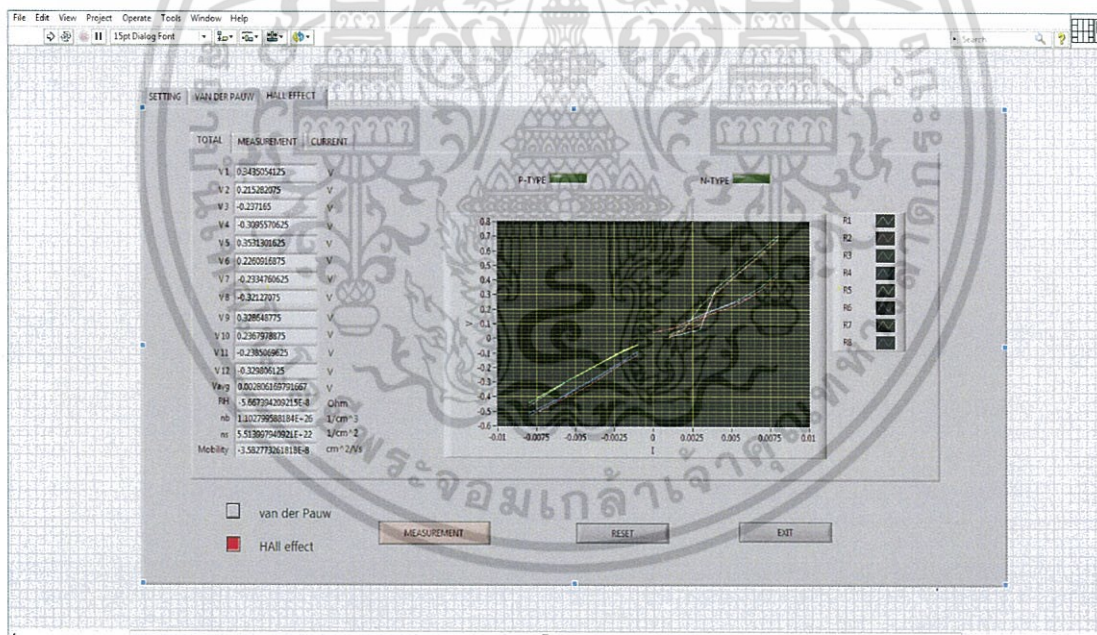


รูปที่ 4.6 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการบันทึกค่าจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

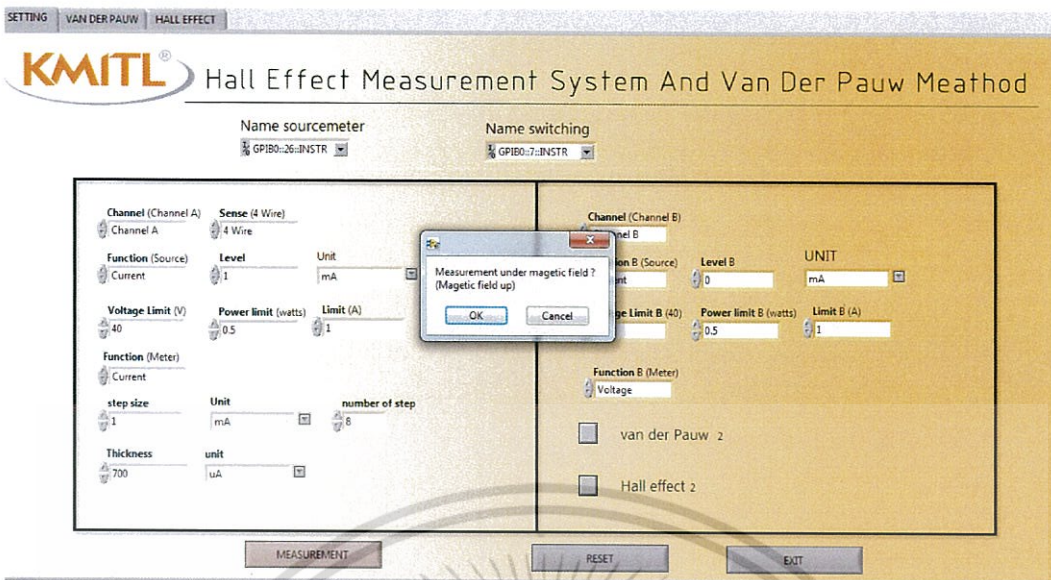


รูปที่ 4.7 โปรแกรมสามารถทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ได้โดยการกดเลือกรูปแบบของการวัดเป็นปรากฏการณ์ฮอลล์, กดปุ่ม Measurement และกด Ctrl R เพื่อ Run Program

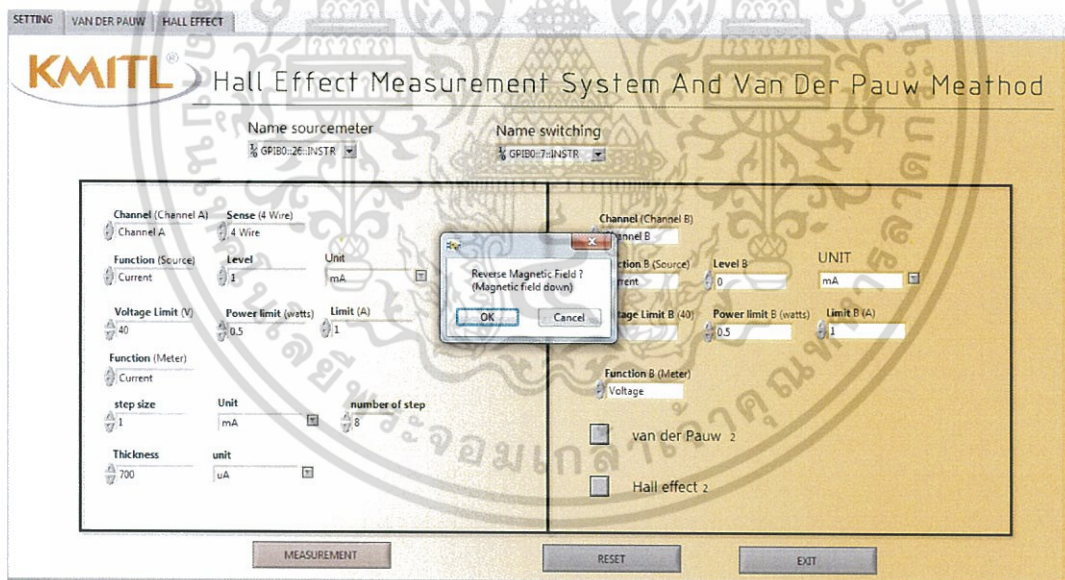


รูปที่ 4.8 หน้าต่างวัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ การวัดนอกสนามแม่เหล็ก, การวัดภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น, การวัดภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

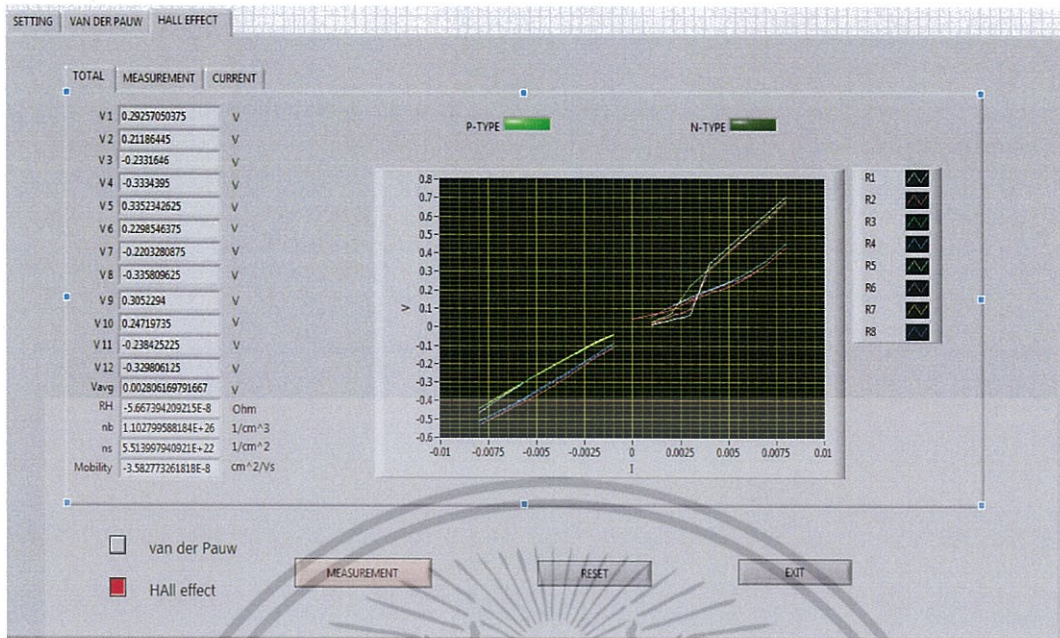


รูปที่ 4.9 เมื่อทำการวัดค่าปรากฏการณ์ฮอลล์นอกสนามแม่เหล็กแล้วจะมี pop-up ให้ทำการตรวจสอบว่าเราทำการใส่แผ่น sample ด้านไหนเพื่อที่โปรแกรมจะได้มีการปรับรูปแบบของการวัดให้มีความสอดคล้องกับแผ่น sample ที่นำมาวัด

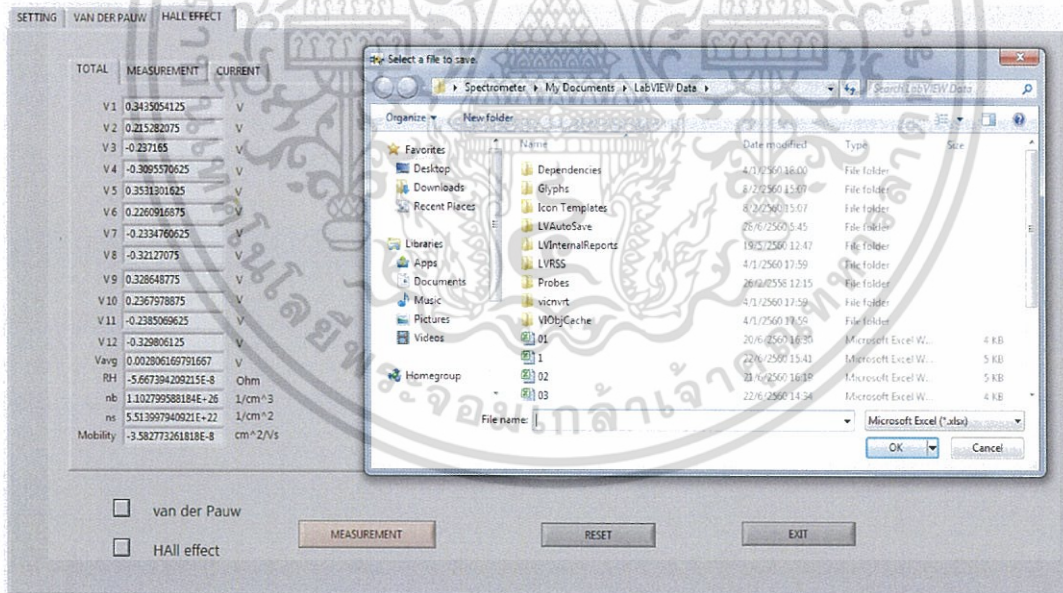


รูปที่ 4.10 หน้าต่างเมื่อทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้นเสร็จแล้วจะมี pop-up ให้เราทำการเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็ก(ในความจริงแล้วไม่สามารถกลับสนามมาเหล็กได้จึงทำการกลับด้านของแผ่น sample แทน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 หน้าต่างรวมเมื่อการวัดครบทั้ง 3 ช่วงก็จะมีกราฟแสดงค่าที่หาได้จากการคำนวณ และบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำนั้นที่เรานำมาวัดด้วยว่าเป็นชนิดใด



รูปที่ 4.12 หน้าต่างบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 หน้าต่างบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม

## 4.2 ผลการทดลอง

เนื่องจากเรามีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของแวนเดอร์พาว และปรากฏการณ์ฮอลล์ เราจึงทำการวัดค่าของแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และ ค่ามาตรฐานที่เราทราบจากจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่เราสร้างขึ้นว่า ระบบที่เราสร้างนั้นมีความเชื่อถือได้และมีค่าใกล้เคียงกัน ในการทดลองเราใช้ชิ้นงาน 2 ชิ้นได้แก่ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30\text{-}50 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ] และ sample 2 Sb-doped [0.01-0.05  $\Omega\cdot\text{cm}$ ] โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสองชิ้นที่ทราบค่าแล้ว

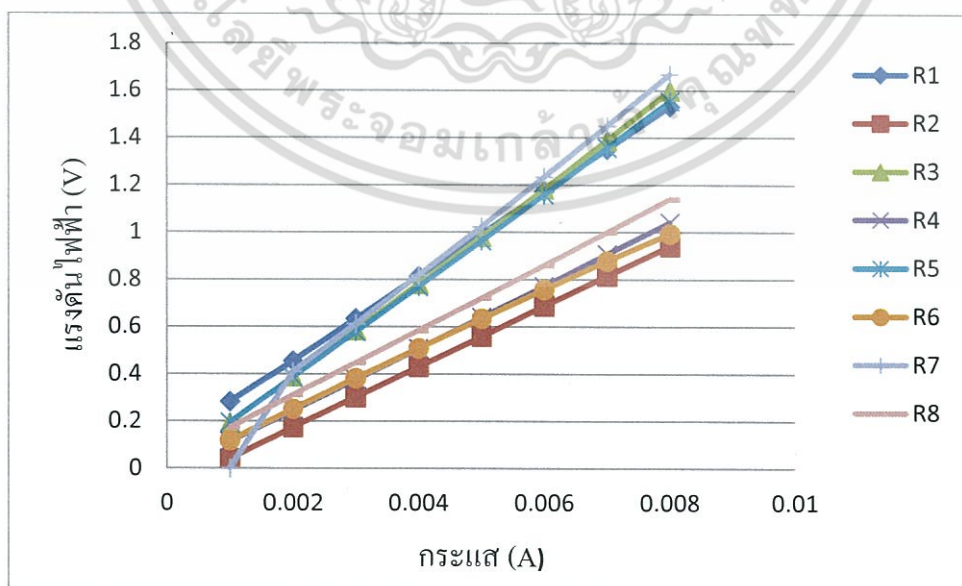
Si wafer	Doping	Type	Resistivity ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	Bulk carrier concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )
ชิ้นที่ 1	Boron(B)	P	30-50	700	$1.33\times 10^{14} - 1.35\times 10^{15}$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของsample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (A)	V1 (V)	2 (V)	V3 (V)	V4 (V)	V5 (V)	V6 (V)	V7 (V)	V8 (V)
0.001	2.82E-01	4.01E-02	1.91E-01	1.13E-01	1.95E-02	1.18E-01	0.4E-04	1.72E-01
0.002	4.54E-01	1.73E-01	3.89E-01	2.44E-01	3.87E-01	2.51E-01	4.10E-01	3.10E-01
0.003	6.34E-01	3.01E-01	5.84E-01	3.75E-01	5.78E-01	3.81E-01	6.13E-01	4.47E-01
0.004	8.15E-01	4.29E-01	7.81E-01	5.06E-01	6.39E-01	5.08E-01	8.17E-01	5.83E-01
0.005	9.94E-01	5.59E-01	9.80E-01	6.39E-01	9.64E-01	6.34E-01	1.02E-01	7.2E-01
0.006	1.17E-00	6.88E+01	1.18E-00	7.71E-01	1.16E-00	7.57E+01	1.24E-00	8.59E-01
0.007	1.35E-00	8.15E+01	1.39E-00	9.07E+01	1.35E+00	8.78E+01	1.45E-00	9.99E-01
0.008	1.53E-00	9.40E+01	1.60E+00	1.04E+00	1.55E+00	9.93E+01	1.67E+00	1.14E-00



