การพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธี 4-Point Probe

THE DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM FOR PROPERTY OF SEMICONDUCTOR USING FOUR-POINT PROBE

นายกรรชิตทรง โพธิ์ศรี

นายจักรพันธ์ วิชาโคตร

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธี 4-Point Probe

THE DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM FOR PROPERTY OF SEMICONDUCTOR USING FOUR-POINT PROBE

นายกรรชิดทรง โพธิ์ศรี
นายจักรพันธ์ วิชาโคตร

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

THE DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM FOR PROPERTY OF SEMICONDUCTOR USING FOUR-POINT PROBE

KUNCHIDSONG PHOSRI

JAKKAPAN WICHAKHOT

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อโครงงานพิเศษ การพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธี 4-Point Probe

THE DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM FOR PROPERTY OF SEMICONDUCTOR USING FOUR-POINT PROBE

ชื่อนักศึกษา นาย กรรชิดทรง โพธิ์ศรี

นาย จักรพันธ์ วิชาโคตร

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ประจาปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
อ.ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์	
อ.สุรชาติ กมลดิลก	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงงานพิเศษ การพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธี 4-Point Probe
ชื่อนักศึกษา นาย กรรชิดทรง โพธิ์ศรี
นาย จักรพันธ์ วิชาโคตร
ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2556
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการวัดของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีFour - Point probe เป็นการป้อนค่าลงคอมพิวเตอร์แล้วคำนวณค่าสภาพต้านทานออกมาจากเดิมที่เป็นการป้อนค่ากระแสด้วยมือ แล้วอ่านค่าแรงดัน จากนั้นนำมาคำนวณค่าสภาพต้านทานด้วยตนเอง โพรบสี่ขั้วที่พัฒนาแล้วสามารถเปลี่ยนเฉพาะหัวเข็มได้หากเกิดการชำรุดเสียหายขึ้นมา แทนการเปลี่ยนหัววัดทั้งชุด ชิ้นงานที่ทำการวัดสามารถเลื่อนขึ้นไปเพื่อสัมผัสกับหัวเข็ม กระแสคงที่จะถูกป้อนผ่านขั้วไฟฟ้าคู่นอกและความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าคู่ในจะถูกวัดด้วยโวลต์มิเตอร์ การกำหนดค่ากระแสคงที่รวมทั้งการบันทึกค่าความต่างศักย์และจำนวนครั้งที่จะทำการวัด ตลอดจนค่าสภาพต้านทานจะทำผ่านคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม Visual Basic ระบบที่พัฒนาขึ้นได้รับการทดสอบการวัดชิ้นงานทั้ง 8 ชิ้นงาน ที่เครื่องจริง จากนั้นนำมาวัดที่เครื่องที่พัฒนาแล้ว โดยจะทำการวัด 1 ชิ้นงานวัดทั้งสองเครื่องแล้วค่อยทำการวัดชิ้นถัดไป เพื่อลดปัญหาออกไซด์มาเกาะที่ชิ้นงานหากชิ้นงานสัมผัสกับอากาศนานเกินไป ผลปรากฏว่า ชิ้นงานที่ทำการวัดจากเครื่องที่พัฒนาแล้วมีค่าสภาพต้านทานเฉลี่ยใกล้เคียงกับชิ้นงานที่วัดจากเครื่องมาตรฐานพอสมควร

คำสำคัญ: Four - Point probe

Title	THE DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM FOR PROPERTY OF SEMICONDUCTOR USING FOUR-POINT PROBE
Students	KUNCHIDSONG PHOSRI
	JAKKAPAN WICHAKHOT
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2556
Advisor	Assoc.Prof. Dr. WARAWOOT THOWLADDA

ABSTRACT

This special project is a development of measurement system of semiconductor using four-point probe. People entered value into the computer and calculated the resistivity. Before, People entered current value by manual then read voltage value. After that resistivity values calculated manually. Four-point probe have developed to change probe if damaged. Instead of changing the entire series.Sample can be moved up to contact the probe. A constant current is applied into the sample through the two outer probes, and the other is measured between the two inner voltage probes. After setting a constant current source, the system is automatically recorded voltage and number of cycle of measurement by the computer with Visual Basic programming. The resistivity of the sample can be calculated by measure data. The system developed has been calibrated 8 samples in standard machine. After that bring to measure at developed machine. Measurement alternate machine then the next sample is measured to reduced the oxide adhesion to the sample if the sample is contacted to air for a long time. As result, the samples measured from the developed machine have the average resistivity value to close to the sample measured from the standard machine

Keyword: four-point probe

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สามารถสามารถเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความสนับสนุนช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

รศ. ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา	ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้ทั้งวิชาการและเทคนิคต่างๆ คอยให้คำปรึกษาในการทำงานและการแก้ไขปัญหาต่างๆจนโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี
ดร. ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	ที่คอยให้คำแนะนำต่างๆมาโดยตลอดจนโครงงานนี้เสร็จสมบูรณ์ และการแก้ไขการใช้เครื่องมือที่เกิดความบกพร่องขณะปฏิบัติงานมาโดยตลอด
คุณ สุภัตรา หมื่นสมบูรณ์พงษ์	ที่คอยให้คำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับตัวอย่างที่ทำการวัดและเครื่องมือ เครื่องใช้มาโดยตลอด

ท้ายที่สุดขอขอบคุณเพื่อนร่วมสาขาทุกคน ที่คอยให้กำลังใจในการทำโครงงานนี้ บิดามารดาที่คอยเป็นแรงผลักดันในการทำงาน และภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และเงินสนันสนุนสำหรับทำโครงงานพิเศษนี้

นาย กรรชิดทรง โพธิ์ศรี
นาย จักรพันธ์ วิชาโคตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
คำย่อและสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสาคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**3**
2.1 สารกึ่งตัวนำ	3
2.2 สภาพต้านทานไฟฟ้า	5
2.3 การวัดสภาพต้านทานและความเข้มข้นของพาหะ	6
2.4 วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	8
2.5 Two and Four point probe instrumentation	13
2.6 ERROR IN TWO- AND FOUR-POINT MEASUREMENTS	16
2.7 วิธีวัดสภาพต้านทานโดยวิธีของแวนเดอร์พอว์(Van der Pauw)	19
2.8 วิธีวัดสภาพความต้านทานโดยวิธี 4 ขั้ว (Four point probes)	23

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงานพิเศษ	23
3.2 ลักษณะของอุปกรณ์	23
3.2.1 Constant Current Source	23
3.2.2 Multimeter	25
3.2.3 4-Point Probe	27
3.2.4 SnO_2	28
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	28
3.4 โปรแกรมควบคุมและวัดบันทึกผล	29
3.5 Flow Chart ของโปรแกรม	35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	36
4.1 ผลการวิจัย	36
4.2 อภิปรายผล	57
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลวิจัย	58
5.2 ปัญหาในการทดลอง	58
5.3 ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม 4-point probe	A
ภาคผนวก ข. Code ของโปรแกรม 4-point probe (Visual Basic)	G

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 แสดงการนำเอาสารกึ่งตัวนำมาประดิษฐ์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	3
2 รูปแบบของการวัดสภาพต้านทานแบบ 2-point probe	9
3 แท่งและโพรบสำหรับการวัดสภาพต้านทานตามการเปลี่ยนแปลงของรัศมี	10
4 การวัดสภาพต้านทานแบบ 4 point probe ในแนวเส้นตรง	11
5 วิธีชีอปเปอร์สำหรับการเปรียบเทียบภายในของโพรบแรงดัน	14
6 การสอบเทียบ 4-point probe	16
7 สารตัวอย่างรูปร่างต่างๆ	20
8 การต่อขั้วไฟฟ้าชิ้นงาน	20
9 การวัดสภาพต้านทานโดยวิธี 4 ขั้ว	21
10 Constant Current Source ด้านหน้า	23
11 Constant Current Source ด้านหลัง	24
12 ปุ่มแสดงการทำงานของเครื่อง	24
13 Multimeterด้านหน้า	25
14 Multimeterด้านหลัง	26
15 4-Point Probe	27
16 ความหมายของ 4-point probe	27
17 SnO_2	28
18 การเตรียมอุปกรณ์	28
19 แสดงการออกแบบฟอร์มของหน้าแรก	30
20 แสดงการออกแบบฟอร์มในหน้าการวัดผลและแสดงผล	30
21 แสดงการกำหนดคุณสมบัติต่างๆของส่วนประกอบในฟอร์ม	31
22 แสดงตัวอย่างการเขียนคำสั่งของปุ่มกดบางส่วนในฟอร์มที่ออกแบบไว้	32
23 แสดงการต่อสาย GPIB ระหว่างเครื่องมือวัดกับคอมพิวเตอร์	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
24 แสดงการส่งคำสั่งไปยังเครื่องมือวัดผ่านโปรแกรม AgilentIO Library suite	33
25 แสดงการตอบสนองของเครื่องมือ เมื่อได้รับคำสั่งจากโปรแกรม	33
26 แสดงการออกแบบ user interface และตัวอย่างการเขียนโปรแกรม เชื่อมต่อกับเครื่องมือ	34
27 Flow Chart ของโปรแกรม	35
28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของSnO_2 ความหนา 479 nm (เครื่องจริง)	36
29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของSnO_2 ความหนา 479 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	37
30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ IของSnO_2 ความหนา 574 nm (เครื่องจริง)	38
31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 574 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	39
32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 832 nm (เครื่องจริง)	40
33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 832 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	41
34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 718 nm (เครื่องจริง)	42
35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 718 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	43
36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 833 nm (เครื่องจริง)	44
37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 833 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	45
38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 770 nm (เครื่องจริง)	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 770 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	47
40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ ITO ความหนา 1160 nm อบที่อุณหภูมิ 400°c (เครื่องจริง)	48
41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ ITO ความหนา 1160 nm อบที่อุณหภูมิ 400°c(เครื่องที่สร้างขึ้น)	49
42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ (เครื่องจริง)	50
43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ (เครื่องที่สร้างขึ้น)	51
44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm) (ความหนา 479 nm)	52
45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm) (ความหนา 574 nm)	52
46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm) (ความหนา 832 nm)	53
47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm) (ความหนา 718 nm)	53
48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm) (ความหนา 833 nm)	54
49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm) (ความหนา 770 nm)	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm) (ความหนา 1160 nm อบ) 55

51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm) (ความหนา 1160nm ไม่อบ) 55

52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง deposition time (hr) กับ Resistivity (Ω.cm) ความเข้มข้น 0.2 M 56

53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง deposition time (hr) กับ Resistivity (Ω.cm) ความเข้มข้น 0.3 M 56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
2.1 วิธีวัดสภาพต้านทานให้ตรงตามที่ต้องการ	7
3.1 การใช้งานเครื่อง Multimeter	26
4.1 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 479 nm (เครื่องจริง)	36
4.2 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 479 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	37
4.3 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 574 nm (เครื่องจริง)	38
4.4 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 574 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	39
4.5 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 832 nm (เครื่องจริง)	40
4.6 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 832 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	41
4.7 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 718 nm (เครื่องจริง)	42
4.8 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 718 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	43
4.9 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 833 nm (เครื่องจริง)	44
4.10 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 833 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	45
4.11 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 770 nm (เครื่องจริง)	46
4.12 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 770 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)	47
4.13 ผลการทดลอง ITO ความหนา 1160 nm อบที่อุณหภูมิ 400 องศา (เครื่องจริง)	48
4.14 ผลการทดลอง ITO ความหนา 1160 nm อบที่อุณหภูมิ 400 องศา (เครื่องที่สร้างขึ้น)	49
4.15 ผลการทดลอง ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ (เครื่องจริง)	50
4.16 ผลการทดลอง ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ (เครื่องที่สร้างขึ้น)	51

คำย่อและสัญลักษณ์

R	ความต้านทานรวม
A	พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป
ρ	สภาพต้านทาน
L	ความยาวของวัสดุที่ทำการวัด
V	ความต่างศักย์
I	กระแสที่ไหล
S	ระยะห่างระหว่างขั้วของโพรบ
R_s	ความต้านทานแผ่น
R_A	ความต้านทานไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานผ่านขั้ว 1 ไปขั้ว 2และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมที่จุดที่ 3 และ 4
R_B	ความต้านทานไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานผ่านขั้ว 2 ไปขั้ว 3และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมที่จุดที่ 1 และ 4
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน
t	ความหนาของชิ้นงาน
f_1	Finite Thickness
f_2	Finite Width
SnO_2	ทินออกไซด์
ITO	อินเดียมทินออกไซด์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้นจะต้องคำนึงถึงสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำไม่ว่าจะเป็น สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ด้วย เพราะสารกึ่งตัวนำแต่ละแบบ แต่ละชนิดนั้นจะมีสมบัติต่างกัน ซึ่งเหมาะแก่การใช้งานที่ต่างกันแล้วแต่ความต้องการ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมืออย่างเช่น 4-Point Probe ซึ่งในการหาค่าการนำไฟฟ้านี้จะใช้ 4-Point Probe เป็นเครื่องมือในการวัดค่า ซึ่ง 4-Point Probe นี้สามารถใช้วัดตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นแบบแผ่นบางและก้อน โดยไม่ทำความเสียหายให้แก่ชิ้นงานด้วย

แต่ในการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำนั้นปกติจะทำการวัดสภาพต้านทานโดยการป้อนค่าต่างๆด้วยมือ ซึ่งการป้อนค่าต่างๆด้วยมือนั้น ต้องใช้ระยะเวลาพอสมควรในการที่ผู้ใช้จะต้องมานั่งป้อนค่าทีละค่า บางครั้งในการป้อนค่าอาจเกิดความผิดพลาดได้ และหัวโพรบนั้นเป็นหัวโพรบแบบสำเร็จ หากเกิดการชำรุดหรือเสียหายขึ้นมา จะต้องเปลี่ยนหัวโพรบทั้งหัว ซึ่งมีราคาที่สูงมาก เพื่อป้องกันการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว เราจึงต้องออกแบบพัฒนาระบบการวัดขึ้นมาโดยสั่งโปรแกรมคำนวณค่าสภาพต้านทานให้เรียบร้อย เพียงป้อนค่ากระแส ระยะห่างระหว่างโพรบ ความหนาของชิ้นงาน จำนวนรอบที่ทำการวัด และหมายเลขเครื่องของแหล่งจ่ายกระแสและมัลติมิเตอร์ ระบบก็จะทำการวัดแรงดัน และนำไปคำนวณค่าสภาพต้านทานในแต่ละรอบและแสดงค่าเฉลี่ยให้เราทราบ ในส่วนของหัวโพรบได้ออกแบบมาให้สามารถเปลี่ยนได้เฉพาะเข็มที่ใช้วัดทั้งสี่เข็ม เข็มที่ใช้วัด เป็นส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงานสม่ำเสมอ เป็นธรรมดาที่เข็มจะเกิดการชำรุดเสียหาย หากเข็มเกิดชำรุดขึ้นมา ซึ่งเข็มที่ใช้วัดนี้มีราคาไม่สูงมาก ทำให้เราไม่ต้องเปลี่ยนหัวโพรบทั้งหัว เป็นการสร้างความสะดวกสบาย รวดเร็วและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำให้เป็นแบบอัตโนมัติ

1.2.2 เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจหลักการทำงานของ 4-point probe

1.2.3 เพื่อสร้างหัววัดของ 4-point probe ด้วยต้นทุนต่ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาประวัติความเป็นมาของ 4-point probe

1.3.2 ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของ 4-point probe

1.3.3 ออกแบบและเขียนโปรแกรมการทำงานที่ใช้ร่วมกับเครื่องมือ 4-point probe

1.3.4ออกแบบชุดจับยึดเข็ม

1.3.5 ทดสอบการใช้ระบบการวัดของ4-point probe

1.3.6 วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัยของโปรแกรมการทำงานกับเครื่องมือ4-point probe

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
มิถุนายน – กรกฎาคม พ.ศ. 2556	- ศึกษาหลักการทำงานของ4-point probe - ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Visual Basic
สิงหาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2556	- ออกแบบระบบการทดลองและเขียนโปรแกรมการทำงานที่ใช้ ร่วมกับอุปกรณ์ - ทำการสอบระบบการวัด และบันทึกผล
มกราคม – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557	- วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองเพื่อทำการปรับปรุงการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้และความเข้าใจในทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการทำงานของ 4-point probe

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในการเชื่อมต่อของโปรแกรม และเครื่องมือวัด 4-point probe

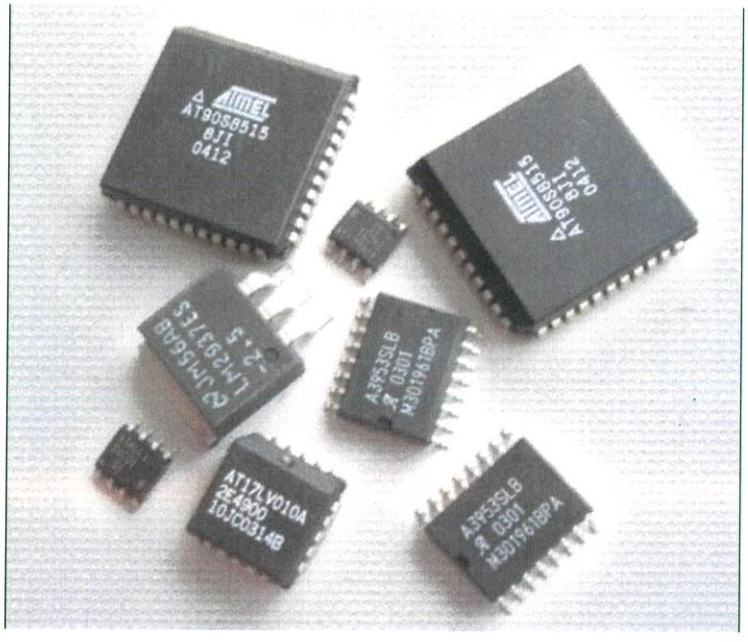
1.5.3 สามารถนำโปรแกรมที่เขียนไปใช้กับการวัดการทดลองได้จริง

1.5.4 สามารถพัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ด้วยโปรแกรมที่เขียนเชื่อมต่อกับ 4-point probe ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและมีความแม่นยำในการวัดมากขึ้น

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ

สารบางชนิดนำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทองแดง เหล็ก สังกะสี สารบางชนิดไม่นำไฟฟ้า แต่เป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น แก้ว ยาง พลาสติก สารที่มีคุณสมบัติไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า เรียกว่า สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเราสามารถควบคุมการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ เราจึงนำเอาสารกึ่งตัวนำมาประดิษฐ์สร้างเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีชื่อ เรียกว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ได้มากมาย เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และวงจรไอซี ในเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เราใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น ใน วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ ล้วนแล้วแต่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบสำคัญทั้งสิ้น สารกึ่งตัวนำที่ใช้ประโยชน์มากที่สุด ได้แก่ ซิลิคอน ซึ่ง เป็นธาตุที่ถลุงได้จากทราย และเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง



รูปที่ 1 การนำเอาสารกึ่งตัวนำมาประดิษฐ์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.1.1 ความหมายของสารกึ่งตัวนำ

สสารทุกชนิดประกอบด้วยส่วนประกอบเล็กๆ ที่เรียกว่า "โมเลกุล" มารวมตัวกัน โดยแต่ละโมเลกุลก็จะประกอบด้วยส่วนที่เล็กมากๆ ซึ่งเรียกว่าอะตอม เช่น โมเลกุลของน้ำจะประกอบด้วยอะตอม 3 อะตอม คืออะตอมของไฮโดรเจน (Hydrogen) 2 อะตอม และ อะตอมของออกซิเจน (Oxygen) 1 อะตอมมารวมกัน โดยอะตอมแต่ละอะตอมจะมีแกนกลางซึ่งเรียกว่านิวเคลียส ซึ่งจะมีนิวตรอนและโปรตอนอยู่ภายใน และจะมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบๆนิวเคลียสหลายๆวง โดยอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดเรียกว่า วาเลนอิเล็กตรอน (Valence Electron) จะมีผลต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของสสารนั้น สสารที่เป็นตัวนำ (Conductor) จะมีอิเล็กตรอนวงนอกเพียง 1-3 ตัว ดังนั้นเมื่อมันได้รับพลังงานความร้อน หรือ พลังงานไฟฟ้า อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกมาจากวงโคจรเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) ได้ทันที ทำให้สามารถเคลื่อนตัวไปในสสารได้อย่างอิสระ ซึ่งเราเรียกการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนนี้ว่า "กระแสไฟฟ้า" ดังนั้นสสารที่เป็นตัวนำจึงมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี ส่วนสสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอกตั้งแต่ 5-8 ตัว เราจะเรียกว่า "ฉนวน" (Insulator) จะมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ไม่ดีนัก เพราะมีอิเล็กตรอนอิสระน้อย สำหรับสสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 4 ตัว เช่น ซิลิกอน (Silicon) และเยอร์มันเนียม (Germanium) จะมีสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เราเรียกว่า "สารกึ่งตัวนำ" (Semiconductor)

2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

สารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้า และฉนวนไฟฟ้า จึงเป็นสารที่เราสามารถควบคุมคุณสมบัตินำไฟฟ้าของมันได้ โดยการเติมสารเจือปนลงไปในขณะที่เตรียมสารกึ่งตัวนำนั้นๆในเครื่องใช้ไฟฟ้าทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็น วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ เครื่องซักผ้า เตาไมโครเวฟ คอมพิวเตอร์ เราจะพบเห็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ในนั้น อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบางชนิดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีขาต่อ 2 ขา เรียกว่า ไดโอด ทำหน้าที่ดัดกระแสไฟฟ้าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบางชนิดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีขาต่อ 3 ขา เรียกว่า ทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวปิดเปิดสัญญาณไฟฟ้า หรือทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้า อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบางชนิดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีขาต่อหลายสิบขา เรียกว่า วงจรไอซี ทำหน้าที่เป็นวงจรตรรก วงจรจำ วงจรขยายสัญญาณ วงจรปรับแรงดัน วงจรกำหนดความถี่ ฯลฯ

สารกึ่งตัวนำจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเครื่องใช้ไฟฟ้าทุกชนิด สารกึ่งตัวนำที่นำมาผลิตเป็นอุตสาหกรรมมากที่สุด ได้แก่ ซิลิคอน ซึ่งเป็น ธาตุที่ถลุงได้จากทราย ซิลิคอนเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีมากที่สุดในโลก ทำให้อุปกรณ์ สารกึ่งตัวนำมีราคาถูก มีขนาดจิ๋ว น้ำหนักเบา จึงทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าสมัยใหม่ที่ใช้ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีขนาดกะทัดรัด และกินไฟฟ้าน้อย สารกึ่งตัวนำจึงเปรียบเสมือน วัสดุพื้นฐานของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน

2.1.3 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ คือ ธาตุกึ่งตัวนำที่ยังไม่ได้เติมสารเจือปน (Doping) ลงไปธาตุกึ่งตัวนำที่นิยมนำไปทำเป็นสารกึ่งตัวนำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็คือ ธาตุกึ่งตัวนำซิลิกอน และธาตุกึ่งตัวนำเยอรมันเนียม ธาตุทั้งสองชนิดนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว แต่อิเล็กตรอนทั้งหมดจะไม่เท่ากัน โดยซิลิคอนจะมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 14 ตัว ส่วนเยอรมันเนียมจะมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 32 ตัว ต่อหนึ่งอะตอม

2.1.4 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ คือการนำเอาธาตุซิลิคอนหรือธาตุเยอรมันเนียมบริสุทธิ์มาเติมเจือปนลงไป โดยใช้ธาตุเจือปนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตัว หรือธาตุเจือปนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 5 ตัว ลงไปในอัตราส่วน 108: 1 คือธาตุกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ 108 ส่วนต่อสารเจือปน 1 ส่วน ซึ่งจะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำใหม่ขึ้นมา คือถ้าเติมธาตุเจือปนที่วาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวลงไป ตัวนำชนิดเอ็น แต่ถ้าเติมธาตุเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ลงไปจะได้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ที่นำมาใช้เป็นธาตุเจือปนเช่นโบรอน อินเดียม แกลเลียม และอลูมิเนียม ส่วนธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวที่นำมาใช้เป็นธาตุเจือปน เช่น ฟอสฟอรัส อาเซนิค

2.2 สภาพต้านทานไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลนั้นหมายถึงมีการเคลื่อนไหวของพาหะ(อิเล็กตรอน)ในเส้นลวดสายไฟและอิเล็กตรอนจะวิ่งชนกับอะตอมของขดลวดทำให้เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น เราเรียกว่า “ความต้านทาน” (Resistance) ความต้านมานมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm) ความต้านทานจะเกิดขึ้นทุกๆที่ที่มีกระแสไหลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในสายไฟเท่านั้น ตัวอย่างความต้านทานต่างๆมีดังนี้

1. ความต้านทานของตัวนำ ได้แก่ ความต้านทานของลวดสายไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไหลผ่าน
2. ความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ ความต้านทานของสารกรดเกลือ กรดกำมะถัน น้ำเกลือ เป็นต้น
3. ความต้านทานของฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วจากสายไฟจะใช้ไวนิลหรือยางซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานสูงหุ้มสายไฟนั้นไว้ เราเรียกการป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วนี้ว่า “การฉนวน” และเรียกวัสดุที่ใช้ในการฉนวนนี้ว่า “ฉนวน” แต่การฉนวนนั้นไม่ได้หมายความว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไม่ได้เลย
4. ความต้านทานของจุดสัมผัส ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสของวิตซ์หรือรอยเชื่อมต่อระหว่างสายไฟที่จุดสัมผัส กระแสจะไหลได้ยากเพราะจะเกิดความต้านทานขึ้น ความต้านทานของจุดสัมผัสนี้จะเป็นปัญหามากเมื่อให้กระแสจำนวนมากไหลผ่าน ค่าของความต้านทานแบบนี้จะลดได้โดยการขัดผิวที่สัมผัสให้เรียบหรือเพิ่มแรงกดที่จุดสัมผัส

5. ความต้านทานของสายดิน ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินกับแผ่นโลหะที่ฝังลงดิน

2.3 การวัดสภาพต้านทานและความเข้มข้นของพาหะ

สภาพต้านทาน ความเข้มของพาหะ และ ความเข้มของสารเจือปน ทั้งหมดล้วนมีความสัมพันธ์กัน และสำหรับสิ่งเจือปนส่วนมากในสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ รู้ความสัมพันธ์แล้ว ดังนั้นการกำหนดของทั้งสามคนนั้นจะเพียงพอแล้วโดยปกติแล้วในหลายกรณีความต้องการพิเศษที่กำหนด ตัวอย่างเช่น การวัดในพื้นที่ที่เล็กมากๆ ในขณะที่ทฤษฎีตามวิธีส่วนใหญ่อธิบายว่าใช้ได้ในทางปฏิบัติ บางอย่างจะเหมาะสมกว่าอย่างอื่น ตารางที่1 จะบอกว่า แบบไหนเหมาะที่จะใช้วิธีแบบไหน

การพิจารณาทั่วไป

วิธีเกือบทั้งหมดสามารถใช้ได้ไม่วัสดุพหุผลึกก็วัสดุผลึกเดี่ยวแต่การอธิบายที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างมากอาจจะต้องการแค่ตัวอย่างที่เป็นพหุผลึก ขอบเกรนทำงานอย่างแตกต่างไปจากผลึกเฉพาะตัว และมันไม่สามารถบอกได้ในเบื้องต้นเสมอไปว่าค่าสภาพต้านทานที่เห็นจะมากกว่า หรือน้อยกว่าวัสดุที่คล้ายกันโดยปราศจากขอบเกรน (นั่นก็คือ วัสดุผลึกเดี่ยว) โดยเฉพาะถ้ามีความเป็นไปได้ของตะกอนตามขอบหลายขอบ นอกจากนี้ยังเกิดปัญหาการอธิบายขึ้น ซึ่งสภาพต้านทานในตัวอย่างแจกต่างกันอย่างมาก (ตัวอย่างเช่น ผลึก β-silicon carbide ใน เมตริกซ์ของ silicon carbide ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน) หรือถ้ามีระยะเดียวซึ่งเป็นแอนไอโซโทรปิค หลายชั้นของค่าสภาพต้านทานมีค่าสูงต่ำสลับกัน หรือชนิด p-nทำให้วัสดุหลายชิ้นเกิดการไม่เท่ากันทุกทิศทาง ตั้งแต่การวัดด้วยกระแสขนานกับชั้นแทบจะแตกต่างจากกระแสที่ไหลในแนวตั้งฉาก เช่นตัวอย่างที่ถูกวิเคราะห์เท่านั้นโดยบางวิธีอธิบายในบทต่อไป

