

ระบบวัดความสูงกำแพงกั้นไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

BARRIER HEIGHT OF METAL-SEMICONDUCTOR CONTACTS
MEASUREMENT SYSTEM



๖๖
๖๖
๒๖ ๕๕

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42552 /
วัน, เดือน, ปี..... พ.ศ. 2545

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-648-556-3

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบวัดความสูงกำแพงกั้นไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

**BARRIER HEIGHT OF METAL-SEMICONDUCTOR CONTACTS
MEASUREMENT SYSTEM**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-556-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**BARRIER HEIGHT OF METAL-SEMICONDUCTOR CONTACTS
MEASUREMENT SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-648-556-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบวัดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัส โลหะ-สารกึ่งตัวนำ
นักศึกษา	นางสาวภทธีรยา กิตติเดชาชาญ
รหัสประจำตัว	41065004
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

บทคัดย่อ

งานวิทยานิพนธ์นี้คือการออกแบบและจัดสร้างระบบเพื่อวัดหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ หลักการวัดอาศัยการป้อนกระแสค่าคงที่ในลักษณะสลับขั้วให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ พล็อตกราฟความสัมพันธ์แรงดันสัมบูรณ์ที่ตกคร่อมชิ้นงานกับอุณหภูมิขณะป้อนกระแสคงที่ค่าหนึ่ง จะเห็นความไม่สมมาตรกันของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ นำอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความไม่สมมาตรของแรงดันไฟฟ้าพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T)$ และ $1/T$ โดยนำค่าความชันของความสัมพันธ์ดังกล่าวมาคำนวณหาความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัส

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ระบบวัดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้างดังกล่าวได้รับการพัฒนาขึ้นให้ทำงานในสภาพแวดล้อมของระบบที่ทำการเปลี่ยนอุณหภูมิให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ตั้งแต่ -180 ถึง 27 องศาเซลเซียสภายในเวลา 192 นาที ทำการเก็บข้อมูลการวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่อัตราการเก็บข้อมูล 38 จุดต่อนาที ใช้ทดลองวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพีที่มีสภาพด้านทานทางไฟฟ้าประมาณ 10 โอห์ม-เซนติเมตร ผ่านกระบวนการแอนนีลภายใต้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาทีและ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่ากำแพงศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีขนาด 0.067 0.140 และ 0.074 อิเล็กตรอน โวลต์ ตามลำดับ

Thesis Title	Barrier Height of Metal-Semiconductor Contacts Measurement System
Student	Pattareeya Kittidachachan
Student ID.	41065004
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2002
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Aree Wichianchai

ABSTRACT

This study designed and established the measurement system to study the barrier height of metal-semiconductor contacts. The method is measuring voltage drop across a sample under various temperatures applying constant current across the sample for the two polarities. The relation between the measured voltage across the sample and the temperature at each constant current shows the asymmetry of measured voltage. The relation of constant current and split temperature using the scheme of $\log(I/T^2)$ versus $(1/T)$ yields the slope that can be used to calculate the barrier heights.

The experiment using such developed system was conducted under the following controlled conditions. The temperature was slowly varied from $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ during 192 minutes. During which the data were taken at the rate 38 points per minute. The samples used are Aluminum and P-type silicon ohmic contacts (resistivity 10 ohm-cm) which undergone different annealing condition: $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 30 minutes, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 20 minutes and $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 30 minutes. The measured barrier heights are 0.067, 0.140, and 0.074 eV, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ

- ดร. วิโรจน์ ตันตราภรณ์และรศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย เป็นอย่างสูงสำหรับคำชี้แนะและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย
- ผศ.ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. สำหรับความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ รวมถึงให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆด้าน
- ผศ. วิชาญ เดชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ให้โอกาสและสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย
- รศ.ดร. ขจรยศ อยู่ดีและอาจารย์ชาญวิทย์ จิตต์ยุทธการ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการจัดเตรียมผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนเพื่อใช้ในการศึกษาในเบื้องต้น
- ผศ. ธนากร โอสดจันท์ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับความอนุเคราะห์เวเฟอร์ซิลิกอนชนิดพีเพื่อใช้ในการจัดเตรียมสิ่งประดิษฐ์เพื่อใช้ในการทดสอบ
- ดร. ปิยวุฒิ ศรีชัยกุล คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกภาควิชา จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติที่เสียสละเวลาในการตรวจทาน แก้ไขและให้ข้อคิดอันเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนางานวิจัย
- บุคลากรในห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (STRL) ทุกๆท่านที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่และทรัพยากรต่างๆในการดำเนินงานวิจัย
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
- คุณณรงค์ แสงแก้ว สำหรับความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

และท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและเพื่อนๆผู้ปรารถนาดีทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอดมา

ภัทริยา กิตติเดชาชาญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 หลักการและเหตุผล.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ผิวนำไฟฟ้าระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	5
2.1.1 ผิวนำไฟฟ้าชนิดกึ่ง.....	5
2.1.2 ผิวนำไฟฟ้าชนิดอินทรีย์.....	9
2.2 ทฤษฎีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากการกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน (Thermionic Emission Theory).....	11
2.3 เทคนิคการวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวนำโลหะและ สารกึ่งตัวนำ.....	17
2.3.1 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า.....	17
2.3.2 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ.....	17
2.3.3 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้า.....	18
2.3.4 การพิจารณาการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสง.....	19
2.4 เทคนิคการวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวนำโลหะและ สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบ การสร้างและการพัฒนาระบบ.....	24
3.1 การออกแบบและการสร้างระบบวัดความสูงกำลังไฟฟ้า.....	24
3.1.1 การออกแบบและสร้างชุดวัดสัญญาณไฟฟ้าและควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.....	24
3.1.2 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องมือวัดและจ่ายสัญญาณไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.....	34
3.2 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวัดคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า.....	37
3.3 การออกแบบและการสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อน.....	40
3.3.1 รายละเอียดของระบบระเหยสารด้วยความร้อน.....	40
3.3.2 การทดสอบชุดวัดความดันสุญญากาศ.....	45
3.3.3 การทดสอบความหนาของฟิล์มบาง โดยการชั่งมวล.....	49
3.4 การพัฒนาระบบแอนนிட.....	52
3.4.1 รายละเอียดของระบบแอนนிட.....	53
3.4.2 การทดสอบระบบแอนนிட.....	54
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	56
4.1 การทดสอบและศึกษาลักษณะสมบัติของระบบวัดความสูงกำลังไฟฟ้าที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น.....	56
4.1.1 ขีดจำกัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบ.....	56
4.1.2 ประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา.....	58
4.1.3 การทดสอบหาขนาดแรงกดของโพรบ.....	60
4.1.4 การศึกษาผลของการกด โพรบบนผิวสัมผัสด้วยแรงค่าต่างๆที่มีต่อสัญญาณไฟฟ้า.....	62
4.1.5 การศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จากการ ไบอัสกระแสสลับทิศทาง.....	66
4.1.6 ผลของความร้อนเนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การเตรียมผิวสัมผัส.....	69
4.3 การศึกษาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยอาศัยระบบที่พัฒนาขึ้น.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและแนวทางในการพัฒนา.....	85
5.1 สรุปผลการวิจัยพัฒนาระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าและการทดสอบ.....	85
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข.....	88
5.2 แนวทางการพัฒนาและการดำเนินงานวิจัยในอนาคต.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	91



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าฟังก์ชันงานของโลหะชนิดต่างๆ.....	8
2.2 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะต่างๆกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี.....	9
3.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพของวัสดุโลหะบริสุทธิ์ชนิดต่างๆ.....	26
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและสิ่งประดิษฐ์ มวลตั้งค้ำของ อคูมิเนียมและความหนาของฟิล์ม.....	49
4.1 ระยะในการกอดโพรบและมวลที่อ่านได้จากตราข่งนำหน้า.....	61
4.2 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเมื่อปรับโพรบให้สัมผัส กับบริเวณผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์ด้วยแรงขนาดต่างๆ.....	63
4.3 ผลการแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสที่เวลา 10 นาที 20 นาที และ 30 นาที	73
4.4 ค่ากระแส(I) และอุณหภูมิ ณ จุดที่ขนาดแรงดันเกิดความไม่สมมาตร(T).....	75
4.5 ค่ากระแส(I) และอุณหภูมิ ณ จุดที่ขนาดแรงดันเกิดความไม่สมมาตร(T).....	80
4.6 ค่ากระแส(I) และอุณหภูมิ ณ จุดที่ขนาดแรงดันเกิดความไม่สมมาตร(T).....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....5
2.2	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังจากสร้างผิวสัมผัส.....6
2.3	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....7
2.4	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังจากสร้างผิวสัมผัส.....8
2.5	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....9
2.6	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังจากสร้างผิวสัมผัส.....10
2.7	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....10
2.8	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังจากสร้างผิวสัมผัส.....10
2.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันสำหรับผิวสัมผัสขั้วตึก.....11
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันสำหรับผิวสัมผัส ไอห์มมิก.....11
2.11	ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนจากวัสดุสารกึ่งตัวนำไปยังวัสดุโลหะ.....13
2.12	โครงสร้างแถบพลังงานของผิวสัมผัสขั้วตึกกรณีได้รับการไบอัสตรง.....14
2.13	โครงสร้างแถบพลังงานของผิวสัมผัสขั้วตึกกรณีได้รับการไบอัสกลับ.....15
2.14	ผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ
(ก)	โครงสร้างผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....20
(ข)	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุภายหลังการสร้างผิวสัมผัส.....20
2.15	การไบอัสกระแสไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์
(ก)	การไบอัสกระแสตรง.....21
(ข)	การไบอัสกระแสสลับขั้ว.....21
3.1	แทนวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
(ก)	โครงสร้างและขนาดของแทนวางสิ่งประดิษฐ์ที่ออกแบบ.....26
(ข)	แทนวางสิ่งประดิษฐ์ที่จัดสร้างขึ้น.....26
3.2	ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์
(ก)	ขนาดของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....27
(ข)	ลักษณะตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....27
3.3	การติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิบนแทนวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.....27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 โพรบสำหรับจ่ายและวัดสัญญาณไฟฟ้า	
(ก) ลักษณะโพรบที่ใช้งานในระบบ.....	28
(ข) การจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า.....	28
3.5 แชมเบอร์สุญญากาศ	
(ก) โครงสร้างของแชมเบอร์สุญญากาศที่ออกแบบ.....	29
(ข) แชมเบอร์สุญญากาศที่จัดสร้างขึ้น.....	29
3.6 ภาชนะบรรจุไนโตรเจนเหลว.....	30
3.7 ป้อนกลโรตารีของบริษัท Javac รุ่น JD 60.....	31
3.8 ป้อนกลโรตารีของบริษัท Balzers-Pfeiffer รุ่น DUO 004B.....	31
3.9 เกจเทอร์โมคัปเปิ้ล	
(ก) โครงสร้างภายในของเกจเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	32
(ข) ลักษณะเกจเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้งาน.....	32
3.10 ส่วนแสดงค่าความดันของเกจเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	32
3.11 แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่.....	33
3.12 มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้า.....	33
3.13 ระบบวัดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้า.....	34
3.14 ลักษณะการเชื่อมต่อชุดเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์.....	35
3.15 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม.....	36
3.16 หน้าจอโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้น.....	37
3.17 วงจรสำหรับทดลองวัดหาคุณลักษณะกระแสและแรงดันของสิ่งประดิษฐ์.....	38
3.18 ตัวอย่างหน้าจอแสดงผลการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	38
3.19 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	39
3.20 แชมเบอร์สุญญากาศ	
(ก) ขนาดของแชมเบอร์สุญญากาศ.....	40
(ข) แชมเบอร์สุญญากาศที่จัดสร้างขึ้น.....	40
3.21 ป้อนกลโรตารี.....	41
3.22 ป้อนไอฟุ้งกระจาย.....	42
3.23 เกจพื้นนิ่ง.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 ส่วนแสดงค่าความดันของเกจเพ็นนิง	43
3.25 เบ้าหลอมสาร โบรอน ในทราย	43
3.26 การติดตั้งเบ้าหลอมสาร	44
3.27 ระบบจ่ายไฟฟ้า	44
3.28 การติดตั้งระบบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างเกจพิรานีของบริษัท Edwards และ เกจเทอร์โมคัปเปิ้ลของบริษัท CVC	46
3.29 ส่วนแสดงผลที่นำมาเปรียบเทียบของบริษัท Edwards	46
3.30 ความดันจากส่วนแสดงผลของบริษัท Astro และส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards	47
3.31 การติดตั้งระบบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างเกจเพ็นนิงของบริษัท Edwards และ เกจเพ็นนิงของบริษัท Varian	47
3.32 ค่าความดันจากส่วนแสดงผลของบริษัท Astro และส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards	48
3.33 ผลการตรวจวัดด้วย SEM ที่ความหนา 1 ไมครอน	51
3.34 ผลการตรวจวัดด้วย SEM ที่ความหนา 2 ไมครอน	51
3.35 ผลการตรวจวัดด้วย SEM ที่ความหนา 3 ไมครอน	52
3.36 โครงสร้างของระบบแอนนูล	53
3.37 ระบบแอนนูล	54
3.38 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ณ ตำแหน่งต่างๆ	55
3.39 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา	55
4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกลางของแท่งวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ	57
4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงขาขึ้นของแท่งวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ	58
4.3 ลักษณะผลการวัดที่แสดงผ่านหน้าจอ โปรแกรม Excel	59
4.4 ลักษณะผลการวัดที่แสดงผ่านหน้าจอที่พัฒนาขึ้น	59
4.5 การจัดระบบเพื่อศึกษาหาขนาดของแรงกดที่สัมพันธ์กับระยะในการกด โพรบ	60
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะในการกด โพรบ	61
4.7 การปรับไมโครมิเตอร์เพื่อให้โพรบสัมผัสกับผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ	62
4.8 กด โพรบด้วยแรงขนาด 0.43 นิวตัน	64
4.9 กด โพรบด้วยแรงขนาด 0.44 นิวตัน	64
4.10 กด โพรบด้วยแรงขนาด 0.45 นิวตัน	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 เปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณเมื่อกดโทรบด้วยแรงค่าต่างๆ.....	65
4.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก่อน(T1) และหลัง(T2) สลับขั้วกระแสในกรณีที่แทนวง สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลง.....	66
4.13 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก่อน(T1) และหลัง(T2) สลับขั้วกระแสในกรณีที่แทนวง สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น.....	67
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่วัดได้ ณ เวลาต่างๆ.....	68
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ณ เวลาต่างๆ.....	68
4.16 ผิดสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพี.....	70
4.17 ลักษณะเวเฟอร์ที่นำไปผ่านกระบวนการแอนนีส.....	70
4.18 แอนนีสที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที.....	71
4.19 แอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที.....	71
4.20 แอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที.....	72
4.21 แอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที.....	72
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 1 ไมโครแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์.....	74
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์.....	75
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่าน กระบวนการแอนนีสภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที.....	76
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.01 มิลลิแอมป์ถึง 10 มิลลิแอมป์.....	77
4.26 สัญญาณรบกวนกรณีไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำขนาด 10 ไมโครแอมป์....	78
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์.....	78
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.01 มิลลิแอมป์ถึง 10 มิลลิแอมป์.....	79
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการแอนนัลภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที.....	81
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสำหรับกระแสไบอัสในย่าน 1 มิลลิแอมป์ถึง 50 มิลลิแอมป์	82
4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสำหรับกระแสไบอัสในย่าน 10 มิลลิแอมป์ถึง 50 มิลลิแอมป์.....	83
4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการแอนนัลภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที.....	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

การสร้างผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเพื่อจัดทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์จำเป็นที่จะต้องใช้ผิวสัมผัสที่สร้างขึ้นมีความต้านทานบริเวณผิวสัมผัสต่ำเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ดี เพราะหากบริเวณผิวสัมผัสแสดงพฤติกรรมขวางกั้นการไหลของกระแสแล้วอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ ตัวอย่างเช่น ผลของความต้านทานบริเวณขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วในการพิจารณาหาความต้านทานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันจะทำให้ทราบถึงความต้านทานโดยรวมของสิ่งประดิษฐ์ กล่าวคือความต้านทานภายในเนื้อวัสดุ ความต้านทานบริเวณผิวสัมผัส รวมถึงความต้านทานของโพรบและสายวัดสัญญาณ การพิจารณาในลักษณะนี้ไม่สามารถบอกได้ว่าความต้านทานบริเวณผิวสัมผัสมีขนาดมากน้อยเพียงใด เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานโดยรวมหรือไม่ เนื่องจากความต้านทานบริเวณผิวสัมผัสเกิดขึ้นเนื่องจากกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นวัดหาความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าจึงทำให้ทราบถึงความต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสได้

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. สามารถเรียนรู้และประยุกต์หลักการทางฟิสิกส์เพื่อใช้ในการออกแบบและและพัฒนา ระบบวัด โดยใช้วัสดุที่มีอยู่ภายในประเทศได้
2. สามารถออกแบบและพัฒนา ระบบวัดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสโลหะ และสารกึ่งตัวนำ
3. สามารถจัดเตรียมผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำโดยใช้ระบบระเหยสารด้วยความร้อนเพื่อใช้ในการศึกษาความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัส
4. ศึกษาคุณลักษณะกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส

1.3 หลักการและเหตุผล

การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนี้มีอยู่หลายเทคนิคด้วยกัน เช่น เทคนิคทางแสงอาศัยหลักการโฟโตอิเล็กทริก เทคนิคการวัดค่าความสัมพัทธ์ระหว่างค่าเก็บประจุบริเวณรอยต่อและแรงดันไฟฟ้า เทคนิคการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น เทคนิคดังกล่าวสามารถใช้วัดหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำได้แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อด้อยของการวัดในบางส่วน ยกตัวอย่างเช่น เทคนิคการใช้แสงอาศัยหลักการโฟโตอิเล็กทริกจะต้องระวังผลกระทบของการจับอิเล็กตรอนและจะต้องใช้แสงที่มีระดับพลังงานเข้าใกล้ค่าเทรชโฮล (มีระดับพลังงานสูงกว่าขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้า) สำหรับเทคนิคการวัดค่าความสัมพัทธ์ระหว่างค่าเก็บประจุบริเวณรอยต่อและแรงดันไฟฟ้าและเทคนิคการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า จะได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิว ชั้นของฉนวนที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ความไม่สม่ำเสมอของการเจือสารเจือในสารกึ่งตัวนำ การทำลายพื้นผิวและการเกิดทันเนล (tunnelling)

ในปี พ.ศ. 2512 ดร.วิโรจน์ ดันตราภรณ์ได้นำเสนอเทคนิคการวัดแบบใหม่เพื่อใช้สำหรับวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้โดยไม่ประสบกับผลกระทบดังเช่นเทคนิคอื่นๆที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น หลักการของเทคนิคนี้คือการวัดขนาดแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ อนุกรมิต่างๆ เมื่อจ่ายกระแส (I) คงที่ค่าหนึ่งๆ จากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้พลอตกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของแรงดันและอุณหภูมิเมื่อกระแสไบอัสค่าต่างๆจะเริ่มเห็นการไม่สมมาตรกันของแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความไม่สมมาตรของแรงดัน (T_S) ไปพลอตกราฟความสัมพัทธ์ระหว่าง $\log(I/T_S^2)$ และ $1/T_S$ และหาค่าความชันของกราฟจะทำให้สามารถคำนวณหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสได้

เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษาฟิสิกส์บริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะการวัดหาความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการนำกระแสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ การพัฒนาระบบสำหรับวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญสำหรับการศึกษาและงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องต่อไปในอนาคต ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เน้นการออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยอาศัยเทคนิคการวัดตามเอกสารอ้างอิง [1], [2]

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบและจัดสร้างระบบวัดขนาดความสูงกัมพวงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัส
2. พัฒนาระบบประเหยสารด้วยความร้อนเพื่อใช้สำหรับจัดเตรียมผิวสัมผัส
3. พัฒนาระบบแอนนีสเพื่อใช้สำหรับแอนนีสผิวสัมผัส
4. เตรียมผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพีเพื่อใช้ในการวัดหาค่าความสูงของกัมพวงศักย์ไฟฟ้า
5. ศึกษาค่าความสูงของกัมพวงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสจากผิวสัมผัสที่เตรียมได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินวิทยานิพนธ์ออกเป็น 11 ขั้นตอนดังนี้

- | | |
|---------------|---|
| ขั้นตอนที่ 1 | การศึกษาเบื้องต้นถึงความรู้พื้นฐานที่จำเป็นและเกี่ยวข้องกับการวัดหาค่าความสูงของกัมพวงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ |
| ขั้นตอนที่ 2 | ศึกษาเทคนิคและแนวทางการพัฒนาระบบเพื่อใช้ในการวัดหาค่าความสูงของ กัมพวงศักย์ไฟฟ้า |
| ขั้นตอนที่ 3 | ออกแบบระบบเพื่อใช้ในการวัดหาค่าความสูงกัมพวงศักย์ไฟฟ้า |
| ขั้นตอนที่ 4 | พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องมือ รวมถึงการบันทึกและแสดงผลการวัดแบบต่อเนื่อง |
| ขั้นตอนที่ 5 | เชื่อมต่อระบบวัดค่าความสูงของกัมพวงศักย์ไฟฟ้าเข้ากับคอมพิวเตอร์ |
| ขั้นตอนที่ 6 | ทดสอบการทำงาน โดยรวมของระบบ |
| ขั้นตอนที่ 7 | พัฒนาระบบประเหยสารด้วยความร้อนเพื่อใช้ในการจัดเตรียมผิวสัมผัส |
| ขั้นตอนที่ 8 | พัฒนาระบบแอนนีสเพื่อใช้สำหรับแอนนีสผิวสัมผัส |
| ขั้นตอนที่ 9 | เตรียมผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพี |
| ขั้นตอนที่ 10 | วัดหาค่าความสูงของกัมพวงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสที่จัดเตรียมได้ |
| ขั้นตอนที่ 11 | สรุปผลและจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ |

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและสร้างระบบวัดความสูงกำลังไฟฟ้า ควบคุมการวัดแบบอัตโนมัติและแสดงผลการวัดแบบต่อเนื่องผ่านจอคอมพิวเตอร์ได้
2. ทราบถึงพฤติกรรมการนำกระแสบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพีจากการวัดหาความสูงกำลังไฟฟ้า
3. มีระบบที่ใช้สำหรับศึกษาความสูงกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส
4. เป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบวัดความสูงกำลังไฟฟ้าต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผิวนำสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

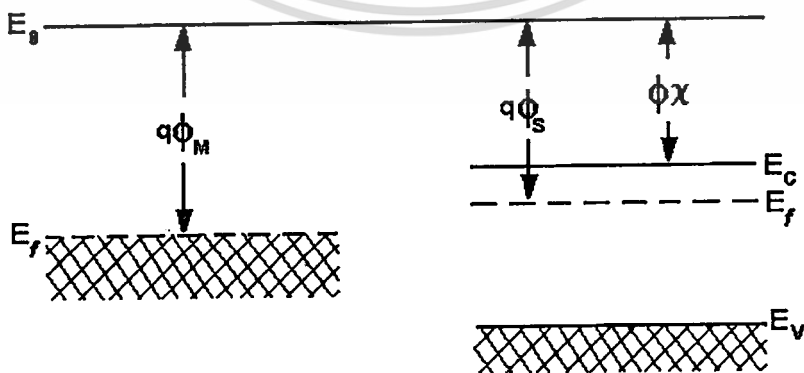
เมื่อนำโลหะมาสร้างผิวนำสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดผิวนำสัมผัส 2 แบบด้วยกันคือ

1. ผิวนำสัมผัสชนิดที่ 1 คือผิวนำสัมผัสที่เกิดกำแพงศักย์ไฟฟ้าหรือที่รู้จักกัน โดยทั่วไปว่า กำแพงศักย์ชนิดที่ 1 (Schottky barrier) บริเวณผิวนำสัมผัส กำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแสดงพฤติกรรมกั้นขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือ ทั้งสองทิศทาง
2. ผิวนำสัมผัสชนิดที่ 2 คือผิวนำสัมผัสที่ไม่แสดงพฤติกรรมกั้นขวางการไหลของกระแส ในทางอุดมคติ

2.1.1 ผิวนำสัมผัสชนิดที่ 1

ในที่นี้จะพิจารณาผิวนำสัมผัสชนิดที่ 1 ที่เกิดจากการนำโลหะมาสร้างผิวนำสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ ใน 2 ลักษณะคือ

1. ผิวนำสัมผัสชนิดที่ 1 ที่เกิดจากการนำโลหะมาเชื่อมต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยวัสดุโลหะมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่าค่าฟังก์ชันงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2.1

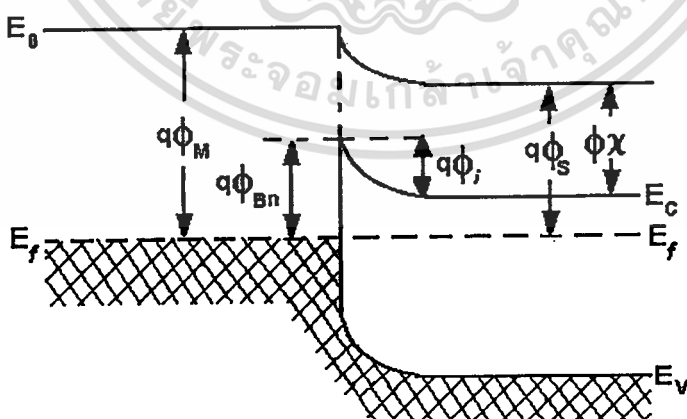


รูปที่ 2.1 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	ϕ_M	คือค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ นิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะไปยังระดับสุญญากาศ (vacuum level)
	ϕ_S	คือค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ นิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำไปยังระดับสุญญากาศ
	χ	คือค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำ นิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากบริเวณขอบล่างของแถบความนำ (conduction band) ไปยังระดับสุญญากาศ
	E_f	คือระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุ
	E_C	คือระดับพลังงานของชั้นแถบความนำของสารกึ่งตัวนำ
	E_V	คือระดับพลังงานของชั้นวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ

จากรูปที่ 2.1 จะสังเกตเห็นว่าวัสดุทั้งสองมีระดับพลังงานเฟอร์มิที่แตกต่างกันและค่าฟังก์ชันงานของวัสดุโลหะนั้นมีค่าสูงกว่าค่าฟังก์ชันงานวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งหมายความว่าพลังงานโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงกว่าพลังงานโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในวัสดุโลหะ ดังนั้นเมื่อนำวัสดุทั้งสองมาสร้างผิวสัมผัสกันจึงเกิดการถ่ายเทประจุจนกระทั่งพลังงานโดยเฉลี่ยของวัสดุทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองปรับตัวจนกระทั่งอยู่ในระดับที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานที่เกิดขึ้นภายหลังจากนำวัสดุทั้งสองมาสร้างผิวสัมผัสกันและระบบอยู่ในสภาวะสมดุลจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2



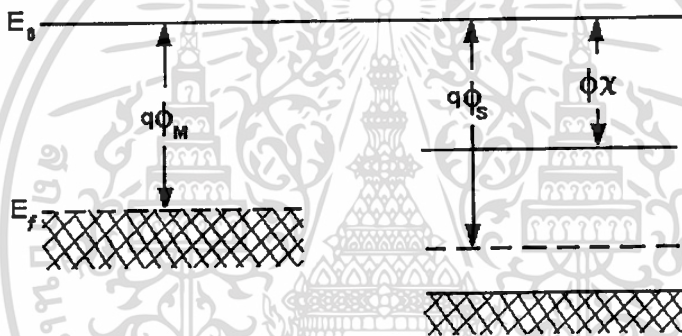
รูปที่ 2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังจากสร้างผิวสัมผัส

จากการถ่ายเทประจุบริเวณผิวสัมผัสนี้เองทำให้เกิดไอออนบวกและลบบริเวณรอยต่อซึ่งมีบทบาทในการสร้างสนามไฟฟ้าภายในทำให้เกิดกำแพงศักย์ไฟฟ้าขึ้นบริเวณผิวสัมผัสซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับปริมาณต่างๆดังสมการ

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.1)$$

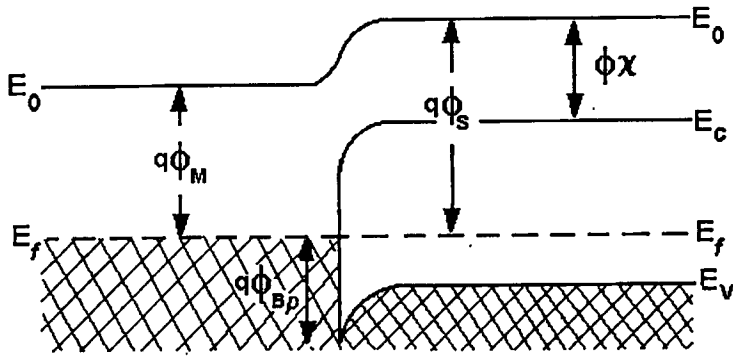
เมื่อ $q\phi_{Bn}$ คือขนาดของกำแพงศักย์ไฟฟ้าหน่วยอิเล็กตรอน โวลต์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2. ผิวสัมผัสชนิดที่ 2 ที่เกิดจากการนำโลหะมาเชื่อมต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยวัสดุโลหะมีค่าฟังก์ชันงานต่ำกว่าค่าฟังก์ชันงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เช่นเดียวกับกรณีแรกคือเมื่อนำวัสดุที่มีโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.3 มาสร้างผิวสัมผัสกัน ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุทั้งสองจะปรับตัวจนกระทั่งอยู่ในระดับเดียวกัน โดยมีโครงสร้างของแถบพลังงานในสภาวะสมดุลย์ภายหลังจากสร้างผิวสัมผัสกันแล้วดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังจากสร้างผิวสัมผัส

ความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการนำวัสดุทั้งสองมาสร้างผิวสัมผัสกันดังรูปที่ 2.4 มีค่าดังสมการ

$$q\phi_{Bp} = E_g - q(\phi_M - \chi) \quad (2.2)$$

เมื่อ E_g คือผลต่างของพลังงานระหว่างชั้นแถบความนำและชั้นวาเลนซ์

ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 แสดงค่าฟังก์ชันงานของโลหะชนิดต่างๆและความสูงของกำแพงศักย์ข้อต่อก็เมื่อนำโลหะมาสร้างผิวสัมผัสกับซิลิกอน

ตารางที่ 2.1 ค่าฟังก์ชันงานของโลหะชนิดต่างๆ

โลหะ	ฟังก์ชันงาน(eV)
Pt	5.65
Ni	5.15
Au	5.10
Cu	4.65
Fe	4.50
Cr	4.50
Sn	4.42
Al	4.28
Ag	4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะต่างๆกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี

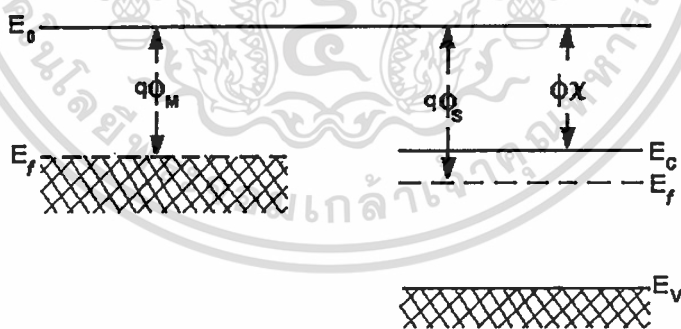
กำแพงศักย์ขั้วต่อ (eV)	โลหะ				
	Ag	Al	Au	Cu	Ni
$q\phi_{Bn}$	0.56	0.50	0.81	0.69	0.67
$q\phi_{Bp}$	0.54	0.58	0.34	0.46	0.51