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ sample1[B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ลักษณะไม่มีสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

Current (mA)	VH1 (I13/V24)	VH2 (I24/V13)	VH3 (I31/V24)	VH4 (I42/V31)
2	-2.64E-03	0.17E-01	-1.98E-02	-2.49E-01
3	1.93E-03	2.43E-01	-3.66E-02	-3.18E-01
4	6.63E-03	2.84E-01	-5.06E-02	-3.65E-01
5	1.19E-02	3.27E-01	-7.55E-02	-4.09E-01
6	1.67E-02	3.64E-01	-9.13E-02	-5.02E-01
7	3.22E-02	3.94E-01	-1.19E-01	-5.45E-01
8	3.89E-02	4.14E-01	-1.47E-01	-5.79E-01

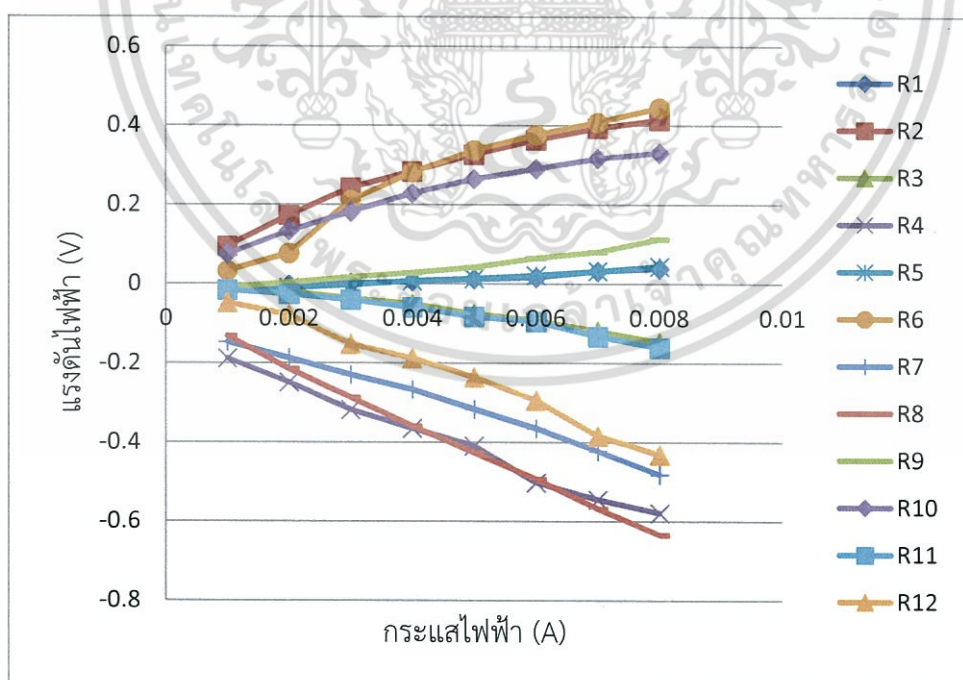
ตารางที่ 4.4 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

Current (mA)	VH1 (I13/V24)	VH2 (I24/V13)	VH3 (I31/V24)	VH4 (I42/V13)
2	-9.54E-03	7.69E-02	-1.87E-02	-2.15E-01
3	-2.68E-03	2.11E-01	-2.29E-01	-2.87E-01
4	7.75E-03	2.82E-01	-2.67E-01	-3.59E-01
5	1.37E-02	3.38E-01	-3.16E-01	-4.26E-01
6	2.19E-02	3.77E-01	-3.65E-01	-4.93E-01
7	3.27E-02	4.08E-01	-4.22E-0	-5.68E-01
8	4.43E-02	4.45E-01	-4.81E-01	-6.34E-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

Current (mA)	VH5 (I13/V24)	VH6 (I24/V13)	VH7 (I31/V24)	VH8 (I42/V13)
2	3.55E-03	1.34E-01	-2.56E-02	-7.86E-02
3	1.66E-02	1.82E-01	-3.97E-02	-1.52E-01
4	2.86E-01	2.29E-01	-5.88E-02	-1.88E-01
5	4.18E-02	2.65E-01	-8.25E-02	-2.36E-01
6	6.56E-01	2.91E-01	-9.47E-02	-2.94E-01
7	8.12E-02	3.17E-02	-1.32E-01	-3.84E-01
8	9.35E-02	3.31E-01	-1.61E-01	-4.31E-01

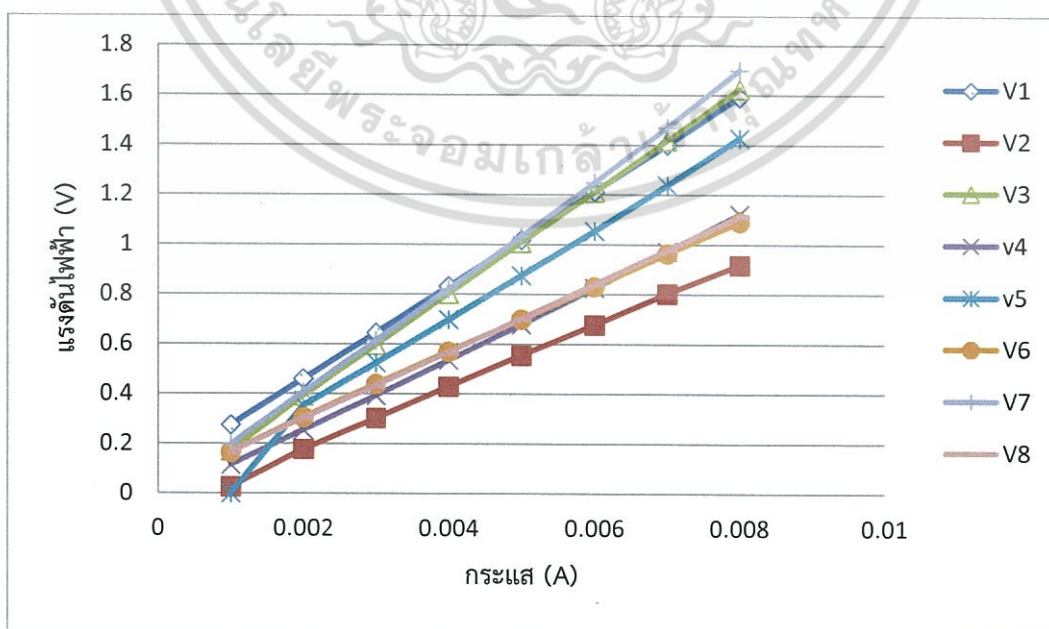


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ sample1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega.cm$ ] ด้วยวิธีวัด Auto

I (A)	v1 (V)	v2 (V)	v3 (V)	v4 (V)	V5 (V)	V6 (V)	V7 (V)	V8 (V)
0.001	2.75E-01	2.62E-02	1.71E-02	1.15E-01	1.14 E-02	1.65E-01	1.99E-02	1.65E-01
0.002	4.60E-01	7.78E-01	3.4 E-01	2.57E-01	3.54E-01	3.06E-01	4.08E-01	3.02E-01
0.003	6.46E-01	3.03E-01	5.97E-01	3.93E-01	5.25E-01	4.41E-01	6.16E-01	4.34E-01
0.004	8.33E-01	4.29E-01	8.03E-01	5.53E-01	6.99E-01	5.71E-01	8.21E-01	5.67E-01
0.005	1.02-00	5.55E-01	1.01E-00	6.78E-01	8.76E-01	6.99E-01	1.03E-00	7.03E-01
0.006	1.02 E-00	6.78E-01	1.21E-00	8.26E-01	1.06E-00	8.31E-01	1.24E-00	8.41E-01
0.007	1.40+00	8.04E-01	1.42E+00	9.72E-01	1.24E-00	9.63E-01	1.45E-00	9.79E+01
0.008	1.59E+00	9.2E-01	1.62E+00	1.12E+00	1.43E+00	1.09E-00	1.69E+00	1.11E+00



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นชอบที่จะนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ด้วยวิธีแบบ Auto  
 ตารางที่ 4.7 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ  
 sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ในลักษณะไม่มีสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธี  
 แบบ Auto

Current (mA)	VH1 (I13/V24)	VH2 (I24/V13)	VH3 (I31/V24)	VH4 (I42/V13)
2.00	-1.14E-02	1.58E-01	-2.97E-02	-1.91E-01
3.00	-6.25E-03	2.13E-01	-4.26E-02	-2.05E-01
4.00	3.73E-03	2.50E-01	-5.60E-02	-3.04E-01
5.00	1.16E-02	2.75E-01	-6.99E-02	-3.63E-01
6.00	2.25E-02	2.94E-01	-9.14E-02	-4.18E-01
7.00	3.28E-02	3.18E-01	-1.13E-01	-4.76E-01
8.00	4.98E-02	3.47E-01	-1.31E-01	-5.32E-01

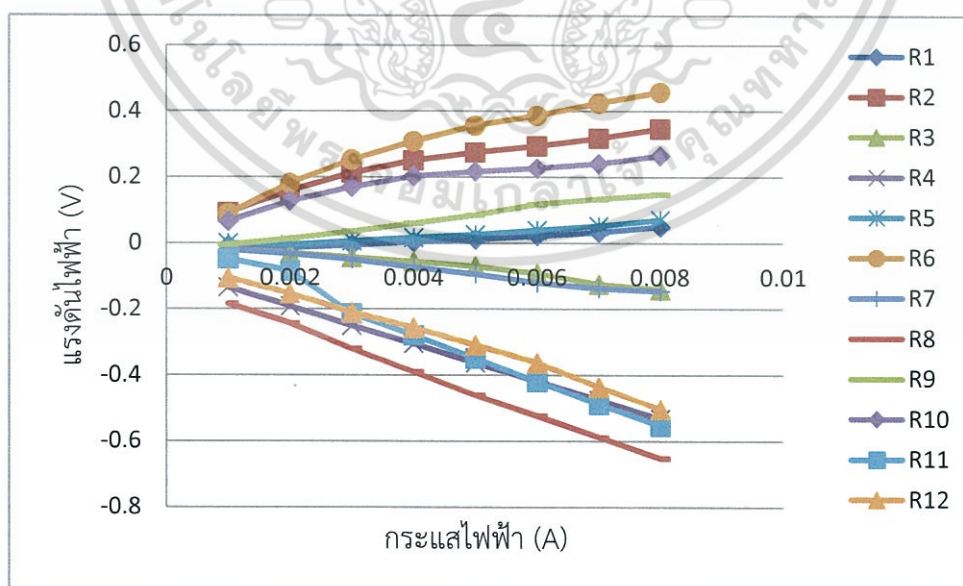
ตารางที่ 4.8 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ  
 sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น  
 ด้วยวิธีแบบ Auto

Current (mA)	VH1 (I13/V24)	VH2 (I24/V13)	VH3 (I31/V24)	VH4 (I42/V13)
2.00	-5.21E-03	1.81E-01	-3.23E-02	-2.43E-01
3.00	6.53E-03	2.53E-01	-4.86E-02	-3.19E-01
4.00	1.69E-02	3.09E-01	-7.30E-02	-3.89E-01
5.00	2.60E-02	3.57E-01	-9.33E-02	-4.6E-01
6.00	3.94E-02	3.86E-01	-1.19E-01	-5.23E-01
7.00	5.21E-02	4.24E-01	-1.37E-01	-5.88E-01
8.00	7.12E-02	4.58E-01	-1.45E-01	-6.52E-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งลง ด้วยวิธีแบบ Auto

Current (mA)	VH5 (I31/V24)	VH6 (I13/V24)	VH7 (I24/V13)	VH8 (I42/V13)
2.00	1.34E-02	1.27E-01	-8.39E-02	-1.52E-01
3.00	3.59E-02	1.69E-01	-2.13E-01	-2.09E-01
4.00	6.03E-02	2.03E-01	-2.79E-01	-2.56E-01
5.00	8.52E-02	2.16E-01	-3.48E-01	-3.09E-01
6.00	1.18E-01	2.27E-01	-4.19E-01	-3.62E-01
7.00	1.33E-02	2.41E-01	-4.88E-01	-4.35E-01
8.00	1.77E-01	2.64E-01	-5.53E-01	-5.03E-01



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ด้วยเครื่องมือระบบอัตโนมัติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าสมบัตินทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 1 [B-doped Si ,  $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$ ] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีแบบ Auto กับค่าที่ทราบ

	ค่าที่ทราบ	วิธีแบบ Manual	วิธีแบบ Auto
$R_a$		158.41 $\Omega$	159.26 $\Omega$
$R_b$		161.96 $\Omega$	162.62 $\Omega$
$R_{av}$		160.86 $\Omega$	160.94 $\Omega$
$V_H$		$2.81 \times 10^{-2} V$	$3.96 \times 10^{-2} V$
Sheet resistance		726.02 $\Omega$	729.427 $\Omega$
Resistivity	30-50	34.13 $\Omega \cdot \text{cm}$	34.28 $\Omega \cdot \text{cm}$
Sheet carrier concentration		$5.16 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$6.1287 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
Majority mobility	466.42	$248.37 \text{ cm}^2 / V \cdot s$	$209.16 \text{ cm}^2 / V \cdot s$
Bulk carrier concentration	$1.33 \times 10^{14} - 1.35 \times 10^{15}$	$7.3729 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$8.7552 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
Conductivity		$2.93 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$	$2.92 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$
Type	P	P	P

### 4.3 อภิปรายผล

จากการทดลองผลการทดลองที่ได้จากจากการวัดด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีแบบ Auto โดยการวัดชิ้นงานเราสามารถนำผลการคำนวณได้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ Sheet resistance :  $R_s$ , Resistivity :  $\rho$ , Sheet carrier concentration :  $n_s$ , Majority carrier mobility :  $\mu_m$ , Bulk electrical resistivity :  $N_B$  และ Conductivity :  $\sigma$  โดยการวัดทั้ง sample ค่าที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ ค่าจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service ค่า Resistivity และ ค่า Bulk carrier concentration ที่ได้ในช่วงที่กำหนดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ทำเพื่อพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ที่สามารถใช้ร่วมกับการวัดแบบแวนเดอร์พาวซึ่งควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้โปรแกรม LabVIEW .ในการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการวัด โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นมานั้นจะสามารถทำการสับขั้วไฟฟ้า กำหนดการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแส บันทึกราค่าแรงดันไฟฟ้า พร้อมด้วยหน้าต่างการทำงานติดต่อกับผู้ใช้งาน และ แสดงผลของการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้า ชนิด ความหนาแน่น และ สภาพคล่องของพาหะ โดยในการวัดค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถวัดได้จากการวัดแบบแวนเดอร์พาว เพื่อป้องกันการเกิดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้จากความต้านทานของรอยต่อของขั้วไฟฟ้า เป็นการทดลองเพื่อสร้างเครื่องมือวัดที่สามารถใช้งานได้จริง โดยมีขั้นตอนการทดลองระบบการวัดของระบบที่สร้างขึ้นมากับการวัดแบบ Manual เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าระบบที่สร้างขึ้นมีการสับขั้วได้ถูกต้องและนำค่าที่วัดได้นั้นมาเปรียบเทียบกับค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ด้วยชิ้นงาน Si wafer สองชิ้นที่มีค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองดังนี้