การเตรียมผิวหน้ามีผลต่อสภาพต้านทานอย่างเห็นได้ชัด ถ้ามีการใช้รูปของชั้นผกผันและระบบของหัววัด หัววัดอาจจะเจาะไม่ผ่านชั้นและจะวัดเท่านั้น ถ้ามันเจาะผ่านได้และสัมผัสกับความหนา ชั้นและความหนาสร้างขึ้นจากวงจรขนาน ในขณะที่บางข้อสังเกตนั้นมีรายงานการขัดผิวหน้าเชิงกล มันแสดงให้เห็นอย่างน้อยที่สุดว่าสภาพต้านทานต่ำของซิลิกอนและเจอร์มาเนียมในการวัดสภาพต้านทานเพิ่มขึ้นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง (อาจเป็นเพราะรอยแตกที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า) ถ้าความลึกของความเสียหายของผิวหน้า (เส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกได้สัดส่วนโดยประมาณ) คือส่วนหนึ่งของความหนาทั้งหมดของตัวอย่างซึ่งประเมินค่าได้ ความผิดพลาดจากหลายต่อหลายครั้งเกิดขึ้นร้อยเปอร์เซ็นต์ ปัญหานี้เป็นไปได้มากที่สุดที่เป็นชั้นบาง แต่ควรจะนำมาพิจารณาเสมอตั้งแต่ผิวหน้าที่ถูกขัดมักใช้เพื่อทำให้สัมผัสได้ง่ายขึ้น ในทางกลับกัน วัสดุที่มีสภาพต้านทานสูงอาจจะทำให้สภาพต้านทานลดต่ำลง เนื่องจากพาหะที่เพิ่มขึ้นเกิดจากความเสียหายที่ส่งผลต่อความบกพร่อง

ตารางที่ 2.1 วิธีวัดสภาพต้านทานให้ตรงตามที่ต้องการ

n on n+ layer p on p+ layer	MOS Spreading resistance 3-point probe
n on p layer p on n layer	All of the above Four-point probe sheet resistance measurement coupled with thickness
Depth profiling	1. C-V measurements 2. C-V coupled with etched steps 3. Differential resistance in avalanche 4. Angle lap coupled with a. Spreading resistance b. 3-point probe c. 4-point probe 5. Sequential thin-layer removal and sheet resistance measurement
Lateral profiling	Electroplating (qualitative only) Electro polishing (qualitative only) Spreading resistance 2-point probe Close-spaced 4-point probe Photovoltaic probe
Very high resistivity	Hall measurements Forward-biased 4-point probe
Very small areas	Spreading resistance Voltage breakdown C-V measurement
Noncontacting	Eddy current, microwave, capacitative coupled probes
Small irregular-shaped sheets	Van der pauw

โดยธรรมชาติส่วนมาก การวัดสภาพต้านทานขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตและค่อนข้างจะไวต่อเงื่อนไขขอบเขต เนื่องจากความไวนี้ มีค่าแก้ที่ถูกนำมาคำนวณอยู่มาก บางส่วนอยู่ในหน้าต่อไป และส่วนอื่นๆอยู่ที่อ้างอิง วัสดุสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่มีอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์ของสภาพต้านทานค่อนข้างจะสูง ดังนั้นถ้าต้องการการวัดที่แม่นยำ หรือถ้าค่าแปรผันซึ่งล้อมรอบอย่างกว้างขวาง ควรทำการแก้ไขให้เหมาะสม กราฟของซิลิกอนและเจอร์มาเนียมถูกใส่ไว้ในบทต่อไปในเล่ม ตั้งแต่ค่าสัมประสิทธิ์สามารถเปลี่ยนไปอย่างพอประเมินค่าได้ด้วยปริมาณของสารเจือปน ข้อควรระวังควรจะใช้การประมาณค่านอกช่วงเกี่ยวกับวัสดุซึ่งมีข้อมูลอยู่เพียงเล็กน้อย

เมื่อทำการวัดวัสดุรอยแยกทางไฟฟ้าโดยรอยต่อ p-n รอยต่อ p-n อาจจะไม่สมบูรณ์ของการแยกทางไฟฟ้า และในบางกรณี กระแสที่ไหลใช้สำหรับการวัดสามารถไบแอสกลับกับรอยต่อและยอมให้กระไหลข้ามผ่านมาได้มากขึ้น

2.4 วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

2.4.1 วิธีวัดสภาพต้านทานโดยตรง(Direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานมักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรง การวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสาร แล้วค่อยมาคิดถึงความยาวและพื้นที่หน้าตัดของสสารที่ต้องการวัด วิธีนี้ต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดแล้วความยาวให้ได้อย่างแน่นอน เช่น ทรงกระบอก ทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายข้างหนึ่งและกระแสะไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองด้านพร้อมๆกัน

จากค่าที่เราทราบคือกระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ นำมาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าได้ดังนี้ เมื่อกำหนดค่า R เป็นความต้านทานรวม จะมีความสัมพันธ์กับสภาพต้านทานและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และL เป็นความยาวของวัสดุที่ทำการวัด

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{1}$$

$$\rho = R\left(\frac{A}{L}\right) = \left(\frac{V}{I}\right)\left(\frac{A}{L}\right) \tag{2}$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกหลายองค์ประกอบด้วยกัน

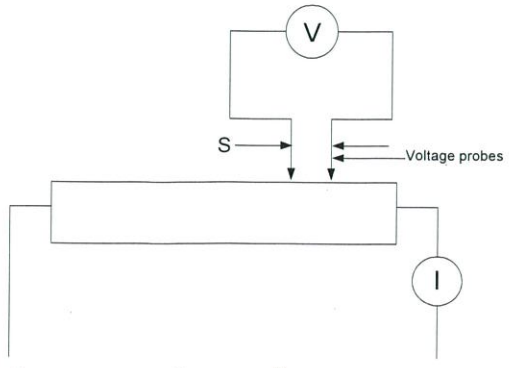
2.4.2 วิธีวัดสภาพความต้านทานโดยวิธี 2 ขั้ว (Two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับวิธีวัดโดยตรง จะแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลง

Two-Point probe

ผลกระทบของความต้านทานที่สัมผัสถูกกำจัดออกไปโดยใช้ Two-Point probe ตามรูปที่ 2 ถ้าภาพตัดขวางของตัวอย่างค่อนข้างจะเป็นไปตามแบบ การควบคุมการวัดคือกระแสต้องต่ำพอที่จะกันความร้อนของตัวอย่าง โวลต์มิเตอร์ต้องมีอิมพิแดนซ์ขาเข้าสูง และการวัดต้องทำให้ห่างพอจากจุดสัมผัสซึ่งมีพาหะรวมตัวใส่เข้าไปเพียงเล็กน้อย สิ่งจำเป็นสำหรับการสัมผัสคือไม่ลงน้ำหนักมากและแปรผันไปจากระนาบหรือเชื่อมสปริง โลหะที่เป็นรอย อย่างไรก็ตาม ถ้าจุดเชื่อมต่อไม่ดีพอมากๆ เส้นสมศักย์ก็จะผิดเพี้ยนไปในที่สุด เพื่อลดผลกระทบนี้ แนะนำให้ใช้ ASTM F 43 ซึ่งมีขนาดภาพตัดขวางสูงสุดไม่มากไปกว่า 1 ใน 3 ของความยาวของตัวอย่างและถือว่าการวัดจะทำที่จุดกึ่งกลางของแถบ ถ้าที่ใช้แถบยาวและรูปโครงร่างถูกทำโดยการเคลื่อนย้ายตามแรงดันสองจุด การอ่านอ่านที่จุดใกล้กว่าขนาดของภาพตัดขวางสูงสุดจากขอบเขตที่คาดคะเน ดังตัวอย่างของผลกระทบที่จุดสัมผัสไม่ดี เมื่อกระแสเข้าและออกที่มุมเหล่านี้ (ซึ่งควรเป็นกรณีที่ไม่ดีที่สุด) และโพรบซึ่งอยู่ห่างออกไปจากเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้ามีความผันผวนขาดตอนไม่ภาพตัดขวางก็สภาพต้านทาน พื้นผิวจุดสัมศักย์อาจจะไม่ตั้งฉากถึงแกนของผลึกและดังนั้นนำไปสู่ความผิดพลาด เพื่อให้ง่ายต่อการสัมผัสตัวอย่าง และเพื่อลดความผิดพลาดระหว่างการรบกวนเส้นสมศักย์ หูที่ยื่นออกมาจากด้านข้างของตัวอย่างสามารถนำไปใช้ได้ โครงร่างที่เหมือนกันเหล่านี้ยังมีประโยชน์ในการทดสอบโครงสร้างสำหรับการประเมินค่าซึ่งกระจายระดับสภาพต้านทาน

ถ้ามากกว่าหนึ่งชุดของการวัดถูกทำขึ้นมาให้ตัวอย่าง ความสามารถในการทำซ้ำจะถูกปรับปรุง ถ้าใช้ตำแหน่งของเครื่องจับ ดังนั้นการวัดทั้งหมดถูกเปรียบเทียบคือทำจริงบนปริมาณของสารกึ่งตัวนำเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การสัมผัสที่เชื่อมต่อที่จุดเดียวกันจะทำให้เกิดความเสียหายทางกลต่อพื้นผิวและการอ่านที่ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 2 รูปแบบของการวัดสภาพต้านทานแบบ 2-point probe

เครื่องมือ two point probe แบบอัตโนมัติ ได้รับการพัฒนา บางอันที่วัดเส้นผ่านศูนย์กลางผลึกที่จุดของการวัดสภาพต้านทาน และให้พิมพ์ข้อมูลออกมาโดยอัตโนมัติของตำแหน่งของการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางผลึกที่จุดนั้น และสภาพต้านทาน ประโยชน์ของระบบเช่นนี้เร่งการประเมินค่าและลดความผิดพลาดจากคน

วิธีปลูกผลึกซิลิกอนที่ดีที่สุดมีการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานตามรัศมีได้ดีเท่าๆกับตามยาว เนื่องจากองค์ประกอบตามรัศมี วิธี two point และ วิธี four point ได้บรรยายในบทต่อไปจะไม่สามารถเปรียบเทียบได้กับผลที่ได้ ซึ่งการวัดวัดจากความยาวของผลึก นั่นคือ V/I ของรูป 3 ถูกกำหนดโดย

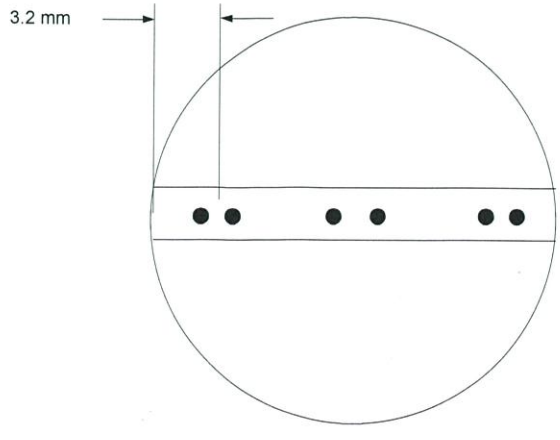
$$\frac{V}{I} = \frac{S}{2\pi \int_0^{R_0} \left[r \frac{dr}{\rho(r)} \right]} \qquad (3)$$

ซึ่ง R_0 คือ รัศมีของแท่งโลหะ อย่างไรก็ตาม แรงดัน four pointprobeส่วนมากจะขึ้นอยู่กับ $\rho(R_0)$ ทำโดยการคำนวณทั้งคู่และสมมติว่าใช้งานได้ตามรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงตามรัศมีขนาดของมันสามารถประมาณได้ วิธี two point ใช้ได้สำหรับแบ่งการวัดสภาพต้านทานตามรัศมีโดยการตัดเพื่อทดสอบเป็นแท่งตาม ASTM และแสดงดังรูป 3

หัววัดเดี่ยวซึ่งเคลื่อนที่สามารถใช้ได้และวัดแรงดันระหว่างนั้น และนำกระแสหรืออ้างอิงอื่นๆที่เหมาะสม ทำโดยการคำนวณได้หลายอย่าง dV/dx สามารถพล๊อตได้และคำนวณสภาพต้านทานจาก

$$\rho = \frac{A}{I} \frac{dV}{dx} \qquad (4)$$

ซึ่ง x คือ ระยะตามผิวหน้า



รูปที่ 3 แท่งและโพรบสำหรับการวัดสภาพต้านทานตามการเปลี่ยนแปลงของรัศมี

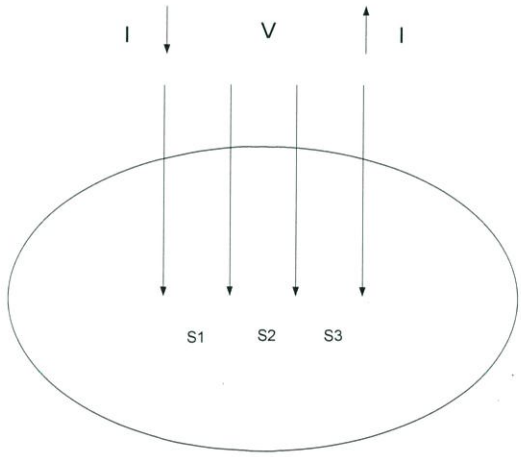
2.4.3 Linear Four-point probe

ในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำทั่วไปส่วนใหญ่ ใช้เทคนิคการวัดสภาพต้านท้านด้วยวิธี Four point probe วิธีโดยทั่วไปแบบไม่ทำลาย อย่างไรก็ตามหัวเข็มอาจจะทำความเสียหายต่อวัสดุสารกึ่งตัวนำเมื่อหัวเข็มกดลงมากเกินไป รูปทรงปกติที่เป็นหัวในเส้นและใช้ระยะห่างของหัวเท่าๆกัน กระแสไหลผ่านออกสองหัวและความต่างศักย์ตกคร่อมไหลเข้าสองหัวจะถูกวัด แต่อื่นๆห้าอันที่รวมกันของหัวกระแสและหัวแรงดันตามหลักสามารถใช้ได้ และอื่นๆที่ระยะไม่เท่ากันได้พิจารณาแล้ว สำหรับหัวเข็มซึ่งยังคงกึ่งอนันต์ปานกลาง สภาพต้านทาน คือ

$$\rho = \frac{2\pi(\mathrm{V}/\mathrm{I})}{\left[1/\mathrm{S}_1 + 1/\mathrm{S}_3 - 1/\left(S_1 + S_2\right) - 1/\left(S_2 + S_3\right)\right]} \tag{5}$$

ซึ่ง S คือระยะห่างของหัวเข็มเป็นเซนติเมตร เมื่อหัวเข็มมีระยะเท่ากัน $\mathrm{S}_1 = S_2 = S_3$ และจากสมการ 5 จะเป็น

$$\rho = 2\pi S \frac{V}{I} \tag{6}$$



รูปที่ 4 การวัดสภาพต้านทานแบบ 4 point probe ในแนวเส้นตรง

ชิ้นบางที่แยกออกจากันของสภาพต้านทาน ρ_1 และขยายด้านข้างสามารถพิจารณาในกรณีพิเศษของโครงสร้างที่มีสองชั้นซึ่งชั้นล่างมีความหนาอย่างไม่จำกัดและมีสภาพต้านทานไม่จำกัด ถ้ามีโลหะอยู่บนชิ้นสามารถประมาณโดยที่สภาพต้านทานที่ก้นเป็นศูนย์ เมื่อชั้นที่สองมีสภาพต้านทาน ρ_2 วัดสภาพต้านทานโดย

$$\rho_{meas} = \rho_1 \left(1 + 4\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{k^n}{\sqrt{1+\left(2nt/15\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4+\left(2nt/15\right)^2}} \right] \right) \tag{7}$$

เมื่อชั้นบน ความหนาคือ t และ

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{8}$$

สำหรับบางกลลุ่มที่มีโครงสร้างสามชั้น ความคิดที่คล้ายกันมี แต่ไม่ค่อยจะได้ใช้ สำหรับชิ้นที่แยกทางไฟฟ้า ρ เข้าใกล้ $0.73(W/S)\rho_{meas}$ (ซึ่ง W คือ ความหนาของแผ่น) W/S น้อยกว่า 1 ด้านหลังของแผ่นถูกปกคลุมด้วยชั้นสื่อกลาง เช่น ชั้นโลหะ หรือ สารตั้งต้นที่มีสภาพต้านทานน้อยมากในกรณีของชั้นepitaxial ผลที่เชื่อถือได้เท่านั้นที่เป็นไปได้ ถ้า W/S มากกว่า 0.5 ดังนั้น เพื่อที่จะวัดชั้นเล็กๆหนาระดับไมโครเมตรอย่างแม่นยำ หัววัดที่มีระยะใกล้กันมากจะเป็นที่ต้องการ ในความพยายามที่จะหลีกเลี่ยงปัญหานี้ รูปร่าง four point probe อื่น ใช้กับการจำกัดผลแล้ว เหล่านี้จะบรรยายในหัวข้อถัดไป ถ้าแผ่นบางขยายออกพอควร การแก้ไขทั้งสองชุดนั้นจำเป็น มันถูกนำมาพิจารณาอยู่บ่อยๆเป็นอิสระจากอื่นๆและและให้ส่วนของการวัด V/I นั้นคือ

$$\rho = F_1 F_2 \rho_{meas} \tag{9}$$

ซึ่ง F_1 คือค่าแก้สำหรับผลกระทบจากขอบ และ F_2 พิจารณาถึงความหนาของแผ่น สำหรับความหนาหลยๆอย่างที่มากว่าระยะของหัววัดมีปฏิกิริยาระหว่างความหนาและผลกระทบจากขอบไม่อนุญาตให้ตั้งค่าแก้โดยปราศจากค่าแก้ง่ายๆ ความต้านทานแผ่น R_s ในหน่วย Ω^2 ใช้ในการคำนวณค่าชั้นตัวนำบางๆ R_s เท่ากับ V/I เมื่อจุดสัมผัสของเต็มความยาวของด้านตรงข้ามของสี่เหลี่ยมของวัสดุและขนาดที่เป็นอิสระของสี่เหลี่ยมสำหรับ four-point probes $R_s = F^*(V/I)$ ให้ F^* แทนความเป็นไปได้ทั้งหมดของการรวมกันของกระแส และ แรงดันของขั้วปลายแหลม

2.4.4 วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง

วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง (Non-collinear probe spacing method) เป็นวิธีที่ใช้การจัดวางตำแหน่งของขั้วไม่อยู่ในแนวเดียวกัน แต่จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมต่างๆ ตามลักษณะชิ้นของสารตัวอย่างหรือตามความเหมาะสมของผู้วัด เช่น

1) การจัดวางตำแหน่งขั้วสัมผัสเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square array)

วิธีนี้มักใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางรูปร่างต่างๆ โดยมีการหาแฟคเตอร์ค่าแก้ (correction factor) ที่เหมาะสม ค่าที่วัดได้เป็นค่าที่ยอมรับได้ สมการพื้นฐานที่ใช้คำนวณของวิธีนี้คือ

$$\rho = \frac{2\pi s V}{(2 - \sqrt{2})I} \qquad (10)$$

โดยที่ s คือ ระยะห่างระหว่างขั้วหรือความยาวของด้านสี่เหลี่ยมจัตุรัส

2) การจัดวางตำแหน่งขั้วสัมผัสเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

เป็นวิธีที่หาสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เป็นชิ้นบางๆซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่าฐานรอง

3) การจัดวางตำแหน่งขั้วสัมผัสอยู่ด้านบน- ด้านล่าง (Over-Under Probe)

เป็นวิธีการจัดวางตำแหน่งขั้วสัมผัสระหว่างคู่ที่ให้กระแสไฟฟ้ากับคู่ที่วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและจะอยู่คนละด้านของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เป็นชิ้นบาง

2.5 Two and Four point probe instrumentation

พื้นฐานของวงจรไฟฟ้า

วงจรไฟฟ้าสำหรับ Four point probe นั้นค่อนข้างจะง่าย และต้องการแค่ขั้วปลายแหลมขั้วเดียว แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และแหล่งจ่ายกระแสเท่านั้น อย่างไรก็ตาม วงจรกระแสและแรงดันห้ามต่อลงดิน และด้วยเหตุนี้ต้องปล่อยให้สัมพันธ์กับอย่างอื่น นอกจากนั้นยังลดผลกระทบของที่เก็บ เปลี่ยนกระแสสลับเป็นกระแสตรงที่ขั้วปลายแหลม และ แรงดันซีเบค เงื่อนไขคือทำให้กระแสไหลย้อนกลับตามปกติ อย่างไรก็ตาม ถ้าตัวอย่าง ขั้วปลายแหลม ตะกั่ว อื่นๆ ทั้งหมดล้วนถูกป้องกันอย่างเหมาะสม จะไม่รับและการอ่านจะเหมือนกันถ้าไม่เว้นแต่กระแสสูงพอที่จะทำให้เกิดความร้อน วงจรนี้เป็นวงจรพื้นฐาน เพราะว่าแหล่งจ่ายกระแสไม่คงที่ดังนั้นต้องปรับเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องให้เป็นไปตามความต้องการ ค่อนข้างจะดีกว่าถ้าใช้อิมพิแดนซ์ขาออกของทรานซิสเตอร์สูงเท่ากับแหล่งจ่ายกระแส ถ้าต้องการความซับซ้อนมากขึ้น ค่าคงที่แหล่งจ่ายกระแสสามารถใช้ได้และสำหรับผล อุปกรณ์ซึ่งตั้งกระแสไว้เป็นความจำเป็น

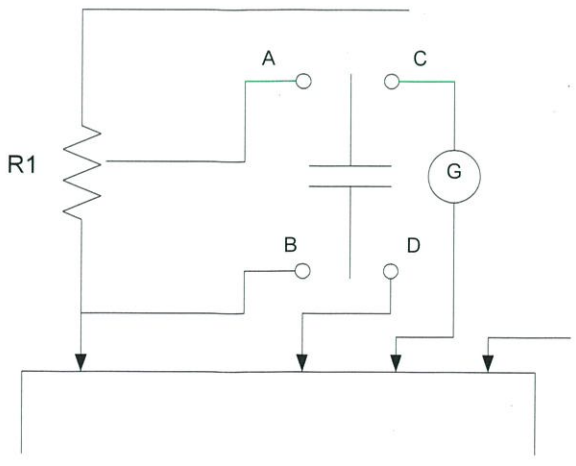
AC มิเตอร์หลายแบบได้ถูกสร้างขึ้น มีข้อดีในการกำจัดผลของเทอร์โมอิเล็คทริกและให้ปรับโวลต์มิเตอร์เพื่อลดสิ่งรบกวนของระบบ การแก้ไขที่ขุดเชื่อมต่อจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนรูปคลื่นและควรถูกยกเลิก เพราะอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดให้เห็นได้ เป็นไปได้ที่จะทำการไบอัสตรงกับขั้วปลายแหลมทั้งหมด จุดเชื่อมต่อที่มีความต้านทานต่ำกว่า และดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการบรรทุกของโพรบโวลต์มิเตอร์ มีข้อจำกัดบางอย่างซึ่งจะต้องมีการกำหนดไว้ในลำดับที่ถูกต้องซึ่งไม่บกพร่อง กระแสไบอัสมีไม่มากพอสำหรับพื้นที่จำนวนมากระหว่างโพรบที่เป็นพาหะส่วนเกิน หรือไม่ก็กระแสสลับสามารถขึ้นจนถึงขีดสุดได้มากกว่าไบอัสกระแสตรง มิฉะนั้นการแก้ไขอาจเกิดขึ้นในระหว่างบางส่วนของวงจร

เนื่องจากสภาพต้านทานขึ้นอยู่กับ V/I มากกว่าการวัดด้วยตัวเอง อุปกรณ์บางอย่างถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อกำหนดอัตราส่วนโดยตรง ซึ่งภายในโพรบแรงดันนั้นมีความสมดุลกับแรงดันที่สร้างโดยการไหลของกระแสผ่านโพเทนชิโอมิเตอร์ P_1 ในทางปฏิบัติ การแยกมีผลที่ง่ายที่สุดโดยใช้กระแสสลับและหม้อแปลง

วิธีการอื่น ใช้ขยายตัวดำเนินการสำหรับการแยกแต่ถาพนิ่งคือ ac ดังนั้นการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุนั้นใช้ได้ซึ่งเหมาะสมเพื่อป้องกันปัญหาที่แรงดันและระดับกระแสตรง ในวงจรเช่นนี้ มันไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่หรือถึงแม้ว่ารู้แล้วว่าเป็นค่าประมาณ จากหลักปฏิบัติหนึ่งๆ อย่างไรก็ตาม ทางที่ดีที่สุดควรตรวจสอบให้แน่ใจว่ากระแสนั้นไม่มีปัญหา จึงควรทำตามคำแนะนำของผู้ผลิต มิฉะนั้นข้อผิดพลาดทั้งหมดอาจเกิดขึ้นได้ เช่น ตามตัวอย่าง ถ้าโพรบทำจุดเชื่อมต่อไม่ดีเท่าที่ควรกระแสก็จะไหลได้น้อยมากและสัญญาณรบกวนจะมีความสมดุลกับแรงดันโพเทนชิโอมิเตอร์

วิธีอื่นสำหรับการเปรียบเทียบแรงดันโพรบที่มีแรงดันเหมาะกับกระแสคือใช้ตัวเก็บประจุที่สับเปลี่ยนระหว่าง $A-B$ และ $C-D$ ของรูป 4 เมื่อแรงดันตกคร่อม R_1 เท่ากับ V_{probe} ตัวเก็บประจุจะไม่เก็บและไม่ปล่อยกระแสไฟฟ้า แต่มันจะสลับกัน ในกรณีที่ต้องการใช้วิธีนี้และสังเกตผลของกระแสในแต่ละทาง (นั่นคือ ถ้ามีการแก้ไข) วงจรสามารถแก้ไขได้อย่างเหมาะสม

แทนการวัด $I-V$ การเชื่อมต่อสี่จุดของไม่ก็สองก็สี่จุดของโพรบ เชื่อมต่ออาจมีการใช้ตัวเชื่อมต่างๆ โดยเฉพาะ สำหรับการวัดไฟกระแสตรงโพเทนชิโอมิเตอร์ที่มีอิมพิแดนซ์ต่ำอาจมีการใช้ระหว่างกราวน์และหนึ่งในโพรบแรงดันให้เป็นกราวน์ที่แท้จริง



รูปที่ 5 วิธีช็อปเปอร์สำหรับการเปรียบเทียบภายในของโพรบแรงดัน

Special circuitry

นอกจากวงจรพื้นฐานที่พึ่งจะอธิบายไป การแปลงวงจรสามารถใช้ดำเนินการบางส่วนของการแก้ไขหารือก่อน และ(หรือ) เก็บข้อมูลได้รวดเร็ว

สำหรับ W/S น้อยกว่า 0.5 แฟคเตอร์ความถูกต้องของความหนาของแผ่นบางเป็นเชิงเส้น ใน W/S ตัวอย่าง potentiometer attenuator บางอย่างในวงจรแรงดันสามารถใช้การคำนวณโดนตรง ค่าแก้ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น สำหรับการจำกัดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นบางสามารถประมาณได้โดยลำดับขั้นเชิงเส้นและอาจจะทำอีกครั้งโดยโพเทนชิโอมิเตอร์ ทางเลือกอีกอย่าง วงจรขยายสามารถใช้ได้และเชื่อมต่อได้หลายทางแทรกเข้าไปในลูปย้อนกลับ

เครื่องมือหลายอย่างใช้มิเตอร์แต่ลดความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติของการเรียกข้อมูกแบบดิจิตอลออกมาและเป็นที่ต้องการสำหรับการควบคุมเป็นประจำ ต่อไประยะเวลาที่สมบูรณ์และลำดับการควบคุม ควบคู่กับการชดเชยอุณหภูมิอัตโนมัติและแสดงผลที่เป็นบัตรเจาะรู (หรือเทปแม่เหล็ก) สามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์ใด ๆที่อธิบายไว้ได้อย่างเต็มที่อย่างการควบคุมอัตโนมัติและการลดลงของข้อมูล เมื่อรวมข้อมูลพื้นผิวของตัวอย่างคู่กับความยาวของแก้ว ส่วนแสดงผลของมิเตอร์สามารถป้อนเข้าไปในอุปกรณ์แล้วแสดงผลดังนั้นค่าของระยะและสภาพต้านทานใส่ลงในตารางอัตโนมัติ