2.1.2 ผิวนำสัมผัสโอห์มมิก

ผิวนำสัมผัสโอห์มมิกคือผิวนำสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่มีค่าความต้านทานของผิวนำสัมผัสต่ำเมื่อเทียบกับความต้านทานภายในสารกึ่งตัวนำ ผิวนำสัมผัสโอห์มมิกที่ดีจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ และเมื่อมีกระแสไหลผ่านจะต้องมีแรงดันตกคร่อมบริเวณผิวนำสัมผัสน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันที่ตกคร่อมบริเวณย่านทำงาน (active region) ของอุปกรณ์

พิจารณาผิวนำสัมผัสโอห์มมิกที่เกิดจากการนำโลหะมาสร้างผิวนำสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำในลักษณะดังนี้

1. ผิวนำสัมผัสโอห์มมิกที่เกิดจากการนำโลหะมาเชื่อมต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยวัสดุโลหะมีค่าฟังก์ชันงานต่ำกว่าค่าฟังก์ชันงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2.5

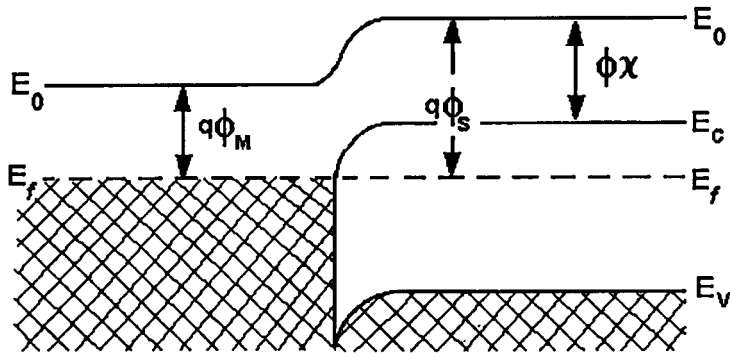


รูปที่ 2.5 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เมื่อวัสดุที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.5 มาสร้างผิวนำสัมผัสกัน จะมีการปรับระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองจนกระทั่งมีระดับพลังงานเท่ากันด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2 และมีโครงสร้างแถบพลังงานภายหลังจากสัมผัสกันแล้วแสดงดังรูปที่

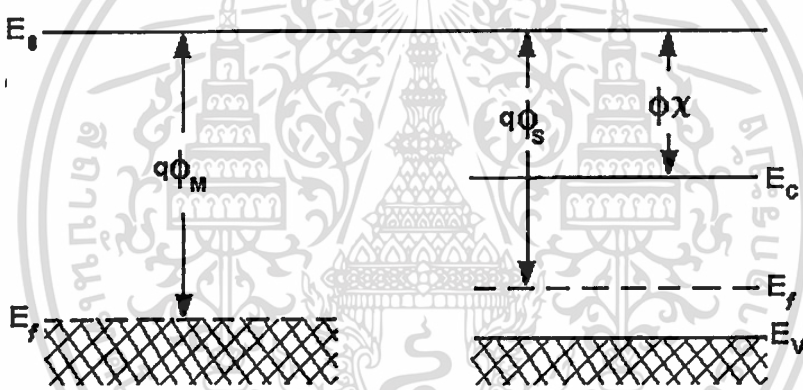
2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



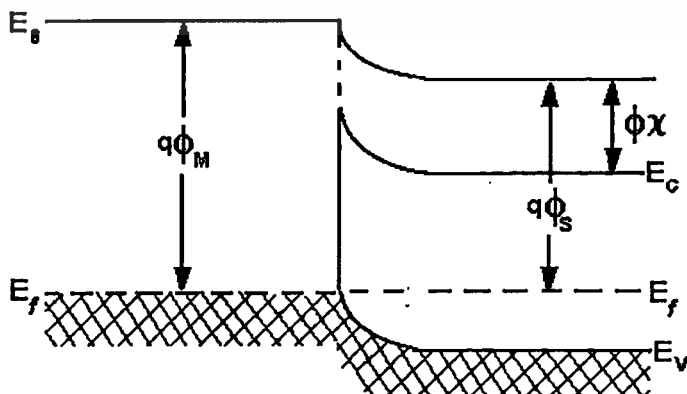
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังจากสร้างผิวสัมผัส

2. ผิวสัมผัสโอห์มมิกที่เกิดจากการนำโลหะมาเชื่อมต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยวัสดุโลหะมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่าค่าฟังก์ชันงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

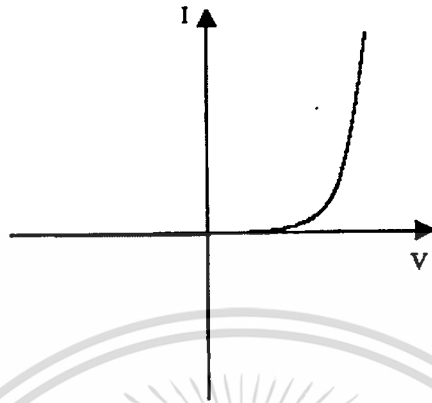
โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุภายหลังการสัมผัสกันแล้วแสดงดังรูปที่ 2.8



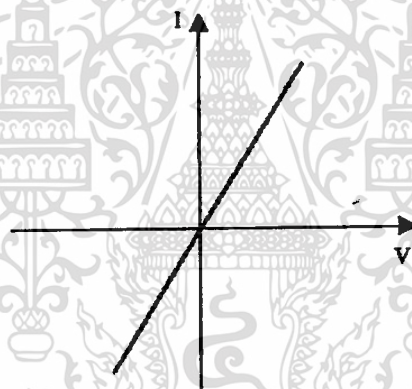
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังจากสร้างผิวสัมผัส

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติการพิจารณาว่าผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์มีคุณลักษณะเป็นขั้วตึกหรือโอห์มมิกจะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของผิวสัมผัสขั้วตึกแสดงดังรูปที่ 2.9 และผิวสัมผัสโอห์มมิกแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันสำหรับผิวสัมผัสขั้วตึก



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันสำหรับผิวสัมผัสโอห์มมิก

2.2 ทฤษฎีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากการกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน (Thermionic Emission Theory)

ทฤษฎีนี้สามารถอธิบายการนำกระแสเนื่องจากอิเล็กตรอนข้ามผ่านกำแพงศักย์ไฟฟ้า การนำกระแสในลักษณะนี้จะเกิดกับสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพคล่องทางไฟฟ้า (mobility) สูงเช่น ซีลีคอน ทฤษฎีนี้ถูกค้นพบโดย Bethe จากสมมติฐาน 3 ข้อคือ

1. ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะต้องมีค่ามากกว่าพลังงานความร้อนของสภาพแวดล้อม
2. ระยะเวลาของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน
3. กระแสสุทธิที่ไหลบริเวณรอยต่อไม่ส่งผลต่อสภาวะสมดุลทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาผิวสัมผัสขั้วต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในสภาวะสมดุลย์ทางความร้อนในกรณีที่สิ่งประดิษฐ์ไม่ได้ถูกไบอัส จะมีการไหลของอิเล็กตรอนผ่านบริเวณรอยต่อ โดยส่วนหนึ่งคืออิเล็กตรอนทางด้านวัสดุโลหะที่มีพลังงานสูงพอที่จะข้ามผ่านกำแพงศักย์ไฟฟ้าไปยังแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำและอีกส่วนหนึ่งคืออิเล็กตรอนที่ไหลมาจากแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำไปยังวัสดุโลหะ ความหนาแน่นกระแสเนื่องจากการไหลของอิเล็กตรอนจากบริเวณแถบความนำของสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$J_{C \rightarrow M} = q n_s \bar{v}_m \quad (2.3)$$

- เมื่อ $J_{C \rightarrow M}$ คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำไปยังวัสดุโลหะ
 q คือค่าประจุของพาหะมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} C
 n_s คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิว
 \bar{v}_m คือความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอน

เนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$n_s = N_C e^{-q\phi_B / kT} \quad (2.4)$$

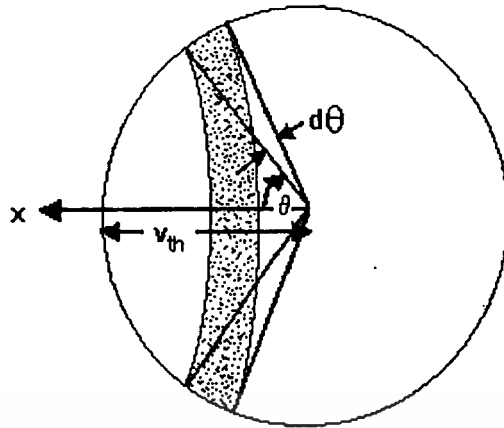
- โดย N_C คือความหนาแน่นขั้วผลของสถานะพลังงานในแถบความนำ (cm^{-3})
 $q\phi_B$ คือความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้า (eV)
 k คือค่าคงที่โบลต์สมานน์มีค่าเท่ากับ 8.62×10^{-5} eV/K
 T คืออุณหภูมิ (K)

ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำไปยังวัสดุโลหะในทิศทางแสดงดังรูปที่ 2.11 คือ

$$\bar{v}_m = \int_0^{\pi/2} \frac{(2\pi v_{th} \sin \theta)(v_{th} \cos \theta) v_{th} d\theta}{4\pi v_{th}^2} = \frac{v_{th}}{2} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{v_{th}}{4} \quad (2.5)$$

- เมื่อ v_{th} คือความเร็วของอิเล็กตรอนเนื่องจากผลของความร้อน (thermal velocity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนจากวัสดุสารกึ่งตัวนำไปยังวัสดุโลหะ

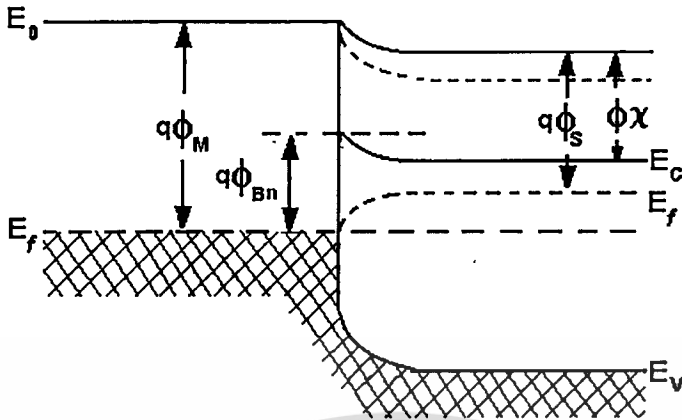
ดังนั้นความหนาแน่นกระแสเนื่องจากการไหลของอิเล็กตรอนจากบริเวณแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำไปยังวัสดุโลหะจากสมการที่ (2.3) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$J_{C \rightarrow M} = \frac{qv_{th}}{4} N_c e^{-q\phi_b / kT} \quad (2.6)$$

เนื่องจากในสภาวะสมดุลย์ทางความร้อนปริมาณความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนจากแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำไปยังวัสดุโลหะจะมีขนาดเท่ากับปริมาณความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนจากวัสดุโลหะไปยังแถบความนำวัสดุสารกึ่งตัวนำคือ

$$J_{M \rightarrow C} = -\frac{qv_{th}}{4} N_c e^{-q\phi_b / kT} \quad (2.7)$$

เมื่อ $J_{M \rightarrow C}$ คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากวัสดุโลหะไปยังแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำ

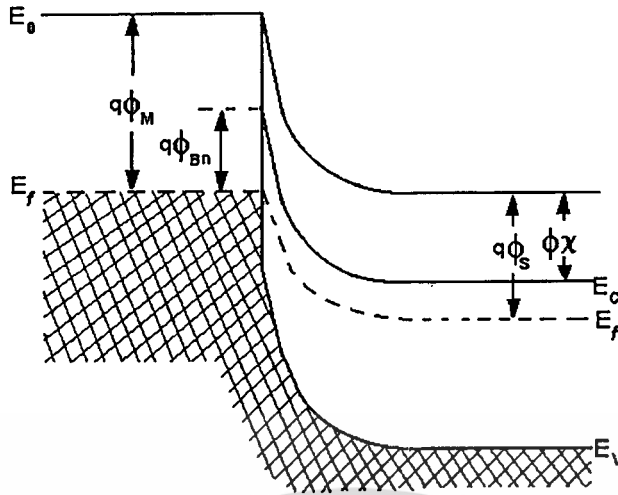


รูปที่ 2.12 โครงสร้างแถบพลังงานของพิวสัมผัสชนิดกึ่งกรณีได้รับการไบอัสตรง

พิจารณาพิวสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำรูปที่ 2.2 หัวข้อ 2.1.1 เมื่อบริเวณพิวสัมผัสถูกไบอัสตรงด้วยแรงดัน V จะทำให้โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปมีลักษณะดังรูปที่ 2.12 ซึ่งส่งผลให้ปริมาณของอิเล็กตรอนที่ไหลจากแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำไปยังวัสดุโลหะเพิ่มสูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันดังสมการ

$$J_{C \rightarrow M} = \frac{q v_{th}}{4} N_c e^{-q\phi_b/kT} e^{qV/kT} \quad (2.8)$$

และเมื่อบริเวณพิวสัมผัสได้รับการไบอัสกลับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแถบพลังงานมีลักษณะดังรูปที่ 2.13 ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำไม่สามารถข้ามผ่านไปยังวัสดุโลหะได้ อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของกระแสซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากวัสดุโลหะไปยังแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำจะยังคงมีค่าเท่าเดิมสำหรับการไบอัสทั้งสองกรณี



รูปที่ 2.13 โครงสร้างแถบพลังงานของพิวสัมผัสชนิดกึ่งกรณีได้รับการไบอัสกลับ

ความหนาแน่นของกระแสรวมที่เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนผ่านบริเวณรอยต่อคือ

$$J_n = J_{C \rightarrow M} + J_{M \rightarrow C} = \frac{q v_{th} N_C}{4} e^{-q \phi_b / kT} (e^{qV / kT} - 1) \quad (2.9)$$

เนื่องจากความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบความนำคือ

$$N_C = 2 \left(\frac{2 \pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.10)$$

เมื่อ m_e^* คือค่ามวลยังผลของอิเล็กตรอน

h คือค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ 4.14×10^{-15} eV·s

และ

$$v_{th} = \left(\frac{2kT}{m_e^*} \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$J_n = J_0 (e^{qV / kT} - 1) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$J_0 = \left[A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ J_0 คือค่าความหนาแน่นกระแสรีชาร์ดสัน

A^* คือค่าคงที่รีชาร์ดสันซึ่งผลมีค่าเท่ากับ $\frac{4q\pi m_e^* k^2}{h^3}$

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้างสมการ

$$I = aJ \quad (2.14)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้า

a คือพื้นที่หน้าตัดที่กระแสไหลผ่าน

ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) จะได้

$$I = I_0 [\exp(qV/kT) - 1] \quad (2.15)$$

เมื่อ I_0 คือกระแสรีชาร์ดสันมีค่าเท่ากับ

$$I_0 = aA^* T^2 \exp(-q\phi_B/kT) \quad (2.16)$$

กระแสรีชาร์ดสันเป็นกระแสที่พิจารณาขณะที่รอยต่อไม่ได้รับการไบอัสเกิดเนื่องจากอิเลคตรอนในวัสดุโลหะมีพลังงานสูงพอที่จะข้ามผ่านกำแพงศักย์ไฟฟ้าไปยังแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำและอิเลคตรอนจากแถบความนำของวัสดุสารกึ่งตัวนำมีพลังงานสูงพอที่จะข้ามมายังวัสดุโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เทคนิคการวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ

การวัดหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี แต่ละวิธีก็มีเทคนิคในการวัดที่แตกต่างกันไป ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการโดยย่อของแต่ละเทคนิคดังนี้

2.3.1 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

เทคนิคนี้จะหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าจากการพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของกระแส ($\log(I)$) พล็อตในแนวแกน y) กับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับสิ่งประดิษฐ์ (V พล็อตในแนวแกน x) พิจารณารูปโดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.15) จะเห็นว่า ณ ตำแหน่งที่ค่าแรงดันไฟฟ้า V มีค่าเท่ากับศูนย์จะแสดงถึงค่า I_0 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากำแพงศักย์ไฟฟ้างสมการที่ (2.16) จึงทำให้สามารถคำนวณหาความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้จาก

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{aA^* T^2}{I_0}\right) \quad (2.17)$$

อย่างไรก็ตามการวัดด้วยเทคนิคนี้ยังมีโอกาสความผิดพลาดจากการคำนวณได้เนื่องจากจำเป็นที่จะต้องทราบค่าคงที่ริชาร์ดสัน (A^*) และพื้นที่ของผิวสัมผัสระหว่างวัสดุโลหะและวัสดุสารกึ่งตัวนำ (a) ที่แน่นอนเพื่อแทนค่าลงในสมการและคำนวณหาความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าต่อไป

2.3.2 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ

พิจารณาสมการที่ (2.15) ในกรณีที่ $kT/q \ll V$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\ln(I/T^2) = \ln(aA^*) - q(\phi_B - V/n)/kT \quad (2.18)$$

เมื่อ n คือแฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor)

การพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/T^2)$ และ $1/T$ ที่ค่าแรงดันไบอัสคงที่ V_1 จะให้ค่าความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ $-q(\phi_B - V_1/n)/k$ และจุดตัดกราฟบนแกน y มีค่าเท่ากับ $\ln(aA^*)$ ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_B = \frac{V}{n} - \frac{k}{q} \frac{\Delta(\ln(I/T^2))}{\Delta(1/T)} \quad (2.19)$$

จากการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/T^2)$ และ $1/T$ จะสามารถหาค่าความชันของกราฟซึ่งสามารถนำมาแทนในสมการที่ (2.19) ได้ แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นที่จะต้องทราบค่า n ที่แน่นอนด้วยจึงจะสามารถคำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้

2.3.3 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

เทคนิคนี้จะหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าจากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และแรงดันไฟฟ้าไบอัสซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\frac{C}{A} = \frac{qK_s \epsilon_0 |N_D - N_A|}{\sqrt{2(V_{bi} + |V| - kT/q)}} \quad (2.20)$$

เมื่อ C คือค่าความเก็บประจุ (F)

A คือพื้นที่ (cm^2)

q คือประจุของอิเล็กตรอน (-1.6×10^{-19} C)

K_s คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุสารกึ่งตัวนำ

ϵ_0 คือเพอิมิตทิวิตีของสุญญากาศ (permittivity of free space = 8.854×10^{-14} F/cm)

N_D คือความหนาแน่นของสารเจือชนิดเอ็น (donor doping concentration: cm^{-3})

N_A คือความหนาแน่นของสารเจือชนิดพี (acceptor doping concentration: cm^{-3})

V_{bi} คือศักย์ไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ (built-in potential: V)

V คือแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับสิ่งประดิษฐ์ (V)

พลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/(C/A)^2$ กับ V จะให้ค่าความชันของกราฟคือ

$$2/(qK_s \epsilon_0 |N_D - N_A|) \quad (2.21)$$

และจุดตัดบนแกนแรงดันคือ

$$V_i = -V_{bi} + kT/q \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า V_{bi} ดังสมการ

$$\phi_B = V_{bi} + V_0 \quad (2.23)$$

โดย

$$V_0 = (kT/q) \ln(N_c/N_D) \quad (2.24)$$

ดังนั้นจากจุดตัดกราฟจึงสามารถหาความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้จาก

$$\phi_B = -V_i + V_0 + kT/q \quad (2.25)$$

2.3.4 การพิจารณาการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสง

การวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยเทคนิคนี้จะกระทำโดยการฉายแสงให้กับบริเวณผิวสัมผัส โดยอาศัยหลักการว่าถ้าแสงที่ฉายให้กับบริเวณผิวสัมผัสมีพลังงาน ($h\nu$) สูงกว่ากำแพงศักย์ไฟฟ้า (ϕ_B) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส จะสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากโลหะข้ามผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำได้ซึ่งจะทำให้สามารถวัดค่ากระแสได้ กำหนดค่ายิลด์ (Y) คืออัตราส่วนระหว่างกระแสโฟโตต่อฟลักซ์ของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนมีความสัมพันธ์กับความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้างดสมการ

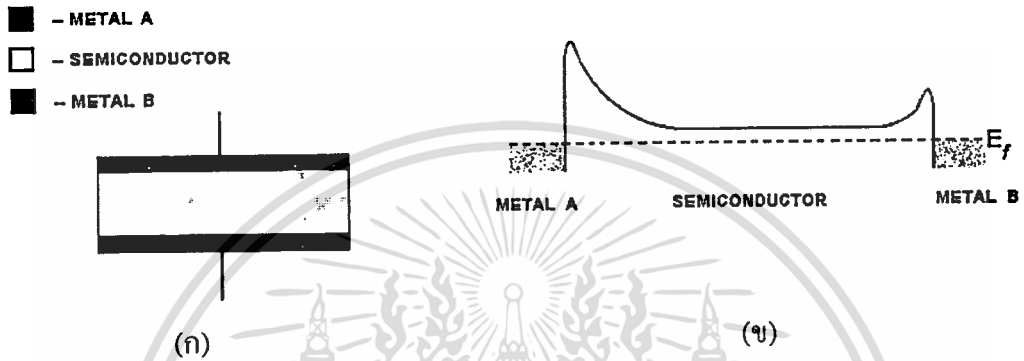
$$Y = B(h\nu - q\phi_B)^2 \quad (2.26)$$

โดย B คือค่าคงที่

ดังนั้นการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Y^{1/2}$ (แกน y) และ $h\nu$ (แกน x) และหาจุดที่กราฟตัดแกน x จะทำให้ทราบถึงความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้

2.4 เทคนิคการวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

พิจารณากรณีที่นำโลหะมาสร้างผิวสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำและเกิดกำแพงศักย์ไฟฟ้าในลักษณะดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

(ก) โครงสร้างผิวสัมผัส

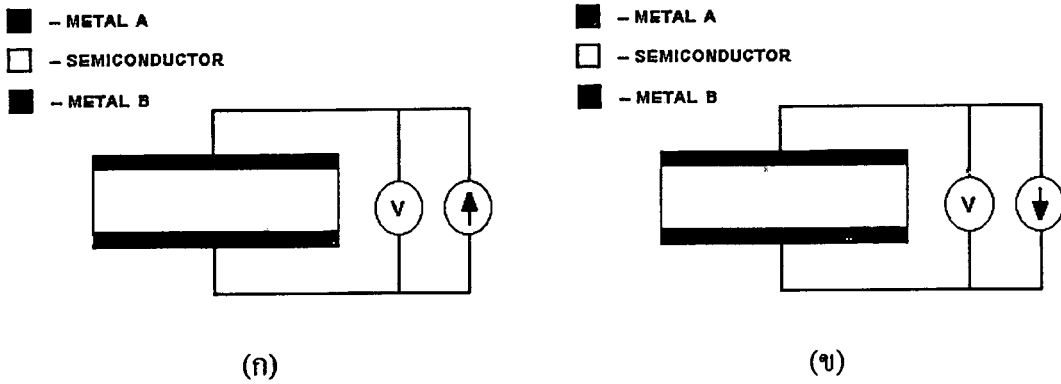
(ข) โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุ

จากรูปกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุโลหะและวัสดุสารกึ่งตัวนำมีพื้นที่เท่ากับ a และผิวสัมผัสระหว่างโลหะ A และวัสดุสารกึ่งตัวนำมีขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $q\phi_1$ ดังนั้นค่ากระแสรีชาร์ดสันจะมีค่าดังสมการ

$$I_{B1} = aA^*T^2 \exp(-q\phi_1 / kT) \quad (2.27)$$

ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ B และวัสดุสารกึ่งตัวนำมีขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $q\phi_2$ ดังนั้นค่ากระแสรีชาร์ดสันจะมีค่าดังสมการ

$$I_{B2} = aA^*T^2 \exp(-q\phi_2 / kT) \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.15 การไบอัสกระแสไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์

(ก) การไบอัสกระแสตรง

(ข) การไบอัสกระแสกลับทาง

เนื่องจากเทคนิคการวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะกระทำโดยการไบอัสกระแสตรงที่ค่าหนึ่งๆให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในลักษณะสลับขั้วดังรูปที่ 2.15 และวัดแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยอาศัยหลักการว่าในสถานะที่สิ่งประดิษฐ์ไม่ได้รับการไบอัสจะมีปริมาณกระแสชาร์ดสัน I_{B1} และ I_{B2} ไหลผ่านระหว่างผิวสัมผัสวัสดุโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าดังสมการที่ (2.27) และ (2.28) ดังนั้นจะพิจารณาการไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในกรณีต่างๆดังนี้

กรณีที่ 1 กระแสไบอัส $I < I_{B1}, I_{B2}$

พิจารณาส่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.14(ข) จากรูปจะเห็นว่ากระแสชาร์ดสัน I_{B1} มีขนาดเล็กกว่ากระแสชาร์ดสัน I_{B2} เมื่อไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์ในลักษณะดังรูปที่ 2.15(ก) จะทำให้เกิดการไหลของกระแสจนครบวงจรโดยโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือไม่ถูกรบกวนกำหนดให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่วัดได้มีขนาดเท่ากับ V_1

ต่อมาเมื่อไบอัสกระแสกลับทิศทางดังรูปที่ 2.15(ข) เนื่องจากกระแสที่ไบอัสมีขนาดเล็กกว่ากระแสชาร์ดสัน I_{B1} และเนื่องจากกระแส $I_{B1} < I_{B2}$ ดังนั้นกระแสไบอัสจึงมีขนาดเล็กกว่ากระแส I_{B2} ด้วย ($I \ll I_{B2}$) ในเงื่อนไขนี้จะเกิดการไหลของกระแสจนครบวงจรโดยโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นกันและความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่วัดได้จะมีขนาดเท่ากันด้วย

ดังนั้นการไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์ในกรณีนี้จะทำให้แรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่วัดได้มีขนาดเท่ากันทั้งสองทิศทาง

กรณีที่ 2 กระแสไบอัส $I_{B1} < I < I_{B2}$

พิจารณาการไบอัสกระแสหลักขณะดังรูปที่ 2.15(ก) กระแสจะสามารถไหลจนครบวงจรได้ โดยโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งนี้เนื่องจากปริมาณกระแสรีชาร์ดสัน I_{B2} มีขนาดมากกว่ากระแสที่ไบอัส I กำหนดให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่วัดได้ในกรณีนี้มีขนาดเท่ากับ V_1

เมื่อไบอัสกระแสกลับทิศทางดังรูปที่ 2.15(ข) พบว่าโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์จะเปลี่ยนแปลงไปทั้งนี้เนื่องจากกระแสรีชาร์ดสัน I_{B1} ที่ไหลผ่านระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุโลหะ A และวัสดุสารกึ่งตัวนำมีขนาดน้อยกว่ากระแสที่ไบอัส I การไบอัสกระแสในลักษณะนี้ กำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุโลหะ A และวัสดุสารกึ่งตัวนำจึงทำหน้าที่เสมือนกำแพงด้านการไหลของกระแส แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสที่จะทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์ ดังนั้นจึงมีการไบอัสแรงดันส่วนหนึ่งให้กับบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุโลหะ A และวัสดุสารกึ่งตัวนำเพื่อลดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสดังกล่าวจนกระทั่งเกิดการไหลของกระแสผ่านบริเวณรอยต่อได้ในปริมาณเท่าเดิม ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่วัดได้เมื่อไบอัสกระแสในลักษณะนี้จะมีขนาดเปลี่ยนไป กำหนดให้แรงดันที่วัดได้ในกรณีนี้คือ V_2

กล่าวได้ว่าการไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์ในกรณีนี้จะทำให้ขนาดของแรงดันที่วัดได้เมื่อสลับขั้วของกระแสแตกต่างกันโดย $|V_1| < |V_2|$

กรณีที่ 3 กระแสไบอัส $I \gg I_{B1}, I_{B2}$

การไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์ในกรณีนี้พบว่า จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์ไม่ว่าจะไบอัสกระแสในลักษณะดังรูปที่ 2.15(ก) หรือรูปที่ 2.15(ข) เนื่องจากในเงื่อนไขนี้กระแสรีชาร์ดสัน I_{B1} และ I_{B2} มีขนาดน้อยกว่ากระแสไบอัส ดังนั้นการที่จะมีกระแสไหลได้ตามปริมาณที่ไบอัสจะต้องเกิดการปรับโครงสร้างของกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุโลหะ A และสารกึ่งตัวนำและระหว่างวัสดุโลหะ B และสารกึ่งตัวนำให้ลดต่ำลงจนกระทั่งกระแสสามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้เท่ากับปริมาณที่ไบอัส ดังนั้นเมื่อวัดขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์เมื่อไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์ทั้งสองทิศทางขนาดของแรงดันที่วัดได้จะแตกต่างกันเช่นเดียวกันกับดังกรณีที่ 2 ถ้ากำหนดให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่วัดได้กรณีไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์ดังรูปที่ 2.15(ก) มีขนาดเท่ากับ V_3 และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่วัดได้กรณีไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์ดังรูปที่ 2.15(ข) มีขนาดเท่ากับ V_4 จะพบว่า $|V_3| < |V_4|$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากปริมาณกระแสชาร์ดสัน I_{B1} และ I_{B2} จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ปริมาณกระแสชาร์ดสันเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.27) และสมการที่ (2.28) พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์ลดต่ำลงปริมาณกระแสชาร์ดสันจะลดลงด้วย ซึ่งการเปลี่ยนอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์ในย่านหนึ่งๆ จะทำให้ค่ากระแสชาร์ดสันเปลี่ยนแปลงและเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ใน 3 กรณีดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นการวัดค่าแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ในย่านอุณหภูมิต่างๆ เมื่อไบอัสกระแสแสดงที่ในลักษณะ สลับขั้วสองทิศทางให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำดังรูปที่ 2.15 และนำข้อมูลที่วัดได้มาพลอตกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ (แนวแกน y) และอุณหภูมิ (แนวแกน x) สำหรับกระแสไบอัสค่าหนึ่งๆ จุดที่กราฟเกิดการแยกของแรงดันซึ่งจะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดความสูงของแพ่งศักย์ไฟฟ้าได้โดยการนำค่าของกระแสและอุณหภูมิที่เริ่มมีการแยกของความต่างศักย์ (T) ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/T^2)$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ $-q\phi/k$ ซึ่งสามารถหาค่าความสูงของกัมแพ่งศักย์ที่มีผลในการกั้นขวางการไหลของกระแสได้



บทที่ 3

การออกแบบ การสร้างและการพัฒนาระบบ

การออกแบบและการสร้างระบบวัดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ การพัฒนาระบบประเหยสารด้วยความร้อนเพื่อใช้ในการจัดเตรียมผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอน รวมถึงการพัฒนาระบบแอนนิตเพื่อใช้สำหรับแอนนิตผิวสัมผัสที่เตรียมได้ โดยรายละเอียดในการออกแบบ การสร้างและพัฒนาระบบในแต่ละส่วนมีดังนี้

3.1 การออกแบบและการสร้างระบบวัดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้า

การออกแบบและจัดสร้างระบบวัดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าสามารถแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการออกแบบและจัดสร้างชุดวัดสัญญาณทางไฟฟ้าและควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ในย่านอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) ถึงอุณหภูมิประมาณ -196 องศาเซลเซียส ส่วนที่สองคือส่วนของการพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องมือวัดและจ่ายสัญญาณทางไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของคิจิตอลมัลติมิเตอร์และส่งข้อมูลมาเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ ขณะเดียวกันโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าโปรแกรมค่าได้ให้จ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งๆให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยจะสลับชั่วคราวจ่ายกระแสไฟฟ้าภายหลังจากมัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันและอุณหภูมิไปเก็บไว้ยังคอมพิวเตอร์เรียบร้อยแล้ว รายละเอียดของการออกแบบ การสร้างและการพัฒนาระบบในแต่ละส่วนจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.1.1 การออกแบบและสร้างชุดวัดสัญญาณไฟฟ้าและควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาระบบวัดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 จากการพิจารณาหลักการในหัวข้อดังกล่าวพบว่าระบบวัดขนาดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าที่ออกแบบควรประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ส่วนเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