ค่า Sheet resistance ของ sample 1 จากการแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้  $726.02 \Omega$  ,  $729.427 \Omega$  และค่าที่นำเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Resistivity ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้  $34.13 \Omega \cdot \text{cm}$  ,  $34.28 \Omega \cdot \text{cm}$  และ  $30-50 \Omega \cdot \text{cm}$

ค่า Sheet carrier concentration ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้  $5.16 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  ,  $6.1287 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  และค่าที่นำเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Bulk carrier concentration

ค่า Majority mobility ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้  $248.37 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$  ,  $209.16 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$  และ  $466.42 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Bulk carrier concentration ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้  $7.37 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $8.76 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  และ  $1.33 \times 10^{14} - 1.35 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

ค่า Conductivity ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้  $2.93 \times 10^{-2} \text{ 1/}\Omega\text{.cm}$ ,  $2.92 \times 10^{-2} \text{ 1/}\Omega\text{.cm}$  และค่าที่นำเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ชนิดของสารกึ่งตัวนำของชิ้นงาน Si wafer sample 1 จากการแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ ชนิดพี , ชนิดพี และชนิดพี

จะเห็นได้จากการทดลองระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เราสร้างขึ้นสามารถวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services จึงสรุปได้ว่าเครื่องมือของเราสามารถใช้ในการทดลองได้จริง และมีผลการทดลองที่น่าเชื่อถือได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียม Sample ที่ใช้ในการทดลองผลทำการทดลองต้องมีความชำนาญในการเตรียมสาร ทำความสะอาดชิ้นงานตัวอย่างและต้องต่อขั้วไฟฟ้าให้ถูกต้องตามระเบียบของแวนเดอร์พาวถึงจะได้ค่าที่แม่นยำ ควรเลือกใช้แผ่นวาง Sample ที่มีเข็มสัมผัสกับ Sample ได้โดยตรง
2. ควรเลือกช่วงของการจ่ายกระแสให้เหมาะกับชิ้นงาน ตามข้อจำกัดของเครื่อง Current source และ Digital multimeter
3. เมื่อมีการกลับชิ้นงานควรมีการรอสักระยะเพื่อให้ประจุนั้นอยู่ในสภาพที่สมดุล จะทำให้ได้ค่าที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กิจบุญชัย ชีวพันธุ์ศรี. (2554) LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาาระบบการวัดและควบคุม. กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [2] นายพัฒนพงษ์ พรหมเกตุ 2555 “การพัฒนาาระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร.
- [3] นายกรณิศ นาคศิษฏ์คุณงาม, นายกิตติทัต บุญธรรมหนัก นางสาวปวีณา เมฆสุกใส 2557 “การปรับปรุงระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร.
- [4] นางจิรนนท์ เจริญพันธ์, นายภัทรพล ศอกจะบก 2558 “การปรับปรุงระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร.
- [5] รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา, ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี “เอกสารประกอบการเรียนวิชาออปโตอิเล็กทรอนิกส์.” สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร.
- [6] 2560. ความต้านทานไฟฟ้า. [Online].  
Available :<http://www.edu.nu.ac.th/wbi/355203/resistance1.htm>
- [7] 2560. การนำไฟฟ้า. [Online].  
Available :<https://www.slideshare.net/somporndb/conductivity-13933943>
- [8] 2560. hall effect. [Online].  
Available :[http://iris.elf.stuba.sk/JEEEC/data/pdf/2\\_113-06.pdf](http://iris.elf.stuba.sk/JEEEC/data/pdf/2_113-06.pdf)
- [9] 2560. สนามแม่เหล็ก. [Online].  
Available :<http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/98/magnetic1/index4.htm>
- [10] 2560. 7001 Switch/Control Mainframe. [Online].  
Available :<http://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/centre-for-bio-inspired-technology/7293200.PDF>
- [11] 2560. Keithley 7012-S 4x10 Matrix Cards. [Online]. Available :  
[http://groups.physics.umn.edu/zudovlab/manuals/measurement/7012\\_m.pdf](http://groups.physics.umn.edu/zudovlab/manuals/measurement/7012_m.pdf)
- [12] 2560. Keithley 2602A Source Meter. [Online].  
Available :<http://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/centre-for-bio-inspired-technology/7291001.PDF>
- [13] 2560. van der Pauw. [Online].  
Available : <http://electroiq.com/blog/2016/10/van-der-pauw-and-hall-voltage-measurements-with-a-parameter-analyzer/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[14] 2560. van der Pauw. [Online]. Available :

Available :[https://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_der\\_Pauw\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Pauw_method)

[15] 2560. Study of quantitative influence of sample defects on measurements of resistivity of thin films using van der Pauw method. [Online].

Available :<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111002867>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MEASUREMENT SYSTEM WITH HALL AND A FOUR POINT PROBES FOR CHARACTERIZATION OF SEMICONDUCTORS

Rudolf Kinder\* — Miroslav Mikolášek\* — Daniel Donoval\*  
Jaroslav Kováč\* — Marek Tlaczala\*\*

This article describes the design, construction and control program of an automatic measuring system (AMS), which was designed for sheet resistance and sheet Hall mobility measurements. The van der Pauw technique and 4-point probe method are used to measure sheet resistance and calculate the specific resistance. Furthermore, the software of the AMS contains graphical subroutines for conversion of resistivity to concentration and mobility. Hall effect and electronic transport measurements are invaluable for understanding and characterization of the physical properties of semiconductors such as Si, GaAs, ZnO, and nanocrystal diamond as well as other electronic and magnetic materials.

**Key words:** Hall system, van der Pauw, 4-point probe, Si, ZnO

## 1 INTRODUCTION

An important part in production of electronic components and integrated circuits is the diagnostics of basic material parameters. The van der Pauw method is one of the most utilized measurement methods for evaluation of the semiconductor material electrical properties, such as resistivity, carrier density, and mobility [1]. Method can be used to measure samples of arbitrary shape, although several basic sample conditions must be satisfied to obtain accurate measurements. Among them the most important are good homogeneity of the sample, constant thickness of the sample and in ideal case infinitive small point contacts placed at the edges of the samples [2]. Moreover, the quality of contact in terms of good ohmic behavior has to be assured. The van der Pauw method is a common method used for investigation of new prepared thin films to determine their quality. Characterizing the mobility of new materials is essential for semiconductor technology innovations, so making accurate Hall effect measurements will continue to be important [2].

Additional resistivity measurement method, the 4-point probe, is also widely used in the semiconductor industry to monitor the production process. Electrical measurements are done on test structures to provide information on the various process steps. For example, resistivity measurements of doped semiconductor structures provide information about the carrier concentration and mobility and are used as feedback for the doping diffusion process [3].

This paper describes an AMS with Hall and the 4-point-probe method. Optimum measurement conditions for determination of mobility  $\mu$  are established for different semiconductor layers and structures. Hall effect is invaluable to understand and characterize the physical properties of semiconductors including materials such as:

Si, Ge, GaAs, AlGaAs, ZnO, and others. Transport measurements of Hall effect and magnetoresistance are ideally suited for material research, product development, and quality control [2, 45].

## 2 THEORY

The designed automatic measuring system can be used to determine several material parameters: the Hall voltage ( $V_H$ ), carrier concentration ( $n$ ), Hall coefficient ( $R_H$ ) and the conductivity type ( $n$  or  $p$ ) are all derived from the Hall voltage measurement. To be able to evaluate carrier mobility ( $\mu$ ) it is necessary to measure also the resistivity of the sample ( $\rho$ ). Due to the required contact node arrangement shown in Fig. 1, the van der Pauw method is the most frequently used method in the Hall measurement systems to evaluate the sample resistivity.

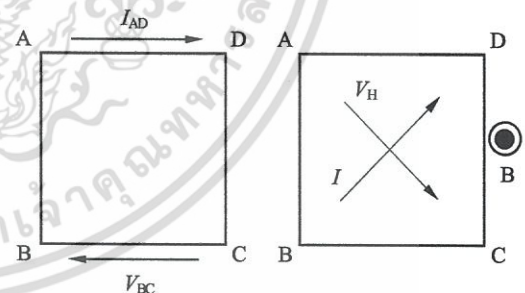


Fig. 1. Contact node arrangement for the van der Pauw and Hall measurement

For Hall measurements a contact configuration gives current and voltage perpendicular to each other. Resistivity measurement configurations  $R_{(A,C/B,D)}$  or  $R_{(B,D/A,C)}$  are possible and can be selected for the measurement. For ideal square symmetry samples the measured voltage at zero magnetic field should be 0 independently of the used current [1–4].

\* Slovak Technical University, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Institute of Electronics and Photonics, SK-812 19 Bratislava, rudolf.kinder@stuba.sk; \*\* Institute of Microsystems Technology, Wrocław University of Technology, Faculty of Electronics, Janiszewskiego 11/17, 50 372 Wrocław, Poland

For Hall effect measurements, a voltage is applied between the contacts placed at diagonally opposite corners and the current  $I$  flowing between them is measured. In addition, a magnetic field  $B$  is applied in the direction perpendicular to the sample and the change in Hall voltage  $V_H$  between the contacts in opposite corners is measured. Resistivity  $\rho$ , carrier density  $n$ , and mobility  $\mu$  are calculated from the measured values, applied magnetic field  $B$  and the film thickness  $d$  of the measured sample [2].

According to [1, 4] the van der Pauw method consists of two measurements of resistivity,  $R_A$  and  $R_B$

$$\begin{aligned} R_A &= (R_{DA,CB} + R_{AD,BC} + R_{BC,AD} + R_{CB,DA})/4, \\ R_B &= (R_{CB,BA} + R_{DC,AB} + R_{AB,DC} + R_{BA,CD})/4. \end{aligned} \quad (1)$$

From these two measurements and the knowledge of the sample thickness under test  $d$ , the conductivity of arbitrary shaped samples can be determined by the solution of the following equation

$$q(-\pi R_A/R_S) + q(-\pi R_B/R_S) = 1. \quad (2)$$

To simplify the solution, it is appropriate to measure square shaped samples, where  $R_A \approx R_B$ . In this case the solution of Eq. (2) can be written as [2]

$$\rho = R_S d = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_{AB,CD} + R_{BC,DA})}{2} f \quad (3)$$

where

$$R_{AB,CD} = \frac{V_{CD}}{I_{AB}}, \quad R_{BC,DA} = \frac{V_{DA}}{I_{BC}} \quad (4)$$

and  $f$  represents the correction factor, which is function of sample symmetry. Within AMS system, Equation (2) is solved numerically using PC software, so correction factor  $f$  has only an informative value. From the Hall voltage measurements it is possible to determine Hall coefficient using equation

$$R_H = \frac{V_H d}{IB} \quad (5)$$

and consequently carrier concentration can be determined

$$n = \frac{1}{R_H q} \quad (6)$$

where  $q$  is the elementary charge. Finally, Hall coefficient and resistivity are used to determine hall mobility

$$\mu = \frac{R_H}{\rho}. \quad (7)$$

To provide a good accuracy of obtained parameters it is necessary to ensure some basic conditions during the measurement. The most crucial one is to have good ohmic contacts. The van der Pauw theory requires infinitive small contacts in the corner of the sample [1]. Very important is also to ensure negligible heating of the

sample during the measurements, sensitive current measurement, and good symmetry and homogeneity of the sample.

The 4-point probe technique is one of the most common experimental methods for measuring resistivity. This configuration consists of four independent electrical terminals where two terminals are used to apply current to the sample, and the other two terminals measure the resulting potential drop across the defined portion of the sample [3, 5]. In the technique of linear 4-point probes all measurement tips are placed along a straight line and separated by a constant distance. The resistivity  $\rho$  of a homogeneously doped semiconductor can be then calculated as

$$\rho = R_s d = 4.53 \frac{V}{I} dk, \quad (8)$$

where  $d$  is the semiconductor sample thickness,  $I$  is the current flowing through the outer tips of the probe,  $V$  is the voltage drop measured on the inner tips,  $k$  is the correction factor. The accuracy of calculating the parameters by the linear 4-point probe is described elsewhere [5].

The concentration values  $n$  can be obtained from the measured values  $\rho$  using the conversion graphs, so-called Irvin curves for n- and p-type. Irvin curves express the mutual dependence between resistivity  $\rho$ , mobility  $\mu$  and concentration  $n$  according to the formula

$$n(x) = \frac{1}{\rho(x)\mu(x)q}. \quad (9)$$

For automatic calculation of  $\rho$  or  $n$ , the value of  $\mu$  is used given by empirical formula

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{\left(1 + \frac{n}{n_{\text{ref}}}\right)^\alpha}. \quad (10)$$

Here  $\mu_{\min}$  and  $\mu_{\max}$  are the values of minimal and maximal mobility;  $n_{\text{ref}}$  is the reference concentration and  $\alpha$  is an exponential factor [5].

### 3 DESIGN OF EQUIPMENT AND MEASUREMENT ROUTINE

The measurements and calculations were carried out on automatic measuring system (AMS) designed at the DSLab. s.r.o. in collaboration with Institute of Electronics and Photonics, STU in Bratislava. The AMS provides measurements of sheet resistivity  $R_S$  and Hall voltage  $V_H$ , to evaluate specific resistivity  $\rho$ , carrier concentration  $n$ , Hall mobility  $\mu$  and type of semiconductor (n-type or p-type). Two different ways were used to measure resistivity: (i) Van der Pauw set-up being the part of the Hall measurement covering the sheet resistance in the range from 0.1 to  $10^{10} \Omega/\text{cm}^2$  and (ii) linear 4-point probe providing measurements in the range of specific resistivity from  $10^{-3}$  to  $20 \Omega\text{cm}$ . A part of measuring system is the sample board allowing measurements at

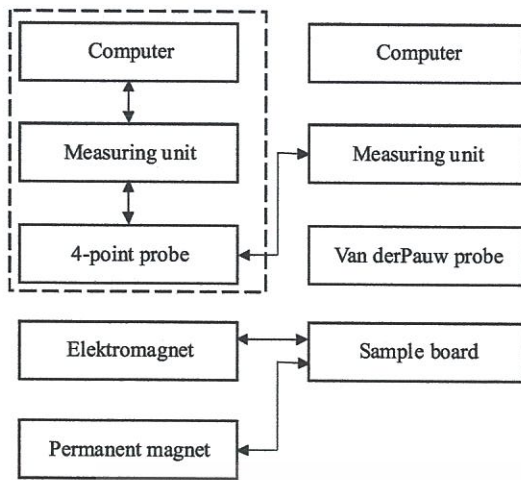


Fig. 2. The complete automatic measuring system

room and liquid nitrogen temperature utilizing permanent magnet (0.55 T) [6] or electromagnet (0.15 T). The sample is electrically contacted through Ecopia corporation sample holder [6]. The block diagram of complete measuring system is shown in Fig. 2.