ถ้าเข็มเดี่ยว (หรือลำอิเล็คตรอน) เคลื่อนที่แยกกันหรือใช้อย่างต่อเนื่อง

$$\rho = \frac{A}{I}\frac{dV}{dx} \tag{11}$$

ดังนั้น โดยทำให้แตกต่างของเข็มแรงดัน V, $\rho(x)$ ถูกกำหนดโดยตรงและสามารถพล็อตได้ สำหรับการเคลื่อนที่แบบจุดต่อจุดของเข็มผิวหน้าตามขวางของวัสดุที่มีสภาพต้านทานสูงมากๆ กระแสคลื่นอาจจะใช้หลีกเลี่ยงความร้อน และจุดเชื่อมที่เสมอกันของโพรบสามารถใช้ลดผลกระทบของตัวตรวจจับอิมพิแดนซ์ที่วัดแรงดัน

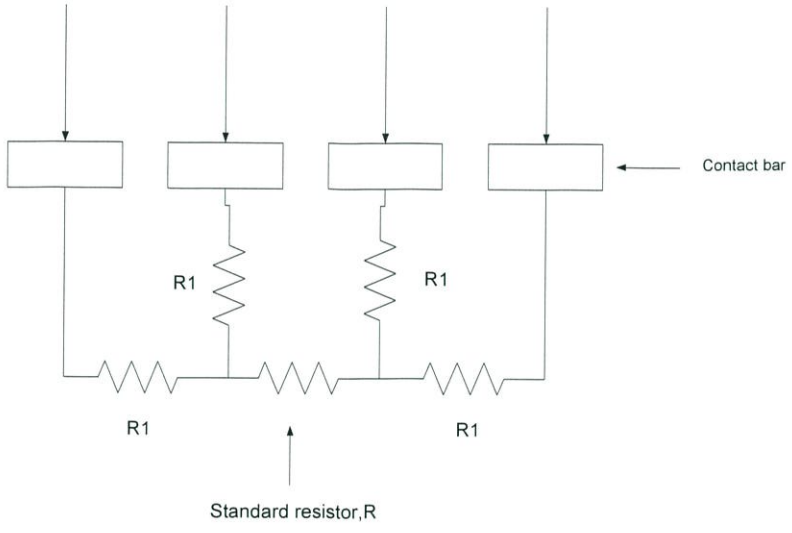
การสอบเทียบ

สิ่งสำคัญคือต้องสามารถสอบเทียบเครื่องมือได้ และมีสองขั้นตอน อันดับแรกคือเก็บตัวอย่างวัสดุที่นำมาวัด และอ่านค่าเป็นช่วงๆ เมื่อทำเช่นนี้ ก็มีข้อสังเกตที่ควรระวังบางอย่าง

1) ไม่วัดที่อุณหภูมิเดียวกันก็ตรวจสอบอุณหภูมิและทำการแก้ไข
2) ไม่จัดตัวอย่างที่ปราศจากการไม่เป็นเนื้อเดียวกันก็วัดที่จุดที่เหมือนกันบนตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโดยใช้เครื่องยึดถาวร

3) เปลี่ยนผิวหน้าตัวอย่างใหม่เท่าที่จำเป็น เนื่องจากหลังจากที่ใช้งานโพรบในบริเวณเดียวกันหลายครั้ง ที่สำคัญการแหว่งสามารถเกิดขึ้นได้

อันดับที่สองคือใช้ตัวต้านทานที่รู้ค่าเชื่อมต่อไม่ระหว่างโพรบก็แทนที่โพรบไปเลย แล้วตรวจสอบวงจรสอบเทียบโวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์ วิธีการใช้งานที่ค่อนข้างดีของการเชื่อมต่อตัวต้านทานแสดงดังรูป 5 การบรรจุของโพรบแรงดันไฟฟ้ามากเกินไป หรือการเสื่อมสภาพของแหล่งจ่ายกระแสคงที่จะนำพาให้การอ่านล้มเหลวตั้งแต่ต้น ไม่ว่าจะอย่างไรก็ตามควรจะตรวจสอบการเคลื่อนย้ายในระยะห่างจองโพรบ



รูปที่ 6 การสอบเทียบ 4-point probe

2.6 ERROR IN TWO- AND FOUR-POINT MEASUREMENTS

ขนาดของตัวอย่าง

หนึ่งในข้อผิดพลาดที่เห็นได้ชัดในการกำหนดสภาพต้านทานที่เพิ่มขึ้นจากความล้มเหลวที่ต้องพิจารณาการแก้ไขการคำนวณสำหรับรูปทรงที่จำกัดทั้งหมดควรจะถูกบันทึกไว้ อย่างไรก็ตามนั้น ในการกำหนดค่าสภาพต้านทานของแผ่นบาง ถ้าความหนาของแผ่นบางน้อยกว่าระยะของโพรบ (กรณีปกติ) คำนวณค่า ρ แปรผันโดยตรงกับค่าสมมติของความหนาของแผ่นบาง ดังนั้นความผิดพลาดในการวัดความหนาแปรผันโดยตรงกลายเป็นความผิดพลาดของสภาพต้านทาน หากไม่มีการแก้ไขที่จะทำ ระยะห่างของโพรบสามารถเลือกที่จะลดข้อผิดพลาดในขั้นต้นสำหรับคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงของระยะ

การรั่วไหลของสารตั้งต้น

ถ้าตัวอย่างถูกวัดแยกจากสารตั้งต้นโดยรอยต่อ p-n เช่น n-on-p ของชั้น epitaxial สารตั้งต้นที่มีกระแสรั่วไหลจะนำไปสู่ความผิดพลาด กระแสอาจจะเพิ่มขึ้นไม่จากรอยต่อที่มีข้อบกพร่องก็การลดลงของไบอัส ส่วนหลังมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นเป็นค่าแผ่นของชั้นที่เพิ่มขึ้น สำหรับซิลิกอนการวัดที่สมเหตุสมผลสามารถทำขึ้นมาได้ถ้าความต้านทานแผ่นนั้นน้อยกว่า $1000\,\Omega^2$ และการวัดกระแสนั้นต่ำพอ หากมีข้อสงสัยเกี่ยวกับช่วงของกระแส R_s ควรจะวัดเป็นฟังก์ชันของโพรบกระแสและการทำงานที่จำกัดพื้นที่ของ R_s โดยปราศจากกระแส

ระยะห่างของโพรบหรือหัววัด

ระยะห่างของโพรบเข้าโดยตรงสู่สี่จุดของการคำนวณสภาพต้านทานจำนวนมาก ดังนั้น ถ้าระยะเท่ากัน ความผิดพลาดใดในการคำนวณที่ระยะห่างจะแปรผันเข้าสู่ความผิดพลาดเหมือนกันในสภาพต้านทาน ถ้าระยะห่างระหว่างแต่ละโพรบเรียงกันแบบเชิงเส้นแตกต่างกันเล็กน้อยตาม S

$$\frac{dp}{\rho} = \frac{1}{4S}\left(3\Delta x_1 - 5\Delta x_2 + 5\Delta x_3 - 3\Delta x_4\right) \tag{12}$$

ซึ่งโพรบ 2 และ 3 คือโพรบแรงดัน และ Δx_i คือ การเครลื่อนที่ของโพรบลำดับที่ i จากตำแหน่งน้อยๆ ถ้า Δx_i ถูกวัดจากการหาสภาพต้านทานแต่ละอัน สมการที่ 12 สามารถใช้ทำให้ค่าแก้เป็นที่ต้องการได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหนึ่งในโพรบแรงดันมีระยะห่าง 10 mm ตั้งไว้เป็น 1 mm ไปทางอื่นค่าสภาพต้านทานที่วัดได้จะมีค่าประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ อย่างต่ำ

เมื่อโพรบเคลื่อนไปแบบสุ่ม ซึ่งเป็นอิสระ และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน δx ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสภาพต้านทาน คือ

$$\delta\rho = \frac{2.06\delta x}{S} \tag{13}$$

สำหรับการวัดแบบสองจุด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ

$$\delta\rho = \frac{1.41\delta x}{S} \tag{14}$$

ดังนั้นสำหรับการออกแบบโพรบที่เปรียบเทียบ ขั้วสองจุดมีความแม่นยำมากกว่า

สำหรับแผ่นที่บางมากๆ ถ้าคำนวณตามพื้นฐานการวัด V/I และ ไม่ได้มาจากเครื่องสอบเทียบมาก่อน S จะไม่ส่งผลกระทบต่อการอ่านตลอดความยาวที่เท่ากัน เมื่อระยะห่างไม่เท่ากัน แต่รู้ค่าแฟคเตอร์ความถูกต้องที่เพิ่มขึ้น F_s ตามที่แนะนำ ดังเช่น

$$\rho = F_s\rho_{meas} \tag{15}$$

ซึ่ง
$$F_s = \frac{2\ln 2}{\ln\left[\dfrac{(S_1+S_2)(S_2+S_3)}{S_2S_3}\right]} \tag{16}$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

$$F_s \cong 1 + 1.082\left(1 - \frac{S_2}{\overline{S}}\right) \tag{17}$$

ซึ่ง $\overline{S}$ คือค่าเฉลี่ยการแยก เมื่อตัวอื่นที่คูณด้วยค่าแก้ต้องเกี่ยวข้อง F_s สามารถเพิ่มเข้าไปได้ หากการเคลื่อนที่ของโพรบนั้นสุ่มและเป็นอิสระจากกัน แต่ละที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน δx ซึ่งสัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน F_s ถ้าระยะห่างของโพรบนั้นตามตัวเลขเท่ากัน โดยให้

$$\delta F_s = \left(\sqrt{5}\,\delta S\right)\left(\overline{S}\ln 4\right) \tag{18}$$

สำหรับ square array อันดับแรก การเคลื่อนของโพรบที่ผิดตลาดสามารถกำจัดได้โดยการเฉลี่ยค่าที่ได้รับจากการวัดแบบสองทิศทางใช้คู่แตกต่างของโพรบกระแสแต่ที่โพรบกระแสที่หนึ่งที่ร่วมกันระหว่างการวัดแบบสองทิศทาง

แสง

แสงที่เป็นประกายบนพื้นผิวอาจจะแนะนำให้ใช้โฟโตโวลต์เตจไม่แท้ที่เป็นผลของเครื่องมือมีปัญหา

ผลของอุณหภูมิ

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิมากโดยเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์ของสภาพต้านทานเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยสามารถนำมาใช้ได้ไม่เกิดความล้มเหลวในการชดเชยสำหรับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันไปก็โดยที่ไม่รู้ว่าความร้อนของตัวอย่างระหว่างการวัด ส่วนหลังมีแนวโน้มมากที่สุดที่เกิดตัวอย่างสภาพต้านทานต่ำซึ่งมีกระแสมากตามที่ต้องการ เพื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่วัดพร้อมกัน The National Bureau of Standards แนะนำขั้นตอนการทำตัวอย่างบนแท่งทองแดงขนาดใหญ่ ซึ่งมีเทอร์โมมิเตอร์อยู่ในนั้น

ผลของเทอร์โมอิเล็กทริก

ความชันของอุณหภูมิในตัวอย่างไม่ว่าสาเหตุมาจากโดยรอบหรือกระแสในโพรบมากเกินไป จะสร้างแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริก ใช้สลับกันหรือกระแสต่ำจะมีผลลดลง

การใส่โพรบเข้าไป

สำหรับวัสดุที่มีอายุการใช้งานยาวนาน จุดเชื่อมต่ออาจใส่พาหะเพียงพอเป็นเหตุให้เกิดการมอดูเลตสภาพนำและอาจจะกระทำต่อการอ่านสภาพต้านทานจริงๆ

AC pickup

ชุด DC ที่มีแนวโน้มจะเกิดข้อผิดพลาดนำมาแก้ไขผ่านการแก้ไขจุดเชื่อมต่อต่างๆนาๆมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศของกระแส การดำเนินการในห้องปิดนั้นทำเป็นบางครั้ง หรือยังดีกว่า ใส่ส่วนประกอบของโพรบอย่างระมัดระวังในกล่องกำบัง การอ่านควรจะทำให้กระแสไหลในแต่ละทิศทางและคล้ายกับค่าของสภาพต้านทานเฉลี่ย หากสองค่าแตกต่างกันมากขึ้นไม่กี่เปอร์เซ็นต์ ควรจะใช้ที่กำบังดีกว่า

เครื่องมือวัดกระแส

จากจุดมาตรฐานการวัดความบริสุทธ์ กระแสที่สูงกว่าทำให้การวัดแรงดันนั้นง่ายกว่า และไวต่อเสียงน้อยอย่างไรก็ตาม กระแสที่สูงเป็นเหตุให้เกิดความร้อนและ บางครั้ง เกิดการมอดูเลตสภาพนำ เพราะ ผลกระทบเหล่านี้ทำให้ยากต่อการประเมินที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ โดยการพล็อตที่จุดวัดสภาพต้านทานกับกระแส สำหรับแต่ช่วงที่ถูกจำลองขึ้นมา โดยปกติจะมีพื้นที่กว้างที่สภาพต้านทานที่ปราศจากกระแส จากขอบเขตของบริเวณนี้ สามารถทำการรับกระแสได้อย่างปลอดภัย

แรงดันไฟฟ้าที่ใช้

ถ้าสนามไฟฟ้าสูงเกินไป การเคลื่อนไหวลดลงจะเกิดขึ้นซึ่งจะทำให้สภาพต้านทานที่อ่านได้นั้นสูงเกิดไป

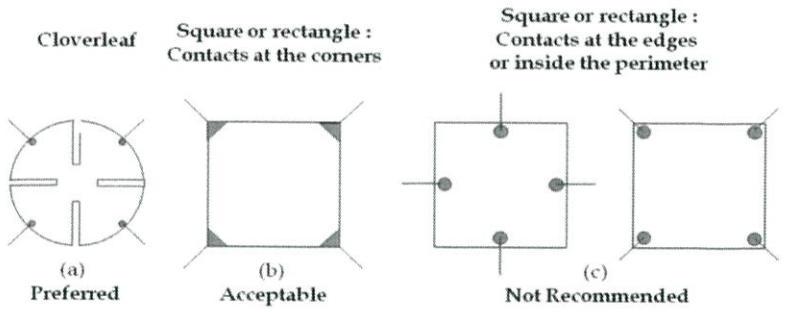
2.7 วิธีวัดสภาพต้านทานโดยวิธีของแวนเดอร์พอว์(Van der Pauw)

การวัดสภาพต้านทานโดยวิธีของแวนเดอร์พอว์เป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่ง เพราะเป็นวิธีที่ไม่จำกัดรูปร่างลักษณะของสารตัวอย่าง รูปร่างของสารที่ต้องการวัดจะมีรูปร่างลักษณะใดก็ได้เพียงแต่สามารถติดขั้วไฟฟ้าได้ก็จะสามารถวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าได้ สามารถวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าบนสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่าชนิด 4 ขั้วเชิงเส้น เพราะความกว้างของระยะขั้วไฟฟ้าสามารถปรับให้เล็กลงได้มากกว่าวิธีการแบบ 4 ขั้วที่เป็นแบบเส้นตรง และยังสามารถตรวจสอบได้ว่าสารที่วัดนั้นมีคุณสมบัติสมมาตรทางไฟฟ้าหรือไม่

ข้อจำกัดของวิธีแวนเดอร์พอว์

1. ขั้วสัมผัสต้องมีคุณสมบัติที่ดี มิฉะนั้นจะทำให้เส้นความสม่ำเสมอของศักย์ไฟฟ้าบิดเบี้ยวไป
2. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสมการที่ใช้คำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามาจากสมมติฐานที่ว่า สารกึ่งตัวนำเป็นแผ่นใหญ่และบางมากคิดว่าเมื่อกระแสไหลและค่าความต่างศักย์ที่วัดได้บนชิ้นสารตัวอย่างเสมือนอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน
3. ต้องไม่ออกแรงกดขั้วสัมผัสมากเกินไป เพราะอาจทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างเสียหายและแตกร้าวได้
4. จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมาก เพื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับเหตุผลตาข้อ 1 และ 2
5. สารตัวอย่างต้องมีความหน้าเท่ากันตลอด
6. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องสม่ำเสมอ ไม่มีรูหรือรอยแตกใดๆ
7. ไม่ควรใช้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากเกินไปนัก เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าผิดไป นอกจากนี้โวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีเดนซ์สูงด้วย
8. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารกึ่งตัวนำ จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

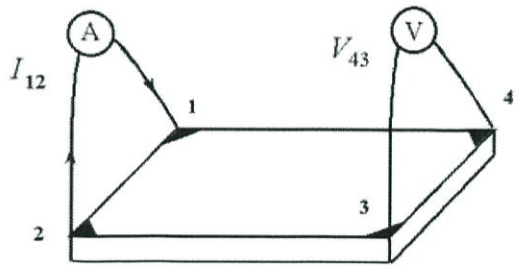
9. รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี



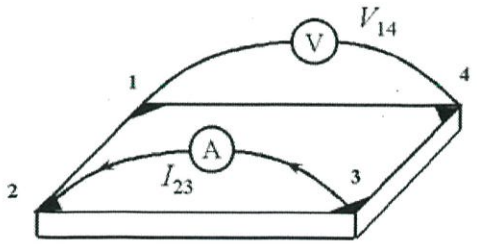
รูปที่ 7 สารตัวอย่างรูปร่างต่างๆ

สำหรับชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้าในรูปที่ นิยามให้ R_Aคือความต้านทานไฟฟ้าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานผ่านขั้ว 1 ไปขั้ว 2 และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมจุดที่ 3 และ 4 และ R_Bคือความต้านทานไฟฟ้าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานผ่านขั้ว 2 ไปขั้ว 3 และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมจุดที่ 1 และ 4

$$R_A = V_{43} / I_{12}$$



$$R_B = V_{14} / I_{23}$$



รูปที่ 8 การต่อขั้วไฟฟ้าชิ้นงาน

จากค่าความต้านทานR_A, R_Bสามารถคำนวณค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าจากสมการของแวนเดอร์พอว์

$$\exp\left(\frac{-\pi R_A d}{\rho}\right) + \left(\frac{-\pi R_B d}{\rho}\right) = 1 \qquad (19)$$

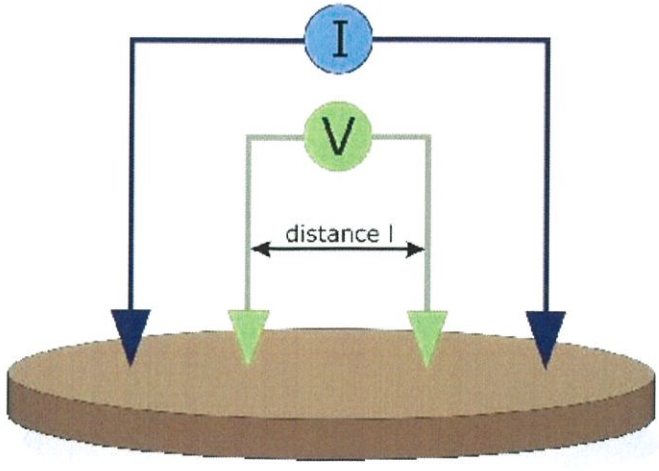
โดย ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

d คือ ความหน้าของชิ้นงาน

จากสมการสามารถหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข

2.8 วิธีวัดสภาพความต้านทานโดยวิธี 4 ขั้ว (Four point probes)

วิธีการนี้เป็นวิธีการวัดสภาพต้านทานที่เป็นที่นิยมกันมากที่สุดในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำเนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ทำลายชิ้นงานอันที่จริงแล้วปัญหา 2 จุด และ 4 จุด ก็คล้ายๆกันคือปัญหาที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่างๆดังนั้นวิธี 4 ขั้ว ในเส้นตรงนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งด้านให้กระแสเข้าออกตลอดจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บนผิวหน้าสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นโลหะแข็งโดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทังสเตน มีลักษณะเป็นเส้นเล็กและแหลม วางเป็นแนวเส้นตรงมีระยะห่างกัน จัดให้ห่างเท่ากันหมดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไม่เท่ากัน ในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน ลักษณะของหัววัด 4 ขั้วเชิงเส้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่7 หัววัดซึ่งยึดอยู่กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ในแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่าๆกัน



รูปที่ 9 การวัดสภาพต้านทานโดยวิธี 4 ขั้ว

ค่าสภาพต้านทานโดยทั่วไปจะหาจากกระแสที่ให้เข้าไปในสารตัวอย่าง และวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีนี้มีข้อจำกัด ในการให้กระแสจะต้องมีลักษณะสม่ำเสมอในสารตัวอย่าง จึงได้มีการพัฒนาการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีใช้หลายขั้วไฟฟ้าดังนั้นสมการในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความเหมาะสม ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

สมการในการคำนวณค่า sheet resistivity

$$\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2 \qquad (20)$$

โดย

$$f_1 = \frac{\ln 2}{\ln 2\left(\frac{\sinh\left(\frac{t}{s}\right)}{\sinh\left(\frac{t}{2s}\right)}\right)}$$

$$f_2 \approx 1, (d/s \gg 1)$$

t = ความหนาของแผ่น wafer

s = ระยะห่างระหว่างขั้วของโพรบ

f_1 = Finite Thickness

f_2 = Finite Width

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นwafer

ในการวัดสภาพต้านทานโดยวิธี 4 ขั้วไฟฟ้าเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ ประการแรกคือ ขั้วทั้ง 4 จะต้องมีลักษณะแหลม มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ อีกประการหนึ่งคือ สารตัวอย่างตรงบริเวณขั้วทั้ง 4 ที่วางอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณ ไม่เกิดรูกลางด้านในและจะคิดว่าการกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งวงกลม(demisphere) โดยอาศัยหลักไฟฟ้าสถิต

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงานพิเศษ

3.1.1 Constant current source

3.1.2 Multimeter

3.1.3 4-point probe

3.1.4ทินออกไซด์และอินเดียมทินออกไซด์ (SnO_2 และ ITO)

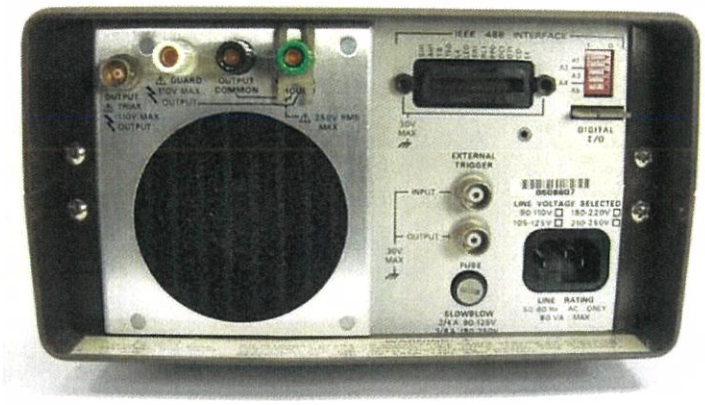
3.1.5 Computer Interface โดยใช้ Visual Basic

3.1.6 GPIB

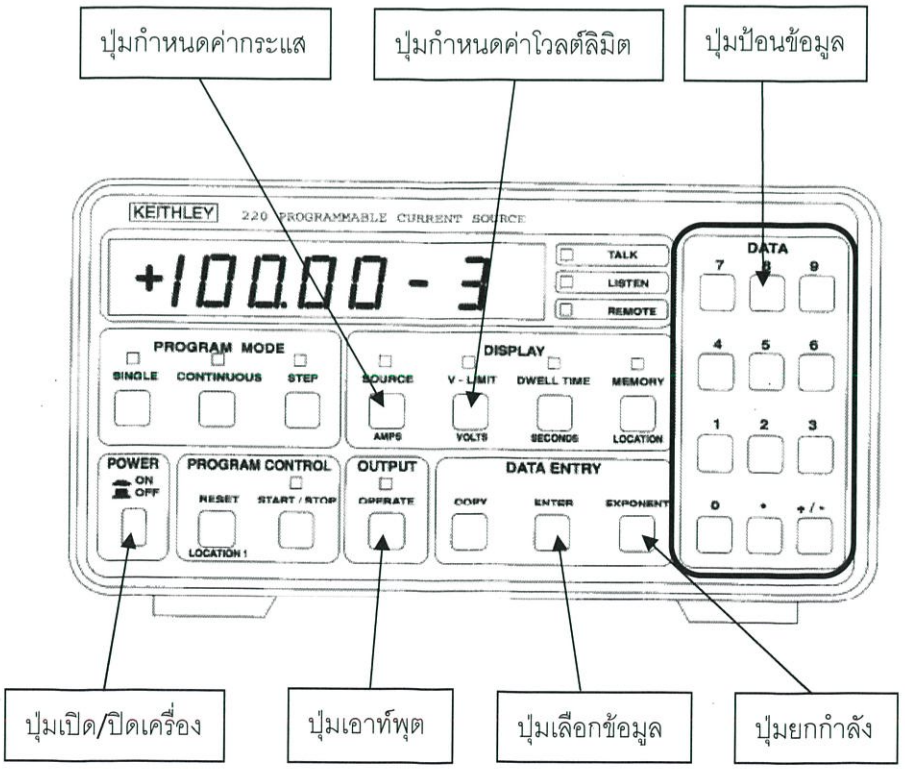
3.2 ลักษณะของอุปกรณ์

3.2.1 Constant Current Source

รูปที่ 10 Constant Current Source ด้านหน้า



รูปที่ 11 Constant Current Source ด้านหลัง



รูปที่ 12 ปุ่มแสดงการทำงานของเครื่อง

เครื่อง Constant Current Source ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องรุ่น Model 220 Programmable Current Source ที่ผลิตโดย Keithley โดยเครื่องนี้จะเป็นเครื่องที่ใช้สำหรับจ่ายกระแสให้กับโพรบคู่นอก (ขั้ว 1 กับ 4) โดยที่กระแสที่มากที่สุดที่สามารถจ่ายได้จะขึ้นอยู่กับสมการจากกฎของโอห์มคือ V=IR เช่น

สมมุติจ่ายกระแส 5mA กำหนด V ไว้ที่ 1V และ R ไว้ที่ 100Ω

จาก V=IR จะได้ว่า

$$V = (5x10^{-3}) \times 100$$

$$V = 0.5\ V$$

แสดงว่า Current Source นี้ สามารถจ่ายกระแสได้ตามที่ต้องการ

แต่หาก สมมุติจ่ายกระแส 20mA กำหนด V ไว้ที่ 1V และ R ไว้ที่ 100Ω

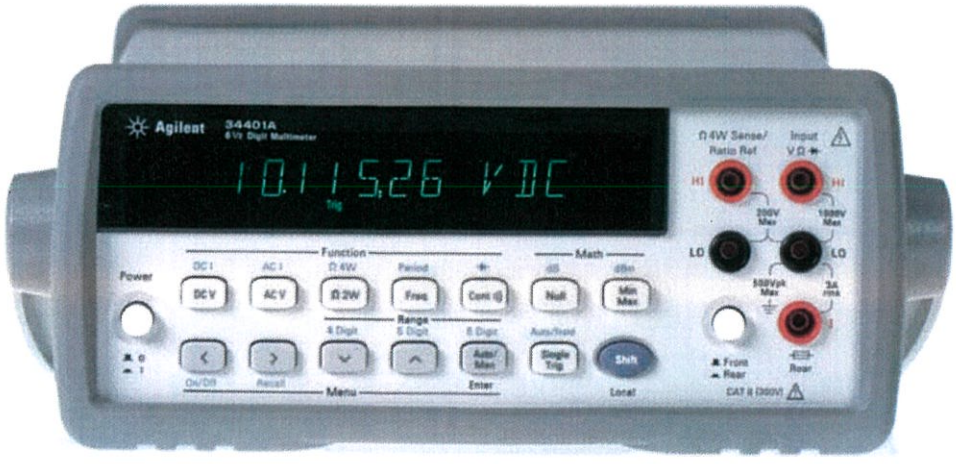
จาก V=IR จะได้ว่า

$$V = (20x10^{-3}) \times 100$$

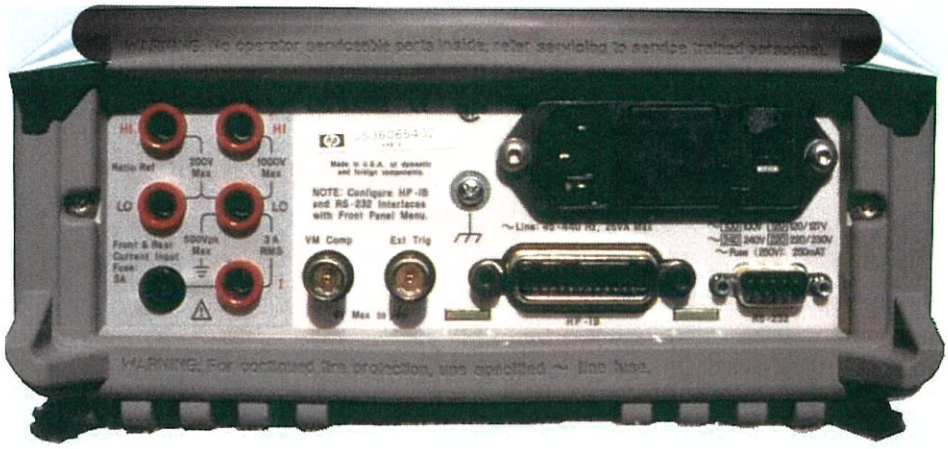
$$V = 2V$$

แสดงว่า Current Source นี้ ไม่สามารถจ่ายกระแสได้ตามที่ต้องการ

3.2.2 Multimeter



รูปที่ 13 Multimeter ด้านหน้า



รูปที่ 14 Multimeter ด้านหลัง

เครื่อง Multimeter ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องรุ่น 34401A ที่ผลิตจาก Agilent Multimeter เครื่องนี้ใช้สำหรับวัดค่า V ที่ได้จากการทดลองโดยจะต่อเข้ากับโพรบขั้วที่ 2 และ 3ของ 4-point probe

