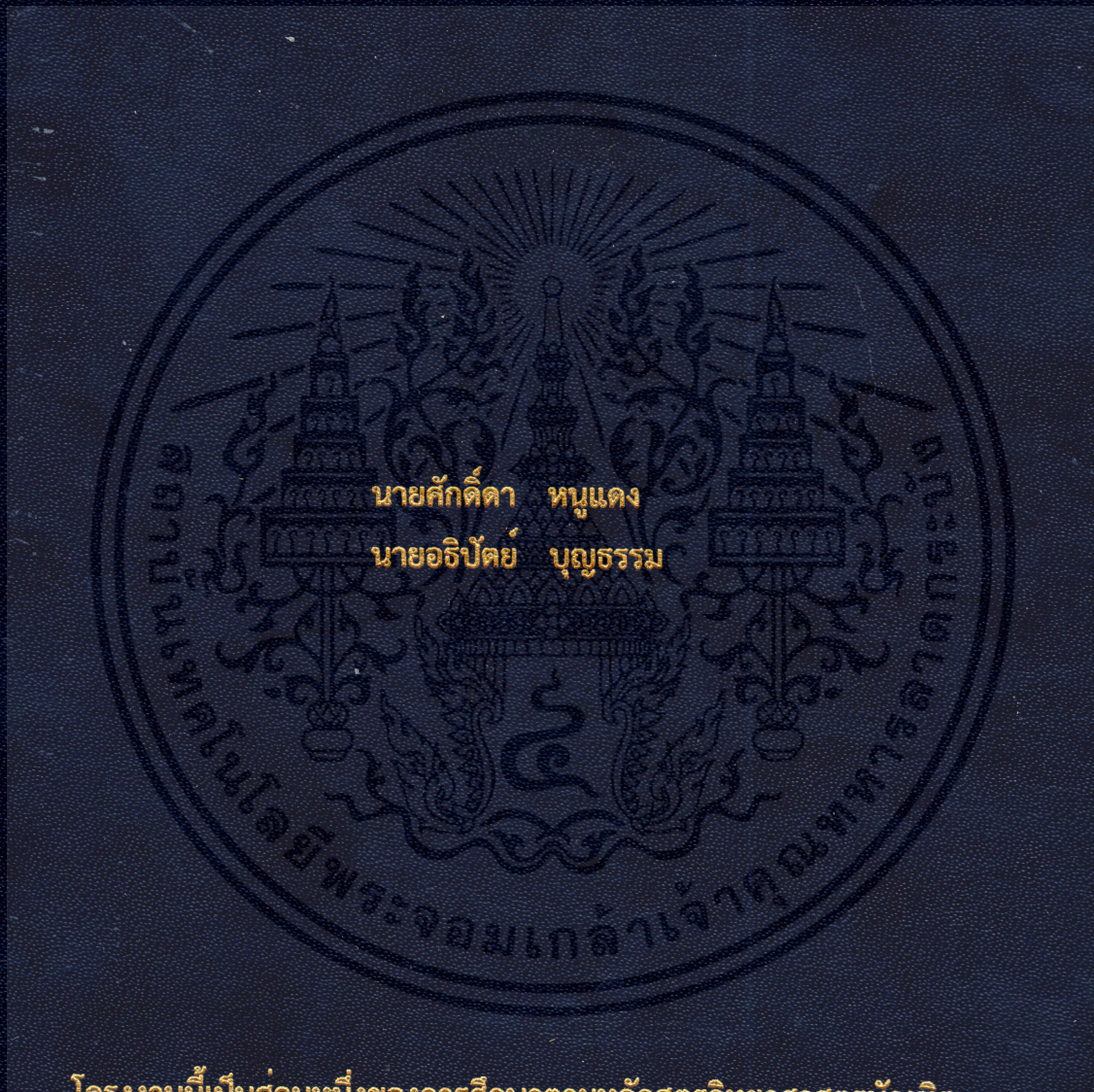


หัววัดโพร์พอยท์โพรบสำหรับการวัดกระแสจนำไฟฟ้าโปร่งแสงภายใต้
การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง

Four – point probe head for transparent conducting oxide
measurement under continuous heating



นายศักดิ์ดา หนูแดง

นายอธิปัตย์ บุญธรรม

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

หัววัดโพร์พอยท์โพรบสำหรับการวัดกระแสจนำไฟฟ้าโปร่งแสงภายใต้
การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง

Four – point probe head for transparent conducting oxide
measurement under continuous heating



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก้นำไปใช้

Four – point probe head for transparent conducting oxide
measurement under continuous heating



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE IN
APPLYPHYSICS DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

หัววัดโพรบยอทโทพรบสำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าโปร่งแสง
ภายใต้การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง

FOUR – POINT PROBE HEAD FOR TRANSPARENT
CONDUCTING OXIDE MEASUREMENT UNDER
CONTINUOUS HEATING

ชื่อนักศึกษา

นายศักดิ์ดา หนูแดง รหัสนักศึกษา 54050600
นายอธิปัตย์ บุญธรรม รหัสนักศึกษา 54050631

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา

ฟิสิกส์

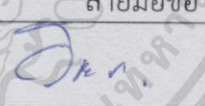
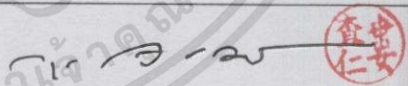

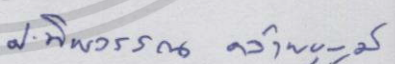
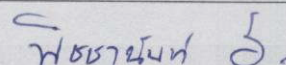
ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์ไศภณ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
ดร.กฤษกร ไฉ้เจริญรัตน์	 
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	
ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์ไศภณ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

หัววัดโพร์พอยท์ไพรบสำหรับการวัดกระแสจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง
ภายใต้การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง

ชื่อนักศึกษา

นายศักดิ์ดา หนูแดง รหัสนักศึกษา 54050600
นายอธิปติย์ บุญธรรม รหัสนักศึกษา 54050631

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการพัฒนาระบบหัววัดเพื่อใช้ในการวัดกระแสจกนำไฟฟ้าภายใต้การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยสร้างหัววัดขึ้นมา 2 รูปแบบ คือแบบ Collinear และ Van der pauw ด้วยเข็มวัดแบบปลายมีสปริง ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัววัดด้วยสเต็ปเปอร์มอเตอร์โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมผ่านบอร์ด arduino mega 256 และป้องกันการรบกวนจากอุณหภูมิภายนอกโดยกล่องอะคริลิก ระบบหัววัดผ่านการสอบเทียบเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้และค่าแก้สำหรับนำไปใช้วัดความต้านทานเชิงแผ่นของกระแสจกนำไฟฟ้าชนิดตีบุกออกไซด์ เจือด้วยอินเดียมภายใต้การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยพบว่าหัววัดแบบ Collinear มีค่าแก้และค่าความไม่แน่นอนที่ $-1.377 (\Omega/\square)$ and $0.0166 (\Omega/\square)$ ตามลำดับและหัววัดแบบ Van der pauw มีค่าแก้และค่าความไม่แน่นอนที่ $0.3671 (\Omega/\square)$ and $0.065 (\Omega/\square)$ ตามลำดับ เมื่อนำหัววัดที่ผ่านการสอบเทียบมาใช้วัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระแสจกนำไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิผันแปรจาก 30°C ถึง 80°C จำนวน 5 รอบ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระแสจกนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระแสจกนำไฟฟ้าอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อทดสอบภายใต้สภาวะแปรผันของอุณหภูมิจำนวน 5 รอบ

Title	FOUR – POINT PROBE HEAD FOR TRANSPARENT CONDUCTING OXIDE MEASUREMENT UNDER CONTINUOUS HEATING		
Students	Mr.Sakda Nudang	Student ID 54050600	
	Mr.Atipat Boonthum	Student ID 54050631	
Degree	Bachelor of Science in Applyphysics		
Major Program	Physics		
Academic Year	2014		
Advisor	Dr.Pichanan Teesetsopon		

Abstract

This special project focuses on developing four-point probe head systems for transparent conducting oxide glass (TCO) testing under continuous heating. Spring probes were used as head pins and the heads were designed into two patterns, collinear and van der pauw. Head movement was controlled by stepper motor programmed with Aduino mega 256. External heat was protected by acrylic box. The collinear head system was calibrated and found its correction value and uncertainty at $-1.377 (\Omega/\square)$ and $0.0166 (\Omega/\square)$, respectively while those of the van der pauw head system were at $0.3671 (\Omega/\square)$ and $0.065 (\Omega/\square)$, respectively. Calibrated heads were used for Indium doped tin oxide transparent conducting glass measurement under continuous heating from $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Testing results indicated that sheet resistance increased with temperature. However, no significant changing in TCO sheet resistance was detected after five rounds of temperature changing test.

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการพิเศษครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้แนวทางคำแนะนำ คำปรึกษาและข้อคิดเห็น ตลอดจนตรวจแก้ไขจนปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วราวุฒิ เถาสัตตา, ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ,สถานที่ ตลอดจนคำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการพิเศษนี้ ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ,ดร.กฤษกร โล้เจริญรัตน์ และ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำตลอดจนความรู้ต่างๆ ที่สามารถใช้ในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่างๆและเป็นกำลังใจจนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นายศักดิ์ดา

หนูแดง

นายอธิปต์ย์

บุญธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เทคนิคการความต้านทานเชิงแผ่นของสารกึ่งตัวนำ	3
2.1.1 ทูโพรบ (Two-probe)	3
2.1.2 โฟร์พอยท์โพรบ (Four-point probe)	4
2.1.2.1 สมการโฟร์พอยท์โพรบ	4
2.1.2.2 ความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance)	7
2.1.2.3 รูปแบบหัววัดโฟร์พอยท์โพรบ [2]	7
2.2 สมบัติของกระแสจลน์ไฟฟ้า	9
2.3 stepper motor	9
2.3.1 การควบคุมการหมุนแบบเฟสเดียว (Single Phase) หรือ Wave Drive	11
2.3.2 การควบคุมการหมุนแบบสองเฟส (Two Phase) หรือ Full Step Drive	11
2.3.3 การควบคุมการหมุนแบบครึ่งเฟส (Half Step)	12
2.3.4 RC Servo	13
2.3.5 การทดลองควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์	14
2.4 อะคริลิก	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	16
3.1 แผนผังแสดงภาพรวมการดำเนินงาน	16
3.2 การออกแบบหัววัดสำหรับเครื่องวัดโฟร์พอยท์โพรบ	17
3.2.1 องค์ประกอบของหัววัด	17
3.2.2 ออกแบบส่วนควบคุมหัววัด	18

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3 ออกแบบส่วนวางชิ้นงาน	19
3.3.1 ส่วนจับชิ้นงาน	20
3.3.1.1 องค์ประกอบของส่วนควบคุมหัววัด	20
3.3.2 ส่วนครอบชิ้นงาน	20
3.4 ตารางแผนการดำเนินงาน	21
บทที่ 4 ผลการทดลอง	22
4.1 การออกแบบและสร้างหัววัดและส่วนควบคุมหัววัด	22
4.1.1 ส่วนหัววัด	22
4.1.1.1 การออกแบบ	22
4.1.1.2 วิเคราะห์ผลที่ออกแบบ	26
4.1.2 การสร้างส่วนหัววัดและเข็มวัด	27
4.1.3 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของหัววัด	28
4.1.4 ส่วนครอบชิ้นงาน และส่วนวางชิ้นงาน	29
4.1.4.1 ส่วนครอบชิ้นงาน	29
4.1.4.2 ส่วนจับชิ้นงาน	30
4.2 ทดสอบ heater	31
4.2.1 ตรวจสอบอุณหภูมิ heater แบบไม่มีกระแสจกนำไฟฟ้า	31
4.2.2 ตรวจสอบอุณหภูมิ heater เมื่อวัดบนผิวกระแสจกนำไฟฟ้า	32
4.2.3 ผลของอุณหภูมิ heater กับค่าความต้านทาน (R) ของกระแสจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคฟูโพรบ	33
4.3 วัดค่าความต่างศักย์ (V) และค่า R_{sheet} ของกระแสจกนำไฟฟ้า	34
4.3.1 วัด V (mV) ของหัววัดแบบ Collinear และแบบ Van der pauw ที่อุณหภูมิห้อง โดยให้ $I = 1.000, 2.000, 3.000$ และ 4.000 mA ตามลำดับโดยที่มีระยะของหัววัดที่ต่างกัน	34
4.3.2 วัด V (mV) , หาค่า R_{sheet} ของหัววัดแบบ Collinear โดยวัดกระแสจก 5 ชั้นหนา 1.00 mm ที่อุณหภูมิห้อง	36
4.3.3 วัด V (mV) , หาค่า R_{sheet} ของหัววัดแบบ Van der pauw โดยวัดกระแสจก 5 ชั้น หนา 1.00 mm	38

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.4 วัด V (mV) (จ่ายกระแส I= 1.000 mA) ของหัววัดแบบ Collinear โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นที่ 80.0 °C แล้ววัดทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง และลดอุณหภูมิมาที่ 30.0 °C แล้ววัดทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.14 ถึง 4.23	41
4.3.5 วัด V (mV) (จ่ายกระแส I= 1.000 mA) ของหัววัดแบบ Van der pauw โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นที่ 80.0 °C แล้ววัดทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง และลดอุณหภูมิอยู่ที่ 30.0 °C แล้ววัดทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผล	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	2
2.1 ลำดับการป้อนกระแสแบบเฟสเดียว	11
2.2 ลำดับการป้อนกระแสแบบสองเฟส	11
2.3 ลำดับการป้อนกระแสแบบครึ่งเฟส	12
3.1 ตารางการดำเนินงาน	21
4.1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 °C - 80 °C	31
4.2 เมื่อลดอุณหภูมิจาก 80.0 °C - 30.0 °C	31
4.3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30.0 °C - 80.0 °C	32
4.4 เมื่อลดอุณหภูมิจาก 80.0 °C - 30.0 °C	32
4.5 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30.0 °C - 100.0 °C	33
4.6 V (mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดโดยใช้หัววัดแบบ Collinear ที่มีระยะ s ที่ต่างกัน	35
4.7 V (mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดโดยใช้หัววัดแบบ Van der pauw ที่มีระยะ s ที่ต่างกัน	35
4.8 V (mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดโดยใช้หัววัดแบบ Collinear ระยะ = 4.00 mm วัดกระแสจกนำไฟฟ้า 5 ชั้น ที่อุณหภูมิห้อง	36
4.9 แสดงค่า V (mV) , Rsheet(Ω/\square)โดยให้หัววัดแบบ Van der pauw ระยะ = 15.00 mm วัดกระแสจกนำไฟฟ้าชั้นที่ 1-3 ที่อุณหภูมิห้อง	37
4.10 V (mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดโดยใช้หัววัดแบบ Van der pauw วัดกระแสจกนำไฟฟ้าชั้นที่ 4-5 ที่อุณหภูมิห้อง	38
4.11 ค่าแก้ไข ของหัววัดแบบ Collinear ระยะ 4.00 mm	39
4.12 ค่าแก้ไข ของหัววัดแบบ Van der pauw ระยะ 15.00 mm	39
4.13 V(mV) , Rsheet (Ω/\square) วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 1	40
4.14 V(mV) , Rsheet (Ω/\square) วัดที่อุณหภูมิ 30.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 2	41
4.15 V(mV) , Rsheet (Ω/\square) วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 3	42
4.16 V(mV) , Rsheet (Ω/\square) วัดที่อุณหภูมิ 30.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 4	42
4.17 V(mV) , Rsheet (Ω/\square) วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 5	42
4.18 V(mV) , Rsheet (Ω/\square) วัดที่อุณหภูมิ 30.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 6	43
4.19 V(mV) , Rsheet (Ω/\square) วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 7	43
4.20 V(mV) , Rsheet (Ω/\square) วัดที่อุณหภูมิ 30.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 8	43
4.21 V(mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 9	44
4.22 V(mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดที่อุณหภูมิ 30.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 10	44
4.23 V(mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 1	44
4.24 V(mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 1	46
4.25 V(mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 1	46
4.26 V(mV) , Rsheet(Ω/\square)วัดที่อุณหภูมิ 30.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 2	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เทคนิคการวัดแบบทูโพรบ	3
2.2 เทคนิคการวัดแบบโพร์พอยท์โพรบ	4
2.3 ค่าความต่างศักย์ 1 เซ็ม	4
2.4 ค่าความต่างศักย์ 2 หัววัด	5
2.5 ค่าความต่างศักย์สำหรับหัววัดแบบเรียงแถว	5
2.6 แผ่นฟิล์มบางที่มีฉนวนกัน	6
2.7 วิธีการหาความต้านทานเชิงแผ่น	7
2.8 เทคนิคสี่หัววัดแบบเรียงแถว	7
2.9 รูปแสดงตำแหน่งจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวอย่าง	8
2.10 ลักษณะภายนอกและโครงสร้างภายในของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Unipolar	10
2.11 โครงสร้างภายในและลักษณะภายนอกของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Bipolar	10
2.12 ส่วนประกอบภายในของ RC Servo	13
2.13 ลักษณะและคุณสมบัติของสเต็ปเปอร์มอเตอร์สำหรับการทดลอง	14
2.14 การใช้งาน Stepper Motor กับ STM32F4DISCOVERY	14
3.1 แผนผังแสดงภาพรวมการดำเนินงาน	16
3.2 องค์ประกอบของส่วนควบคุมหัววัด 1. stepping motor, 2. ราง stepping motor , 3. ส่วนควบคุม (controller)	18
3.3 แสดงลักษณะส่วนวางชิ้นงานและส่วนประกอบชิ้นงาน	19
3.4 แสดงลักษณะส่วนประกอบชิ้นงาน	20
4.1 แบบหัววัดแบบ Collinear โดย Solidworks	23
4.2 แบบหัววัดแบบ Van der pauw โดย Solidworks	24
4.3 หัววัดแบบ Collinear และแบบ Van der pauw ที่ใช้เทปลอนวัสดุ	24
4.4 แบบแขนยึดหัววัดและส่วนยึดกับราง stepping motor โดย Solidworks	25
4.5 แขนยึดหัววัดและส่วนยึดกับราง ที่ทำจาก Stainless Steel หลังจากสั่งทำ	25
4.6 หัววัดและเข็มแบบ Collinear	27
4.7 หัววัดและเข็มแบบ Van der pauw	27
4.8 แขนยึดหัวและวัดราง step motor	28
4.9 แผงควบคุม ยี่ห้อ arduino mega256 เชื่อมกับ driver และ power supply	28
4.10 ประตูเลื่อนสำหรับ เปิด - ปิด	29
4.11 ประตูเลื่อนสำหรับ เปิด - ปิด	30
4.12 ส่วนยึดชิ้นงานสามารถใช้หมอนน็อตเพื่อปรับหรือเคลื่อนชิ้นงาน	30
4.13 current source และ volt meter ที่ใช้ในการจ่ายกระแสและความต่างศักย์	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟแสดงค่า R_{sheet} ที่อุณหภูมิ 80°C นาน 1 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงที่ 30°C นาน 30 นาที โดยทำซ้ำ 5 ครั้ง	45
4.15 กราฟแสดงค่า R_{sheet} ที่อุณหภูมิ 80°C นาน 1 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงที่ 30.0°C นาน 30 นาที โดยทำซ้ำ 1 ครั้ง	47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

กระจกนำไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์หลายชนิด เช่น จอ LCD, LED Solar cells เป็นต้น การวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่น (Sheet Resistance : R_{sheet}) ของกระจกนำไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพชิ้นงานแต่ละชิ้นภายใต้สภาวะใช้งานจริงนั้นมีความสำคัญต่อการบ่งชี้ถึงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นและนำไปสู่การปรับปรุงและแก้ไขในขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน ให้มีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเหมาะสม

เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคโพรบพอยท์โพรบแบบอัตโนมัติ (Four point probe) เป็นเครื่องมือที่ใช้งานได้ง่ายและสะดวกต่อการวัดบริเวณผิวหน้าของแผ่นกระจกนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของตัวอย่างได้ถูกต้องมากกว่าเทคนิคการวัดแบบทูโพรบ

โครงการพิเศษนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและพัฒนาระบบหัววัดสำหรับการวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าภายใต้ความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเทคนิคโพรบพอยท์โพรบ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาระบบวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคโพรบพอยท์โพรบ

1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบหัววัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคโพรบพอยท์โพรบ

ให้เหมาะกับการใช้วัดกระจกนำไฟฟ้าภายใต้ความร้อนแบบต่อเนื่อง

1.2.3 เพื่อศึกษากระบวนการสอบเทียบเครื่องมือ

1.2.4 เพื่อประยุกต์ใช้กับการวัดค่าความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อออกแบบหัววัดรูปแบบ Collinear และหัววัดรูปแบบ Van der pauw

1.3.2 ช่วงอุณหภูมิของการวัดกระจกนำไฟฟ้า $30\text{ }^{\circ}\text{C} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

1.3.3 ใช้สำหรับการวัดกระจกนำไฟฟ้าเท่านั้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
ตุลาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2557	- ศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องวัดค่า ความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคโพร์พอยท์โพร บบแบบอัตโนมัติ - ศึกษาวัสดุที่ใช้ทำหัววัด
ธันวาคม – มกราคม พ.ศ. 2557	- ศึกษาวัสดุและออกแบบ หัววัด - ศึกษาและออกแบบส่วนเคลื่อนหัววัด - ศึกษาและออกแบบส่วนควบคุมความร้อน
มกราคม – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558	- สร้างระบบหัววัดและส่วนเคลื่อนหัววัด
กุมภาพันธ์ – มีนาคม พ.ศ. 2558	- ทดสอบหัววัดและส่วนควบคุมความร้อน - ทดลองวัดกระจกนำไฟฟ้า - วิเคราะห์ผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.2 ความรู้ความเข้าใจถึงหลักการและทฤษฎีของเครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคโพร์พอยท์โพรบบแบบอัตโนมัติ

1.5.2 สามารถออกแบบและสร้างหัววัดความต้านทานไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าภายใต้ความร้อนแบบต่อเนื่อง

บทที่ 2

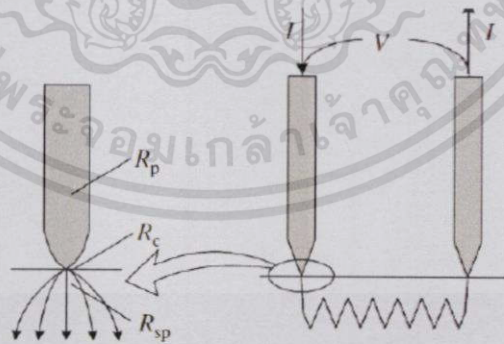
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคการความต้านทานเชิงแผ่นของสารกึ่งตัวนำ [1]

สมบัติของสารกึ่งตัวนำเป็นตัวบ่งบอกถึงความเหมาะสมในการนำสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นๆ ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ สมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิดด้วยกัน อาทิเช่น ความหนาแน่นของพาหะ, สภาพคล่องตัวของพาหะ สภาพการนำไฟฟ้า และสภาพต้านทานไฟฟ้า สำหรับโครงการพิเศษนี้มุ่งความสนใจไปที่การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำในรูปแบบฟิล์มนำไฟฟ้าที่เคลือบลงบนกระจก หรือที่เรียกกันว่า กระจกนำไฟฟ้า (Transparent conducting oxide) โดยวิธีการวัดที่นิยมกันมาก คือ “วิธีวัดด้วยเข็ม” (point probe measurement) ซึ่งมีหลายรูปแบบ ดังที่จะได้กล่าวต่อไปนี้

2.1.1 ทูโพรบ (Two-probe)

เทคนิคแรกนี้ เป็นการวัดอย่างง่าย โดยใช้หัววัดเป็นเข็ม 2 หัววัด วัดโดยการสัมผัสโดยตรงกับชิ้นงาน หลักการคือ ปล่อยกระแส (I) และวัดค่าความต่างศักย์ (V) โดยใช้ขาคู่เดียวกัน เพื่ออ่านค่าความต้านทาน (R) แต่จะมีข้อเสียคือ มีความต้านทานที่อ่านได้เป็นความต้านทานรวมเนื่องจาก หัววัด, หน้าสัมผัสและชิ้นงานดังรูปที่ 2.1 ทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้ไม่แสดงค่าความต้านทานจริงของชิ้นงาน



R_p ความต้านทานที่หัววัด

R_c ความต้านทานผิวสัมผัส

R_{sp} ความต้านทานภายในชิ้นงาน

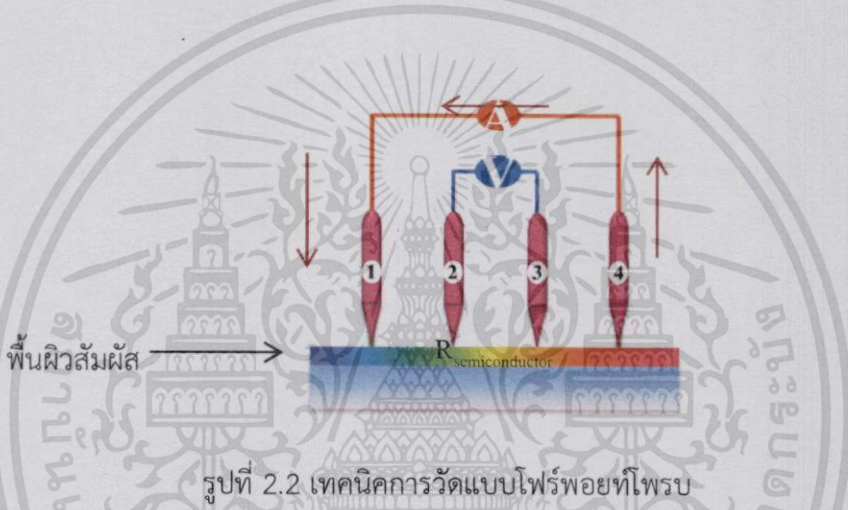
รูปที่ 2.1 เทคนิคการวัดแบบทูโพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 โพรบพอยท์โพรบ (Four-point probe)

จากเทคนิคทูโพรบ ทำให้มีแก้ปัญหาการวัดความต้านทานที่คลาดเคลื่อนไป โดยการเพิ่มหัววัดเป็น 4 หัวและกำหนดให้จ่ายกระแส (I) ที่ขาคุณอกและวัดค่าความต่างศักย์ (V) ที่ขาคุณใน เรียกเทคนิคการวัดแบบนี้ว่า “โพรบพอยท์โพรบ” (Four-point probe)

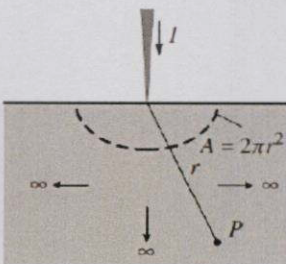
การวัดโดยเทคนิคโพรบพอยท์โพรบมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบทูโพรบเนื่องจากหัววัดมี 4 หัว จะปล่อยกระแส (I) เข้าที่ขาคุณอกและวัดความต่างศักย์ (V) ที่ขาคุณใน เนื่องจากความต้านทานจากโวลต์มิเตอร์สูงมากกระแสจึงไม่ไหลเข้าหัววัด ผลกระทบจากชนิดของวัสดุและความต้านทานที่หน้าสัมผัสต่อค่าที่วัดได้มีน้อย ค่าที่วัดออกมาจึงเป็นค่า $R_{\text{semiconductor}}$ ดังรูปที่ 2.2



2.1.2.1 สมการโพรบพอยท์โพรบ

สมมติว่า กระแสไหลออกมาจากปลายของหัววัด [5]

1) ค่าศักย์ไฟฟ้ากรณี 1 หัววัด หาได้จาก



รูปที่ 2.3 ค่าความต่างศักย์

1 หัววัด

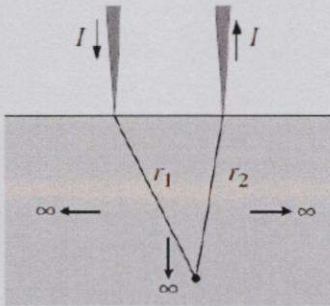
$$V = IR \quad (2.1)$$

$$J\rho = -\frac{dV}{dr} \quad (2.2)$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.3)$$

$$\int_0^V dV = -\frac{I\rho}{2\pi} \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} \quad (2.4)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.5)$$



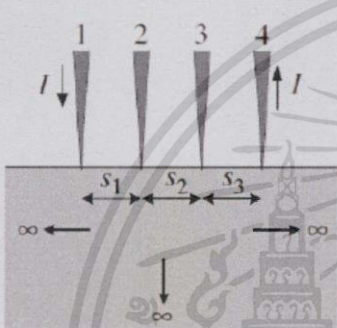
รูปที่ 2.4 ค่าความต่างศักย์ 2 หัววัด

2) ศักย์ไฟฟ้ากรณี 2 หัววัด หาได้จาก

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r_1} - \frac{\rho I}{2\pi r_2} \tag{2.6}$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \tag{2.7}$$

3) ค่าความต่างศักย์สำหรับหัววัดแบบเรียงแถว



รูปที่ 2.5 ค่าความต่างศักย์ สำหรับหัววัดแบบเรียงแถว

$$V_2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{2s} \right); \quad V_3 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{2s} - \frac{1}{s} \right) \tag{2.8}$$

$$V = V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{2s} - \frac{1}{2s} + \frac{1}{s} \right) \tag{2.9}$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi s} \tag{2.10}$$

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I}; \quad \Omega\text{-cm} \tag{2.11}$$

J คือ ความหนาแน่นกระแส

I คือ กระแสไฟฟ้า

ρ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า

4) ค่าความต้านทานที่คำนวณได้ตามสมการ (2.11) จะถูกต้องเมื่อตัวอย่างที่นำมาวัด สอดคล้องกับสมมติฐานดังต่อไปนี้

- มีการนำไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจนถึงขอบล่าง
- มีขนาดกึ่งอนันต์ (Semi-infinite) ดังรูปที่ 2.5

5) สำหรับตัวอย่างที่ไม่สอดคล้องกับสมมติฐานในข้อ 4) และฐานของฟิล์มไม่นำไฟฟ้าจะต้องมีการแก้ไขการคำนวณให้ถูกต้องโดยอาศัยการแก้ไขความคลาดเคลื่อนที่เป็นผลจากตำแหน่งการวางหัววัด ระยะห่างระหว่างหัววัดถึงขอบตัวอย่าง ความหนา และอุณหภูมิที่วัดด้วยค่าแก้ไขให้ถูกต้อง (Correction factor) ดังต่อไปนี้

$$\rho = 2\pi s F \frac{V}{I} ; \Omega\text{-cm} \quad (2.12)$$

เมื่อ $F = F_1 F_2 F_3$

- F_1 คือ แก้ไขความคลาดเคลื่อนจากความหนาของตัวอย่าง

$$F_1 = \frac{t/s}{2 \ln [\sinh(t/s) / \sinh(t/2s)]} \quad (2.13)$$

- F_2 คือ แก้ไขความคลาดเคลื่อนจากขนาดของตัวอย่าง ($F_2 = 1$ ถ้าสารตัวอย่างมีขนาด ≥ 40 เท่าของระยะห่างระหว่างหัววัด)

- F_3 คือ แก้ไขความคลาดเคลื่อนจากระยะห่างระหว่างหัววัดถึงขอบของตัวอย่าง

6) Correction factor สำหรับฟิล์มบาง

พิจารณาฟิล์มบางบนฉนวน เช่น ฟิล์มของสารกึ่งตัวนำบนฉนวน

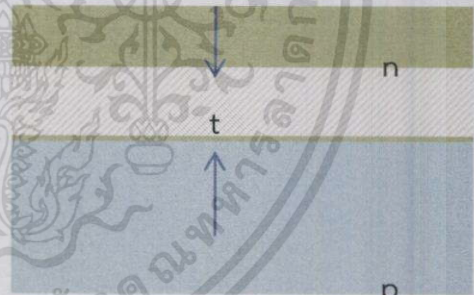
- ฟิล์มบางของ Si บนฉนวน

$$F_1 = \frac{t/s}{2 \ln [\sinh(t/s) / \sinh(t/2s)]}$$

ปกติ $t \ll s$

ให้ $\sinh x \approx x$ สำหรับ $x \ll 1$

$$\therefore F_1 \approx \frac{t/s}{2 \ln(2)}$$



รูปที่ 2.6 แผ่นฟิล์มบางที่มีฉนวนกัน

ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางบนฉนวน สามารถหาได้จาก

$$\rho = 2\pi s \frac{t/s}{2 \ln(2)} \frac{V}{I} = \frac{\pi}{\ln 2} t \frac{V}{I} = 4.532 t \frac{V}{I} \quad (2.14)$$