The conversion of  $\rho$  to  $n$  for p- or n-type Si according to Eqs. (9) and (10) can be performed by a conversion code. For determining  $R_s$ ,  $\rho$  and  $n$  it is needed to know following parameters: type of semiconductor, thickness of sample or layer, correction factor value, given current (max. 100 mA) and number of measurements. Then from selected number of measurements the average values of  $R_s$ ,  $\rho$  and  $n$  are calculated (Eqs. (8), (9), (10)) [5].

The value of sheet resistance required for evaluation of Hall mobility and concentration is measured using van der Pauw configuration. Various aspects are important to obtain a good sensitivity and accuracy using this method. The most critical role in the measurements play the contacts created on the samples [7]. The quality of ohmic contacts in the van der Pauw configuration is controlled via the measurements of I-V linearity between neighboring contacts, where four leads labeled as A, B, C, and D (Fig. 1) are connected to the four contacts on the edges of the sample. The technology of ohmic contacts formation differs for various semiconductor samples and is described elsewhere [7].

The sample of good homogeneity and symmetry is required for accurate resistivity measurements. These two sample quantities are inspected through the resistivity measurement,  $R_A$  and  $R_B$ , carried on two sides of the square sample.  $R_A$  divided by  $R_B$  then gives the information on sample symmetry and should have the value in the range of 0.9–1.

Another aspect influencing the measurement accuracy, power dissipation during the measurements is automatically controlled by software as well. Power dissipation in designed measurement system is controlled and a warning signal is generated when a prescribed value (in mW) is overcome.

The Hall system together with the van der Pauw resistivity configuration was primary designed for high resistance sample measurements. For this kind of measurements, the voltage source was used to feed the sample, so the current through sample is limited only by semiconductor resistivity. The current measurements are provided with currents ranging from 100 pA to 10 mA with the highest sensitivity of 0.02 pA.

For Hall measurements a contact configuration perpendicular to each other is expected for current flow and voltage measurement. For ideal samples the measured voltage at zero magnetic field should be zero independently of the used current. In a real sample, due to non-perpendicular contact misalignment, the voltage offset is measured also at zero magnetic field, which present a serious problem for measurements of low Hall voltage. In some cases, if this misalignment voltage is much higher than the Hall voltage, this voltage can cause a big systematic error. To overcome this problem, Hall system contains a hardware compensation of misalignment voltage and gives much better results on asymmetric samples as Hall systems without it. The compensation mode can be switched on by software. The range of Hall voltage measurements goes from 5 mV to 10 V with the highest sensitivity 0.05  $\mu$ V provided at the lowest voltage range.

The measuring system is fully automated. The menu driven software of AMS insures communication with the measuring equipment, commands its single parts, measurement of the required parameters and communication with the operating personnel. The operating personnel by means of the driven software enters the data needed for the measurement process and at the same time the results of measurement form a listing on the display or a file. As development tools, the operating systems MS Windows and Borland C Builder 6 were used. The control graphical interface of AMS for Hall, 4-point probe and van der Pauw measurements is shown in Fig. 3.

As can be seen on the left hand side of the front panel shown in Fig. 3, main parameters to be set before measurements are sample thickness, initial voltage, and number of measured points of I-V curves for contacts linearity control. For resistivity and Hall measurements, it is necessary to set the value of initial approximate current used during the sample check and number of Hall voltage averaging together with Hall voltage measurement range. In this part of the panel, it is also possible to set optional linear 4-point probe measurements or Hall measurements with included van der Pauw resistivity measurements. The middle part of the control graphical interface gives to user basic information about voltages and current at particular nodes of the sample and information about compensation voltage at zero magnetic field and measured Hall voltage. Measured values of Hall voltage, resistivity and parameters determined from these values are set in the right part of the control graphical interface.

The 4-point probe measurement of resistivity is controlled by separate computer. The control software allows setting the optional linear or square 4-point probe arrangement, conductivity type of the semiconductor, film

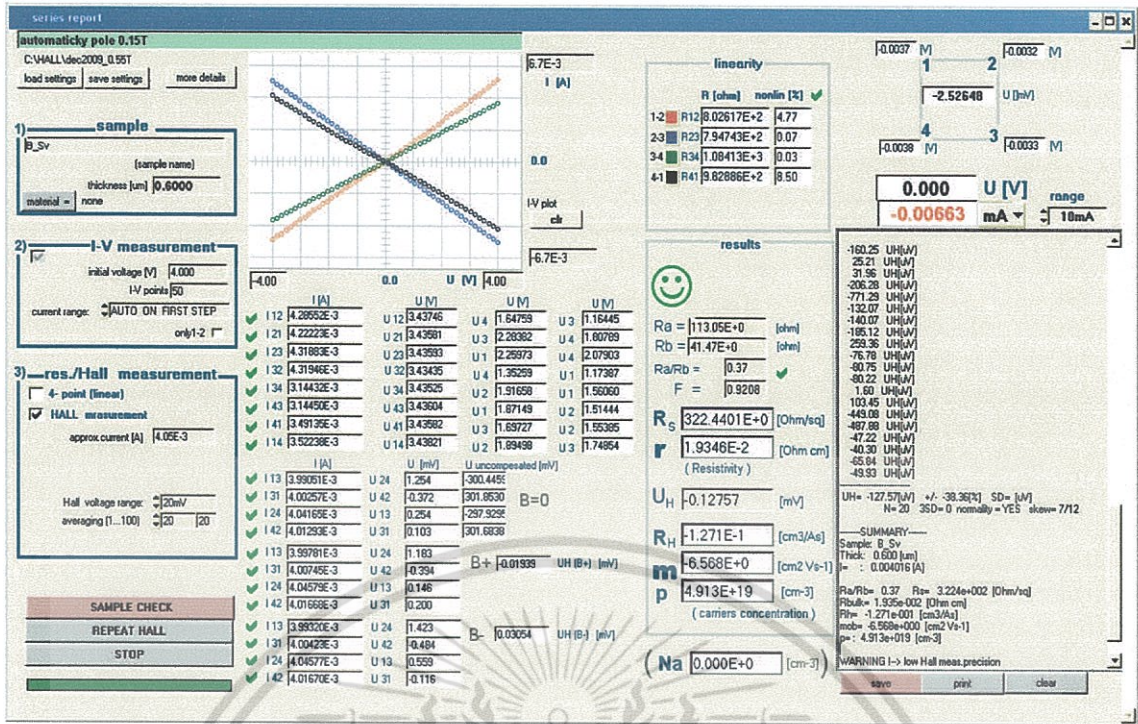


Fig. 3. Control graphical interface of AMS for Hall, linear 4-point probe and van der Pauw measurements

thickens  $d$ , correction factor, current and number of the measurements. The measured and evaluated values are spreading resistance, resistance and concentration.

#### 4 EXPERIMENTAL RESULTS

Designed AMS system allows measuring and calculating various parameters such as resistivity, Hall mobility and doping concentration. To demonstrate applicability and reliability of this system, we conducted various experiments described in details below.

To verify the resistivity measurements provided by linear 4-point probe being part of the AMS, two wafers were used: p-type Si(100) substrate with  $\rho = 8-12 \Omega\text{cm}$  and thickness of  $300 \mu\text{m}$  and n-type Si(100) substrate with  $\rho = 2-4 \Omega\text{cm}$  and thickness of  $360 \mu\text{m}$ . The values of  $\rho$ ,  $n$  and  $\mu$  were measured and calculated by using AMS. For both samples, the value of  $k$  was 0.9818 (Eq. 8). For the p-type Si sample we measured values:  $R_s = 345 \Omega$ ,  $\rho = 10.3 \Omega\text{cm}$ ,  $n = 1.2 \times 10^{15} \Omega\text{cm}^{-3}$ ,  $\mu = 485 \text{cm}^2/\text{Vs}$ . For the n-type Si:  $R_s = 108.6 \Omega$ ,  $\rho = 3.3 \Omega\text{cm}$ ,  $n = 4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $\mu = 472 \text{cm}^2/\text{Vs}$ . The above-mentioned results  $\rho$  and  $n$  satisfy the sample technological parameters.

For the verification of  $\rho$  to  $n$  conversion p-type silicon substrate with  $\rho = 10 \Omega\text{cm}$  and n-type silicon substrate with  $\rho = 1 \Omega\text{cm}$  were used. Obtained results of conversion are for p-type Si:  $n = 1.29 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $\mu = 485 \text{cm}^2/\text{Vs}$  and for n-type Si:  $n = 5.3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $\mu = 1180 \text{cm}^2/\text{Vs}$ . The calculated results are identical with the results obtained from Irvin curves [5].

To demonstrate the potential of Hall measurement tool in current most attractive topics in material research, measurements on four kinds of semiconductor samples with different resistance were carried out:

- sample c-Si(p): High doped p-type crystalline silicon substrate with thickness of  $450 \mu\text{m}$ . Silicon is still most used material in semiconductor industry and part of various structures and devices.
- sample ZnO:Al:  $1.1 \mu\text{m}$  thick aluminum doped zinc oxide layer prepared on glass substrate. ZnO is a unique material and has been used considerably for its catalytic, electrical, optoelectronic and photochemical properties.
- sample GaAs:Si: Si doped GaAs epitaxial layer of thickness  $1.25 \mu\text{m}$  grown by molecular beam epitaxy on GaAs-SI (semi-insulating) substrate. GaAs based heterostructures have the advantage for realization of micro and optoelectronic devices.
- sample Diamond: nanocrystalline diamond layer of  $0.9 \mu\text{m}$  thickness deposited on a  $1.4 \mu\text{m}$  thick  $\text{SiO}_2$  insulating layer on silicon substrate. To overcome the leakage current caused by diamond layer, which during the deposition overlaps over the thin insulating  $\text{SiO}_2$  layer and makes connection to the silicon substrate, the edges of the diamond layer were etched. Diamond is a robust semiconductor with a wide bandgap of 5.48 eV, and it could potentially be used in applications that need to function in environments of extreme heat and radiation.
- sample BDiam: boron doped diamond layer of thickness  $0.2 \mu\text{m}$  deposited on  $1.4 \mu\text{m}$  thick  $\text{SiO}_2$  insulating layer on silicon substrate. The edge of the sample was

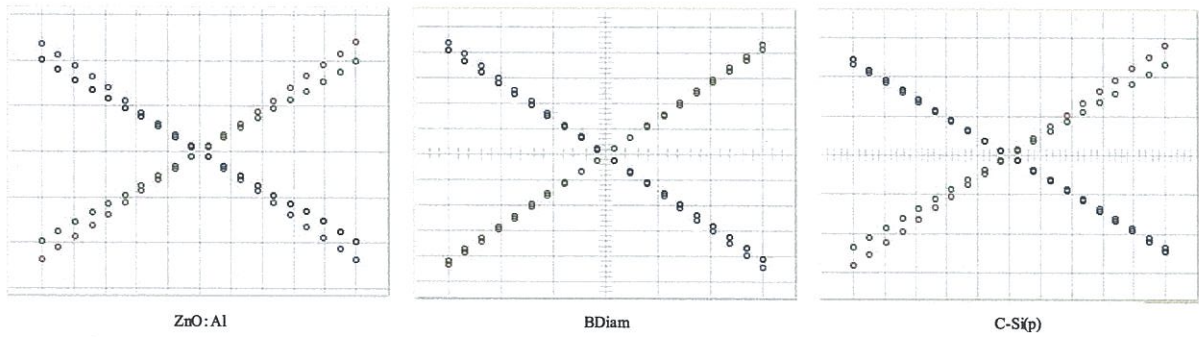


Fig. 4. Contact linearity of measured samples: ZnO:Al, BDiam and c-Si(p)

Table 1. Summarized results of Hall measurements. In the table  $d$  is sample thickness,  $R_s$  is sheet resistivity,  $\rho$  is specific resistivity,  $U_H$  is Hall voltage,  $\mu$  is mobility and  $n$  is carrier concentration

Sample	$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_s$ ( $\Omega/\text{cm}^2$ )	$\rho$ Omega cm	Contact nonlin. %	$U_H$ ( $\mu\text{V}$ )	$\mu$ ( $\text{cm}^2\text{Vs}^{-1}$ )	$n$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
c-Si(p)	450	0.0438	$1.97 \times 10^{-3}$	< 1	0.25	49.2	$6.4 \times 10^{19}$
ZnO:Al	0.750	$4.587 \times 10^1$	$3.4 \times 10^{-3}$	< 8.01	79.40	10.2	$8 \times 10^{20}$
GaAs:Si	1.25	$6.24 \times 10^2$	$7.8 \times 10^{-2}$	< 0.2	33330	$3.5 \times 10^3$	$2.2 \times 10^{16}$
Diamond	0.9	$3.6 \times 10^7$	$3.3 \times 10^3$	< 10	130	1.5	$1.2 \times 10^{15}$
BDiam	0.2	$2.2 \times 10^3$	$4.4 \times 10^{-2}$	< 1	45	1.3	$1.1 \times 10^{20}$

cut in order to prevent the leakage via the silicon substrate. Doped diamond can be used as a core material of sensors, MEMS and MESFET.

In the first step of measurements, the samples were attached to the holder and four contact labels were placed on the corners of the sample. The quality of the ohmic contacts to the sample was controlled via the resistance linearity measurement between neighboring contacts. In case of the ZnO:Al sample, which has a high conductance, the good ohmic contact giving nonlinearity value below 0.5% was attained by direct placing of sample holder gold tips on the sample. Other samples required contact preparation. For samples with diamond layer and GaAs:Si layers an In contacts were first spread at the corners of the samples and then annealed in FGA (90%  $\text{N}_2$  + 10%  $\text{H}_2$ ) at the temperature of 400°C for 1.5 minutes. The aluminum contacts were evaporated on the corners of c-Si(p) substrate to assure ohmic contact.

As is shown in the Fig. 4, sufficient linearity of I-V curves between neighbored contacts and thus good ohmic contacts were achieved for all samples. The results of resistivity and Hall measurements for selected samples are summarized in Tab. 1. All Hall measurements were conducted by averaging over 20 measurements to improve the statistics. Such a high number of measurements were provided using electromagnet.

Measurements of resistivity provide information in development of new materials for various applications. Zinc oxide represents attractive alternative of transparent conductive oxide (TCO) for solar cell applications. Resistivity of TCO is one of the most important parameters significantly affecting the performance of solar cells, thus need to be controlled. The obtained resistivity of ZnO noticed in Tab. 1. [8] is usually achieved in case of state of the art ZnO layers for TCO applications in solar cells.

Diamond is an attractive material for sensors, MEMS and MESFET transistors [9,10]. Important feature for such applications is a good conductivity of diamond layers to achieve ohmic contact. Low resistance ohmic contact can be achieved for layers when the current crosses a very thin potential barrier between the metal and the diamond. While the barrier thickness decreases upon the increase of dopant concentration, the Hall measurements are important to optimize the ohmic contacts [11]. Results of resistivity and Hall measurements obtained on intrinsic and boron doped diamond films (Tab. 1) represent the basic steps in the process of ohmic contact optimization.

Obtained results are in good agreement with technological predictions and measurements carried out on other Hall measurement tools [8]. The developed system proved the potential of reliable resistivity, mobility and doping concentration measurements on various semiconductors.

## 5 CONCLUSION

The classical Hall measurement system has been completed by a 4-point probe method, which employs a relay network for measuring the sheet resistance and then calculates the resistivity of semiconductor layers. The Hall system together with the van der Pauw resistivity configuration was primary designed for high resistance sample measurements. Two different ways were used to measure resistivity (i) Van der Pauw set-up being the part of the Hall and (ii) 4-point linear probe. The software of the equipment contains graphics for converting the resistivity into concentration and mobility.