ตารางที่ 3.1 การใช้งานเครื่อง Multimeter

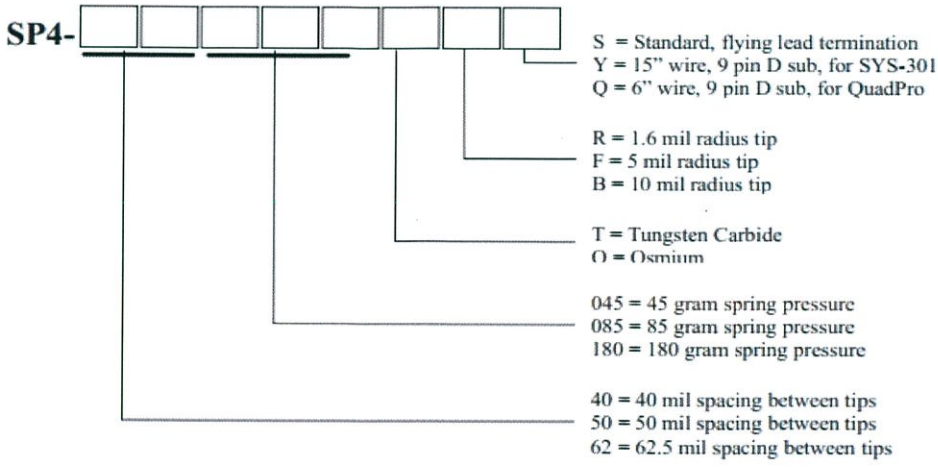
Function	Range (For accuracy specifications, consult the full manual)
DC Characteristics	DC Voltage Range and input Resistance 0.1V,1V,10V: input resistance selectable 10MW or >10GW 100mV to 1000V : R_{in} = 10MW DC Current Range and shunt resistance 10mA,100mA : R_{shunt} = 5W 1A ,3A : 0.1W
AC Characteristics: true RMS	AC Voltage from 3 Hz to 300 kHz AC Current from 3 Hz to 5 kHz
Resistance range: 2-wise and 4-wise method	100W,1kW,10kW,100kW,1MW and 100MW Input protection: 1000V
Frequency and Period measurement	Frequency range: 3Hz-300kHz Input voltage range: 100mV to 750V

3.2.3 4-Point Probe

รูปที่ 15 4-Point Probe

4-point probe ที่ใช้ในการทดลองนี้ ผลิตมาจาก Signatone ตัวหนังสือที่เห็นได้จากรูปมีความหมายดังนี้

Standard Head



รูปที่ 16 ความหมายของ 4-point probe

4-point probe ที่ใช้ มีระยะห่างจากขั้ว 1-4= 50 mil แรงกดสปริง 45 gram ขั้วของโพรบทำมาจาก Tungsten Carbid

3.2.4 SnO_2

รูปที่ 17 SnO_2

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

รูป18 การเตรียมอุปกรณ์

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูป และทำการเชื่อมต่อสาย GPIB เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ ให้เรียบร้อย

2. เปิดเครื่อง Constant Current Source และเครื่อง Multimeter (ควรเปิดเครื่องทิ้งไว้ก่อนอย่างน้อยครึ่งชั่วโมง)

3. นำชิ้นงานที่จะทำการวัด (SnO_2หนา 479 nm)ลงบนที่วางตัวอย่างของเครื่องจริง (โดยขั้นตอนนี้ต้องใช้ความระมัดระวังมากโดยเวลาจับชิ้นงานนั้นหลีกเลี่ยงการจับเข้าที่ชิ้นงานโดนตรง ให้จับที่ขอบๆของชิ้นงานเพราะหากพื้นผิวของชิ้นงานมีรอยหรือมีสิ่งแปลกปลอมเกาะจะทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้อง

4. ตั้งค่าเครื่อง Constant Current Source โดยใช้โปรแกรม Visual Basic ในการควบคุมการป้อนกระแส

5. ทำการหมุน 4-Point Probe ลงโดยให้ปลายเข็มทั้ง 4 แตะที่พื้นผิวของชิ้นงานพอดี

6. กดปุ่ม Start ที่ตัวโปรแกรมเพื่อจ่ายกระแสไปยังขั้ว 1 และ ขั้ว 4 ของ 4-point probe

7. บันทึกผลที่ได้จากคอมพิวเตอร์

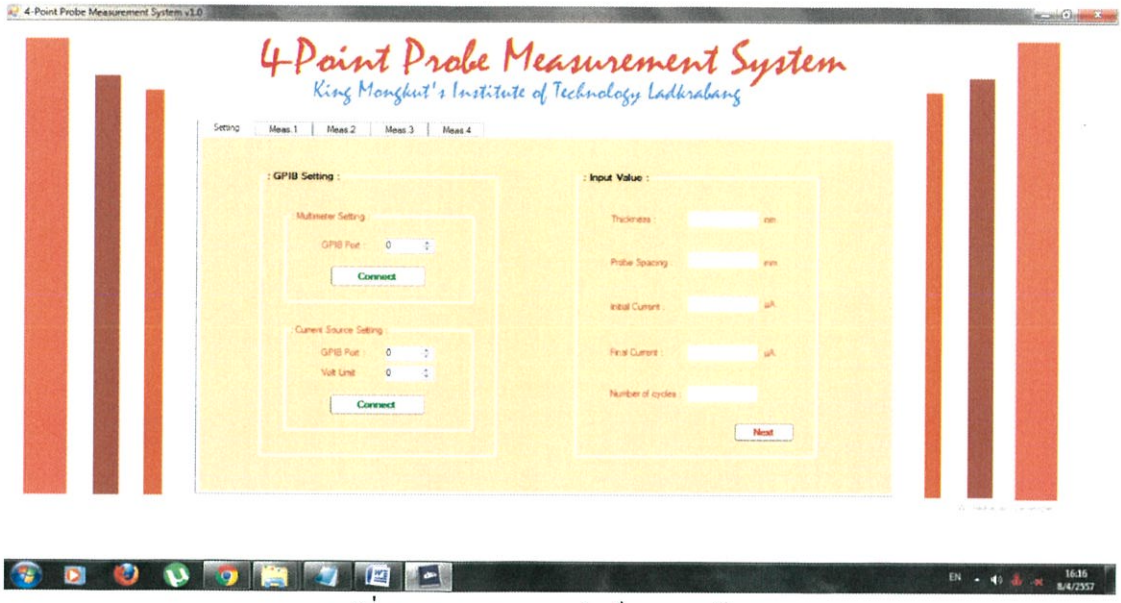
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 – ข้อ 7 แต่เปลี่ยนจากการวัดที่เครื่องจริงมาวัดที่เครื่องที่ทำขึ้นมา โดยทำการหมุนแท่นวางชิ้นงานให้ไปสัมผัสกับปลายเข็มทั้ง 4 พอดี

9. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 – ข้อ 8 แต่เปลี่ยนชิ้นงานเป็น SnO_2หนา 479 nm, 574 nm, 832 nm, 718 nm, 833nm, 770 nm และ ITO หนา 1160 nm ทั้งแบบอบ และไม่อบ

3.4 โปรแกรมควบคุมและวัดบันทึกผล

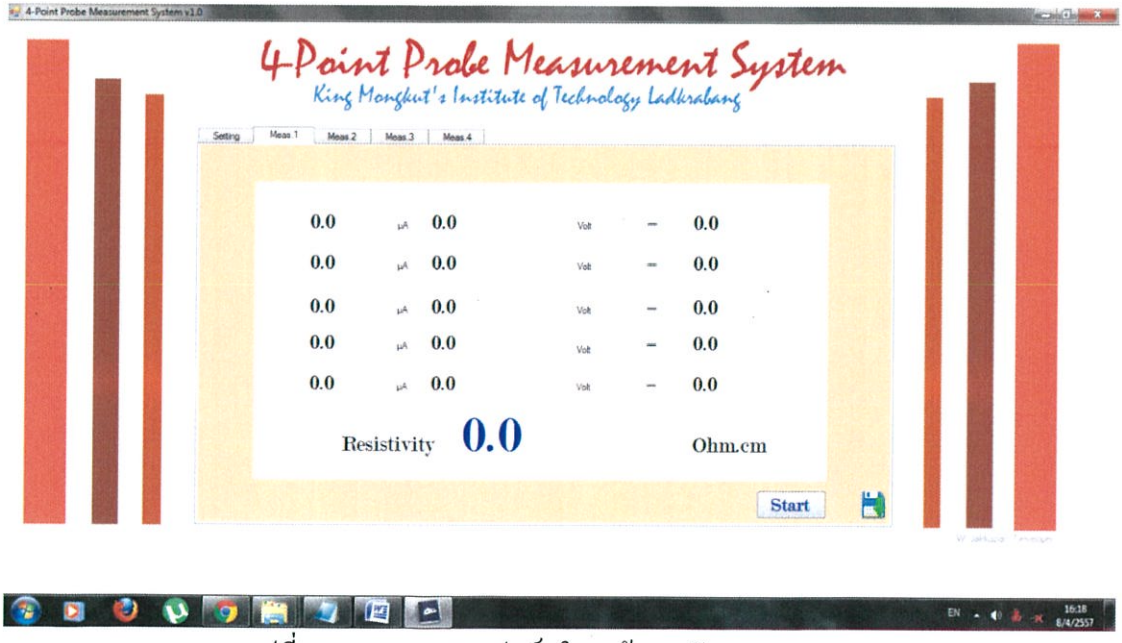
เนื่องจากเครื่องมือวัดที่เราจะสร้างขึ้นมานี้มีความต้องการให้เป็นระบบอัตโนมัติ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานและแสดงผล โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

เริ่มต้นจากการออกแบบฟอร์ม User interface ก่อน ด้วยโปรแกรม Visual Basic ในหน้าแรกเราจะกำหนดให้เป็นหน้าสำหรับกรอกข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณ ค่าของกระแสที่จะจ่ายให้กับเครื่อง Current Source รวมไปถึง port ที่ใช้ในการเชื่อมต่อของ เครื่อง Current Source และ Digital multimeter ด้วย ดังรูปที่ 19



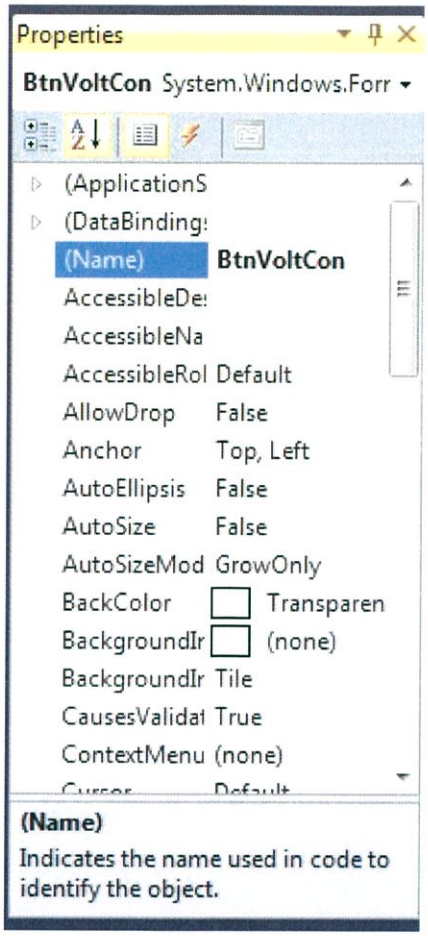
รูปที่ 19 การออกแบบฟอร์มของหน้าแรก

จากนั้นออกแบบหน้าถัดไปคือสำหรับการวัดและแสดงผล โดยข้อมูลในแสดงผลจะประกอบไปด้วย ค่ากระแสที่จ่าย ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ และค่าที่คำนวณได้ ทั้งหมด 5 ครั้ง และจะนำค่าที่ได้ทั้งห้าครั้งนั้นมาเฉลี่ยเป็นผลลัพธ์เพียงค่าเดียว แสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 การออกแบบฟอร์มในหน้าการวัดผลและแสดงผล

เมื่อออกแบบฟอร์มโดยการใส่องค์ประกอบต่างๆลงไปตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นทำการกำหนดค่าคุณสมบัติที่สำคัญของส่วนประกอบต่างๆ เช่น Name, Text เป็นต้น ในการตั้งชื่อควรให้ง่ายต่อการจดจำและไม่สับสนเพื่อจะทำการเขียนโค้ดต่อไป



รูปที่ 21การกำหนดคุณสมบัติต่างๆของส่วนประกอบในฟอร์ม

เริ่มทำการเขียนคำสั่งจากการกำหนดตัวแปรต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการเก็บข้อมูลในการวัด ในการคำนวณ และตำแปรของผลลัพธ์ที่เราต้องการ นั่นก็คือค่าคุณสมบัติของสารที่เราวัด เป็นต้น

จากนั้นเขียนคำสั่งของปุ่มต่างๆที่เราใส่ไว้ในฟอร์มให้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์ที่เราต้องการ แสดงดังรูปที่ 22

```
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button1.Click
    If TextBoxT.Text = ("") Then
        MessageBox.Show("Please input Thickness value!!")
    ElseIf TextBoxS.Text = ("") Then
        MessageBox.Show("Please input Probe Spacing value!!")
    ElseIf TextCurr1.Text = ("") Then
        MessageBox.Show("Please input Initial Current value!!")
    ElseIf TextCurr2.Text = ("") Then
        MessageBox.Show("Please input Final Current value!!")
    ElseIf TextCurr1.Text = TextCurr2.Text Then
        MessageBox.Show("Current must be different!!")
    ElseIf TextCurr2.Text >= 2 Then
        MessageBox.Show("Please Decrease Final Current!!")
    Else
        TabControl1.SelectedTab = TabMeas 'ปุ่ม next
    End If
End Sub
```

รูปที่ 22 แสดงตัวอย่างการเขียนคำสั่งของปุ่มกดบางส่วนในฟอร์มที่ออกแบบไว้

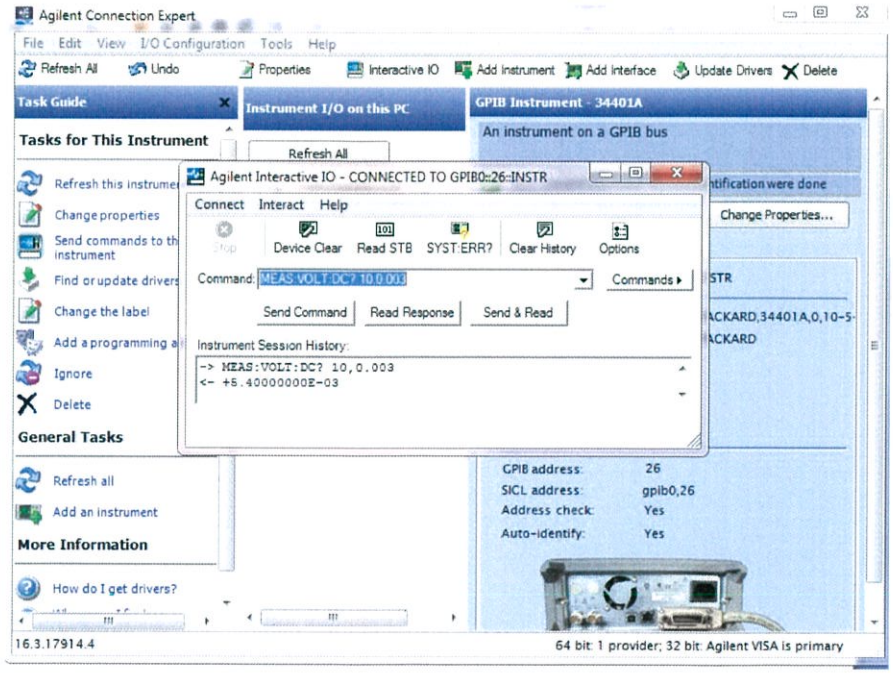
เมื่อทำการเขียนคำสั่งเรียบร้อยแล้วให้ทดลองรันโปรแกรมดูว่าสามารถใช้ได้ตามที่เราต้องการหรือไม่ หากมีส่วนที่ยังไม่พอดีก็สามารถแก้ไขเพิ่มเติมได้

ในส่วนถัดไปเป็นการเขียนคำสั่งในการเชื่อมต่อกับเครื่องเพื่อจ่ายกระแสและเก็บค่าแรงดันจากเครื่องมือมายังค่าตัวแปรที่เรากำหนดไว้โดยข้อมูลจะถูกส่งจากเครื่องมือวัดมายังคอมพิวเตอร์ผ่ายสาย GPIB

รูปที่ 23 การต่อสาย GPIB ระหว่างเครื่องมือวัดกับคอมพิวเตอร์

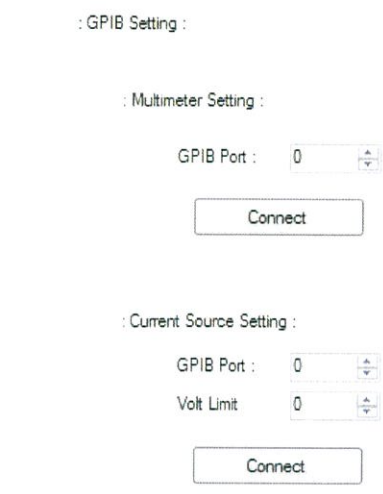
จากนั้นใช้โปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite เพื่อทำการติดต่อกับเครื่องมือวัด ว่าเครื่องมือที่เราเชื่อมต่ออยู่นั้นอยู่พอร์ตใด แอดเดรสใด จากนั้นทดลองส่งคำสั่งไปยังเครื่องว่าที่การตอบสนองอย่างไรบ้าง หากเครื่องมือมีการตอบสนองกับคำสั่งที่เราส่งไปนั้นเราจะสามารถนำคำสั่งที่ส่งไปนั้นมาใช้ในการเขียนโปรแกรม Visual Basic ของเราได้

รูปที่ 24 การส่งคำสั่งไปยังเครื่องมือวัดผ่านโปรแกรม AgilentIO Library suite



รูปที่ 25 การตอบสนองของเครื่องมือ เมื่อได้รับคำสั่งจากโปรแกรม

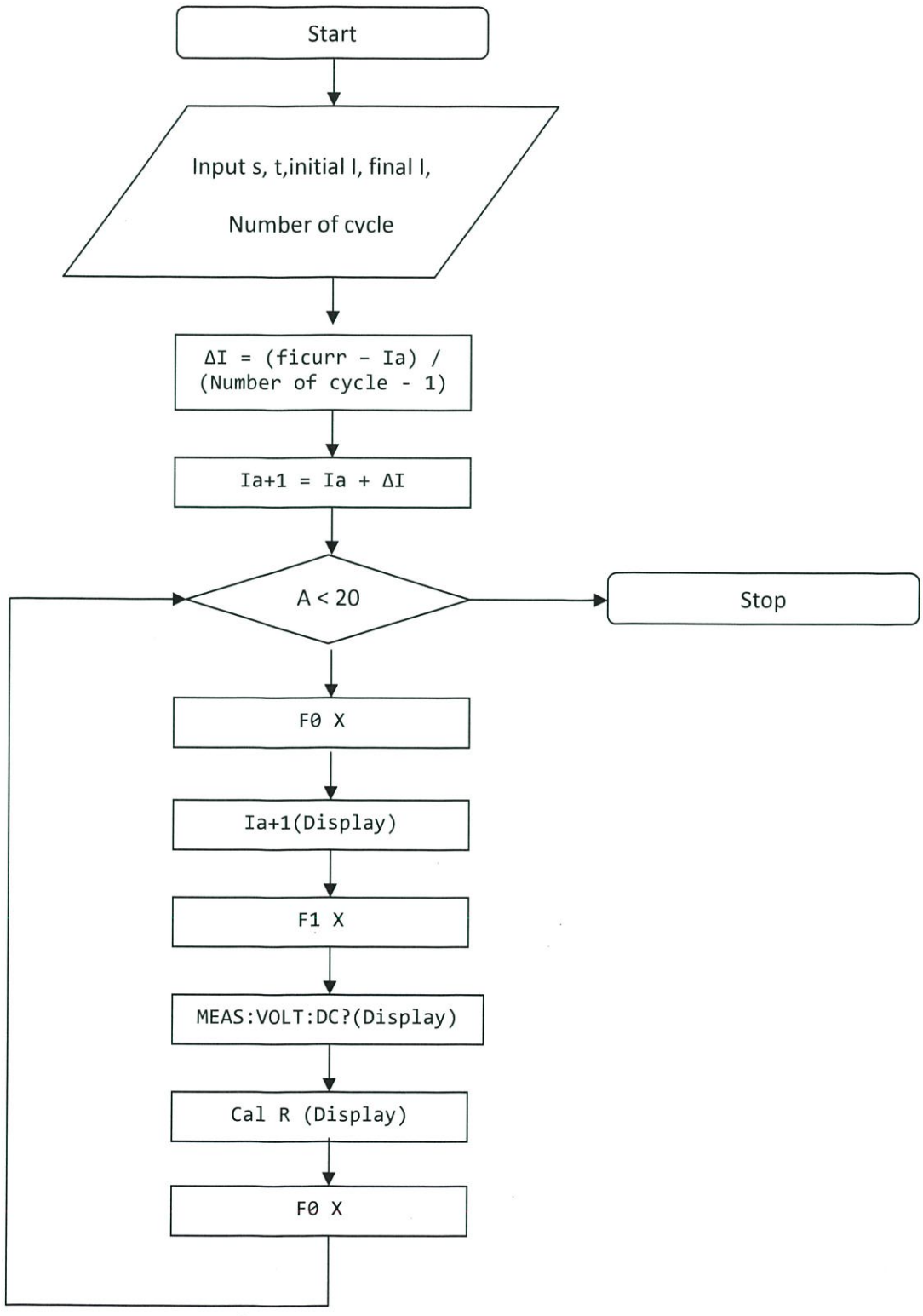
เครื่องมือที่เราใช้คือ Constant Current Source ยี่ห้อ KEITHLY รุ่น 220 PROGRAMABLE CURRENT SOURCE และ Multimeter รุ่น 34001A ซึ่งเครื่องมือแต่ละเครื่องนั้นก็จะมีการใช้งานของคำสั่งที่แตกต่างกันออกไป โดนเราสามารถศึกษาได้ในคู่มือของเครื่องมือที่เราใช้งานนั้นๆ




```
Private Sub ConnectBtn1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles BtnVoltCon.Click

    'เชื่อมต่อเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์

    Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
    mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
    dmm = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488

    Dim ioAddress As String
    ioAddress = "GPIB0:: " + NumGPIB1.Value.ToString()
    dmm.IO() = mgr.Open(ioAddress)


    BtnVoltCon.Enabled = False

    NumGPIB1.Enabled = False
    BtnVoltCon.BackColor = Color.Green
    BtnVoltCon.Text = "Connected"

End Sub
```

รูปที่ 26 การออกแบบ user interface และตัวอย่างการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อกับเครื่องมือ

3.5 Flow Chart ของโปรแกรม



รูปที่ 27 Flow Chart ของโปรแกรม

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

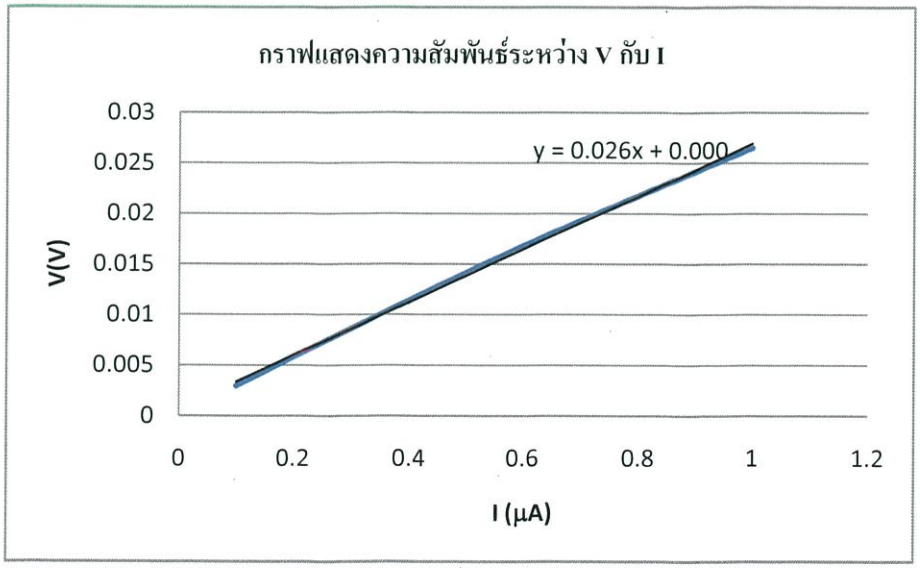
4.1 ผลการวิจัย

ชิ้นงานที่ทำการวัดคือ SnO_2ความเข้มข้น 0.2 M ระยะเวลาในการพ่นเครื่อง 3 hr ความหนา 479 nm ทำการวัดโดยเริ่มจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.1 μA - 1 μA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 479 nm (เครื่องจริง)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.0029567	6.418517374
0.2	0.0058401	6.338927224
0.3	0.0086499	6.259187286
0.4	0.0114284	6.20230074
0.5	0.0141465	6.141933054
0.6	0.0167714	6.067970992
0.7	0.0192974	5.984505604
0.8	0.0217738	5.908418123
0.9	0.0241784	5.831916247
1	0.0265564	5.764939041

Resistivity (avg) = 6.091861 Ω.cm



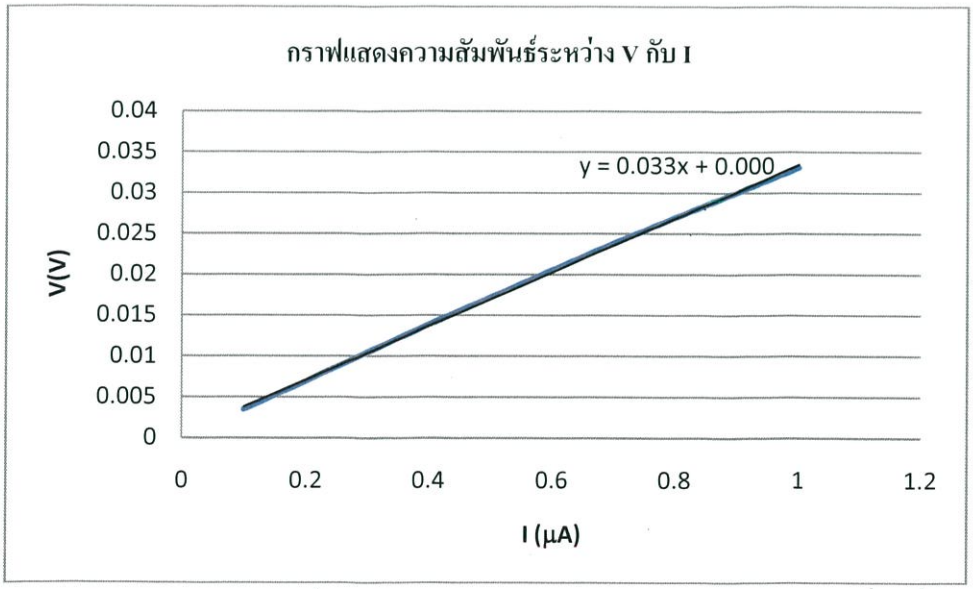
รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของSnO_2 ความหนา 479 nm (เครื่องจริง)

จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 6.091861 Ω.cm

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 479 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.003517	7.634943039
0.2	0.0069737	7.569352558
0.3	0.010474	7.57912454
0.4	0.0138911	7.538809008
0.5	0.0172378	7.484089599
0.6	0.0205492	7.434812238
0.7	0.0238081	7.383332294
0.8	0.0269769	7.320287225
0.9	0.0300711	7.253247082
1	0.0331279	7.191506709

Resistivity (avg) = 7.438950 Ω.cm



รูปที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของSnO_2 ความหนา 479 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

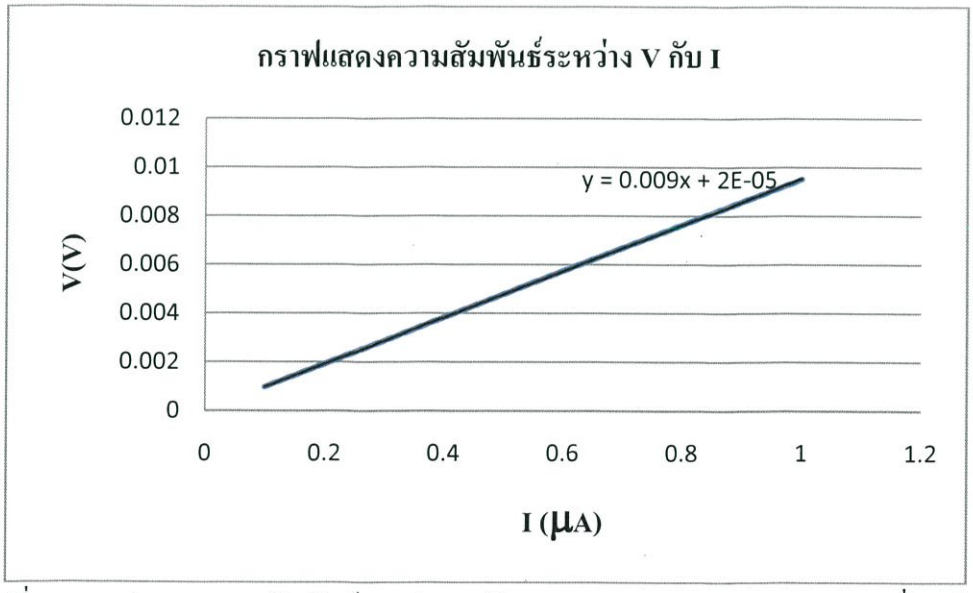
จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 7.438950 Ω.cm

ชิ้นงานที่ทำการวัดคือ SnO_2ความเข้มข้น 0.2 M ระยะเวลาในการพ่นเครื่อง 4 hr ความหนา 574 nm ทำการวัดโดยเริ่มจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.1 μA - 1 μA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 574 nm (เครื่องจริง)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.0009718	2.528147201
0.2	0.0019225	2.500653344
0.3	0.0028759	2.493842096
0.4	0.0038364	2.494990816
0.5	0.0047878	2.490971573
0.6	0.0057413	2.489246779
0.7	0.0066882	2.485520444
0.8	0.0076404	2.484465357
0.9	0.008584	2.481128054
1	0.0095302	2.479174369

Resistivity (avg) = 2.492814 Ω.cm



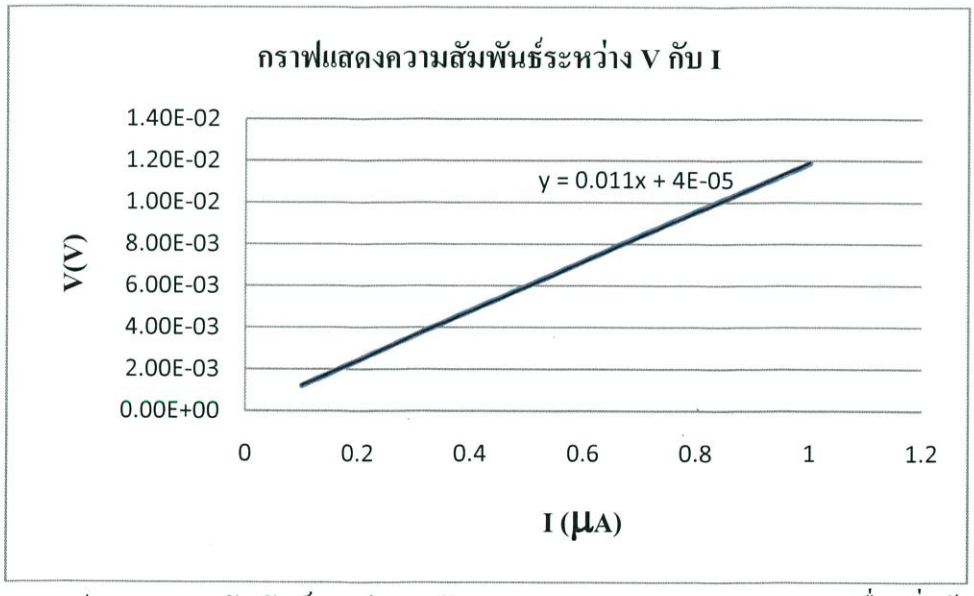
รูปที่ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ IของSnO_2 ความหนา 574 nm (เครื่องจริง)

จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 2.492814 Ω.cm

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 574 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.0012096	3.146794144
0.2	0.0024095	3.134011022
0.3	0.003603	3.124268032
0.4	0.0048069	3.126163995
0.5	0.0060021	3.12276947
0.6	0.0071843	3.11485715
0.7	0.0083724	3.111386925
0.8	0.0095538	3.106635526
0.9	0.0107224	3.099230443
1	0.0118973	3.094941597

Resistivity (avg) = 3.118105 Ω.cm



รูปที่ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 574 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

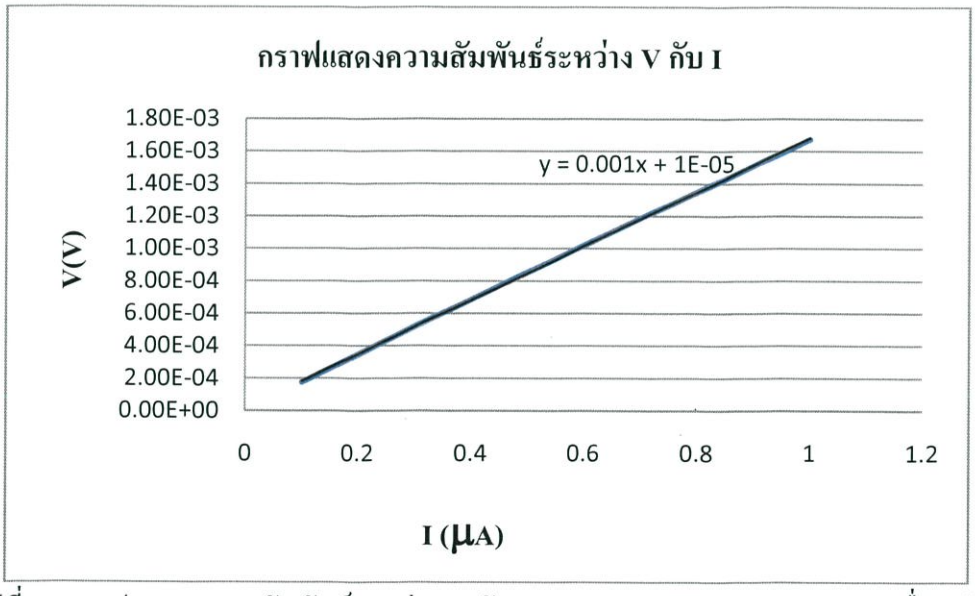
จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 3.118105 Ω.cm

ชิ้นงานที่ทำการวัดคือ SnO_2ความเข้มข้น 0.2 M ระยะเวลาในการพ่นเครื่อง 5 hr ความหนา 832 nm ทำการวัดโดยเริ่มจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.1 μA - 1 μA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 832 nm (เครื่องจริง)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.0001754	0.661488058
0.2	0.0003439	0.648360631
0.3	0.000517	0.649835574
0.4	0.0006856	0.646341462
0.5	0.0008555	0.645170307
0.6	0.0010198	0.640888512
0.7	0.0011865	0.63914011
0.8	0.0013494	0.636011839
0.9	0.001514	0.634314011
1	0.0016763	0.632094161

Resistivity (avg) = 0.643364 Ω.cm



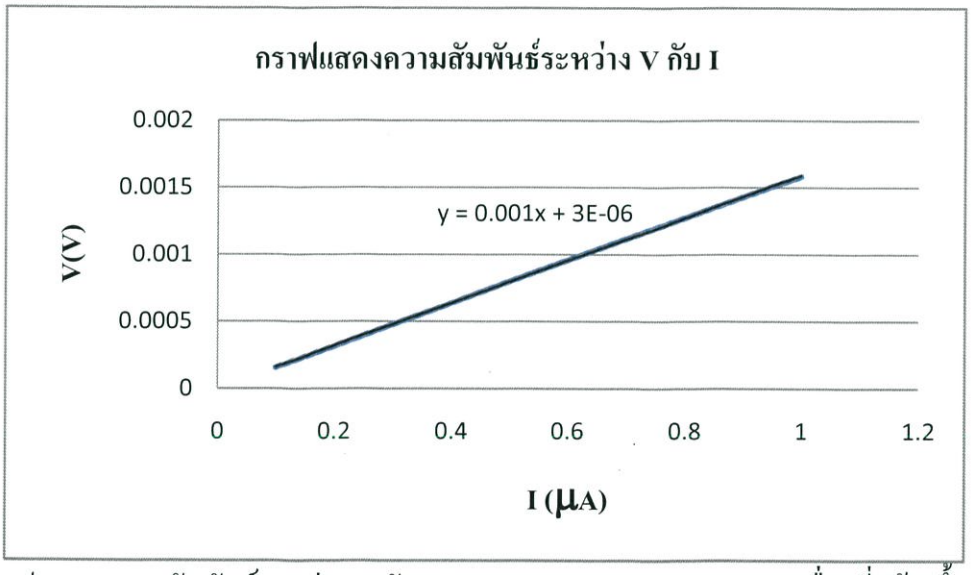
รูปที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 832 nm (เครื่องจริง)

จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.643364 Ω.cm

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 832 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.0001595	0.60168975
0.2	0.0003187	0.600886607
0.3	0.00048	0.60336255
0.4	0.000639	0.602444817
0.5	0.0008015	0.604488307
0.6	0.0009603	0.603531699
0.7	0.0011187	0.602602779
0.8	0.001278	0.60237129
0.9	0.0014338	0.600710644
1	0.0015859	0.59801867

Resistivity (avg) = 0.602010 Ω.cm



รูปที่ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 832 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

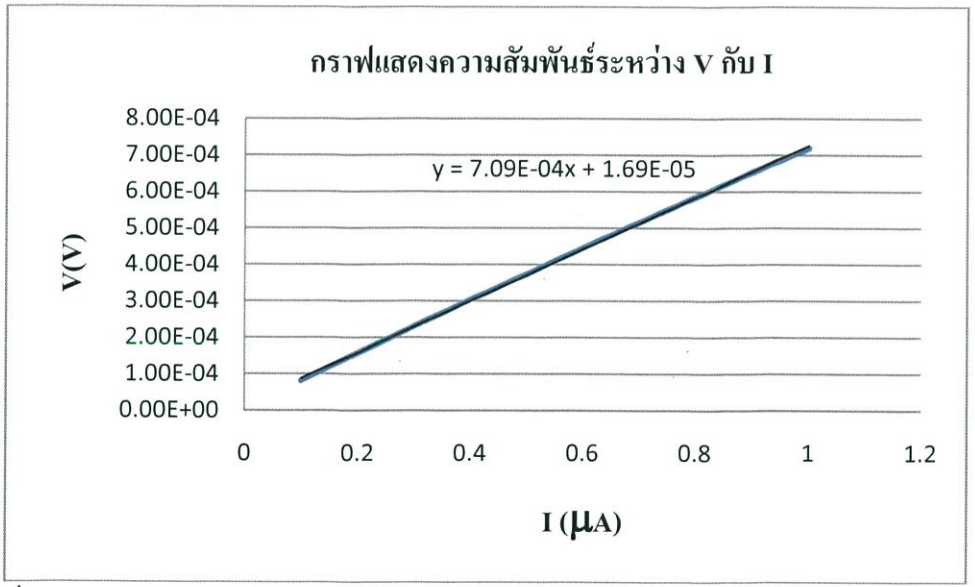
จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.602010 Ω.cm

ชิ้นงานที่ทำการวัดคือ SnO_2ความเข้มข้น 0.3 M ระยะเวลาในการพ่นเครื่อง 3 hr ความหนา 718 nm ทำการวัดโดยเริ่มจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.1 μA - 1 μA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 718 nm (เครื่องจริง)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000081579	0.265456092
0.2	0.0001574	0.25612369
0.3	0.000231	0.25057783
0.4	0.0003036	0.246984899
0.5	0.0003747	0.243902407
0.6	0.0004464	0.242129424
0.7	0.000516	0.239901691
0.8	0.0005847	0.237841633
0.9	0.0006539	0.236427374
1	0.0007202	0.234359472

Resistivity (avg) = 0.245370 Ω.cm



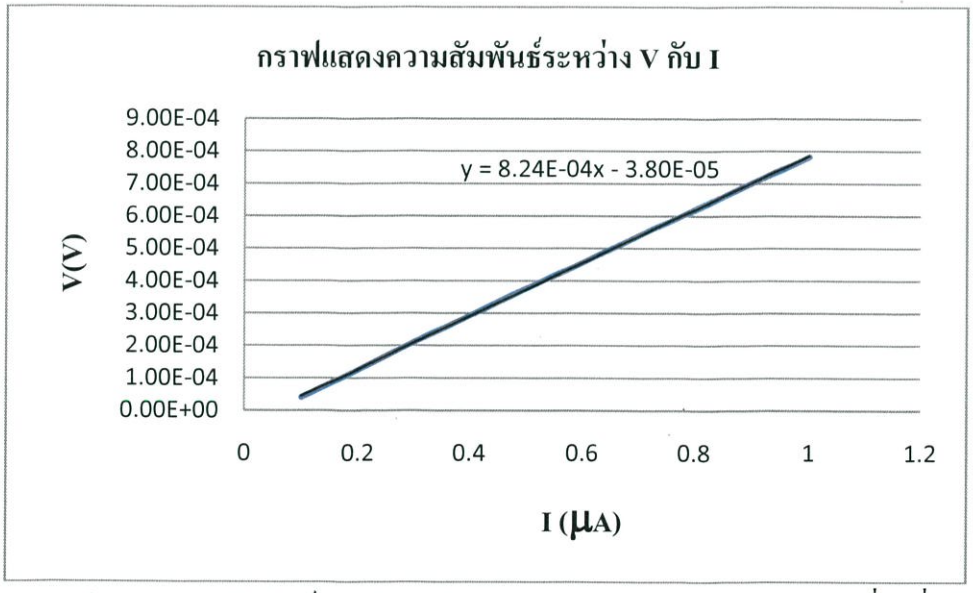
รูปที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 718 nm (เครื่องจริง)

จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.245370 Ω.cm

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 718 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000040894	0.133068089
0.2	0.0001258	0.204740161
0.3	0.0002111	0.228980112
0.4	0.0002926	0.238048671
0.5	0.000377	0.245377113
0.6	0.0004574	0.248075527
0.7	0.00054	0.251055859
0.8	0.0006194	0.251955758
0.9	0.0007034	0.254327499
1	0.0007837	0.255021247

Resistivity (avg) = 0.231065 Ω.cm



รูปที่ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 718 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

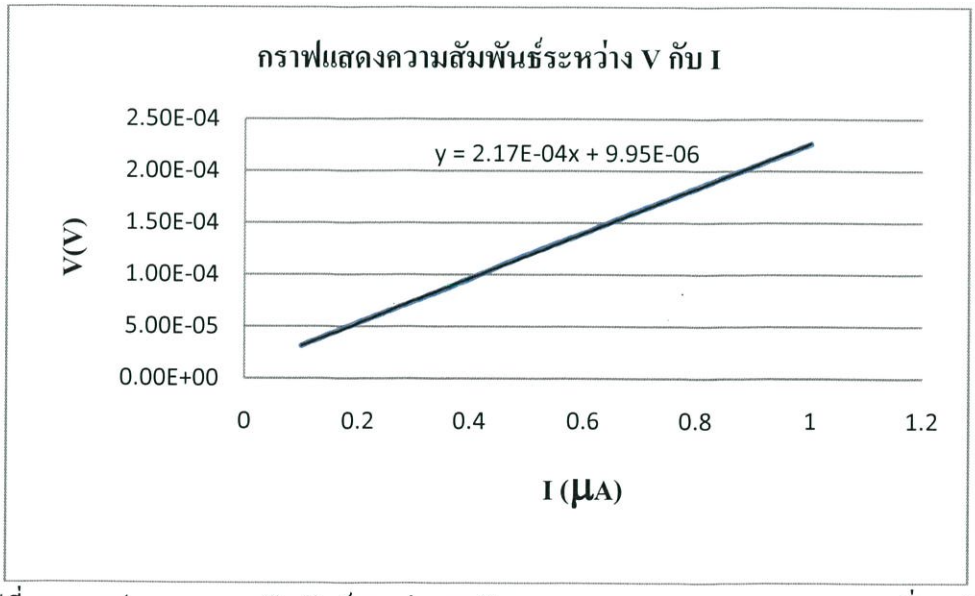
จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.231065 Ω.cm

ชิ้นงานที่ทำการวัดคือ SnO_2ความเข้มข้น 0.3 M ระยะเวลาในการพ่นเครื่อง 4 hr ความหนา 833 nm ทำการวัดโดยเริ่มจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.1 μA - 1 μA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 833 nm (เครื่องจริง)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.00003153	0.119030659
0.2	0.000053645	0.101259113
0.3	0.000074419	0.09364777
0.4	0.00009617	0.090764181
0.5	0.0001192	0.090022362
0.6	0.0001402	0.088253073
0.7	0.0001619	0.08735926
0.8	0.0001832	0.086482682
0.9	0.000205	0.08601063
1	0.0002266	0.085577494

Resistivity (avg) = 0.092840 Ω.cm



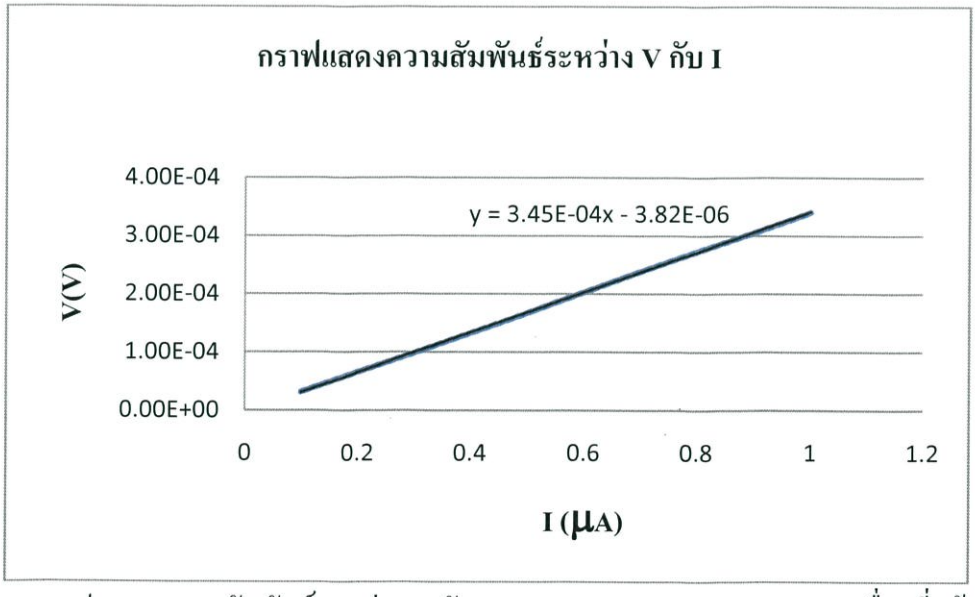
รูปที่ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 833 nm (เครื่องจริง)

จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.092840 Ω.cm

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 833 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000031426	0.118638045
0.2	0.000065565	0.123759044
0.3	0.000098851	0.124392641
0.4	0.0001328	0.125347441
0.5	0.0001677	0.126673842
0.6	0.0002033	0.127963309
0.7	0.0002385	0.128643287
0.8	0.0002725	0.128598794
0.9	0.0003061	0.128407729
1	0.0003405	0.128548962

Resistivity (avg) = 0.126097 Ω.cm



รูปที่ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 833 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

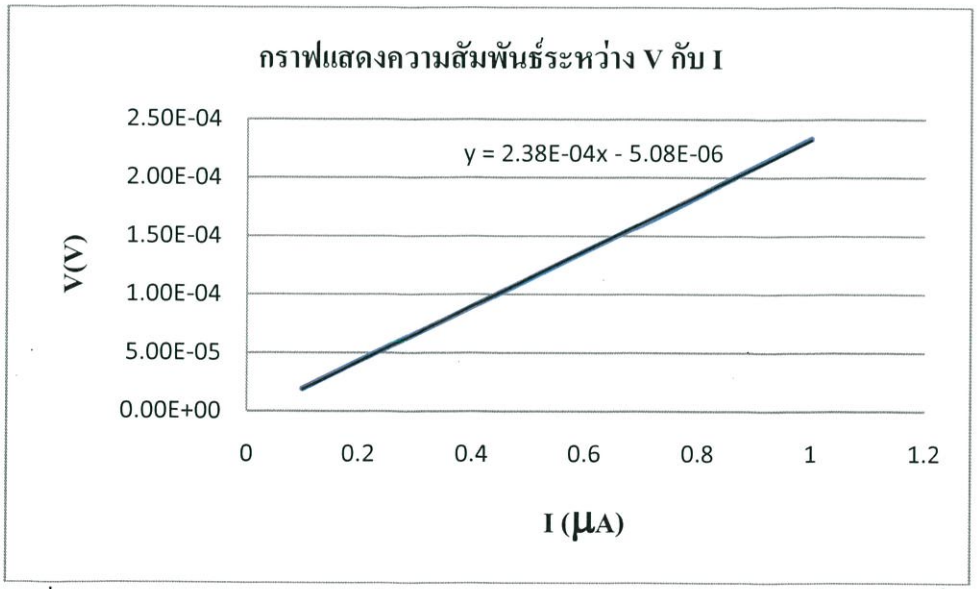
จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.126097 Ω.cm

ชิ้นงานที่ทำการวัดคือ SnO_2ความเข้มข้น 0.3 M ระยะเวลาในการพ่นเครื่อง 5 hr ความหนา 770 nm ทำการวัดโดยเริ่มจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.1 μA - 1 μA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 770 nm (เครื่องจริง)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000019174	0.066910352
0.2	0.000042858	0.07477949
0.3	0.00006623	0.077039613
0.4	0.000089509	0.078088541
0.5	0.0001133	0.079123394
0.6	0.0001373	0.079885996
0.7	0.0001603	0.079928703
0.8	0.0001844	0.080477199
0.9	0.000209	0.081060842
1	0.0002335	0.081509609

Resistivity (avg) = 0.077880 Ω.cm



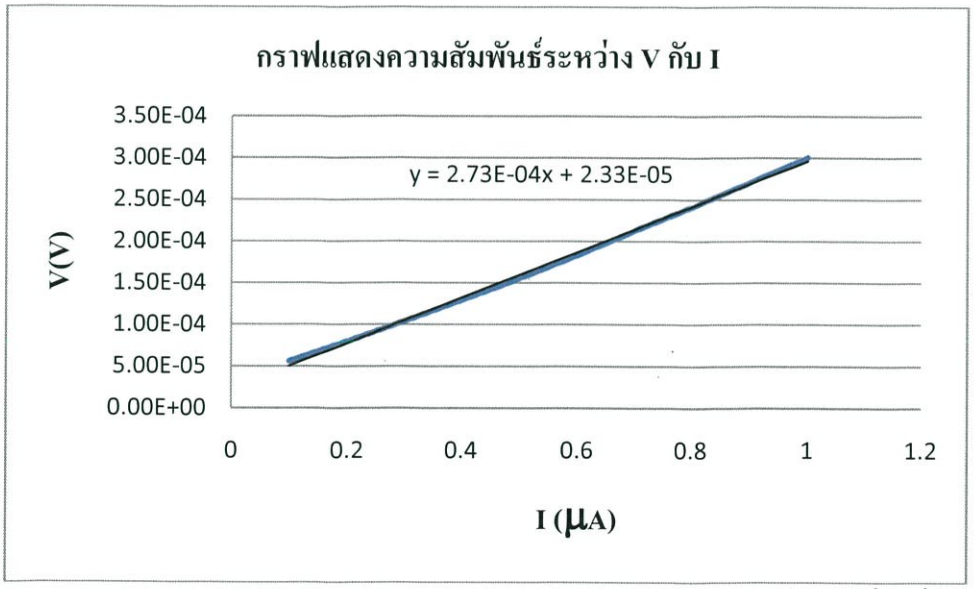
รูปที่ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 770 nm (เครื่องจริง)

จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.077880 Ω.cm

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลอง SnO_2 ความหนา 770 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000055786	0.194673047
0.2	0.000079916	0.139439028
0.3	0.0001045	0.12165815
0.4	0.0001293	0.112839248
0.5	0.0001554	0.1085271
0.6	0.0001837	0.106849282
0.7	0.0002127	0.106039685
0.8	0.0002407	0.105001517
0.9	0.0002707	0.104995895
1	0.000301	0.105060492

Resistivity (avg) = 0.120508 Ω.cm



รูปที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ SnO_2 ความหนา 770 nm (เครื่องที่สร้างขึ้น)

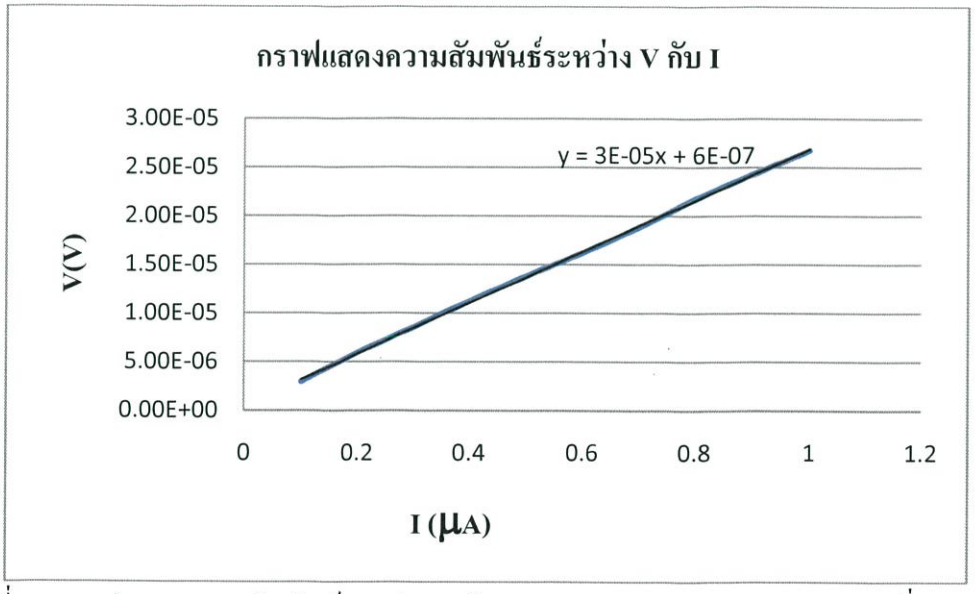
จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.120508 Ω.cm

ชิ้นงานที่ทำการวัดคือ ITO ความหนา 1160 nmอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ทำการวัดโดยเริ่มจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.1 μA - 1 μA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.13 และ 4.14

