การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

THE STUDY OF CRYSTALLINE SILICON THERMOPILE

รังสรรค์ เมืองเหลือ

RANGSON MUANGHLUA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-455-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

THE STUDY OF CRYSTALLINE SILICON THERMOPILE

T041501

รังสรรค์ เมืองเหลือ

RANGSON MUANGHLUA

เลขหมู่.......
เลขทะเบียน 41501
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974 - 648 - 455 - 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b11169370

THE STUDY OF CRYSTALLINE SILICON THERMOPILE

RANGSON MUANGHLUA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2001

ISBN 974 - 648 - 455 - 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

THE STUDY OF CRYSTALLINE SILICON THERMOPILE

ชื่อนักศึกษา นายรังสรรค์ เมืองเหลือ

รหัสประจำตัว 38061237

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช	
รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง	
ผศ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล	
รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 28 กันยายน 2544 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-401)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่......6......**เดือน**..........................**พ.ศ.**....2544....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว
นักศึกษา	นายรังสรรค์ เมืองเหลือ
รหัสประจำตัว	38061237
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุตัวนำสองชนิดต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งถูกเชื่อมต่อกัน เมื่อเกิดผลต่างของอุณหภูมิ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเทอร์โมคัปเปิล โดยค่าแรงดันไฟฟ้าขึ้นกับชนิดของวัสดุและผลต่างของอุณหภูมิ และเมื่อนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่ออนุกรมกัน จะทำให้ได้ค่าเอาท์พุทสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่า “เทอร์โมไพล์”

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิจัย การศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนเทอร์โมไพล์บนฐานรองซิลิคอน ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ การศึกษาวิธีการสร้างซิลิคอนเทอร์โมไพล์และฮีตเตอร์แบบโลหะจนเป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์ โดยโครงสร้างของอุปกรณ์จะอยู่บนไดอะแฟรมประกอบด้วย เทอร์โมไพล์และฮีตเตอร์ เริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนระนาบ (100) มาสร้างเป็นไดอะแฟรมด้วยกระบวนการกัดเนื้อซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิคในสารละลาย โดยการใช้เทคนิคการจับเวลา แล้วทำการแพร่สารเจือแบบความร้อนลงบนแผ่นซิลิคอนเพื่อสร้างเป็นแถบสารเจือแล้ว สร้างฮีตเตอร์จากฟิล์มไททาเนียมและแถบอลูมิเนียมเพื่อเชื่อมต่อเป็นเทอร์โมไพล์โดยการระเหยในระบบสุญญากาศ ซึ่งฮีตเตอร์จะเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อสร้างผลต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อร้อนและรอยต่อเย็นและฮีตเตอร์ให้อุณหภูมิในช่วง 25 – 45.5 ^{0}C จากการทดลองพบว่าค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์จะแปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิและชนิดของวัสดุ โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คอยู่ในช่วง 150 – 620 μV/K และค่าความไวเทอร์โมไพล์อยู่ในช่วง 12.5-1035 mV/W การประยุกต์ใช้เทอร์โมไพล์เป็นตัววัดอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งมีโครงสร้างส่วนสำคัญคือช่องอุโมงค์สำหรับให้ก๊าซไหลผ่านไดอะแฟรมเพื่อพาความร้อน ซึ่งในการทดลองนี้จะสามารถให้ก๊าซไหลผ่านได้สูงสุด 450 sccm และได้ค่าความไวของการวัดอัตราการไหลของก๊าซ 0.147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The study of crystalline silicon thermopile
Student	Rangson Muanghlua
Student ID.	38061237
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Associate Professor Somsak cheersirikul

ABSTRACT

Thermocouple, one type of thermal meter has been designed to have two different materials in contact. The temperature different between the contact results in voltage drop across the thermocouple. The voltage level depends on type of materials used and the different temperature. And when thermocouples are connected in series, or "Thermopile" would increase the output voltage.

This thesis involves the Silicon thermopile. The characteristics of this type of thermopile on silicon substrate have been studied. The main structure is placed on diaphram with thermopile and heater. The first process is to create diaphram by using silicon (100), starting from anisotropic etching on the designed layout of this silicon in solution with the appropriate etching rate. The thermal doping is followed to create doped strip. The evaporation process is also applied to create Titanium heater film and Aluminum in contact to form the thermopile. This Titanium heater creates heat and causes the temperature different in the range of 25-45.5 $^{\circ}$C. At the end of the process, the Thermopile had been tested and showed the output of this thermopile is direct proportional to the temperature different and materials used. In addition, the seebeck coefficient is in the range 150-620 μV/K. The thermopile sensitivity is in the range of 12.5-1035 mV/W. The applications of this type of the device includes gas flow rate meter with a tunnel for gas flow as the main part. Testing shows that the maximum gas flow rate of 450 sccm and the sensitivity of gas flow rate of 0.147.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล ที่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำปรึกษาวางแนวทางในการทำวิจัย การแก้ปัญหา การคิดริเริ่มตลอดจนชี้แนะให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป้าหมาย

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สมเกียรติ ศุภเดช ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ รศ. โยอิชิ ยาซามูระ ที่กรุณาให้คำปรึกษาวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ ทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษา และขอขอบคุณ คุณวีระศักดิ์ สนเภา ที่ช่วยในการสร้างซิลิคอนไดอะแฟรมบาง

ขอกราบขอบพระคุณ มูลนิธิสื่อสารและคอมพิวเตอร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนในการศึกษาและทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์ฟิล์มโลหะ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้อง ผู้ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษากับผู้เขียนมาโดยตลอด

ขอกราบอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์

รังสรรค์ เมืองเหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...II

กิตติกรรมประกาศ...III

สารบัญ...IV

สารบัญตาราง...VII

สารบัญภาพ...VIII

สัญลักษณ์...XIII

คำนำ...XIV

บทที่ 1 บทนำ..1

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย...5

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย......................................5

บทที่ 2 ทฤษฎี..7

2.1 วัสดุซิลิคอน...7

2.2 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน...13

2.3 การถ่ายเทความร้อน..27

บทที่ 3 การวัดและวิเคราะห์โครงสร้างของเทอร์โมไพล์และไมโครฮีตเตอร์..................33

3.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นและความลึกของสารเจือบนฐานรองซิลิคอนด้วย SR-210..33

3.2 การวัดด้วยระบบ GPIB..40

บทที่ 4 การออกแบบและการสร้าง...74

4.1 การออกแบบไดอะแฟรม...48

4.2 การออกแบบฮีตเตอร์..49

4.3 การออกแบบเทอร์โมไพล์...50

4.4 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์...51

4.5 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์................................62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.6 การแอสแซมบี...... 67

4.7 การเก็บบรรจุ......67

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง......71

5.1 การวิเคราะห์การแพร่สารเจือชนิดเอ็นและพี......71

5.1.1 การศึกษาความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นและพี......71

5.1.2 การศึกษาความลึกของรอยต่อพีเอ็น......73

5.2 การศึกษาเทอร์โมไพล์แบบสารกึ่งตัวนำซิลิคอน......74

5.2.1 ผลของโครงสร้างต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาท์พุท......74

5.2.2 ผลของความเข้มข้นสารเจือและความลึกของรอยต่อที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าเทอร์โมคัปเปิล......75

5.2.3 จำนวนเทอร์โมไพล์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุท......77

5.3 การศึกษาไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน......78

5.3.1 การวิเคราะห์วัสดุฮีตเตอร์ Ti-Al 78

5.3.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน......79

5.3.3 ผลของไมโครฮีตเตอร์บนไดอะแฟรมซิลิคอน......80

5.4 การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์บนฐานไมโครฮีตเตอร์...... 81

5.4.1 ค่าเอาท์พุทการตอบสนอง......81

5.4.2 ผลของการเป็นเชิงเส้นของเอาท์พุทเทอร์โมไพล์......83

5.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเทอร์โมไพล์......84

5.5 การศึกษาเทอร์โมไพล์สำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซ......84

5.5.1 ผลของไดอะแฟรมต่ออัตราการไหลของก๊าซ......84

5.5.2 ผลของไมโครฮีตเตอร์ต่ออัตราการไหลของก๊าซ......88

5.5.3 ผลของเสถียรภาพการวัดอัตราการไหล......90

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง......93

เอกสารอ้างอิง......96

ภาคผนวก ก......97

ภาคผนวก ข......98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน.. 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ชนิดของเซนเซอร์ที่แบ่งตามสัญญาณ..2

1.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติ ไฟฟ้าและความร้อน..3

1.3 เซนเซอร์ความร้อนแบบต่างๆ...4

2.1 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุ โดยที่จุดอ้างอิงอยู่ที่ 0 ^{0}C และจุดที่วัด 100 ^{0}C..................19

5.1 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์... 79

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ระบบการวัดและแสดงผลแบบพื้นฐาน..1

1.2 ลักษณะการทำงานของเซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณเองและ แบบผสมสัญญาณ...................2

1.3 ตระกูลของเซนเซอร์ความร้อน..4

2.1 แบบจำลองของอะตอมซิลิคอน..6

2.2 แบบจำลองพันธะโควาเลนซ์ระหว่างอะตอมซิลิคอน..7

2.3 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน..7

2.4 ลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์..8

2.5 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงาน..9

2.6 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดเอ็น..10

2.7 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดพี..11

2.8 ประเภทของอินเตอร์เฟสแทรปและออกไซด์ชาร์จ..12

2.9 วงจรปิดจะเกิดกระแสไหลวน..14

2.10 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล..14

2.11 โลหะแทรก..15

2.12 กฎของการแทรกอุณหภูมิ..15

2.13 การต่อขนานเทอร์โมคัปเปิล..16

2.14 การหาผลต่างกลับขั้วของเทอร์โมคัปเปิล..16

2.15 การต่อเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า..17

2.16 การต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิล..17

2.17 การเปลี่ยนระดับเฟอร์มิและแพร่ของอิเล็กตรอน..21

2.18 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งเฟอร์มิในช่วงแบนด์กับของซิลิคอนที่มีความสัมพันธ์กับ
อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ N_d และ N_a..22

2.19 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเทียบกับสภาพความต้านทานซิลิคอน..24

2.20 การเปรียบเทียบของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ..25

2.21 วงจรการทดลองของเพลเทียร์..26

2. 22 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของวัสดุตัวนำ..26

2.23 การนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่ A..29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.24 การพาความร้อนจากผิววัสดุ..31

3.1 หลักการวัดของ SR-210..34

3.2 แผนภาพส่วนประกอบต่างๆ ของ SR-210..35

3.3 ขนาดชิ้นงานของซิลิคอนที่ถูกตัดแบ่ง..36

3.4 อุปกรณ์การขัด..37

3.5 ชิ้นงานที่ผ่านการขัด..38

3.6 การวัดของ SR-210..38

3.7 ผลการวัดค่าสเปรดิงรีซิสแตนท์ของ SR-210..39

3.8 ผลการวิเคราห์การวัดของ SR-210..40

3.9 แผนผังอุปกรณ์ GPIB และการต่อสัญญาณต่างๆ.. 42

3.10 อุปกรณ์และการวัดอุณหภูมิ..43

3.11 อุปกรณ์และวิธีการวัดค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์..44

3.12 ส่วนประกอบของบล๊อคคำสั่ง..45

3.13 แผนผังการทำงานโปรแกรมการวัด..46

3.14 แผนโปรแกรมการวัดคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์..46

4.1 รายละเอียดการกัดซิลิคอนโดยสารละลาย..48

4.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์..49

4.3 โครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์..50

4.4 การออกแบบความกว้างและระห่างระหว่างแถบแพร่สารเจือ..50

4.5 ความยาวของแถบแพร่สารเจือที่ต่างๆ กัน.. 51

4.6 ภาพตัดขวางชิพเทอร์โมไพล์..51

4.7 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก..56

4.8 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก..57

4.9 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7..59

4.10 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11..59

4.11 การสร้างแถบไททาเนียม..60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 ภาพตัดขวางโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์....61

4.13 การสร้างไมโครฮีตเตอร์ขั้นสุดท้าย....62

4.14 รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11....62

4.15 ภาพตัดขวางแถบแพร่สารเจือ....64

4.16 ภาพตัดขวางเทอร์โมไพล์....66

4.17 รูปถ่ายด้านบนเทอร์โมไพล์....66

4.18 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลคอนไดออกไซด์ที่ถูกเปิดช่อง....67

4.19 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลคอนเป็นรูที่ถูกกัดด้วยสารละลาย....68

4.20 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลิคอนเป็นช่องอุโมงค์....68

4.21 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลิคอนเป็นช่องอุโมงค์ที่ถูกต่อท่อ....68