The measuring system allows measurements utilizing permanent magnet (0.55 T) or electromagnet (0.15 T) and is suitable for determination of the influence the disturbances on the measured mobility. Special feature

of the equipment is generation of magnetic field, which is realized with air-cooled magnet with fast switching magnetic pole 0.15 T. This has the advantage to minimize an excessive heat generation in some samples and also exhibit lower false thermovoltages in sample contacts. The quickly switch combination are especially advantage for a sample with low Hall voltage (less than  $50 \mu\text{V}$ ).

The potential of developed tool was attested by measurement on various types of semiconductor samples and structures. Potential problems inherent to the AMS have been described and minimized as far as possible.

### Acknowledgement

The work has been conducted in the Centre of Excellence CENAMOST supported by the grants VEGA 1/0377/13 and Project of International Research Collaboration, SK-PL-0005-12: TU Wroclaw/STU Bratislava. The authors would like to thank Vladimír Kremničan, director of DSLab. s.r.o. company for design and manufacture of this equipments.

### REFERENCES

- [1] VAN DER PAUW, L. J.: A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape, Philips Research Reports, 13, 1958, 1.
- [2] MATSUMURA, T.—SATO, Y.: A Theoretical Study on Van Der Pauw Measurement Values of Inhomogeneous Compound Semiconductor Thin Films, *J. Mod. Phys.* 1 (2010), 340.
- [3] SCHUETZ, A. P. *et al* : *Am. J. Phys.* vol 72 No. 2 (Feb 2004), 49.
- [4] GREEN, R. : Hall Effect Measurements in Materials Characterization, Keithley Instruments, Inc., Keithley Instruments, Inc. 2011.
- [5] KINDER, R. *et al* : *Journal of Electrical Engineering* 56 (2005), 268-270.
- [6] <http://four-point-probes.com/ecopia.html>.
- [7] [www.ecse.rpi.edu/~schubert/.../A07-Specific-contact-resistance.pdf](http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/.../A07-Specific-contact-resistance.pdf).
- [8] FLICKYNGEROVÁ, S.—NETRVALOVÁ, M.—ŠUTTA, P.—NOVOTNÝ, I.—TVAROŽEK, V.—GAŠPIERIK, P.—BRUNCKO, J. : Effects of Sputtering Power and Pressure on Properties of ZnO:Ga Thin Films Prepared by Oblique-Angle Deposition, *Thin Solid Films* 520 No. 4 (2011), 1233.
- [9] MARTON, M.—IŽÁK, T.—VESELÝ, M.—VOJS, M.—MICHALKA, M.—BRUNCKO, J. : Effect of Argon and Substrate Bias on Diamond Thin Film Surface Morphology, *Vacuum*. 82 (2008), 154.
- [10] IŽÁK, T.—VOJS, M.—VESELÝ, M.—ŠKRINIAROVÁ, J.—NOVOTNÝ, I.—MICHALKA, M.—REDHAMMER, R. : Electrical Property Dependence on Thickness and Morphology of Nanocrystalline Diamond Thin Films, *Microelectronics Journal* 40 (2009), 615.
- [11] WERNER, M.—DORSCH, O.—BAERWIND, H. U.—ERSOY, A.—OBERMEIER, E.—JOHNSTON, C. : *Diamond Relat. Mater.* 3 (1994), 983.

Received 16 September 2012

**Rudolf Kinder** (doc, Ing, CSc) was born in Pezinok in 1940. In the sixties, he worked in electrotechnical industry in Bratislava, later at VURUP (Research Center for Petrol Chemistry) in the field of automation of chemical services. He

graduated in technical cybernetics from the Faculty of Electrical Engineering, Slovak Technical University, Bratislava. He received CSc (PhD) degree in electronics and vacuum technology in 1984 and has worked as a senior scientist since 1989. Since 1996 he has been Associate Professor in microelectronics. His research activities are oriented towards semiconductor technology, particularly to analysis and simulation.

**Miroslav Mikolášek** (Ing), (Ing, PhD.) was born in Myjava (Slovakia), in 1983. He carried out research in the area of microfluidic circuits at the Johannes Kepler University in Linz, Austria, and based on this work he received his Master degree in electronics from the Slovak University of Technology, Bratislava, in 2007. In year 2011 he received PhD degree in Electronics from the Slovak University of Technology. At present he works at the Institute of Electronics and Photonics, Slovak Technical University in Bratislava. Main interests of his research include simulation and diagnostics in the field of solar cells based on amorphous silicon.

**Daniel Donoval** (Prof, Ing, DrSc) was born in Banská Bystrica, Slovakia in 1953. He received his MSc and PhD degrees in electronics from Slovak University of Technology in 1976 and 1981, respectively. Since 1981 he has been with Microelectronics Department, FEI STU Bratislava. He is currently a Professor and Head of the Department of Electronics and Phototonics. His research interests include technology and characterization of semiconductor structures and devices supported by 2/3-D modeling and simulation. He is a member of Scientific Community Council and Education and Training Coordination Board of European Technology Platform ENIAC.

**Jaroslav Kováč** (Prof, Ing, CSc) was born in Šafárikovo, Slovakia, in 1947. He graduated from the FEI STU, Bratislava, in 1970. Since 1971 he has been engaged in the research of optoelectronic devices technology at the Microelectronics Department of FEI STU. He received a CSc (PhD) degree from STU Bratislava, in 1983. Since 1991 he has been the team leader of the Optoelectronic and microwave group at the Department of Electronics and Phototonics.

**Marek Tlaczala** (Prof Dr Hab) was born in Bydgoszcz in 1949. He graduated in Electronics from Faculty of Electronics in 1972. In 1973–1976 he worked at the Electrotechnical University at Sankt Petersburg. He received his PhD degree in Electronic Engineering in 1976 at Electrotechnical University in Sankt Petersburg. In 2002 he received the DSc degree (habilitation). At present he is a Full Professor (from 2009) and Head of the Semiconductor Devices Lab. in Faculty of Microsystem Electronics and Photonics Wroclaw University of Technology. Vice-Director of Center of Advanced Materials and Nanotechnology at Wroclaw University of Technology. Member of Committee of Polish Vacuum Society and, at this moment he is a scientific secretary of the society. Member of: Polish Committee of Electronics and Telecommunication Polish Academy of Science, Thin Layers Division, Microelectronic Division and Electronic Materials Technology Division of Polish Academy of Sciences. His main research interest concerns crystal growth of thin and low dimensional heterostructures of AIII-BV and AIIIBV-N semiconductor compounds for optoelectronics and microelectronics application. He is a specialist in designing and construction of advanced apparatus for epitaxial crystal growth and in theoretical approach to the semiconductor materials processing technology. Many of his original works were published in scientific journals (he authored or co-authored 160 papers). During the last three years he has been a principal investigator of 11 scientific grants.



## Study of quantitative influence of sample defects on measurements of resistivity of thin films using van der Pauw method

Josef Náhlík<sup>a,\*</sup>, Irena Kašpárková<sup>a</sup>, Přemysl Fitl<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Solid State Engineering, Institute of Chemical Technology, Technická 5, 16628 Prague 6, Czech Republic

<sup>b</sup> Department of Physics and Measurements, Institute of Chemical Technology, Technická 5, 16628 Prague 6, Czech Republic

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 18 January 2011

Received in revised form 18 July 2011

Accepted 22 August 2011

Available online 27 August 2011

#### Keywords:

Van der Pauw

Resistivity measurement

Corrigible defects

Incorrigible defects

### ABSTRACT

The paper is devoted to the methodology of measurement of resistivity of thin films using van der Pauw (VDP) technique – in particular to the consequences of typical “defects” that can appear in the samples. To a certain extent, it can be actually deduced from the measurement whether the defect is fatal, and the sample has to be excluded from the experimental results (incorrigible defect), or whether the error can be subsequently corrected numerically (corrigible defect). This is important especially for ultrathin films close to the limit of their connectivity, where the consequences of these defects can be easily mistaken for actual anomalous behaviour. Therefore, we decided to simulate the consequences of such defects experimentally.

Using standard photolithographic techniques and subsequent selective etching, typical sample defects were simulated on geometrically symmetric samples of thin Cu foil: these defects ranged from non-symmetric contacting, isolated and non-isolated cracks and holes, to the influence of their size and position within the sample. The impact of these defects on the sequence of values measured in one measurement cycle of the VDP method is demonstrated, and a comparison with characteristic values of perfect samples is carried out. Then, we summarise the manifestations and consequences of the defects and demonstrate practical possibilities of their numerical correction. The goal of this study is to show experimentally the types of defects that can lead to electrical asymmetry of the originally symmetric samples, which of these are theoretically amenable to correction, and which cannot be corrected in this way. It was experimentally confirmed that values measured on “simply connected” samples are generally corrigible but in other cases (interior cracks and holes) are incorrigible.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

The van der Pauw method makes it possible to measure both sheet resistance ( $R_{ps}$ ) and volume resistivity ( $\rho$ ) of materials on planar plates or layers that are homogeneous, isotropic and have uniform thickness. Otherwise, their shape can be arbitrary. The measuring technique is then applicable, if we are able to provide the sample of such a plate, foil or layer with four distinct, theoretically point-like ohmic (linear) contacts on its circumference. See, e.g. [1,3].

On studying the properties of thin and, in particular, ultrathin layers (nano-layers) by means of the van der Pauw method, we should always verify the validity of these assumptions beforehand and consequently separate the consequences of possible failure to observe the input assumptions from the real anomalous behaviour of these layers.

For example, the samples must be free of cracks and holes (voids) [2], which represent inhomogeneities from the material viewpoint, and undesirable discontinuities in the behaviour of  $\rho(x,y)$  [3] from the viewpoint of the fundamental theory of VDP. Theoretically, the problem seems to be clear. In reality, however, only few studies point to

\* Corresponding author. Tel.: +420 220445160; fax: +420 224310337.

E-mail address: [Josef.Nahlík@vscht.cz](mailto:Josef.Nahlík@vscht.cz) (J. Náhlík).

practical consequences of non-fulfilment of basic assumptions and document these consequences either by calculation or experiment [2,4–6].

Measurements by VDP technique are based in principle on a method of evaluation of voltage response on application of a suitable constant electrical current; therefore, a very important assumption is the point-like nature of circumferential contacts used to pass current through the sample and to read the corresponding voltage response. On the other hand, the consequences of non-point-like nature of actual contacts are treated in numerous studies, in detail e.g. [2,7,8], hence we only conclude here that a negative error in the measurement of resistivity (the measured value is smaller than the true one) due to contacts of finite dimensions and at a finite distance from the border is smaller in proportion to the ratio of the contact length or its distance from the border to the total circumference of the sample.

Let us state that the realisation of a general conception of the VDP technique, in particular its manual implementation, is a time demanding task. Therefore, the experimenters try to simplify the measurements by preparing electrically symmetric samples and evaluate the results without the need for introducing numerical corrections by successive approximations. This approach has a certain additional advantage in the ability to reveal a nonstandard behaviour of the sample from successive measurements, find its cause, and (if theoretically possible) apply corrections *a posteriori*, or exclude the sample from the experiment. For this purpose, however, it is necessary to master the VDP technique not only theoretically, but acquire also a sufficient amount of practical experience. Therefore, we decided to simulate the manifestation of typical sample defects in resistivity measurements by the VDP technique and demonstrate their practical consequences.

### 1.1. Fundamental approach in assessment of the resistivity of materials using the VDP technique

Based on the assumptions mentioned above, the problem of the determination of the resistivity of a material was solved theoretically and practically by van der Pauw

(hence the abbreviation VDP) as early as in 1958 [3]. Let us mention that the method is a destructive one, but has the lowest measurement uncertainty [9].

Based on Ref. [3], one can state the following. In the case of a planar plate, foil or layer from a homogeneous isotropic material of uniform thickness, free from isolated holes and cracks, the following approach can be used to determine the volume resistivity  $\rho$  (if the thickness  $h$  is known) or sheet resistance  $R_{PS}$  (if the thickness is not known):

- (1) The foil, plate or layer is provided by ohmic point contacts at its circumference and by means of those we enable to realise gradually the connection shown in Fig. 1a and b.
- (2) In the connection according to Fig. 1a we select and set a suitable magnitude of electric current  $I_{12}$  [A], and read the voltage response  $U_{43}$  [V] of the sample. Then we calculate the ratio  $R_a$  [ $\Omega$ ],

$$R_a = U_{43}/I_{12}. \tag{1}$$

- (3) We change the connection according to Fig. 1b (cyclic interchange of contacts), and again set a “suitable” current  $I_{23}$  [A] (as a rule identical to or comparable with  $I_{12}$  according to 2), read the corresponding voltage response  $U_{14}$  [V] and calculate the ratio  $R_b$  [ $\Omega$ ],

$$R_b = U_{14}/I_{23}. \tag{2}$$

As a “suitable” value of the measuring current we consider in general such value that gives corresponding voltage response measurable with the desired accuracy and the sample heating due to passing current can be neglected.

Van der Pauw showed [3] that in the case given above the following equation holds

$$\exp\left(-\pi \cdot \frac{R_a}{R_{PS}}\right) + \exp\left(-\pi \cdot \frac{R_b}{R_{PS}}\right) = 1, \tag{3}$$

where  $R_{PS}$  [ $\Omega$ ] is the sheet resistance of the material. In practice, this parameter is also referred to as Resistance

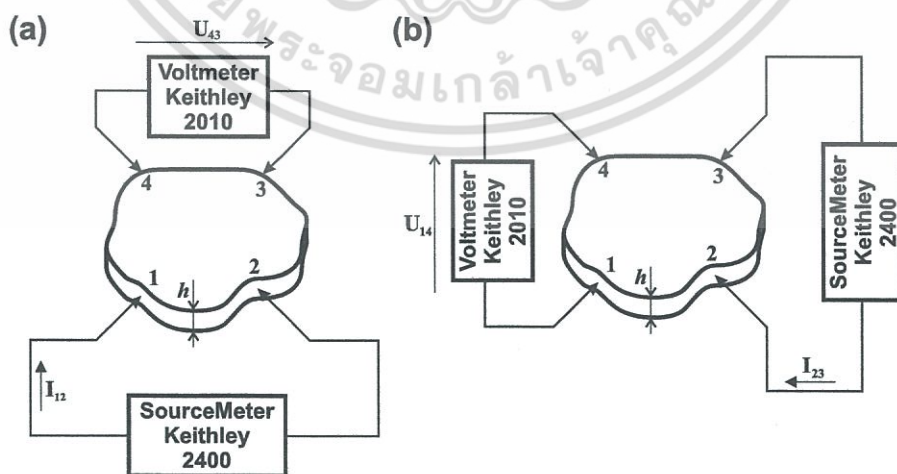


Fig. 1. Measurement of sheet resistance and volume resistivity of plates, foils and layers using van der Pauw technique.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Per Square – hence the abbreviation  $R_{PS}$ . For the general case of electrically non-symmetrical samples,

$$R_a \neq R_b, \tag{4}$$

Eq. (3) is a transcendental equation (does not have solutions in a closed-form) and has to be solved numerically using a method of successive approximations. Nevertheless, for electrically symmetrical samples, i.e. where it holds that

$$R_a = R_b = R, \tag{5}$$

the solution for  $R_{PS}$  can be found easily in a closed form after substituting Eq. (5) into Eq. (3) and solving the exponential equation.

$$2 \cdot \exp\left(-\pi \cdot \frac{R}{R_{PS}}\right) = 1, \tag{6}$$

where, by taking logarithms and simple manipulations, we get the following relation for the sheet resistance

$$R_{PS} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot R. \tag{7}$$

If the thickness  $h$  [m] is known, we can also easily determine the volume resistivity  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] of the material, using a the general relation

$$\rho = h \cdot R_{PS} = h \cdot \frac{\pi}{\ln 2} \cdot R. \tag{8}$$

In view of evident simplicity of evaluation of the measured values, the above-mentioned special case of electrically symmetric sample is often used in practice, whenever the character of the experiment allows preparing such a sample. In particular, this approach is suitable for manual one-shot measurements, as each sample showing surface mechanical symmetry of the tested layer and symmetrically placed contacts is, in general, electrically symmetric. But, we should always check the electrical symmetry in the particular measurement, because the appearance of asymmetry can signal mechanical damage to the sample, which need not be visually detectable.