งานวิทยานิพนธ์นี้เน้นศึกษากำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในย่านอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ -196 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกั้นขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสเมื่ออุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำลดต่ำลง ดังนั้นส่วนเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจึงต้องสามารถเปลี่ยนอุณหภูมิให้กับสิ่งประดิษฐ์ในย่านอุณหภูมิดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสำหรับระบบที่ออกแบบนี้กระทำโดยการวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำบนแท่นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในย่านอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งการพิจารณาวัสดุเพื่อนำมาใช้ในการจัดทำแท่นวางสิ่งประดิษฐ์นั้น ผู้วิจัยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆดังนี้คือ

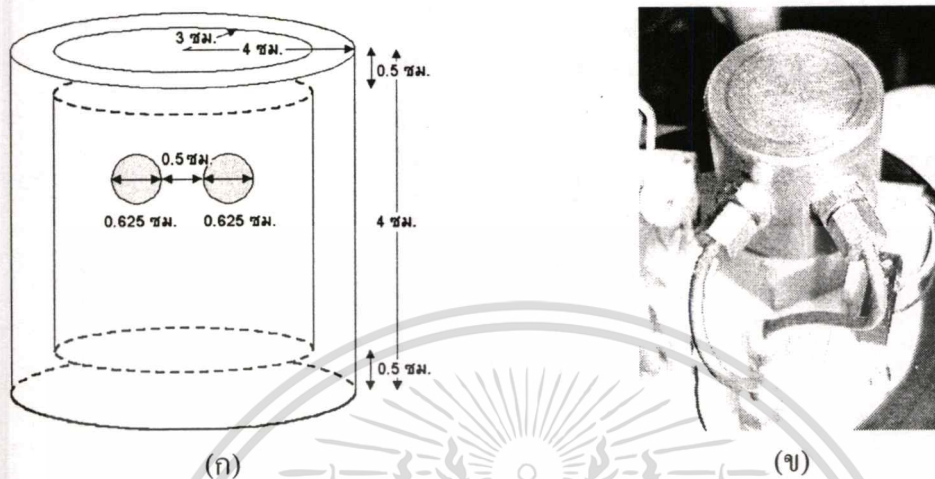
- ราคาถูก
- หาซื้อได้ง่าย (มีจำหน่ายภายในประเทศ)
- มีค่าความนำความร้อนสูง (ดูตารางที่ 3.1)
- มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำ (ดูตารางที่ 3.1)

จากการพิจารณาคุณสมบัติวัสดุในตารางที่ 3.1 พบว่าทองแดงเป็นวัสดุที่มีค่าความนำความร้อนสูงที่สุดและทองเป็นวัสดุที่มีค่าความนำความร้อนสูงเป็นอันดับที่สองรองลงมา และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุทั้งสองจะเห็นว่าทองมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำกว่าทองแดง อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาการขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุทั้งสองเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนแปลงในย่านประมาณ 27 องศาเซลเซียสถึง -196 องศาเซลเซียส จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.1 พบว่าทองและทองแดงจะมีการขยายตัวเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในย่านอุณหภูมิดังกล่าวประมาณ 0.317% และ 0.368 % ซึ่งจะเห็นว่ามีการขยายตัวเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมค่อนข้างน้อยและมีความแตกต่างกันของการขยายตัวของวัสดุทั้งสองน้อยมาก

$$\alpha = \frac{\Delta L / L}{\Delta T} \quad (3.1)$$

ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงเลือกใช้วัสดุทองแดงเพื่อออกแบบให้เป็นแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยได้ออกแบบแท่งทองแดงให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกกลวง (ใช้บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งทองแดงให้มีอุณหภูมิต่ำประมาณ -196 องศาเซลเซียส) เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 4 เซนติเมตร เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติเมตร แท่งทองแดงสูง 4 เซนติเมตร ด้านบนเจาะรู 2 รูเพื่อใช้เป็นทางเข้าและออกของ ไนโตรเจนเหลว รูทั้งสองของแท่งทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.625 เซนติเมตร ลักษณะ แท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ออกแบบมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

- (ก) โครงสร้างและขนาดของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์ที่ออกแบบ
- (ข) แท่นวางสิ่งประดิษฐ์ที่จัดสร้างขึ้น

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพของวัสดุ โลหะบริสุทธิ์ชนิดต่างๆ

วัสดุ	ρ_{25} กรัม/(ซม.) ³	$\alpha \times 10^6$ (เคลวิน ⁻¹)	K วัตต์/(ซม.·เคลวิน)
อลูมิเนียม	2.70	2.31	2.37
แบเรียม	3.62	20.6	0.184
แคดเมียม	8.69	30.8	0.968
โครเมียม	7.15	4.9	0.937
ทองแดง	8.96	16.5	4.01
ทอง	19.3	14.2	3.17
เหล็ก	7.87	11.8	0.802
ตะกั่ว	11.3	28.9	0.353

ρ_{25} : ความหนาแน่นของวัสดุที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

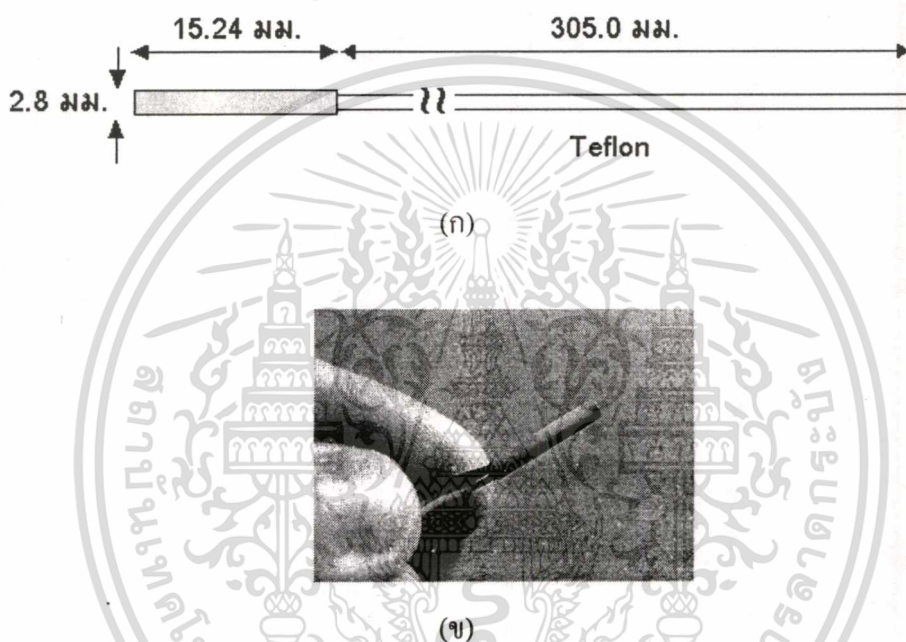
α : สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

K : สหภาพนำความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์

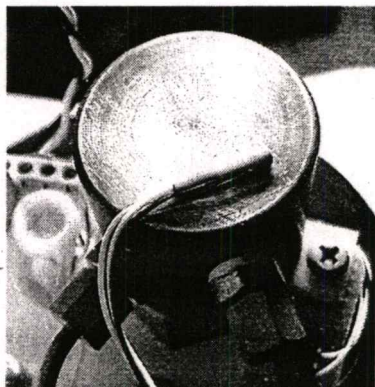
ตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่เลือกใช้คือ RTD platinum 100 ของบริษัท Honeywell (รุ่น HEL-711) มีขนาดและลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.2 สามารถวัดอุณหภูมิได้ในย่าน -200 องศาเซลเซียสถึง $+260$ องศาเซลเซียส มีค่าคลาดเคลื่อน ± 0.5 องศาเซลเซียส ตัวตรวจวัดอุณหภูมินี้ถูกติดตั้งบนแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งที่วางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำลักษณะดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์

(ก) ขนาดของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

(ข) ลักษณะตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

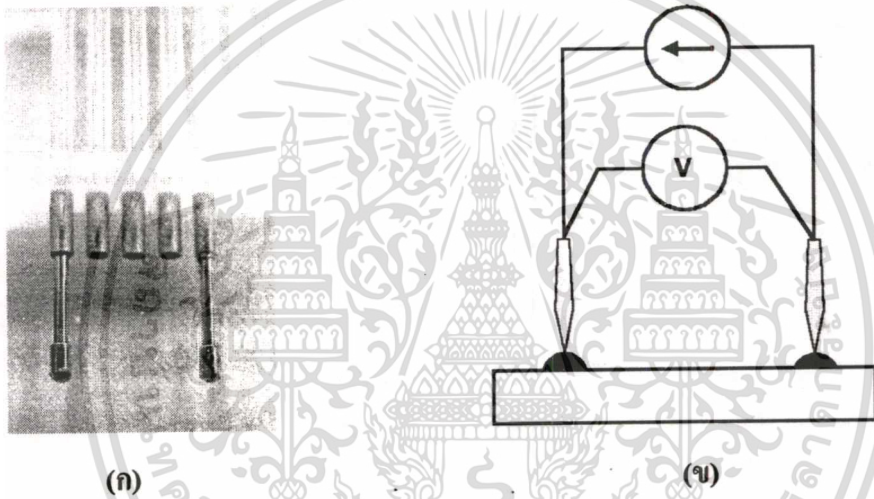


รูปที่ 3.3 การติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิบนแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) โพรบสำหรับวัดและจ่ายสัญญาณทางไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์

ระบบที่ออกแบบประกอบด้วยโพรบสำหรับจ่ายและวัดสัญญาณทางไฟฟ้าให้กับบริเวณผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจำนวน 1 คู่ มีระยะห่างระหว่างโพรบ 1 เซนติเมตรแสดงดังรูปที่ 3.4(ก) โครงสร้างของโพรบทำจากวัสดุโลหะ บริเวณหัวโพรบมีลักษณะมนเพื่อป้องกันปัญหาการทำลายผิวสัมผัสขณะทำการวัด ด้านปลายของโพรบต่อกับสายสัญญาณจำนวน 4 เส้น สายสัญญาณคู่แรกทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับบริเวณผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและสายสัญญาณอีกคู่หนึ่งทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ลักษณะการต่อสายสัญญาณแสดงดังวงจรในรูปที่ 3.4 (ข)



รูปที่ 3.4 โพรบสำหรับจ่ายและวัดสัญญาณไฟฟ้า

(ก) ลักษณะโพรบที่ใช้ในงานในระบบ

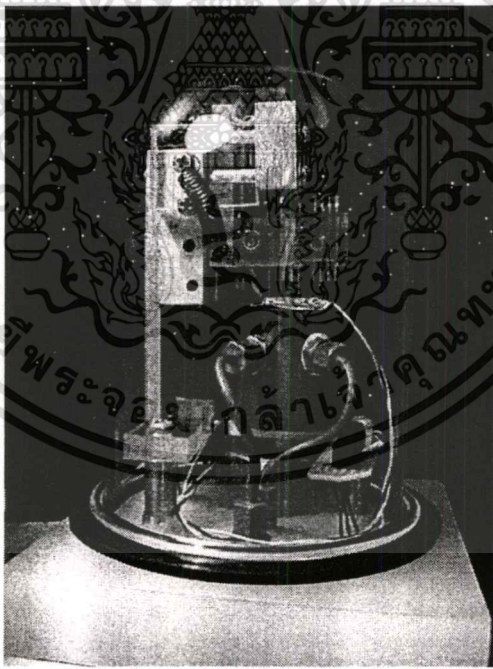
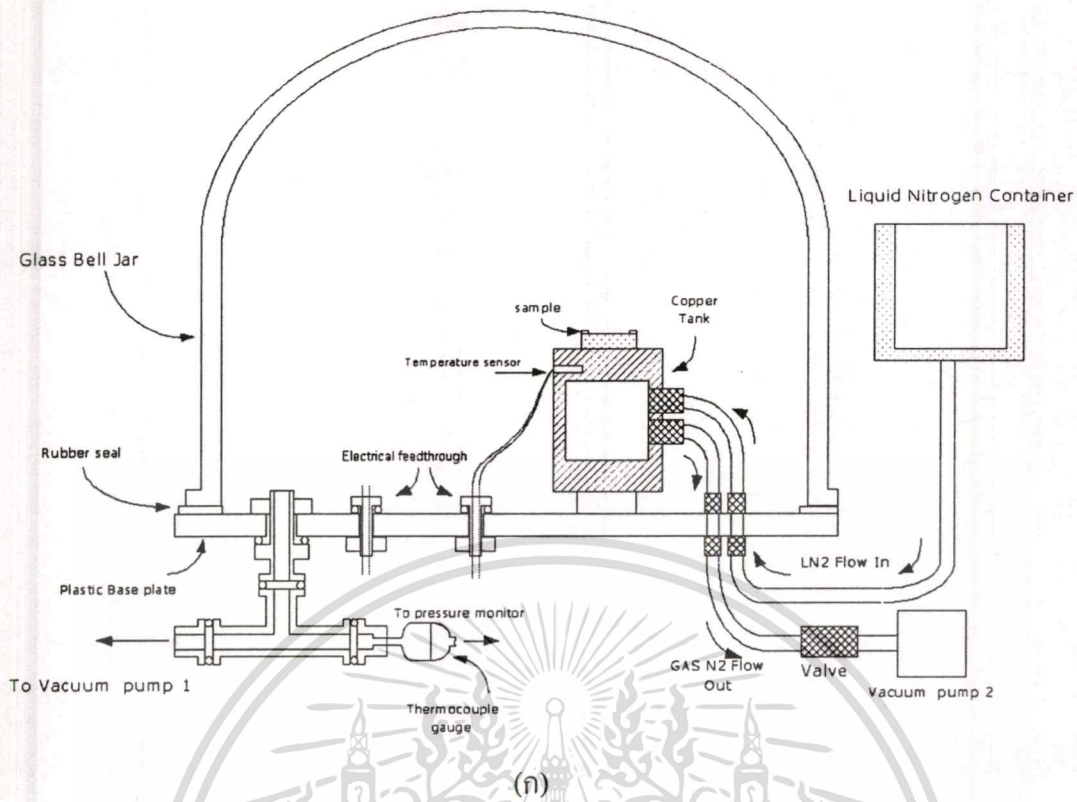
(ข) การจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า

4) แคมเบอร์สัญญาณ

เนื่องจากอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและระบบจะถูกทำให้เปลี่ยนแปลงในย่านอุณหภูมิ 27 ถึง -196 องศาเซลเซียสขณะที่ทำการวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงผลของการเย็นตัวของบรรยากาศโดยรอบซึ่งจะส่งผลให้เกิดไอน้ำและน้ำแข็งเกาะบริเวณ โดยรอบสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและโพรบวัดสัญญาณทางไฟฟ้าและทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อข้อมูลที่ทำการวัด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ออกแบบให้โพรบและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำบรรจุอยู่ในแคมเบอร์สัญญาณมีลักษณะดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.5 แคมเบอร์สุญญากาศ

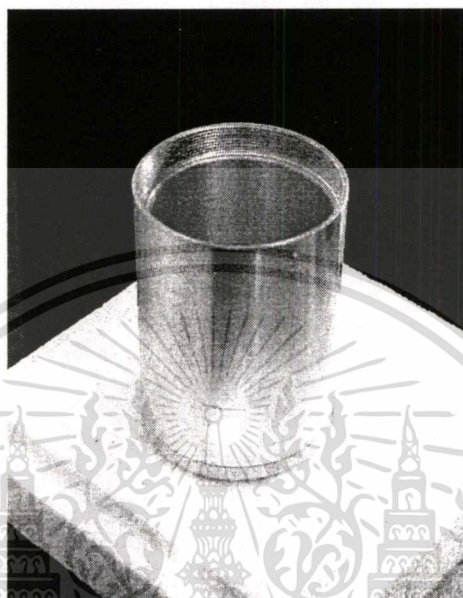
(ก) โครงสร้างของแคมเบอร์สุญญากาศที่ออกแบบ

(ข) แคมเบอร์สุญญากาศที่จัดสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ภาชนะบรรจุในโตรเจนเหลว

ภาชนะบรรจุในโตรเจนเหลวทำจากวัสดุอลูมิเนียม มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกลักษณะ ดังรูปที่ 3.6

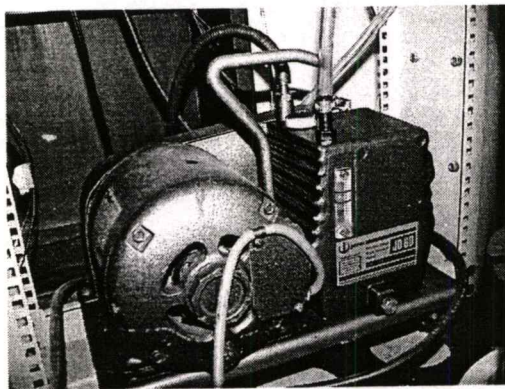


รูปที่ 3.6 ภาชนะบรรจุในโตรเจนเหลว

ภาชนะนี้สามารถบรรจุในโตรเจนเหลวได้ปริมาตร 2×10^4 ลูกบาศก์เมตร โดยในโตรเจนเหลวที่ถูกรวบรวมอยู่ในภาชนะจะถูกสูบให้ไหลผ่านท่อทองแดงขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว (เชื่อมต่อกับบริเวณด้านล่างของภาชนะซึ่งถูกเจาะรู) โดยปั๊มกลโรตารีแบบจังหวะเดียวมาเก็บไว้ยังบริเวณภายในของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซึ่งถูกออกแบบให้มีลักษณะกลวงดังรูป 3.1

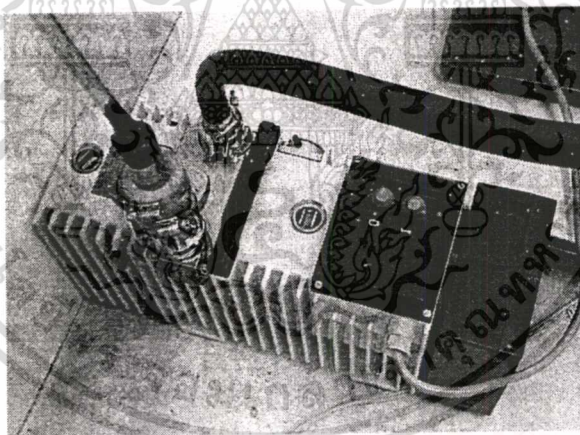
6) ปั๊มกลโรตารีแบบ 2 จังหวะ

ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ปั๊มกลโรตารีแบบ 2 จังหวะจำนวน 2 ตัว ปั๊มตัวแรกเป็นของบริษัท Javac รุ่น JD 60 ทำหน้าที่สูบในโตรเจนเหลวจากภาชนะบรรจุในโตรเจนเหลวดังรูปที่ 3.6 ให้ไหลผ่านท่อทองแดงมาเก็บไว้ยังบริเวณภายในของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำดังกล่าวไปแล้วในข้างต้น ลักษณะของปั๊มแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ปัมกลโรตารีของบริษัท Javac รุ่น JD 60

ปั๊มตัวที่สองทำหน้าที่ปั๊มโมเลกุลของอากาศภายในแชมเบอร์สุญญากาศออกทั้งนี้เพื่อลดความดันภายในแชมเบอร์ให้ลดต่ำในย่านประมาณ 10^{-3} ทอร์รี่ โดยงานวิจัยนี้ใช้ปั๊มของบริษัท Balzers-Pfeiffer รุ่น DUO 004B มีอัตราการปั๊ม (pumping speed) โดยประมาณคือ 4.2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.8

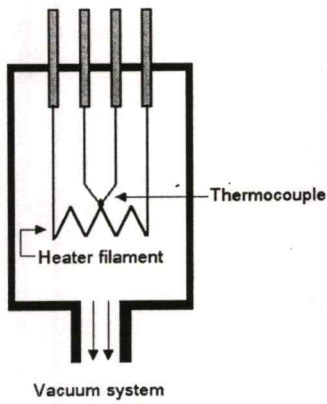


รูปที่ 3.8 ปัมกลโรตารีของบริษัท Balzers-Pfeiffer รุ่น DUO 004B

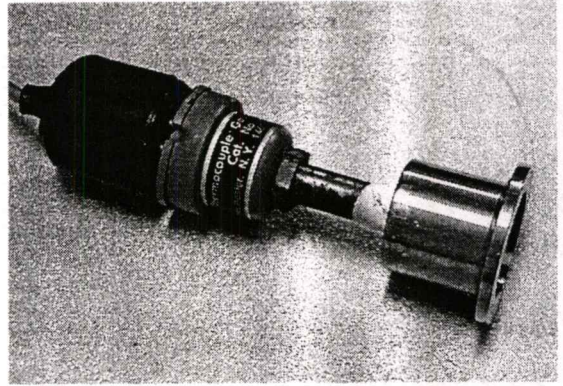
7) เกจวัดความดันและส่วนแสดงค่าความดัน

เกจวัดความดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเกจเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple gauge) ของบริษัท CVC รุ่น GTC-004 ใช้สำหรับวัดความดันในย่านประมาณ $760-10^{-3}$ ทอร์รี่ มีโครงสร้างและลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.9 สำหรับส่วนแสดงค่าความดันเป็นของบริษัท Astro มีลักษณะการแสดงผลเป็นแบบอนาล็อกแสดงดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

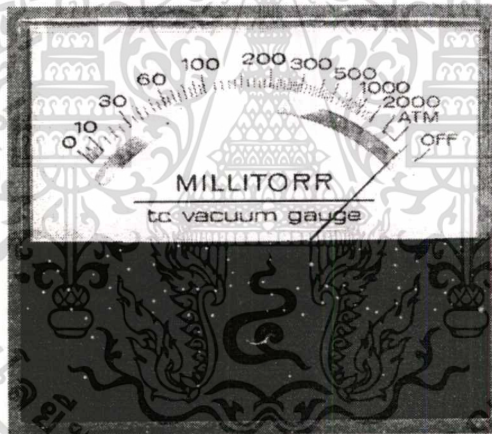


(ข)

รูปที่ 3.9 เกจเทอร์โมคัปเปิ้ล

(ก) โครงสร้างภายในของเกจเทอร์โมคัปเปิ้ล

(ข) ลักษณะเกจเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้งาน



รูปที่ 3.10 ส่วนแสดงค่าความดันของเกจเทอร์โมคัปเปิ้ล

8) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่

แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ที่นำมาใช้คือแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่แบบโปรแกรมค่าได้ของบริษัท Keithley รุ่น 220 ลักษณะดังรูปที่ 3.11 ซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ได้ในย่าน 1.9995 นาโนแอมป์ถึง 101 มิลลิแอมป์ โดยมีค่าแรงดันสูงสุด ± 100 โวลต์ การโปรแกรมค่ากระแสไฟฟ้าสามารถกระทำได้ 2 ลักษณะคือ (1) โปรแกรมค่าผ่านแผงควบคุม (control panel) บริเวณด้านหน้าของเครื่องโดยตรงหรือ (2) โปรแกรมค่าผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การโปรแกรมในลักษณะหลังจะต้องเชื่อมต่อแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางบัส IEEE-488

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่

9) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

งานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ของบริษัท Keithley รุ่น 2001 มีลักษณะดังรูปที่ 3.12 เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์และอุณหภูมิจากตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งบนแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยการเชื่อมต่อสายสัญญาณสำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและสายสัญญาณสำหรับวัดอุณหภูมิเข้ากับเซนแนล 5 และเซนแนล 3 ของการ์ดสแกนเนอร์รุ่น 2001-SCAN ซึ่งถูกติดตั้งเพิ่มเติมให้กับมัลติมิเตอร์ ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลที่วัดได้แบบมัลติเพล็กซ์ โดยทำการติดต่อสื่อสารกับมัลติมิเตอร์ผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกันกับแหล่งจ่ายกระแสคงที่โปรแกรมค่าได้

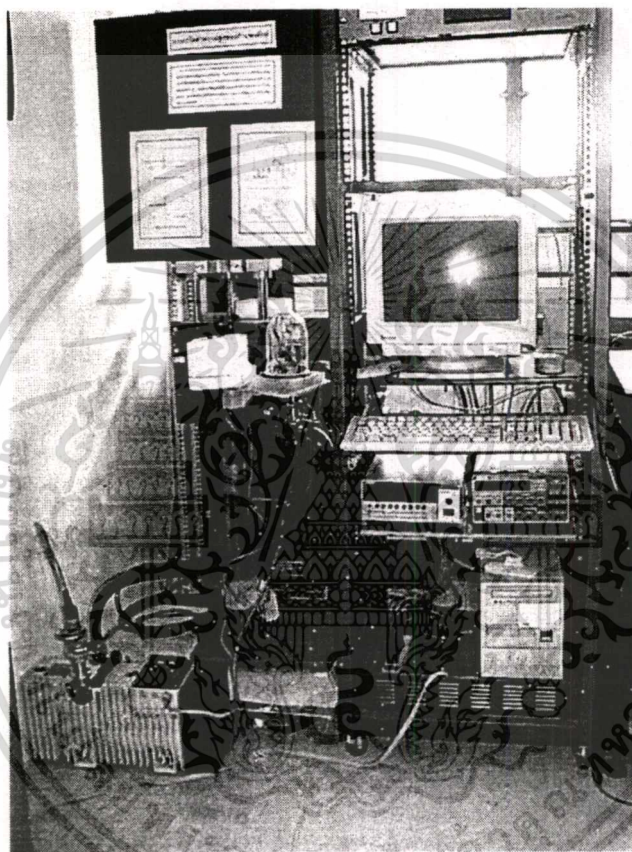


รูปที่ 3.12 มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้า

10) คอมพิวเตอร์

เพื่อให้เกิดความคล่องตัวต่อการจ่ายและวัดสัญญาณทางไฟฟ้าและมีความแม่นยำในการวัดและเก็บบันทึกผลข้อมูล ระบบวัดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าจึงถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้น โดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าโปรแกรมค่าได้และควบคุมการวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รวมถึงการอ่านและเก็บบันทึกผลข้อมูลมาเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ โดยได้ทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าโปรแกรมค่าได้และดิจิตอลมัลติมิเตอร์ผ่านทางบัส IEEE-488 และพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องมือและการเก็บบันทึกผลข้อมูลดังกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป สำหรับระบบวัดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.13



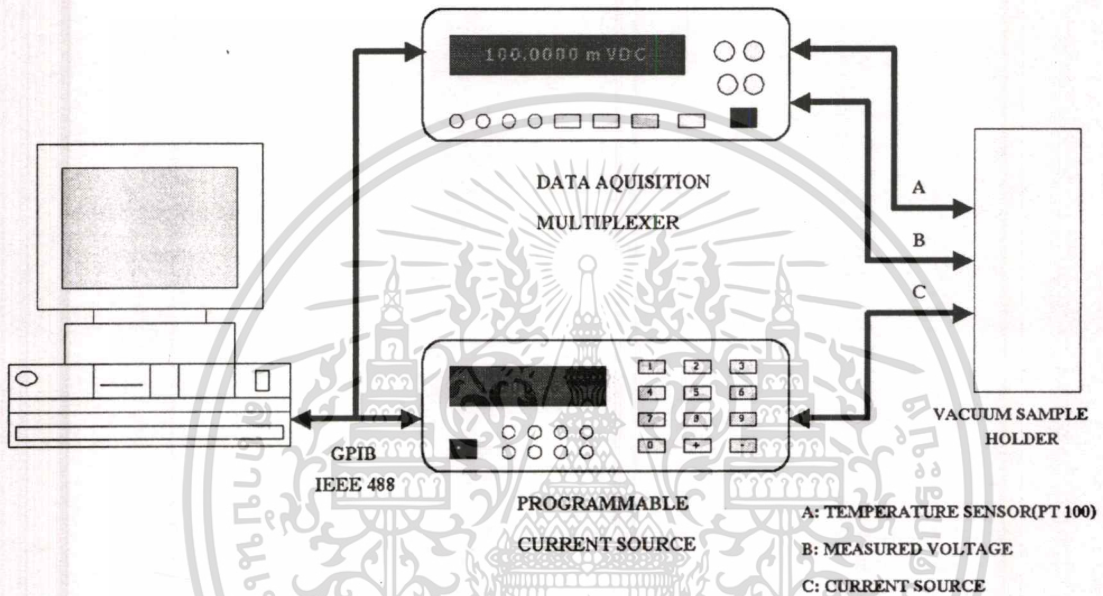
รูปที่ 3.13 ระบบวัดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้า

3.1.2 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องมือวัดและจ่ายสัญญาณไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้พัฒนา โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับควบคุมการจังหวะการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าโปรแกรมค่าได้ให้ป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งๆให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและสลับขั้วของการจ่ายกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อเก็บบันทึกผลค่าแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ทั้ง 2 ทิศทาง ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ นอกจากนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังสามารถอ่านค่าแรงดันและอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

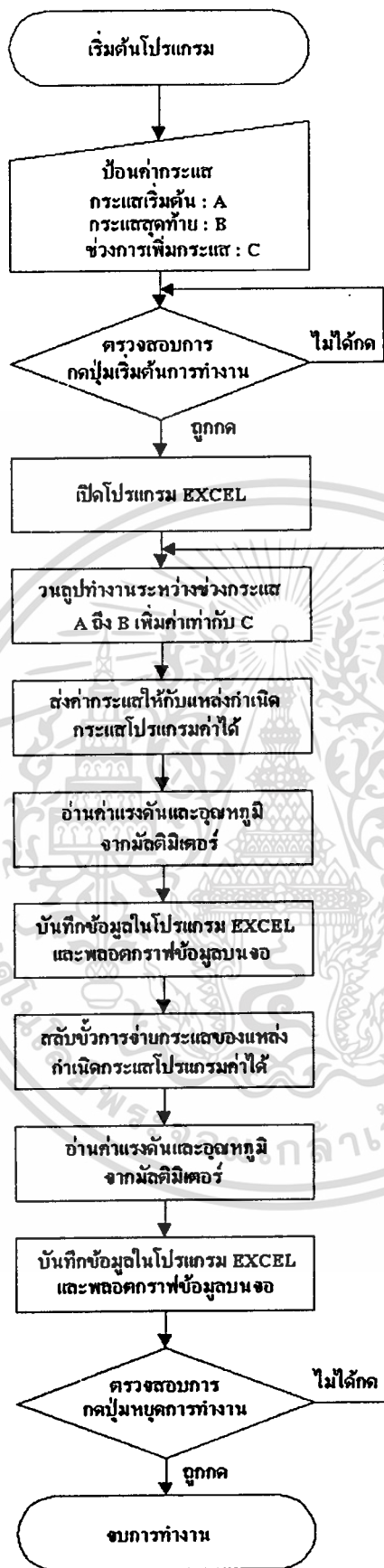
มาเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์และแสดงผลการวัดผ่านจอคอมพิวเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยเลือกใช้โปรแกรม HP VEE 5.0 ของบริษัท Hewlett Packard ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์และเครื่องมือวัดผ่านทางบัส IEEE-488

การวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำกระทำโดยการเชื่อมต่อเครื่องมือต่างๆเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางบัส IEEE-488 ลักษณะดังรูปที่ 3.14 ทั้งนี้เพื่อใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการวัดสัญญาณและการทำงานของระบบทั้งหมด