4.22 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลิคอนเป็นช่องอุโมงค์และเทอร์โมไพล์....69

4.23 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลิคอนเป็นช่องอุโมงค์ที่ถูกกับชิพเทอร์โมไพล์....69

4.24 ภาพถ่ายของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ....70

5.1 ชิ้นงานที่ถูกขัดด้วยผงเพชร....71

5.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขับลึกอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสต่อ
ความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน....72

5.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขับลึกอะตอมสารเจือ
โบรอนต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน....72

5.4 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสที่ใช้เวลาขับลึกต่างกัน....73

5.5 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือโบรอนที่ใช้เวลาขับลึกต่างกัน....74

5.6 ความสัมพันธ์ของค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือชนิดเอ็น....75

5.7 ความสัมพันธ์ของค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือชนิดพี....75

5.8 ค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดเอ็น....76

5.9 ค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดพี....76

5.10 จำนวนเทอร์โมไพล์กับค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น....77

5.11 จำนวนเทอร์โมไพล์กับค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดพี....78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.12 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย SEM....78

5.13 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะด้วย EDS....79

5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความต้านทานและค่าความต้านทาน....79

5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของฮีตเตอร์ ที่มีขนาดความกว้าง (W) ต่างกัน....80

5.16 การกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่ความหนาต่างกัน....81

5.17 การกระจายความร้อนของฮีตเตอร์ที่ขนาด 40 μm โดยความหนาของไดอะแฟรม 25 μm... 81

5.18 ค่าเอาท์พุทการตอบสนองของเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น....82

5.19 ค่าเอาท์พุทการตอบสนองของเทอร์โมไพล์ชนิดพี....82

5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น....83

5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดพี....83

5.22 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่อุณหภูมิฐานรองซิลิคอนเปลี่ยนไป....84

5.23 การเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 μm เส้นที่ (d2) หนา 28 μm และเส้นที่ (d3) หนา 36 μm......85

5.24 การเปลี่ยนแปลงค่าความไวเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 μm เส้นที่ (d2) หนา 28 μm และเส้นที่ (d3) หนา 36 μm....85

5.25 การเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน....86

5.26 การเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p1) 0.584 Watt....86

5.27 การเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p2) 0.337 Watt....87

5.28 การเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p3) 0.112 Watt....87

5.29 การเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน....88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.30 การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 μm เส้นที่ (d2) หนา 28 μm และเส้นที่ (d3) หนา 36 μm........89

5.31 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม ต่างกันคือเส้นที่ (d1) หนา 20 μm เส้นที่ (d2) หนา 28 μm และเส้นที่ (d3) หนา 36 μm........89

5.32 การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน........90

5.33 อัตราเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ........90

5.34 เสถียรภาพค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ยังไม่มีก๊าซไหลผ่าน........91

5.35 สถียรภาพของค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่อัตราการไหล 450 sccm........92

5.36 การเปรียบเทียบเสถียรภาพของระหว่างค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ไม่ก๊าซไหลผ่านและมีก๊าซไหลผ่าน........92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก	^{0}A
E_a	พลังงานอะตอมสารเจือผู้รับ	eV
E_c	พลังงานแถบความนำ	eV
E_f	พลังงานระดับเฟอร์มิ	eV
E_I	พลังงานระดับอินทรินซิค	eV
h	ค่าคงที่แพลงค์	eV
I	ค่ากระแสไฟฟ้า	mA
J	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	mA/cm^2
J_e	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอน	mA/cm^2
n	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	cm^{-3}
n_i	ความหนาแน่นพาหะสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	cm^{3}
p	ความหนาแน่นของโฮล	cm^{3}
q	ประจุไฟฟ้า	C
Q_{it}	อินเตอร์เฟสแทรบชาร์จ	C
Q_f	ฟิกซ์ออกไซด์ชาร์จ	C
Q_{Ot}	ออกไซด์แทรบชาร์จ	C
Q_m	โมบิลไอออนิกชาร์จ	
T	อุณหภูมิ	K
V	ศักดาไฟฟ้า	V
ε_0	ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของสูญญากาศ	F/cm
ρ	สภาพความต้านทาน	Ω-cm
λ	ค่าความยายคลื่น	nm
α	ค่าสัมประสิทธิ์ซีดบ็ค	V/K
Π	ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์	
γ	สัมประสิทธิ์ของทอมสัน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วมากและมีบทบาทสำคัญในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์เกือบทั้งหมดส่วนมากจะถูกสร้างขึ้นบนฐานรองที่เป็นผลึกซิลิคอน ทำให้ผลึกซิลิคอนกลายมาเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีความสำคัญ สำหรับนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ในงานเหล่านี้ "เซนเซอร์ (sensors)" นับเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ช่วยให้ระบบรับการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมจากตัวเซนเซอร์ ทำให้การควบคุมสามารถทำโดยผ่านเซนเซอร์ ในบรรดาเซนเซอร์หลายชนิดด้วยกัน ซิลิคอนเซนเซอร์นับเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่ง ซึ่งได้มีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ใช้งาน[1,2,3] เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหล และความดัน เป็นต้น

ซิลิคอนเทอร์โมไพล์เซนเซอร์เป็นเซนเซอร์แบบความร้อน โดยอาศัยหลักของ "ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck effect)" เป็นปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน เมื่อนำวัสดุตัวนำสองชนิดต่างกันมาเชื่อมต่อกันด้านหนึ่ง และทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสอง จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตรงรอยนั้น ในปัจจุบันเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและสามารถสร้างอุปกรณ์บนไดอะแฟรม ซึ่งจุดหมายหลักของการพัฒนาเน้นไปสู่โครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ให้มีความไวสูง มีความเป็นเชิงเส้นและเสถียรภาพที่ดี
ในการศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนเทอร์โมไพล์ในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีศักยภาพในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบนฐานรองซิลิคอน ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์เกิดความสนใจและมีแนวความคิดที่จะทำการสร้างซิลิคอนเทอร์โมไพล์ เซนเซอร์

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการทำวิจัยเรื่องการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติไฟฟ้าความร้อนของซิลิคอนเทอร์โมไพล์ โดยเริ่มต้นจาก บทนำ ทฤษฎี การวิเคราะห์ การออกแบบและกระบวนการสร้าง ผลการทดลอง และสุดท้ายสรุปผลการทดลอง ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึง ความเป็นของงานวิจัย และการนำเอาซิลิคอนเทอร์โมไพล์ประยุกต์ใช้งาน ตลอดจนวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

บทที่ 2 เนื้อหาจะกล่าวถึงทฤษฎีซิลิคอน ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน ปรากฏการณ์ซีเบ็ค ปรากฏการณ์เพลเทียร์ ปรากฏการณ์ทอมสัน และการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 3 เนื้อหาจะกล่าวถึง เทคนิคและเครื่องมือวัด ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องตรวจสอบความลึกของการแพร่สารเจือและระบบการวัดด้วยระบบ GBIP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 เนื้อหาจะกล่าวถึง การออกแบบและกระบวนการสร้างฮีตเตอร์ และ การออกแบบและกระบวนการเทอร์โมไพล์

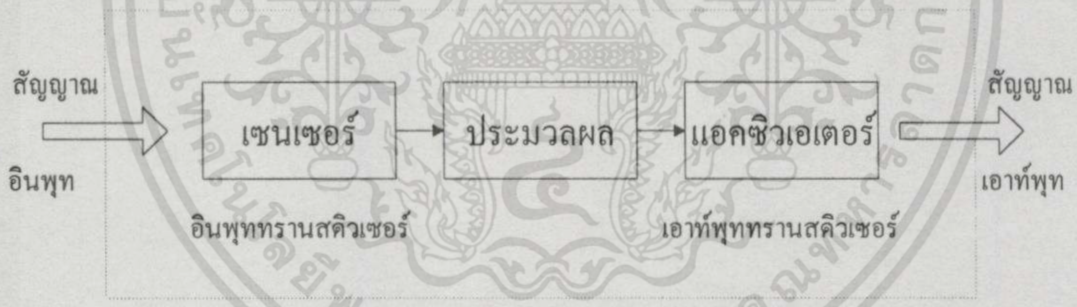
บทที่ 5 เป็นการทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ทรานสดิวเซอร์เป็นตัวแปลงสัญญาณอย่างหนึ่งไปเป็นสัญญาณอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์ (sensors) และ แอคซิวเอเตอร์ (Actuators) เซนเซอร์เป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณในรูปต่างๆ ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนแอคซิวเอเตอร์จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณอย่างอื่น จะเห็นได้ว่าทั้งเซนเซอร์และแอคซิวเอเตอร์จะแปลงสัญญาณที่ตรงกันข้ามกันและมีความสัมพันธ์กันแสดงดังรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์จะวัดคุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมีแล้วแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งไปยังกระบวนการประมวลผลสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อที่จะส่งไปยังส่วนแอคซิวเอเตอร์เพื่อที่จะแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นเอาท์พุทที่ต้องการแสดงมีด้วยกันหลายวิธีเช่น แสดงเป็นภาพ, เสียง, การสั่น, อุณหภูมิและแสงสว่างเป็นต้น ซึ่งทำให้เราสามารถรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน นอกจากนั้นยังสามารถบันทึกข้อมูลได้



รูปที่ 1.1 ระบบการวัดและแสดงผลแบบพื้นฐาน

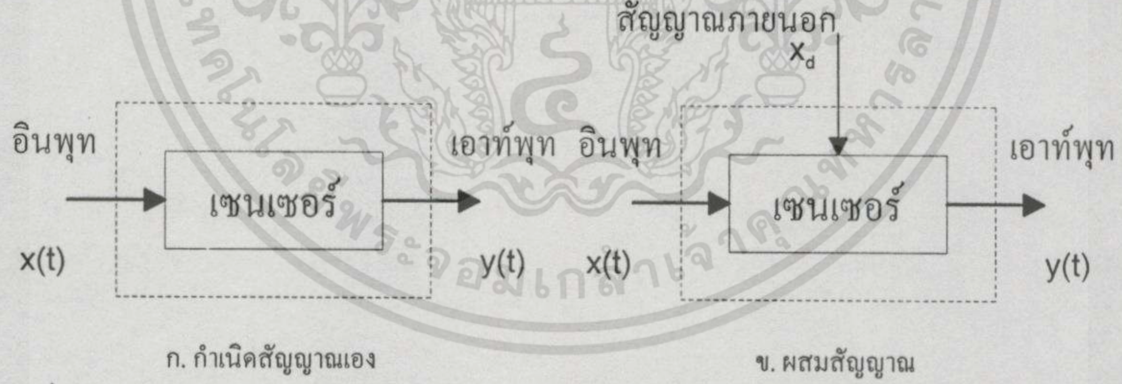
เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับระบบการวัดและควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแสดงผลแทนการตอบสนองของระบบประสาทมนุษย์ที่มีขีดจำกัดในการรับรู้ที่มีระบบประสาทสัมผัสทั้ง 5 คือ หูรับฟังเสียง, ร่างกายรับการสัมผัส, จมูกใช้ดมกลิ่น, ลิ้นใช้การลิ้มรสและตาใช้ในการมอง ซึ่งถ้าสิ่งที่ใช้สัมผัสมีปริมาณมากเกินไปจะเป็นอันตรายต่อร่างกายและถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปก็ไม่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงได้ โดยทั่วไปเซนเซอร์แบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด ตามชนิดสัญญาณคือ เซนเซอร์ความร้อน (thermal sensor), เซนเซอร์รังสี (radiotion sensor), เซนเซอร์กล (mechanical sensor), เซนเซอร์เคมี (chemical sensor) และเซนเซอร์ชีวภาพ (Biological sensor) แสดงดังตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ชนิดของเซนเซอร์ที่แบ่งตามสัญญาณ

สัญญาณ	การวัด
ความร้อน	อุณหภูมิ, ความร้อน, อัตราการไหลความร้อน, ความจุความร้อน
การแผ่รังสี	รังสีแกมมา, อัลตร้าไวโอเลต, การมองเห็น, อินฟาเรด, ไมโครเวฟ, คลื่นวิทยุ
กล	ระยะทาง, ความเร็ว, ความเร่ง, แรง, ทอร์ก, ความดัน, การไหลของมวล,การสั่นของคลื่นยาวและความสูงคลื่น
แม่เหล็ก	สนามแม่เหล็ก, ฟลักซ์, โมเมนต์แม่เหล็ก, สภาพการยอมแม่เหล็ก, อำนาจแม่เหล็ก
เคมี	ความชื้น, ค่าพี-เอช , ความเข้มข้นก๊าซ
ชีวภาพ	ความหวาน, โปรตีน, โฮร์โมน