2.1.2.2 ความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance)

ความต้านทานหาได้จาก

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho L}{t W}; \text{ หน่วย โห์ม (Ohms:}\Omega\text{)} \quad (2.15)$$

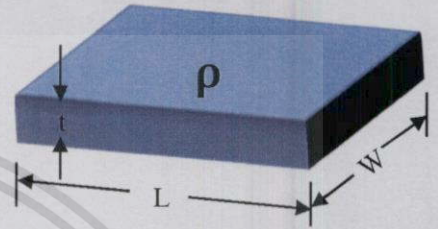
t คือความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

A คือ พื้นที่ตัดขวางของชั้นสารตัวอย่าง

L คือ ความยาวของชั้นสารตัวอย่าง

W คือ ความกว้างของชั้นสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.7 วิธีการหาความต้านทานเชิงแผ่น

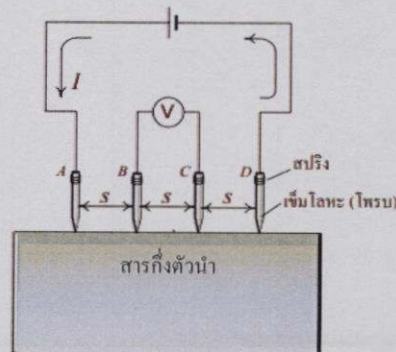
$$R_{\text{sheet}} = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (\Omega / \square) \quad (2.16)$$

2.1.2.3. รูปแบบหัววัดโพรบพอยท์โพรบ [2]

ลักษณะการจัดวางหัววัดนั้น มีผลต่อการวัดสารกึ่งตัวนำเป็นอย่างมาก เนื่องจากขนาด รูปร่าง พื้นผิว ความหนาที่แตกต่างกันของชั้นงาน ทำให้ต้องมีการคิดรูปแบบของหัววัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเพื่อให้สะดวกสำหรับวัดสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด ลักษณะหัววัดที่นิยมใช้กันมี 2 แบบ

- แบบ 4 หัววัดเรียงแถว (Collinear four - point probe)

เทคนิค Collinear เป็นการใส่เข็มวัดสี่เข็ม เรียงเป็นแถว โดยที่เข็มคู่นอกจะถูกจ่ายกระแสเข้า และเข็มคู่ในจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งระยะห่างของเข็ม (s) มีผลต่อค่าที่วัดด้วยเช่นกันดังรูป 2.9

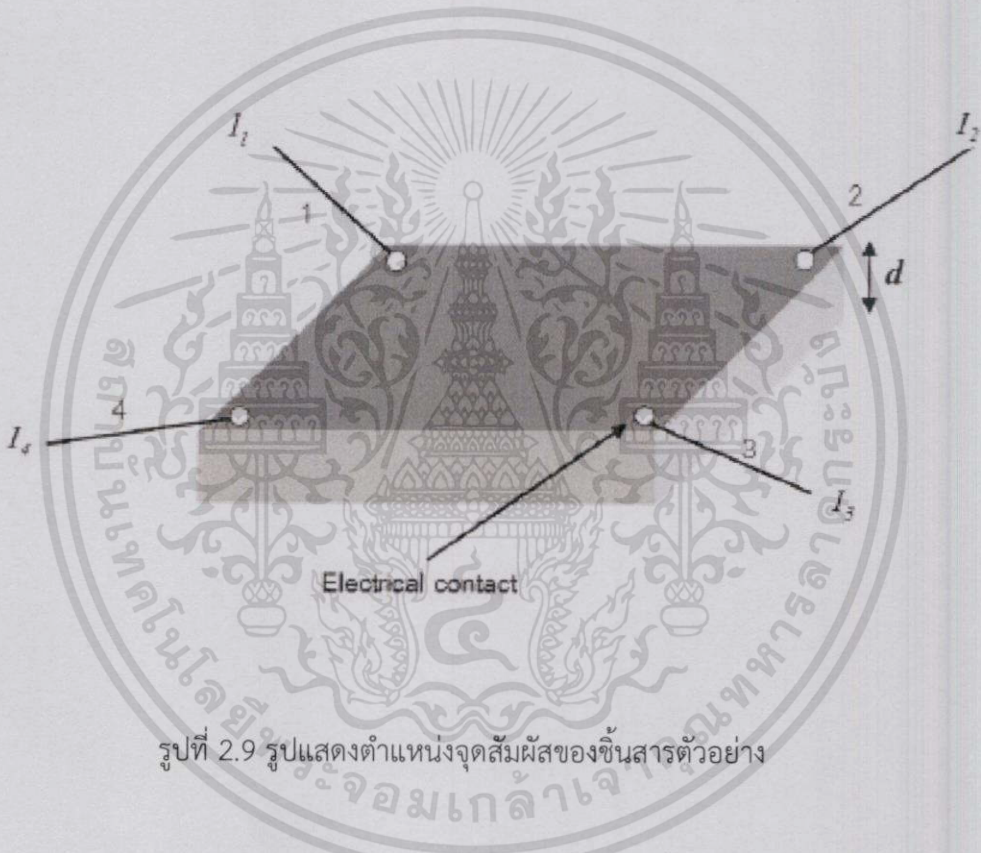


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.8 เทคนิคสี่หัววัดแบบเรียงแถว
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบแวนเดอพาว (Van der pauw)

เทคนิคแบบ Van der pauw เป็นรูปแบบการใช้หัววัด วัดที่มุมชิ้นงาน โดยที่ต้องทำขั้วถาวร สำหรับการวัด และชิ้นงานต้องมีเงื่อนไขดังนี้

- ขั้วจะต้องอยู่ที่ขอบของวัสดุ
- จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับขนาดเส้นรอบรูปของวัสดุ
- วัสดุต้องมีความหนาเท่ากัน
- เนื้อของวัสดุต้องมีความสม่ำเสมอไม่มีรอยแยกใดๆ



รูปที่ 2.9 รูปแสดงตำแหน่งจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 2.10 ลักษณะการวัดรูปแบบ Van der pauw ต้องวัดที่ขั้วของตัวอย่าง จ่ายกระแสจุด 1,2 และวัดค่าความต่างศักย์ที่จุด 3,4 และสลับคู่จุดที่จ่ายกระแสและวัดค่าความต่างศักย์ ค่าที่วัดได้ต้องทำการเฉลี่ยสลับเปลี่ยนขั้วเพื่อเฉลี่ย โดยจะหาค่า R_{sheet} ได้จากสมการที่ 2.17

$$R_{sheet} = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{R_{12,34} + R_{34,12}}{2} \quad (\Omega / \square) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติของกระจกนำไฟฟ้า

กระจกนำไฟฟ้า คือ กระจกที่เคลือบด้วยสารนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide glass : TCO) สารนำไฟฟ้าโปร่งแสงมีคุณสมบัติสามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่ในขณะเดียวกันก็ยอมให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นผ่านได้ ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มักใช้กระจกนำไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มของดีบุกที่เจือด้วยอินเดียม (Indium doped tin oxide, ITO) หรือฟิล์มของดีบุกที่เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine doped tin oxide, FTO) ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากในกระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจะต้องมีการให้ความร้อนประมาณ 450 °C ในการเตรียมชั้นฟิล์มของสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานกว้าง ซึ่งพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของกระจกจะไม่มี ความเสถียร หรือมีความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านอุณหภูมิสูงอันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงได้

2.3 stepper motor[3]

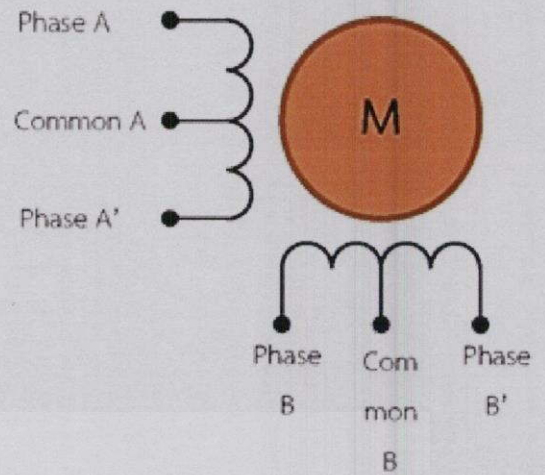
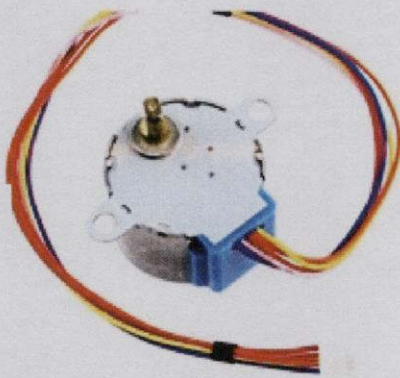
สเต็ปเปอร์มอเตอร์ คือ มอเตอร์ที่มีการหมุนเป็นขั้นๆ โดยแกนของมอเตอร์จะหมุนด้วยมุมค่าคงที่เมื่อมีสัญญาณ Pulse มากกระตุ้น เช่น 0.9, 1.8, 5, 7.5, 15 หรือ 45 องศาต่อสเต็ป การควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์สามารถใช้สัญญาณดิจิทัลควบคุมได้โดยตรง และสามารถบังคับทิศทางและความเร็วของแกนหมุน

สเต็ปเปอร์มอเตอร์เป็นที่นิยมมาใช้ในการควบคุมเช่น เครื่องปริ้นเตอร์, X-Y table โดยมีข้อดี ดังนี้

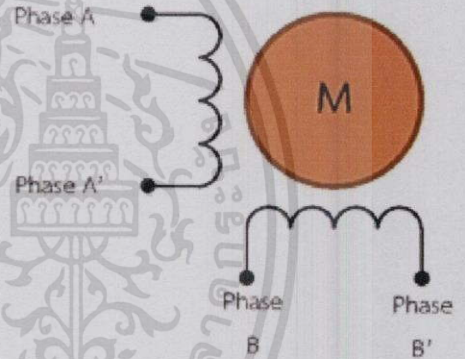
- หมุนได้ครบ 360 องศา อย่างต่อเนื่อง
- การควบคุมตำแหน่งไม่ต้องอาศัยตัวตรวจจับการหมุน
- ไม่ต้องใช้แปรงถ่านดังนั้นจึงไม่มีส่วนที่สึกหรอและปัญหาจากประกายไฟ (ที่เกิดจากหน้าสัมผัสของแปรงถ่านกับแหวนตัวนำในโรเตอร์ที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน)

- การควบคุมโดยทางวงจรดิจิทัลหรือไม่โครคอนโทรลเลอร์ทำได้ง่ายและสะดวก

โดยทั่วไป สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Two-phase Stepper Motor) สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ Unipolar และ Bipolar ดังรูป 2.11 และรูป 2.12 ตามลำดับ ผู้ใช้สามารถสังเกตข้อแตกต่างได้จากจำนวนสายไฟ กล่าวคือ แบบ Unipolar จะมีสายไฟต่อ 5 (Common A และ Common B เชื่อมด้วยกัน) หรือ 6 เส้น และแบบ Bipolar จะมีสายไฟต่อ 4 เส้น เท่านั้น



รูปที่ 2.10 ลักษณะภายนอกและโครงสร้างภายในของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Unipolar



รูปที่ 2.11 โครงสร้างภายในและลักษณะภายนอกของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Bipolar

การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Unipolar สามารถทำได้โดยการควบคุมกระแสไฟที่จ่ายให้กับขดลวดในแต่ละเฟสอย่างเป็นลำดับที่แน่นอน โดยถ้าหากเราต้องการให้กระแสไหลในเฟสใดๆ ก็จะทำให้สถานะของเฟสนั้นๆ เป็นสถานะลอจิก “1” การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

2.3.1. การควบคุมการหมุนแบบเฟสเดียว (Single Phase) หรือ Wave Drive

เป็นการป้อนกระแสไฟให้กับขดลวดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ทีละขด โดยจะป้อนกระแสเรียงตามลำดับกันไปตามตาราง 2.1 (ตัวเลข 1 หมายถึง มีการจ่ายแรงดันให้กับขดลวด 0 คือไม่จ่ายแรงดันให้กับขดลวด) ดังนั้นกระแสที่ไหลในขดลวดจะไหลในทิศทางเดียวกันทุกขด ลักษณะเช่นนี้จึงทำให้แรงขับของสเต็ปเปอร์มอเตอร์มีน้อยและไม่เป็นที่นิยมใช้

ตารางที่ 2.1 ลำดับการป้อนกระแสแบบเฟสเดียว

Step	Phase A	Phase B	Phase A'	Phase B'
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	Back to Step 1			

2.3.2. การควบคุมการหมุนแบบสองเฟส (Two Phase) หรือ Full Step Drive

เป็นการป้อนกระแสไฟให้กับขดลวดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ทั้ง 2 ขด พร้อมๆ กันไป และป้อนกระแสเรียงตามลำดับกันไป ตามตาราง 2.2 ดังนั้นจึงมีกระแสไหลในขดลวดของมอเตอร์มากขึ้น และจะทำให้มอเตอร์มีแรงบิดมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 ลำดับการป้อนกระแสแบบสองเฟส

Step	Phase A	Phase B	Phase A'	Phase B'
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1
5	Back to Step 1			

2.3.3.การควบคุมการหมุนแบบครึ่งเฟส (Half Step)

เป็นการป้อนกระแสแบบ Two Phase และ Single Phase สลับกันไป ตามตาราง

2.3 ซึ่งเป็นการเพิ่มความละเอียดของตำแหน่งในการหมุน

ตารางที่ 2.3 ลำดับการป้อนกระแสแบบครึ่งเฟส

Step	Phase A	Phase B	Phase A'	Phase B'
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1
9	Back to Step 1			

ความเร็วการหมุนของแกนสเต็ปเปอร์มอเตอร์ จะขึ้นอยู่กับคาบการหน่วงเวลา (Time Delay) ในแต่ละลำดับ ถ้า Time Delay มีค่าน้อย แกนจะหมุนเร็วขึ้น ถ้า Time Delay มีค่ามาก แกนจะหมุนช้าและหมุนไม่สม่ำเสมอ

2.3.4 RC Servo

RC Servo (คำว่า RC ย่อมาจาก Radio Control) เป็นชุดมอเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถหมุนแกนไปยังตำแหน่ง (มุม) ต่างๆ ได้อย่างแน่นอน และโดยปกติสามารถตอบสนองได้เร็วกว่า สเต็ปเปอร์มอเตอร์ตามคำสั่งที่เป็นสัญญาณไฟฟ้าจากตัวรับสัญญาณวิทยุ ส่วนประกอบหลักของ RC Servo แสดงได้ดัง รูป 2.13