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลอง ITO ความหนา 1160 nm อบที่อุณหภูมิ 400°c (เครื่องจริง)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000002951	0.001551375
0.2	0.000005903	0.001551638
0.3	0.000008532	0.001495124
0.4	0.000011234	0.001476461
0.5	0.000013832	0.001454329
0.6	0.000016222	0.001421349
0.7	0.00001882	0.001413414
0.8	0.00002172	0.001427307
0.9	0.000024318	0.001420473
1	0.00002677	0.00140733

Resistivity (avg) = 0.001461 Ω.cm



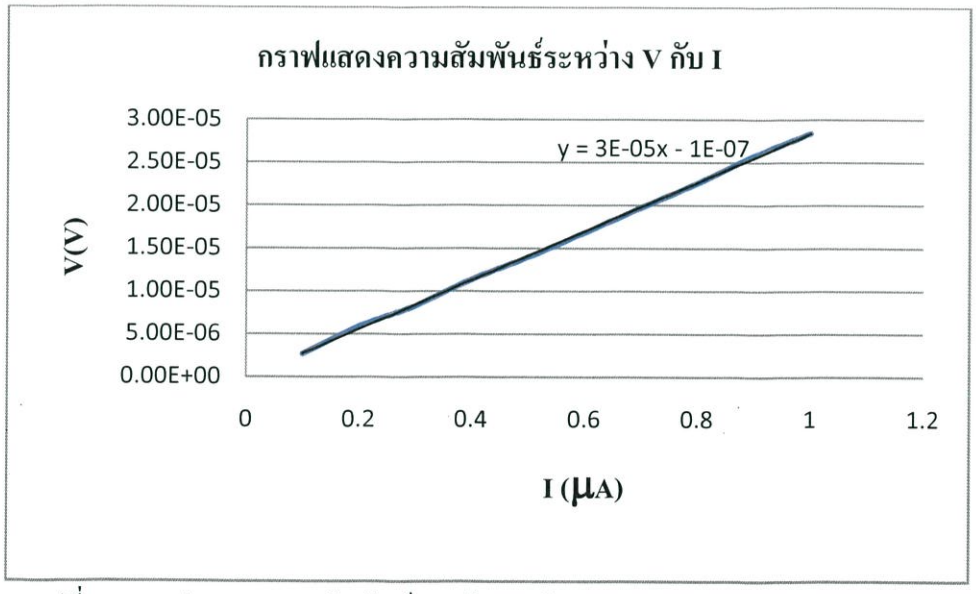
รูปที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ ITO ความหนา 1160 nm อบที่อุณหภูมิ 400°c (เครื่องจริง)

จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.001461 Ω.cm

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลอง ITO ความหนา 1160 nm อบที่อุณหภูมิ 400°c(เครื่องที่สร้างขึ้น)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000002681	0.001409433
0.2	0.000005861	0.001540598
0.3	0.000008293	0.001453243
0.4	0.00001138	0.00149565
0.5	0.000013978	0.00146968
0.6	0.000016856	0.0014769
0.7	0.000019776	0.001485211
0.8	0.000022645	0.001488093
0.9	0.000025762	0.001504821
1	0.000028454	0.00149586

Resistivity (avg) = 0.001481 Ω.cm



รูปที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ ITO ความหนา 1160 nm อบที่อุณหภูมิ 400°c(เครื่องที่สร้างขึ้น)

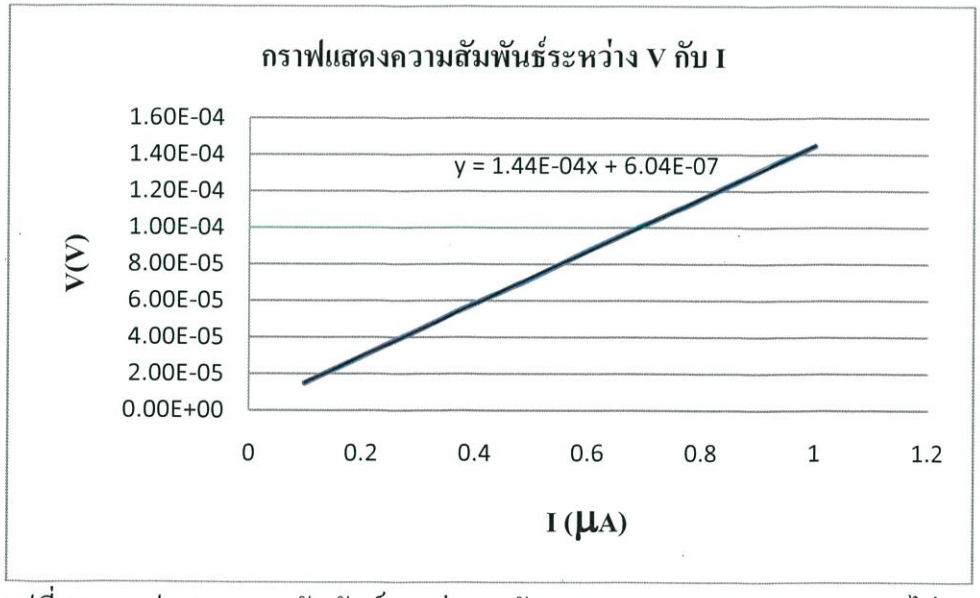
จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.001481 Ω.cm

ชิ้นงานที่ทำการวัดคือ ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ ทำการวัดโดยเริ่มจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.1 μA - 1 μA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.15 และ 4.16

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลอง ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ (เครื่องจริง)

Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000014902	0.007834159
0.2	0.000029431	0.007736113
0.3	0.000044084	0.007725161
0.4	0.000058716	0.007716925
0.5	0.000072341	0.007606105
0.6	0.00008742	0.007659622
0.7	0.0001018	0.007650234
0.8	0.0001159	0.00761658
0.9	0.0001306	0.007631643
1	0.000145	0.007627922

Resistivity (avg) = 0.007680 Ω.cm



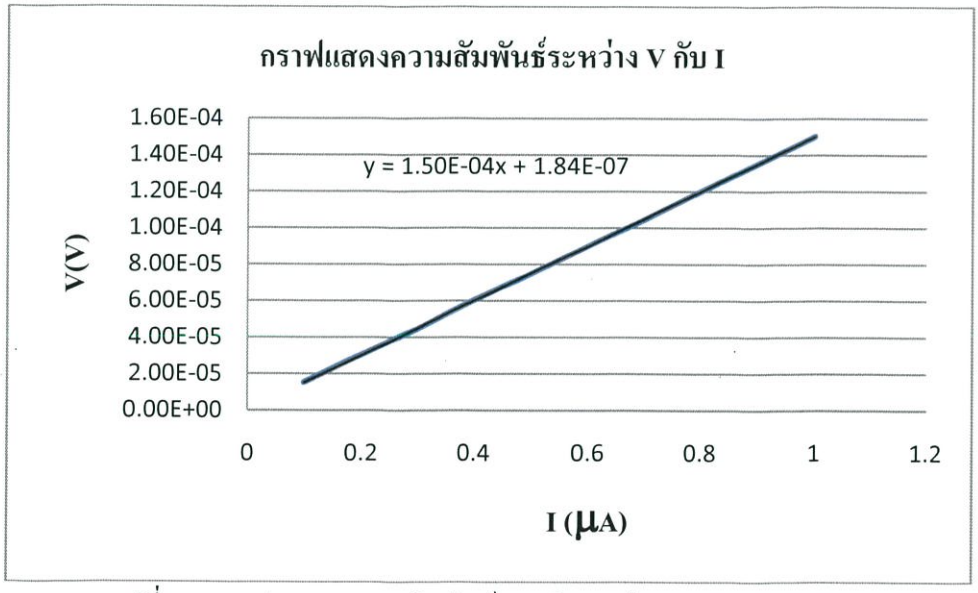
รูปที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ (เครื่องจริง)

จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.007680 Ω.cm

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลอง ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ (เครื่องที่สร้างขึ้น)

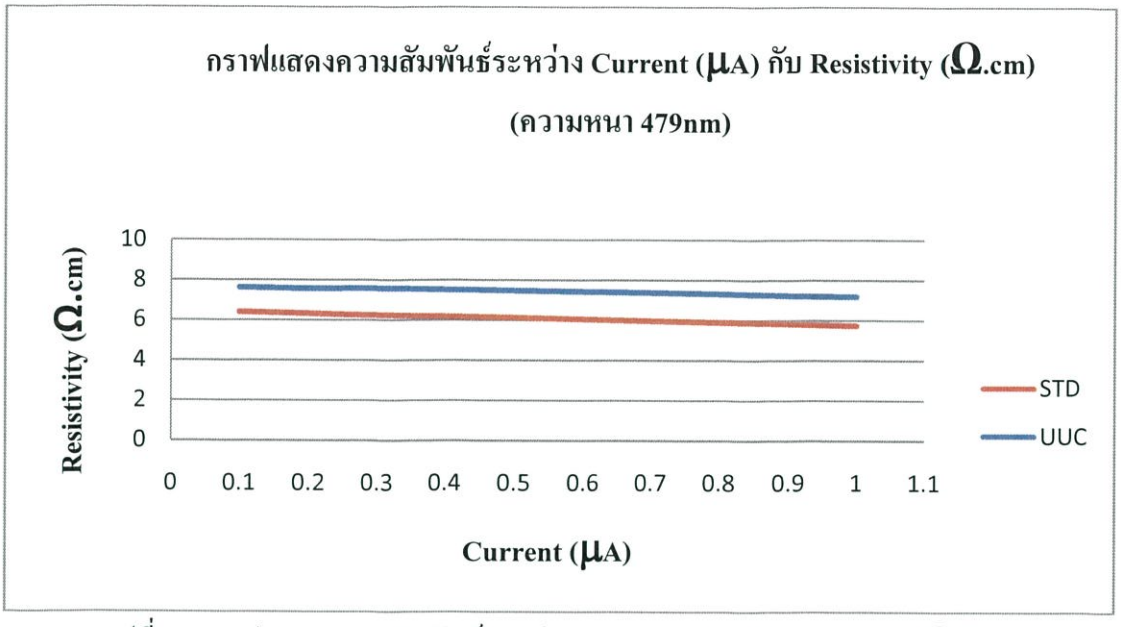
Current (μA)	Voltage (V)	Resistivity (Ω.cm)
0.1	0.000015204	0.007992924
0.2	0.000030522	0.008022289
0.3	0.000044915	0.007870783
0.4	0.000060493	0.007950473
0.5	0.000074949	0.007880316
0.6	0.000090184	0.0079018
0.7	0.000105	0.007891386
0.8	0.0001201	0.007893827
0.9	0.0001352	0.007899347
1	0.0001506	0.007920744

Resistivity (avg) = 0.007922 Ω.cm

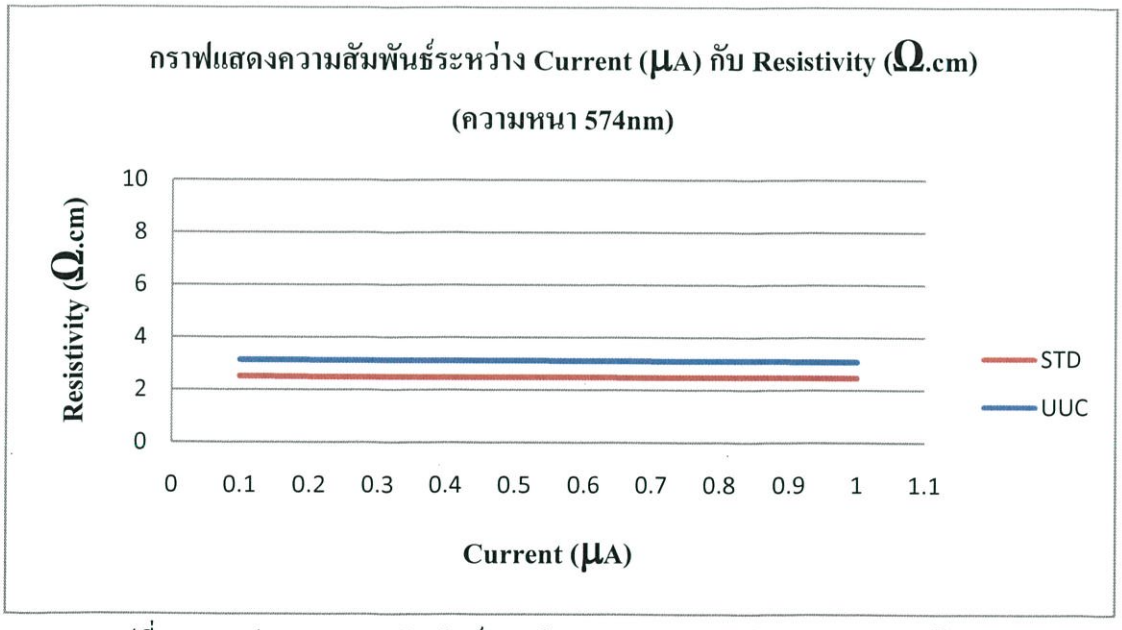


รูปที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ของ ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ (เครื่องที่สร้างขึ้น)

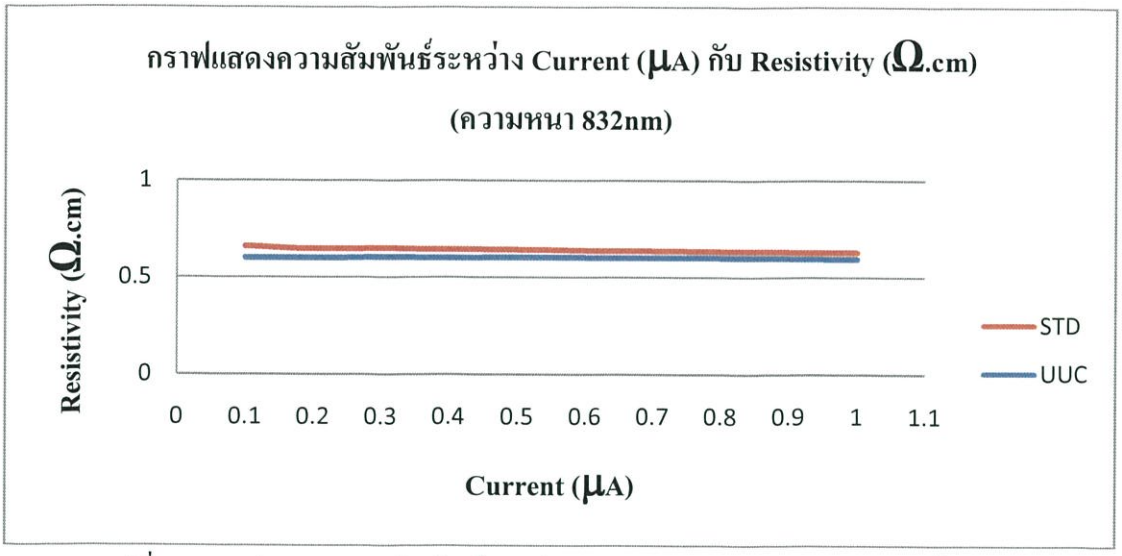
จากกราฟสามารถนำค่า V/I ที่ได้จาก slope มาคำนวณหาค่า Resistivity (ρ) จากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1 f_2$ ค่า Resistivity (ρ) เฉลี่ยที่ได้จากการทดลองนี้คือ 0.007922 Ω.cm



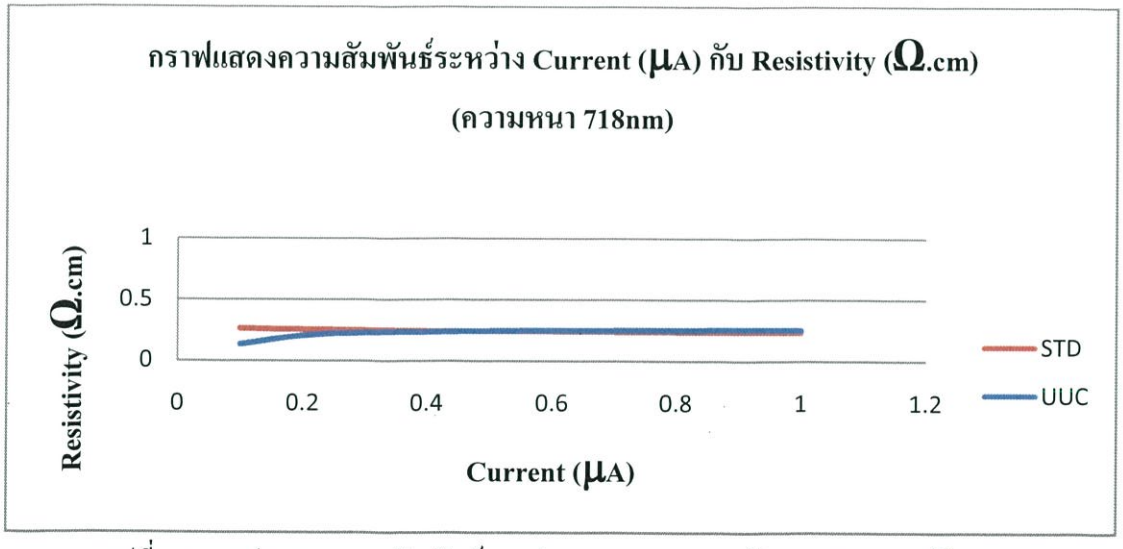
รูปที่ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm)
(ความหนา 479nm)



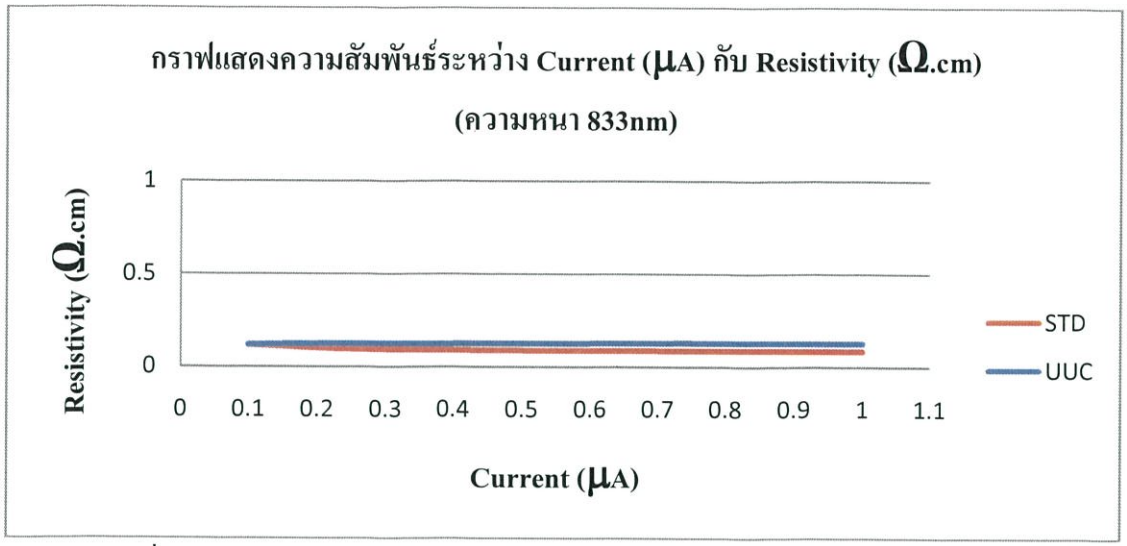
รูปที่ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm)
(ความหนา 574nm)



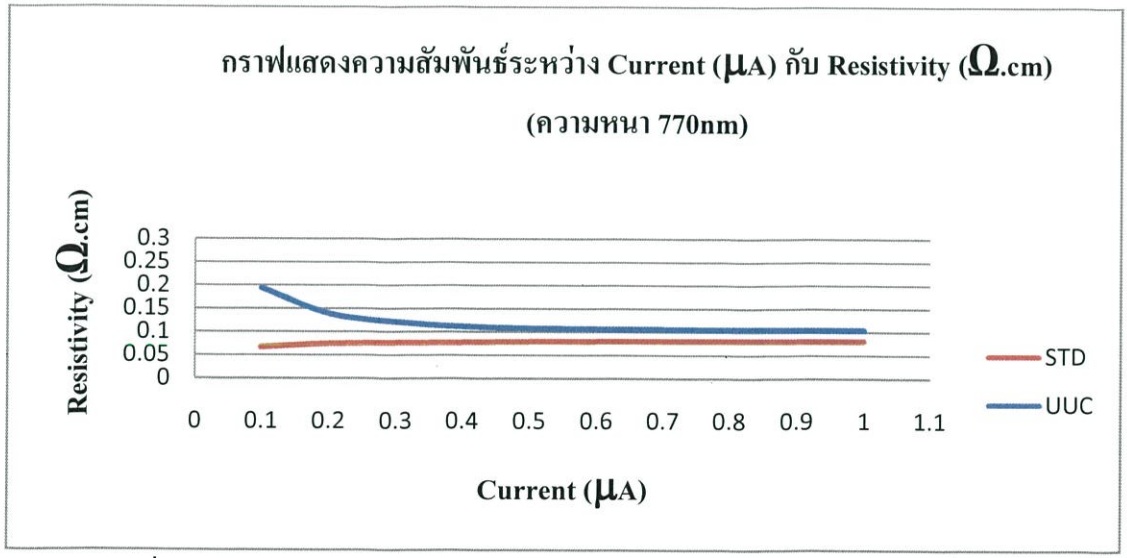
รูปที่ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm)
(ความหนา 832nm)



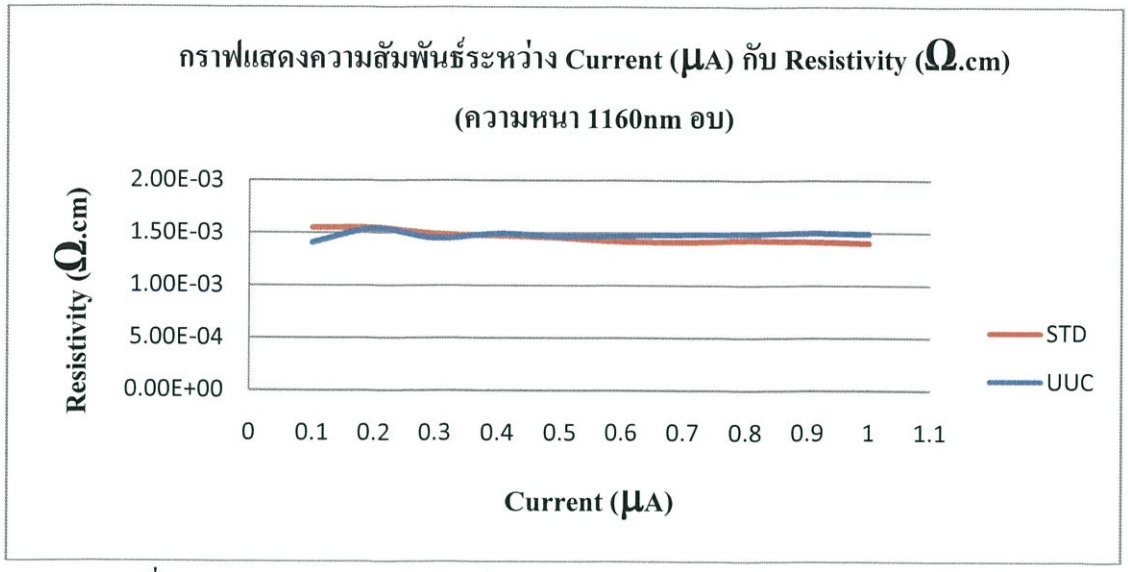
รูปที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm)
(ความหนา 718nm)



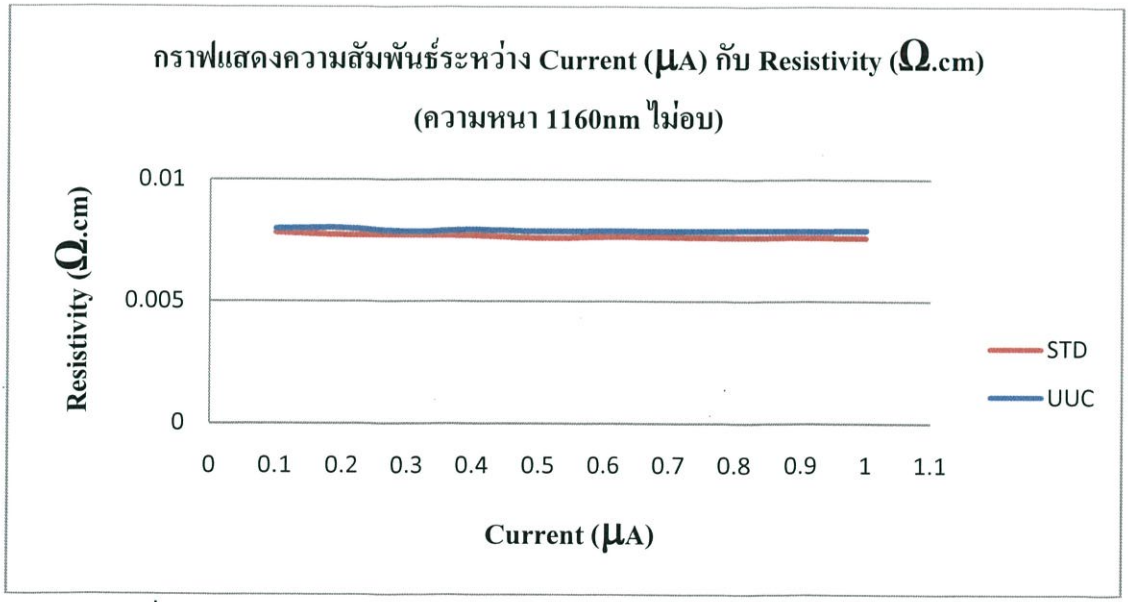
รูปที่ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm)
(ความหนา 833nm)



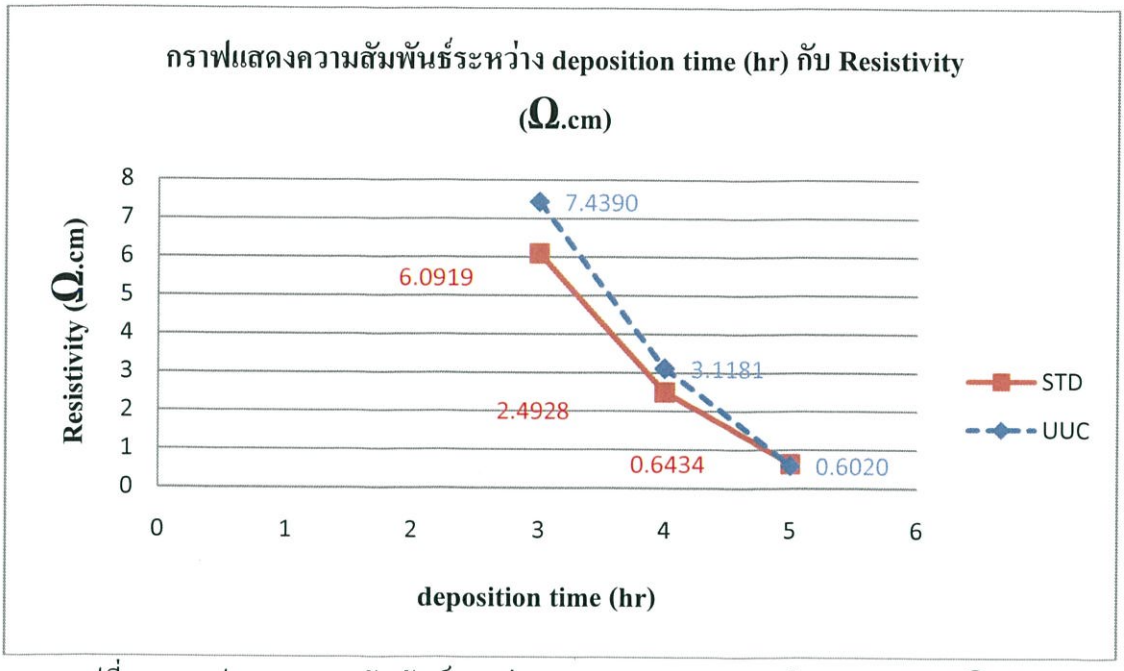
รูปที่ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm)
(ความหนา 770nm)



รูปที่ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm)
(ความหนา 1160nm อบ)



รูปที่ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current (μA) กับ Resistivity (Ω.cm)
(ความหนา 1160nm ไม่อบ)