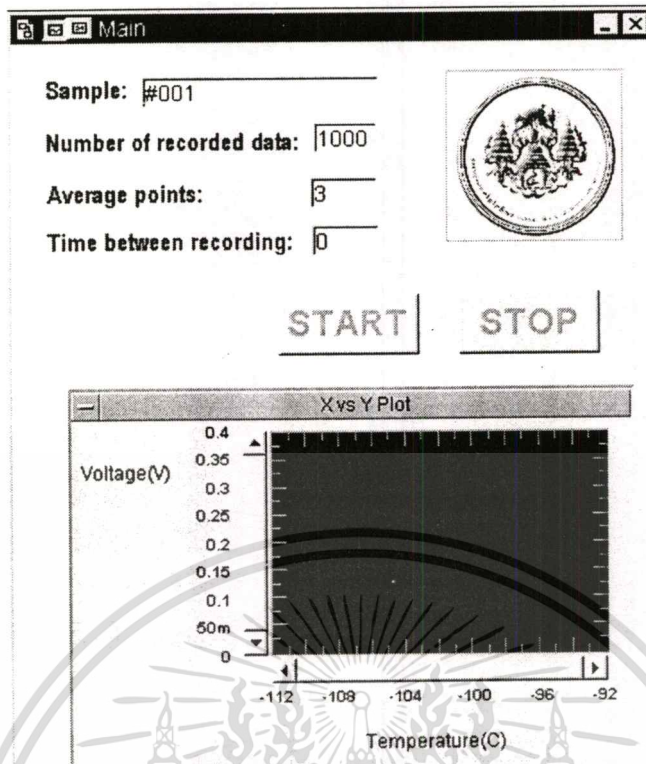
รูปที่ 3.14 ลักษณะการเชื่อมต่อชุดเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์

ลักษณะแผนภาพการทำงานโปรแกรมและหน้าจอที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ



รูปที่ 3.15 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



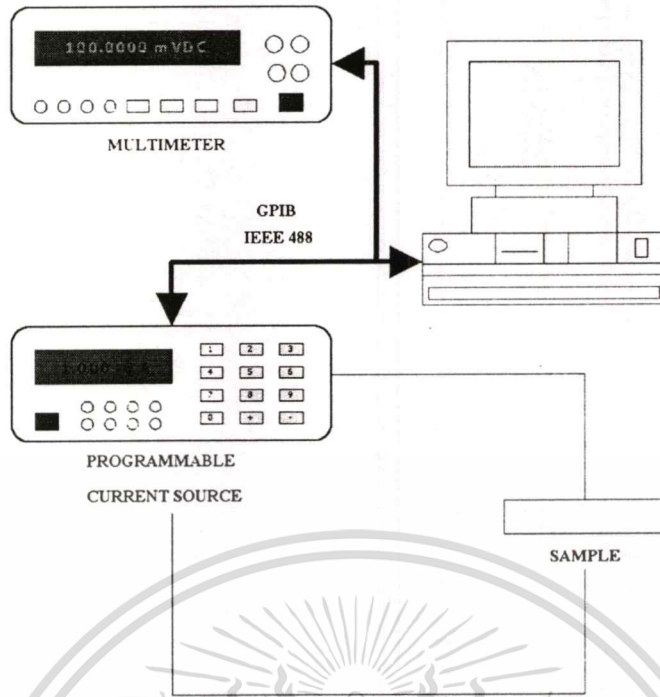
รูปที่ 3.16 หน้าจอโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้น

3.2 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวัดคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

ในการศึกษาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าจำเป็นต้องพิจารณาคคุณลักษณะของผิวสัมผัสในเบื้องต้นก่อนว่าเป็นผิวสัมผัสที่เตรียมได้นั้นเป็นผิวสัมผัสขั้วต่อหรือผิวสัมผัสโอห์มมิก จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 ว่าการพิจารณาคคุณลักษณะผิวสัมผัสสามารถพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของสิ่งประดิษฐ์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้จัดทำระบบเพื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำขึ้น

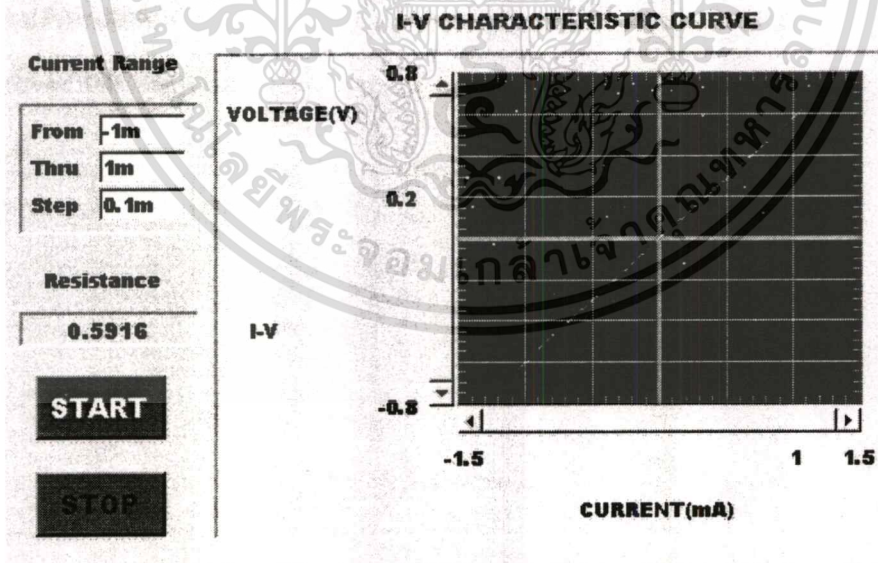
- รายละเอียดของโปรแกรม

ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อติดต่อสื่อสารและรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องมือต่างๆ กับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต GPIB (General Purpose Interface Bus) ตามมาตรฐาน IEEE-488 โดยอาศัยโปรแกรม HP VEE 5.0 โดยลักษณะการต่อเครื่องมือวัดต่างๆกับคอมพิวเตอร์มีลักษณะดังรูปที่ 3.17

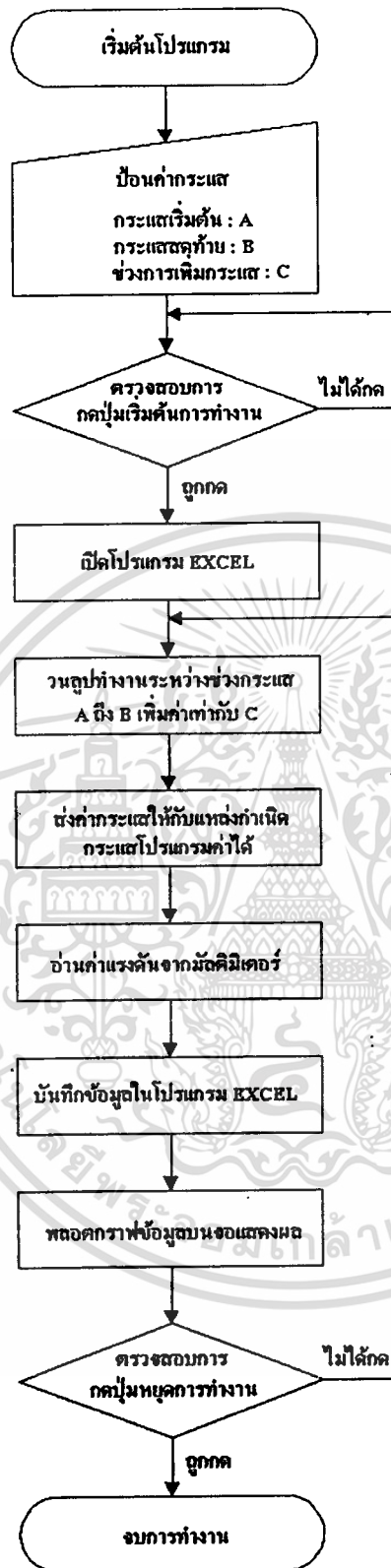


รูปที่ 3.17 วงจรสำหรับทดสอบวัดหาคณลักษณะกระแสและแรงดันของสิ่งประดิษฐ์

ลักษณะหน้าจอที่ออกแบบและแผนภาพการทำงานของโปรแกรมมีลักษณะดังรูปที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างหน้าจอแสดงผลการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.19 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า

3.3 การออกแบบและการสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อน

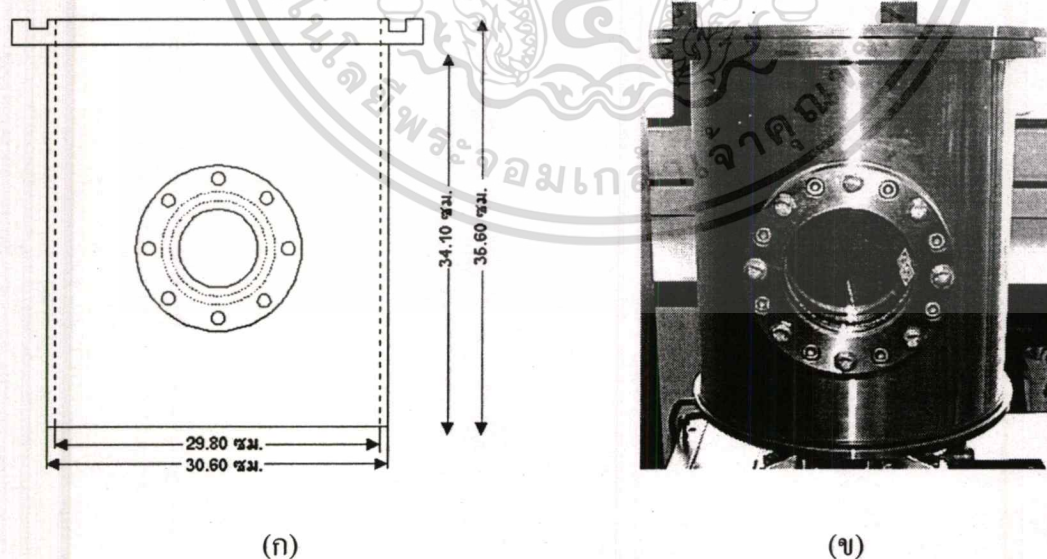
เนื่องจากกระบวนการในการจัดเตรียมผิวสัมผัสเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อขนาดความสูงกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการทราบถึงที่มาของผิวสัมผัสก่อนที่จะนำมาผ่านการวัดหาขนาดความสูงกำลังไฟฟ้า จึงมีประโยชน์ต่อการพัฒนาขั้นตอนในการจัดเตรียมผิวสัมผัสเพื่อให้ผิวสัมผัสที่เตรียมได้มีขนาดกำลังไฟฟ้าตามต้องการได้

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น จึงได้ออกแบบและจัดสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อนขึ้นเพื่อใช้ในการจัดเตรียมผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นศึกษาผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพี

3.3.1 รายละเอียดของระบบระเหยสารด้วยความร้อน

ระบบระเหยสารด้วยความร้อนที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีส่วนประกอบหลัก 7 ส่วน คือ แคมเบอร์สุญญากาศ ปัมสุญญากาศ เกจวัดความดัน เหวหลอมสาร ระบบจ่ายไฟฟ้า ระบบป้อนก๊าซ และระบบหล่อเย็น รายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

1) แคมเบอร์สุญญากาศ



รูปที่ 3.20 แคมเบอร์สุญญากาศ

(ก) ขนาดของแคมเบอร์สุญญากาศ

เอกสารนี้เป็น (ข) แคมเบอร์สุญญากาศที่จัดสร้างขึ้น การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

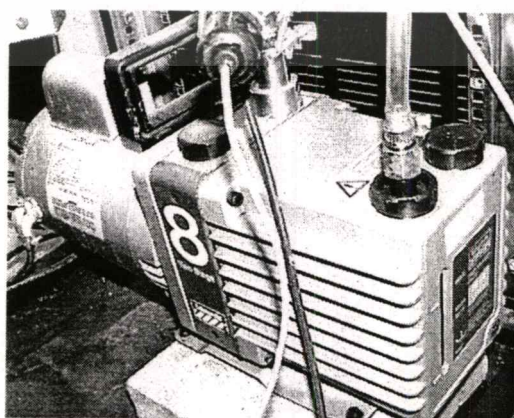
แชมเบอร์สุญญากาศคือบริเวณที่จะทำการระเหยสาร ทำหน้าที่บรรจุวัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่อการระเหยสาร มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำจากวัสดุสแตนเลสหนา 0.8 เซนติเมตร ออกแบบให้มีปริมาตรใช้งานประมาณ 24.83 ลิตร รัศมีภายในขนาด 14.90 เซนติเมตร รัศมีภายนอกขนาด 15.30 เซนติเมตร สูง 35.60 เซนติเมตร มีหน้าต่าง 1 หน้าต่าง สำหรับสังเกตปรากฏการณ์ภายในภาชนะ แผ่นฐาน (base plate) ของแชมเบอร์สุญญากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.50 เซนติเมตร มีหน้าแปลนสำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆจำนวน 12 ช่อง ลักษณะของแชมเบอร์สุญญากาศที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.20

2) ปั๊มสุญญากาศ

ปั๊มสุญญากาศทำหน้าที่สร้างสภาวะภายในแชมเบอร์สุญญากาศให้อยู่ในย่านความดันต่ำที่เหมาะสมต่อการระเหยสาร กล่าวคือมีค่าความดันภายในแชมเบอร์ต่ำกว่า 5×10^{-3} ทอร์ร ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณของโมเลกุลอากาศ (โดยเฉพาะออกซิเจน) ภายในแชมเบอร์ เพราะถ้ามีปริมาณออกซิเจนภายในแชมเบอร์มากขณะที่ทำการระเหยอลูมิเนียม อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างอลูมิเนียมและออกซิเจนเกิดเป็นอลูมิเนียมไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งจะเจือปนกับอลูมิเนียมที่ระเหยไปเคลือบเป็นฟิล์มบางบนเวเฟอร์ซิลิกอนซึ่งส่งผลให้สภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มอลูมิเนียมลดลง และเหตุผลอีกประการหนึ่งที่ต้องทำการระเหยสารที่ความดันต่ำเนื่องจากต้องการให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความสม่ำเสมอของเนื้อฟิล์ม

ระบบที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นจะประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศ 2 แบบด้วยกันคือ

- ปั๊มกลโรตารี (Mechanical Rotary Pump) ทำหน้าที่สร้างสุญญากาศขั้นต้นให้กับแชมเบอร์สุญญากาศ (ประมาณ 10^{-3} ทอร์ร) เป็นเครื่องของบริษัท Edwards รุ่น E2M8 มีอัตราการปั๊ม (ก๊าซไนโตรเจน) ประมาณ 190 ลิตรต่ออนาที มีลักษณะดังรูปที่ 3.21

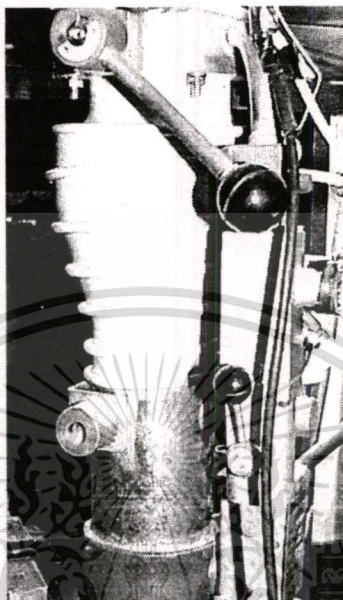


รูปที่ 3.21 ปั๊มกลโรตารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปัมไอฟุ้งกระจาย (Diffusion Pump) ทำหน้าที่สร้างความดันให้กับระบบในย่าน 10^{-3} - 10^{-10} ทอร์รี่ เป็นเครื่องของบริษัท Edwards รุ่น 63/150M มีอัตราการปั๊ม (ก๊าซไนโตรเจน) ประมาณ 150 ลิตรต่อวินาที มีลักษณะดังรูปที่ 3.22



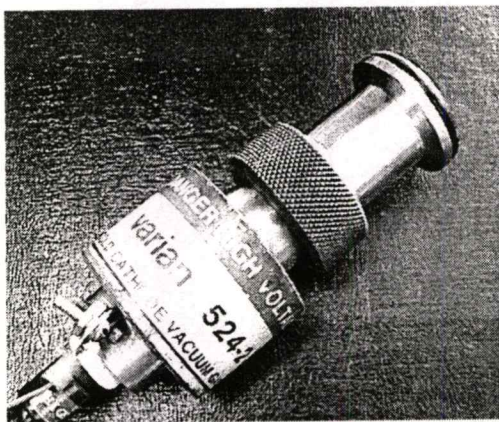
รูปที่ 3.22 ปัมไอฟุ้งกระจาย

3) เกจวัดความดันและส่วนแสดงค่าความดัน

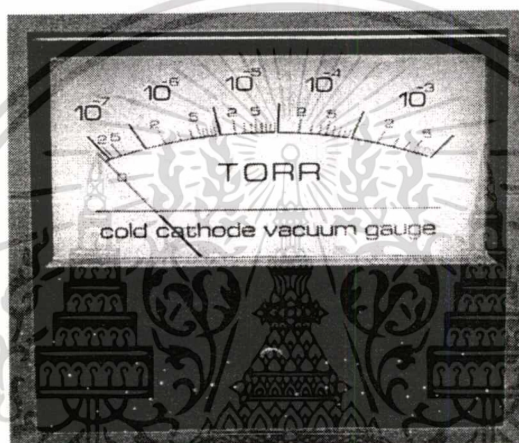
เกจวัดความดันทำหน้าที่วัดความดันภายในระบบ เกจวัดความดันที่นำมาใช้ในระบบนี้มี 2 ชนิดด้วยกันคือ

- เกจเทอร์โมคัปเปิลและส่วนแสดงค่าความดัน (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1.1)
- เกจเพนนิ่ง (Penning Gauge) และส่วนแสดงค่าความดัน

เกจเพนนิ่งที่ใช้ในระบบนี้คือเกจรุ่น 524-2 ของบริษัท Varian ใช้สำหรับวัดความดันในย่านประมาณ 10^{-2} - 10^{-6} ทอร์รี่ มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.23 สำหรับส่วนแสดงค่าความดันมีลักษณะดังรูปที่ 3.24



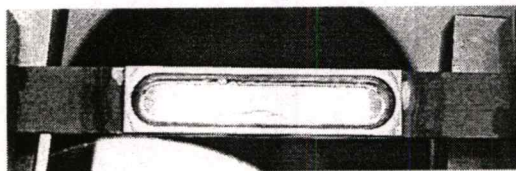
รูปที่ 3.23 เกจเพ็ญนิ่ง



รูปที่ 3.24 ส่วนแสดงค่าความดันของเกจเพ็ญนิ่ง

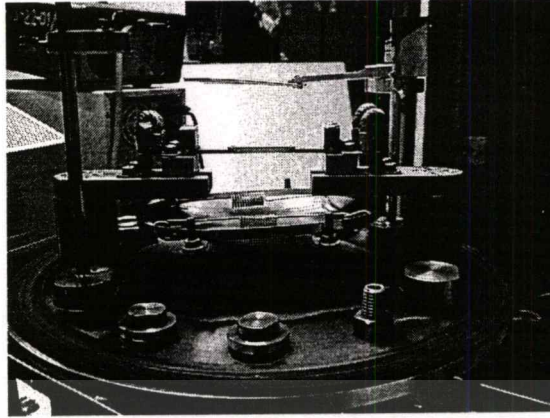
4) เบ้าหลอมสาร

เบ้าหลอมสารที่ใช้ในระบบนี้คือ โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride: BN) มีลักษณะดังรูปที่ 3.25 โดยเบ้าหลอมสารนี้สามารถใช้ในการหลอมเหลวอลูมิเนียม (มีจุดหลอมเหลวประมาณ 660 องศาเซลเซียส) เพื่อให้ระเหยไปสร้างผิวสัมผัสกับซิลิกอนได้เนื่องจากมีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูงถึงอุณหภูมิประมาณ 1850 องศาเซลเซียส ในการใช้งานจะถูกนำมาติดตั้งกับส่วนจับยึดของแท่งทองแดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 เบ้าหลอมสารโบรอนไนไตรด์

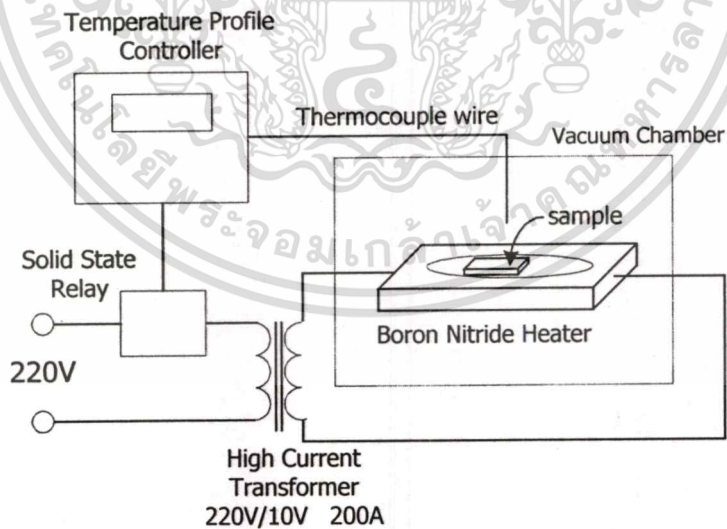
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 การติดตั้งเบ้าหลอมสาร

5) ระบบจ่ายไฟฟ้า

ระบบจ่ายไฟฟ้าทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับเบ้าหลอมสาร โบรอน ไนตรายเพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นความร้อน โดยป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งทองแดงซึ่งทำหน้าที่จับยึดและส่งผ่านกระแสไฟฟ้าเพื่อทำความร้อนให้กับเบ้าหลอมสาร ลักษณะวงจรควบคุมการจ่ายไฟฟ้ามีลักษณะดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ระบบจ่ายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● หลักการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้า

หม้อแปลงที่ใช้งานในวงจรในรูปที่ 3.27 เป็นหม้อแปลงขนาด 10 โวลต์ 200 แอมป์ ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะต่อกับโซลิตสเตทรีเลย์แบบควบคุมเฟส (phase control) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมขนาดของแรงดันไฟสลับ 220 โวลต์ทางด้านปฐมภูมิโดยการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 ถึง 5 โวลต์ทางด้านอินพุทของโซลิตสเตทรีเลย์ การควบคุมความร้อนของเบ้าหลอมสารกระทำได้โดยการปรับแรงดันทางด้านอินพุทของโซลิตสเตทรีเลย์ โดยเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นเบ้าหลอมสารก็จะร้อนขึ้นด้วย

6) ระบบป้อนก๊าซ

ระบบป้อนก๊าซทำหน้าที่ป้อนก๊าซในโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 % ให้กับบริเวณภายในแชมเบอร์สุญญากาศเพื่อลดปริมาณออกซิเจน ความชื้น รวมถึงสิ่งเจือปนต่างๆภายในแชมเบอร์สุญญากาศ ทำให้บริเวณภายในแชมเบอร์สุญญากาศมีความบริสุทธิ์สูงและลดโอกาสการเกิดออกไซด์และสิ่งเจือปนบริเวณผิวสัมผัสขณะทำการระเหยสาร โดยอัตราการไหลของก๊าซในโตรเจนนี้จะควบคุมด้วยโฟลว์มิเตอร์ (flow meter)

7) ระบบหล่อน้ำเย็น

ระบบหล่อน้ำเย็นทำหน้าที่ทำความเย็นให้กับปั๊มไอฟุ้งกระจาย โดยระบบหล่อเย็นที่ใช้งานคือตู้ทำความเย็นของบริษัท EYELA รุ่น CA-1100 สามารถทำความเย็นได้ในย่านอุณหภูมิ -20 ถึง 20 องศาเซลเซียสและมีอัตราการปั๊มน้ำไหลสูงสุด (maximum pump flow rate) 9 ลิตรต่ออนาที

3.3.2 การทดสอบชุดวัดความดันสุญญากาศ

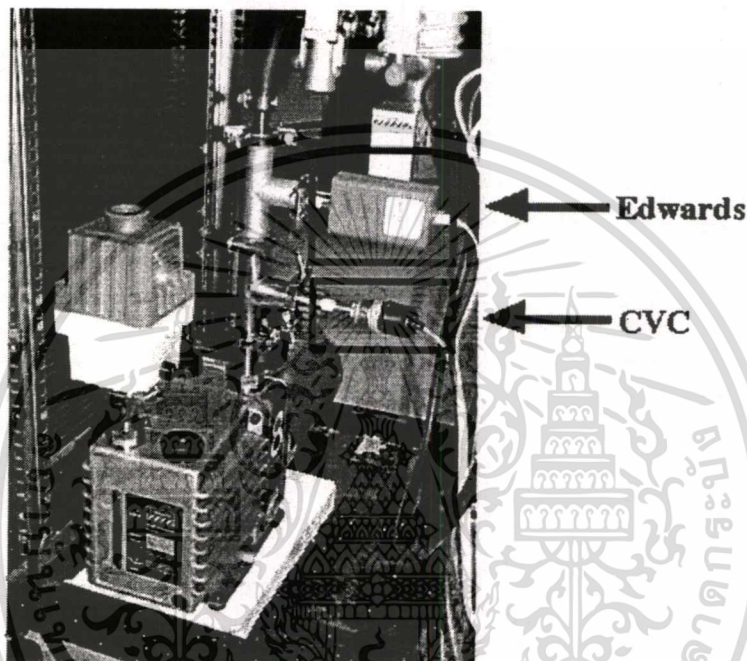
เนื่องจากผู้วิจัยได้พัฒนาระบบนี้โดยนำอุปกรณ์และเครื่องมือจากหลายๆระบบมาประกอบเข้าด้วยกันจึงจำเป็นต้องทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของชุดวัดความดันสุญญากาศ ทั้งนี้เนื่องจากหากค่าความดันที่อ่านได้มีความผิดพลาดจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบโดยรวมและอาจส่งผลให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

ชุดวัดความดันสุญญากาศที่ใช้ในระบบนี้ประกอบด้วยเกจเทอร์โมคัปเปิลของบริษัท CVC และเกจเพนนิ่งของบริษัท Varian มีรายละเอียดแสดงดังหัวข้อ 3.3.1 ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเกจพิรานินและเกจเพนนิ่งของบริษัท Edwards โดยได้ทดลองเพื่อเปรียบเทียบชุดวัดความดันในส่วนต่างๆดังนี้

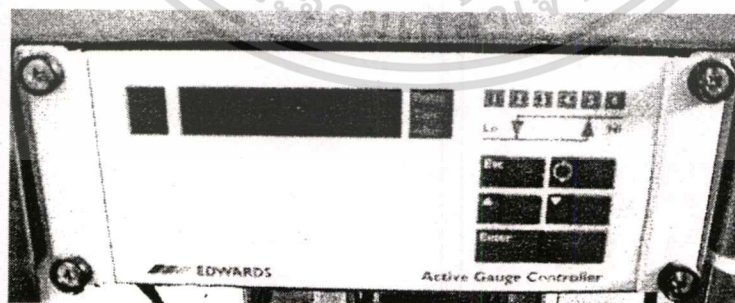
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การปรับเทียบเกจเทอร์โมคัปเปิลของบริษัท CVC กับเกจพิรานีของบริษัท Edwards

ติดตั้งเกจวัดความดันเทอร์โมคัปเปิลของบริษัท CVC กับเกจพิรานีของบริษัท Edwards เข้ากับระบบลักษณะดังรูปที่ 3.28 และทดลองลดความของระบบโดยใช้ปั๊มกลโรตารี สังเกตค่าความดันจากส่วนแสดงผลของระบบซึ่งเป็นของบริษัท Astro แสดงดังรูปที่ 3.10 และส่วนแสดงผลที่นำมาปรับเทียบของบริษัท Edwards แสดงดังรูปที่ 3.29

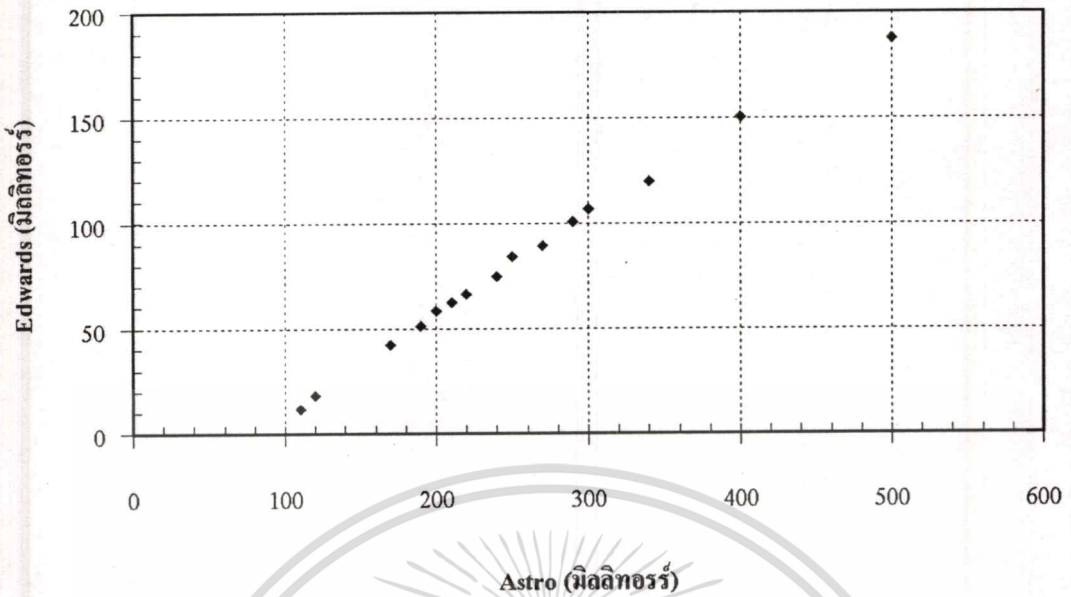


รูปที่ 3.28 การติดตั้งระบบเพื่อปรับเทียบระหว่างเกจพิรานีของบริษัท Edwards และเกจเทอร์โมคัปเปิลของบริษัท CVC



รูปที่ 3.29 ส่วนแสดงผลที่นำมาปรับเทียบของบริษัท Edwards

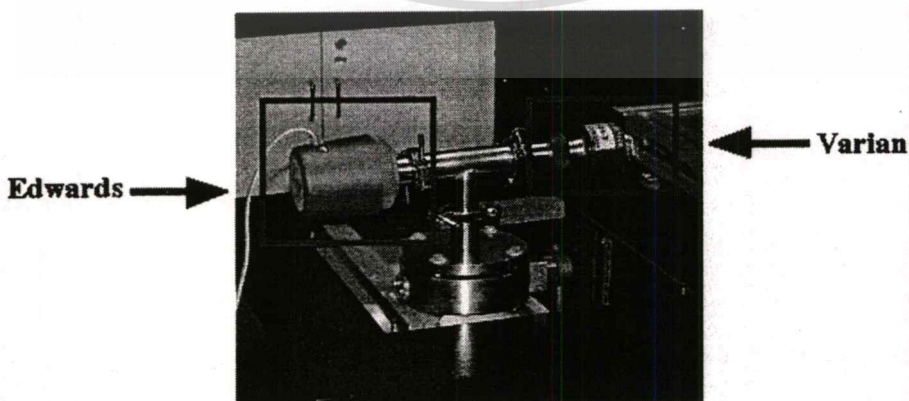
จากการทดลองพบว่าค่าความดันที่อ่านได้จากส่วนแสดงผลของบริษัท Astro และส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards จะมีลักษณะสัมพันธ์กันดังกราฟรูปที่ 3.30 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 ความดันจากส่วนแสดงผลของบริษัท Astro และส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards

จากกราฟจะเห็นว่าค่าความดันที่อ่านได้จากส่วนแสดงผลของบริษัท Astro และส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นดังสมการ $y = 0.4555x - 34.109$ และมีค่า $R^2 = 0.9963$ (R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกถึงความถูกต้องของสมการแสดงความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลที่พลอตในกราฟ ถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการมีความถูกต้องสูง) ซึ่งจากสมการทำให้สามารถคำนวณหาความดันที่อ่านได้จากส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards เมื่อทราบค่าความดันที่แสดงผลของบริษัท Astro