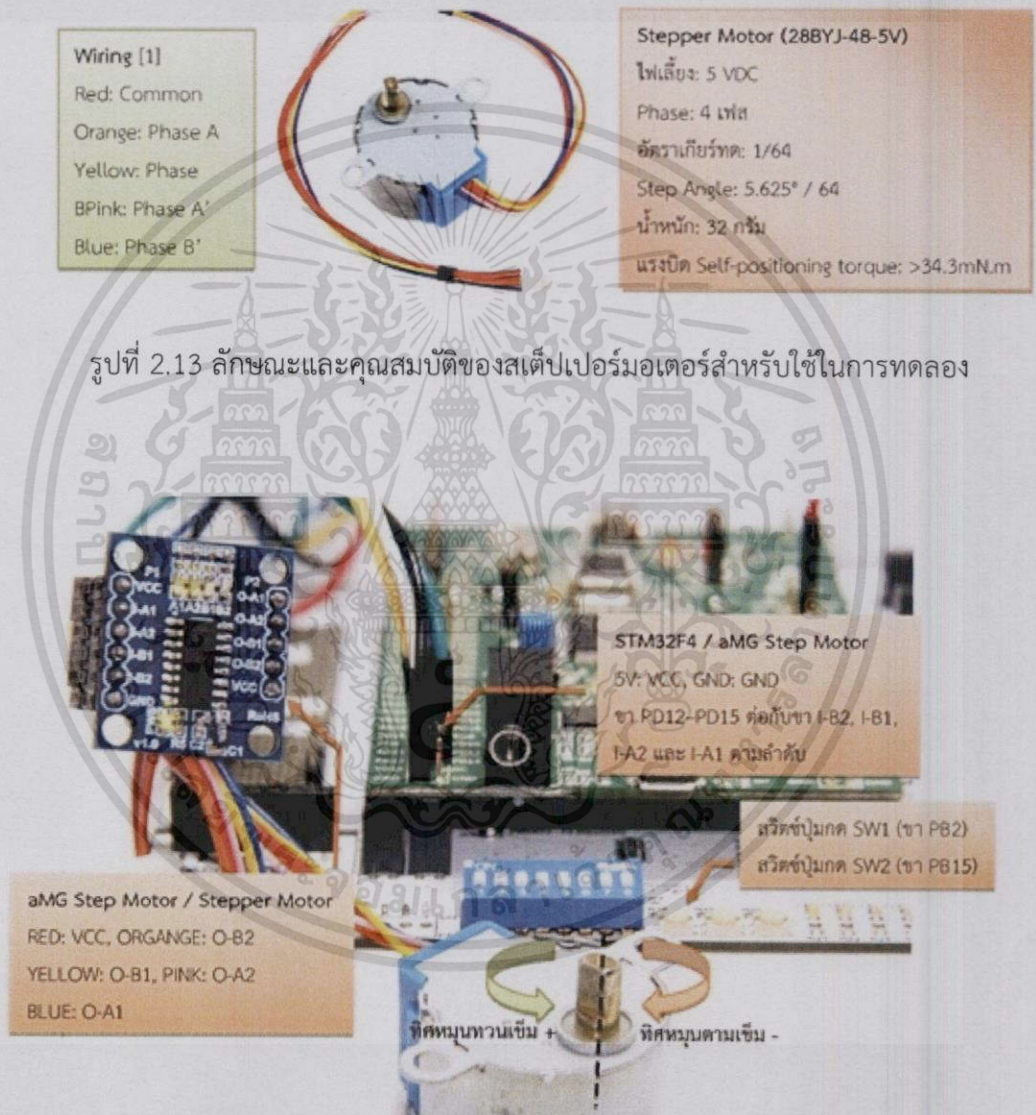


รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบภายในของ RC Servo

เนื่องจาก RC Servo มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีแรงบิดสูง จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุปกรณ์บังคับวิทยุ เช่น การปรับองศาของล้อหน้าในรถบังคับวิทยุ หรือการปรับมุมปีกและหางของเครื่องบินบังคับวิทยุ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ชนิดนี้ ไม่สามารถหมุนได้ต่อเนื่องครบ 360 องศา จึงไม่เหมาะใช้งานขับเคลื่อนแบบล้อ

2.3.5 การทดลองควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์

การควบคุมอุปกรณ์ขับเคลื่อนเช่นสเต็ปเปอร์มอเตอร์ จะใช้กระแสขับสูงเพื่อสร้างแรงบิด จึงไม่สามารถต่อกับ Microcontroller ได้โดยตรง ดังนั้นต้องมีอุปกรณ์ขับกระแสเชื่อมต่อระหว่าง Microcontroller กับ สเต็ปเปอร์มอเตอร์ ยกตัวอย่างเช่น บอร์ด aMG Step Motor ใช้ IC ขับกระแสเบอร์ ULN2003 ซึ่งจ่ายกระแสสูงสุด 500 mA ใช้สำหรับควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ Unipolar เท่านั้น



รูปที่ 2.14 การใช้งาน Stepper Motor กับ STM32F4DISCOVERY

2.4 อะคริลิก

ความรู้เกี่ยวกับอะคริลิก : แผ่นอะคริลิก "Acrylic" เป็นแผ่นพลาสติกเรียบชนิด Thermoplastic ซึ่งผลิตจากน้ำยา MMA (Methyl Methacrylate) นำไปเข้าระบบหล่อแบบ (Casting System) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อได้รับความร้อนสูงจะอ่อนตัวลง สามารถตัดหรือขึ้นรูปเป็นแบบต่าง ๆ ได้ และเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัวและคงสภาพไว้ มีน้ำหนักเบาและสามารถแกะสลัก ฟันสี ระบาย หรือ SILK SCREEN เป็นรูปหรือลวดลายต่างๆ ได้

กระบวนการผลิต ของ Acrylic ใน 2 ระบบ แตกต่างกันในแง่ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต โดยในระบบ Casting จะใช้น้ำยา MMA เป็นวัตถุดิบในการผลิต ส่วนในระบบ Extrusion จะใช้เม็ด PMMA ในการผลิต สมบัติที่ได้จะใกล้เคียงกันเนื่องจากมีวัตถุดิบเบื้องต้นชนิดเดียวกัน เพียงแต่เมื่อผ่าน process ที่แตกต่างกันจึงทำให้มีข้อจำกัดการใช้งานต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานในลักษณะต่างๆ ด้วย

วิธีการพับแผ่นอะคริลิกเป็นมุมต่างๆ ทำได้โดยการนำแผ่นอะคริลิกไปให้ความร้อนตามแนวเส้น ลวดความร้อน เมื่ออะคริลิกอ่อนตัวจึงทำการพับให้ได้มุมตามที่ต้องการ

คุณสมบัติของแผ่นอะคริลิก

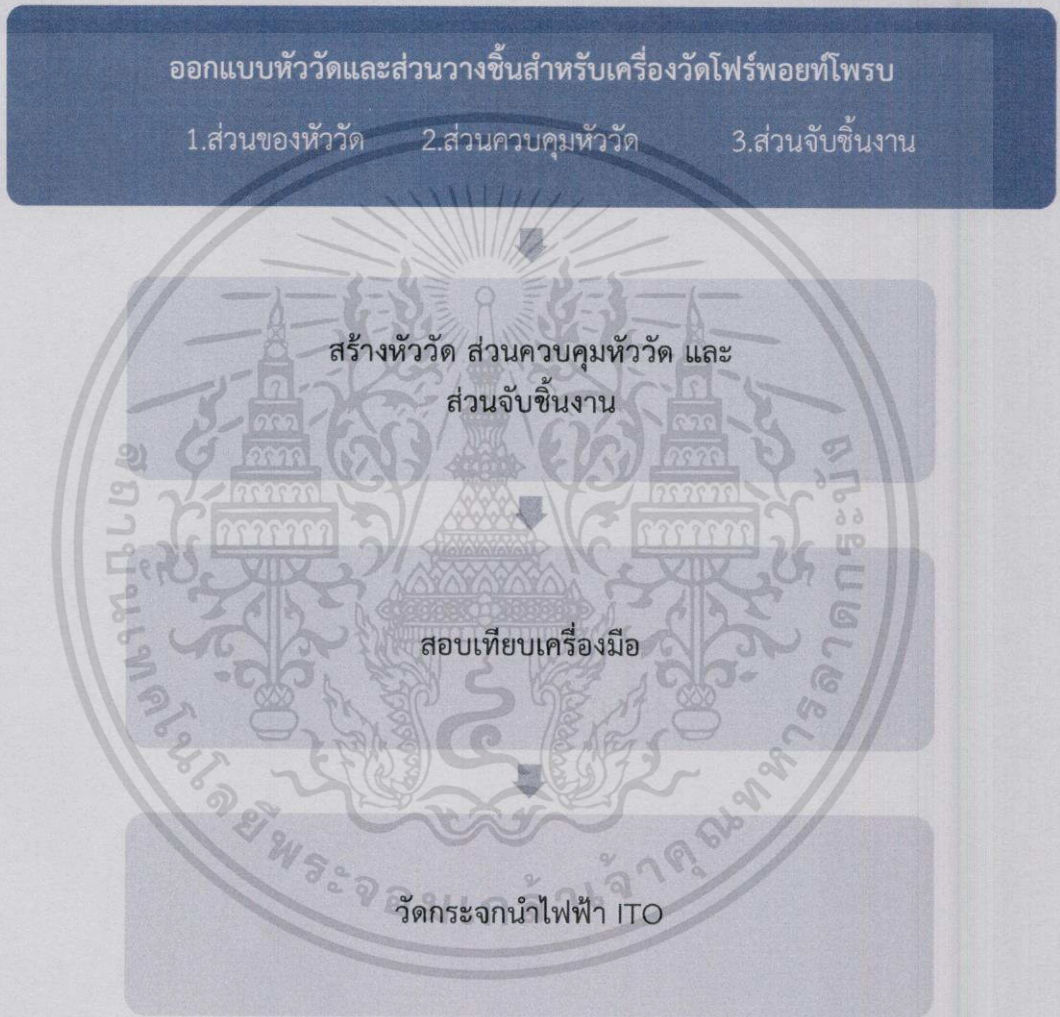
- 1.) สามารถตัดเป็นรูปต่างๆได้ตามต้องการด้วยความร้อน
- 2.) มีน้ำหนักเบา โดยมีน้ำหนักเพียงครึ่งหนึ่งของน้ำหนักแผ่นกระจกขนาดเดียวกัน
- 3.) สามารถต้านแรงกระแทกได้มากกว่ากระจกถึง 15 เท่า
- 4.) ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายเกลือ น้ำมัน น้ำมันเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซโซลีน สารเคมีและต่าง
- 5.) เป็นฉนวนกันความร้อนและกันไฟฟ้าได้ อีกทั้งไม่เป็นตัวนำความร้อน
- 6.) นำมาเลื่อย ตะไบ เจาะรู หรือเข้าเครื่องตัดเป็นรูปต่างๆได้ตามต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถทำซิลค์สกรีน สลักลงบนแผ่นอะคริลิก หรือนำมาเชื่อมต่อกันได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนผังแสดงภาพรวมการดำเนินงาน

ภาพรวมของการดำเนินโครงการพิเศษนี้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงภาพรวมการดำเนินงาน

3.2 การออกแบบหัววัดสำหรับเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบ

การออกแบบหัววัดสำหรับวัดความต้านทานโดยใช้โพร์พอยท์โพรบ 2 รูปแบบคือหัววัดแบบ เรียงแถวและ หัววัดแบบแวนเดอพาฟ โดยเลือกหัววัดที่ปลายมีความยืดหยุ่นเมื่อสัมผัสกับชิ้นงานที่จะ วัดเพื่อลดความเสียหายของผิวชิ้นงาน วัสดุที่นำมาสร้างหัววัดทั้ง 4 หัวต้องมีจุดหลอมเหลวที่สูงหรือ ทนต่ออุณหภูมิที่ใช้ขณะทำการวัดได้และอุณหภูมิที่หัววัดไม่มีผลกระทบต่อการวัดความต้านทานใน กระจกนำไฟฟ้าเมื่อหัววัดมีอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป แล้วนำหัววัดไปต่อกับเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบ

3.2.1 องค์ประกอบของหัววัด

ระบบหัววัดประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่

1. หัววัด Collinear และแบบ
2. แขนยึดหัววัด
3. เข็มวัด

3.2.1.1 วัสดุ อุปกรณ์

- 1) หัววัดแบบ Collinear และแบบ Van der pauw ใช้เทฟลอน (Teflon)
- 2) แขนยึดหัววัดใช้สแตนเลส (Stainless Steel)
- 3) เข็มวัด ใช้เข็มสำเร็จรูป ทำจากโลหะผสม

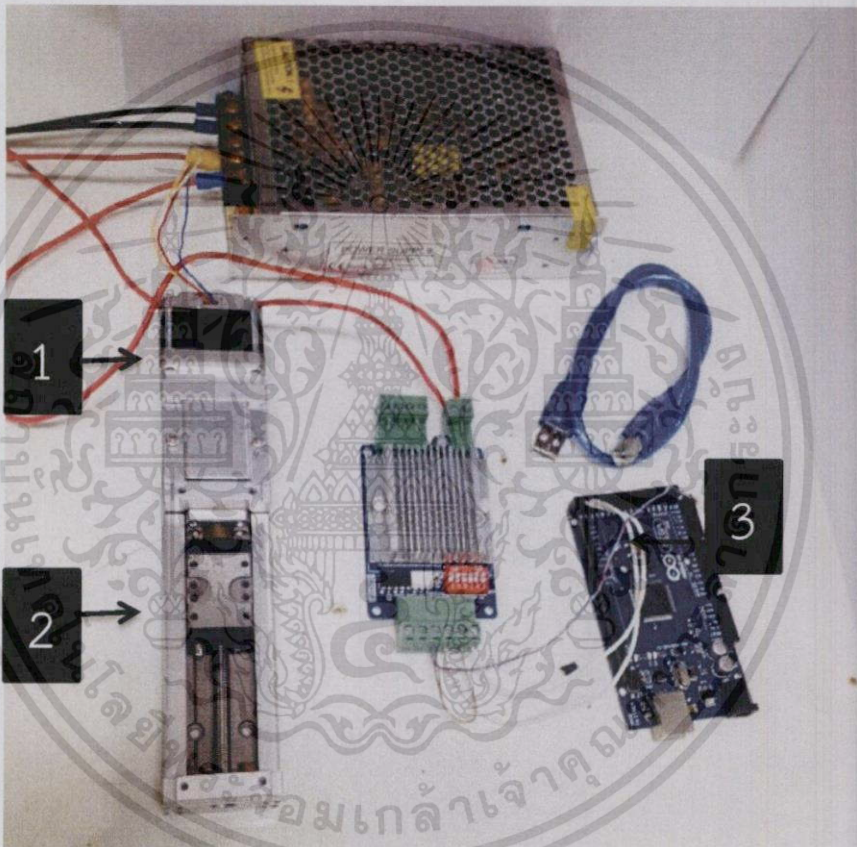
3.2.1.2 ขั้นตอนออกแบบ

- 1) วาดแบบองค์ประกอบต่างๆโดยใช้โปรแกรม Solid Works
 - หัววัดแบบ Collinear และแบบ Van der pauw
 - แขนยึดหัววัด

3.2.2 ออกแบบส่วนควบคุมหัววัด

การออกแบบส่วนควบคุมหัววัดจะออกแบบโดยใช้ สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (stepper motor) เพื่อควบคุมให้หัววัดเลื่อนลงและกระจกนำไฟฟ้าที่วางอยู่ด้านล่างโดยกระจกนำไฟฟ้าต้องวางด้านที่นำไฟฟ้าขึ้นบนในช่องวางชิ้นงานจึงจะวัดความต้านทานไฟฟ้าได้ เมื่อวัดเสร็จมอเตอร์ก็จะหมุนขึ้นตามคำสั่งของผู้ควบคุม โดยส่วนประกอบของส่วนควบคุมหัววัดจะมีดังนี้

3.2.2.1 องค์ประกอบของส่วนควบคุมหัววัด

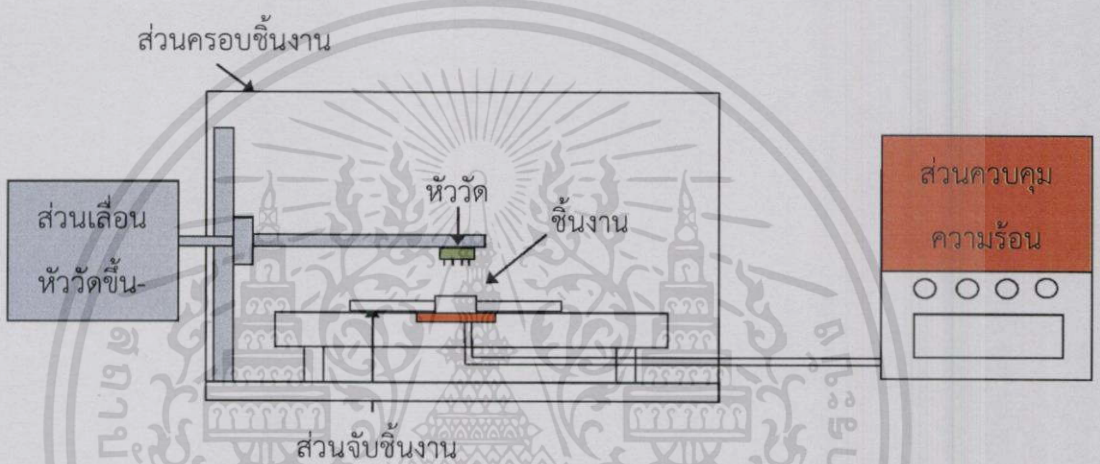


รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของส่วนควบคุมหัววัด 1.stepping motor, 2.ราง stepping motor , 3.ส่วนควบคุม (controller)