สำหรับเซนเซอร์ความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือแบบกำเนิดสัญญาณเอง (self generating) และ แบบผสมสัญญาณ (modurating) เซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณเองไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกก็สามารถทำงานได้เช่น เทอร์โมคัปเปิลจะให้ค่า e.m.f (electromotive force) ที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ในกรณีเซนเซอร์แบบผสมสัญญาณ ต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานเช่น โฟโต้ไดโอด ต้องให้แรงดันไบอัสถึงจะทำงานได้แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ลักษณะการทำงานของเซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณเองและ แบบผสมสัญญาณ

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลใช้วัดความแตกต่างอุณหภูมิ $\Delta T(t)$ และเอาท์พุทคือ e.m.f $\phi(t)$ ซึ่งแสดงเป็นสมการได้

$$y(t) = F(x(t)) \tag{1.1}$$

หรือ

$$y(t) = F(\Delta T(t)) \tag{1.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $F(\Delta T(t))$ คือคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของเซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณ ในกรณีของเซนเซอร์แบบผสมสัญญาณ สามารถเขียนเป็นสมการที่ซับซ้อนขึ้น

$$y(t) = F(x(t)+x_d) \qquad (1.3)$$

โดย x_d เป็นแหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอกเช่น กระแสหรือแรงดันไฟฟ้า

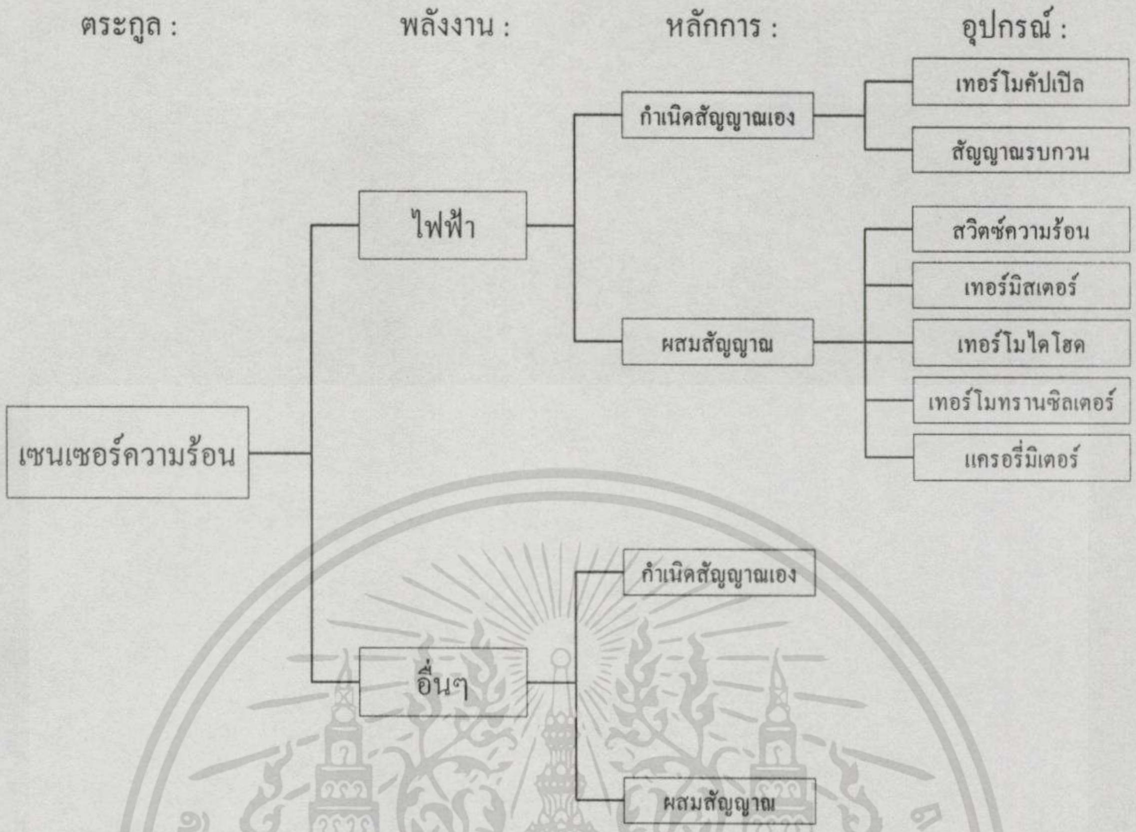
ไมโครเซนเซอร์แบบความร้อน (Thermal microsensors) ใช้ในการวัดปริมาณความร้อน เช่น อุณหภูมิ (T), การไหลของความร้อน (heat flux Q) และ ค่าความจุความร้อน (heat capacity C_T) อุณหภูมิเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการวัดปริมาณความร้อนหรือความร้อนในวัสดุ ค่าความจุความร้อนคือความสามารถการเก็บความร้อนต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ (J/K) เปรียบได้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ความต้านทานความร้อน (R_T) คือความสามารถต้านทานการไหลผ่านความร้อนเปรียบได้กับตัวความต้านทาน (R) ดังนั้นอุณหภูมิและการไหลของความร้อนเปรียบได้กับความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแส (I) ในระบบความร้อนไม่มีตัวเปรียบเทียบกับระบบไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำ (L) แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติ ไฟฟ้าและความร้อน

ระบบ	ตัวแปร	องค์ประกอบ	กฎสแตติก	กฎไดนามิค
ไฟฟ้า	I,V	R,C,L	q = C/V	V = IR
ความร้อน	Q,T	R_T,C_T,-	Q = C_T/T	T = Q/R_T

รูปที่ 1.3 แสดงตระกูลของเซนเซอร์ความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นแบบการผสมสัญญาณไฟฟ้าความร้อน (thermal electrical modulation) มากกว่าแบบการเนิดสัญญาณเอง สำหรับเซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณเอง ที่ยอมรับได้มีสองแบบคือเทอร์คัปเปิลและแบบความร้อนรบกวน (thermal noise) และ แบบผสมสัญญาณ เช่น เทอร์มิสเตอร์, เทอร์โมไดโอดและเทอร์โมทรานซิสเตอร์ สามารถพัฒนาเป็นไมโครเซนเซอร์ได้ อย่างไรก็ตามยังมีตัววัดอุณหภูมิอีกหลายชนิดเช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทที่ไม่สามารถทำเป็นไมโครเซนเซอร์ได้ ในที่นี้เราจะศึกษารายละเอียดจากตารางที่ 1.3 แสดงชนิดของตัววัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (contacting thermal sensor) มีช่วงการใช้งานกว้าง แต่ในขณะเดียวกันเซนเซอร์แบบไม่สัมผัส (non-contactting thermal sensor) จากตารางแสดงช่วงของการวัดอุณหภูมิที่ครอบคุมโดยมาตรฐานการวัดและความละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 ตระกูลของเซนเซอร์ความร้อน

ตารางที่ 1.3 เซนเซอร์ความร้อนแบบต่างๆ

เซนเซอร์ / เทคนิค	ช่วงการใช้งาน (K)	การใช้งาน	ความละเอียด
ไมโครเซนเซอร์			
อาร์ทีดีแบบเจอเมเนียม	1.5 - 100	ห้องปฏิบัติการ	0.0001
อาร์ทีดีแบบคาร์บอน	1.5 - 100	ห้องปฏิบัติการ	0.001
เทอร์มิสเตอร์	15 - 1000	มาตรฐาน	0.00001
รอยต่อพีเอ็นซิลิคอน	4 - 500	ห้องปฏิบัติการ	0.001
เทอร์โมคัปเปิล	210 - 430	ห้องปฏิบัติการ	1
การแผ่รังสี	270 - 5,000	อุตสหกรรม	1.0
เทอร์โมมิเตอร์			
เทอร์โมมิเตอร์แบบก๊าซ	1.5 - 1,400	ห้องปฏิบัติการ	0.002
เทอร์โมมิเตอร์แบบของเหลว	130 - 950	ทั่วไป	0.1
เทอร์โมมิเตอร์แบบโลหะคู่	130 - 700	อุตสหกรรม	1 - 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จะใช้แผ่นผลึกซิลิคอนเป็นวัสดุพื้นฐาน ซึ่งปัจจุบันมีความสำคัญมาก โดยการนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและวงจรรวม (IC)ชนิดต่างๆ ด้วยเหตุผลที่ว่ามีราคาถูกและยังสามารถทำการสร้างและพัฒนาเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน แต่สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางด้านการวัดอุณหภูมิมักไม่ค่อยนิยมนำสารกึ่งตัวซิลิคอนมาใช้เป็นวัสดุพื้นฐาน สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย ซิลิคอนเทอร์โมไพล์และฮีตเตอร์[1,2,3] ซึ่งมีโครงสร้างอยู่บนไดอะแฟรม

การศึกษาถึงคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์เพื่อประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดอัตราการไหลของก๊าซแบบซิลิคอน โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นหลักการทำงาน โดยใช้โครงสร้างเทอร์โมไพล์เป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและมีฮีตเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน เมื่อมีก๊าซไหลผ่านตรวจวัดอัตราการไหลทำให้เกิดการพาความร้อนทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ สำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดอัตราการไหลจะต้องอาศัยกระบวนการทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำเทคโนโลยีแบบระนาบ (plannar technology) ร่วมกับโครงสร้างกลไกลขนาดเล็ก (micromachining)

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

จากอดีตที่ผ่านมาเทอร์โมคัปเปิลมีความสำคัญและมีประโยชน์มากในการวัดอุณหภูมิสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ได้ในงานวิจัย โดยโครงการทำวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์

1. ศึกษาโครงสร้างของเทอร์โมไพล์
2. ศึกษาคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์
3. ศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์
4. ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้เป็นตัววัดอัตราการไหลของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 วัสดุซิลิคอน

2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน

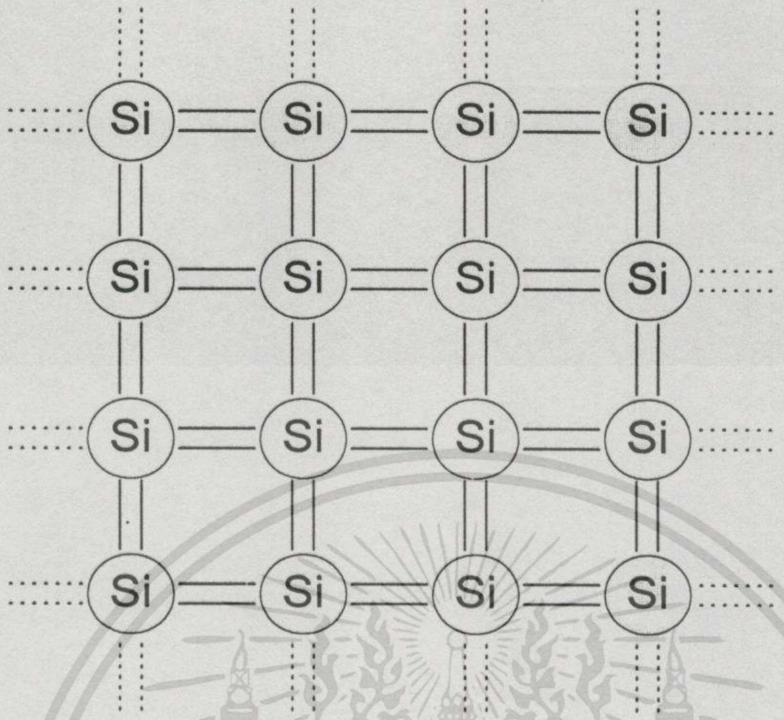
ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุซิลิคอนหลายๆ อะตอมมาอยู่ใกล้ชิดกัน โดยอะตอมดังกล่าวจะมีการยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมซิลิคอนเหล่านี้เรียกว่า พันธะ (bond) กลไกลในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดพันธะนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะที่เกิดขึ้นในผลึกซิลิคอนเท่านั้น

ในผลึกซิลิคอนเมื่ออะตอมของซิลิคอนเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันจะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมซิลิคอนซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) อยู่ถึง 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 แบบจำลองของอะตอมซิลิคอน