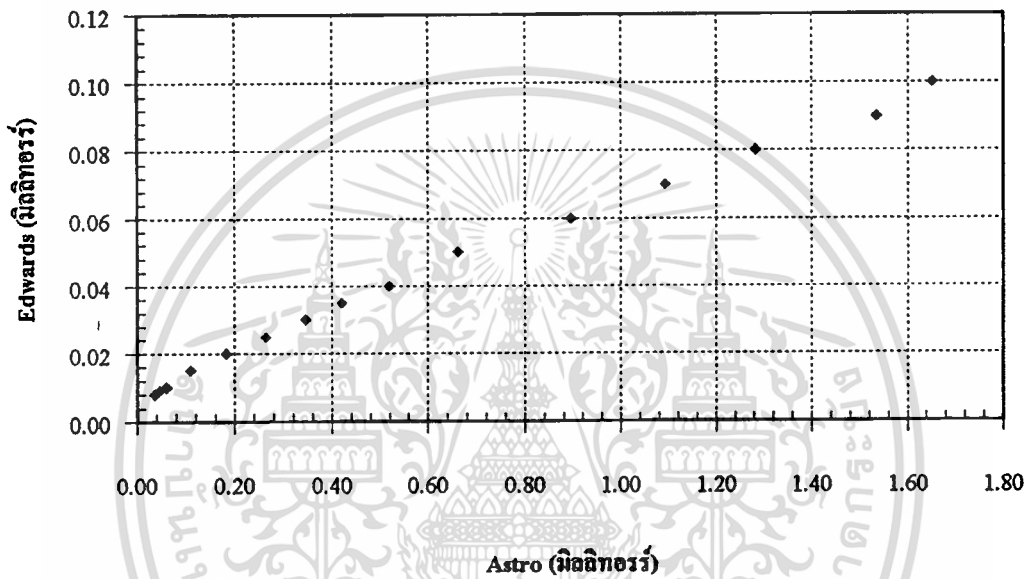
- ทดสอบเกจพื้นนิ่ง



รูปที่ 3.31 การติดตั้งระบบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างเกจพื้นนิ่งของบริษัท Edwards และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัท Varian งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งเกจพื้นนิ่งของบริษัท Varian กับเกจพื้นนิ่งของบริษัท Edwards ดังรูปที่ 3.31 ทดลองลดความดันของระบบโดยใช้ปั๊มกลโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจาย โดยใช้ปั๊มกลโรตารีลดความดันของระบบในช่วงแรกคือจากความดันบรรยากาศจนกระทั่งความดันของระบบอยู่ในย่านต่ำกว่า 10^{-3} ทอร์รี่ สำหรับปั๊มไอฟุ้งกระจายจะใช้ร่วมกับปั๊มกลโรตารีเพื่อลดความดันของระบบในย่านที่ต่ำกว่า 10^{-3} ทอร์รี่ถึงย่านประมาณ 10^{-6} ทอร์รี่ สังเกตค่าความดันจากส่วนแสดงผลของระบบซึ่งเป็นของบริษัท Astro (แสดงดังรูปที่ 3.24) และส่วนแสดงผลที่นำมาเปรียบเทียบของบริษัท Edwards (แสดงดังรูปที่ 3.29)



รูปที่ 3.32 ค่าความดันจากส่วนแสดงผลของบริษัท Astro และส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards

จากการทดลองพบว่าค่าความดันที่อ่านได้จากส่วนแสดงผลของระบบเทียบกับค่าความดันที่อ่านได้จากส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards มีความสัมพันธ์ดังกราฟรูปที่ 3.32 จากกราฟจะเห็นว่าค่าความดันที่อ่านได้จากส่วนแสดงผลของบริษัท Astro และส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นดังสมการ $y = 0.0551x + 0.0093$ และมีค่า $R^2 = 0.9942$ ซึ่งจากสมการทำให้สามารถคำนวณหาค่าความดันที่อ่านได้จากส่วนแสดงผลของบริษัท Edwards เมื่อทราบค่าความดันที่แสดงผลของบริษัท Astro

3.3.3 การทดสอบความหนาของฟิล์มบางโดยการขังมวล

เนื่องจากความหนาของฟิล์มบางมีความสัมพันธ์กับมวลตั้งต้นและค่าความหนาแน่นของสารที่ต้องการระเหย ระยะห่างระหว่างวัสดุที่ต้องการเคลือบฟิล์มบางกับแท่นระเหยสาร และรัศมีของเป้าหมายดังสมการที่ 3.2

$$d = \frac{m}{\rho h^2 \{1 + (r/h)^2\}^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ	d	คือความหนาของสารที่เคลือบอยู่บนชิ้นงาน
	m	คือมวลของสารตั้งต้น
	ρ	คือความหนาแน่นของสารที่ต้องการระเหย
	h	คือระยะห่างระหว่างชิ้นงานและแท่นระเหยสาร
	r	คือรัศมีของเป้าหมาย

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและสิ่งประดิษฐ์ มวลตั้งต้นของอลูมิเนียมและความหนาของฟิล์ม

ระยะห่าง (เซนติเมตร)	มวลตั้งต้นของอลูมิเนียม(กรัม)		
	1 ไมโครเมตร	2 ไมโครเมตร	3 ไมโครเมตร
1	0.0212	0.0424	0.0636
2	0.0136	0.0272	0.0407
3	0.0159	0.0319	0.0478
4	0.0212	0.0424	0.0636
5	0.0285	0.0571	0.0856
6	0.0377	0.0754	0.1131
7	0.0486	0.0973	0.1459
8	0.0613	0.1226	0.1839
9	0.0757	0.1514	0.2271
10	0.0918	0.1836	0.2753

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อศึกษาความหนาของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากการระเหยสาร โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงได้จัดระบบโครงสร้างภายในระเหยสารให้มีระยะห่างระหว่างชั้นงานกับแท่นระเหยสารมีขนาดเท่ากับ 7 เซนติเมตรและรัศมีของเป้าหมายถึงคือ 2 เซนติเมตร ในการทดลองทำการระเหยอลูมิเนียม (ความหนาแน่นเท่ากับ 2700 kg/m^3) เพื่อไปเคลือบแผ่นกระจกสไลด์ให้เกิดเป็นฟิล์มบางหนา 1, 2 และ 3 ไมโครเมตร อาศัยข้อมูลในตารางที่ 3.2 ทำให้ทราบว่าต้องใช้มวลของอลูมิเนียมตั้งต้น 0.0486, 0.0973 และ 0.1459 กรัมตามลำดับ จากการทดลองระเหยสารเพื่อให้ได้ฟิล์มบางขนาด 1 ไมโครเมตรจำนวน 3 ครั้งและคำนวณหาความหนาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.3 พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ย 1.0316 ไมโครเมตร คำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (standard deviation of mean value) โดยอาศัยสมการที่ 3.4 พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.029 และ 0.021 ตามลำดับ ดังนั้นการเตรียมฟิล์มบางของอลูมิเนียมเพื่อให้ได้ความหนา 1 ไมโครเมตรโดยอาศัยเทคนิคการชั่งมวลจะได้ฟิล์มบางที่มีความหนาเท่ากับ 1 ± 0.021 ไมโครเมตรที่ความเชื่อมั่น 68 %

$$d = \frac{m_2 - m_1}{\pi r^2 \rho} = \frac{\Delta m}{\pi r^2 \rho} \quad (3.3)$$

เมื่อ	r	คือรัศมีของฟิล์มที่เคลือบบนกระจก
	d	คือความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม
	m_1	คือมวลของกระจกสไลด์ก่อนถูกเคลือบด้วยอลูมิเนียม
	m_2	คือมวลของกระจกสไลด์หลังจากถูกเคลือบด้วยอลูมิเนียม
	Δm	คือผลต่างมวลของกระจกสไลด์ก่อนและหลังจากถูกเคลือบด้วยอลูมิเนียม
	ρ	คือความหนาแน่นของสารที่ต้องการระเหย

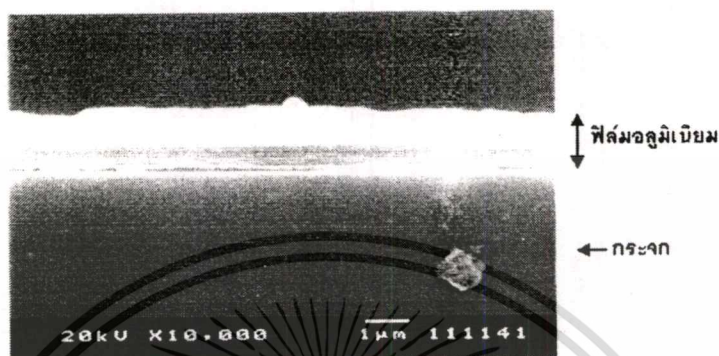
$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad \text{และ} \quad s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{N-1}} \quad (3.4)$$

เมื่อ	s	คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	$s_{\bar{x}}$	คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย
	x_i	คือข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ i
	\bar{x}	คือค่าเฉลี่ยของผลข้อมูล
	N	คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

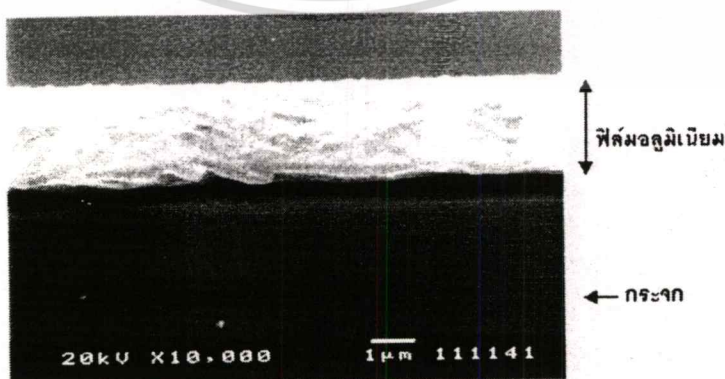
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามการวัดความหนาโดยการชั่งมวลไม่สามารถบอกถึงความสม่ำเสมอของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ผู้วิจัยจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปตรวจสอบความสม่ำเสมอของฟิล์มอีกครั้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) พบว่าได้ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 ผลการตรวจวัดด้วย SEM ที่ความหนา 1 ไมครอน

ทดลองระเหยสารเพื่อเตรียมฟิล์มบางขนาด 2 ไมโครเมตรจำนวน 3 ครั้งและคำนวณหาความหนาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.3 พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ย 1.8175 ไมโครเมตร คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยโดยอาศัยสมการที่ 3.4 พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.133 และ 0.094 ตามลำดับ ดังนั้นการเตรียมฟิล์มบางของอลูมิเนียมเพื่อให้ได้ความหนา 2 ไมโครเมตรโดยอาศัยเทคนิคการชั่งมวลจะได้ฟิล์มบางที่มีความหนาเท่ากับ 2 ± 0.094 ไมโครเมตรที่ความเชื่อมั่น 68 % ตรวจสอบความสม่ำเสมอของฟิล์มอีกครั้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดพบว่าได้ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 ผลการตรวจวัดด้วย SEM ที่ความหนา 2 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองระเหยสารเพื่อเตรียมฟิล์มบางขนาด 3 ไมโครเมตรจำนวน 3 ครั้งและคำนวณหาความหนาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.3 พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาเฉลี่ย 3.0750 ไมโครเมตร คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยโดยอาศัยสมการที่ 3.4 พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.376 และ 0.266 ตามลำดับ ดังนั้นการเตรียมฟิล์มบางของอลูมิเนียมเพื่อให้ได้ความหนา 3 ไมโครเมตรโดยอาศัยเทคนิคการชั่งมวลจะได้ฟิล์มบางที่มีความหนาเท่ากับ 3 ± 0.266 ไมโครเมตรที่ความเชื่อมั่น 68 % ตรวจสอบความสม่ำเสมอของฟิล์มอีกครั้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเล็กราคพบว่าได้ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ผลการตรวจวัดด้วย SEM ที่ความหนา 3 ไมครอน

จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมฟิล์มบางของอลูมิเนียมโดยอาศัยเทคนิคการชั่งมวล โดยใช้ระบบระเหยสารที่พัฒนาขึ้นสามารถเตรียมฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอของเนื้อฟิล์มพอสมควรและค่าความหนาของฟิล์มที่ได้จากการคำนวณนั้นให้ผลใกล้เคียงกับค่าความหนาของฟิล์มบางที่เกิดขึ้นจริง

3.4 การพัฒนาระบบแอนนีส

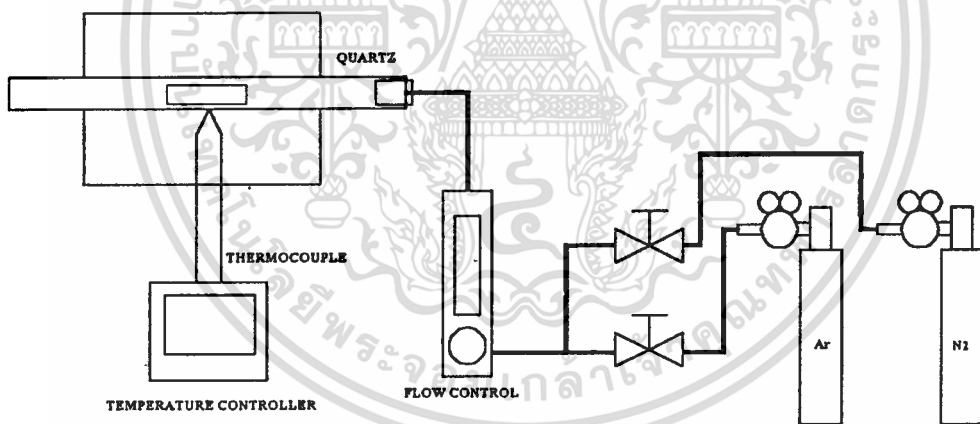
ระบบนี้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับแอนนีสผิวสัมผัสที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้คือผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพี โดยการแอนนีสคือการให้ความร้อนกับบริเวณผิวสัมผัสทำให้ฟิล์มบางของอลูมิเนียมติดทนบนเวเฟอร์ซิลิกอน ไม่หลุดลอกง่ายและทำให้ผิวสัมผัสสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 รายละเอียดของระบบแอนนีส

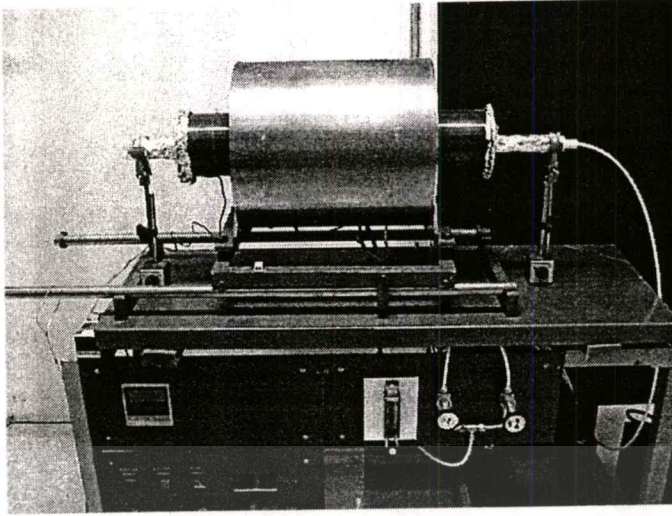
ระบบแอนนีสที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ถูกพัฒนาขึ้นจากระบบเตาเผาที่มีอยู่เดิม โดยผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมเป็นระบบแอนนีสโดยการติดตั้งระบบสำหรับจ่ายก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999 % และก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 % เพิ่มเติมให้กับระบบ ทั้งนี้เพื่อควบคุมเงื่อนไขของการแอนนีสให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย โดยในเบื้องต้นจะทำการจ่ายก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 % ให้กับระบบทั้งนี้เพื่อควบคุมให้บรรยากาศภายในระบบอยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อยในระดับหนึ่งก่อน และขณะที่จะเริ่มทำการแอนนีสจึงทำให้ระบบอยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999 % สำหรับเหตุผลที่ไม่ทำการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเนื่องจากก๊าซไนโตรเจนจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกอนเมื่ออุณหภูมิสูงและเกิดเป็นซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสที่เตรียม ได้มีสภาพนำไฟฟ้าลดลง และการที่ไม่จ่ายก๊าซอาร์กอนให้กับระบบตั้งแต่เริ่มต้นนั้นเนื่องจากจะใช้ปริมาณก๊าซค่อนข้างมากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์นี้มีราคาค่อนข้างแพง

โครงสร้างของระบบแอนนีสที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมีลักษณะไดอะแกรมดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 โครงสร้างของระบบแอนนีส

ระบบแอนนีสที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.37

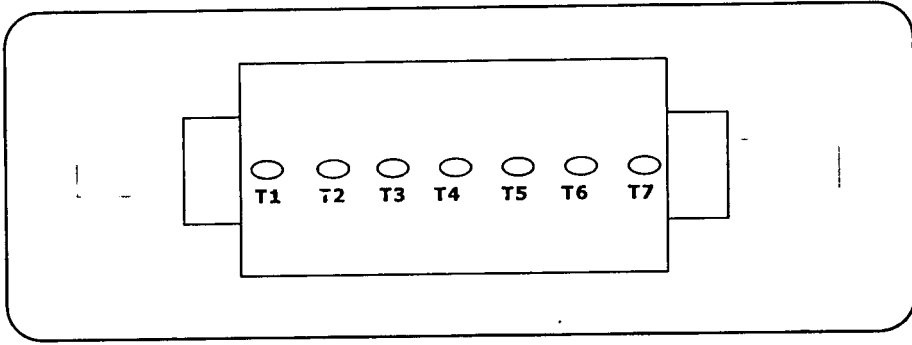


รูปที่ 3.37 ระบบแอนนีสล

จากรูปจะสังเกตเห็นว่าบริเวณปลายของท่อแก้วควอทซ์และปากเตาทั้งสองด้านจะถูกห่อหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟลอยด์ ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดเกรเดียนท์ (gradient) ของอุณหภูมิของท่อแก้วควอทซ์ เพราะหากท่อแก้วมีเกรเดียนท์ของอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดความเครียด (strain) ขึ้นกับท่อแก้วควอทซ์ทำให้ท่อแก้วร้าวหรือแตกได้ และเนื่องจากตัวตรวจวัดอุณหภูมิคือเทอร์โมคัปเปิ้ลซึ่งต่อกับส่วนควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) นั้นถูกติดตั้งอยู่บริเวณใจกลางเตา ดังนั้นจึงต้องควบคุมไม่ให้เกิดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณภายในเตาซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่วัดได้ของเทอร์โมคัปเปิ้ลตลอดเวลาและส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสลผิดพลาด เกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องควบคุมการเกิดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณภายในเตาได้โดยการหุ้มอลูมิเนียมฟลอยด์บริเวณปากเตาทั้งสองดังรูป

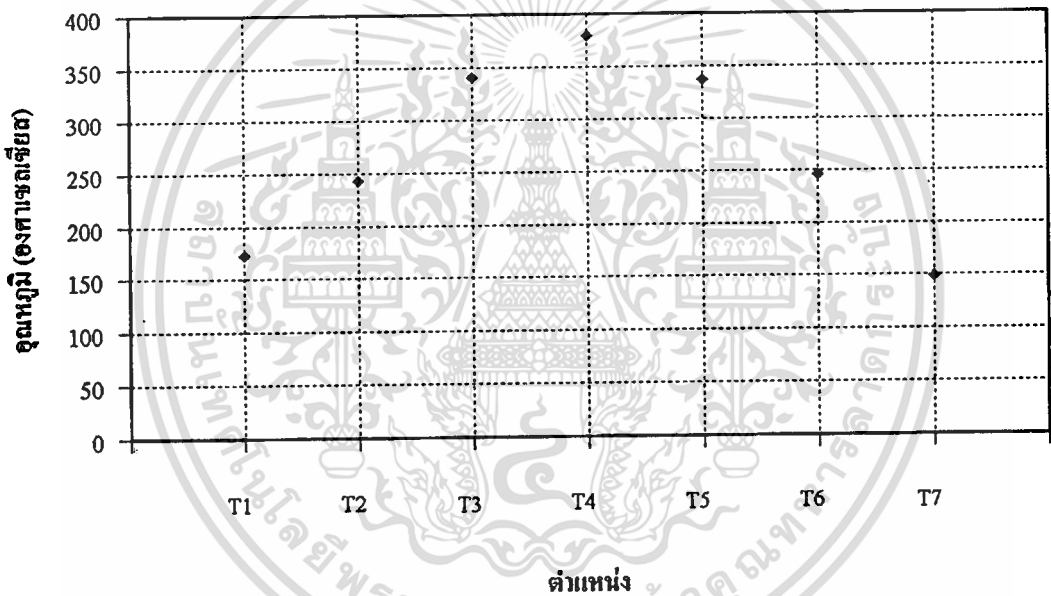
3.4.2 การทดสอบระบบแอนนีสล

เพื่อทดสอบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาว่ามีการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นอย่างไรเพื่อที่จะได้ไหลลสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อทำการแอนนีสลผิดพลาดได้อย่างเหมาะสม จึงได้ทดสอบระบบแอนนีสลโดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ตำแหน่งต่างๆของท่อแก้วควอทซ์ และนำไปติดตั้งกับเตาแอนนีสลลักษณะดังรูปที่ 3.38 โดยระยะห่างของเทอร์โมคัปเปิ้ลในแต่ละตำแหน่งนั้นมีค่าระยะห่างเท่ากับ 6 เซนติเมตร จากนั้นทดลองจ่ายความร้อนให้กับระบบเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ถูกติดตั้งไว้กับท่อแก้ว ณ ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 3.38 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ณ ตำแหน่งต่างๆ

จากการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเมื่อทดลองให้ความร้อนกับเตาที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งพบว่า มีลักษณะแสดงดังกราฟรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา

จากกราฟจะเห็นว่าอุณหภูมิจะมีค่าสูงที่สุด ณ บริเวณใจกลางเตาคือตำแหน่ง T4 และจะมีค่าลดลงลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ โดยตำแหน่ง T3 และ T5 จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับบริเวณใจกลางเตาคือตำแหน่ง T4 โดยประมาณคือ 40 องศาเซลเซียส สำหรับตำแหน่ง T2 และ T6 จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับบริเวณใจกลางเตาคือตำแหน่ง T4 โดยประมาณคือ 140 องศาเซลเซียส และตำแหน่ง T1 และ T7 จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับบริเวณใจกลางเตาคือตำแหน่ง T4 โดยประมาณคือ 210 และ 230 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิในตำแหน่ง T1 และ T7 นี้ อาจมีสาเหตุเนื่องจากความไม่สมมาตรของตำแหน่งในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลให้กับท่อแก้วควอทซ์

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน โดยส่วนแรกเกี่ยวข้องกับการทดสอบและศึกษา ลักษณะสมบัติของระบบวัดความสูงกำลังไฟฟ้าที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นว่ามีประสิทธิภาพ การทำงานระดับใด ส่วนที่สองคือการจัดเตรียมวัสดุสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนเพื่อใช้เป็น ตัวอย่างในการทดสอบความสามารถในการวัดหาขนาดความสูงของกำลังไฟฟ้าของระบบที่ พัฒนาขึ้น และส่วนที่สามคือการศึกษาขนาดความสูงของกำลังไฟฟ้าที่เกิดบริเวณผิวสัมผัส ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดที่ภายใต้เงื่อนไขการแอนนีลที่แตกต่างกัน

4.1 การทดสอบและศึกษาลักษณะสมบัติของระบบวัดความสูงกำลังไฟฟ้าที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดสอบและศึกษาลักษณะสมบัติของระบบวัดความสูงกำลังไฟฟ้าที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น โดยได้ศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆที่สำคัญคือ ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ) การควบคุมการจ่ายและวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของเครื่องมือ รวมถึงการ เก็บบันทึกและแสดงผลการทดลองที่วัดได้โดยอาศัยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง นอกจากนี้ยังได้ ศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อข้อมูลที่ทำกรวัด ได้แก่ ขนาดแรงกดของโพรบและผลของแรง กดที่มีต่อบริเวณผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ผลของความร้อนเนื่องจากการจ่ายกระแส ให้กับบริเวณผิวสัมผัสเป็นระยะเวลาาน ความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จากการไบอัสกระแส สลับทิศทาง

4.1.1 ซีดจำกัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบ

เนื่องจากเทคนิคการวัดหาขนาดความสูงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้กระทำ โดยการไบอัสกระแสคงที่ค่าต่างๆในลักษณะสลับขั้วให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ขณะเดียวกัน ได้ทำการลดอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและวัดขนาดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.4 ดังนั้นจึงต้องทดสอบหาขีด จำกัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ของระบบที่พัฒนาขึ้นว่า

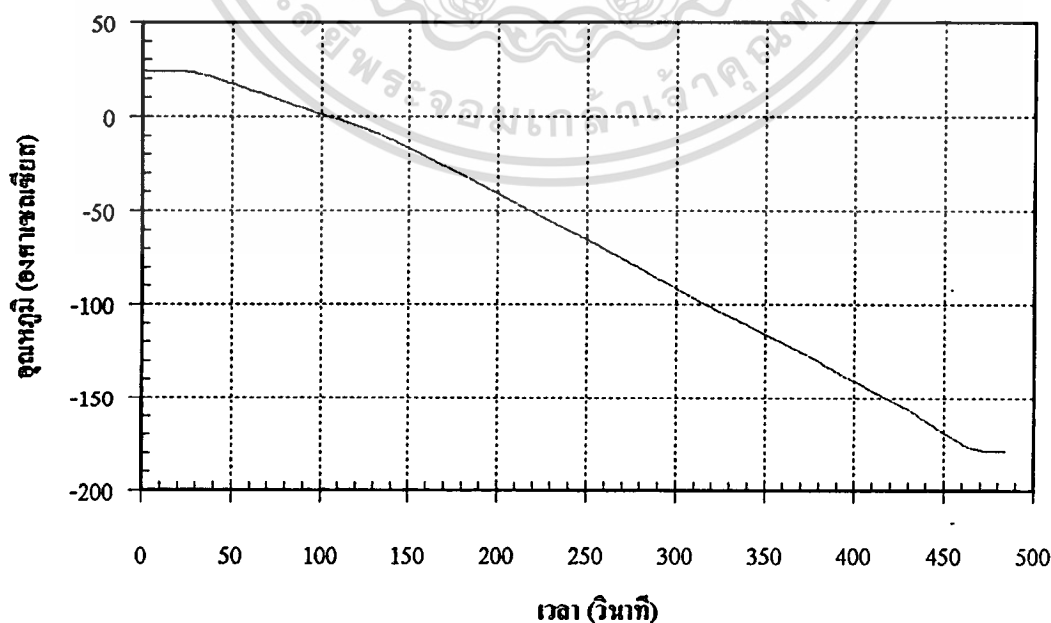
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ในย่านใด โดยได้ทำการทดสอบระบบตามขั้นตอนต่างๆดังนี้

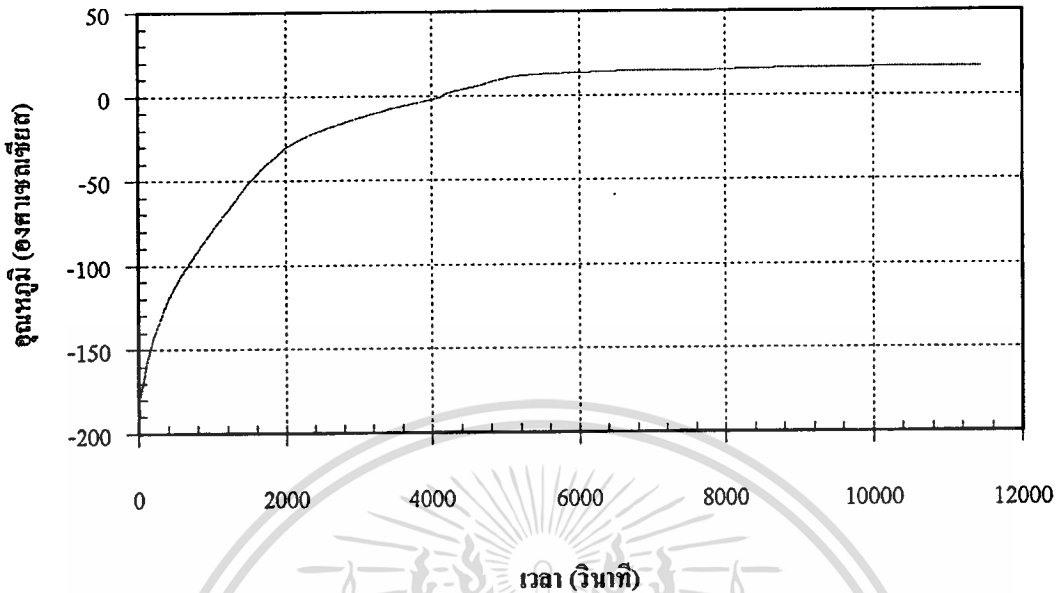
1. จัดระบบบดรูปที่ 3.13 (ดูรูปในบทที่ 3 ประกอบ)
2. เปิดปั๊มกลโรตารีของบริษัท Balzers-Pfeiffer เพื่อลดความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศให้อยู่ในย่านประมาณ 5×10^{-3} ทอรร
3. เปิดปั๊มกลโรตารีของบริษัท Jovac เพื่อเตรียมปั๊มไนโตรเจนเหลวให้ไหลผ่านท่อทองแดงมาเก็บไว้บริเวณภายในแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซึ่งถูกออกแบบให้มีลักษณะกลวง
4. ค่อยๆเติมไนโตรเจนเหลวให้ระบบและสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

จากการเติมไนโตรเจนเหลวให้กับระบบปริมาณ 1 ลิตร และสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกลางของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเทียบกับเวลาพบว่าแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 27 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้องขณะทำการทดลอง) ถึงอุณหภูมิต่ำกว่า -180 องศาเซลเซียสโดยอาศัยเวลาประมาณ 8 นาที ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.1 และจะใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงขาขึ้น (เปลี่ยนแปลงจาก -180 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิห้องคือประมาณ 27 องศาเซลเซียส) ภายในเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกลางของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงขาขึ้นของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

4.1.2 ประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1.2) ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของเครื่องมือต่างๆ รวมถึงความสามารถในการอ่านและเก็บบันทึกผลข้อมูล จึงได้เชื่อมต่อแหล่งจ่ายกระแสคงที่แบบโปรแกรมค่าได้และดิจิตอลมัลติมิเตอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์ดังรูป 3.14 และทดลองสั่งงานโปรแกรม

จากการทดลองและสังเกตการทำงานรวมของระบบพบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกระแสคงที่แบบโปรแกรมค่าได้ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบเป็นจังหวะและสามารถควบคุมการวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รวมถึงสามารถเก็บบันทึกผลข้อมูลในคอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่อง มีอัตราการเก็บข้อมูล (sampling rate) จำนวน 38 จุดต่อวินาที ข้อมูลที่วัดได้จะถูกแสดงใน 2 ลักษณะด้วยกัน ลักษณะแรกเป็นการแสดงค่าของข้อมูลที่วัดได้จริงที่ถูกเก็บบันทึกผ่านโปรแกรม Excel มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.3 สำหรับลักษณะที่สองแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเมื่อไบอัสกระแสคงที่ค่าต่างๆ ในลักษณะสลับขั้ว มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.4