In a general example of a non-symmetric sample, of course, we have to reconcile ourselves with the fact that the resistivity must be obtained by solving Eq. (3) using a method of successive approximations. This will be always subject to certain error, depending on the number of approximation cycles performed. In practice, the solution of Eq. (3) can be sought in the form

$$R_{PS} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{R_a + R_b}{2} \cdot f\left(\frac{R_a}{R_b}\right), \tag{9}$$

where  $f(R_a/R_b) = f(k)$  is the sought correction function obeying a transcendental equation.

$$\exp\left(-\frac{\ln 2}{f(k)}\right) \cdot \cosh\left(\frac{k-1}{k+1} \cdot \frac{\ln 2}{f(k)}\right) = \frac{1}{2}. \tag{10}$$

The value of the function  $f(k)$  can be calculated for a given ratio  $k = R_a/R_b$  by the method of successive approximations.

The case of correction function  $f(R_a/R_b)$  calculated by the method of successive approximation on a computer with accuracy set to 0.0001% is shown in Fig. 2. Only the part

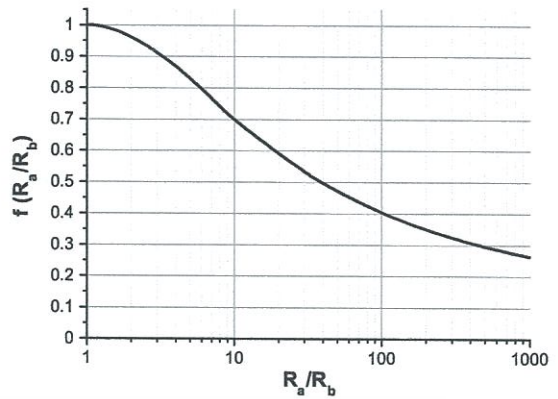


Fig. 2. The value of VDP correction function  $f(k)$  plotted against the measure of asymmetry  $k = R_a/R_b$ .

corresponding to  $R_a/R_b > 1$  is shown. The function is symmetric with respect to  $k = 1$  and the case of  $R_a/R_b < 1$  need not be therefore shown. The value of the ratio

$$k = R_a/R_b, \tag{11}$$

can be conveniently used to characterise the electrical asymmetry of the sample and we will follow it carefully in the discussion of experimental results. In view of the fact that the origin and end of cyclic notation of contacts is arbitrary, we will convene to evaluate the electrical asymmetry by using the larger of the resistances  $R_a$  and  $R_b$  in the numerator of the Eq. (11) and the smaller of them in the denominator. Eventual rise of the sample asymmetry evaluated in this way will be thus logically accompanied by the rise of the asymmetry measure  $k$  according to Eq. (11).

As we pointed out above, it often happens in testing thin and ultrathin layers that the sample shows significant electrical asymmetry even if it is *a priori* prepared as a symmetric one [10]. Then it is necessary to diagnose the cause from the measured values and, in case of suspicion that the sample defect is incorrigible in the sense of Eqs. (9) and (10) [3], repeat the preparation of sample with utmost care and exclude the defective sample from measurements. The failure may be due to minute cracks or holes, difficult to perceive by naked eye, incurred during manipulation of the sample (cracking under mechanical deformation, scratching by tweezers, etc.).

The aim of our work is to show what types of defects lead to asymmetry, which of them can be still theoretically corrected by calculation in the sense of Eq. (9), and those that cannot be corrected in this way. In general, it is then necessary to judge individually whether the error incurred by disregarding an incorrigible sample defect can be still acceptable or whether the sample has to be excluded from the experiment.

For the sake of completeness, let us note that a further remarkable property of flawless VDP samples of plates, foils and layers is the so-called reciprocity. This property, characterising VDP samples, even without respect to their electrical symmetry, is generally understood as self-evident (following from the general reciprocity theorem

[11,12]); therefore, it does not perhaps receive due attention by various authors and even its essence does not enter general awareness.

With certain simplification, this property can be in our concrete case characterised as follows: under the assumptions on the VDP samples mentioned above, it is possible to interchange the voltage contacts with the current contacts (see Fig. 1) without influencing the value of the ratio of these quantities. If, for example, we switch the source of constant current from terminals 1, 2 to terminals 3, 4 and at the same time switch the voltmeter from terminals 3, 4 to terminals 1, 2, we obtain the resistance  $R'_a$  [ $\Omega$ ] as a ratio of voltage  $U_{21}$  [V] to current  $I_{34}$  [A], for which it holds that

$$R'_a = \frac{U_{21}}{I_{34}} = \frac{U_{34}}{I_{12}} = R_a, \tag{12}$$

and also, in full analogy,

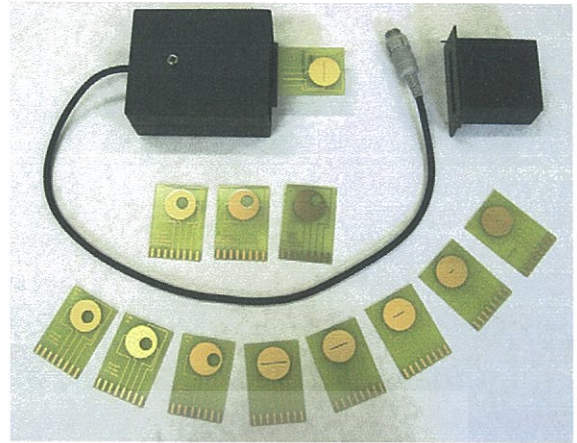
$$R'_b = \frac{U_{14}}{I_{23}} = \frac{U_{34}}{I_{12}} = R_b, \tag{13}$$

regardless of the fact whether the sample exhibits electrical asymmetry or not. This rule follows from the general theory of electromagnetic field applied to the theory of linear electric circuits and is known as the reciprocity theorem, see e.g. [11].

In this study we are going to verify its very good validity for relatively thick Cu layer of our samples containing simulated defects. We shall show that typical defects of VDP samples on “sufficiently thick” layers do not lead to reciprocity failure.

**2. Experimental**

To prepare the samples, we used commercially available plates for printed circuits, DURAVER-E-Cu of 1.5 mm thickness, laminated on one side with a 35  $\mu$ m thick Cu foil (Cu purity: 98.8%), provided with a photosensitive layer. The required shapes of reference samples with simulated defects of sample symmetry, contact symmetry, simulated cracks, holes of various positions, etc. were then produced

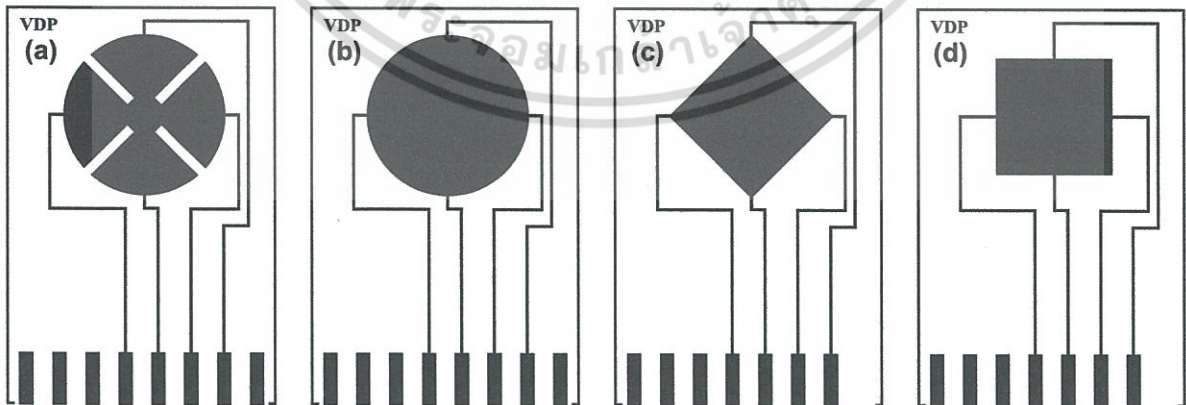


**Fig. 3.** Adaptor for manual and automated measurements of resistivity of materials using van der Pauw method, shown with a set of samples featuring a simulated crack of variable length and holes of variable positions.

by photolithography. Immediately after production, the samples were rid of the photosensitive layer and provided with electro-insulating varnish (protection against corrosion).

The samples formed targeted series characterised by specific defects of variable size and position. Subsequently, the influence of these parameters on the symmetry and reciprocity was evaluated, and the nature of this effect and conclusions relevant for the practice were determined.

Measurements of the volume resistivity were carried out in an automated lab using an in-house program designed within the environment of National Instruments LabVIEW. The program contains functions required for accurate calculation of corrected and uncorrected value of  $\rho$ , calculation of the value of correction function and relative error due to neglect of correction. The correction function was computed using a method of successive approximations with settable relative error of 0.0001% at most.



**Fig. 4.** Examples of mechanically and electrically symmetric reference samples used for our measurements of resistivity by the VDP technique (from the left): a) Often recommended shape (so-called butterfly  $\phi$  25/5 mm), b), c) mostly accepted shape (circle  $\phi$  25 mm and square 18  $\times$  18 mm contacted in the corners), d) often not recommended shape (square 18  $\times$  18 mm contacted in the centres of its sides). Width of all copper contact wires is 0.35 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

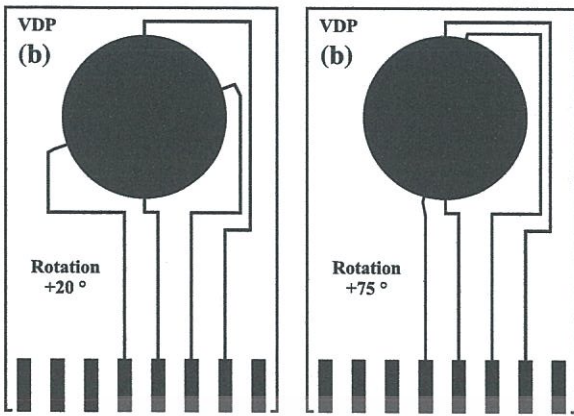


Fig. 5. Example of a rotation of opposite contacts by +20° and +75° with respect to horizontal axis.

The measuring current was supplied by programmable current SourceMeter Keithley 2400, the voltage responses read by a multimeter Keithley 2010, and the connections

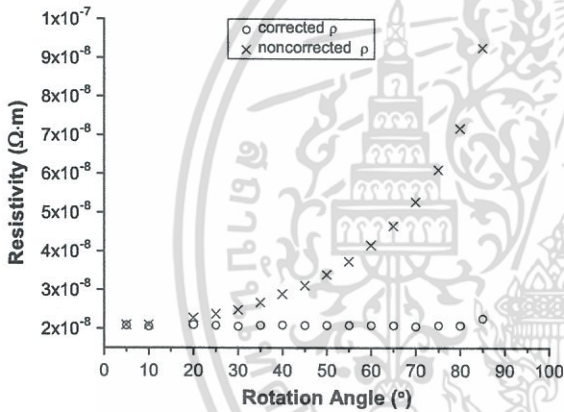


Fig. 6. Dependence of the measured resistivity  $\rho$  [ $\Omega\cdot m$ ] on the rotation of the pair of opposite contacts for a circular sample.

of the instruments to the sample were program-controlled by a cross-switching array Keithley 7001 provided with plug-in cross-switching module Keithley 7012 S.

Rapid connection of the samples to the measuring system was realised by a special connecting adaptor using a slot-type connector with shielded connecting wires to minimise the influence of external interference (see Fig. 3).

Measurements and numerical evaluation of the resistivity then proceeded automatically with the following parameters. Measuring current 200 mA, measured parameters: corrected and uncorrected volume resistivity  $\rho$  [ $\Omega\cdot m$ ]; sample thickness: 35  $\mu m$ ; voltage limit of the supply: max. 21 V; maximum allowed error in the approximation of the correction function: 0.0001%. The parameters were chosen so as to make possible the measurements of resistances  $R_a$  and  $R_b$  with an accuracy of  $\pm 100 \mu\Omega$ . The technique of testing current polarity change and averaging of the measured resistances ( $R_a, R'_a; R_b, R'_b$ ) was used, of

course. To determine the total experimental error, each sample was measured repeatedly (five times) and the measurement uncertainty of the type B was finally obtained.

### 3. Results

The measurement itself proceeded as follows:

First, perfect samples of all shapes given, *i.a.*, in the recommendation [13] were measured. There one finds the most often used shapes of VDP samples of the following types: butterfly, circle, square contacted in the corners and square contacted at the centres of its sides, see Fig. 4. All shapes have led to virtually identical results with minimum scatter of values. Hence, the application advantages and disadvantages of individual shapes, alleged sometimes [2], were not confirmed – which is obviously due to the quality of the Cu foil and, precise sample geometry and their contacting by photolithographic technique. Fig. 4 and next figures of samples are to-scale replicas of photolithography masks.

Reference value of the sheet resistance ( $R_{PS}$ ) was determined beforehand for each shape according to Fig. 4 by accurate measurements on basic sample, well complying with theoretical assumptions.

The measured values  $R_{PS}$  in individual cases at a temperature of 24 °C was found to be:

$$\text{sample(a)} R_{PS} = 5.80 \pm 0.03 \times 10^{-4} \Omega \tag{14}$$

$$\text{sample(b)} R_{PS} = 5.90 \pm 0.03 \times 10^{-4} \Omega \tag{15}$$

$$\text{sample(c)} R_{PS} = 5.83 \pm 0.03 \times 10^{-4} \Omega \tag{16}$$

$$\text{sample(d)} R_{PS} = 6.06 \pm 0.03 \times 10^{-4} \Omega \tag{17}$$

With respect to uncertainty of measurement it is obvious that measured values of sheet resistance of sample series with individual geometries are not statistically the same. It can be caused by thickness uncertainty (manufacturing tolerance) of copper foil eventually by uncertainty of its purity (manufacturing tolerance of resistivity), etc. Producer of PCBs (printed circuit boards), which were used to prepare samples with simulated defects, sets neither thickness uncertainty of the copper foil nor its uncertainty of resistivity. Therefore the reference samples and the samples with defects were prepared from one set of PCBs to minimise the effect of mentioned uncertainties and first of all, to deal with consequences of simulated defects. Then the mean value of resistivity can be estimated according to (8) as a product of nominal foil thickness (35  $\mu m$ ) and sheet resistance.