3.3 ออกแบบส่วนวางชิ้นงาน

การออกแบบส่วนวางชิ้นงานจะรวมถึงการให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงานด้วย ดังนั้นวัสดุที่นำมาออกแบบต้องทนอุณหภูมิสูงหรือมีจุดหลอมเหลวสูง นอกจากนี้จะต้องป้องกันอุณหภูมิจากส่วนวางชิ้นงานไปยังส่วนอื่นๆ เพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งานและง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิ ส่วนวางชิ้นงานจะมีส่วนประกอบดังนี้

1. ส่วนจับชิ้นงาน
2. ส่วนครอบชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะส่วนวางชิ้นงานและส่วนครอบชิ้นงาน

3.3.1 ส่วนจับชิ้นงาน

ส่วนจับชิ้นงานจะประกอบด้วยแท่นยึด และส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงานเพื่อยึด ในส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงานต้องเป็นวัสดุที่สามารถทนความร้อนสูง เนื่องจากต้องวางอยู่บน heater ให้ความร้อน และยังคงไม่นำไฟฟ้า เพื่อจะไม่ส่งผลกับการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น

3.3.1.1 องค์ประกอบของส่วนควบคุมหัววัด

1) แท่งเทพลอน	2	แท่ง
2) แท่งอลูมิเนียม	4	แท่ง
3) น็อตหมนมมือ	4	ตัว

3.3.2 ส่วนครอบชิ้นงาน

ในการวัดความต้านทานในกระจกนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิจะต้องมีส่วนครอบชิ้นงานที่นำมาวัดเพื่อป้องกันการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่นระบบปรับอากาศในห้องทดลอง และเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน แต่เนื่องจากอุณหภูมิสูงสุด คือ 80°C จึงใช้วัสดุเป็นอะคริลิก แทนกระจกทนความร้อน



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะส่วนครอบชิ้นงาน

3.4 ตารางแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 ตารางการดำเนินงาน

หัวข้อการดำเนินงาน	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
	2557	2557	2557	2558	2558	2558	2558
- ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องวัด ค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิค โพร์พอยท์โพรบแบบอัตโนมัติ							
- ศึกษาวัสดุที่ใช้ทำหัววัด							
- ศึกษาวัสดุและออกแบบ หัววัด							
- ศึกษาและออกแบบส่วนเคลื่อนหัววัด							
- ออกแบบและประกอบ							
- หัววัด , ส่วนเคลื่อนหัววัด							
- ส่วนจับชิ้นงาน							
- ทดสอบหัววัดและส่วนควบคุม ความร้อน							
- วิเคราะห์ผลของเครื่องวัดความ ต้านทานไฟฟ้าและทำรายงาน							

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การออกแบบและสร้างหัววัดและส่วนควบคุมหัววัด

4.1.1 ส่วนหัววัด

4.1.1.1 การออกแบบ

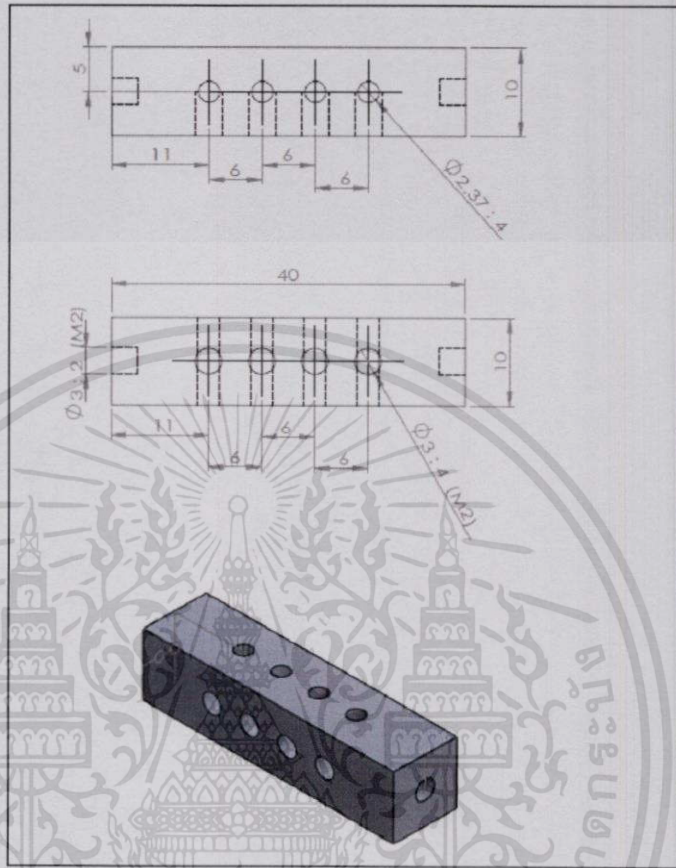
เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้วัดเป็นกระจกนำไฟฟ้า ขนาด 20 x 20 mm การออกแบบหัววัดจึงควรมีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวัด การออกแบบทำโดยใช้โปรแกรม Solid Work s 2015 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สะดวกในการออกแบบชิ้นงานในลักษณะ 3 มิติ และในงานออกแบบวัสดุขนาดเล็กๆ มีฟังก์ชันในการใช้งานที่ง่าย และรูปแบบเป็นมาตรฐาน วัสดุที่เลือกใช้เป็นเทฟลอนเพราะทนต่ออุณหภูมิสูง (มากกว่า 100 °C) โครงสร้างภายในแข็งแรงสะดวกในการเจาะและแก้ไข โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบหัววัดของแต่ละรูปแบบดังนี้

1) หัววัดแบบ Collinear

ส่วนจับเข็มวัดต้องสามารถจับเข็มวัดในลักษณะเรียงแถวสี่เข็มจึงใช้แนวคิดนี้ออกเป็นให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยวัดขนาดให้ตำแหน่งรูสำหรับใส่เข็มนั้นเหมาะสมกับระยะกระจกขนาดดังกล่าว เพื่อให้ง่ายต่อการเจาะและเรียงหัวเข็มจึงเลือกใช้ วัสดุที่เป็นเทฟลอนเพราะทนต่ออุณหภูมิสูง (อุณหภูมิหลอมเหลวของเทฟลอนอยู่ที่ 327 °C) โครงสร้างภายในแข็งแรง เพื่อต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี การออกแบบส่วนหัววัด Collinear และแบบ Van der pauw , แขนยึดหัววัดทำโดยใช้โปรแกรม Solid Works 2015 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สะดวกในการออกแบบชิ้นงานในลักษณะ 3 มิติ และงานในการออกแบบวัสดุขนาดเล็กๆ มีฟังก์ชันในการใช้งานที่ง่าย และรูปแบบเป็นมาตรฐาน การวัดความต้านทานเชิงแผ่นโดยใช้หัววัดแบบ Collinear หรือหัววัดแบบเรียงแถว เงื่อนไขในการวัดมีดังต่อไปนี้

1. ง่ายกระแสน้ำที่เข็มคู่ด้านใน วัดค่าความต่างศักย์ที่เข็มคู่นอก
2. ชิ้นงานต้องมีผิวเรียบ เชื่อมต่อทั้งแผ่น และนำไฟฟ้า
3. ระยะห่างระหว่างเข็มวัดแต่ละเข็ม (ระยะ s) ต้องเท่ากัน
4. ระยะห่างระหว่างขอบตัวอย่างถึงเข็มที่ 1 กับ เข็มที่ 4 ทั้ง 2 ด้านต้องมีระยะมาก

เพื่อทดสอบเงื่อนไขข้างต้น จึงออกแบบหัววัดมีระยะห่างระหว่างเข็ม 3 ระยะ คือ 4.00 mm , 5.00 mm และ 6.00 mm โดยมีตัวอย่างลักษณะการออกแบบหัววัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบหัววัดแบบ Collinear โดย Solidworks

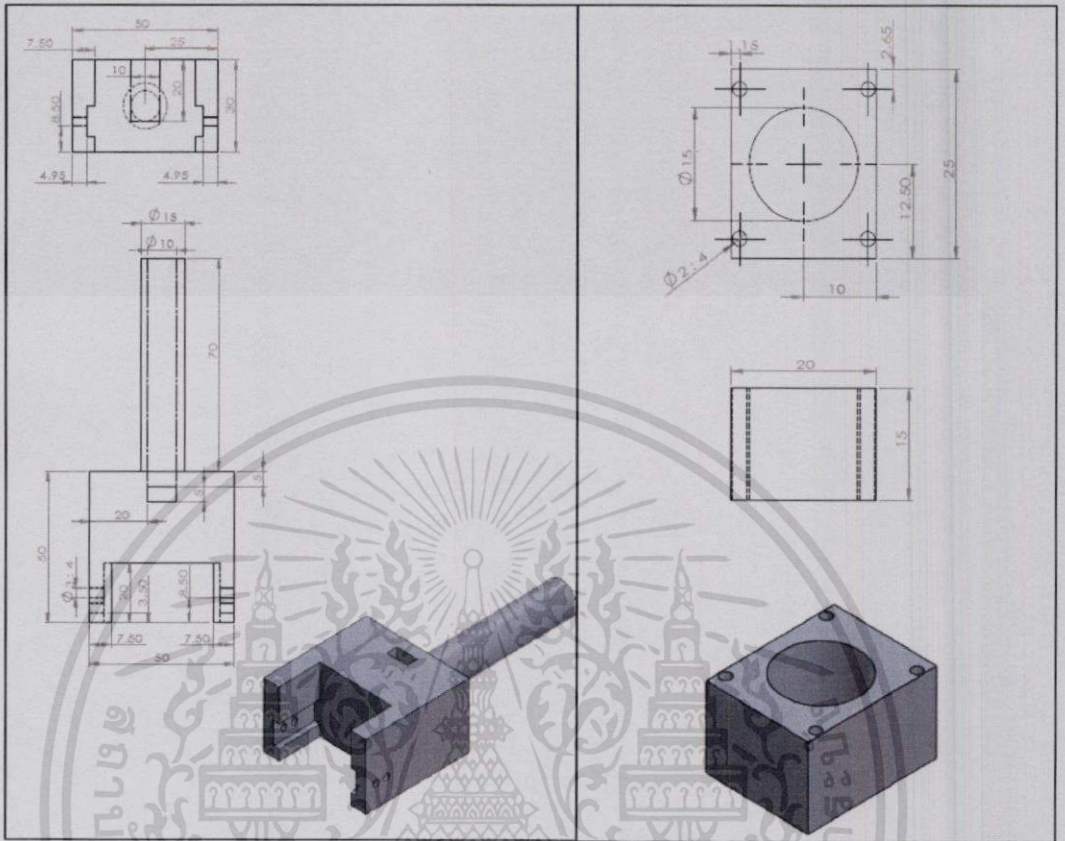
2) หัววัดแบบ Van der pauw

การวัดความต้านทานเชิงแผ่นโดยใช้หัววัดแบบ Van der pauw มีเงื่อนไขในการวัดดังต่อไปนี้

1. สุ่มจ่ายกระแสที่เข็ม 1 คู่ และวัดค่าความต่างศักย์ที่เข็ม 1 คู่
2. ชิ้นงานต้องมีผิวเรียบ เชื่อมต่อทั้งแผ่น และนำไฟฟ้า
3. ระยะห่างระหว่างเข็มวัดแต่ละเข็ม (ระยะ s) ต้องเท่ากัน
4. ระยะห่างระหว่างขอบตัวอย่างถึงเข็มทั้ง 4 ด้านต้องมีระยะน้อย

เพื่อทดสอบเงื่อนไขข้างต้น จึงออกแบบหัววัดมีระยะห่างระหว่างเข็ม 3 ระยะ คือ 9.00 mm , 12.00 mm และ 15.00 mm โดยมีตัวอย่างลักษณะการออกแบบหัววัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3

- ส่วนแขนยึดหัววัด



รูปที่ 4.4 แบบแขนยึดหัววัดและส่วนยึดกับราง stepping motor โดย Solidworks



รูปที่ 4.5 แขนยึดหัววัดและส่วนยึดกับราง ที่ทำจาก Stainless Steel หลังจากสั่งทำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 วิเคราะห์ผลที่ออกแบบ

การออกแบบหัววัดแบบ Collinear , Van der pauw และส่วนยึดกับราง หัววัดที่ใช้ เทฟลอนสามารถต่อเข็มวัดและง่ายต่อการขึ้นรูป ทนต่ออุณหภูมิสูง แต่เนื่องจากขนาดของเข็ม (1.5 mm) เล็กมากทำให้รู้เจาะให้ตรงยากเพราะต้องใช้สายตาในการกะระยะ ขนาดหัววัดที่ออกแบบ สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยลดขนาดระยะห่างระหว่างเข็ม (ระยะ s) สำหรับส่วนยึดหัววัดกับรางสเต็ปเปอร์มอเตอร์นั้นใช้วัสดุเป็นสแตนเลสเนื่องจากทนทานและแข็งแรง แต่การออกแบบมีข้อจำกัดเรื่องขนาดของตัวอย่าง ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวอย่างต้องปรับความกว้างของส่วนยึดหัววัดให้เหมาะสม

จุดเด่น : หัววัด

- มีระยะของหัวเข็มสามารถเปลี่ยนได้
- วัสดุทนความร้อนและโครงสร้างแข็งแรง แต่ง่ายต่อการขึ้นรูป
- นำไฟฟ้าและทนความร้อนสูง

จุดเด่น: ส่วนยึดหัววัดกับราง

- มีความแข็งแรง คงทน

จุดด้อย : หัววัด

- ส่วนยึดหัววัดมีขนาดเดียว ทำให้วัดได้ไม่เกินระยะนั้น
- รูที่เจาะเข็มเล็กมาก จึงยากต่อการใส่เข็ม

จุดด้อย: ส่วนยึดหัววัดกับราง

- มีขนาดเดียว
- นำไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะ:

1. เพิ่มระยะของส่วนยึดหัววัดเพื่อใช้วัดตัวอย่างที่ขนาดใหญ่กว่า
2. ใช้ความระมัดระวังในการเจาะเพราะรูมีขนาดเล็กมากจะทำให้หัวเจาะ

หัก

3. เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ยึดหัววัดไม่ให้นำไฟฟ้าเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากผลการ