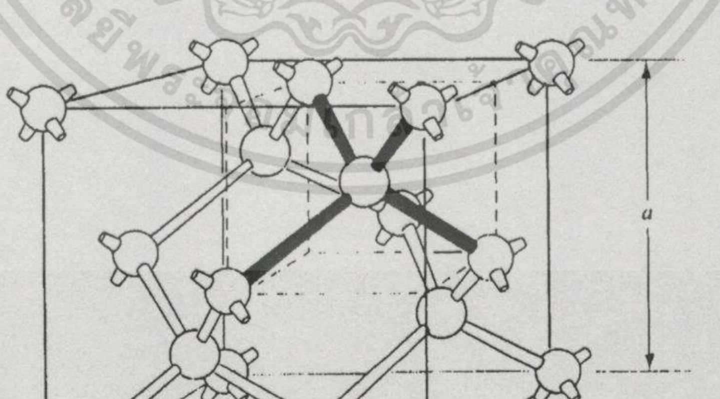
เกิดการทับซ้อนกัน อันจะทำให้เกิดพันธะแบบที่เรียกว่า พันธะโควาเลนซ์ (covalent bond) เกิดขึ้น โดยพันธะดังกล่าวนี้เกิดจากอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน ทั้งนี้ก็เพื่อให้อะตอมอยู่ในภาวะที่มั่นคง ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แบบจำลองพันธะโควาเลนซ์ระหว่างอะตอมซิลิคอน

จากรูปข้างต้นจะเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์ในสองมิติ โดยอะตอมจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้ง 4 ร่วมกันกับอิเล็กตรอนนี้เองทำให้อะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เกิดพันธะโควาเลนซ์ขึ้น 4 พันธะด้วยกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้เองทำให้อะตอมของซิลิคอนต่างๆ มีความมั่นคง และสามารถประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

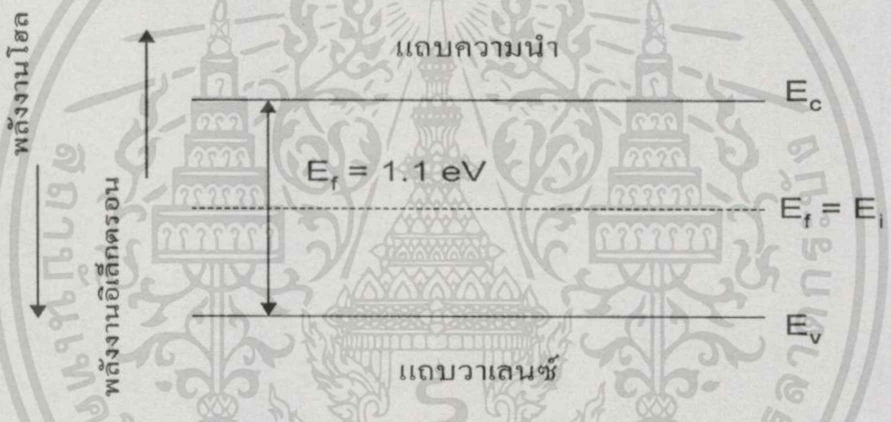
2.1.1 ชนิดของผลึกซิลิคอน

ผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ ได้คือ ซิลิคอนบริสุทธิ์และซิลิคอนเจือปน

2.1.1.1 ซิลิคอนบริสุทธิ์ (Intrinsic Silicon)

ผลึกซิลิคอนซึ่งไม่ได้ถูกเติมหรือเจือปนด้วยอะตอมสารเจือของธาตุอื่น จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.4

จากภาพเป็นลักษณะโครงสร้างพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบความนำและแถบพลังงานต้องห้ามโดยระดับพลังงานซึ่งแสดงเป็นเส้นประโครงที่อยู่ระหว่างกึ่งกลางแถบวาเลนซ์และแถบความนำ คือระดับพลังงานเฟอร์มิ สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์

ระดับพลังงานนี้จะถูกเรียกว่าเป็นระดับพลังงานอินทรินซิค และเมื่อทำการพิจารณาแถบพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ การที่พันธะโควาเลนซ์ถูกแตกออกเนื่องจากการกระตุ้นด้วยพลังงานภายนอก นั่นก็คือการที่อิเล็กตรอนภายในแถบวาเลนซ์ ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้นมากพอที่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ในระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดที่ว่าง (โฮล) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยสภาพความนำไฟฟ้าของซิลิคอนบริสุทธิ์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์นี้ ซึ่งการเกิดประจุพาหะในซิลิคอนบริสุทธิ์จะเกิดได้เฉพาะในกรณีนี้เท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำ จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์สามารถเขียนสมการได้เป็น

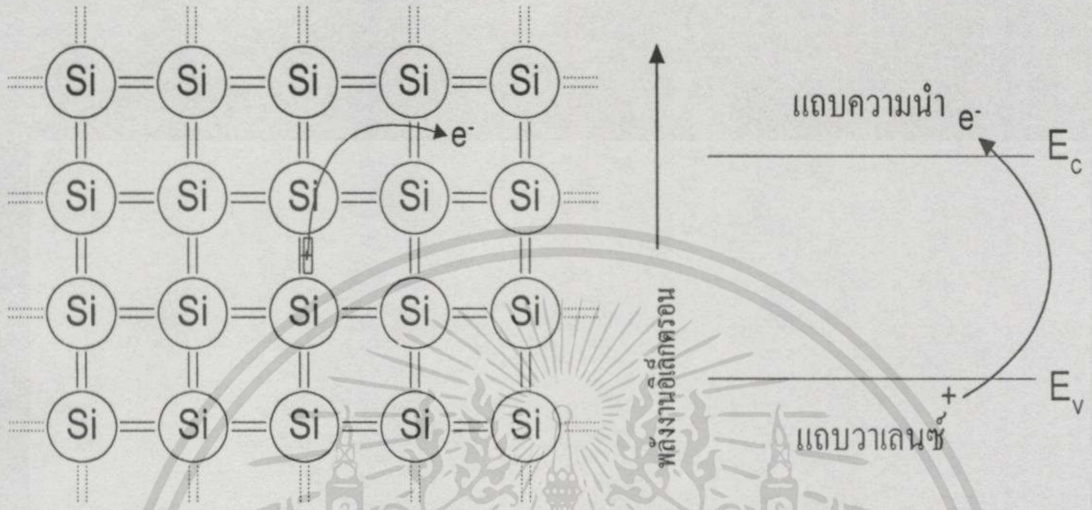
$$n = p = n_i \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ n = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p = ความหนาแน่นของโฮล

n_i = ความหนาแน่นอินทรินซิค



รูปที่ 2.5 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงาน

2.1.1.2 ซิลิคอนเจือปน (Extrinsic Silicon)

ซิลิคอนบริสุทธิ์หรือที่เรียกว่าอินทรินซิคซิลิคอนนั้น ตามความจริงแล้วจะถูกนำไปใช้งานเพื่อการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้น้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอนบริสุทธิ์มีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำและมีค่าจำกัด โดยค่าความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงได้เฉพาะในกรณีที่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น ความร้อนหรือแสง เป็นต้น ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มสภาพความนำไฟฟ้าให้เกิดแก่ผลึกซิลิคอนจึงมีการเติมอะตอมสารเจือธาตุอื่นเข้าไปในผลึกด้วย ผลึกซิลิคอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมของธาตุเจือปน (impurity atom) ถูกเรียกว่า ซิลิคอนเจือปน หรือ เอ็กทรินซิคซิลิคอน ทำให้ผลึกซิลิคอนดังกล่าวมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ

สำหรับอะตอมของธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือปน (impurity) เติมลงไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. อะตอมธาตุเจือปนชนิดเอ็น (n-type impurity atom)

ได้แก่อะตอมของธาตุหมู่ที่ 5 ของตารางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส สารหนู พลวง เป็นต้น เมื่อเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์แล้วจะทำให้ได้ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก อะตอมสารเจือชนิดเอ็นนี้ถูกเรียกว่า อะตอมผู้ให้ (donor atom)

2. อะตอมธาตุเจือชนิดพี (p-type impurity atom)

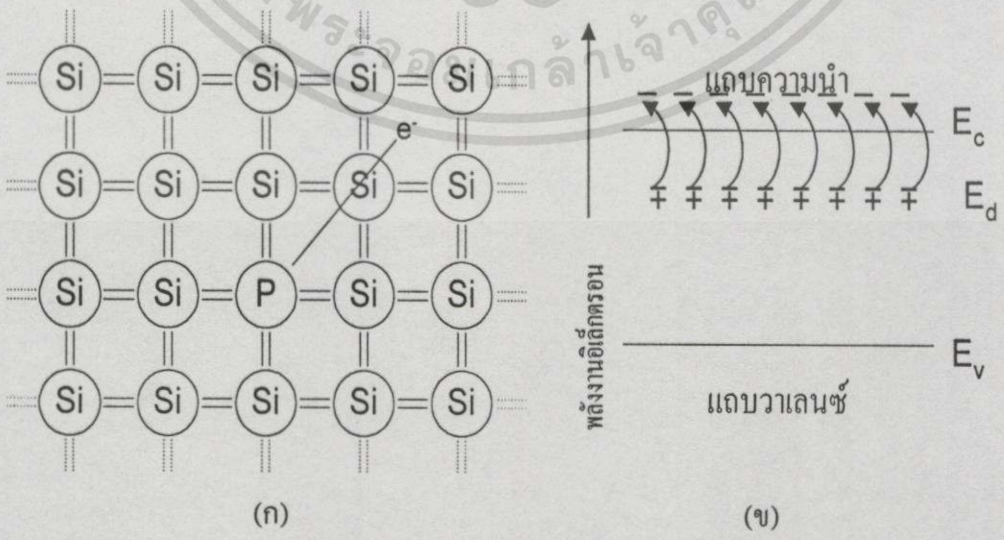
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่อะตอมธาตุเจือชนิดพีในหมู่ที่ 3 ของตารางธาตุเช่น โบรอน อะลูมิเนียม อินเดียม เป็นต้น เมื่อเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์แล้ว จะทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดพี สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกจำนวนมาก อะตอมสารเจือชนิดพีนี้ถูกเรียกว่าอะตอมผู้รับ (acceptor atom)

ส่วนซิลิคอนเจือปนที่ได้หลังจากการเติมอะตอมสารเจือแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดเอ็น หรืออะตอมผู้ให้ เช่น อะตอมของฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 5 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวเมื่ออะตอมถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ซึ่งอยู่รอบๆ เกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ขึ้น 4 พันธะ ดังนั้นจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งไม่มีพันธะจับอยู่ อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะอยู่ในอิทธิพลของนิวเคลียสด้วยแรงยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อยเกือบจะเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องปกติพลังงานจากความร้อนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวได้รับพลังงานและหลุดออกมาเป็นอิสระได้เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างเสรีกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ในสภาพเช่นนี้ปรากฏการณ์พันธะแตกเนื่องจากพลังงานความร้อนก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนซ์หลุดมาเป็นอิสระได้เช่นกัน และทิ้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าชนิดบวกเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ แต่ปริมาณโฮล และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะแตกนี้จะมีจำนวนน้อย ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงมีปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอนที่มากกว่าโฮล ทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดจึงนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดลบ (Negative charge) ดังนั้นเราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่าผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n : ย่อมาจาก negative) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้ และลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

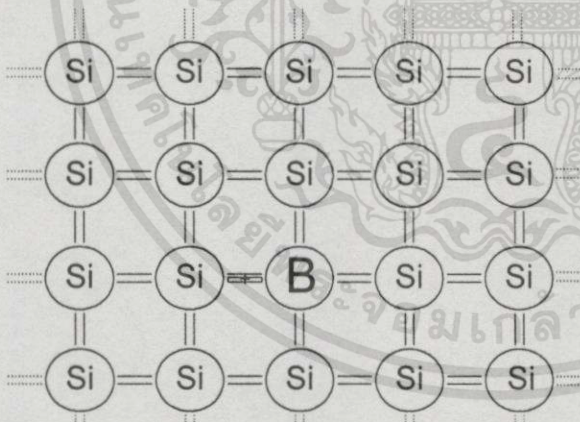


รูปที่ 2.6 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดเอ็น

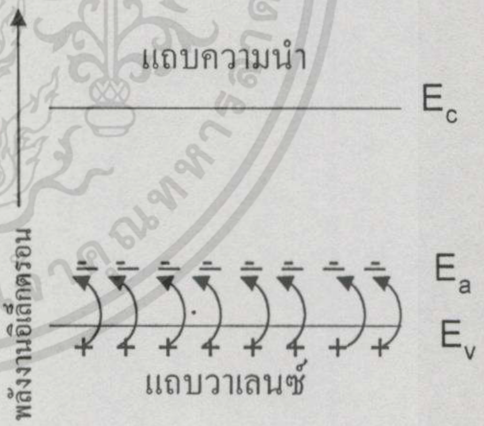
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลึกซิลิคอนชนิดพี (p-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี หรือที่เรียกว่า อะตอมผู้รับ เช่น อะตอมของโบรอน ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียง 3 ตัว เมื่ออะตอมสารเจือผู้รับถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมของผลึกซิลิคอนที่อยู่ข้างเคียงอีก 4 อะตอม แต่อะตอมสารเจือชนิดนี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ดังนั้นจึงสามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ได้เพียง 3 ตัวพันธะเท่านั้น ส่วนอีกหนึ่งพันธะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนซ์ใกล้ๆ มีโอกาสที่จะเข้าไปอยู่ในที่ดังกล่าวเพื่อทำให้เป็นพันธะที่สมบูรณ์ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากพันธะโควาเลนซ์ก็จะทิ้งให้เกิดโฮลขึ้นมา โฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกสามารถนำไฟฟ้าได้ อะตอมของสารเจือชนิดนี้ เมื่อได้อิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามาก็จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนและโฮลจำนวนเล็กน้อยที่สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากพลังงานจากความร้อนซึ่งทำให้พันธะแตกออก ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดพีจึงมีปริมาณของประจุพาหะโฮลมากกว่าจำนวนของอิเล็กตรอน และสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดบวก (positive charge) เราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่า ผลึกซิลิคอนชนิดพี (p : ย่อมาจาก positive) การเกิดโฮลเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้รับและลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดพีแสดงได้ดังในรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก)