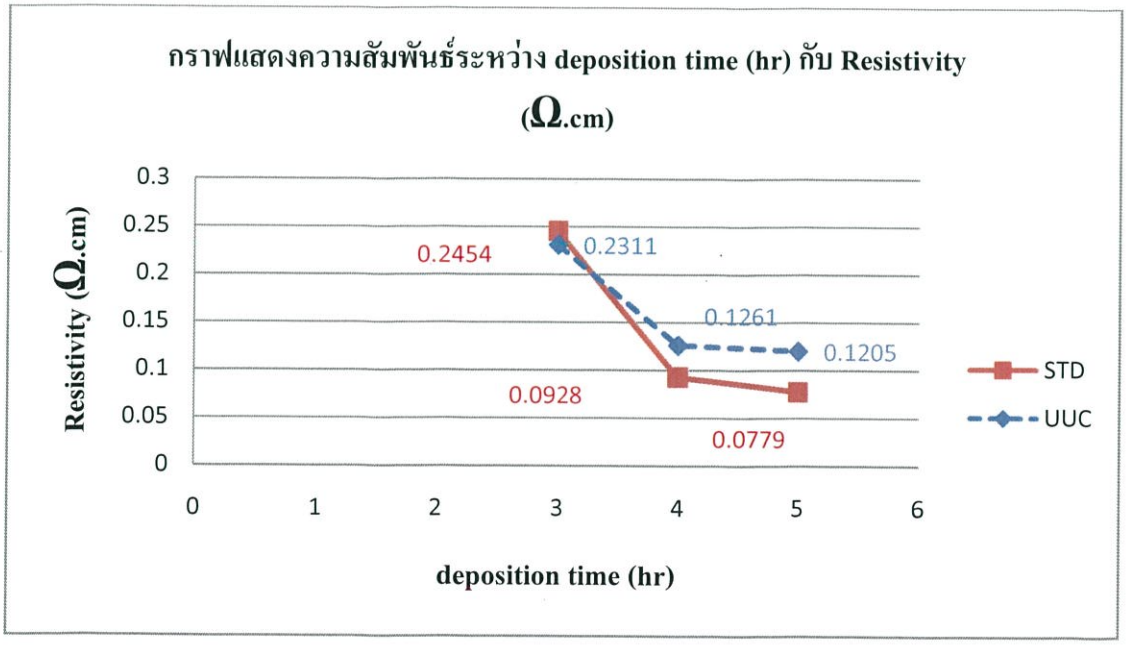


รูปที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง deposition time (hr) กับ Resistivity (Ω.cm) ความเข้มข้น 0.2 M

จากกราฟสามารถหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างได้(เมื่อ $X_1 = 7.439$ nm , $X_2 = 6.0919$ nm)

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง(ความเข้มข้น 0.2 M) $= 2\left(\frac{|x_1-x_2|}{x_1+x_2}\right)\times 100\%$

$= 19.91\%$



รูปที่ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง deposition time (hr) กับ Resistivity (Ω.cm) ความเข้มข้น 0.3 M

จากกราฟสามารถหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างได้(เมื่อ $X_1 = 0.2454$ nm, $X_2 = 0.2311$ nm)

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง(ความเข้มข้น 0.3 M) $= 2\left(\frac{|x_1-x_2|}{x_1+x_2}\right)\times 100\%$

$= 6.00\%$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง(ITO ความหนา 1160 nm อบ 400°c)

(เมื่อ $X_1 = 0.001481$ nm, $X_2 = 0.001461$ nm)

$= 2\left(\frac{|x_1-x_2|}{x_1+x_2}\right)\times 100\%$

$= 1.36\%$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง(ITO ความหนา 1160 nm ไม่อบ)

(เมื่อ $X_1 = 0.007680$ nm, $X_2 = 0.007922$ nm)

$= 2\left(\frac{|x_1-x_2|}{x_1+x_2}\right)\times 100\%$

$= 3.10\%$

4.2 อภิปรายผล

จากผลการวิจัยจะเห็นว่าค่าสภาพต้านทานในแต่ละกระแสที่เพิ่มเข้าไป ไม่ว่าจะเป็นค่าที่วัดได้จากเครื่องจริง หรือค่าที่วัดได้จากเครื่องที่ทำขึ้นมา จะมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าสภาพต้านทานเฉลี่ยของสารกึ่งตัวนำแต่ละชิ้นจากเครื่องทั้งสอง จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยในการวิจัย ได้ใช้โปรแกรม Visual Basic ในการเก็บค่าและคำนวณค่าสภาพต้านทาน โดยคำนวณจากสูตร

ค่า Resistivity ที่ได้คำนวณมาจากสูตร $\rho = 4.532t\left(\frac{V}{I}\right)f_1f_2$ โดย

$$f_1 = \frac{\ln 2}{\ln\left[\frac{\sinh\left(\frac{t}{s}\right)}{\sinh\left(\frac{t}{2s}\right)}\right]} \qquad ; f_2 \approx 1, (d/s >> 1) \qquad (4.1)$$

t = ความหนาของชิ้นงาน

s = ระยะห่างระหว่างขั้วของโพรบ

f_1 = Finite Thickness

f_2 = Finite Width

d = เส้นผ่านศูนย์ของของชิ้นงาน

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

จากการวิจัยเรื่อง การพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธี 4 point probe เป็นการศึกษาทดลองมีการดำเนินการเกี่ยวกับการวัดค่าสภาพต้านทานของชิ้นงาน เพื่อศึกษาถึงสมบัติของสารกึ่งตัวนำ โดยพัฒนาเครื่อง 4 point probe ให้เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ multimeterและ constant current source ซึ่งจะต้องออกแบบตัวเครื่อง และเซตระบบ แล้วนำค่าแรงดันที่วัดได้ไปคำนวณค่าสภาพต้านทานผ่านโปรแกรม Visual Basic ที่ได้เขียนขึ้นมา โดยจะทำการวัดชิ้นงานที่เครื่องเดิม และเครื่องที่พัฒนาแล้ว แล้วเปรียบเทียบกัน ผลปรากฏว่า ค่าสภาพต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทั้งสองนั้น มีค่าใกล้เคียงกันมาก อาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากการจัดลำดับในการวัด (หากชิ้นงานถูกปล่อยทิ้งไว้นาน จะทำให้ออกไซด์มาเกาะบริเวณผิวหน้า ค่าสภาพต้านทานที่วัดก็จะแตกต่างออกไปเล็กน้อย) วัสดุที่นำมาใช้ทำหัวเข็ม ความหนาที่สม่ำเสมอของชิ้นงาน เหล่านี้ล้วนมีผลทั้งสิ้น ค่าสภาพต้านทานที่ได้จากการทดลองยังสามารถนำไปหาค่าของสมบัติของสารกึ่งตัวนำอื่นๆได้ เช่น สภาพนำไฟฟ้า

ข้อดีของเครื่อง 4 point probe ที่ได้พัฒนาแล้วคือ สามารถทำการทดลองในการวัดค่าสภาพต้านทานได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติจะทำการป้อนค่ากระแสด้วยตัวเอง (manual) แล้วอ่านค่าแรงดันที่ได้ จากนั้นก็นำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานด้วยตนเอง แต่เครื่อง 4 point probe ที่พัฒนาแล้วเพียงแค่ใส่ข้อมูลที่จำเป็น ได้แก่ กระแสเริ่มต้น กระแสสิ้นสุด จำนวนรอบที่ทำการวัด หมายเลขเครื่อง multimeter และ constant current source ระยะห่างระหว่างขั้ว ความหนาของชิ้นงาน และแรงดันจำกัด โปรแกรมก็จะคำนวณให้ทันที นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนหัวเข็มได้เลยหากเกิดการชำรุดขึ้นมา โดยที่ไม่ต้องเปลี่ยนทั้งชุด

ข้อเสียของเครื่อง 4 point probe ที่ได้พัฒนาแล้วคือ เข็มที่ใช้นั้นมีขนาดเล็กและบางมาก ซึ่งในขณะที่เปลี่ยนเข็มอาจจะทำให้เข็มเสียหายได้หากขาดความระมัดระวัง

5.2 ปัญหาในการทดลอง

1. ในการวัดความต่างศักย์จากเครื่อง multimeterเนื่องจากไม่ทราบค่า resolution ทำให้เกิดปัญหาในการรันโปรแกรม
2. แผงวงจรที่นำมาทำหัวโพรบในตำแหน่งที่จะเสียบเข็มและซ็อคเกตมีขนาดเล็กกว่า ทำให้ไม่สามารถเสียบ จึงต้องขยายรู

3. ตำแหน่งที่ทำการวัดของชิ้นงานอาจจะคลาดเคลื่อน ทำให้ผลการทดลองอาจจะคลาดเคลื่อนไปบ้าง
4. เนื่องจากเข็มที่ใช้วัด มีขนาดบางมาก จึงเกิดการชำรุดของเข็มขึ้นมา ต้องเปลี่ยนเข็มใหม่

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิจัยนี้อุปกรณ์และ samples ควรมีความสะอาด

2. ก่อนทำการวิจัยทุกครั้งควรทำการเปิดเครื่อง current source และ multimeterทิ้งไว้ประมาณครึ่งชั่วโมงก่อน เพื่อเป็นการรอให้เครื่องพร้อมที่จะใช้งาน

3. ก่อนทำการวิจัยควรมีการเช็คโพรบก่อนว่ามีการช็อตกันอยู่หรือไม่

4. samplesที่นำมาทำการวิจัยไม่ควรมีขนาดเล็กเกินไป เนื่องจากอาจทำให้เกิดความคลาดเครลื่อนในการวัดค่าสภาพต้านทานได้

5. หาก samples ทำการวัดไม่ได้อาจเป็นเพราะ samples ไม่สะอาด หรือมีออกไซด์มาเกาะอยู่ที่ผิวหน้าของ samples จึงควรมีการนำ samples ไปทำความสะอาดก่อน

6. ไม่ควรปล่อยให้ samples สัมผัสกับอากาศนานเกินไป เพราะจะทำให้เกิดออกไซด์มาเกาะที่ผิวหน้าของ samples ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าสภาพต้านทานของชิ้นงานได้ (ออกไซด์ที่มาเกาะผิวหน้าของ samples มีคุณสมบัติเป็นฉนวน)

7. ในการทำการวิจัยแต่ละครั้งแรงกดของโพรบจะส่งผลต่อการวัด ดังนั้นในการวิจัยแต่ละครั้งจึงควรกำหนดแรงกดของโพรบให้มีค่าที่สม่ำเสมอตลอด

8. ตำแหน่งที่ทำการวัดบนชิ้นงานควรจะเป็นตำแหน่งเดียวกัน เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในขณะทดลองทั้งสองเครื่อง

เอกสารอ้างอิง

[1] ชลธิศ เลิศวนิชย์ทิพย์ และอคิระ โอตะ. การพัฒนาระบบวัดสภาพต้านทานของวัสดุที่อุณหภูมิต่ำด้วยโพรบสี่ขั้ว. ปริญญานิพธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบัน-เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังพ.ศ. 2554.

[2] W.R. Runyan, "Semiconductor Measurements and Instrumentation",McGraw-Hill Kogakusha,Ltd.1975.

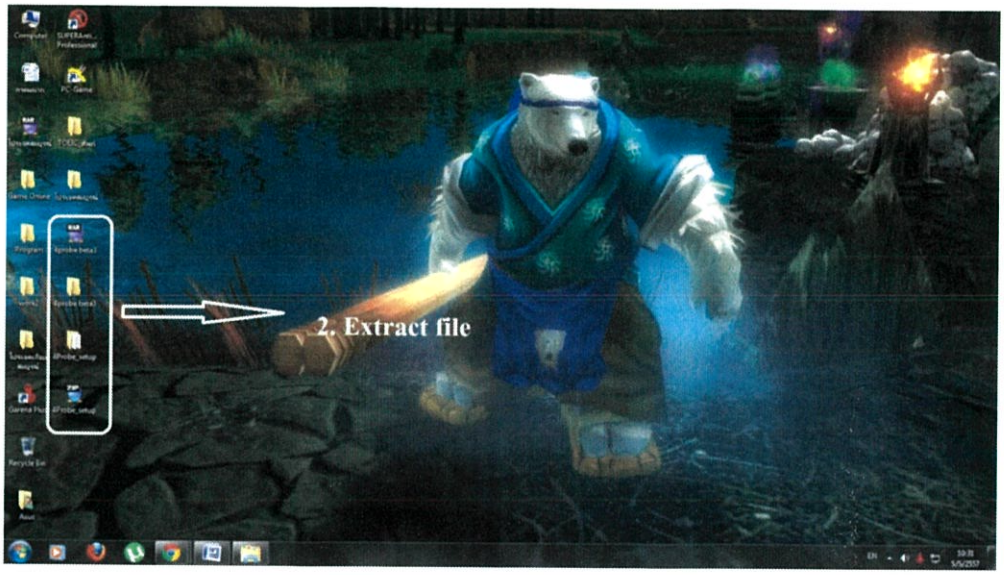
[3] บัญชา ปะสีละเตสัง. พัฒนาแอปพลิเคชั่นด้วย Visual Basic 2010. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2554.

[4] พัฒนพงษ์ พรมเกตุ. การพัฒนาระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อหาสมบัติของสารกึ่งตัวนำควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์.ปริญญานิพธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังพ.ศ. 2555.

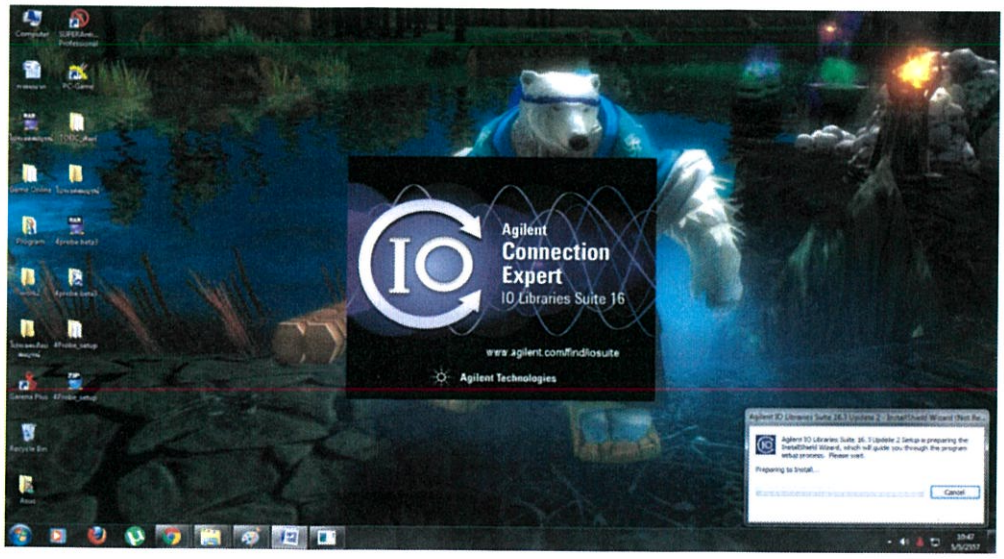
ภาคผนวก ก.

ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม 4-point probe

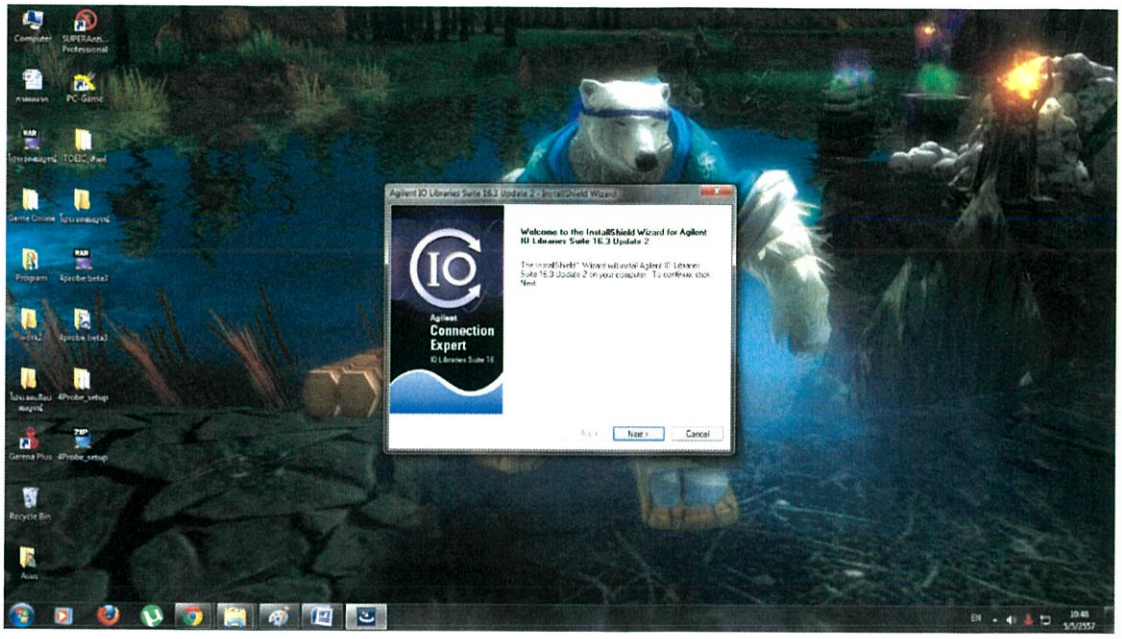
1. ทำการดาวโหลดโปรแกรมจาก http://www.4shared.com/rar/DE6pPjYtce/4probe_beta3.html และโปรแกรม IOLibSuite_16_3_17914 จาก http://www.4shared.com/zip/J1F9tO0-ba/4Probe_setup.html ซึ่งเป็นโปรแกรมเชื่อมต่อพอร์ท
2. จะได้ตัวโปรแกรมมา แล้วให้ทำการแตกไฟล์ให้เรียบร้อย



3. ไป 4Probe_setup เพื่อทำการติดตั้งโปรแกรมเชื่อมต่อพอร์ท แล้วดับเบิ้ลคลิกที่ IOLibSuite_16_3_17914

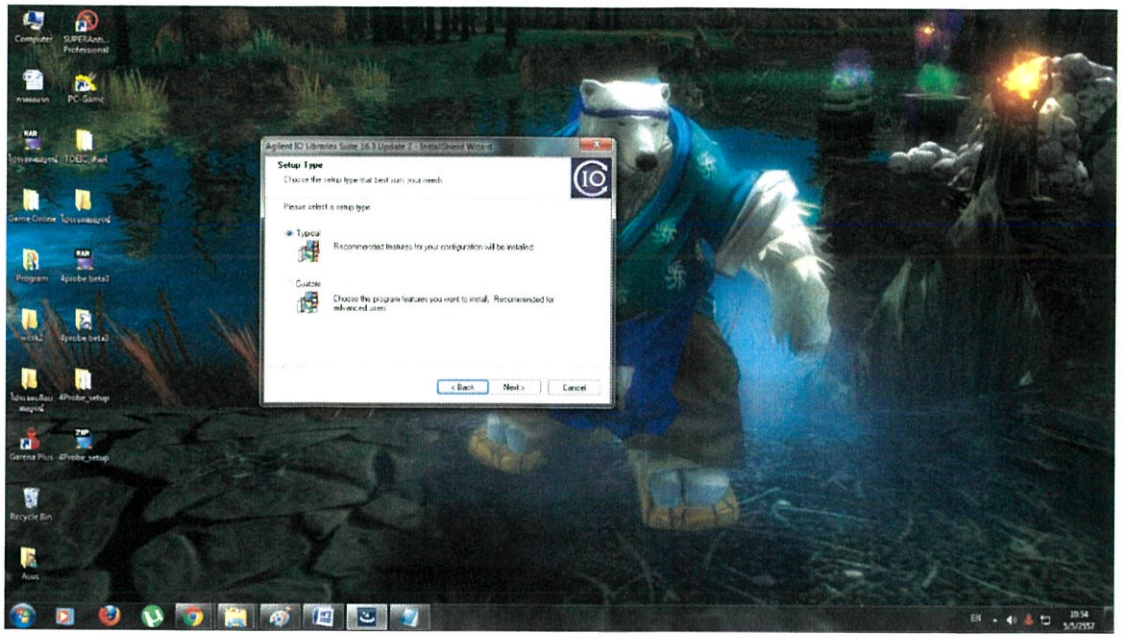


4. คลิก Next

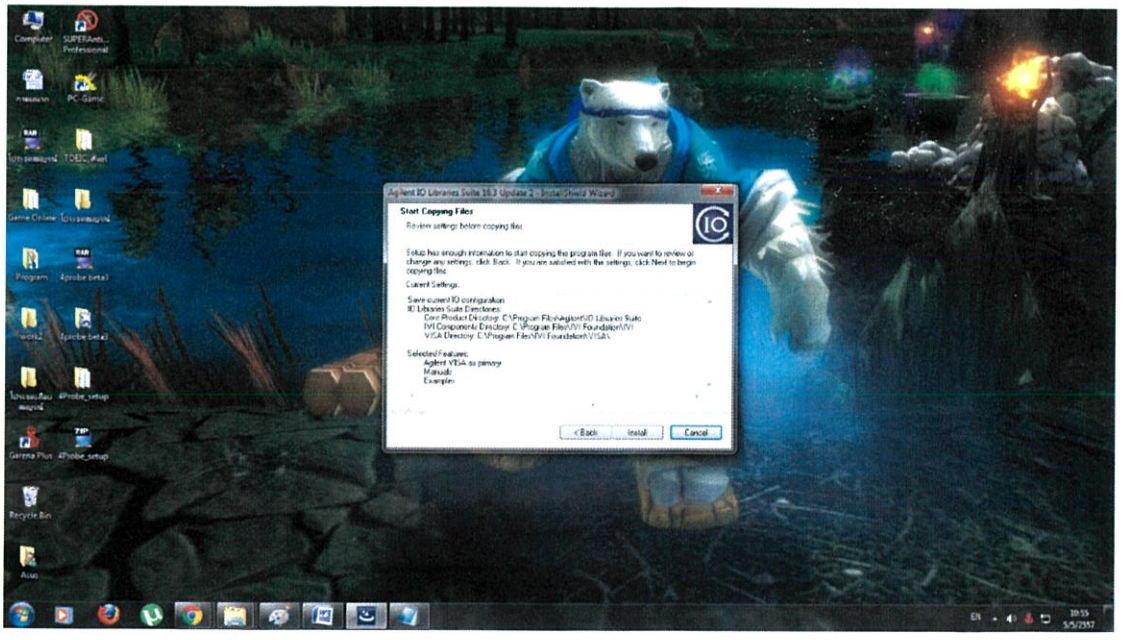


5. ทำเครื่องหมายที่ช่องแรก แล้วคลิกที่ Next ดังภาพ

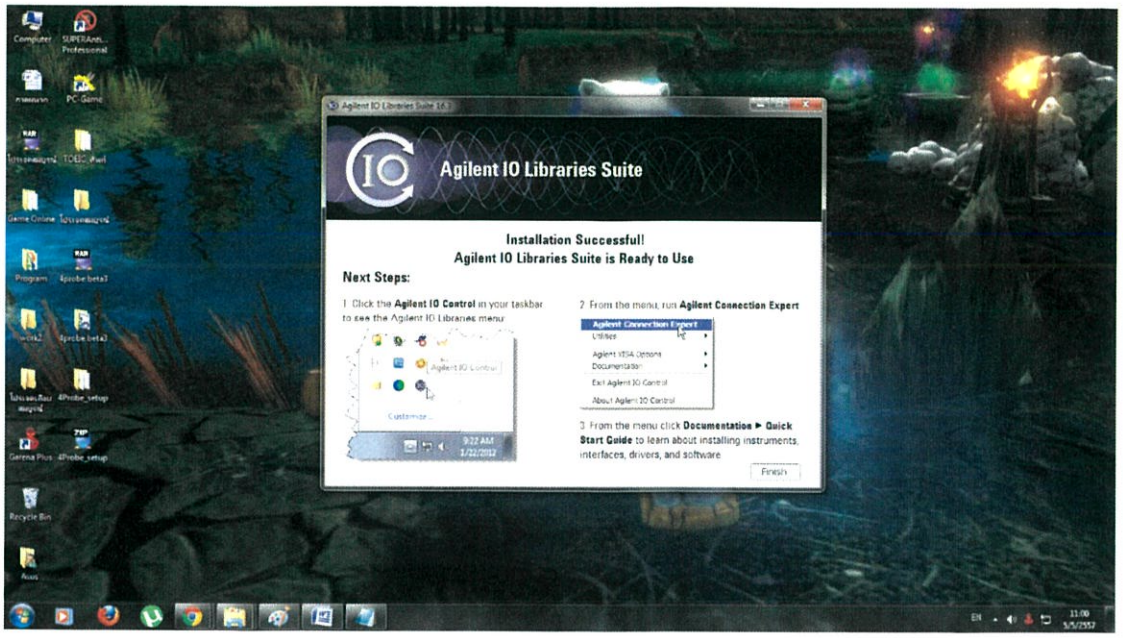
6. คลิก Next



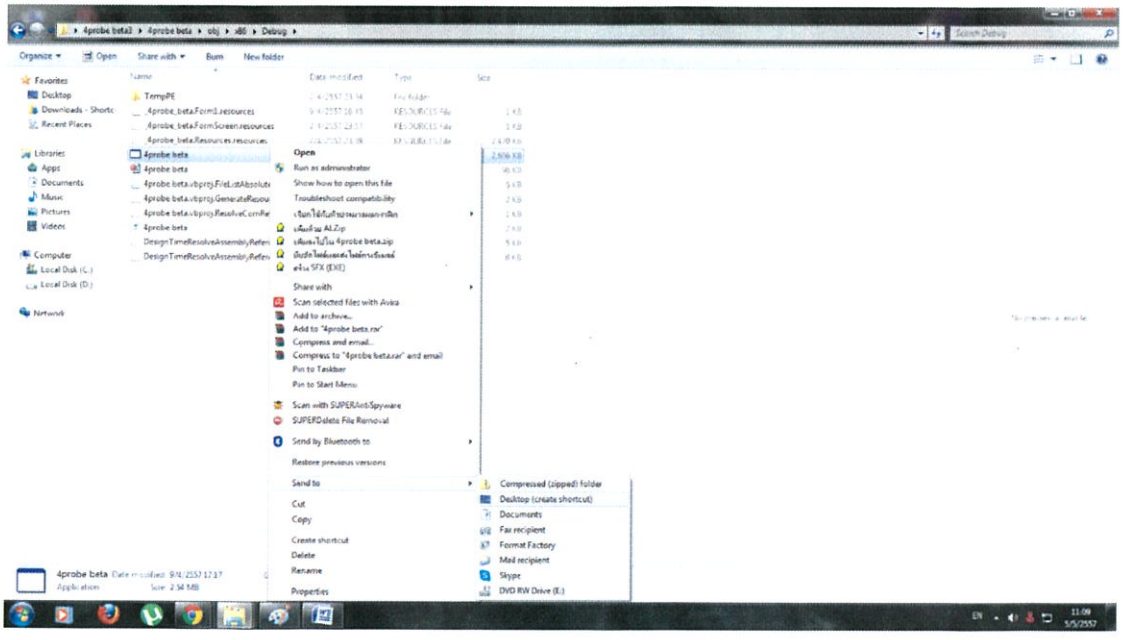
7. คลิก Install



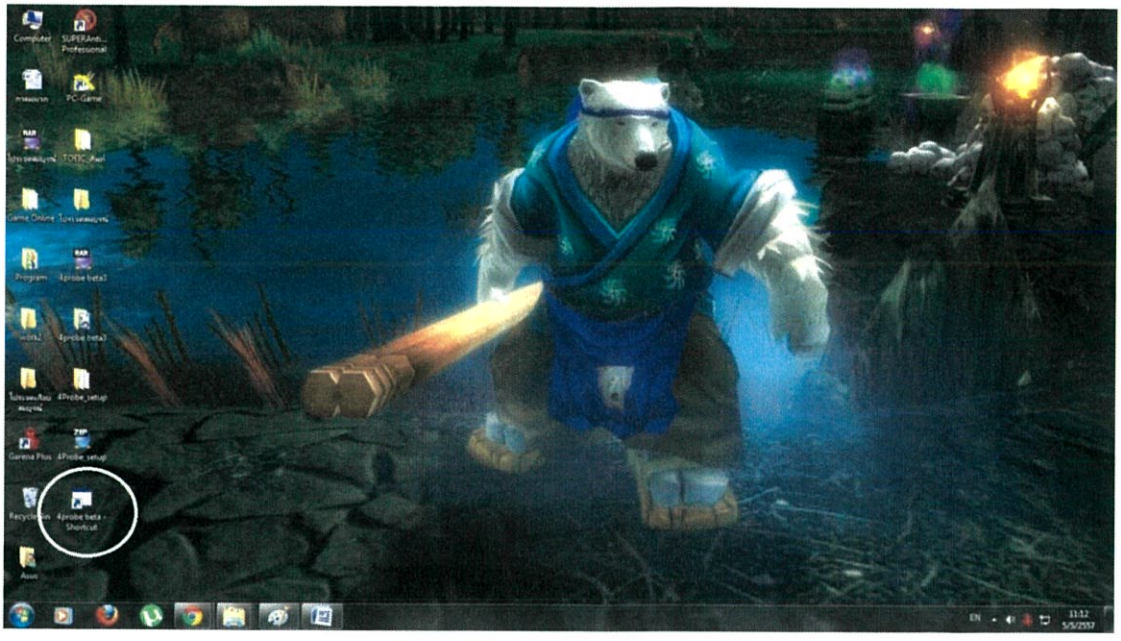
8. คลิก Finish



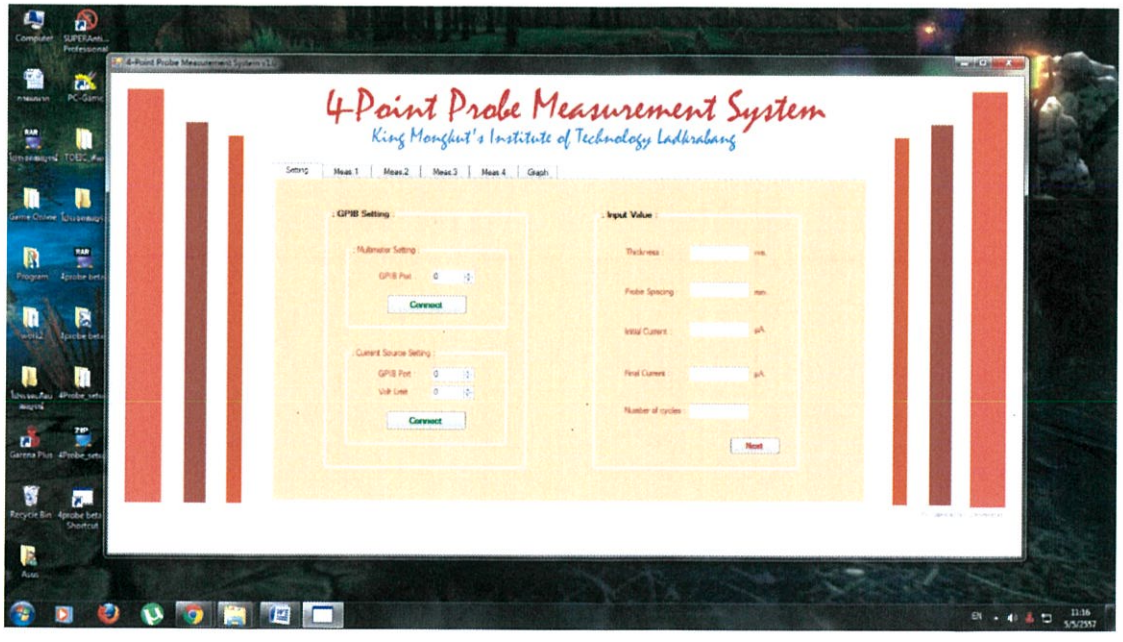
9. ให้ไปที่ 4probe beta3\4probe beta\obj\x86\Debug แล้วขวาที่ไฟล์ 4probe beta.exe จากนั้นก็ให้ shortcut ลงบน desktop



10. จะได้ตัวโปรแกรมขึ้นมาที่ desktop ดังภาพ แล้วดับเบิ้ลคลิกที่โปรแกรม



11. โปรแกรมก็จะแสดงหน้าต่างของโปรแกรม ดังภาพ



ภาคผนวก ข.