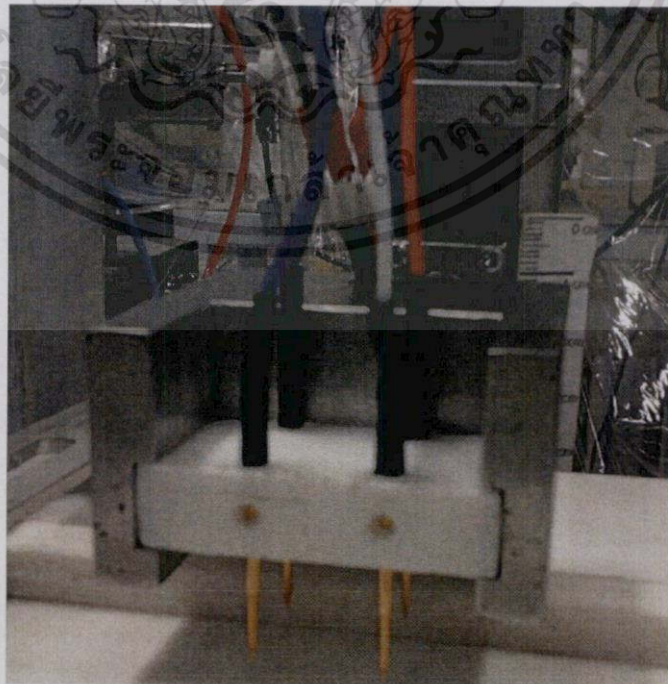
ทดลอง

4.1.2 การสร้างส่วนหัววัดและเข็มวัด

หลังจากออกแบบและทำหัววัดแบบ Collinear และแบบ Van der pauw



รูปที่ 4.6 หัววัดและเข็มแบบ Collinear

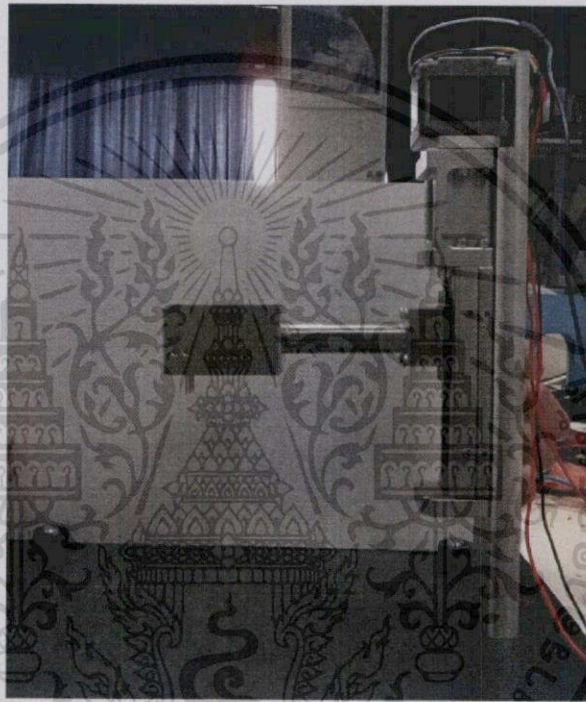


รูปที่ 4.7 หัววัดและเข็มแบบ Van der pauw

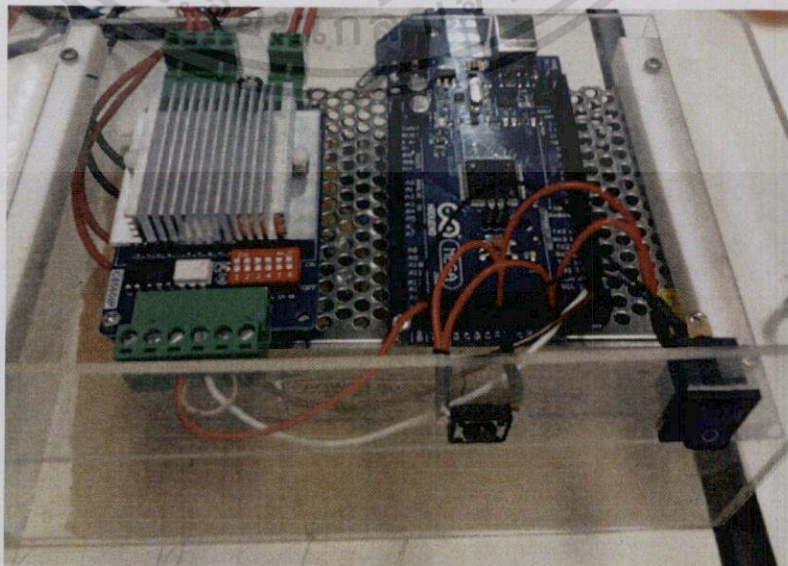
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของหัววัด

การเคลื่อนขึ้น - ลงของหัววัดจะควบคุมโดยสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ที่ถูกป้อนคำสั่งจากแผงควบคุม (บอร์ดรุ่น arduino mega256 ต่อกับdriver) เพื่อขับมอเตอร์ที่ต่อกับส่วนแขนจับหัววัดให้เคลื่อนขึ้น - ลง ผ่านปุ่มคำสั่งขึ้น - ลง ทั้งนี้เนื่องจากขั้นตอนการวัดนั้นต้องวัดภายใต้อุณหภูมิที่สูง และต้องใช้ความละเอียดและเที่ยงตรงของตำแหน่งในการวัดแต่ละครั้งจึงมีการคิดและออกแบบส่วนเคลื่อนขึ้น - ลงแบบมีปุ่มกดเคลื่อน ขึ้น - ลงของหัววัด



รูปที่ 4.8 แขนยึดหัวและวัดราง step motor

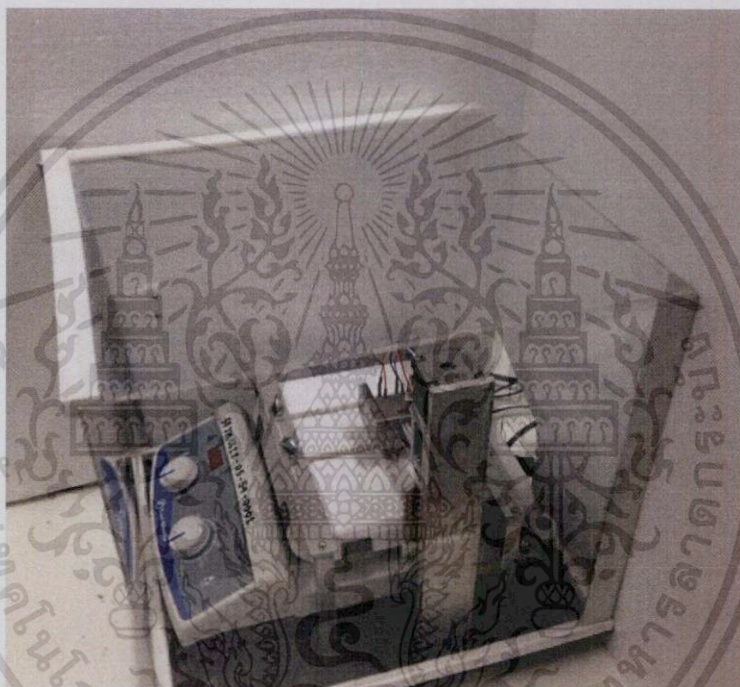


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ รูปที่ 4.9 แผงควบคุม ยี่ห้อ arduino mega256 เชื่อมกับ driver และ power supply ใช้

ในขณะที่ทำการวัดนั้นหากต้องมีการเปลี่ยนตำแหน่งหรือชิ้นงานต้องยกหัววัดขึ้น ส่วนเลื่อนขึ้น - ลงจึงช่วยให้สามารถทำงานได้อย่างสะดวกและปลอดภัยในอีกระดับหนึ่ง และยังสามารถกำหนด ระยะเข็มตกลงบนตัวอย่างได้จากสเกลอย่างไรก็ตามควรใช้ความระมัดระวังขณะที่หัววัดสัมผัสชิ้นงาน เพราะยังต้องใช้สายตาหรือใช้เซนเซอร์จากเครื่องมืออื่น

4.1.4 ส่วนประกอบชิ้นงาน และส่วนวางชิ้นงาน

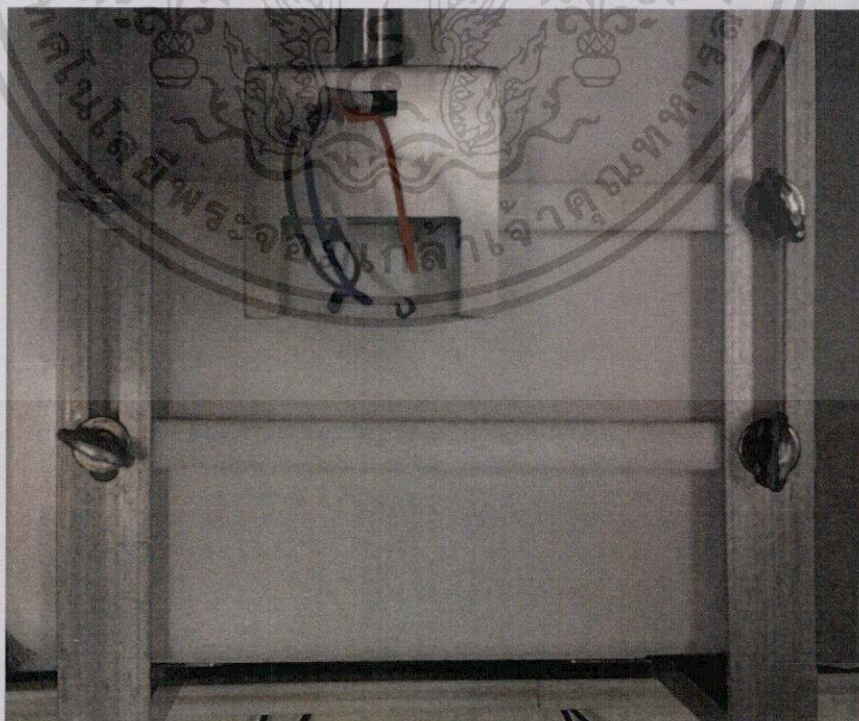
4.1.4.1 ส่วนประกอบชิ้นงาน



รูปที่ 4.10 ประตูลิ้นสำหรับ เปิด - ปิด



รูปที่ 4.11 ประตูเลื่อนสำหรับ เปิด - ปิด
4.1.4.2 ส่วนลับชิ้นงาน



รูปที่ 4.12 ส่วนยึดชิ้นงานสามารถใช้มือหมุนน็อตเพื่อปรับหรือเคลื่อนชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ทดสอบ heater

การตรวจสอบค่าอุณหภูมิของ heater ให้แน่นอนนั้นสำคัญ จึงต้องสอบเทียบอุณหภูมิของ heater ที่เพิ่มขึ้น โดยตั้งค่าเริ่มต้นที่ 30.0°C – 80.0°C วัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของ heater โดยตรงโดยใช้ k-type thermocouple thermometer ยี่ห้อ Lutron รุ่น TM-947SD

4.2.1 ตรวจสอบอุณหภูมิ heater แบบไม่มีกระจกนำไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30°C - 80°C

อุณหภูมิ set point ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่วัดได้จาก thermometer ($^{\circ}\text{C}$)				เวลา (นาที)
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	
30.0	30.2	29.8	30.1	30.0	0
40.0	39.1	39.6	38.8	39.2	4.26
50.0	46.0	48.2	47.3	47.2	10.13
60.0	57.3	56.8	58.1	57.4	14.13
70.0	67.1	67.5	68.2	67.6	20.47
80.0	73.8	74.2	74.0	74.0	26.27

ตารางที่ 4.2 เมื่อลดอุณหภูมิจาก 80.0°C - 30.0°C

อุณหภูมิ set point ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่วัดได้จาก thermometer ($^{\circ}\text{C}$)				เวลา (นาที)
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย	
80.0	74.5	74.0	73.8	74.1	0
70.0	67.2	66.8	66.9	67.0	3.31
60.0	57.1	56.8	56.7	56.9	7.25
50.0	49.0	50.0	49.2	49.4	13.29
40.0	40.0	39.6	39.8	39.8	20.12
30.0	30.4	31.0	30.8	30.7	28.30

4.2.2 ตรวจสอบอุณหภูมิ heater เมื่อวัดบนผิวกระจกนำไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30.0 °C - 80.0 °C

อุณหภูมิ set point (°C)	อุณหภูมิที่วัดได้จาก thermometer (°C)	เวลา (นาที)
30.0	29.0	0
40.0	35.0	5.47
50.0	45.0	12.38
60.0	54.0	17.48
70.0	62.0	23.00
80.0	69.0	27.00
85.0	79.0	32.00

ตารางที่ 4.4 เมื่อลดอุณหภูมิจาก 80.0 °C - 30.0 °C

อุณหภูมิ set point (°C)	อุณหภูมิที่วัดได้จาก thermometer (°C)	เวลา (นาที)
80.0	69.0	0
70.0	62.0	4.34
60.0	54.0	8.43
50.0	45.0	14.57
40.0	38.0	24.30
30.0	30.0	30.25

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ค่าอุณหภูมิที่ set point หมายถึงอุณหภูมิที่กำหนดจากตัวเครื่อง heater นั้นเมื่อตรวจวัดด้วย thermometer แล้วผลปรากฏว่า ค่าอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 40.0 °C - 80.0 °C มีค่าที่ไม่เท่ากันทั้งในช่วงการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิ ค่าอุณหภูมิที่ต่างกัน จะอยู่ประมาณ 5.0 °C นั้นหมายความว่า ต้องทำการปรับอุณหภูมิที่เครื่อง heater เพิ่มจากเดิม 5.0 °C จึงจะได้ค่าอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิที่ต้องการจริง เรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิปรับแก้

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 เป็นการตรวจสอบอุณหภูมิกระจกนำไฟฟ้าที่วางอยู่บน heater เพื่อตรวจสอบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิปรับแก้แล้วค่าอุณหภูมิบนกระจกนำไฟฟ้านั้นจะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการหรือไม่ ผลคือค่าอุณหภูมิบนกระจกนำนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการจริง

4.2.3 ผลของอุณหภูมิ heater กับค่าความต้านทาน (R) ของกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคฟูโพรบ

อุณหภูมิ set point (°C)	อุณหภูมิกะจกนำไฟฟ้า (°C)	ค่าความต้านทานของกระจกนำ ไฟฟ้า (Ω)
30.0	30.1	29.1
35.0	33.0	29.1
40.0	36.0	29.2
45.0	40.0	29.5
50.0	46.0	29.6
55.0	50.0	29.7
60.0	52.0	29.8
65.0	59.0	29.8
70.0	65.0	30.0
75.0	69.0	30.0
80.0	74.0	30.0
85.0	77.0	30.1
90.0	84.0	30.1
95.0	86.0	30.2
100.0	91.0	30.4

ตารางที่ 4.5 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30.0 °C – 100.0 °C

ตารางที่ 4.5 เป็นตารางที่แสดงถึงค่าอุณหภูมิบนกระจกนำไฟฟ้าเมื่อนำมาวางบนเครื่อง heater และวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ ค่าอุณหภูมิที่วัดได้นั้นน้อยกว่าค่าที่อ่านจากเครื่องเหตุผลเดียวกันกับตารางที่ 4.1 ,4.2 และเมื่อคำนวณค่า R_{sheet} โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแบบ 2 หัววัดแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

เนื่องจากกรณีนี้ใช้หัววัดแบบทูปโพรบ ทำให้ได้ค่าความต้านทานมากกว่าความต้านทานจริงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 (ค่าความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้าหนา 2.00 mm = 15.000 Ω/\square) จึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่สนับสนุนให้เลือกวัดโดยใช้เทคนิคโพร์พอยท์โพรบ

4.3 วัดค่าความต่างศักย์ (V) และค่า R_{sheet} ของกระจกนำไฟฟ้า

ใช้ current source ของ Keithley รุ่น 220 และ เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ของ Agilent รุ่น 34401 A ในการจ่ายกระแสและวัดค่าโวลต์ ซึ่งกระจกนำไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดนี้ เป็นชนิด ITO ขนาด 20 x 20 mm, $R_{sheet} = 10.000 \Omega/\square$ โดยแบ่งรูปแบบการวัดตามลักษณะรูปแบบหัววัดคือ แบบ Collinear และ แบบ Van der pauw ดังนี้



รูปที่ 4.13 current source และ volt meter ที่ใช้ในการจ่ายกระแสและความต่างศักย์
ได้รับการอนุเคราะห์มาจากแล็บของ รศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดตา

4.3.1) วัด V (mV) ของหัววัดแบบ Collinear และแบบ Van der pauw ที่อุณหภูมิห้อง โดยให้ $I = 1.000, 2.000, 3.000$ และ 4.000 mA ตามลำดับ โดยที่มีระยะของหัววัดที่ต่างกัน

- Collinear 4.00 mm, 5.00 mm, 6.00 mm
- Van der pauw 9.00 mm, 12.00 mm, 15.00 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัววัดแบบ Collinear

ตารางที่ 4.6 V (mV) , $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดโดยใช้หัววัดแบบ Collinear ที่มีระยะ s ที่ต่างกัน