Microsoft Excel - Bh3 e1

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

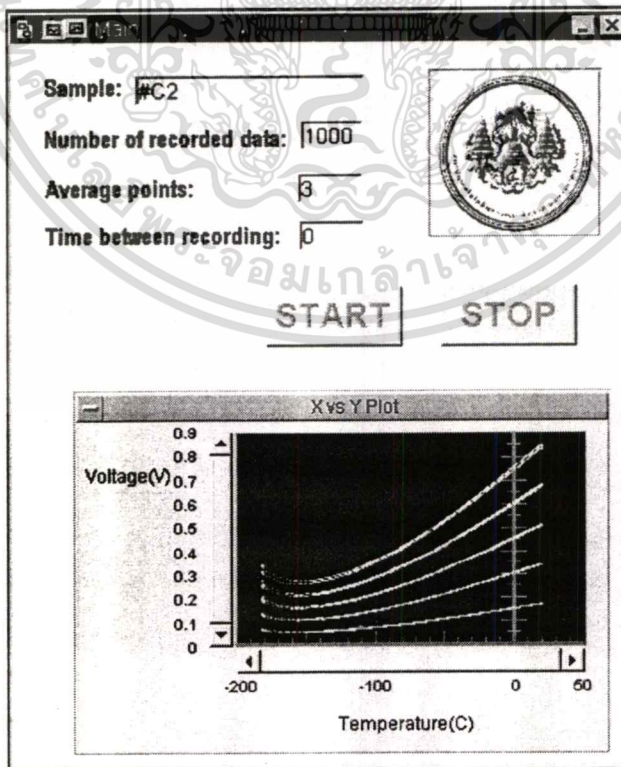
Cordia New 14

A2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	2 Channels scan: Temperature, Voltage												
2													
3	I = 1E-2 A				I = 1E-3 A				I = 1E-4 A				
4	V1	T1	V2	T2	V1	T1	V2	T2	V1	T1	V2	T2	
5	6.1337	25.84000	-6.1311	25.84	0.6141	25.84	-0.6146	25.83	0.0614	25.83	-0.0614	25.82	
6	6.1381	25.80000	-6.1336	25.79	0.6143	25.78	-0.6148	25.78	0.0614	25.77	-0.0614	25.77	
7	6.1386	25.74000	-6.1342	25.73	0.6143	25.73	-0.6148	25.72	0.0614	25.72	-0.0614	25.71	
8	6.1364	25.68000	-6.1310	25.66	0.6138	25.64	-0.6141	25.6	0.0613	25.55	-0.0612	25.49	
9	6.0945	24.98000	-6.0849	24.84	0.6087	24.68	-0.6085	24.54	0.0608	24.36	-0.0606	24.19	
10	6.0128	23.21000	-6.0021	22.99	0.6003	22.75	-0.5999	22.55	0.0599	22.31	-0.0596	22.08	
11	5.8977	20.53000	-5.8876	20.27	0.5889	20	-0.5883	19.76	0.0588	19.47	-0.0584	19.22	
12	5.7862	17.89000	-5.7769	17.61	0.5779	17.33	-0.5772	17.08	0.0577	16.79	-0.0572	16.52	
13	5.6626	15.18000	-5.6608	14.9	0.5665	14.63	-0.5656	14.39	0.0566	14.1	-0.0560	13.83	
14	5.5252	12.10000	-5.5180	11.81	0.5523	11.5	-0.5510	11.24	0.0553	10.94	-0.0544	10.67	
15	5.3843	9.10000	-5.3797	8.89	0.5384	8.57	-0.5380	8.30	0.0538	8.05	-0.0530	7.66	

Ready

รูปที่ 4.3 ลักษณะผลการวัดที่แสดงผ่านหน้าจอโปรแกรม Excel



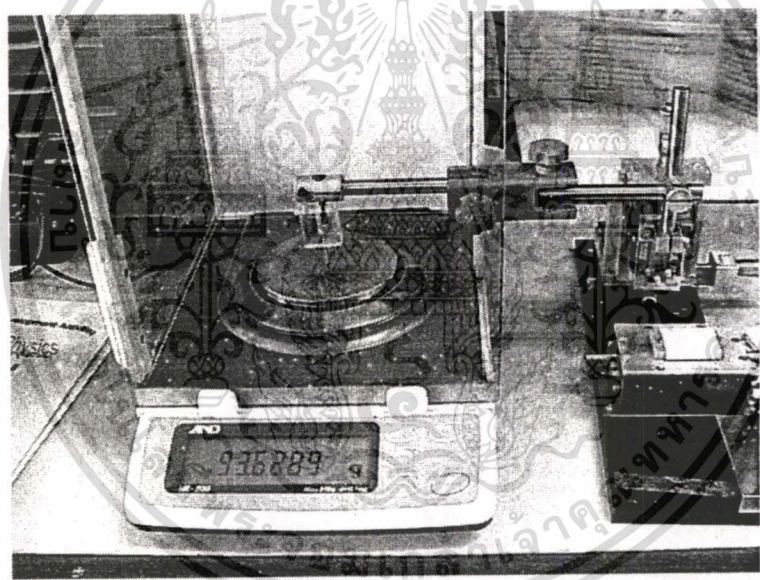
รูปที่ 4.4 ลักษณะผลการวัดที่แสดงผ่านหน้าจอที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การทดสอบหาขนาดแรงกดของโพรบ

ในการวัดหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าจะใช้โพรบซึ่งทำจากวัสดุที่เป็นโลหะกดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอน ทั้งนี้เพื่อจ่ายและวัดสัญญาณทางไฟฟ้าตกรวมถึงประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำผ่านทางโพรบซึ่งเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแส โพรแกรมค่าได้และมัลติมิเตอร์ โพรแกรมได้โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 3.4 (ข) ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.1.1 เนื่องจากส่วนของโพรบที่นำมาใช้ในระบบนี้มีลักษณะเป็นสปริงสามารถหดและยืดตัวได้ขึ้นกับการปรับไมโครมิเตอร์ ผู้วิจัยจึงได้ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะในการกดโพรบและแรงกดของโพรบที่กระทำกับบริเวณผิวสัมผัส ทั้งนี้เพื่อจะใช้สำหรับศึกษาหาผลของแรงกดโพรบที่มีต่อค่าสัญญาณที่วัดได้ดังจะได้อีกกล่าวในหัวข้อต่อไป

การทดลองกระทำได้โดยการจัดระบบลักษณะดังรูปที่ 4.5

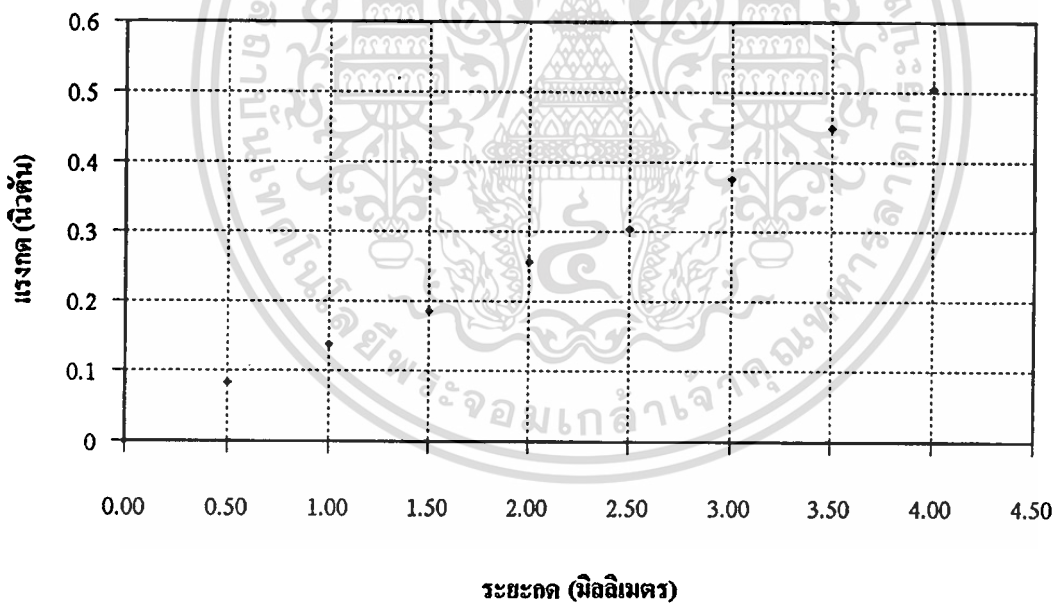


รูปที่ 4.5 การจัดระบบเพื่อศึกษาหาขนาดของแรงกดที่สัมพันธ์กับระยะในการกดโพรบ

จากการทดลองปรับไมโครมิเตอร์ให้กดโพรบที่ระยะต่างๆและสังเกตค่าของมวลที่แสดงบนตราชั่งน้ำหนักโดยทดลองซ้ำ 5 ครั้งได้ผลดังตารางที่ 4.1 และเมื่อนำข้อมูลไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (ผลคูณระหว่างค่าของมวลและค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง) และระยะในการกดโพรบพบว่ากราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 ระยะในการกดโพรบและมวลที่อ่านได้จากตราชั่งน้ำหนัก

ระยะ (มิลลิเมตร)	มวล (กรัม)					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
0	0	0	0	0	0	0
0.5	6.7	9.6	6.8	10.9	8.3	8.5
1.0	12.3	15.3	12.4	16.1	14.4	14.0
1.5	15.8	20	17.8	22.3	21.2	19.0
2.0	24.1	27.1	25.8	27.9	28.2	26.2
2.5	28.0	32.1	29.4	34.6	34.7	31.0
3.0	33.3	40.9	37.6	41.8	41.1	38.4
3.5	42.3	47.5	45.8	47.7	46.2	45.8
4.0	45.8	53.1	53.1	54.0	50.6	51.5



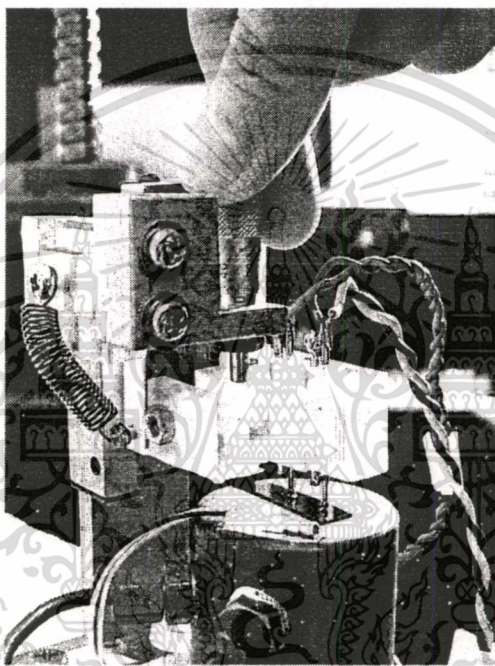
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะในการกดโพรบ

กราฟรูปที่ 4.6 มีความสัมพันธ์ของข้อมูลในลักษณะเชิงเส้นแสดงดังสมการ $y = 1.265x$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9967 จากสมการทำให้ทราบถึงค่าคงที่ของสปริง (k) มีค่าเท่ากับ 126.5 นิวตัน/เมตร ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาค่าแรงกดของโพรบ (F) ที่กระทำต่อชิ้นงานได้เมื่อทราบระยะกด (x) จากความสัมพันธ์ $F = -kx$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การศึกษาผลของการกดโพรบบนผิวสัมผัสด้วยแรงค่าต่างๆที่มีต่อสัญญาณไฟฟ้า

เพื่อศึกษาผลของการกดโพรบบนผิวสัมผัสด้วยแรงค่าต่างๆที่มีต่อสัญญาณไฟฟ้าที่ทำการวัดจึงทดลองปรับไมโครมิเตอร์เพื่อให้โพรบค่อยๆเลื่อนลงมาสัมผัสกับบริเวณผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำด้วยแรงขนาดต่างๆคือ 0.43 นิวตัน 0.44 นิวตันและ 0.45 นิวตัน (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ) จากนั้นทดลองถ่ายภาพกระแสและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์เพื่อนำข้อมูลที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ต่อไป



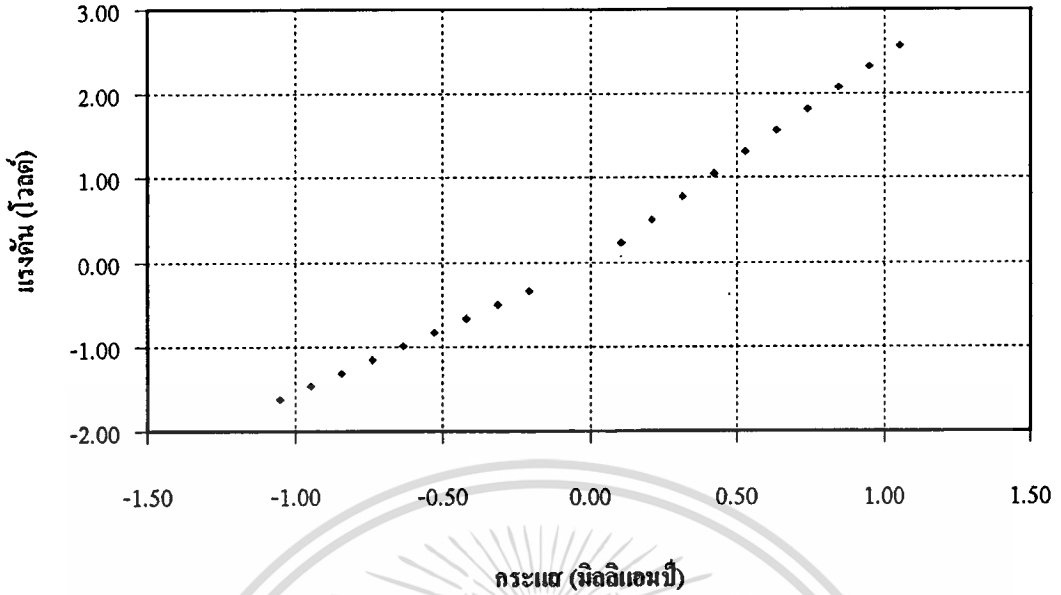
รูปที่ 4.7 การปรับไมโครมิเตอร์เพื่อให้โพรบสัมผัสกับผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

จากการทดลองถ่ายภาพกระแสไฟฟ้าและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์โดยการปรับโพรบให้สัมผัสกับบริเวณผิวสัมผัสด้วยแรงค่าต่างๆคือ 0.43 นิวตัน 0.44 นิวตันและ 0.45 นิวตัน ได้ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.2 และเมื่อนำข้อมูลในตารางไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะได้กราฟลักษณะดังรูปที่ 4.8-4.10 ตามลำดับ จากการพิจารณากราฟทั้งสามจะเห็นว่ามีความแตกต่างของค่าสัญญาณที่วัดได้น้อยมากดังกราฟรูปที่ 4.11

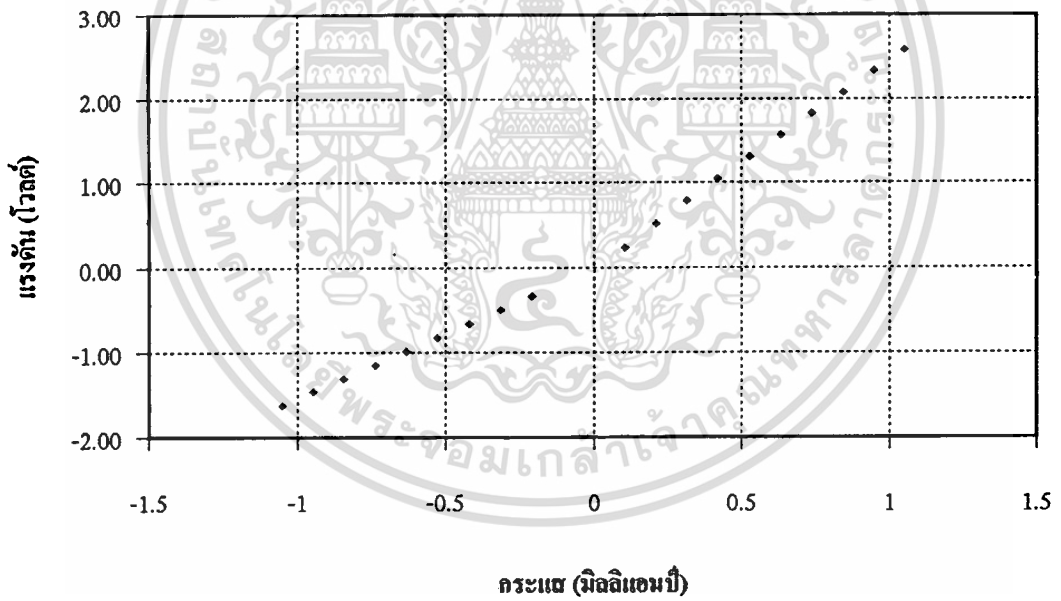
ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเมื่อปรับโพรบให้สัมผัสกับบริเวณผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์ด้วยแรงขนาดต่างๆ

กระแส (มิลลิแอมป์)	แรงดัน (โวลต์)			
	แรงกด 0.43 นิวตัน	แรงกด 0.44 นิวตัน	แรงกด 0.45 นิวตัน	แรงกดเฉลี่ย
-1.054	-1.621	-1.622	-1.630	-1.624
-0.948	-1.464	-1.466	-1.472	-1.467
-0.842	-1.305	-1.308	-1.312	-1.308
-0.737	-1.147	-1.149	-1.153	-1.150
-0.632	-0.988	-0.990	-0.993	-0.990
-0.526	-0.828	-0.829	-0.832	-0.830
-0.421	-0.666	-0.667	-0.670	-0.668
-0.316	-0.503	-0.504	-0.506	-0.505
-0.211	-0.340	-0.341	-0.342	-0.341
-0.211	-0.340	-0.341	-0.342	-0.341
-0.211	-0.340	-0.341	-0.342	-0.341
0.105	0.239	0.239	0.240	0.240
0.211	0.513	0.514	0.516	0.514
0.316	0.783	0.785	0.788	0.785
0.421	1.047	1.050	1.053	1.050
0.527	1.308	1.312	1.315	1.312
0.632	1.565	1.570	1.575	1.570
0.738	1.820	1.826	1.830	1.825
0.843	2.073	2.080	2.084	2.079
0.948	2.326	2.332	2.338	2.332
1.054	2.575	2.583	2.589	2.582

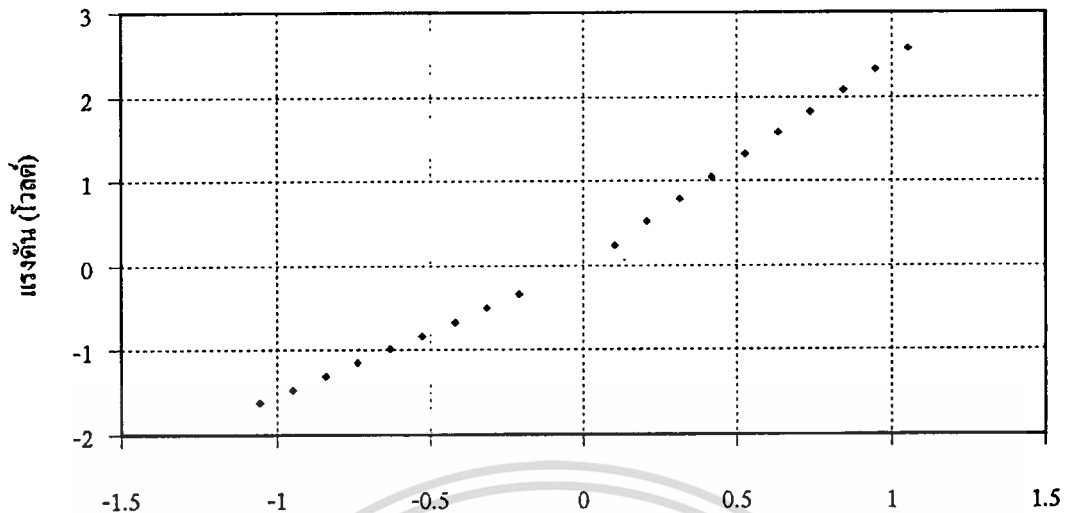
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



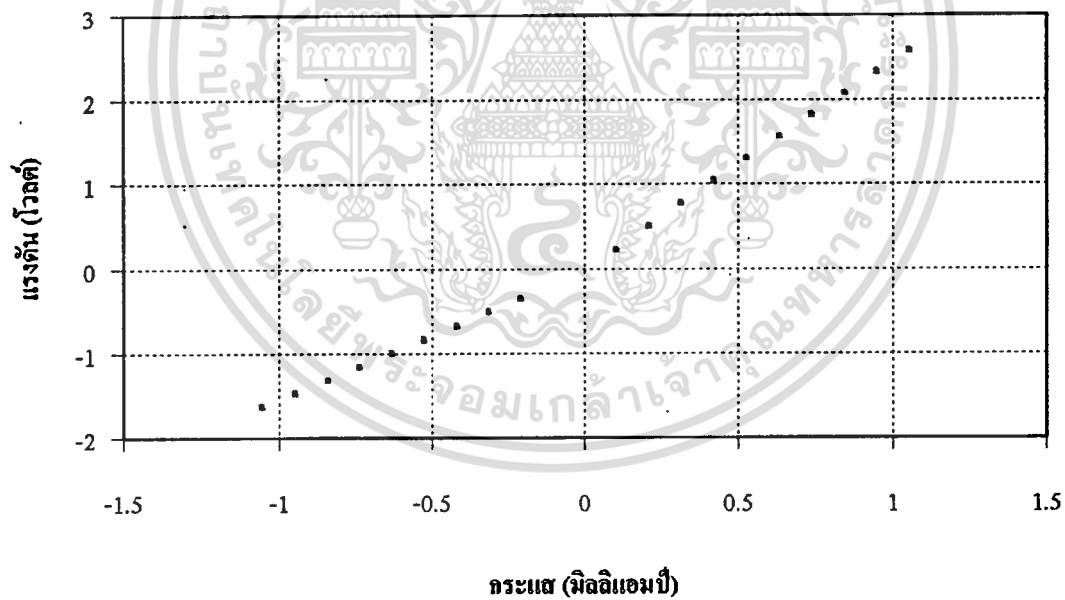
รูปที่ 4.8 กด โพรบด้วยแรงขนาด 0.43 นิวตัน



รูปที่ 4.9 กด โพรบด้วยแรงขนาด 0.44 นิวตัน



รูปที่ 4.10 กด โพรบด้วยแรงขนาด 0.45 นิวตัน



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณเมื่อกด โพรบด้วยแรงค่าต่างๆ

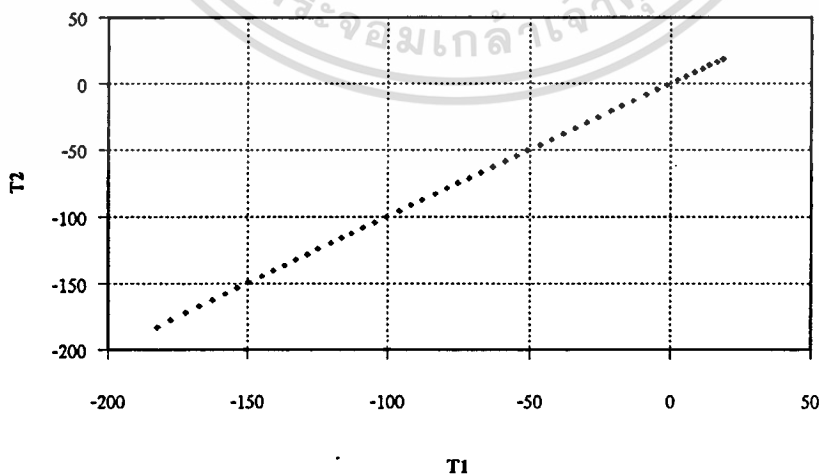
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จากการไบอัสกระแสสลับทิศทาง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเทคนิคการวัดหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าจะกระทำโดยการสลับขั้วการจ่ายกระแสและวัดอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ทั้ง 2 ทิศทาง แต่เนื่องจากระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นนั้นไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำให้คงที่ขณะที่ทำการสลับขั้วกระแสและวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้า กล่าวคืออุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาซึ่งจะส่งผลให้ขนาดของอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่วัดได้เมื่อไบอัสกระแสคงที่ค่าหนึ่งมีค่าไม่เท่ากับขนาดของอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าเมื่อไบอัสกระแสคงที่ค่าเดิมแต่สลับทิศทาง ดังนั้นการทดลองนี้จึงจะศึกษาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่วัดได้ทั้งก่อนและหลังสลับขั้วกระแส

การทดลองกระทำโดยการจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์ขนาด 1 มิลลิแอมป์ขณะที่ทำการลดอุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์จากอุณหภูมิห้องให้ต่ำลงถึงอุณหภูมิตั้งที่ประมาณ -180 องศาเซลเซียส และทำการวัดอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทั้งก่อนและหลังสลับขั้วกระแสอย่างต่อเนื่อง

จากการวัดอุณหภูมิตั้งที่แท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทั้งก่อนและหลังสลับขั้วการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเมื่ออุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงลดลง (เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิตั้งที่ประมาณ -180 องศาเซลเซียส) และเมื่ออุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น (เปลี่ยนแปลงจาก -180 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิห้อง) พบว่าได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

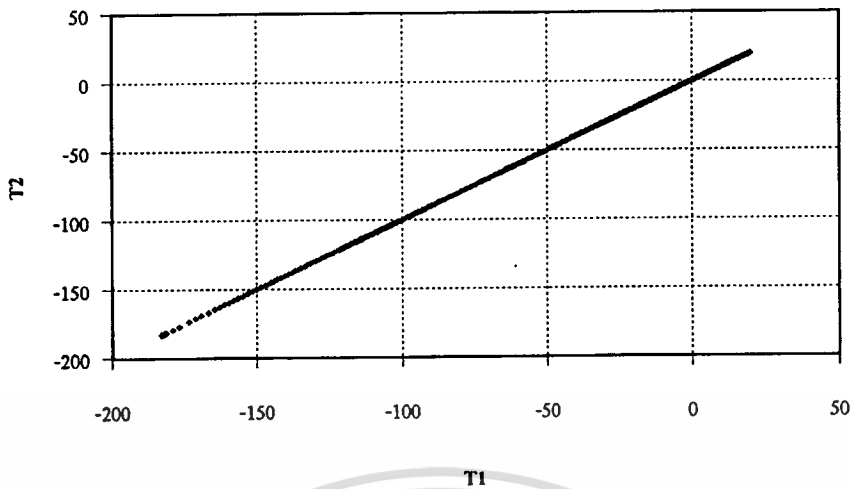


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก่อน (T1) และหลัง (T2) สลับขั้วกระแสในกรณีที่แท่นวาง

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก่อน (T1) และหลัง (T2) สลับขั้วกระแสในกรณีที่แทนวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จากการพิจารณากราฟในรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้ทั้งก่อนและหลังสลับขั้วมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยมีสมการแสดงความสัมพันธ์คือ $y = 0.997x$ และ $y = 1.0006x$ ตามลำดับและมีค่า R^2 เท่ากับ 1 ทั้งสองสมการ และจากการสังเกตจะเห็นว่าข้อมูลที่วัดได้ในช่วงที่แทนวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลงจะมีความละเอียดน้อยกว่าข้อมูลที่วัดได้ในช่วงที่แทนวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแทนวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในช่วงกลางจะใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเร็วมากคือประมาณ 8 นาที ขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแทนวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในช่วงขาขึ้นจะใช้เวลานานคือประมาณ 3 ชั่วโมง ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1

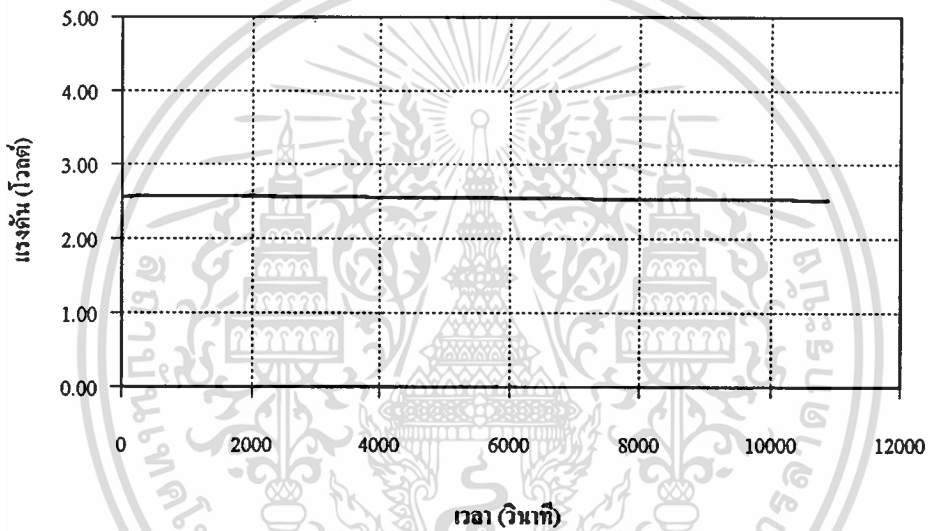
4.1.6 ผลของความร้อนเนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

เนื่องจากการวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสของสิ่งประดิษฐ์โดยอาศัยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ จะมีการจ่ายกระแสคงที่ค่าต่างๆแบบเป็นจังหวะให้กับสิ่งประดิษฐ์และวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าดังได้กล่าวมาแล้ว โดยการเก็บบันทึกผลนั้นจะกระทำอย่างต่อเนื่อง เริ่มต้นตั้งแต่แทนวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิลดลงประมาณ -180 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องจึงหยุดบันทึกผล ซึ่งจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวนี้ใช้เวลาค่อนข้างเวลานาน ซึ่งการจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์เป็น

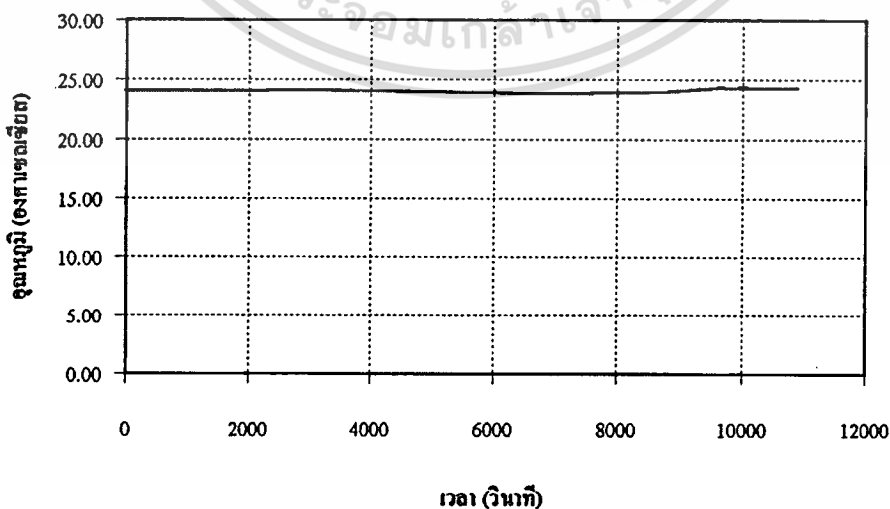
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ควรแก้ไขใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาานอาจส่งผลให้สิ่งประดิษฐ์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลต่อค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทดลองจ่ายกระแสคงที่ขนาด 100 มิลลิแอมป์ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและวัดค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เวลาต่างๆกัน

จากการทดลองพบว่าการจ่ายกระแสคงที่ขนาด 100 มิลลิแอมป์ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอย่างต่อเนื่องและวัดค่าของอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เวลาต่างๆกัน เป็นระยะเวลาานประมาณ 3 ชั่วโมงพบว่าค่าของอุณหภูมิและแรงดันมีความแตกต่างของค่าสัญญาณน้อยมาก ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.14 และ 4.15 โดยค่าของแรงดันที่วัดได้มีค่าเฉลี่ย 2.547 ± 0.280 โวลต์ ที่ความเชื่อมั่น 68 % และค่าของอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าเฉลี่ย 24.012 ± 0.002 องศาเซลเซียส ที่ความเชื่อมั่น 68 %



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่วัดได้ ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ณ เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเตรียมผิวสัมผัส

การทดลองในหัวข้อนี้จะเป็นการเตรียมผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนเพื่อสำหรับทดสอบความสามารถในการวัดหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าของระบบวัดที่ได้พัฒนาขึ้นและเพื่อศึกษาเงื่อนไขในการจัดเตรียมผิวสัมผัสที่มีผลต่อขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส โดยการจัดเตรียมผิวสัมผัสประกอบด้วย 3 กระบวนการหลักคือ