Code ของโปรแกรม 4-point probe (Visual Basic)

```
'Imports Library ที่จำเป็น
Imports System.Windows.Forms.TabPage
Imports System.IO
Imports System.IO.Ports
Imports System.Math
Imports System.Threading
Imports System.Resources
Imports Ivi.Visa.Interop
Imports Microsoft.VisualBasic
Imports System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting

Public Class Form1
    Public dmm As Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
    Public curr As Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
    Public dtTest As New DataTable
    Public t As Object
    Public s As Object
    Public f1 As Object
    Public R0 As Double
    Public R1 As Double
    Public R2 As Double
    Public R3 As Double
    Public R4 As Double
    Public R5 As Double
    Public R6 As Double
    Public R7 As Double
    Public R8 As Double
    Public R9 As Double
```

```
Public R10 As Double
Public R11 As Double
Public R12 As Double
Public R13 As Double
Public R14 As Double
Public R15 As Double
Public R16 As Double
Public R17 As Double
Public R18 As Double
Public R19 As Double
Public resisR As Double
Public dI0 As Double
Public dI1 As Double
Public dI2 As Double
Public dI3 As Double
Public dI4 As Double
Public dI5 As Double
Public dI6 As Double
Public dI7 As Double
Public dI8 As Double
Public dI9 As Double
Public dI10 As Double
Public dI11 As Double
Public dI12 As Double
Public dI13 As Double
Public dI14 As Double
Public dI15 As Double
Public dI16 As Double
Public dI17 As Double
Public dI18 As Double
Public dI19 As Double
Public ficurr As Double
```

```
Public n As Double
Public g0 As Double
Public g1 As Double
Public g2 As Double
Public g3 As Double
Public g4 As Double
Public g5 As Double
Public g6 As Double
Public g7 As Double
Public g8 As Double
Public g9 As Double
Public g10 As Double
Public g11 As Double
Public g12 As Double
Public g13 As Double
Public g14 As Double
Public g15 As Double
Public g16 As Double
Public g17 As Double
Public g18 As Double
Public g19 As Double
Dim axisy As Double
Dim axisx As Double
Dim data(,) As Object

Private Sub ConnectBtn1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles BtnVoltCon.Click

    'เชื่อมต่อเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์
    Try
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
```

```
        dmm = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488

        Dim ioAddress As String
        ioAddress = "GPIB0:: " + NumGPIB1.Value.ToString()
        dmm.IO() = mgr.Open(ioAddress)
        dmm.IO.Timeout = 7000
        BtnVoltCon.Enabled = False
        NumGPIB1.Enabled = False
        BtnVoltCon.BackColor = Color.Green
        BtnVoltCon.Text = "Connected"
      Catch ex As Exception
        MessageBox.Show("Please check GPIB address!!")
      End Try
    End Sub

    Private Sub BtnCurrCon_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BtnCurrCon.Click

      'เชื่อมต่อเครื่อง Current Source
      Try
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        curr = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
        Dim ioAddress2 As String
        ioAddress2 = "GPIB0:: " + NumGPIB2.Value.ToString()
        curr.IO() = mgr.Open(ioAddress2)
        curr.IO.Timeout = 7000
        BtnCurrCon.Enabled = False
        NumGPIB2.Enabled = False
        NumVlimt.Enabled = False
        curr.WriteString("REN X")
        Delay(1.5)
```

```
            curr.WriteString("D1 X")
            Delay(0.5)
            curr.WriteString("V" + NumVlimt.Value.ToString() + ".00E+00X")
            Delay(1)
            curr.WriteString("D0 X")
            Delay(0.25)
            BtnCurrCon.BackColor = Color.Green
            BtnCurrCon.Text = "Connected"
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Please check GPIB address!!")
        End Try
    End Sub

    Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles Button1.Click
        Try
            If TextBoxT.Text = ("") Then
                MessageBox.Show("Please input Thickness value!!")
            ElseIf TextBoxS.Text = ("") Then
                MessageBox.Show("Please input Probe Spacing value!!")
            ElseIf TextCurr1.Text = ("") Then
                MessageBox.Show("Please input Initial Current value!!")
            ElseIf TextCurr2.Text = ("") Then
                MessageBox.Show("Please input Final Current value!!")
            ElseIf TextCurr1.Text = TextCurr2.Text Then
                MessageBox.Show("Current must be different!!")
            ElseIf TextCurr2.Text >= 5000 Then
                MessageBox.Show("Please Decrease Final Current!!")
            ElseIf TextRound.Text < 2 Then
                MessageBox.Show("Number of cycles should more than 1 !!")
            ElseIf TextRound.Text > 20 Then
                MessageBox.Show("Number of cycles maximun 20")
```

```
        Else
            Tab.SelectedTab = TabMeas1 'ปุ่ม next
        End If
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show("Please check Connector!!")
    End Try
End Sub

Private Sub btnStt_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles btnStt.Click
    Try
        LabelI0.Text = "0.0"
        LabelI1.Text = "0.0"
        LabelI2.Text = "0.0"
        LabelI3.Text = "0.0"
        LabelI4.Text = "0.0"
        LabelI4.Text = "0.0"
        LabelI5.Text = "0.0"
        LabelI6.Text = "0.0"
        LabelI7.Text = "0.0"
        LabelI8.Text = "0.0"
        LabelI9.Text = "0.0"
        LabelI10.Text = "0.0"
        LabelI11.Text = "0.0"
        LabelI12.Text = "0.0"
        LabelI13.Text = "0.0"
        LabelI14.Text = "0.0"
        LabelI15.Text = "0.0"
        LabelI16.Text = "0.0"
        LabelI17.Text = "0.0"
        LabelI18.Text = "0.0"
        LabelI19.Text = "0.0"
```

```
LabelV0.Text = "0.0"
LabelV1.Text = "0.0"
LabelV2.Text = "0.0"
LabelV3.Text = "0.0"
LabelV4.Text = "0.0"
LabelV5.Text = "0.0"
LabelV6.Text = "0.0"
LabelV7.Text = "0.0"
LabelV8.Text = "0.0"
LabelV9.Text = "0.0"
LabelV10.Text = "0.0"
LabelV11.Text = "0.0"
LabelV12.Text = "0.0"
LabelV13.Text = "0.0"
LabelV14.Text = "0.0"
LabelV15.Text = "0.0"
LabelV16.Text = "0.0"
LabelV17.Text = "0.0"
LabelV18.Text = "0.0"
LabelV19.Text = "0.0"
LabelR0.Text = "0.0"
LabelR1.Text = "0.0"
LabelR2.Text = "0.0"
LabelR3.Text = "0.0"
LabelR4.Text = "0.0"
LabelR5.Text = "0.0"
LabelR6.Text = "0.0"
LabelR7.Text = "0.0"
LabelR8.Text = "0.0"
LabelR9.Text = "0.0"
LabelR10.Text = "0.0"
LabelR11.Text = "0.0"
```

```
LabelR12.Text = "0.0"
LabelR13.Text = "0.0"
LabelR14.Text = "0.0"
LabelR15.Text = "0.0"
LabelR16.Text = "0.0"
LabelR17.Text = "0.0"
LabelR18.Text = "0.0"
LabelR19.Text = "0.0"
LabelResisR0.Text = "0.0"
LabelResisR1.Text = "0.0"
LabelResisR2.Text = "0.0"
LabelResisR3.Text = "0.0"
Delay(0.5)
'คำนวณกระแสที่จ่ายในแต่ละรอบ
ficurr = TextCurr2.Text
dI0 = TextCurr1.Text
n = (ficurr - dI0) / (TextRound.Text - 1)
dI1 = dI0 + n
dI2 = dI1 + n
dI3 = dI2 + n
dI4 = dI3 + n
dI5 = dI4 + n
dI6 = dI5 + n
dI7 = dI6 + n
dI8 = dI7 + n
dI9 = dI8 + n
dI10 = dI9 + n
dI11 = dI10 + n
dI12 = dI11 + n
dI13 = dI12 + n
dI14 = dI13 + n
dI15 = dI14 + n
```

```
dI16 = dI15 + n
dI17 = dI16 + n
dI18 = dI17 + n
dI19 = dI18 + n
s = TextBoxS.Text
t = TextBoxT.Text
Dim dI() As Object = {dI0, dI1, dI2, dI3, dI4,
                      dI5, dI6, dI7, dI8, dI9,
                      dI10, dI11, dI12, dI13, dI14,
                      dI15, dI16, dI17, dI18, dI19}
Dim g() As Object = {g0, g1, g2, g3, g4,
                     g5, g6, g7, g8, g9,
                     g10, g11, g12, g13, g14,
                     g15, g16, g17, g18, g19}
Dim result() As Label = {LabelR0, LabelR1, LabelR2, LabelR3, LabelR4,
                         LabelR5, LabelR6, LabelR7, LabelR8, LabelR9,
                         LabelR10, LabelR11, LabelR12, LabelR13, LabelR14,
                         LabelR15, LabelR16, LabelR17, LabelR18, LabelR19}
Dim ShoI() As Label = {LabelI0, LabelI1, LabelI2, LabelI3, LabelI4,
                       LabelI5, LabelI6, LabelI7, LabelI8, LabelI9,
                       LabelI10, LabelI11, LabelI12, LabelI13, LabelI14,
                       LabelI15, LabelI16, LabelI17, LabelI18, LabelI19}
Dim ShoV() As Label = {LabelV0, LabelV1, LabelV2, LabelV3, LabelV4,
                       LabelV5, LabelV6, LabelV7, LabelV8, LabelV9,
                       LabelV10, LabelV11, LabelV12, LabelV13, LabelV14,
                       LabelV15, LabelV16, LabelV17, LabelV18, LabelV19}
Dim R(19) As Object
Dim a As Integer = 0
While (a <= TextRound.Text - 1)

  'จ่ายกระแส
  curr.WriteString("F0 X")
```

```
            curr.WriteString("I" + dI(a).ToString + "E-06 X")
            ShoI(a).Text = dI(a)
            Delay(5)
            curr.WriteString("F1 X")
            'ใส่ทศนิยม
            Delay(1)
            'วัดแรงดัน
            dmm.WriteString("MEAS:VOLT:DC? 0.01,0.0000001")
            g(a) = dmm.ReadNumber
            ShoV(a).Text = g(a) 'ใส่ทศนิยม
            'คำนวณ
            f1 = Log(2) / (Log(Sinh(t * 10 ^ -6 / s) / Sinh(t * 10 ^ -6 / (2 * s))))
            R(a) = ((4.532 * t * 10 ^ -9 * (g(a) / (dI(a) * 10 ^ -6))) * f1) * 100
            result(a).Text = R(a)  'ใส่ทศนิยม
            a += 1
            Delay(2)
            curr.WriteString("F0 X")
            Button2.PerformClick()
        End While
        resisR = (R(0) + R(1) + R(2) + R(3) + R(4) + R(5) + R(6) + R(7) + R(8) + R(9) +
            R(10) + R(11) + R(12) + R(13) + R(14) + R(15) + R(16) + R(17) + R(18) + R(19)) /
(TextRound.Text * 1)
        LabelResisR0.Text = resisR
        LabelResisR1.Text = resisR
        LabelResisR2.Text = resisR
        LabelResisR3.Text = resisR
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show("Something Wrong!!")
    End Try
End Sub
```

```
'ส่งค่าไป Excal
  Private Sub PictureBox1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles PictureBox1.Click
    Try
      Dim oExcel As Object
      Dim oBook As Object
      Dim oSheet As Object
      'Start a new workbook in Excel
      oExcel = CreateObject("Excel.Application")
      oBook = oExcel.Workbooks.Add
      'Add data to cells of the first worksheet in the new workbook
      oSheet = oBook.Worksheets(1)
      '------------------------- sheet 1-------------------------
      oSheet = oBook.Worksheets(1)
      oSheet.Range("A1").Value = "Current(μA.)"
      oSheet.Range("A2").Value = LabelI0.Text
      oSheet.Range("A3").Value = LabelI1.Text
      oSheet.Range("A4").Value = LabelI2.Text
      oSheet.Range("A5").Value = LabelI3.Text
      oSheet.Range("A6").Value = LabelI4.Text
      oSheet.Range("A7").Value = LabelI5.Text
      oSheet.Range("A8").Value = LabelI6.Text
      oSheet.Range("A9").Value = LabelI7.Text
      oSheet.Range("A10").Value = LabelI8.Text
      oSheet.Range("A11").Value = LabelI9.Text
      oSheet.Range("A12").Value = LabelI10.Text
      oSheet.Range("A13").Value = LabelI11.Text
      oSheet.Range("A14").Value = LabelI12.Text
      oSheet.Range("A15").Value = LabelI13.Text
      oSheet.Range("A16").Value = LabelI14.Text
```

```
oSheet.Range("A17").Value = LabelI15.Text
oSheet.Range("A18").Value = LabelI16.Text
oSheet.Range("A19").Value = LabelI17.Text
oSheet.Range("A20").Value = LabelI18.Text
oSheet.Range("A21").Value = LabelI19.Text
oSheet.Range("B1").Value = "Voltage(V.)"
oSheet.Range("B2").Value = LabelV0.Text
oSheet.Range("B3").Value = LabelV1.Text
oSheet.Range("B4").Value = LabelV2.Text
oSheet.Range("B5").Value = LabelV3.Text
oSheet.Range("B6").Value = LabelV4.Text
oSheet.Range("B7").Value = LabelV5.Text
oSheet.Range("B8").Value = LabelV6.Text
oSheet.Range("B9").Value = LabelV7.Text
oSheet.Range("B10").Value = LabelV8.Text
oSheet.Range("B11").Value = LabelV9.Text
oSheet.Range("B12").Value = LabelV10.Text
oSheet.Range("B13").Value = LabelV11.Text
oSheet.Range("B14").Value = LabelV12.Text
oSheet.Range("B15").Value = LabelV13.Text
oSheet.Range("B16").Value = LabelV14.Text
oSheet.Range("B17").Value = LabelV15.Text
oSheet.Range("B18").Value = LabelV16.Text
oSheet.Range("B19").Value = LabelV17.Text
oSheet.Range("B20").Value = LabelV18.Text
oSheet.Range("B21").Value = LabelV19.Text
oSheet.Range("C1").Value = "Resistivity(Ω.cm)"
oSheet.Range("C2").Value = LabelR0.Text
oSheet.Range("C3").Value = LabelR1.Text
oSheet.Range("C4").Value = LabelR2.Text
oSheet.Range("C5").Value = LabelR3.Text
oSheet.Range("C6").Value = LabelR4.Text
```

```
            oSheet.Range("C7").Value = LabelR5.Text
            oSheet.Range("C8").Value = LabelR6.Text
            oSheet.Range("C9").Value = LabelR7.Text
            oSheet.Range("C10").Value = LabelR8.Text
            oSheet.Range("C11").Value = LabelR9.Text
            oSheet.Range("C12").Value = LabelR10.Text
            oSheet.Range("C13").Value = LabelR11.Text
            oSheet.Range("C14").Value = LabelR12.Text
            oSheet.Range("C15").Value = LabelR13.Text
            oSheet.Range("C16").Value = LabelR14.Text
            oSheet.Range("C17").Value = LabelR15.Text
            oSheet.Range("C18").Value = LabelR16.Text
            oSheet.Range("C19").Value = LabelR17.Text
            oSheet.Range("C20").Value = LabelR18.Text
            oSheet.Range("C21").Value = LabelR19.Text
            'Save the Workbook and Quit Excel
            oBook.SaveAs("D:\4Probe\4Probe.xlsx")
            oExcel.Quit()
            MessageBox.Show("Save to excel complete ")
    Catch ex As Exception
            MsgBox("Can not Save", MsgBoxStyle.Exclamation)
        End Try
    End Sub

    Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles Button2.Click
        Try
            Chart1.Series.Clear()
            Chart2.Series.Clear()
            Chart1.Titles.Clear()
            Chart2.Titles.Clear()
            If TextRound.Text = 20 Then
```

```
'กราฟ I, V
Chart1.ResetAutoValues()
Chart1.Series.Clear()
Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
'Create a new series and add data points to it.
Dim s As New Series
s.Name = "I, V"
'Change to a line graph.
s.ChartType = SeriesChartType.Line
s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
s.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelV12.Text)
s.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelV13.Text)
s.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelV14.Text)
s.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelV15.Text)
s.Points.AddXY(LabelI16.Text, LabelV16.Text)
s.Points.AddXY(LabelI17.Text, LabelV17.Text)
s.Points.AddXY(LabelI18.Text, LabelV18.Text)
s.Points.AddXY(LabelI19.Text, LabelV19.Text)
'Add the series to the Chart1 control.
Chart1.Series.Add(s)
'กราฟ I, R
```

```
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelR12.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelR13.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelR14.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelR15.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI16.Text, LabelR16.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI17.Text, LabelR17.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI18.Text, LabelR18.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI19.Text, LabelR19.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 19 Then
        'กราฟ I, V
```

```
Chart1.ResetAutoValues()
Chart1.Series.Clear()
Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
'Create a new series and add data points to it.
Dim s As New Series
s.Name = "I, V"
'Change to a line graph.
s.ChartType = SeriesChartType.Line
s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
s.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelV12.Text)
s.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelV13.Text)
s.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelV14.Text)
s.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelV15.Text)
s.Points.AddXY(LabelI16.Text, LabelV16.Text)
s.Points.AddXY(LabelI17.Text, LabelV17.Text)
s.Points.AddXY(LabelI18.Text, LabelV18.Text)
'Add the series to the Chart1 control.
Chart1.Series.Add(s)
'กราฟ I, R
Chart1.ResetAutoValues()
Chart2.Series.Clear()
```

```
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelR12.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelR13.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelR14.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelR15.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI16.Text, LabelR16.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI17.Text, LabelR17.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI18.Text, LabelR18.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 18 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
```

```
'Create a new series and add data points to it.
Dim s As New Series
s.Name = "I, V"
'Change to a line graph.
s.ChartType = SeriesChartType.Line
s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
s.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelV12.Text)
s.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelV13.Text)
s.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelV14.Text)
s.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelV15.Text)
s.Points.AddXY(LabelI16.Text, LabelV16.Text)
s.Points.AddXY(LabelI17.Text, LabelV17.Text)
'Add the series to the Chart1 control.
Chart1.Series.Add(s)

'กราฟ I, R
Chart1.ResetAutoValues()
Chart2.Series.Clear()
Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
'Create a new series and add data points to it.
Dim t As New Series
```

```
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelR12.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelR13.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelR14.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelR15.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI16.Text, LabelR16.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI17.Text, LabelR17.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 17 Then

        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
```

```
'Change to a line graph.
s.ChartType = SeriesChartType.Line
s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
s.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelV12.Text)
s.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelV13.Text)
s.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelV14.Text)
s.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelV15.Text)
s.Points.AddXY(LabelI16.Text, LabelV16.Text)
'Add the series to the Chart1 control.
Chart1.Series.Add(s)

'กราฟ I, R
Chart1.ResetAutoValues()
Chart2.Series.Clear()
Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
'Create a new series and add data points to it.
Dim t As New Series
t.Name = "I, R"
'Change to a line graph.
t.ChartType = SeriesChartType.Line
t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
```

```
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelR12.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelR13.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelR14.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelR15.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI16.Text, LabelR16.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 16 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
```

```
s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
s.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelV12.Text)
s.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelV13.Text)
s.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelV14.Text)
s.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelV15.Text)
'Add the series to the Chart1 control.
Chart1.Series.Add(s)

'กราฟ I, R
Chart1.ResetAutoValues()
Chart2.Series.Clear()
Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
'Create a new series and add data points to it.
Dim t As New Series
t.Name = "I, R"
'Change to a line graph.
t.ChartType = SeriesChartType.Line
t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
```

```
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelR12.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelR13.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelR14.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI15.Text, LabelR15.Text)

    ElseIf TextRound.Text = 15 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelV12.Text)
```

```
        s.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelV13.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelV14.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)

        'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelR12.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelR13.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI14.Text, LabelR14.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 14 Then
```

```
'กราฟ I, V
 Chart1.ResetAutoValues()
 Chart1.Series.Clear()
 Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
 'Create a new series and add data points to it.
 Dim s As New Series
 s.Name = "I, V"
 'Change to a line graph.
 s.ChartType = SeriesChartType.Line
 s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelV12.Text)
 s.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelV13.Text)
 'Add the series to the Chart1 control.
 Chart1.Series.Add(s)

'กราฟ I, R
 Chart1.ResetAutoValues()
 Chart2.Series.Clear()
 Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
```

```
    'Create a new series and add data points to it.

    Dim t As New Series
    t.Name = "I, R"
    'Change to a line graph.
    t.ChartType = SeriesChartType.Line
    t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelR12.Text)
    t.Points.AddXY(LabelI13.Text, LabelR13.Text)
    'Add the series to the Chart1 control.
    Chart2.Series.Add(t)
ElseIf TextRound.Text = 13 Then

  'กราฟ I, V
    Chart1.ResetAutoValues()
    Chart1.Series.Clear()
    Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
    'Create a new series and add data points to it.
    Dim s As New Series
    s.Name = "I, V"
    'Change to a line graph.
```

```
s.ChartType = SeriesChartType.Line
s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
s.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelV12.Text)
'Add the series to the Chart1 control.
Chart1.Series.Add(s)

'กราฟ I, R
Chart1.ResetAutoValues()
Chart2.Series.Clear()
Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
'Create a new series and add data points to it.
Dim t As New Series
t.Name = "I, R"
'Change to a line graph.
t.ChartType = SeriesChartType.Line
t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
```

```
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI12.Text, LabelR12.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)

    ElseIf TextRound.Text = 12 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelV11.Text)
```

```
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)
    'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI11.Text, LabelR11.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 11 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
```

```
s.Name = "I, V"
'Change to a line graph.
s.ChartType = SeriesChartType.Line
s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
s.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelV10.Text)
'Add the series to the Chart1 control.
Chart1.Series.Add(s)

'กราฟ I, R
Chart1.ResetAutoValues()
Chart2.Series.Clear()
Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
'Create a new series and add data points to it.
Dim t As New Series
t.Name = "I, R"
'Change to a line graph.
t.ChartType = SeriesChartType.Line
t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
```

```
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI10.Text, LabelR10.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 10 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelV9.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)

        'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
```

```
        Chart2.Series.Clear()


        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI9.Text, LabelR9.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 9 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
```

```
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelV8.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)

        'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI8.Text, LabelR8.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 8 Then
        'กราฟ I, V
```

```
Chart1.ResetAutoValues()
Chart1.Series.Clear()
Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
'Create a new series and add data points to it.
Dim s As New Series
s.Name = "I, V"
'Change to a line graph.
s.ChartType = SeriesChartType.Line
s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
s.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelV7.Text)
'Add the series to the Chart1 control.
Chart1.Series.Add(s)

'กราฟ I, R
Chart1.ResetAutoValues()
Chart2.Series.Clear()
Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
'Create a new series and add data points to it.
Dim t As New Series
t.Name = "I, R"
'Change to a line graph.
t.ChartType = SeriesChartType.Line
t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
```

```
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI7.Text, LabelR7.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 7 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelV6.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)

        'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
```

```
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI6.Text, LabelR6.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 6 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelV5.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)
        'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
```

```
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI5.Text, LabelR5.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 5 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelV4.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)
```

```
        'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI4.Text, LabelR4.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 4 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelV3.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)
```

```
        'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI3.Text, LabelR3.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 3 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelV2.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)

        'กราฟ I, R
```

```
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim t As New Series
        t.Name = "I, R"
        'Change to a line graph.
        t.ChartType = SeriesChartType.Line
        t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
        t.Points.AddXY(LabelI2.Text, LabelR2.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart2.Series.Add(t)
    ElseIf TextRound.Text = 2 Then
        'กราฟ I, V
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart1.Series.Clear()
        Chart1.Titles.Add("Grapg show relation of I and V")
        'Create a new series and add data points to it.
        Dim s As New Series
        s.Name = "I, V"
        'Change to a line graph.
        s.ChartType = SeriesChartType.Line
        s.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelV0.Text)
        s.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelV1.Text)
        'Add the series to the Chart1 control.
        Chart1.Series.Add(s)

        'กราฟ I, R
        Chart1.ResetAutoValues()
        Chart2.Series.Clear()
        Chart2.Titles.Add("Grapg show relation of I and R")
```

```
            'Create a new series and add data points to it.
            Dim t As New Series
            t.Name = "I, R"
            'Change to a line graph.
            t.ChartType = SeriesChartType.Line
            t.Points.AddXY(LabelI0.Text, LabelR0.Text)
            t.Points.AddXY(LabelI1.Text, LabelR1.Text)
            'Add the series to the Chart1 control.
            Chart2.Series.Add(t)
        End If
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show("Something Wrong!!")
    End Try
  End Sub
End Class
```