ระยะ s I (mA)	4.00 mm		5.00 mm		6.00 mm	
	V(mV)	ค่าเฉลี่ย $R_{sheet}(\Omega/\square)$	V(mV)	ค่าเฉลี่ย $R_{sheet}(\Omega/\square)$	V(mV)	ค่าเฉลี่ย $R_{sheet}(\Omega/\square)$
1.000	2.416	10.949	2.98	13.505	3.732	16.913
2.000	4.829	10.943	5.964	13.514	7.464	16.913
3.000	7.241	10.939	8.944	13.511	11.194	16.910
4.000	9.655	10.939	11.926	13.512	14.926	16.911

หัววัดแบบ Van der pauw

ตารางที่ 4.7 V (mV) , $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดโดยใช้หัววัดแบบ Van der pauw ที่มีระยะ s ที่ต่างกัน

ระยะ s I (mA)	9.00 mm			12.00 mm			15.00 mm		
	V_1 (mV)	V_2 (mV)	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)
1.000	0.652	0.651	26.574	2.285	2.286	10.357	2.213	2.217	10.038
2.000	1.304	1.300	26.554	4.563	4.564	10.340	4.415	4.421	10.011
3.000	1.912	1.915	26.017	6.841	6.84	10.333	6.614	6.624	9.999
4.000	2.58	2.572	26.268	9.119	9.118	10.331	8.816	8.828	9.995

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 เป็นการวัดค่า V(mV) เพื่อมาคำนวณหาค่า $R_{sheet}(\Omega/\square)$ ที่อุณหภูมิห้อง โดยให้หัววัดแบบ Collinear และ หัววัดแบบ Van der pauw ที่มีระยะ s ที่ต่างกัน (ระยะ s หมายถึง ระยะห่างระหว่างเข็มวัดแต่ละอัน) ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าที่เป็นค่ามาตรฐานคือ $10.000 \Omega/\square$ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.6 และ 4.7 ระยะหัววัดแบบ Collinear ที่มีค่า R_{sheet} ใกล้เคียงที่สุดคือระยะ 4.00 mm และระยะหัววัดแบบ Collinear ที่มีค่า R_{sheet} ใกล้เคียงที่สุดคือระยะ 15.00 mm สอดคล้องกับเงื่อนไขการวัดในรูปแบบนั้นๆตามทฤษฎี คือ หัววัดแบบ Collinear ควรมีระยะห่างระหว่างเข็มวัดกับขอบของตัวอย่างมาก และหัววัดแบบ Van der pauw หัววัดควรอยู่ใกล้ขอบของตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดน้อยที่สุดจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกหัววัดทั้งสองรูปแบบนี้ใช้ในการวัดที่อุณหภูมิสูงต่อไป

ใช้ค่ากระแสที่ $I = 1.000 \text{ mA}$ ในการจ่ายกระแสเพื่อทำการวัดภายใต้อุณหภูมิสูง เพราะไม่ต้องการให้ความร้อนจากการป้อนกระแสรบกวนผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าเมื่อต้องวัดเป็นระยะเวลาานาน

4.3.2) วัด $V \text{ (mV)}$, หาค่า R_{sheet} ของหัววัดแบบ Collinear โดยวัดกระจก 5 ชั้น หนา 1.00 mm ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.8 $V \text{ (mV)}$, $R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$ วัดโดยหัววัดแบบ Collinear ระยะ = 4.00 mm วัดกระจกนำไฟฟ้าชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิห้อง

ครั้งที่วัด	กระจกชั้นที่ 1		กระจกชั้นที่ 2		กระจกชั้นที่ 3	
	$V \text{ (mV)}$	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)	$V \text{ (mV)}$	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)	$V \text{ (mV)}$	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)
1	2.565	11.625	2.495	11.307	2.480	11.239
2	2.565	11.625	2.495	11.307	2.480	11.239
3	2.564	11.620	2.495	11.307	2.480	11.239
4	2.564	11.620	2.496	11.312	2.480	11.239
5	2.564	11.620	2.496	11.312	2.480	11.239
6	2.564	11.620	2.495	11.307	2.480	11.239
7	2.565	11.625	2.496	11.312	2.480	11.239
8	2.564	11.620	2.495	11.307	2.480	11.239
9	2.564	11.620	2.496	11.312	2.480	11.239
10	2.564	11.620	2.496	11.312	2.480	11.239
เฉลี่ย	2.564	11.621	2.495	11.310	2.480	11.239

ตารางที่ 4.9 V (mV) , R_{sheet} (Ω/\square) วัดโดยหัววัดแบบ Collinear ระยะ = 4.00 mm วัดกระแสจก นำไฟฟ้าชั้นที่ 4 ถึงชั้นที่ 5 ที่อุณหภูมิห้อง

ครั้งที่วัด	กระแสจกชั้นที่ 4		กระแสจกชั้นที่ 5	
	V (mV)	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)	V (mV)	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)
1	2.508	11.366	2.506	11.357
2	2.508	11.366	2.505	11.353
3	2.507	11.362	2.505	11.353
4	2.507	11.362	2.505	11.353
5	2.507	11.362	2.505	11.353
6	2.507	11.362	2.506	11.357
7	2.507	11.362	2.505	11.353
8	2.507	11.362	2.505	11.353
9	2.507	11.362	2.505	11.353
10	2.507	11.362	2.505	11.353
เฉลี่ย	2.507	11.363	2.505	11.354

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3) วัด V (mV) , หาค่า R_{sheet} ของหัววัดแบบ Van der pauw โดยวัดกระแสจก 5 ชั้น หนา

1.00 mm

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า V (mV) , R_{sheet} (Ω/\square) โดยให้หัววัดแบบ Van der pauw ระยะ = 15.00 mm วัดกระแสจกนำไฟฟ้าชั้นที่ 1-3 ที่อุณหภูมิห้อง

ครั้งที่วัด	กระแสจกชั้นที่ 1			กระแสจกชั้นที่ 2			กระแสจกชั้นที่ 3		
	V_1 (mV)	V_2 (mV)	R_{sheet} (Ω/\square)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	R_{sheet} (Ω/\square)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	R_{sheet} (Ω/\square)
1	2.175	2.178	9.864	2.077	2.079	9.417	2.163	2.163	9.803
2	2.179	2.179	9.875	2.078	2.078	9.417	2.163	2.163	9.803
3	2.173	2.177	9.857	2.078	2.079	9.420	2.163	2.163	9.803
4	2.173	2.177	9.857	2.077	2.078	9.415	2.164	2.164	9.807
5	2.174	2.177	9.859	2.078	2.079	9.420	2.163	2.163	9.803
6	2.174	2.176	9.857	2.079	2.078	9.420	2.163	2.163	9.803
7	2.176	2.177	9.864	2.079	2.078	9.420	2.162	2.164	9.803
8	2.175	2.176	9.859	2.08	2.078	9.422	2.163	2.164	9.805
9	2.174	2.176	9.857	2.079	2.079	9.422	2.163	2.164	9.805
10	2.178	2.176	9.866	2.08	2.079	9.424	2.163	2.164	9.805
เฉลี่ย	2.175	2.177	9.862	2.078	2.079	9.420	2.163	2.164	9.804

ตารางที่ 4.11 V (mV) , R_{sheet} (Ω/\square) วัดโดยหัววัดแบบ Van der pauw วัดกระแสจนำไฟฟ้าชั้นที่ 4-5 ที่อุณหภูมิห้อง

ครั้งที่วัด	กระจกชั้นที่ 4			กระจกชั้นที่ 5		
	V_1 (mV)	V_2 (mV)	R_{sheet} (Ω/\square)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	R_{sheet} (Ω/\square)
1	2.114	2.117	9.587	2.093	2.094	9.488
2	2.115	2.117	9.590	2.094	2.094	9.490
3	2.114	2.116	9.585	2.094	2.094	9.490
4	2.115	2.117	9.590	2.094	2.094	9.490
5	2.114	2.117	9.587	2.095	2.093	9.490
6	2.115	2.117	9.590	2.094	2.094	9.490
7	2.115	2.117	9.590	2.094	2.094	9.490
8	2.115	2.117	9.590	2.095	2.094	9.492
9	2.115	2.117	9.590	2.095	2.094	9.492
10	2.115	2.117	9.590	2.094	2.095	9.492
เฉลี่ย	2.114	2.117	9.589	2.094	2.094	9.490

จากตารางที่ 4.8 4.9 และ 4.10 นั้น การหาค่า R_{sheet} ของกระจกนำไฟฟ้าแต่ละชั้นจะทำการวัด 10 ครั้งเพื่อหาเฉลี่ย และนำไปหาค่าแก้ไข (Correction value) จาก

$$\text{ค่าแก้ไข} = \text{ค่าจริง} - \text{ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด}$$

ค่า R_{sheet} มาตรฐานของกระจกนำไฟฟ้าหนา 1 mm = 10.000 Ω/\square

ผลการหาค่าเฉลี่ยค่าแก้ไข ของหัววัดแบบ Collinear แสดงได้ดังตารางที่ 4.11 และค่าเฉลี่ยค่าแก้ไข ของหัววัดแบบ Van der pauw แสดงได้ดังตารางที่ 4.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ค่าแก้ไข ของหัววัดแบบ Collinear ระยะ 4.00 mm

กระจกนำไฟฟ้า (ชั้น)	R_{sheet} ค่าจริง (Ω/\square)	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)	ค่าแก้ไข
1	10.000	11.621	-1.621
2	10.000	11.309	-1.309
3	10.000	11.239	-1.239
4	10.000	11.362	-1.362
5	10.000	11.353	-1.353
ค่าเฉลี่ยค่าแก้ไข			-1.377

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Van der pauw

ตารางที่ 4.13 ค่าแก้ไข ของหัววัดแบบ Van der pauw ระยะ 15.00 mm

กระจกนำไฟฟ้า (ชิ้น)	R_{sheet} ค่าจริง (Ω/\square)	ค่าเฉลี่ย R_{sheet} (Ω/\square)	ค่าแก้ไข (Ω/\square)
1	10.000	9.420	0.580
2	10.000	9.419	0.580
3	10.000	9.803	0.196
4	10.000	9.588	0.411
5	10.000	9.490	0.509
ค่าเฉลี่ยค่าแก้ไข			0.367

จากตารางที่ 4.12 และ 4.13 จะได้ค่าแก้ไขของหัววัดแบบ Collinear ระยะ 4.00 mm และหัววัดแบบ Van der pauw ระยะ 15.00 mm มีค่าเท่ากับ $-1.377 \Omega/\square$ และ $0.367 \Omega/\square$ ตามลำดับ

เนื่องจากต้องการที่จะให้เกิดความเที่ยงตรงในการวัดโดยทำการหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด ซึ่งจะใช้ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (Experimental standard deviation of the mean: ESDM, $S_{\bar{x}}$) ดังสมการ

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$S_{\bar{x}}$ คือค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการทวนซ้ำได้

S_x คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n คือจำนวนครั้งที่ทำการวัด

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ

X_i คือค่าที่วัดได้

\bar{X} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่วัดได้

n คือจำนวนข้อมูลที่ทำการวัด

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณจะได้ค่าดังนี้

- หัววัดแบบ Collinear ระยะ 4.00 mm

$$S_x = 0.037 \Omega/\square$$

$$S_{\bar{x}} = 0.016 \Omega/\square$$

- หัววัดแบบ Van der pauw ระยะ 15.00 mm

$$S_x = 0.145 \Omega/\square$$

$$S_{\bar{x}} = 0.065 \Omega/\square$$

4.3.4) วัด V (mV) (จ่ายกระแส $I = 1.000$ mA) ของหัววัดแบบ Collinear โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นที่ 80.0 °C แล้ววัดทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง และลดอุณหภูมิมามีที่ 30.0 °C แล้ววัดทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.14 V (mV) , $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ 80.0 °C ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 1

T= 80.0 °C		รอบที่ 1					
เวลา (นาที)		10	20	30	40	50	60
V(mV)							
ครั้งที่ 1		2.663	2.653	2.649	2.646	2.649	2.645
ครั้งที่ 2		2.663	2.653	2.649	2.645	2.650	2.646
ครั้งที่ 3		2.663	2.653	2.649	2.646	2.649	2.649
Vav(mV)		2.663	2.653	2.649	2.646	2.649	2.647
$R_{sheet}(\Omega/\square)$		10.692	10.646	10.628	10.613	10.630	10.618

ตารางที่ 4.15 V (mV) , $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ 30.0 °C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 2

T= 30.0 °C		รอบที่ 2		
เวลา (นาที)		70	80	90
V(mV)				
ครั้งที่ 1		2.522	2.522	2.521
ครั้งที่ 2		2.522	2.522	2.521
ครั้งที่ 3		2.522	2.522	2.521
Vav(mV)		2.522	2.522	2.521
$R_{sheet}(\Omega/\square)$		10.053	10.053	10.048

ตารางที่ 4.16 $V(mV)$, $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ $80.0^{\circ}C$ ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 3

$T= 80.0^{\circ}C$		รอบที่ 3					
$V(mV)$	เวลา(นาที)	100	110	120	130	140	150
	ครั้งที่ 1		2.655	2.661	2.658	2.655	2.650
ครั้งที่ 2		2.658	2.66	2.656	2.654	2.653	2.652
ครั้งที่ 3		2.656	2.663	2.658	2.652	2.649	2.649
$V_{av}(mV)$		2.656	2.661	2.657	2.654	2.651	2.652
$R_{sheet}(\Omega/\square)$		10.662	10.684	10.666	10.649	10.636	10.640

ตารางที่ 4.17 $V(mV)$, $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ $30.0^{\circ}C$ ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 4

$T= 30.0^{\circ}C$		รอบที่ 4		
$V(mV)$	เวลา (นาที)	160	170	180
	ครั้งที่ 1		2.543	2.538
ครั้งที่ 2		2.542	2.538	2.534
ครั้งที่ 3		2.542	2.538	2.534
$V_{av}(mV)$		2.542	2.538	2.534
$R_{sheet}(\Omega/\square)$		10.145	10.125	10.107

ตารางที่ 4.18 $V(mV)$, $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ $80.0^{\circ}C$ ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 5

$T= 80.0^{\circ}C$		รอบที่ 5					
$V(mV)$	เวลา(นาที)	190	200	210	220	230	240
	ครั้งที่ 1		2.645	2.663	2.658	2.658	2.657
ครั้งที่ 2		2.646	2.66	2.656	2.659	2.655	2.656
ครั้งที่ 3		2.646	2.658	2.663	2.657	2.656	2.656
$V_{av}(mV)$		2.646	2.660	2.659	2.658	2.656	2.655
$R_{sheet}(\Omega/\square)$		10.613	10.680	10.674	10.669	10.660	10.655

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 $V(\text{mV})$, $R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ 30.0°C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 6

$T = 30.0^\circ\text{C}$		รอบที่ 6		
$V(\text{mV})$	เวลา (นาที)	250	260	270
	ครั้งที่ 1		2.539	2.537
ครั้งที่ 2		2.539	2.538	2.539
ครั้งที่ 3		2.539	2.537	2.539
$V_{\text{av}}(\text{mV})$		2.539	2.537	2.539
$R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$		10.130	10.122	10.130

ตารางที่ 4.20 $V(\text{mV})$, $R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ 80.0°C ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 7

$T = 80.0^\circ\text{C}$		รอบที่ 7					
$V(\text{mV})$	เวลา(นาที)	280	290	300	310	320	330
	ครั้งที่ 1		2.657	2.659	2.657	2.658	2.656
ครั้งที่ 2		2.657	2.656	2.656	2.657	2.659	2.656
ครั้งที่ 3		2.668	2.657	2.659	2.659	2.658	2.655
$V_{\text{av}}(\text{mV})$		2.661	2.657	2.657	2.658	2.658	2.656
$R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$		10.681	10.666	10.666	10.669	10.668	10.662

ตารางที่ 4.21 $V(\text{mV})$, $R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ 30.0°C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 8

$T = 30.0^\circ\text{C}$		รอบที่ 8		
$V(\text{mV})$	เวลา (นาที)	340	350	360
	ครั้งที่ 1		2.542	2.534
ครั้งที่ 2		2.543	2.534	2.534
ครั้งที่ 3		2.542	2.534	2.534
$V_{\text{av}}(\text{mV})$		2.542	2.534	2.534
$R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$		10.145	10.107	10.107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