These values were then used as a reference in the evaluation of the influence of simulated defects. The value of asymmetry of these samples in the sense of (11) was found to lie in the interval  $k = 0.9996 \pm 0.0001$ . The resistivity measured in the same way on the samples with intentionally produced defects was then evaluated with respect to the reference resistivity established for the reference sample at the same temperature.

The consequences of the intentionally prepared defects of sample with original geometric and electrical symmetry

can be divided into two basic groups: the group of samples where the consequences of simulated defects are computationally corrigible and the group where the consequences of the defects cannot be computationally corrected. In view of the scope of experiments, we shall limit ourselves in the present paper only to a brief description and a representative schematic rendering of the defects. The corresponding graphs give then a complex illustration of the consequences of the defects, with each point in the graph representing one specially prepared sample with a simulated defect of a given type, size and position. Even here, each measurement was repeated five times in order to determine the mean value of the resistivity and the measurement uncertainty of the B-type.

At first we focus on the defects that are computationally corrigible and then we shall discuss the typical incorrigible defects.

### 3.1. Corrigible defects

The first five series of samples are targeted at inaccurate contacting of the samples. Each pair of points in the graphs represents one real sample.

#### 3.1.1. Rotation of the pair of opposite contacts (+5° to +85° in steps 5°) on a circular sample

The samples are schematically shown in Fig. 5. The dependence of the corrected and uncorrected resistivity value on the angle of rotation shown in Fig. 6 implies that the corrected value  $\rho$  is not affected by rotation of the contacts and, in comparison to the reference value according to (14), characterises the tested material very well. However, the error of the uncorrected value can be rather significant. The result of the corrected measurements on 16 asymmetrically contacted samples gives a mean value  $\rho = 2.09 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  with a scatter of 1.8%. Contact rotation has evidently a large influence on electrical symmetry of the samples measured in this way. Uncorrected resistivity value, hence also the positive error of the measurement, rises steeply with the angle of rotation of contacts. This is due to the increasing measure of electrical asymmetry. The original symmetry is broken even at minimal contact rotation ( $k = 1.27$  at +5°). The asymmetry of the sample steeply rises with increasing rotation angle; the rise has hyperbolic character, theoretically diverging beyond limits at a value close to 90°. Unless a correction is applied to our system, this type of faulty contacting of a circular sample is a potential source of larger (even by an order of magnitude) positive errors.

#### 3.1.2. Shift of contacts from the centre in the y-axis direction, $\Delta y = 2\text{--}16\text{ mm}$ , in steps of 2 mm

This example is schematically shown in Fig. 7. The dependence of the corrected and uncorrected resistivity on a shift of the contacts shown in Fig. 8 implies that the corrected value of  $\rho$  is not affected by the shift of the contacts and, in comparison with the reference value according to (17), characterises again the tested material very well. The results of measurements on eight samples give a mean value of  $\rho = 2.09 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  with a scatter of 1.09% at most. The uncorrected value  $\rho$  again grows with

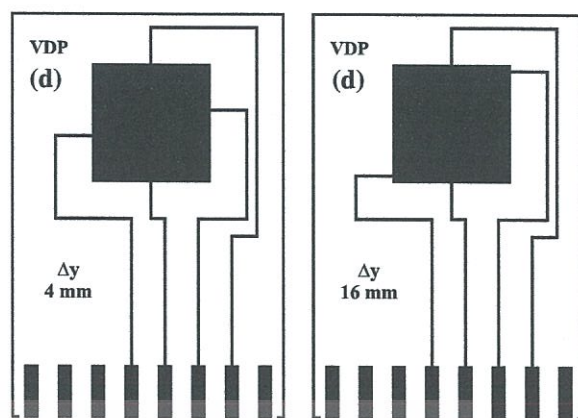


Fig. 7. Example of a centrosymmetric shift of a contact pair on opposite sides of a square, by 4–16 mm.

increasing shift (see Fig. 8), but not as dramatically as in the preceding case. On shifting the contacts from  $\Delta y = 2\text{ mm}$  to  $\Delta y = 16\text{ mm}$ , the measure of asymmetry changes from  $k = 1.53$  to  $k = 11.61$ . Positive error of the

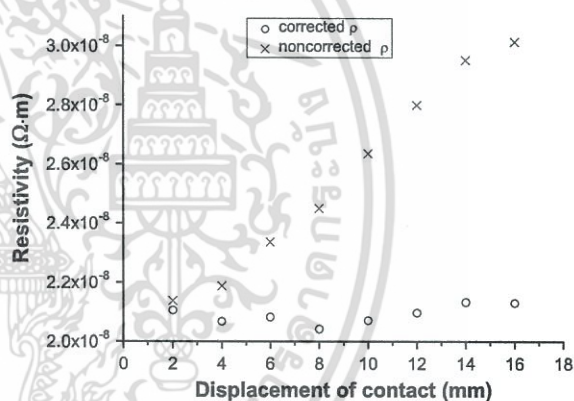


Fig. 8. Dependence of corrected and uncorrected resistivity on symmetric shift of contacts in the direction of y-axis by 2–16 mm.

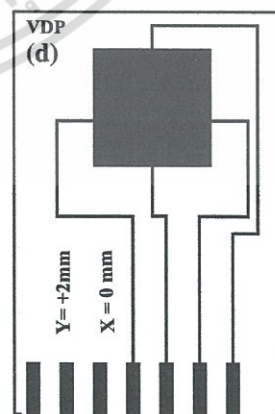


Fig. 9. Example of a shift of the square by +2 mm in the direction of y-axis.

uncorrected value can exceed even 30%, but remains less than an order of magnitude.

3.1.3. Off-centre shift of the square in the y-axis direction,  $\Delta y = 1-5$  mm

This case is sketched in Fig. 9. The dependence of corrected and uncorrected resistivity on a shift of the square shown in Fig. 10 implies that neither of the  $\rho$  values is affected by the shift and, in comparison to the reference value (17), again correctly characterise the tested material. The result of measurements on five samples gives a mean value of  $\rho = 2.1 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  with a scatter of 2.04% at most. It is remarkable that for geometrically asymmetric samples prepared in this way both dependences coincide very closely. This is due to the fact that these samples with apparent geometric asymmetry exhibit electrical symmetry. The proof can be easily obtained using the reciprocity theorem Eqs. (12) and (13) as well as the consequences of axial symmetry with respect to the y-axis. The scatter of measured values is given predominantly by technological fluctuations of the resistivity of the tested foil on the set of samples exhibiting this type of contacting defect. We deal therefore only with apparent symmetry defect in the contacting of the sample.

Similar procedure was used in testing a series of samples according to Figs. 11 and 12. In agreement with expectations, we verified by measurements that the electrical symmetry is not violated by conversion of the square to a rectangle, according to Fig. 11, nor by rotation of the square about its centre, according to Fig. 12. Thanks to this, the corrected and uncorrected resistivity values are identical and true. Even a rotation of rectangles in Fig. 11 about the intersection of its diagonals must lead and, indeed, leads to the conclusion that the measured value is correct even without any numerical correction.

The category of samples with computationally corrigible influence of defects encompasses also the types of cracks in Figs. 13–16. The common characteristic property of these defects is: the cracks are either not isolated, i.e. reach at least one edge of the samples (Figs. 13–16) or extend over the whole length of the sample (Fig. 16) without hindering the passage of current through the rest of the

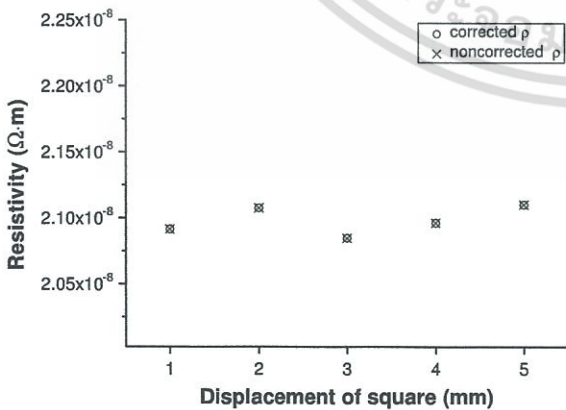


Fig. 10. Dependence of resistivity on the shift of the square by +1 to +5 mm in the y-axis direction.

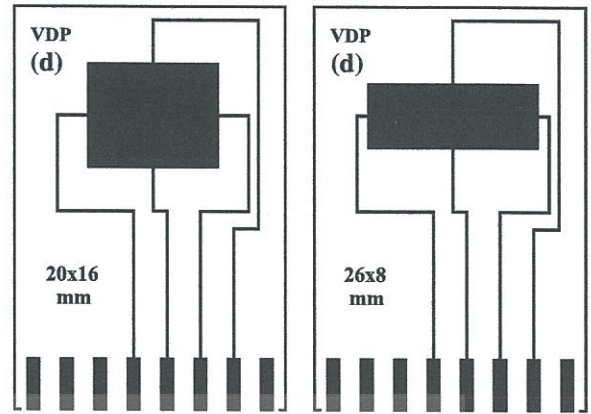


Fig. 11. Example of transformation of the initial square  $18 \times 18$  mm to a rectangle  $20 \times 16$  mm and  $26 \times 8$  mm.

sample (broken corner). A sample damaged in this way still represents a contiguous set from the viewpoint of the VDP theory. Such defect, as a rule, results only in a loss of electrical symmetry of the sample; nevertheless, for the same reason, the corrected resistivity is in principle true. This is of course confirmed by our measurements. The corresponding measure of asymmetry is given in figure captions. The samples are electrically asymmetric, hence a correction is required. However, the corrected value is true because the initial assumptions are not violated.

Corrected value of the resistivity of these samples lies in the range of  $\rho = 2.10 \pm 0.03 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  and, despite the asymmetry, does not significantly differ from the reference value (15) (for example, the circular sample showed the reference resistivity  $\rho = 2.06 \pm 0.01 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ). In practice, various combinations of cracks can be found. Nevertheless, if the remaining part of the sample including the four contacts represents a contiguous set free of holes and isolated cracks not reaching to the borders, the corrected value of the measured resistivity is in principle always true. The examples of samples shown in Figs. 17–19 exhibited resistivity in the same interval as in the preceding case.

3.2. Incurable defects

3.2.1. Length change of a central isolated crack in the horizontal axis  $0.5 \times (2-22$  mm at 2 mm steps)

The samples with a simulated crack are sketched in Fig. 20 and the corresponding graph of the dependence of corrected and uncorrected resistivity on the crack length is shown in Fig. 21. The growth of the crack length results in the rise of both corrected and uncorrected measured resistivity value, and the resulting curve can be approximated by a second-order polynomial. For a given length of the crack, both values (corrected and uncorrected,) are identical, but evidently wrong, as compared to (15). This is a consequence of symmetric position of the crack. The electric symmetry of the sample is not disturbed by the crack; hence both values must be identical. The isolated crack is, of course, an unallowable inhomogeneity, leading to incorrigible measurement error. This is a consequence of

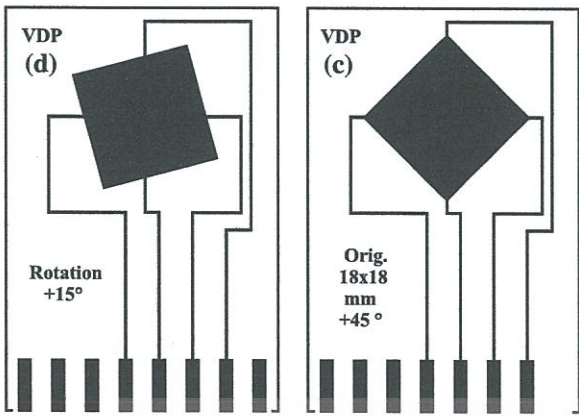


Fig. 12. Example of a rotation of the square by +15° and +45°.

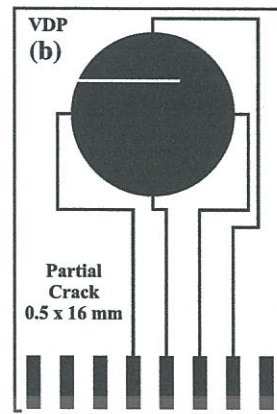


Fig. 15. Horizontal partial crack far from a contact. Measure of electrical asymmetry  $k = 10.0$ .

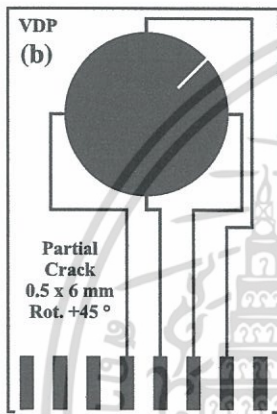


Fig. 13. The case of a partial crack of dimensions  $0.5 \times 6$  mm, (slope +45°). Measure of electrical asymmetry  $k = 1.85$ .

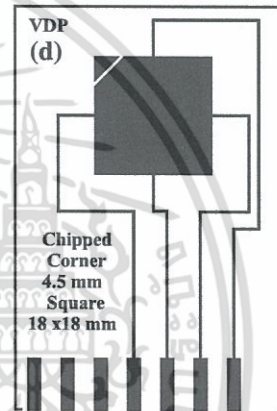


Fig. 16. Chipped corner of a square. Measure of electrical asymmetry  $k = 1.04$ .

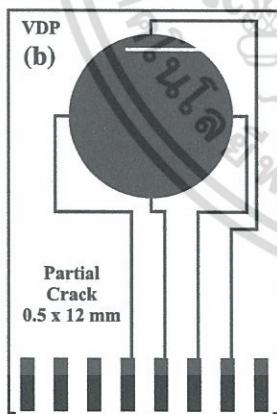


Fig. 14. Horizontal partial crack close to a contact. Measure of electrical asymmetry  $k = 2.63$ .

symmetric position of the crack. Thus, symmetric position of the crack is an insidious defect, at which the sample appears symmetric and reciprocal (see [1]), but the measured resistivity is erroneous and the error increases with increasing length of the crack.

### 3.2.2. Shift of isolated crack of dimensions $12 \times 0.5$ mm along the y-axis by +2 to +10 mm

The scheme of a sample with a simulated shift of the crack is shown in Fig. 22 and the corresponding graph of

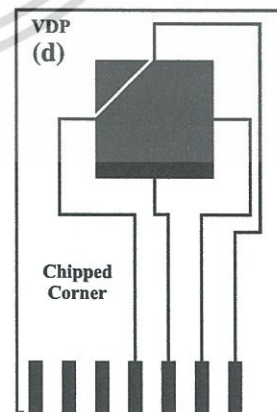


Fig. 17. Electrical asymmetry  $k = 1.94$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

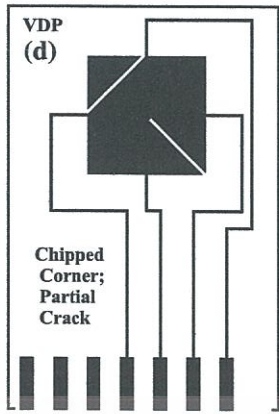


Fig. 18. Electrical asymmetry  $k = 25.6$ .