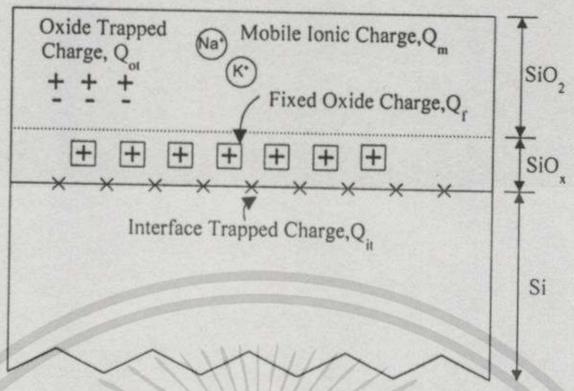
(ข)

รูปที่ 2.7 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 อินเตอร์เฟสแทรบ (Interface trap) และออกไซด์ชาร์จ (Oxide charge)

การจำแนกประเภทพื้นฐานของประพาหะและแทรบเหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ชนิดด้วยกันคือ



รูปที่ 2.8 ประเภทของอินเตอร์เฟสแทรปและออกไซด์ชาร์จ

1. อินเตอร์เฟสแทรบชาร์จ (Interface trapped charge ,Q_{it})

อินเตอร์เฟสแทรบชาร์จ Q_{it} เกิดเนื่องจากคุณสมบัติของรอยต่อของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์และขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของรอยต่อทั้งสอง ตำแหน่งที่ตั้งของแทรบเหล่านี้อยู่ที่รอยเชื่อมต่อของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีระดับพลังงานอยู่ในแถบต้องห้ามของซิลิคอน

2. ฟิกซ์ออกไซด์ชาร์จ (Fixed oxide chagre ,Q_f)

ฟิกซ์ออกไซด์ชาร์จ Q_f มีตำแหน่งอยู่ภายในช่วงประมาณ 30 อังสตรอมของรอยเชื่อมต่อซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ ประจุเหล่านี้อยู่กับที่ไม่สามารถถูกประจุหรือคายประจุได้ โดยปกติแล้ว Q_f มีค่าเป็นบวกและขึ้นกับเงื่อนไขการทำออกซิเดชันและการแอนนีลและระนาบของซิลิคอน ไอออนของซิลิคอนบางตัวจะยังคงอยู่ใกล้กับรอยเชื่อมต่อ ไอออนเหล่านี้และพันธะที่ไม่สมบูรณ์ของซิลิคอนเช่น Si-Si และ Si-O ที่ผิวเป็นสาเหตุให้เกิดฟิกซ์ชาร์จ

3. ออกไซด์แทรบชาร์จ (Oxide trapped charge ,Q_{Ot})

ออกไซด์แทรบชาร์จ Q_{Ot} เกี่ยวข้องกับจุเสีย ในซิลิคอนไดออกไซด์ ประจุเหล่าเกิดจากสาเหตุดังเช่น การแผ่รังสีเอ็กซ์ หรือ high-energy electron bombartment แทรบเหล่านี้จะกระจายอยู่ทั่วไปในชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์

4. โมบิลไอออนิกชาร์จ (Mobile ionic charge ,Q_m)

โมบิลไอออนิกชาร์จ Q_m ดังเช่น โซเดียมหรือไอออนิกของธาตุอัลคาไลด์อื่นๆ จะเคลื่อนที่ภายในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิและศักย์ดาไฟฟ้าที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน (Thermoelectric Effect)

เป็นปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนและไฟฟ้า เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ปรากฏการณ์คือ

1. ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

เป็นปรากฏการณ์นี้สังเกตุได้จากการทดลองเมื่อนำวัสดุตัวนำต่างกัน 2 ชนิด โดยการนำปลายทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน และปลายทั้งสองถูกทำให้มีอุณหภูมิต่างกัน ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรโลหะ

2. ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงวัสดุตัวนำต่างกัน 2 ชนิด ที่ปลายทั้งสองด้านถูกเชื่อมต่อกัน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อที่ถูกเชื่อม โดยความร้อนจะถูกคลายออกมาด้านหนึ่งและปลายอีกด้านหนึ่งดูดความร้อน ซึ่งจะขึ้นกับทิศทางกระแสที่ไหล

3. ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงวัสดุตัวนำที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุแท่งตัวนำ จะเกิดการดูดความร้อนและคลายความร้อน

จากปรากฏการณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นที่รู้จักกันดีและประยุกต์ใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลซึ่งถูกใช้วัดความแตกต่างของอุณหภูมิ ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์เพลเทียร์จะได้รับความสนใจน้อยกว่าแบบแรก แต่ถูกประยุกต์ใช้ทำเป็นระบบทำความเย็นและระบบทำความร้อนที่ใช้โครงสร้างเดียวกัน ส่วนปรากฏการณ์ทอมสันได้รับความสนใจน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองปรากฏการณ์ที่กล่าวมาและไม่มีการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ โทมัส ซีเบ็ค (Thomas Seebeck) ในราวปี ค.ศ. 1822 พบว่าเมื่อนำโลหะสองเส้นชนิดต่างกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน ซึ่งปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองตามรูปที่ 2.9 ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสอง และถ้าเปิดจุดต่อเชื่อมด้านหนึ่งออกจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force) ที่ปลายเปิด ซึ่งถูกเรียกว่า "เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)" แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสอง เมื่ออิเล็กตรอนได้รับความร้อนจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่และไปสะสมอยู่ที่ปลายด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของเทอร์โมคัปเปิลได้ดังสมการที่ 2.2

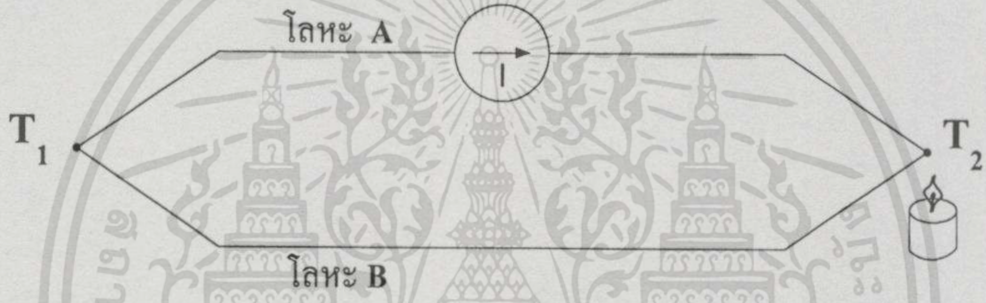
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{AB} = \alpha_{AB}(T_2 - T_1) \tag{2.2}$$

เมื่อ α_{AB} คือค่าสัมประสิทธ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) ของวัสดุ A เทียบกับวัสดุ B เป็นค่าคงที่ มีหน่วยเป็น V/K T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) และ V_{AB} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force)

เมื่อนำเทอร์โมคัปเปิลมาใช้งานโดยการนำรอยต่อ AB ไปยังจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิและปลายอีกด้านหนึ่งอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิที่รู้ค่า ทำให้เทอร์คัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัปเปิลดำเนินต่อมาจนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.9 วงจรปิดจะเกิดกระแสไหลวน

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล

2.2.1.1 กฎการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Laws)[4]

1. กฎของวงจรโลหะชนิดเดียวกัน (Law of the Homogeneous Circuit)

เป็นวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยโลหะชนิดเดียวกัน จะไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อเกิดความต่างของอุณหภูมิ ณ ปลายจุดทั้งสอง

แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดในกรณีที่ลวดทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกันเท่านั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้าง

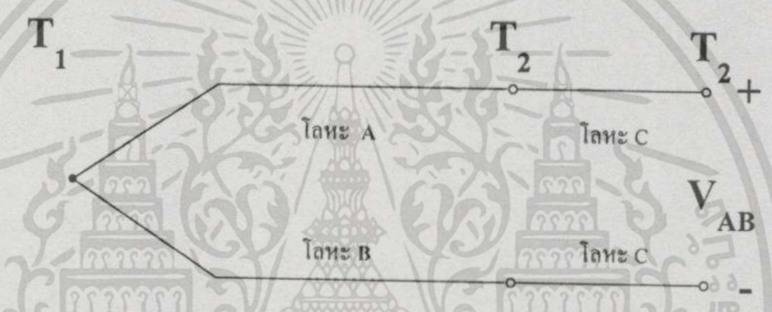
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กฎของโลหะ (Law of Intermediate Metals)

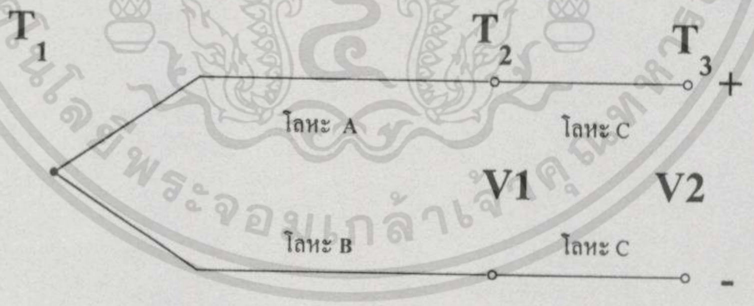
ในวงจรเทอร์โมคัปเปิล ถ้ามีโลหะแทรกอยู่ในส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจร หากจุดต่อของปลายโลหะแทรกทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากันแล้ว โลหะที่แทรกนี้จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในทางปฏิบัติมีอยู่เสมอ เช่น ข้อต่อ หรือลวดทองแดงที่ต่อเข้ากับขามิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยมีโลหะ C ที่ต่อแทรกอยู่ในวงจรจะไม่มีผลต่อการวัดถ้าอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองเท่ากัน

3. กฎของอุณหภูมิแทรก (Law of Intermediate Temperature)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลชุดใดๆ ที่มีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกัน จะมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลชุดนั้น ตามรูปที่ 2.12 คือ ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลรวมเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองชุด