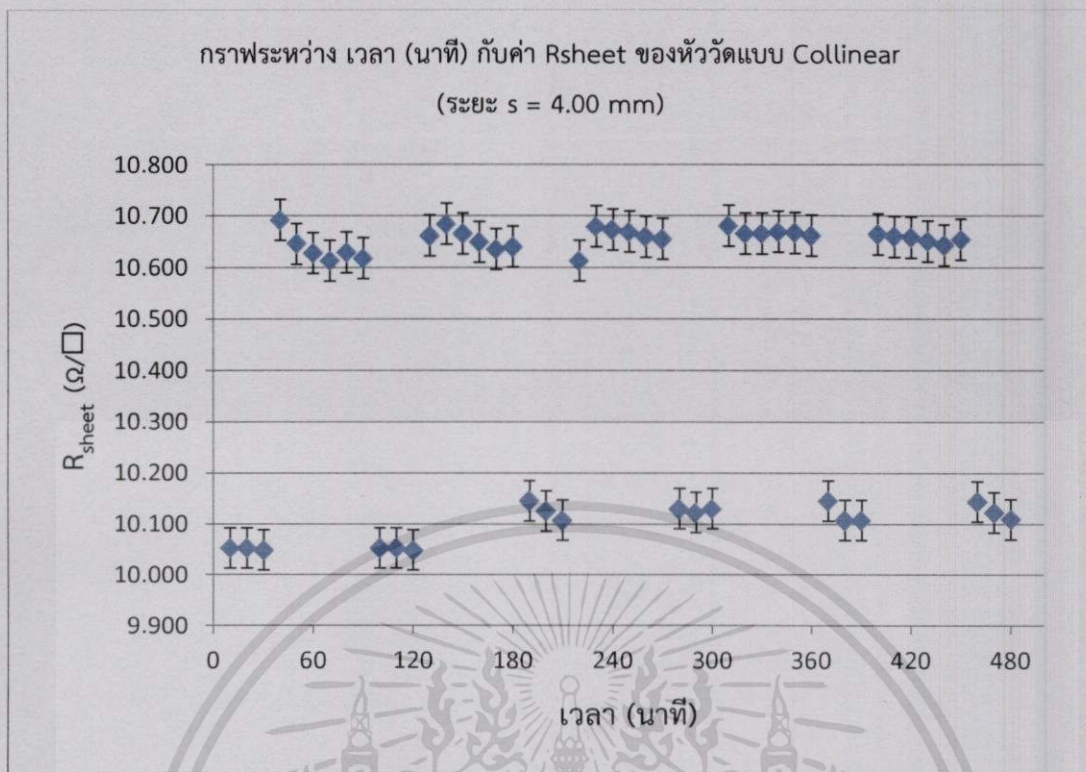
ตารางที่ 4.22 $V(mV)$, $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ $80.0^{\circ}C$ ทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง รอบที่ 9

$T = 80.0^{\circ}C$		รอบที่ 9					
$V(mV)$	เวลา(นาที)	370	380	390	400	410	420
	ครั้งที่ 1		2.656	2.655	2.656	2.653	2.653
ครั้งที่ 2		2.657	2.657	2.656	2.654	2.653	2.654
ครั้งที่ 3		2.658	2.656	2.655	2.655	2.651	2.654
$V_{av}(mV)$		2.657	2.656	2.656	2.654	2.652	2.655
$R_{sheet}(\Omega/\square)$		10.665	10.660	10.658	10.651	10.643	10.654

ตารางที่ 4.23 $V(mV)$, $R_{sheet}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ $30.0^{\circ}C$ ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 10

$T = 30.0^{\circ}C$		รอบที่ 10		
$V(mV)$	เวลา (นาที)	430	440	450
	ครั้งที่ 1		2.543	2.538
ครั้งที่ 2		2.541	2.537	2.534
ครั้งที่ 3		2.542	2.537	2.535
$V_{av}(mV)$		2.542	2.537	2.534
$R_{sheet}(\Omega/\square)$		10.143	10.122	10.109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่า R_{sheet} ที่อุณหภูมิ 80°C นาน 1 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงที่ 30°C นาน 30 นาที โดยทำซ้ำ 5 ครั้ง

จากตารางที่ 4.14 ถึง 4.23 แสดงค่า R_{sheet} (Ω/\square) ที่วัด V (mV) โดยหัววัดแบบ Collinear ระยะ 4.00 mm ภายใต้อุณหภูมิ 80°C นาน 1 ชั่วโมง วัด V (mV) ทุกๆ 10 นาที แล้วลด อุณหภูมิลงที่ 30°C ทำซ้ำ 5 รอบ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 80°C ค่า R_{sheet} จะมีค่าสูง และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่ 30°C R_{sheet} จะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าชนิด ITO เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งแตกต่างการสมบัติของสารกึ่งตัวนำทั่วไปและค่า R_{sheet} มีค่าคงตัวเมื่อวัดที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3.5) วัด V (mV) (จ่ายกระแส $I = 1.000$ mA) ของหัววัดแบบ Van der pauw โดยเพิ่มอุณหภูมิจนที่ 80.0°C แล้ววัดทุกๆ 10 นาที 6 ครั้ง และลดอุณหภูมิลงอยู่ที่ 30.0°C แล้ววัดทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.24 $V(\text{mV})$, $R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ 80.0°C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 1

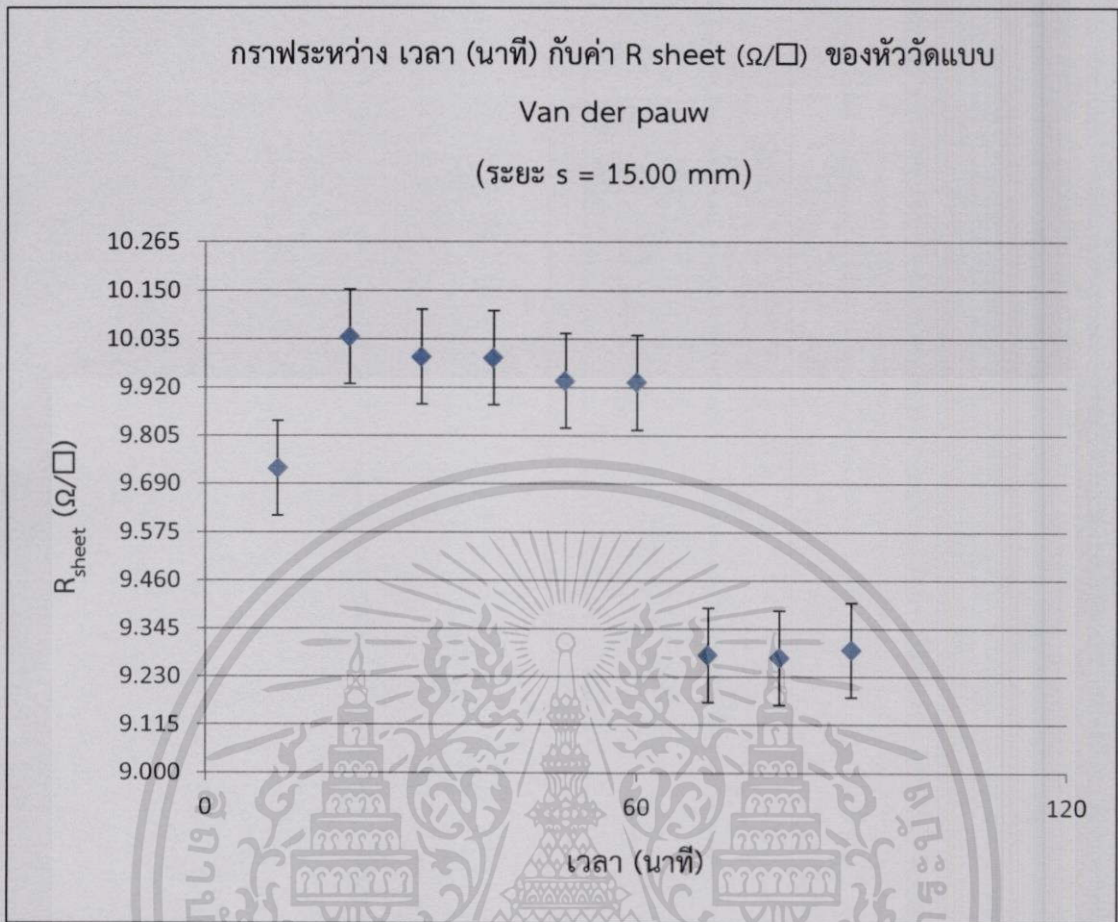
$T = 80^\circ\text{C}$		รอบที่ 1					
เวลา(นาที)	$V(\text{mV})$	10		20		30	
		ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2	ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2	ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2
ครั้งที่ 1		2.084	2.207	2.211	2.221	2.203	2.220
ครั้งที่ 2		2.087	2.206	2.213	2.218	2.201	2.203
ครั้งที่ 3		2.086	2.208	2.211	2.221	2.202	2.200
$V_{\text{av}}(\text{mV})$		2.086	2.207	2.212	2.219	2.202	2.208
$R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$		10.094		10.408		10.359	

ตารางที่ 4.25 $V(\text{mV})$, $R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ 80.0°C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 1

$T = 80.0^\circ\text{C}$		รอบที่ 1					
เวลา(นาที)	$V(\text{mV})$	40		50		60	
		ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2	ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2	ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2
ครั้งที่ 1		2.196	2.21	2.194	2.194	2.191	2.194
ครั้งที่ 2		2.196	2.217	2.19	2.192	2.187	2.193
ครั้งที่ 3		2.196	2.211	2.192	2.192	2.188	2.196
$V_{\text{av}}(\text{mV})$		2.196	2.213	2.192	2.193	2.189	2.194
$R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$		10.357		10.303		10.299	

ตารางที่ 4.26 $V(\text{mV})$, $R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$ วัดที่อุณหภูมิ 30.0°C ทุกๆ 10 นาที 3 ครั้ง รอบที่ 2

$T = 30.0^\circ\text{C}$		รอบที่ 2					
เวลา(นาที)	$V(\text{mV})$	70		80		90	
		ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2	ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2	ตำแหน่ง1	ตำแหน่ง2
ครั้งที่ 1		2.060	2.036	2.040	2.053	2.054	2.047
ครั้งที่ 2		2.060	2.036	2.040	2.053	2.055	2.047
ครั้งที่ 3		2.060	2.036	2.040	2.054	2.055	2.047
$V_{\text{av}}(\text{mV})$		2.060	2.036	2.040	2.053	2.055	2.047
$R_{\text{sheet}}(\Omega/\square)$		9.649		9.642		9.661	



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่า R_{sheet} ที่อุณหภูมิ 80°C นาน 1 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงที่ 30.0°C นาน 30 นาที โดยทำซ้ำ 1 ครั้ง

จากตารางที่ 4.24 ถึง 4.26 แสดงค่า R_{sheet} (Ω/\square), V (mV) วัดโดยหัววัดแบบ Van der pauw ระยะ 15.00 mm ภายใต้อุณหภูมิ 80.0°C นาน 1 ชั่วโมง วัด V (mV) ทุกๆ 10 นาที แล้วลด อุณหภูมิลงที่ 30.0°C ทำซ้ำ 1 ครั้ง แสดงให้เห็นว่า หัววัดแบบ Van der pauw สามารถวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นภายใต้อุณหภูมิสูงได้เช่นเดียวกัน โดยรูปที่ 4.15 แสดงผลจากตาราง 4.21 – 4.23 ค่าของ R_{sheet} ของหัววัดแบบ Van der pauw นั้น แนวโน้มการเพิ่ม-ลด คล้ายกับหัววัดแบบ Collinear

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาและพัฒนากระบวนการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น ภายใต้ความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้ลักษณะหัววัดแบบ Collinear และ แบบ Van der pauw ผลปรากฏว่าหัววัดแบบ Collinear และ แบบ Van der pauw สามารถวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าชนิด ITO หนา 1.00 mm ใช้กระแส 1.000 mA ภายใต้อุณหภูมิแบบต่อเนื่องตั้งแต่ 30.0 °C – 80.0 °C ได้ โดยต้องออกแบบวัสดุหัววัดให้ทนความร้อนสูง แต่ต้องง่ายต่อการขึ้นรูป จึงเลือกใช้เทฟลอน ซึ่งเป็นพลาสติกทนความร้อนและไม่นำไฟฟ้า และทำส่วนเลื่อนขึ้น – ลง หัววัดและส่วนจับชิ้นงาน เพื่อให้สะดวกในการวัด ณ จุดๆ เดียวและยังเพิ่มความปลอดภัยในการวัดที่อุณหภูมิสูงด้วยส่วนครอบชิ้นงาน หลังจากนั้นทำการตรวจสอบค่าอุณหภูมิของ heater และปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง ทำการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเข็ม(ระยะ s)ของหัววัดแต่ละแบบ เพื่อใช้ระยะที่มีค่า R_{sheet} ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด ผลที่ได้คือ หัววัดแบบ Collinear ระยะ 4.00 mm และหัววัดแบบ Van der pauw ระยะ 15.00 mm วัดค่า R_{sheet} ได้ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานจากโรงงานของกระจกนำไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีค่าแก้ไขและค่าความไม่แน่นอนแบบทำซ้ำได้ของหัววัดแบบ Collinear และแบบ Van der pauw เท่ากับ 1.377 Ω/\square , 0.367 Ω/\square และ 0.016 Ω/\square , 0.065 Ω/\square ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 เพิ่มช่วงการวัดที่อุณหภูมิสูงขึ้น
- 5.2.2 เพิ่มวิธีการตรวจสอบว่าเข็มวัด 4 เข็มสัมผัสกับชิ้นงาน
- 5.2.3 หัววัดแบบ Van der pauw ต้องปรับปรุงการสลักหัวในการวัด R_{sheet}

เอกสารอ้างอิง

- [1] นางสาวนาฏนภา และศิลาคุปต์ นายศตพร ปะมา, “เครื่องวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบาง โดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบเพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดกระจกนำไฟฟ้า” (Four-point probe machine for transparent conducting oxide sheet resistance measurement),2-10 (2556), <http://www.kmitl.ac.th/~kssomkia/semi1/9.pdf>
- [2] <http://www.dyesolarcells-kku.blogspot.com/>
- [3] <http://www.aimagin.com/blog/driving-step-motor-and-rc-servo-motor/?lang=th>
- [4] DIETER K. SCHRODER, “SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION”, Third Edition , Arizona State University.
- [5] <http://www.tiktraining.blogspot.com/>
- [6] THERMOMETRY METROLOGY DEPARTMENT, “CALIBRATION OF INFRARED THERMOMETER” , April 2012 , NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY (THAILAND) .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมใช้ควบคุมส่วนขึ้น - ลงหัววัด

```
int clk = 22 ;
```

```
int dir = 24 ;
```

```
int sw1;
```

```
int sw2;
```

```
void setup()
```

```
{Serial.begin(19200);
```

```
pinMode(clk,OUTPUT);
```

```
pinMode(dir,OUTPUT);
```

```
pinMode(40,INPUT);
```

```
pinMode(41,INPUT);
```

```
pinMode(30,OUTPUT);
```

```
pinMode(31,OUTPUT);
```

```
digitalWrite(30,HIGH);
```

```
digitalWrite(31,HIGH);
```

```
digitalWrite(dir,LOW);
```

```
digitalWrite(clk,LOW);
```

```
}
```

```
void loop()
```

```
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
sw1=digitalRead(40);

if(sw1==LOW)

{

sw2=digitalRead(41);

if(sw2==LOW)

{

digitalWrite(dir,HIGH);

for(int i = 0; i < 1600 ;i++)

{

digitalWrite(clk,HIGH);

delayMicroseconds(100);

digitalWrite(clk,LOW);

delayMicroseconds(100);

}

}

}

}
```

```
else if(sw1==HIGH)
```

```
{
```

```
sw2=digitalRead(41);
```

```
if(sw2==LOW)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{  
  
    digitalWrite(dir,LOW);  
  
    for(int i = 0; i < 1600 ;i++)  
  
    {  
  
        digitalWrite(clk,HIGH);  
  
        delayMicroseconds(100);  
  
        digitalWrite(clk,LOW);  
  
        delayMicroseconds(100);  
    }  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้