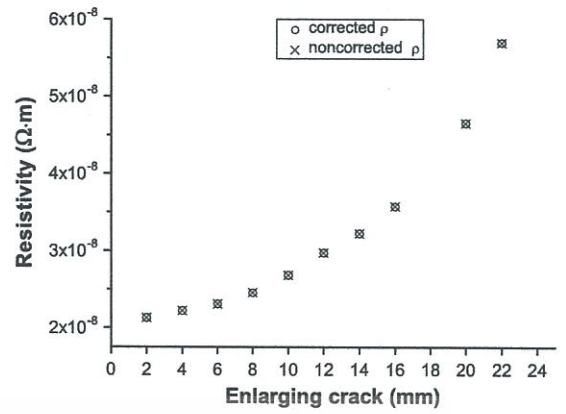


Fig. 21. Dependence of resistivity on crack length increasing from 2 to 22 mm.

dependence of the corrected and uncorrected resistivity from the centre along  $y$ -axis is shown in Fig. 23. Obviously, a shift of the crack disturbed neither the sample symmetry nor its reciprocity. A nearly linear decrease of the mea-

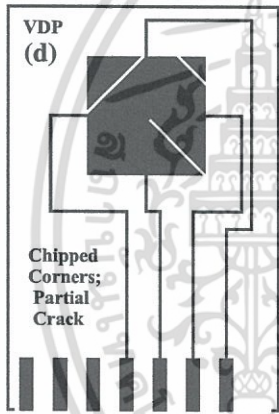


Fig. 19. Electrical asymmetry  $k = 23.3$ .

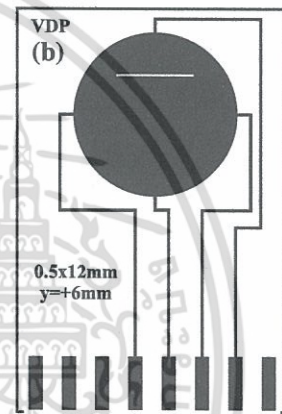


Fig. 22. Example of a shift of an isolated crack of dimensions  $12 \times 0.5$  mm – by 6 mm in the direction of  $y$ -axis.

asured value towards the true value is, however, evident from the graph. The influence of the crack on the measurement error thus decreases with the shift of the defect towards the edge of the sample.

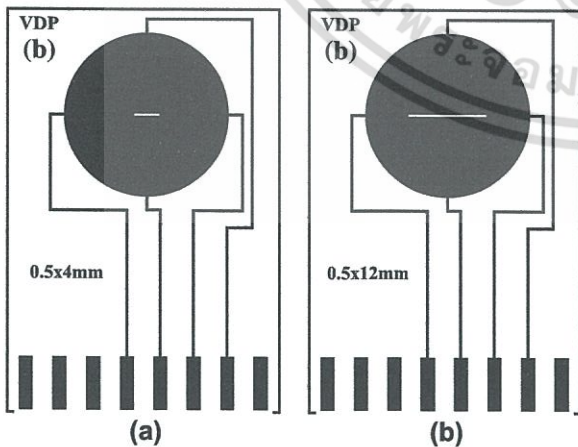


Fig. 20. Example of an isolated crack with dimensions (a)  $0.5 \times 4$  mm and (b)  $0.5 \times 12$  mm.

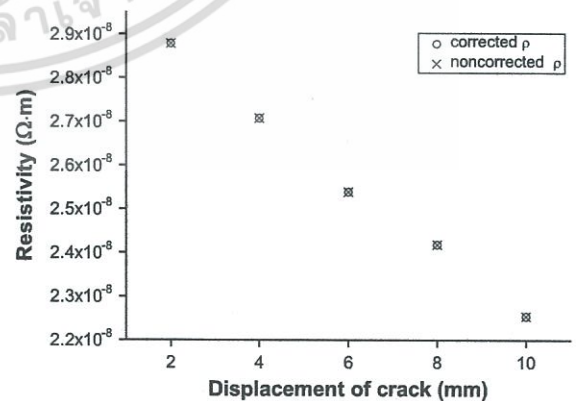


Fig. 23. Dependence of resistivity on crack shift in the direction of  $y$ -axis in the range of 2–10 mm at steps of 2 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

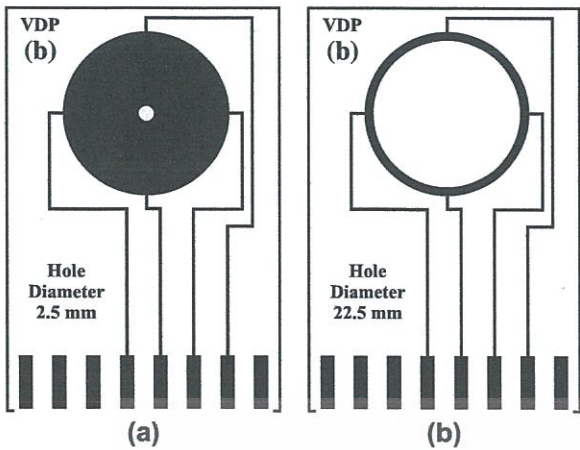


Fig. 24. Examples of a central hole of diameter increasing from 2.5 to 22.5 mm.

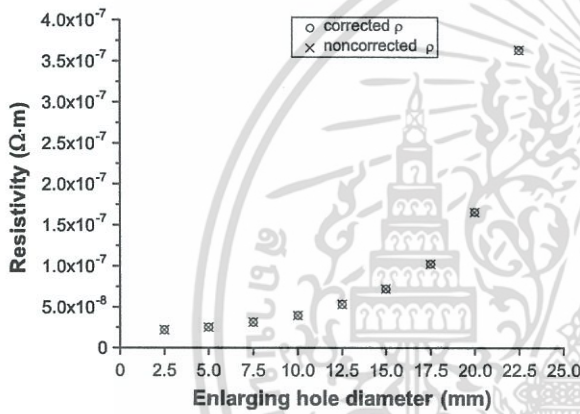


Fig. 25. Dependence of resistivity on hole diameter increasing from 2.5 to 22.5 mm at steps of 2.5 mm.

3.2.3. Central hole of increasing diameter from 2.5 to 22.5 mm

The sample with a simulated central hole of increasing diameter is shown in Fig. 24, and the corresponding graph of corrected and uncorrected resistivity is shown in Fig. 25.

This defect obviously changed neither the electrical symmetry nor the reciprocity of the sample; therefore the corrected and uncorrected values are identical. With increasing diameter of the hole, however, the measured resistivity value steeply increases – hence also the positive error of measurement. The resistivity grew from the original, nearly correct value of  $2.19 \times 10^{-8} \Omega m$  at the hole of diameter 2.5 mm by more than an order of magnitude to  $3.61 \times 10^{-7} \Omega m$  for the hole of diameter 22.5 mm (see Fig. 25).

3.2.4. Rotation of an isolated crack of dimensions  $0.5 \times 22$  mm about the centre, by  $+5^\circ$  to  $+45^\circ$

The sample with a simulated rotated crack is sketched in Fig. 26 and the corresponding graph of the dependence of the corrected and uncorrected resistivity on the angle of rotation is shown in Fig. 27. Increasing angle of rotation results in increasing value of the asymmetry parameter

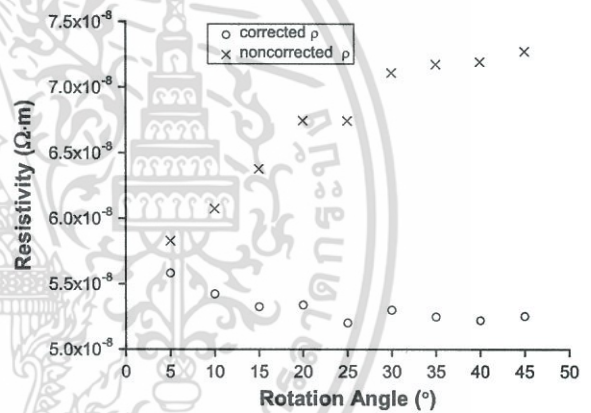


Fig. 27. Dependence of the resistivity on rotation of the crack  $0.5 \times 22$  mm from  $+5^\circ$  to  $45^\circ$ , at  $5^\circ$  steps.

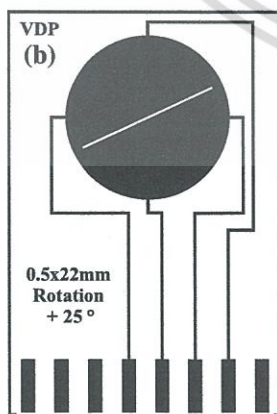


Fig. 26. Example of a sample with a crack  $0.5 \times 22$  mm, rotated by  $+25^\circ$ .

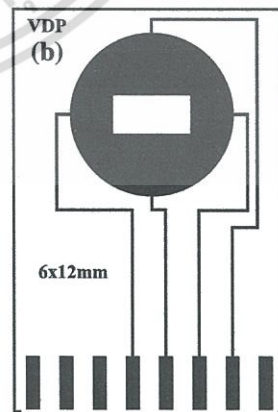


Fig. 28. Example of a defect of rectangular shape of with dimensions  $12 \times 6$  mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

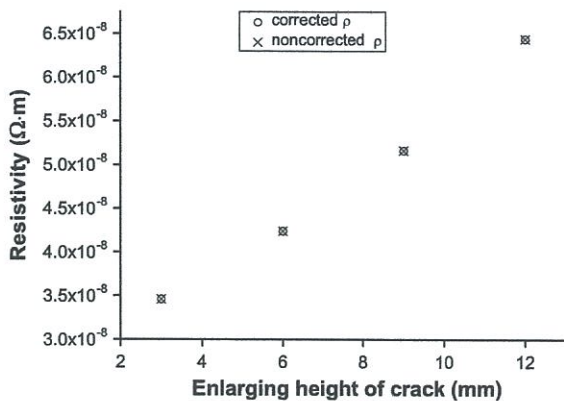


Fig. 29. Dependence of the resistivity on increasing height of a rectangular defect.

from  $k = 2$  to  $k = 10$ . The measured and corrected resistivity value decreases with increasing rotation from  $5.58 \times 10^{-8} \Omega m$  to  $5.25 \times 10^{-8} \Omega m$ . On the contrary, the uncorrected measured value increases with increasing angle of rotation, showing a polynomial (2nd order) dependence on the angle, see Fig. 27. In comparison with (15), however, all values are evidently wrong and the error exceeds 100%.

### 3.2.5. Rectangular hole of variable height, of dimensions $12 \times (3-12) \text{ mm}$

An example of this defect is shown in Fig. 28. The measured resistivity value, in agreement with expectations, increases with symmetrically increasing height of the rectangular hole in the  $y$ -axis (see Fig. 29). Neither the symmetry nor the reciprocity is disturbed (a symmetrical defect is symmetrically placed). The values are, however, wrong. Positive error significantly increases.

We arrived to analogous conclusions, when we shifted the rectangle towards the edge (the symmetry was not violated and the error decreased with the shift). If we rotated the rectangle about its centre in the range of  $0-45^\circ$ , the asymmetry increases with the angle of rotation and the same is true for the uncorrected resistivity. The corrected resistivity drops down, but neither of the values is correct.

## 4. Conclusions

If a perfect geometrically symmetric sample of a layer is provided with symmetrically placed contacts, the resistivity measurements by VDP technique show also electrical symmetry, and the values of the measured resistivity, evaluated from the simplified Eqs. (7) or (8) need not be computationally corrected.

If the sample, even if prepared as a symmetrical one in the sense of the preceding paragraph, shows electrical asymmetry, the cause may follow from asymmetric contacting or from a mechanical damage to the sample.

From the viewpoint of the general theory of VDP technique, asymmetric contacting of the sample is not a defect in the true sense of the word. In general, the theory allows for an arbitrary shape of the sample and arbitrary positions

of the (otherwise distinct) contacts. In general, however, we must not use the simplified Eqs. (7) or (8). It is necessary to employ a general evaluation in the sense of Eqs. (9) and (10), i.e. to correct the values calculated according to Eqs. (7) and (8) for asymmetry.

If the mechanical damage to the sample by cracks (e.g. chipping, cracking, scratching, etc.) is of such character that the remaining contiguous part of the sample is contacted by all four contacts, and no crack nor hole lies completely within the contacted region (the cracks are not isolated), then the true value of the resistivity can be again obtained by numerical correction of the measured value in the sense of Eqs. (9) and (10).

In the remaining cases of a damaged layer, the measured value of the resistivity need not be true and, in general, the true value cannot be obtained even by numerical correction of the measured value.

Each defect that has the character of an isolated crack or general hole localised within the region tested by VDP technique leads to incorrect measured resistivity value, irrespective of the fact whether its location in the originally symmetric sample gives rise to electrical asymmetry or not. While the error may be mitigated by correction for asymmetry, it cannot be in principle removed.

If the defect is symmetric and symmetrically localised within an electrically symmetric sample, it does not give rise to electrical asymmetry, but – notwithstanding – it results in incorrect measured values. Hence, mere electrical symmetry of a sample with (isolated) cracks and holes does not imply correctness of the measured results.

Corrigible and incorrigible defects in the above mentioned sense were in no case (in agreement with reciprocity theorem) the cause of non-reciprocity of the samples. Manifest non-reciprocity was not observed in any sample tested by us (Cu foil,  $35 \mu m$  thick). All tested samples obeyed reciprocity in the sense of Eqs. (12) and (13).

## Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of their study from the following grants:

MSM 6046137302, MSM 6046137306 and VSCHT A1 FCHT 2010 001.

## References

- [1] A.A. Ramadan, R.D. Gould, A. Ashour, On the van der Pauw method of resistivity measurements, *Thin Solid Films* 239 (1994) 272–275.
- [2] D.W. Koon, Effect of contact size and placement, and of resistive inhomogeneities on van der Pauw measurements, *Rev. Sci. Instrum.* 60 (1989) 271–274.
- [3] Van der Pauw, A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape, *Philips Res. Rep* 13 (1958) 1–9.
- [4] D.W. Koon, Nonlinearity of resistive impurity effects on van der Pauw measurements, *Rev. Sci. Instrum.* 77 (2006) 1–4.
- [5] D.W. Koon, C.J. Knickerbocker, Effects of macroscopic inhomogeneities on resistive and Hall measurements on crosses, cloverleaves, and bars, *Rev. Sci. Instrum.* 67 (1996) 4282–4285.
- [6] D.W. Koon, W.K. Chan, Direct measurement of the resistivity weighting function, *Rev. Sci. Instrum.* 69 (1998) 4218–4220.
- [7] R. Chwang, B.J. Smith, C.R. Crowell, Contact size effects on the van der Pauw method for resistivity and Hall coefficient measurement, *Solid State Electron.* 17 (1974) 1217–1227.

- [8] J.D. Weiss, R.J. Kaplar, K.E. Kambour, A derivation of the van der Pauw formula from electrostatics, *Solid State Electron.* 52 (2008) 91–98.
- [9] J.H. Kang, K.M. Yu, H.J. Kim, J.Ch. Ryu, S.O. Hang, Comparisons of precision measurement methods for metallic resistivities, *Key Eng. Mater.* 321–323 (2006) 1465–1469.
- [10] P. Slepíčka, Z. Kolská, J. Náhlík, V. Hnatowicz, V. Švorčík, Properties of Au nanolayers on polyethyleneterephthalate and polytetrafluoroethylene, *Surf. Interface Anal.* 41 (2009) 741–745.
- [11] A.T. de Hoop, A reciprocity theorem for the electromagnetic field scattered by an obstacle, *Appl. Sci. Res. Sect. B* 8 (1960) 135–140.
- [12] M. Robles et al., Effective conductivity of chemically deposited ZnO thin films, *Thin Solid Films* 293 (1977) 320–326.
- [13] ASTM F76-08, Standard Test Methods for Measuring Resistivity and Hall Coefficient and Determining Hall Mobility in Single-Crystal Semiconductors.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