รูปที่ 2.11 โลหะแทรก



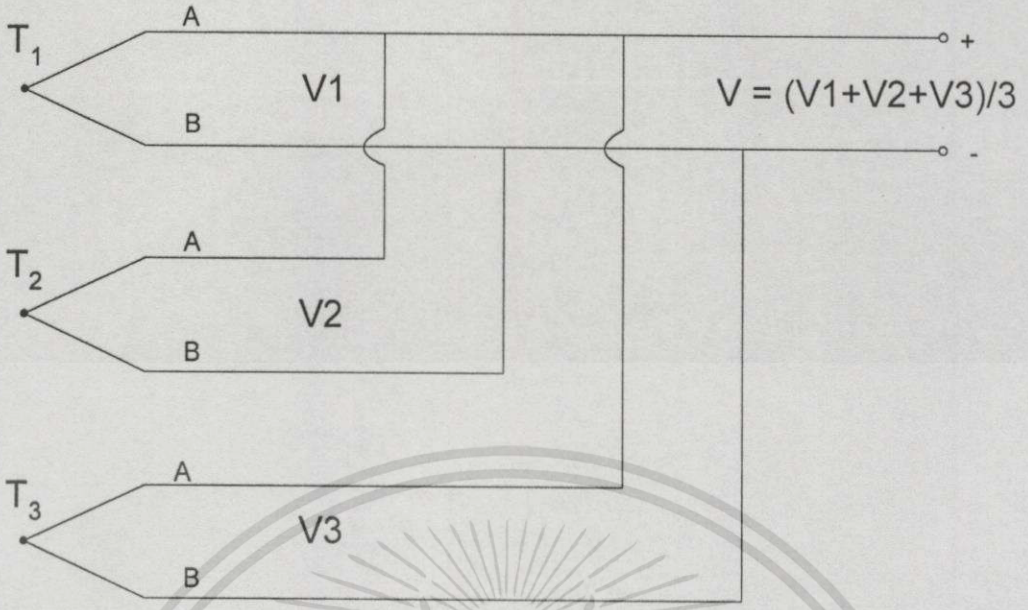
$$V = V1 + V2$$

รูปที่ 2.12 กฎของการแทรกอุณหภูมิ

2.2.1.2 ผลของการนำเอาเทอร์คัปเปิลมาต่อกันจะได้ดังนี้

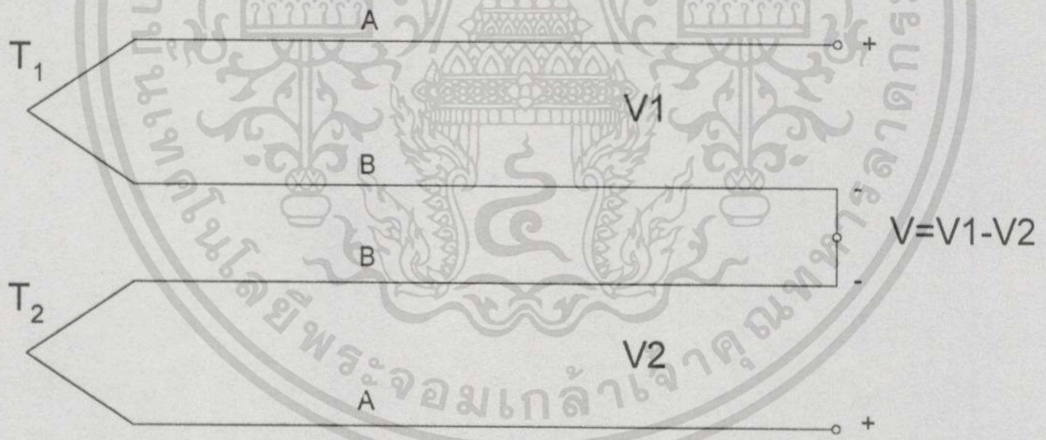
1. การนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่อขนานกัน ผลที่ได้คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย แสดงดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การต่อขนานเทอร์โมคัปเปิล

2. การนำเทอร์โมคัปเปิลสองชุดมาต่อกลับขั้วกันจะให้ผลของเอาท์พุทลดลงแสดงดังรูปที่ 2.14



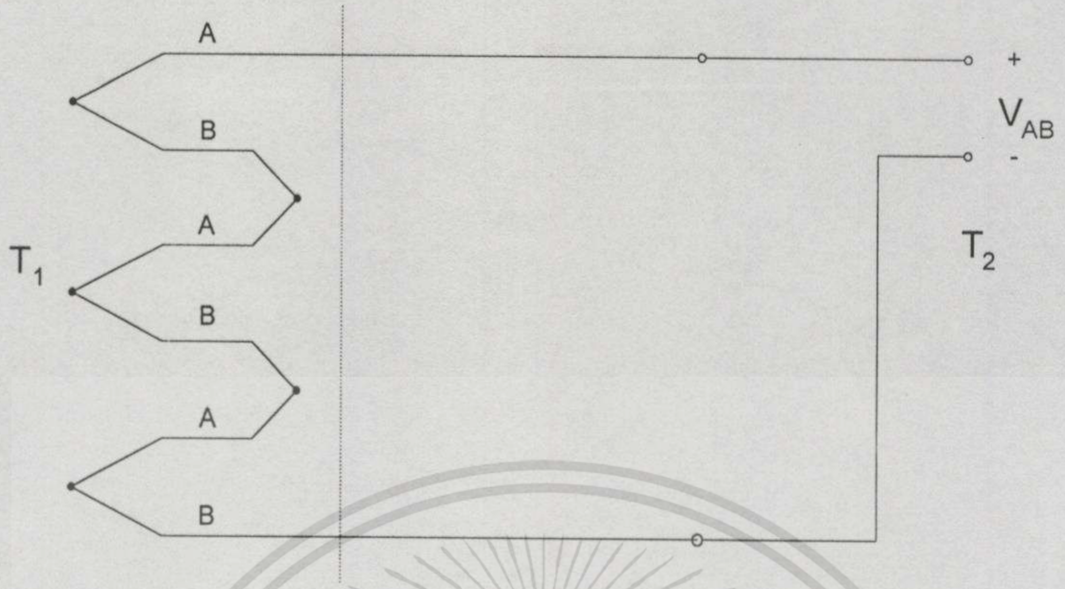
รูปที่ 2.14 การหาผลต่างกลับขั้วของเทอร์โมคัปเปิล

3. การเพิ่มจำนวนเทอร์โมคัปเปิลมาต่อกัน จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.15

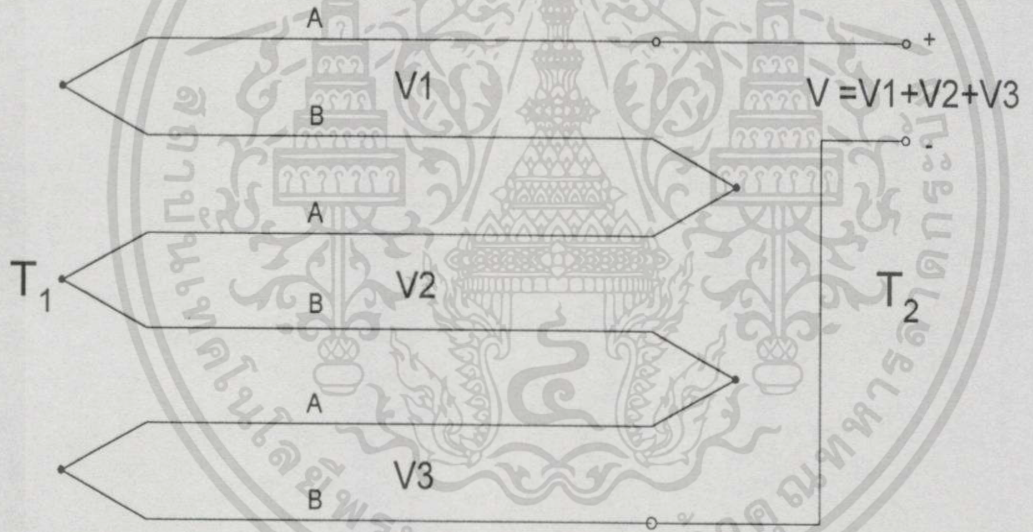
4. การนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่ออนุกรมกัน จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าก็คือผลรวมของจำนวนเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชุดมารวมกัน แสดงดังรูปที่ 2.16 ถูกเรียกว่า “เทอร์โมไพล์ (Thermoplie)”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.15 การต่อเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า



รูปที่ 2.16 การต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิล

ปัจจุบันคุณสมบัติของปรากฏการณ์ซีเบ็คได้ถูกศึกษากันอย่างกว้างขวาง[5] แต่อย่างไรก็ตามการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายโครงสร้างของอิเล็กตรอนและการกระเจิงของอิเล็กตรอน (electron scatering) ที่เป็นไปตามทฤษฎีและผลการทดลอง และบ่อยครั้งก็ไม่เป็นไปตามทฤษฎีและผลการทดลอง ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ซีเบ็คนั้นต้องรู้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแท่งวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

41501

ก. การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ (change of fermi level)

ระดับเฟอร์มิมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ทำให้ปลายทั้งสองมีระดับเฟอร์ไม่เท่ากัน

ข. การเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงาน (band gap change)

ในสภาวะของแข็งอิเล็กตรอนเท่านั้นที่สามารถมีพลังงานได้หลายสถานะ ในแถบพลังงานของโลหะจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม ในการตรงกันข้ามของสารกึ่งตัวนำและฉนวน โดยที่แถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและแถบคอนดัคชันไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย ความกว้างของแถบพลังงานขึ้นกับอุณหภูมิ ทำให้เกิดการไหลของประจุพาหะระหว่างปลายทั้งสองของแท่งวัสดุ

ค. การเปลี่ยนแปลงความเข้นข้นของประจุพาหะ (change carrier concentration gradient change)

การเปลี่ยนแปลงความเข้นข้นของประจุพาหะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นสาเหตุให้ความเข้นข้นของประจุพาหะเปลี่ยนไปส่งผลให้เกิดการแพร่ประจุพาหะ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient change)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับระยะการชนของอนุภาคและค่าความพร่องตัวของประจุพาหะ จากที่กล่าวมาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นสาเหตุของการแพร่ของประจุพาหะตามแท่งของวัสดุ

จ. การแพร่ของความร้อน (thermal diffusion)

พลังงานจลน์ของอนุภาคและประจุพาหะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยที่ปลายด้านร้อนอนุภาคจะมีพลังงานสูงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนไปยังบริเวณที่เย็นกว่าและจะมีการสะสมของอนุภาคและประจุพาหะที่ปลายทั้งของวัสดุ

ช. โฟนอนดราก (phonon drag)

เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีฟลักซ์ (flux) ความร้อนไหลตามแท่งวัสดุ ฟลักซ์ความร้อนจะถูกพาไปโดยประจุพาหะและโฟนอน โดยที่โฟนอนเป็นผลจากการสั่นของแลตทิซ (lattace) ทั้งประจุพาหะและโฟนอนจะมีความสัมพันธ์และอิทธิพลต่อกัน

ซ. การสะสมของประจุพาหะ (change accumulation)

จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสาเหตุของการสะสมของประจุพาหะที่อยู่ที่ปลายทั้งสองของแท่งวัสดุจะมีขั้วประจุต่างกันเป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ในกรณีที่เป็นวงจรเปิดสนามไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะสมดุล จากปรากฏการณ์ทั้งหมดมีผลครอบคุมค่าซีเบ็คของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.3 ปรากฏการณ์ซีเบ็คในโลหะ (Seebeck effect in metal)

โลหะเป็นวัสดุตัวนำซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะที่นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ดังนั้น ปรากฏการซีเบ็คเป็นคุณสมบัติของวัสดุทุกตัว แต่การวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของวัสดุตัวนำต้องมีรอยต่อของวัสดุที่ต่างกันดังนั้นนิยามของซีเบ็ค คือ

$$\Delta V = \alpha_A \Delta T \qquad (2.3)$$

α_A คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะ A และ ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ A ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะต่างกันของโลหะ A และ B ถูกนิยามโดยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \qquad (2.4)$$

ในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะตัวนำต่างๆ ต้องเลือกโลหะตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวอ้างอิงในการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คโดยต้องมีค่าซีเบ็คต่ำๆ Pt ถูกเลือกเป็นโลหะอ้างอิงในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะต่างๆ และรู้คุณสมบัติเป็นอย่างดี ที่อุณหภูมิสูงๆ Pt มีเสถียรภาพดี แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุ โดยที่จุดอ้างอิงอยู่ที่ 0 ^{0}C และจุดที่วัด 100 ^{0}C [5]

ธาตุ	E.m.f (mV)	ธาตุ	E.m.f (mV)
Bismuth	-7.34	Indium	+0.69
Nickel	-1.48	Carbon	+0.70
Cobalt	-1.33	Rhodium	+0.70
Mercury	-0.60	Silver	+0.74
Palladium	-0.57	Copper	+0.76
Calcium	-0.51	Zinc	+0.76
Thorium	-0.13	Gold	+0.78
Platinum	0.00	Cadmium	+0.90
Tantalum	+0.33	Tungsten	+1.12
Aluminium	+0.42	Cerium	+1.14
Tin	+0.42	Molybdenum	+1.45
Lead	+0.44	Lithium	+1.82
Magnesium	+0.44	Iron	+1.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการพิจารณาในกรณีการเกิดปรากฏการณ์ซีเบ็คเนื่องจากการแพร่ของความร้อน (จ) เมื่ออิเล็กตรอนได้รับความร้อนที่ปลายแท่งโลหะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากบริเวณที่ปลายร้อนไปยังปลายด้านเย็นเพราะว่าอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบทำให้ปลายด้านเย็นมีประค่าเป็นลบและปลายด้านร้อนมีค่าเป็นบวก จะได้ผลค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นลบซึ่งเป็นไปตามผลที่คาดการณ์ไว้ แต่กลไกลการแพร่ความร้อนยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่ตารางที่ 2.1 เพราะว่าโลหะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระแต่อย่างไรก็ตามยังมีโลหะบางชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นบวกและนั้นหมายถึงอิเล็กตรอนไปสะสมที่ปลายร้อนของแท่งโลหะ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการทางไฟฟ้าของโลหะทำให้เกิดปรากฏการณ์ซีเบ็คคือ การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ (ก) การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ (ง) และการแพร่ของความร้อน (จ) ในสภาวะสมดุลของปรากฏการณ์จะถูกชดเชยด้วยสนามไฟฟ้าสาเหตุเนื่องมาจากการสะสมของประจุไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ (ซ) การเปลี่ยนอุณหภูมิทำให้ระดับเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงเพราะกฎการแยกตัวเพาลีก์ (Pauli exelusion priciple) ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์สถานะของพลังงานอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิที่จะมีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่และที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับเฟอร์มิขึ้นไปจะมีแต่ความว่างเปล่า กล่าวคืออิเล็กตรอนมีพลังงานไม่เกินระดับเฟอร์มิ ที่อุณหภูมิใดๆ สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนถูกควบคุมโดยฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิไดแรค (fermi-dirac distribution function)