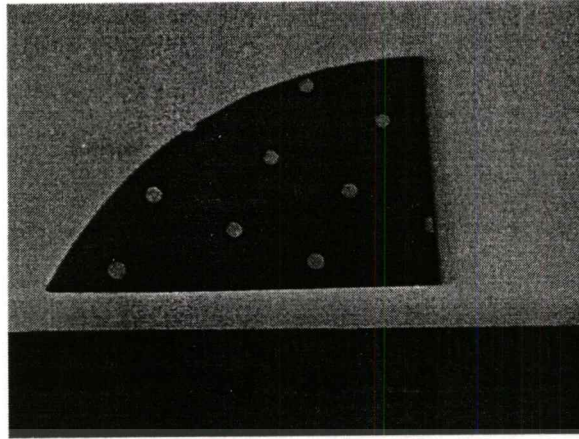
● การล้างเวเฟอร์ซิลิกอน

เวเฟอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองคือเวเฟอร์ซิลิกอนชนิดพีระนาบ 100 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ 14 โอห์ม·เซนติเมตร ก่อนนำไปสร้างผิวสัมผัสกับอลูมิเนียมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ตามขั้นตอนต่างๆคือ

- จุ่มในอะซิโตน 20 นาที
- จุ่ม IPA (Isopropanol) 20 นาที
- อัลตราโซนิคในน้ำ DI 20 นาที
- จุ่มใน $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 20 นาที
- จุ่มใน $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:20 นาน 15 วินาที
- จุ่มใน $\text{HCL}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 20 นาที

● การระเหยอลูมิเนียมเพื่อไปสร้างผิวสัมผัสกับเวเฟอร์

เวเฟอร์ซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการล้างตามขั้นตอนข้างต้นเรียบร้อยแล้วจะถูกโหลดเข้าไปในแชมเบอร์สุญญากาศของระบบระเหยสารด้วยความร้อน ทั้งนี้เพื่อทำการระเหยอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.999% ไปสร้างผิวสัมผัส การระเหยสารจะกระทำเมื่อความดันภายในระบบลดต่ำถึงค่าประมาณ 2×10^{-5} ทอรร် ผิวสัมผัสที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นทรงกลมรัศมี 1 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างผิวสัมผัส 1 เซนติเมตรดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผิวสัมผัสที่ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพี

- การแอนนัล

เวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการระเหยสารจะถูกนำมาตัดแบ่งเป็นส่วนๆ ลักษณะดังรูปที่ 4.17 และจะถูกนำไปผ่านกระบวนการแอนนัลที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียสตามลำดับ เป็นระยะเวลา 30 นาทีภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999%

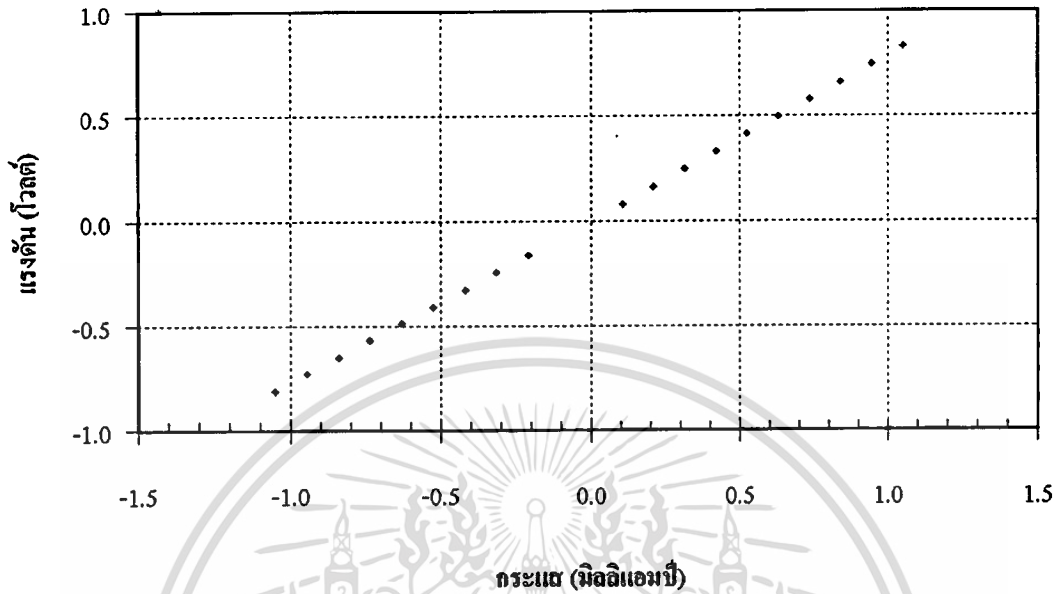


รูปที่ 4.17 ลักษณะเวเฟอร์ที่นำไปผ่านกระบวนการแอนนัล

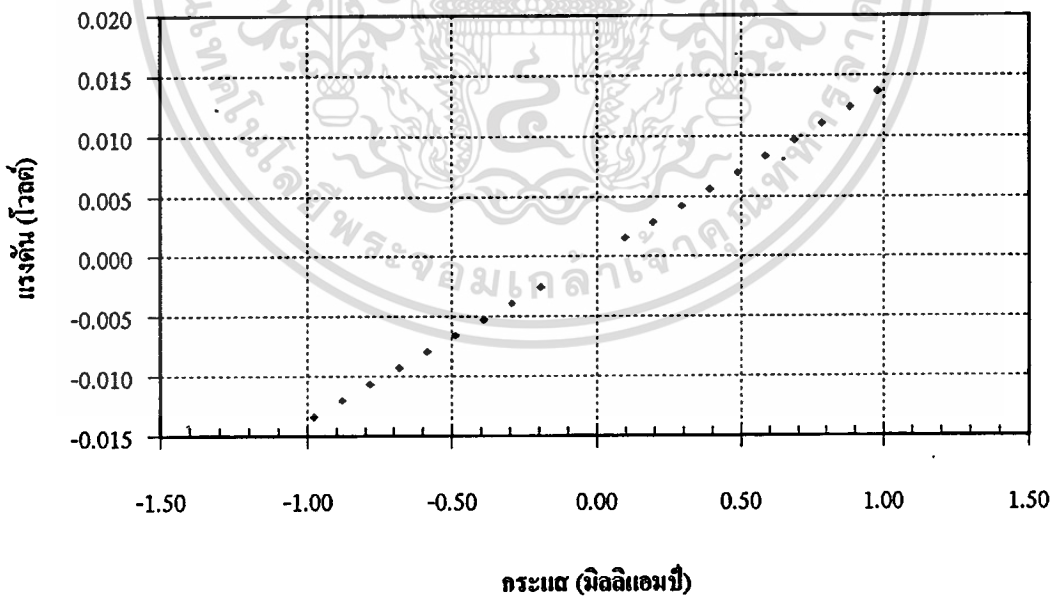
จากการตรวจสอบคุณลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของผิวสัมผัสที่ผ่านกระบวนการแอนนัลภายใต้อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียสพบว่าให้ผลของกราฟเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับและจากการพิจารณาสมการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของกราฟรูปที่ 4.18 พบว่าสมการแสดงความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลคือ $y = 0.7821x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9999 และกราฟรูปที่ 4.19 มีสมการแสดงความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลคือ $y = 0.0139x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9996 ซึ่งจากสมการทั้งสองจะเห็นว่าผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนัลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศา-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ซีสมิค่าความต้านทานรวมของสิ่งประดิษฐ์ 13.9 โอห์มซึ่งต่ำกว่าค่าความต้านทานรวมของผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนัลภายใต้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่า 782.1 โอห์ม



รูปที่ 4.18 แอนนัลที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที



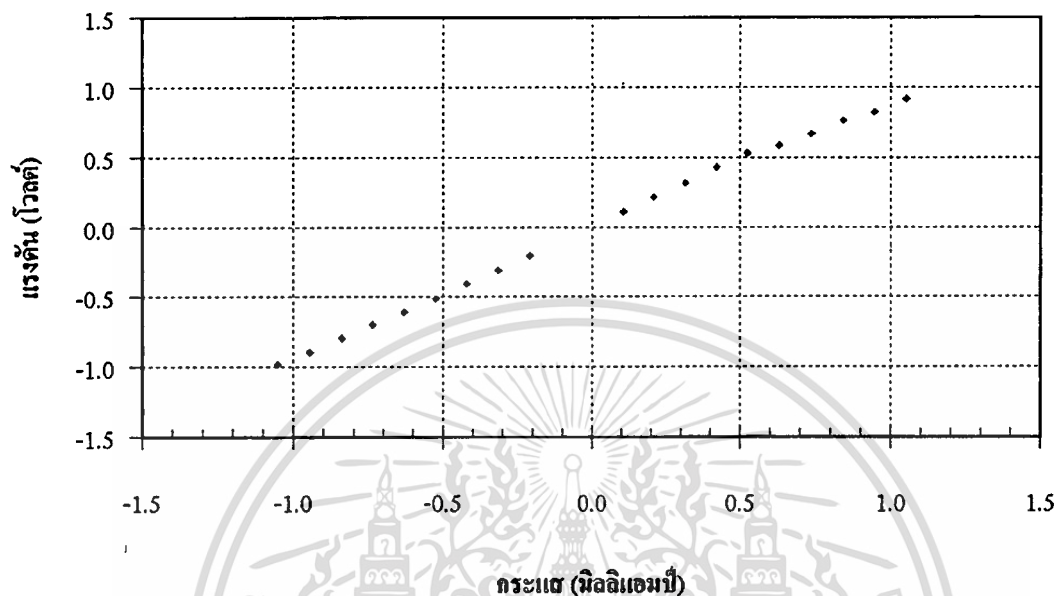
รูปที่ 4.19 แอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

เพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอนนัลที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานรวมของผิวสัมผัส ผู้วิจัย

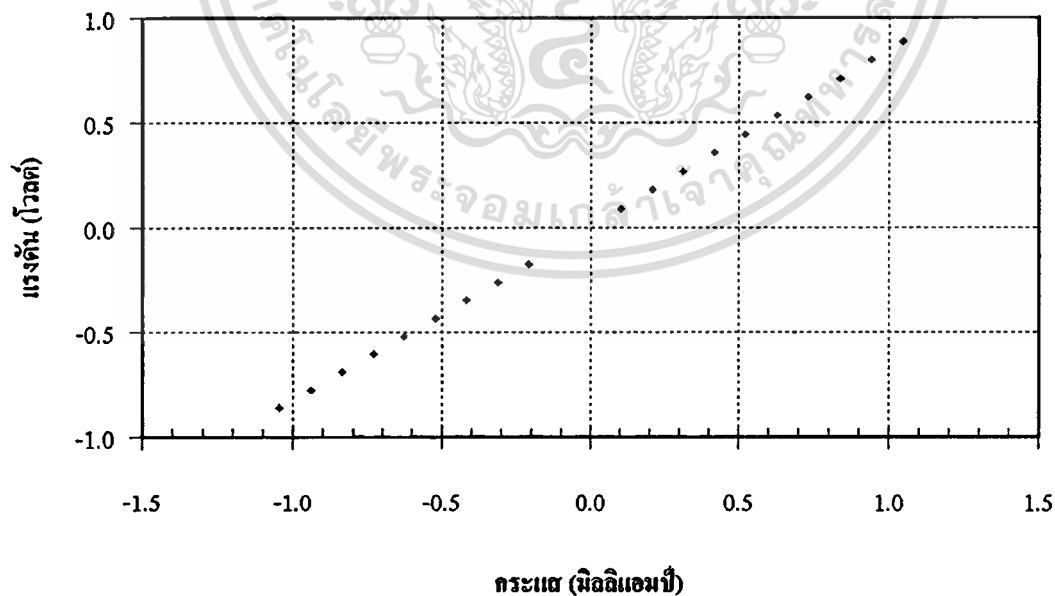
จึงทดลองแอนนัลผิวสัมผัสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสนาน 10 นาที 20 นาทีตามลำดับ ภายใต้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999% และนำผิวสัมผัสที่ผ่านกระบวนการแอนนีย์ลิ่งดังกล่าว ไปวัดหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันพบว่าให้ผลดังกราฟรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 แอนนีย์ลิ่งที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที



รูปที่ 4.21 แอนนีย์ลิ่งที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟรูปที่ 4.20 มีสมการแสดงความสัมพันธ์ของกราฟคือ $y = 0.9288x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9981 และกราฟรูปที่ 4.21 มีสมการแสดงความสัมพันธ์ของกราฟคือ $y = 0.8401x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9998 จากการพิจารณาสมการแสดงความสัมพันธ์ของกราฟในรูปที่ 4.19-4.21 ทำให้ทราบขนาดความต้านทานรวมของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนัลภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียสด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันดังแสดงผลในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสที่เวลา 10 นาที 20 นาทีและ 30 นาที

อุณหภูมิในการแอนนัล 500 องศาเซลเซียส			
ระยะเวลาในการแอนนัล (นาที)	10	20	30
ขนาดความต้านทานรวม (โอห์ม)	928.8	840.1	13.9

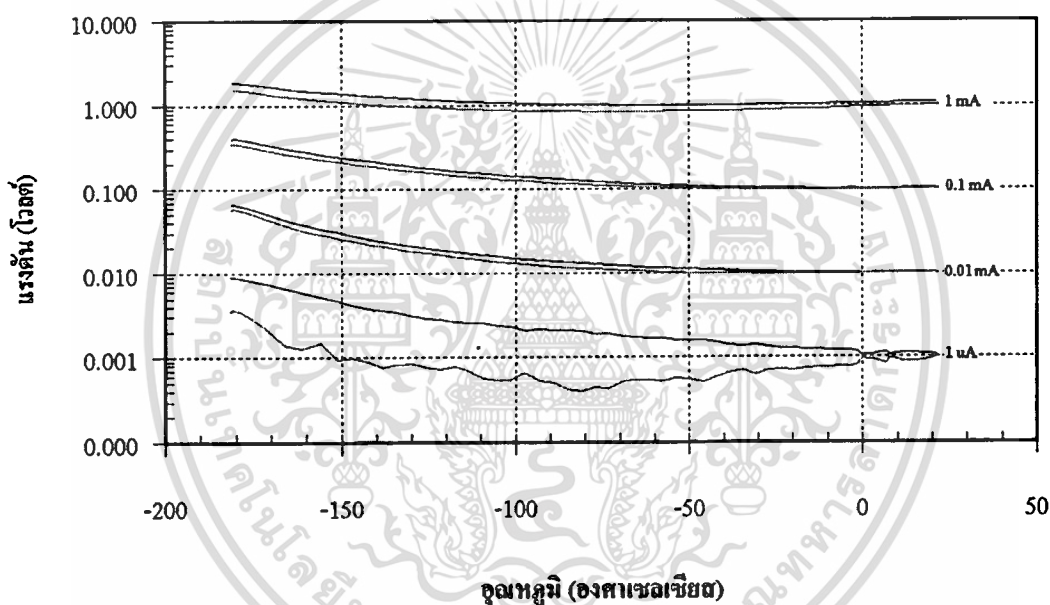
จากข้อมูลในตาราง 4.3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแอนนัลให้สูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานรวมของวัสดุผลดต่ำลง

4.3 การศึกษาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยอาศัยระบบที่พัฒนาขึ้น

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพีภายใต้เงื่อนไขการแอนนัลที่แตกต่างกันโดยอาศัยระบบที่ได้พัฒนาขึ้น เนื่องจากการศึกษาคุณลักษณะของสิ่งประดิษฐ์จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันภายใต้เงื่อนไขการแอนนัลต่างๆที่กล่าวมาแล้วนั้นเป็นเพียงการทดสอบในเบื้องต้นซึ่งทำให้ทราบถึงความเป็นเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ อย่างไรก็ตามการทดสอบในลักษณะดังกล่าวทำให้ทราบเพียงขนาดความต้านทานรวมของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและไม่สามารถบอกถึงขนาดความต้านทานที่เกิดขึ้นจริงบริเวณผิวสัมผัสได้ ผู้วิจัยจึงนำผิวสัมผัสที่ผ่านกระบวนการแอนนัลในเงื่อนไขดังกล่าวมาทดลองวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนอีกครั้งหนึ่ง โดยอาศัยระบบการวัดที่ได้จัดสร้างและพัฒนาขึ้น มีรายละเอียดของการวัดดังนี้

- การศึกษาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าสำหรับผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนีกายใต้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาานาน 30 นาที

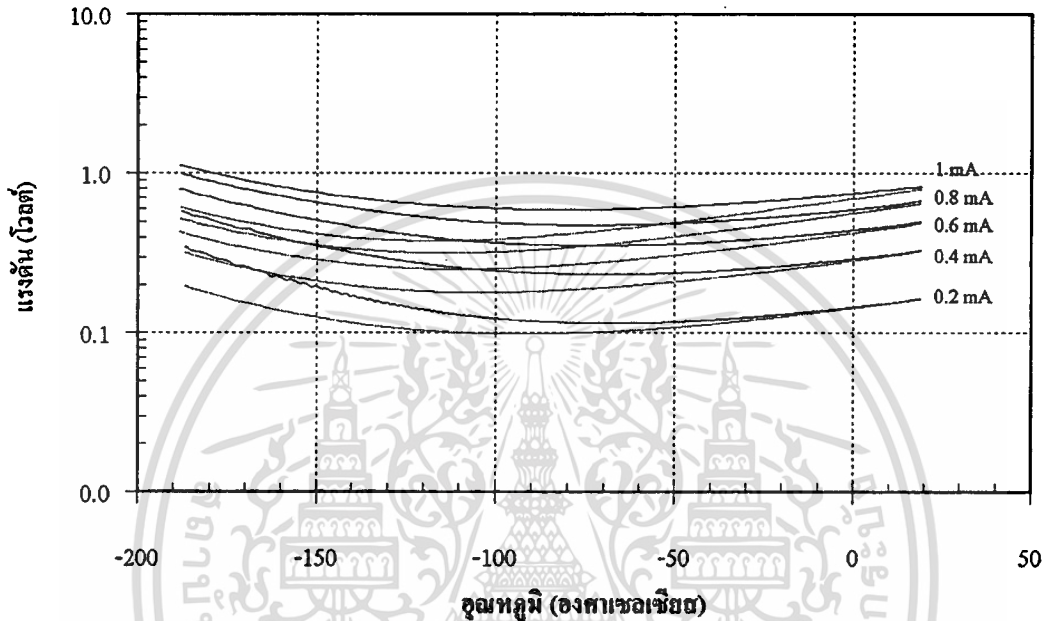
นำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนีกายใต้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีมาทดลองวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบเป็นจังหวะค่าต่างๆ ในย่าน 1 ไมโครแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์และวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ณ อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่กระแสค่าต่างๆ



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 1 ไมโครแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์

จากการทดลองพบว่าได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.22 จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์พบว่าเมื่อจ่ายกระแสคงที่ขนาด 0.01, 0.1 และ 1 มิลลิแอมป์ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบสลับขั้วจะเกิดความแตกต่างของขนาดแรงดันที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) คือ 0.2, 0.5 และ 30 มิลลิโวลต์ตามลำดับ สำหรับการจ่ายกระแสขนาด 1 ไมโครแอมป์ไม่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้เนื่องจากค่าสัญญาณที่วัดได้นั้นมีขนาดต่ำมากจนเกิดสัญญาณรบกวนขึ้น และเนื่องจากในการหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้านั้นจะต้องนำพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ เพื่อหาค่าความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าจากความชันของกราฟ และควรมีชุดข้อมูลระหว่างกระแสที่ไบอัสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและอุณหภูมิที่เกิดจาก

แยกของแรงดันอย่างน้อย 5 ชุดข้อมูลทั้งนี้เพื่อใช้ในการพิจารณาหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของชุดข้อมูล ผู้วิจัยจึงได้ทดลองจ่ายกระแสแรงดันให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซ้ำ โดยเลือกไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำให้มีค่าอยู่ในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์ ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์

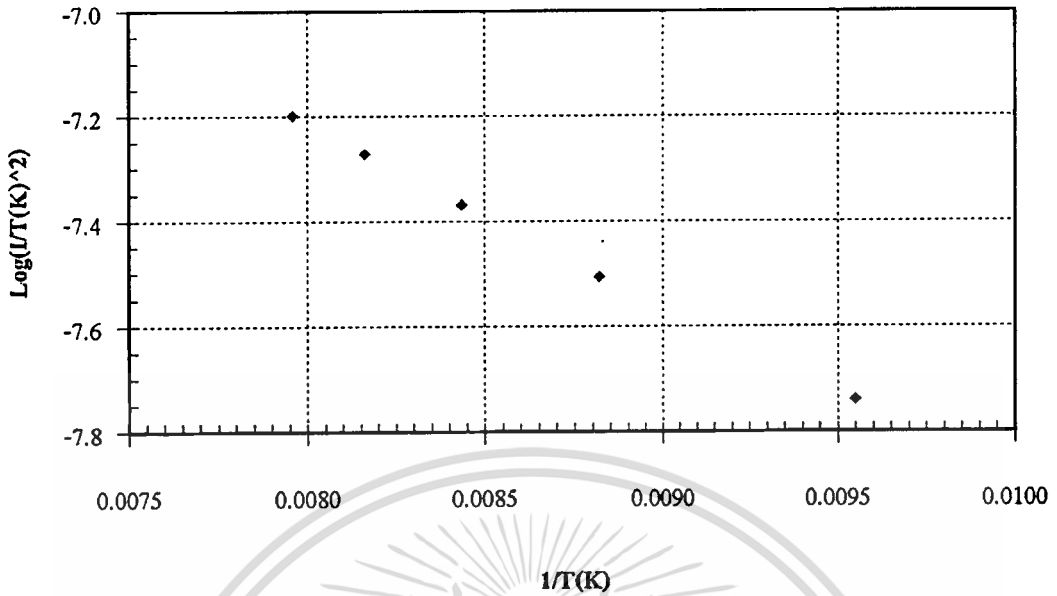
นำค่ากระแส (I) และอุณหภูมิ (T(K)) ณ จุดที่เกิดความไม่สมมาตรในขนาดของแรงดันดังแสดงในตารางที่ 4.4 ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ จะให้ผลดังกราฟรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.4 ค่ากระแส (I) และอุณหภูมิ ณ จุดที่ขนาดแรงดันเกิดความไม่สมมาตร (T)

I (mA)	T (C)	T (K)	Log (I/T(K) ²)	1/T(K)
0.2	-168.265	104.735	-7.73915	0.00955
0.4	-159.625	113.375	-7.50697	0.00882
0.6	-154.435	118.565	-7.36976	0.00843
0.8	-150.480	122.520	-7.27332	0.00816
1.0	-147.363	125.638	-7.19824	0.00796

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการแอนนัลภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

จากการหาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลในกราฟรูปที่ 4.24 พบว่ามีความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลดังสมการ $y = -340.27x - 4.4964$ และมีค่า $R^2 = 0.999$ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้จากความสัมพันธ์

$$q\phi_B = \frac{\text{Slope} \times k}{\log e} \quad (4.1)$$

เมื่อ $q\phi_B$ คือค่าความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าในหน่วยอิเล็กตรอน โวลต์ (eV)

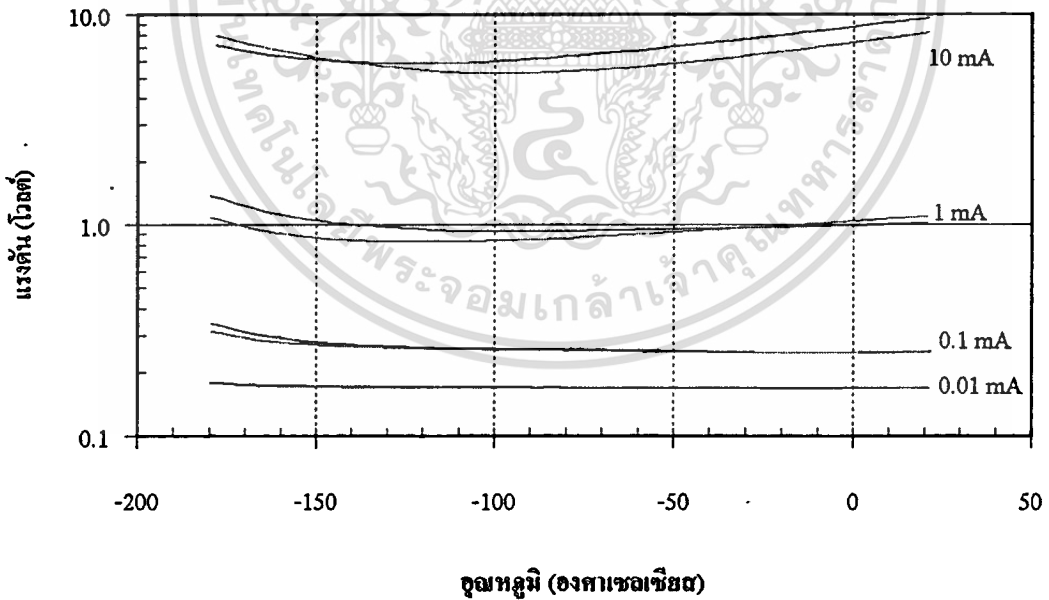
k คือค่าคงที่ของโบลต์สมานน์ (Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ 8.62×10^{-5} eV/K

จากการคำนวณหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยอาศัยสมการ 4.1 พบว่าผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนัลภายใต้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีที่มีความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.067 อิเล็กตรอน โวลต์

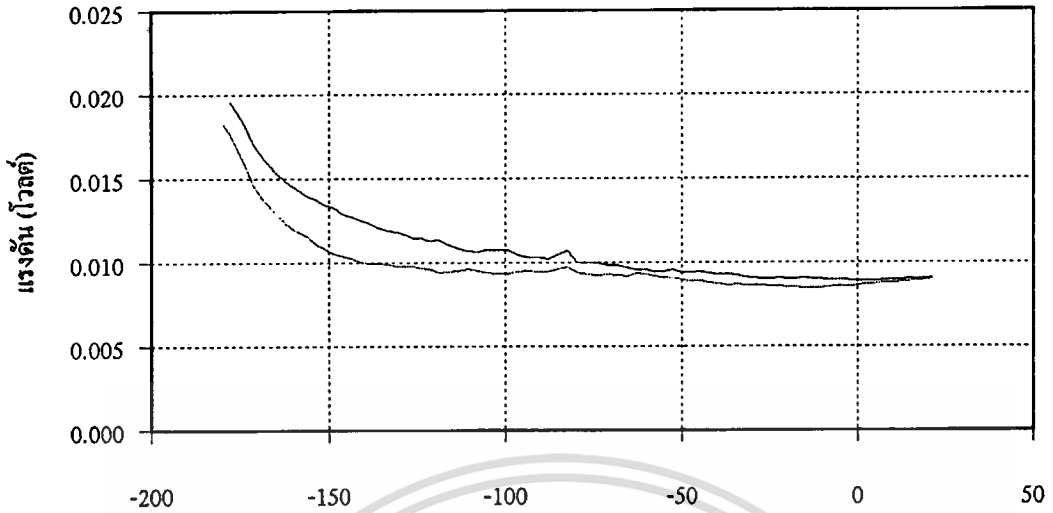
- การศึกษาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าสำหรับผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนีลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 นาที

นำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนีลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 10 นาทีมาทดลองวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบเป็นจังหวะค่าต่างๆในย่าน 0.01 มิลลิแอมป์ถึง 10 มิลลิแอมป์และวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ณ อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่กระแสค่าต่างๆ

จากการทดลองพบว่าได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.25 จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์พบว่าเมื่อจ่ายกระแสคงที่ขนาด 0.1, 1 และ 10 มิลลิแอมป์ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบสลับขั้วจะเกิดความแตกต่างของขนาดแรงดันที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) คือ 1.34 มิลลิโวลต์ 72.67 มิลลิโวลต์และ 1.41 โวลต์ตามลำดับ และการจ่ายกระแสขนาด 10 ไมโครแอมป์ไม่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้เนื่องจากค่าสัญญาณที่วัดได้นั้นมีขนาดต่ำมากจนเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.26



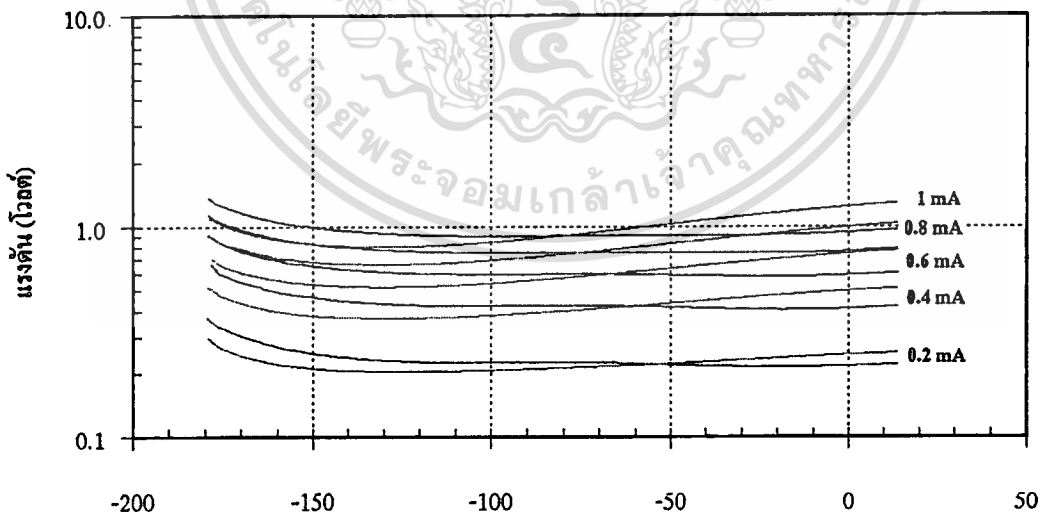
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.01 มิลลิแอมป์ถึง 10 มิลลิแอมป์



อุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)

รูปที่ 4.26 สัญญาณรบกวนกรณีไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำขนาด 10 ไมโครแอมป์

จากผลการทดลองข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ทดลองจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซ้ำ โดยเลือกไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำให้มีค่าอยู่ในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์ ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.27



อุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)

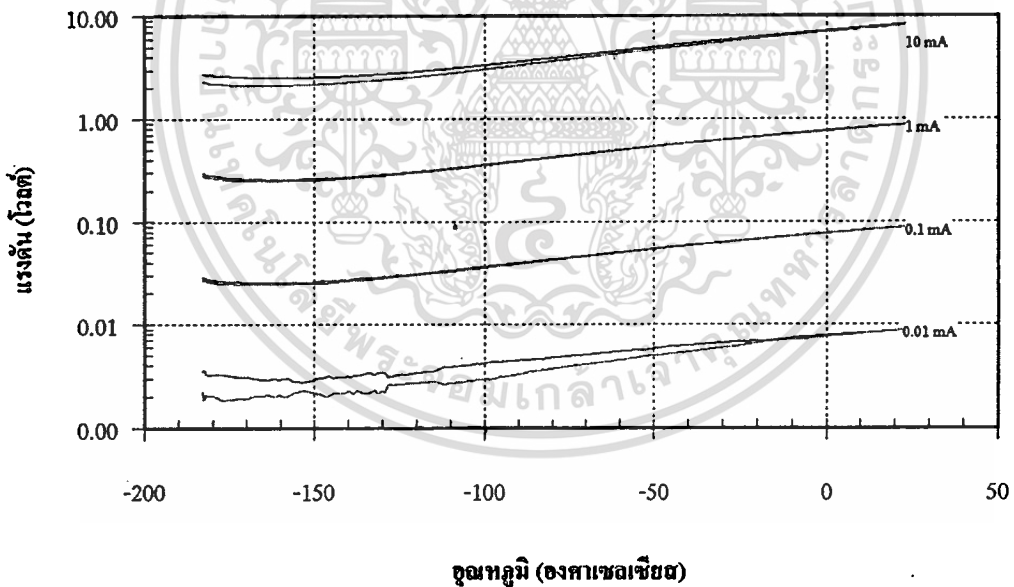
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่ำและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นว่า การไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในย่านดังกล่าวมีความแตกต่างของขนาดแรงดันที่วัดได้เมื่อสลับขั้วการไบอัสกระแสไฟฟ้าตั้งแต่อุณหภูมิต่ำ และเมื่ออุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำลดต่ำลงได้เกิดการไขว้กันของค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จึงไม่สามารถนำผลข้อมูลมาวิเคราะห์หาผลต่างของแรงดัน โดยอาศัยหลักการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

- การศึกษาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าสำหรับผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนียลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาที

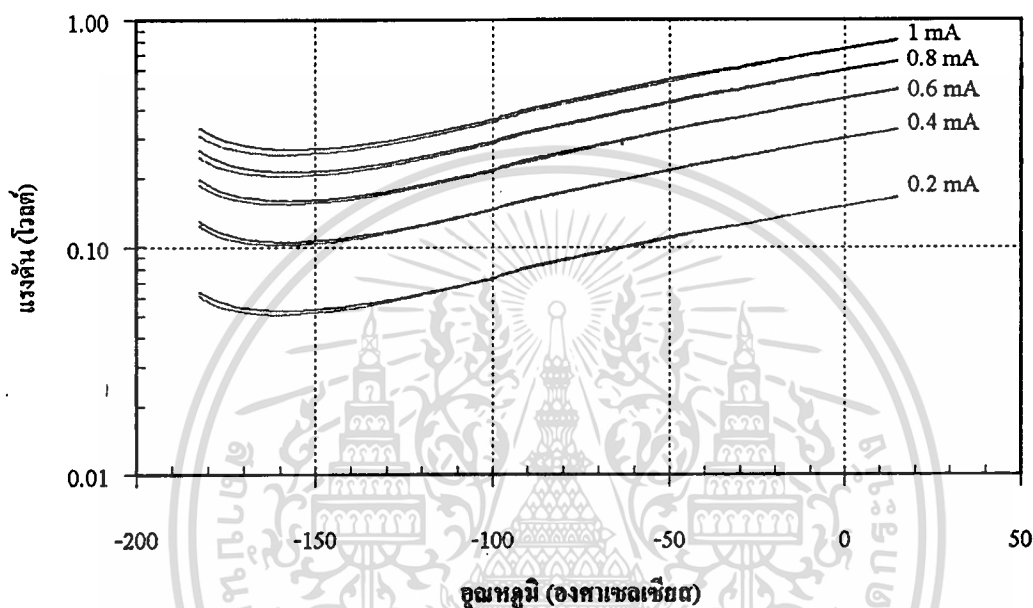
นำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนียลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 20 นาทีมาทดลองวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบเป็นจังหวะค่าต่างๆ ในย่าน 0.01 มิลลิแอมป์ถึง 10 มิลลิแอมป์และวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ณ อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่กระแสค่าต่างๆ



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.01 มิลลิแอมป์ถึง 10 มิลลิแอมป์

จากการทดลองพบว่าได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.28 จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์พบว่า เมื่อจ่ายกระแสคงที่ขนาด 0.1, 1 และ 10 มิลลิแอมป์ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบสลับขั้วจะเกิดความแตกต่างของขนาดแรงดันที่วัดได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) คือ 0.22 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิโวลต์ 14.52 มิลลิโวลต์และ 0.27 โวลต์ตามลำดับ และการจ่ายกระแสขนาด 10 ไมโครแอมป์ ไม่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้เนื่องจากค่าสัญญาณที่วัดได้นั้นมีขนาดค้ำมาก จนเกิดสัญญาณรบกวนขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดลองจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยเลือกไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำให้มีค่าอยู่ในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์ ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.29



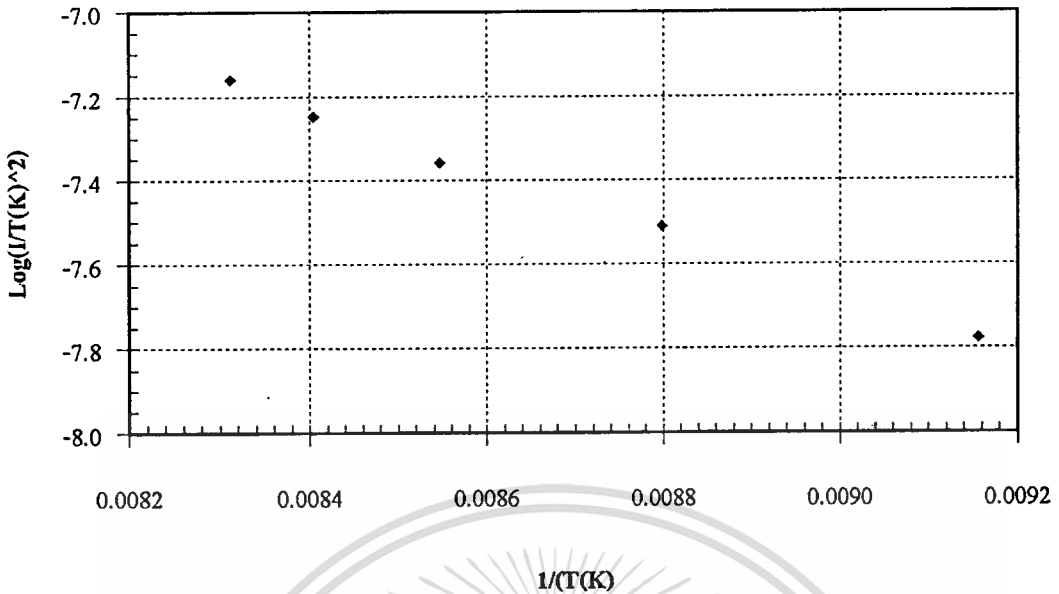
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 0.2 มิลลิแอมป์ถึง 1 มิลลิแอมป์

นำค่ากระแสและอุณหภูมิที่เกิดความไม่สมมาตรในขนาดของแรงดันค้ำแสดงในตารางที่ 4.5 ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ จะให้ผลดังกราฟรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.5 ค่ากระแส (I) และอุณหภูมิ ณ จุดที่ขนาดแรงดันเกิดความไม่สมมาตร (T)

I (mA)	T (C)	T (K)	Log (I/T(K) ²)	1/T(K)
0.2	-163.780	109.220	-7.77557	0.00916
0.4	-159.345	113.655	-7.50912	0.00880
0.6	-155.990	117.010	-7.35829	0.00855
0.8	-154.005	118.995	-7.24797	0.00840
1.0	-152.690	120.310	-7.16060	0.00831

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการแอนนัลภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที

จากการหาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลในกราฟรูปที่ 4.30 พบว่ามีความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลซึ่งสมการ $y = -710.43x - 1.2699$ และมีค่า $R^2 = 0.9971$ และจากการคำนวณหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยอาศัยสมการ 4.1 พบว่าผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนัลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาทีมีความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้า 0.140 อิเล็กตรอนโวลต์

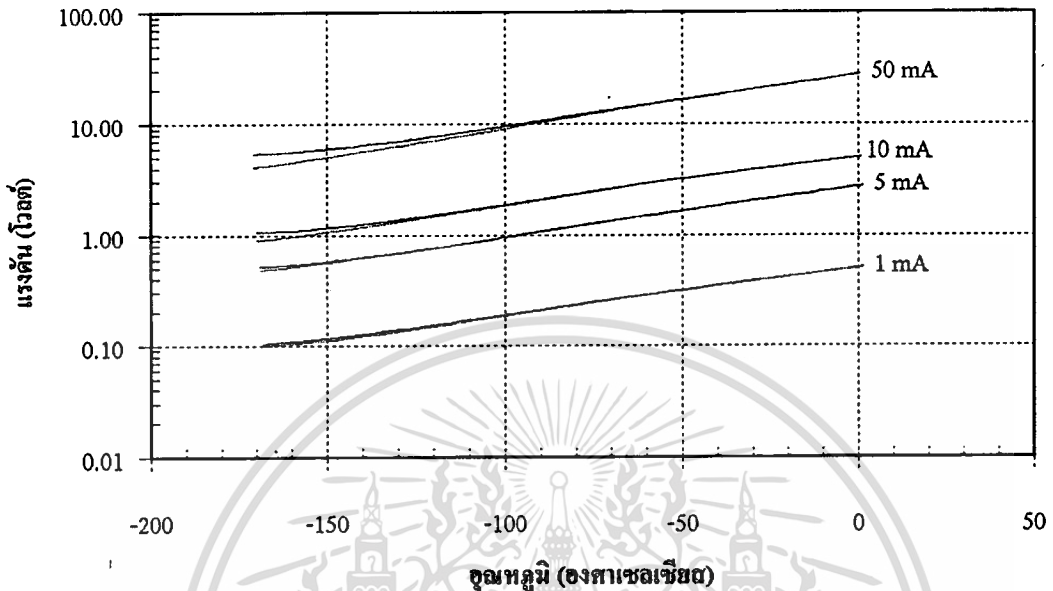
- การศึกษาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าสำหรับผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนัลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที

นำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนัลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีมาทดลองวัดหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบเป็นจังหวะค่าต่างๆ ในย่าน 1 มิลลิแอมป์ถึง 50 มิลลิแอมป์และวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ณ อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ที่กระแสค่าต่างๆ

จากการทดลองพบว่าได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.31 จากการพิจารณารูปความสัมพันธ์พบว่าเมื่อจ่ายกระแสคงที่ขนาด 10 และ 50 มิลลิแอมป์ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบสลับขั้วจะมีความแตกต่างของขนาดแรงดันที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) คือ 4.60 มิลลิโวลต์และ 0.72 โวลต์ตามลำดับ และการจ่ายกระแสขนาด 1 มิลลิแอมป์และ 5 มิลลิแอมป์จะมีความ

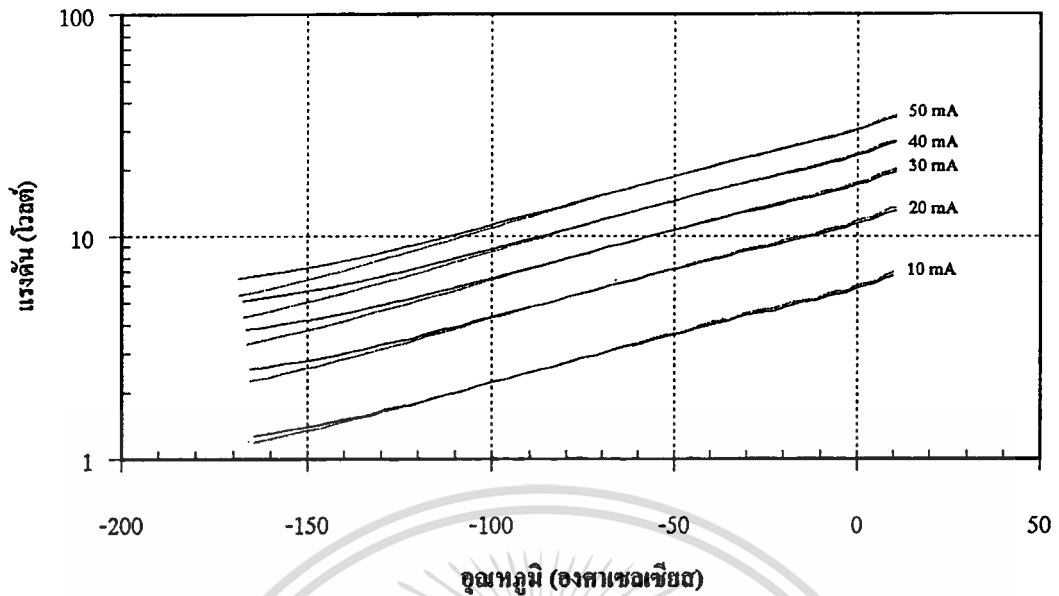
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างของขนาดแรงดันที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) คือ 0.63 มิลลิโวลต์ และ 38.51 มิลลิโวลต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 1 มิลลิแอมป์ถึง 50 มิลลิแอมป์

จากผลการทดลองข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ทดลองจ่ายกระแสคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซ้ำ โดยเลือกไบอัสกระแสให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำให้มีค่าอยู่ในย่าน 10 มิลลิแอมป์ถึง 50 มิลลิแอมป์ ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.32

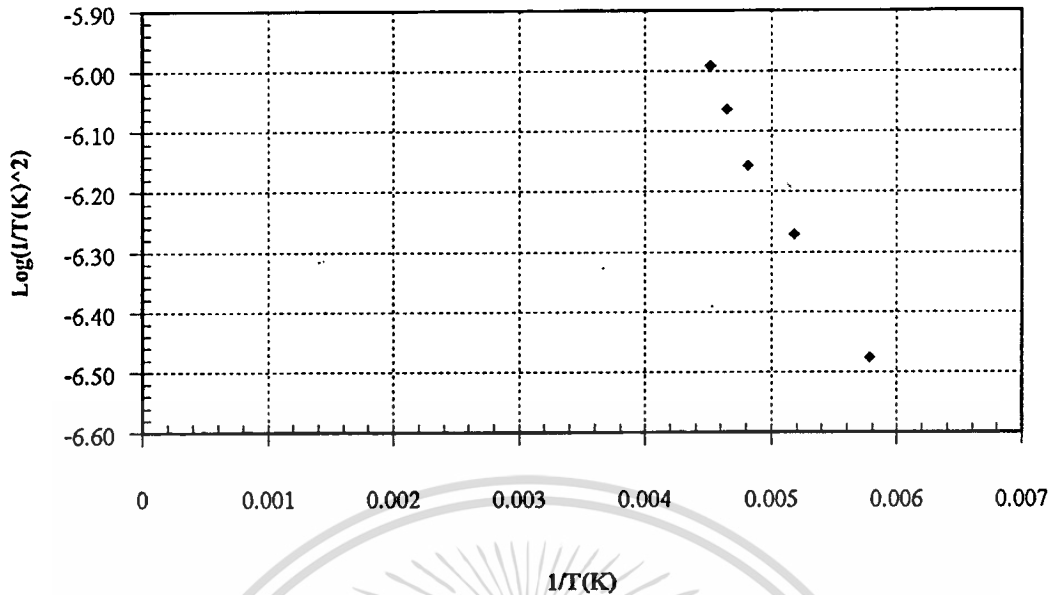


รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันคกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับกระแสไบอัสในย่าน 10 มิลลิแอมป์ถึง 50 มิลลิแอมป์

นำค่ากระแสและอุณหภูมิที่เกิดความไม่สมมาตรในขนาดของแรงดันดังแสดงในตารางที่ 4.6 พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ จะให้ผลดังกราฟรูปที่ 4.33

ตารางที่ 4.6 ค่ากระแส (I) และอุณหภูมิ ณ จุดที่ขนาดแรงดันเกิดความไม่สมมาตร (T)

I (mA)	T (C)	T (K)	Log (I/T(K) ²)	1/T(K)
10	-99.960	173.040	-6.47629	0.005779
20	-80.060	192.940	-6.26981	0.005183
30	-65.365	207.635	-6.15748	0.004816
40	-57.975	215.025	-6.06292	0.004651
50	-51.689	221.311	-5.99104	0.004519



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T^2)$ และ $1/T$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการแอนนัลกายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

จากการหาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลในกราฟรูปที่ 4.33 พบว่ามีความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลดังสมการ $y = -373.62x - 4.3273$ และมีค่า $R^2 = 0.9884$ และจากการคำนวณหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยอาศัยสมการ 4.1 พบว่าผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนัลกายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีมีความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้า 0.074 อิเล็กตรอน โวลต์

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและแนวทางในการพัฒนา

บทนี้เป็นการสรุปผลการออกแบบและพัฒนาระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้า ผลการทดสอบระบบที่ได้พัฒนาขึ้น ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงระบบเพื่อการดำเนินวิจัยในอนาคต

5.1 สรุปผลการวิจัยพัฒนาระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าและการทดสอบ

1. ระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น อาศัยหลักการวัดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ ณ อุณหภูมิต่างๆเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า (I) คงที่ค่าหนึ่งๆแบบสลับขั้ว และเมื่อนำข้อมูลที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการสลับขั้วกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิสำหรับกระแสไฟฟ้าไบอัสค่าต่างๆจะเห็นความไม่สมมาตรของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่อุณหภูมิกำหนดหนึ่ง นำอุณหภูมิจุดที่เริ่มเกิดความไม่สมมาตรของแรงดันไฟฟ้า (T_s) ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T_s^2)$ และ $1/T_s$ และหาค่าความชันของกราฟจะทำให้สามารถคำนวณหาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสได้
2. อุปกรณ์และชุดเครื่องมือของระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย (1) ส่วนเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซึ่งทำจากวัสดุทองแดง ออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร ถูกเจาะรู 2 และต่อกับท่อทองแดงขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้วเพื่อใช้เป็นทางเข้าและออกของไนโตรเจนเหลว (2) ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในงานวิจัยนี้ใช้ RTD platinum 100 ของบริษัท Honeywell รุ่น HEL-711 สามารถวัดอุณหภูมิได้ในย่าน -200 °C ถึง $+260$ °C มีค่าคลาดเคลื่อน ± 0.5 °C (3) โพรบสำหรับวัดและจ่ายสัญญาณทางไฟฟ้าทำจากวัสดุโลหะ มีระยะห่างระหว่างโพรบ 1 เซนติเมตร (4) แชมเบอร์สูญญากาศทำหน้าที่ป้องกันไอน้ำและน้ำแข็งที่เกิดขึ้นกับโพรบและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเมื่ออุณหภูมิของระบบลดต่ำลง (5) ภาชนะบรรจุไนโตรเจนเหลว ใช้สำหรับบรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อลดอุณหภูมิให้กับระบบ (6) ปืนกลโรตารีแบบสองจังหวะจำนวน 2 ตัว ตัวแรกคือปืนของบริษัท Javac รุ่น JD 60 ทำหน้าที่สูบลไนโตรเจนเหลวจากภาชนะบรรจุไนโตรเจนให้ไหลผ่านท่อทองแดงมายังบริเวณแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและตัวที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้รู้เห็นเป็นชอบหรือให้การรับรอง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือปั๊มของบริษัท Balzers-Pfeiffer รุ่น DUO 004B ทำหน้าที่ลดความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศให้ลดต่ำในย่านประมาณ 10^{-3} ทอรร (7) เกจวัดความดันและส่วนแสดงค่าความดัน เกจวัดความดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเกจเทอร์โมคัปเปิ้ลของบริษัท CVC รุ่น GTC-004 ใช้สำหรับวัดความดันในย่านประมาณ $760-10^{-3}$ ทอรร สำหรับส่วนแสดงค่าความดันเป็นของบริษัท Astro มีลักษณะการแสดงผลเป็นแบบอนาล็อก (8) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่แบบโปรแกรมค่าได้ของบริษัท Keithley รุ่น 220 สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ได้ในย่าน 1.9995 นาโนแอมป์ถึง 101 มิลลิแอมป์ โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 100 โวลต์ (9) มัลติมิเตอร์โปรแกรมค่าได้ของบริษัท Keithley รุ่น 2001 สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ และค่าอุณหภูมิจากตัวตรวจวัดที่ติดตั้งบนแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (10) คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด

3. ระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในย่านอุณหภูมิระหว่าง 27 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิ -180 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 8 นาทีและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก -180 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสภายในเวลา 192 นาทีลักษณะแสดงดังกราฟรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ
4. ระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะทำงานโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ในการควบคุมการจ่ายและวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของเครื่องมือต่างๆ โดยผลการวัดจะถูกเก็บบันทึกอย่างต่อเนื่องผ่านโปรแกรม Excel และขณะเดียวกันก็จะแสดงผลข้อมูลที่วัดได้ในลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสัมบูรณ์ของแรงดันไฟฟ้าผ่านทางหน้าจอของโปรแกรม HP-VEE 5.0
5. จากการศึกษาหาขนาดแรงกดของ โพรบ โดยการปรับโมโครมิเตอร์ให้กดโพรบระยะต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และเมื่อนำข้อมูลในตารางไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงกดกับระยะที่โพรบถูกกดพบว่าข้อมูลในกราฟมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นดังสมการ $y = 1.265x$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9967 จากสมการทำให้ทราบค่าคงที่สปริงของโพรบที่ใช้กันว่ามีความเท่ากับ 126.5 นิวตัน/เมตร
6. จากการศึกษาผลของสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้เนื่องจากกดโพรบบนผิวสัมผัสด้วยแรงค่าต่างๆ โดยการปรับโพรบให้กดบริเวณผิวสัมผัสด้วยแรงขนาดต่างๆ คือ 0.43 นิวตัน, 0.44 นิวตัน และ 0.45 นิวตัน และพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้พบว่ามีค่าแตกต่างของค่าสัญญาณที่วัดได้น้อย สังเกตได้จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงดังกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.11
7. ผลของอุณหภูมิที่วัดได้เมื่อไบอัสกระแสไฟฟ้าสลับทิศทางมีความแตกต่างกันน้อย โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกลาง (เปลี่ยนแปลงจาก 27 องศาเซลเซียสถึง -180 องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้ก่อนสลับขั้วกระแสไฟฟ้า (T1) และอุณหภูมิที่วัดได้ภายหลังจากสลับขั้วกระแสไฟฟ้า (T2) ดังกราฟรูปที่ 4.12 และมีสมการแสดงความสัมพันธ์คือ $y = 0.997x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 1 และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาขึ้น (เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิประมาณ -180 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส) มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้ก่อนสลับขั้วกระแสไฟฟ้า (T1) และอุณหภูมิที่วัดได้ภายหลังจากสลับขั้วกระแสไฟฟ้า (T2) ดังกราฟรูปที่ 4.13 มีสมการแสดงความสัมพันธ์คือ $y = 1.0006x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 1 และจากการสังเกตกราฟความสัมพันธ์ทั้งสองจะเห็นว่าข้อมูลที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งวางตั้งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในช่วงกลางจะมีความละเอียดต่ำกว่าข้อมูลที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงขาขึ้น
8. ได้ทดลองศึกษาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ขนาด 100 มิลลิแอมป์ ให้กับสิ่งประดิษฐ์เป็นระยะเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง พบว่าค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่วัดได้ในระยะเวลา 3 ชั่วโมงนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน
 9. ได้ทดลองเตรียมผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) มีสภาพด้านทานทางไฟฟ้า $14 \Omega\text{-cm}$ โดยการระเหยอลูมิเนียมโดยอาศัยระบบระเหยสารด้วยความร้อนภายใต้ความดันประมาณ 2×10^{-5} ทอรร ได้ผิวสัมผัสเป็นลักษณะทรงกลม รัศมี 1 มิลลิเมตร (มีพื้นที่ของผิวสัมผัส 3.14×10^{-6} ตารางเมตร) มีระยะห่างระหว่างคู่ทรงกลมขนาด 1 เซนติเมตร
 10. เมื่อนำผิวสัมผัสที่เตรียมได้ในข้อ 9 ไปผ่านกระบวนการแอนนیلที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียสระยะเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999% และนำมาวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าพบว่าได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลในกราฟทั้งสองพบว่ามีความสัมพันธ์ดังสมการ $y = 0.7821x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9999 และ $y = 0.0139x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9996 ตามลำดับ จากสมการทั้งสองทำให้ทราบว่าผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนิลที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสมีความต้านทานรวมของผิวสัมผัสขนาด 782.1 โอห์มซึ่งมีขนาดสูงกว่าความต้านทานรวมที่วัดได้จากผิวสัมผัสที่ผ่านกระบวนการแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสซึ่งมีขนาด 13.9 โอห์ม
 11. ได้ทดลองแอนนิลผิวสัมผัสภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10 นาทีและ 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999% และนำมาวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าพบว่าได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.20 ; 4.21 จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลในกราฟทั้งสองพบว่ามีความสัมพันธ์ดังสมการ $y = 0.9288x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9981 และ $y = 0.8401x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9998 ตามลำดับ จากสมการทั้งสองทำให้ทราบว่าผิวสัมผัสที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

- ผ่านการแอนนิลภายใต้อุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียสระยะเวลา 10 นาทีและ 20 นาทีที่มีค่าความต้านทานรวมของผิวสัมผัส 928.8 โอห์มและ 840.1 โอห์ม จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 10 นาทีที่มีค่าความต้านทานรวมของผิวสัมผัสสูงสุดและผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีที่มีค่าความต้านทานรวมของผิวสัมผัสต่ำสุด
12. ได้ทดลองนำผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนิลที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที มาวัดหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยระบบที่ได้พัฒนาขึ้นพบว่าได้ผลการวัดดังรูปที่ 4.22 และ 4.23 และจากการวิเคราะห์หาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T_s^2)$ และ $1/T_s$ ได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.24 ซึ่งจากกราฟสามารถหาค่าขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสได้เท่ากับ 0.067 อิเล็กตรอน โวลต์
 13. ไม่สามารถวิเคราะห์หาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าของผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนิลภายใต้ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 10 นาทีได้เนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของแรงดัน ไฟฟ้าที่วัดได้และอุณหภูมิจะเห็นว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อสลับขั้วกระแสไฟฟ้าที่ไบอัสมีขนาดไม่เท่ากันตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (พิจารณาผลการวัดในกราฟรูปที่ 4.25-4.27 ประกอบ) จึงไม่สามารถพิจารณาค่าของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความไม่สมมาตรของขนาดแรงดันไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I/T_s^2)$ และ $1/T_s$ และวิเคราะห์หาขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าได้
 14. ได้ทดลองวัดหาขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนิลภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 20 นาทีและ 30 นาที พบว่าผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนิลภายใต้เงื่อนไข 500 องศาเซลเซียส นาน 20 นาทีมีขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัส 0.140 อิเล็กตรอน โวลต์ ผิวสัมผัสที่ผ่านการแอนนิลภายใต้เงื่อนไข 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีมีขนาดความสูงของกำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัส 0.074 อิเล็กตรอน โวลต์ตามลำดับ

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

จากการออกแบบและพัฒนาระบบวัดขนาดความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.4 พบว่ามีปัญหาบางประการที่ควรได้รับการปรับปรุงต่อไป ได้แก่

1. การรั่วของระบบสุญญากาศในตำแหน่งที่เชื่อมต่อกับท่อทองแดงขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้วที่ใช้เป็นตัวส่งผ่านไนโตรเจนเหลวให้กับแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ การรั่วในตำแหน่งดังกล่าวเกิดจากการเย็นตัวของกาวที่ทำหน้าที่อุดรอยรั่วบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างฐานรองและท่อทองแดงเกิดการแตกตัวทำให้อากาศจากบริเวณภายนอกสามารถไหลผ่านเข้ามาภายในระบบได้ ทำให้ความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นภายในแชนเบอร์ดต่ำลงได้ไม่มากเท่าที่ควรซึ่งส่งผลให้เกิดไอน้ำบริเวณภายในแชนเบอร์ด และส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนขณะทำการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้า รวมถึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ อุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำลดได้ต่ำเพียง -180 องศาเซลเซียส แนวทางแก้ไขปัญหานี้อาจกระทำได้โดยการเลือกหาวัสดุที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในย่านดังกล่าว มาทำหน้าที่อุครรอยร่วมแทนกาวที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2. การเกิดสัญญาณรบกวนขณะทำการวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิของระบบลดต่ำลง ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุจากการสปริงที่ทำหน้าที่ในการกด โพรบเกิดการหดขณะที่อุณหภูมิลดต่ำลงและ ทำให้โพรบเกิดการขยับตัวขณะทำการวัดสัญญาณหรืออาจมีสาเหตุจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว ในข้อ 1

5.3 แนวทางการพัฒนาและการดำเนินงานวิจัยในอนาคต

สำหรับการพัฒนาและการดำเนินงานวิจัยในอนาคตสามารถกระทำได้ดังนี้

1. เนื่องจากระบบวัดขนาดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้สามารถวัดหาขนาดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่มีกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในย่านอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) ถึงอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส (ในความเป็นจริงสามารถลดได้ต่ำเพียง -180 องศาเซลเซียส) ซึ่งการจะศึกษาขนาดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่มีกราฟความสัมพัทธ์ไม่เป็นเชิงเส้นดังกรณีรูปที่ 2.9 นั้นสามารถกระทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้กับสิ่งประดิษฐ์ ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยต่อไปสามารถกระทำได้โดยพัฒนาระบบเดิมที่มีอยู่ให้สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้กับสิ่งประดิษฐ์ได้ในย่านอุณหภูมิที่กว้างขึ้น ทั้งนี้เพื่อศึกษาขนาดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าของผิวสัมผัสทุกประเภท
2. โครงสร้างของระบบวัดที่ออกแบบจะใช้สำหรับวัดหาขนาดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าของผิวสัมผัสที่มีโครงสร้างลักษณะดังรูปที่ 4.17 เท่านั้น อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ขนาดความสูงค่าแรงศักย์ไฟฟ้าของผิวสัมผัสที่มีลักษณะแตกต่างไปจากนี้สามารถกระทำได้โดยการพัฒนาในส่วนโครงสร้างของโพรบวัดสัญญาณทางไฟฟ้าให้สามารถใช้งานได้เหมาะสมกับทุกโครงสร้าง

เอกสารอ้างอิง

- [1] W.Tantraporn, “Determination of Low Barrier Heights in Metal-Semiconductor Contacts”, Journal of Applied Physics, vol. 41, no. 11, Oct 1970.
- [2] W. Tantraporn, “On the Study of Metal-Semiconductor Contacts”, IEEE Trans. on electron devices, vol. ED-19, no. 3, March 1972.
- [3] E.H. Rhoderick and R.H. Williams, **Metal-Semiconductor Contacts**. 2nd Ed. New York : Oxford University Place. 1988.
- [4] S.M. Sze, **Physics of Semiconductor Devices**. 2nd Ed. Singapore : John Wiley & Sons. 1981.
- [5] Dieter K. Schroder, **Semiconductor Material and Device Characterization**. Singapore : John Wiley & Son. 1990.
- [6] Jasprit Singh, **Semiconductor Devices Basic Priciples**. New York : John Wiley & Son. 2001.
- [7] David L. Pulfrey and N. Garry Tarr, **Introduction to Microelectronic Devices**. London : Prentice-Hall. 1989.
- [8] L. Solymar and D. Walsh, **Lectures on the Electrical Properties of Materials**. 5th Ed. New York : Oxford University Press. 1993.
- [9] Robert F. Pierret, **Semiconductor Device Fundamentals**. New York : Addison-Wesley. 1996.
- [10] James W. Mayer and S.S. Lau, **Electronic Materials Science: For Integrated Circuits in Si and GaAs**. New York : Macmillan. 1990.
- [11] Greg Parker, **Introductory Semiconductor Device Physics**. New York : Prentice-Hall. 1994.
- [12] Nigel S. Harris, **Modern Vacuum Practice**. UK : McGraw-Hill. 1989.
- [13] Richard S. Muller and Theodore I. Kamins, **Device Electronics for Integrated Circuits**. 2nd Ed. Singapore : John Wiley & Sons. 1986.
- [14] Robert Helsel, **Visual Programming with HP-VEE**. 3rd Ed. London : Prentice-Hall. 1998.
- [15] ศุติศ เครื่องงาม, **โวลิตสมคทฟิสิกส์**. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2521.
- [16] ศุติศ เครื่องงาม, **สิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1**
กรุงเทพมหานคร : สทจ. 2542.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวภัทริยา กิตติเดชาชาญ เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ จากภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ปีการศึกษา 2539 หลังจากจบการศึกษาได้ทำงานรับราชการในตำแหน่งอาจารย์ระดับ 3 ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ในปีพ.ศ. 2541 ได้ลาราชการบางส่วนเพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งอาจารย์ระดับ 4 ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