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{1+\exp[\frac{E-E_F}{kT}]} \tag{2.5}$$

โดยที่ k คือค่าคงที่ของ โบลซ์แมน (Boltzmann) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ เมื่ออุณหภูมิ 0 K ค่า E_F (T) จะมีระดับพลังงานเท่ากับ $E_F(0)$ ในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้ $E_F(T)$ มีระดับไม่เท่ากับ $E_F(0)$ มีผลให้มีอิเล็กตรอนสามารถอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงกว่าเดิมได้ อย่างไรก็ตามการอธิบายปรากฏการณ์เทอร์อิเล็กทริกเป็นเรื่องที่ละเอียดอ่อนและสำคัญมาก สำหรับการคำนวนหาจำนวนรวมอิเล็กตรอน n ตัวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโลหะซึ่งมีพลังงานอยู่ในช่วง E และ E+dE เท่ากับจำนวนสถานะพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (density of available energy state) N(E) คูณกับฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์ไดแรคและทั้งหมดถูกอินทริเกรต

$$n = \int N(E) f_{FD}(E) dE \tag{2.6}$$

โดยที่ N(E)dE คือจำนวนสถานพลังงานที่จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในช่วงพลังงาน E ถึง dE ที่อุณหภูมิ 0 K สถานะของพลังงานทั้งหมดจะอยู่ที่ $E_F(0)$ ที่ระดับพลังงานสูงกว่า $E_F(0)$ จะมีแต่ความว่าง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนที่ครอบครองพลังงานที่ต่ำกว่า E_F ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

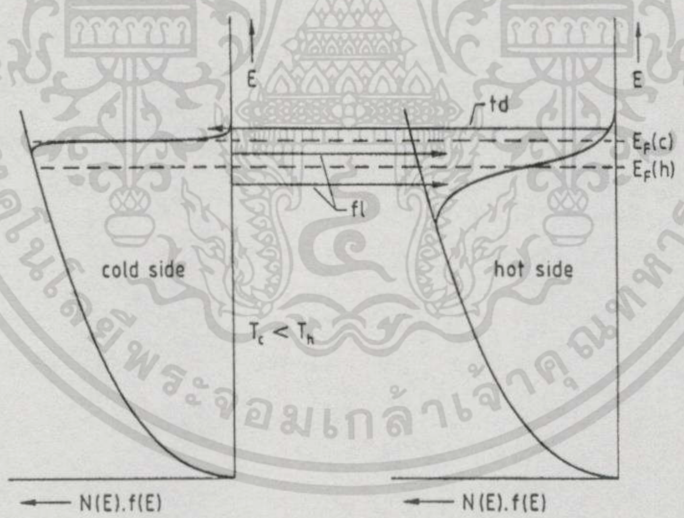
พลังงานเพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนสามารถขึ้นไปครอบครองสถานะพลังงานที่สูงกว่า E_F เป็นสาเหตุของการโค้งงอของระดับ การลดลงของระดับเฟอร์มิแสดงดังสมการ คือ

$$E_F(T) = E_F(0) - \frac{\pi^2 k^2 T^2}{12 E_E} \qquad (2.7)$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป

$$E_F(T) = E_F(0) - \frac{\pi^2 k^2 T^2}{6 E_E} \frac{d(\ln N(E))}{dE} \qquad (2.8)$$

จากสมการอธิบายการลดลงของระดับเฟอร์มิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่ปลายแท่งโลหะได้รับความร้อนมีผลให้ระดับเฟอร์มิอยู่ต่ำกว่าปลายด้านเย็นมีอิเล็กตรอนไหลจากปลายด้านร้อนไปยังปลายด้านเย็นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นบวกซึ่งตรงกันข้ามกรณีของการแพร่ของประจุพาหะเมื่อได้รับความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.17



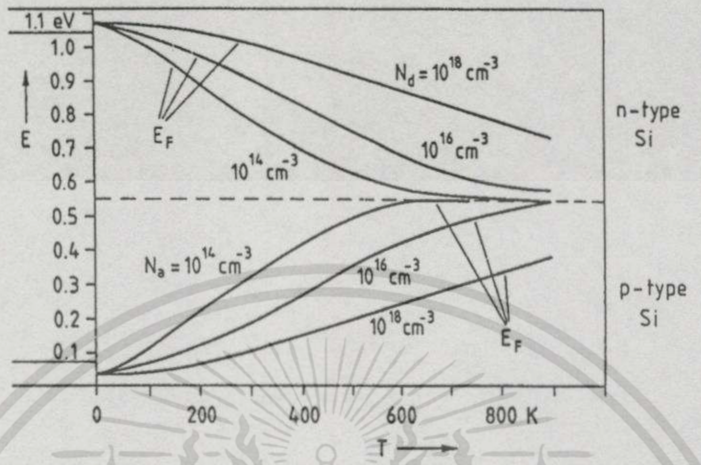
รูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนระดับเฟอร์มิและแพร่ของอิเล็กตรอน

2.2.1.4 ปรากฏการณ์ซีเบ็คในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

ในการเปรียบเทียบขนาดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะนั้นสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงกว่าโลหะมาก ซึ่งซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่นำไปใช้สร้างเป็นวงจรรวม (IC) นอกจากนี้ยังมีประโยชน์อีกข้อหนึ่งของซิลิคอนมีคุณสมบัติคือสามารถพัฒนาใช้กับโครงสร้างใหม่ๆ ได้ มื่อนำแท่งซิลิคอนมาทำให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านจะเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มิที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งเฟอร์มิในช่วงแบนด์กับของซิลิคอนที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ N_d และ N_a

จากรูปที่ 2.18 สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มิ ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับเฟอร์มิจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมาก สำหรับซิลิคอนชนิดเอ็นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นลบและซิลิคอนชนิดพีได้ค่าซีเบ็คเป็นบวก ดังนั้นการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คสามารถใช้บอกชนิดและความเข้มข้นของสารเจือซิลิคอนได้

สารกึ่งตัวนำบริสุทธ์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งเป็นสาเหตุทำให้มีประจุพาหะเพิ่มขึ้นเพราะว่าโฮลและอิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนที่ต่างกัน (ค และ ง) และขนาดของแถบพลังงานเองก็มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อตำแหน่งของเฟอร์มิ (ก) สามารถประค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คสำหรับซิลิคอนชนิดเอ็น

$$\alpha(a) = \frac{1}{q}\frac{dE_F}{dT} = -\frac{k}{q}\left(\ln\frac{N_c}{N_d} + \frac{3}{2}\right) \qquad (2.9)$$

โดยที่ N_c คือความหนาแน่นของสถานะพลังงานในชั้นของคอนดัคชัน N_d คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือและ k คือค่าคงที่โบลซ์แมน จากการเปลี่ยนแปลงระดับของเฟอร์มิมีผลที่ตามมาคือ (ง) และ (จ) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประจุพาหะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นและเคลื่อนยังบริเวณที่เย็นกว่า นอกจากนั้นยังเกิดการกระเจิงของประจุพาหะซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha(d) = -\frac{k}{q}(1+s) \tag{2.10}$$

โดยที่ s คือความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการชนเฉลี่ยระหว่างการชนและพลังงานงานของประจุพาหะ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเกิดการไหลของโฟนอนจากปลายด้านร้อนไปด้านเย็น(ช) การสั่นของโฟนอนสามารถถ่ายเทโมเมนตัมของประจุพาหะทำให้เกิดการลาก(drag)ของประจุพาหะ แสดงดังสมการ

$$\alpha(f) = -\frac{k}{q}\phi \tag{2.11}$$

โดยที่ ϕ คือค่าโฟนอนดราก

สำหรับซิลิคอนชนิดเอ็นได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ครวมเป็น

$$\alpha = -\frac{k}{q}(\ln\frac{N_c}{N_d} + \frac{5}{2} + s_n + \phi_n) \tag{2.12}$$

สำหรับซิลิคอนชนิดพีได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ครวมเป็น

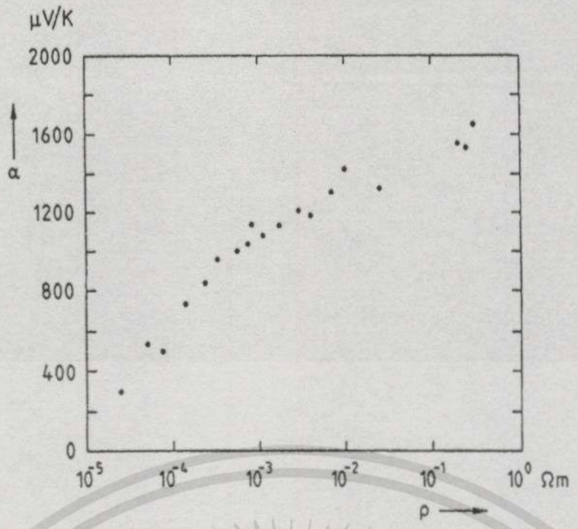
$$\alpha = -\frac{k}{q}(\ln\frac{N_v}{N_a} + \frac{5}{2} + s_p + \phi_p) \tag{2.13}$$

ในทางปฏิบัติการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของซิลิคอน (α_s) จะใช้ความสัมพันธ์ของสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ρ ซึ่งสามารถประมาณได้ดังสมการ

$$\alpha_s = \frac{mk}{q}\ln(\frac{\rho}{\rho_0}) \tag{2.14}$$

โดยที่ m คือค่าคงที่ มีค่าประมาณ 2.6 และ ρ_0 extrapolated Si resistance zero α_s (5×10^{-6} Ω.m) ดังแสดงรูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของซิลิกอนผลึกเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 300 องศาเควิน กับสภาพความต้านทานที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเทียบกับสภาพความต้านทานซิลิคอน

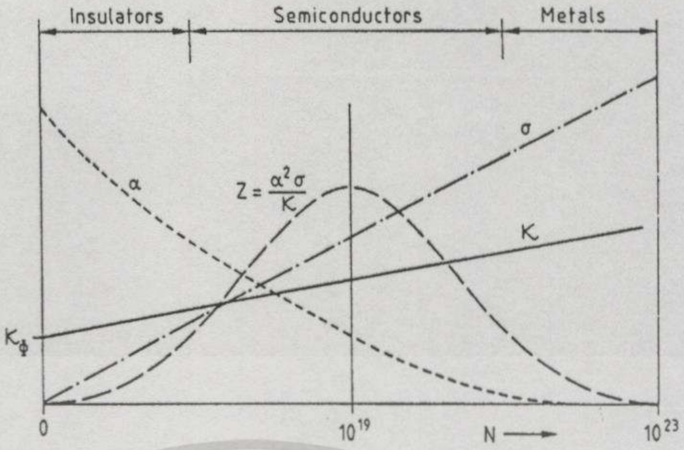
ปรากฏการณ์เบ็คในสารกึ่งตัวนำและโลหะ โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงกว่าโลหะมาก ต่อมาได้มีการนำเสนอค่า efficient energy converter converters โดย Professor A.V. Joffe เป็นโครงสร้าง thermoelectric energy converters สำหรับ power converter ที่เรียกว่า figure of merit Z แสดงดังสมการ

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{K} \tag{2.15}$$

โดยที่ α คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค σ คือค่าความนำไฟฟ้าและ K คือค่าการนำความร้อน สำหรับประสิทธิภาพของ power converters ของวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าสูงและการนำความร้อนต่ำจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิสูง แต่ในทางปฏิบัติคุณสมบัติการนำทั้งสองอย่างขึ้นตรงกับความหนาแน่นของประจุพาหะ สำหรับวัสดุที่เหมาะสมคือสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเติมอะตอมสารเจือให้มีความเข้มข้นสูงเพราะว่าคุณสมบัติของวัสดุจะมีโฟนอนที่ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง จากรูปที่ 2.20 เป็นการเปรียบเทียบของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ ความสำคัญของค่าคงที่ ที่ได้จากการคำนวนจาก figure of merit Z ได้แสดงความสัมพันธ์ของ Z และ ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ โดย K_ϕ คือค่าโฟนอน K คือค่าการนำความร้อนนี้ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุพาหะ

จากความสัมพันธ์ของกราฟทำให้คาดการณ์ความสัมพันธ์ความหนาแน่นของประจุพาหะที่เพิ่มขึ้นและถ้าความหนาแน่นประจุพาหะเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Z เพิ่มขึ้นด้วยเพราะว่าระดับของเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเจือ จากกราฟแสดงค่า Z สูงสุดในช่วงความหนาแน่นของสารเจือระหว่าง 10^{18} ถึง 10^{21} cm^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ

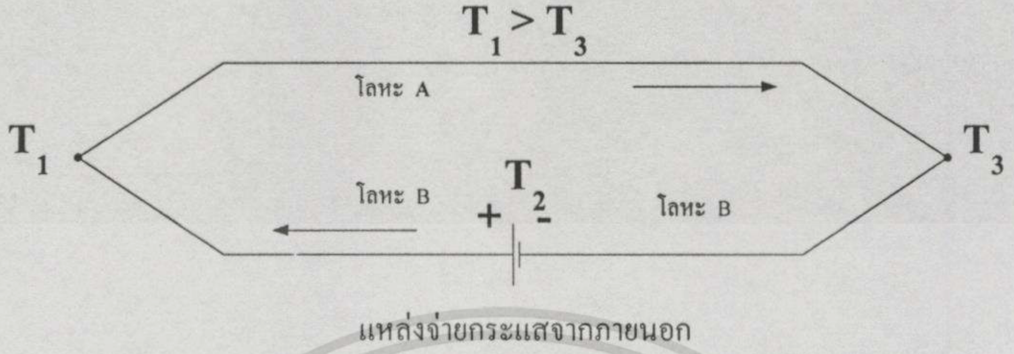
2.2.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

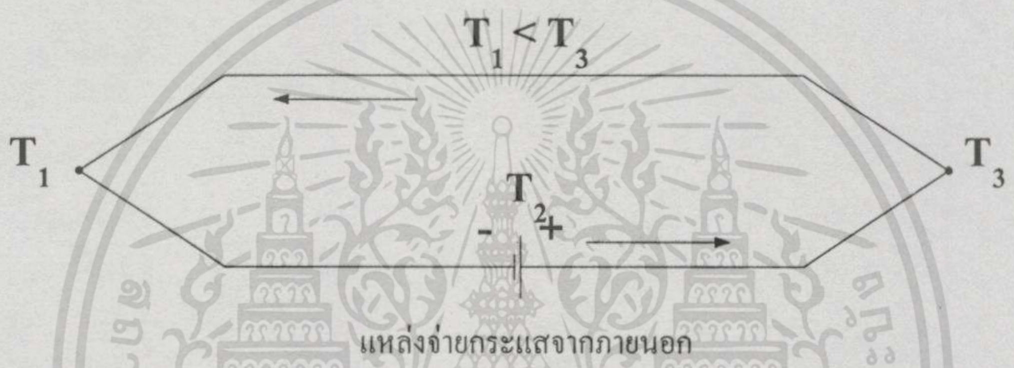
ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ ฌอง ซี เอ เพลเทียร์ (Jean C. A. Peltier) ในปี ค.ศ. 1834 เมื่อนำวัสดุตัวนำ 2 ชนิดต่างกันนำปลายทั้งเชื่อมต่อกัน พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจร จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของจุดเชื่อมต่อแตกต่างกัน โดยที่ปลายด้านหนึ่งจะคลายความร้อนและอีกปลายด้านหนึ่งดูดความร้อน วงจรการทดลองของเพลเทียร์ แสดงดังรูปที่ 2.21 ถ้าเราเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำให้น้ำเป็นน้ำแข็งหรือเดือดที่จุดรอยต่อนั้นเพียงแต่เปลี่ยนทางการไหลของกระแสเท่านั้น ทำให้ได้รับความสนใจอย่างมาก เพราะเชื่อว่ามีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องปรับอากาศในฤดูร้อนและเครื่องกำเนิดความร้อนในฤดูหนาว แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าอุปกรณ์นี้มีประสิทธิภาพต่ำ จึงทำให้อุปกรณ์ของเพลเทียร์ได้รับความสนใจน้อยลง แต่ก็ยังมีการใช้อยู่ในระบบเล็กๆ ที่ใช้พลังงานน้อย เช่น ระบบทำความเย็นเฉพาะจุด ปรากฏการณ์เพลเทียร์เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานประจุพาหะที่เคลื่อนที่จากวัสดุ A ไปยังอีกวัสดุ B ซึ่งรอยต่อมีระดับพลังงานต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.22 อิเล็กตรอนซึ่งมีระดับพลังงาน E_a จะเคลื่อนที่จากวัสดุ A ไปยัง B ทำให้อิเล็กตรอนจำเป็นต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นโดยการดูดพลังงานเพื่อเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนให้มีพลังงานเท่ากับระดับพลังงาน E_b และเมื่ออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากวัสดุ B ไปวัสดุ A ทำให้อิเล็กตรอนอิเล็กตรอนต้องคายพลังงานออกมาก ซึ่งจะทำให้หาความสัมพันธ์ความหนาแน่นของกระแส (J) ที่รอยต่อวัสดุ A และ Bได้ดังนี้

$$J_a - J_b = \Delta J_h = n_a E_a v_a - n_b E_b v_b \tag{2.16}$$

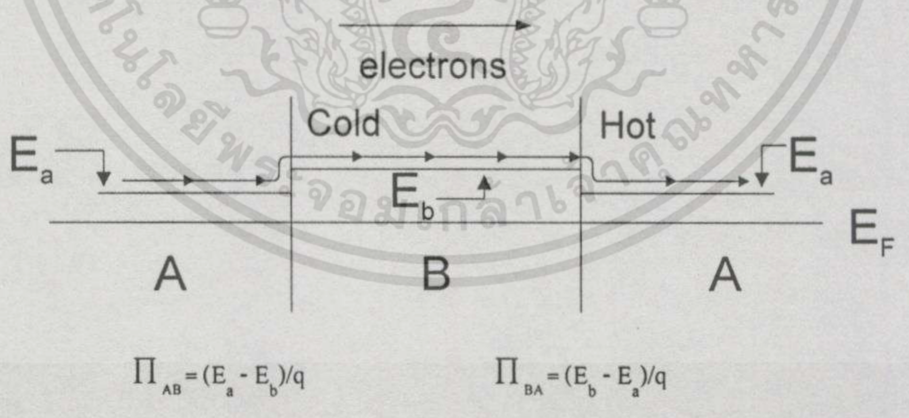
เพราะว่ากระแสไหลผ่านวัสดุ A และ B จะมีค่าเท่ากันและ q คือประจุของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.21 วงจรการทดลองของเพลเทียร์



รูปที่ 2.22 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของวัสดุตัวนำ

$$J_e = n_a q v_a = n_b q v_b \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta J_h = \frac{J_e}{q}(E_a - E_b) \qquad (2.18)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของเพลเทียร์ (Peltier coefficient) Π_{ab} ระหว่างวัสดุ 2 ชนิด คือ ปริมาณความร้อนที่ดูดหรือคายต่อหนึ่งหน่วยกระแส

$$\Pi_{ab} = \frac{\Delta J_h}{J_e} = \frac{1}{q}(E_a - E_b) \qquad (2.19)$$

2.2.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

ตามกฎความร้อนของจูล เมื่อกระแสไหลผ่านวัสดุตัวนำจะทำให้เกิดความร้อน อย่างไรก็ตามสำหรับแท่งวัสดุตัวนำที่มีอุณหภูมิตลอดทั้งแท่งไม่เท่ากัน เพราะว่าที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เมื่อให้กระแสไหลผ่านจะทำให้พลังงานของประจุพาหะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งบนแท่งวัสดุตัวนำ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานของประจุพาหะจะสัมพันธ์กับการสั่นของแลตทิซบนแท่งวัสดุ ซึ่งประจุพาหะอาจดูดความร้อนหรือคลายความร้อนให้กับแลตทิซ ดังนั้นปรากฏการณ์ทอมสันแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\Delta J_h = \gamma \Delta T J_e \qquad (2.20)$$

โดยที่ ΔJ_h คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่ดูดหรือคลาย γ คือ สัมประสิทธิ์ของทอมสัน (Thomson coefficient) ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ และ J_e คือ ความหนาแน่นของกระแส

2.3 การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer)[6]

ในทางเทอร์โมไดนามิคส์(thermodynamic) ลักษณะของพลังงานนั้นจะระบุสภาวะของระบบ โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าพลังงานจะสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายไม่ได้ เพียงแต่มีความสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ ดังนั้นความรู้ทางเทอร์ไดนามิคส์ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและรูปอื่นๆ ของพลังงาน แต่ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ การถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีการทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถวัดได้โดยการสังเกตุ พบว่าเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นในระบบแล้วจะมีการไหลของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการไหลของความร้อนจากบริเวณเกิดขึ้นได้เมื่อไรก็ตามที่มีความแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอุณหภูมิในระบบ ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิในระบบจึงจำเป็นมาก ในการศึกษาการถ่ายเถความร้อนและถ้าทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ทำให้สามารถหาฟลักซ์ความร้อน(heat flux) ซึ่งเป็นค่าของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้จากกฎหรือสมการซึ่งเกี่ยวข้องระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ปัญหาในการหาค่าการกระจายของอุณหภูมิและการไหลของความร้อนเป็นสิ่งที่น่าสนใจในสาขาต่างๆ ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น หม้อน้ำ (boilers) คอนเดนเซอร์ (condensor) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเมื่อชิพทำงานจะทำให้เกิดความร้อนทำให้ต้องออกแบบชิพให้สามารถระบายความร้อนได้ดี ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจึงเป็นสิ่งสำคัญหรับกำหนดขนาดของอุปกรณ์นั้นๆ

การถ่ายเทความร้อนคือ การเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 3 แบบ

- การนำ (conduction)
- การพา (convection)
- การแพ่รังสี (radiation)

การกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบตามที่กล่าวมาแต่ตามความเป็นจริงนั้นไม่สามารถจะแยกแบบหนึ่งแบบไดได้โดยสิ้นเชิงจาก 3 แบบ อย่างไรเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะแยกพิจารณาเป็นแบบไดแบบหนึ่งได้

2.3.1 การนำความร้อน (conduction)

การนำความร้อน เป็นรูปหนึ่งของการถ่ายความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณภูมิสูงไปยังมีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยเคลื่อนที่แบบจลย์ (kinetic motion) หรือเป็นการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในการไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะมีการไหลของกระแสอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นมา สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายเคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก เป็นต้น อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายทอดพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนเหล่านี้

จากกฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์จากการสังเกตุจากผลการทดลองโดยกำเนิดจากบิโอท์ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$Q_x = -kA\frac{dT}{dx} \qquad (2.21)$$

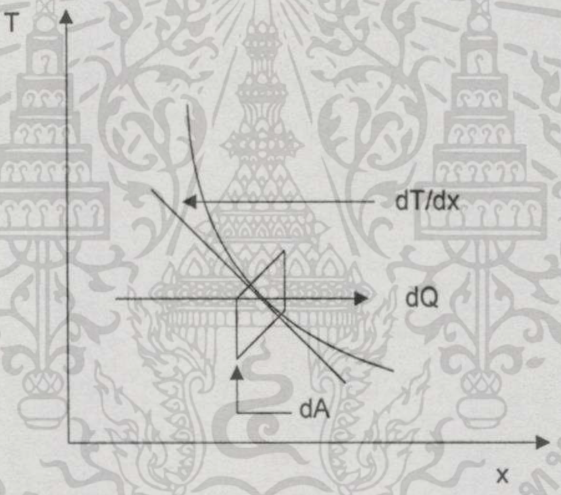
Q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (thermal conductivity of material)

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนผ่านและตั้งฉากกับทิศทางของ x

dT/dx คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

จากสมการที่ (2.21) เครื่องหมายลบแสดงว่าแสดงว่าความร้อนที่ไปในทิศทางที่อุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่ A

สมการของฟูริเยร์อาจเขียนอยู่ในรูปของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k\frac{dT}{dx} \qquad (2.22)$$

สมการ Q_x = -k(dT/dx) แสดงว่า ความร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางของ x โดยที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในทิศทางของ x เท่านั้น โดยทั่วๆ ไปแล้ว อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงทั้งสามทิศทางคือ เปลี่ยนแปลงในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของความร้อนจึงเกิดขึ้นทั้งสามทิศ โดยการสมมติว่าตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน มีค่านำความร้อน (k) คงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งสามทิศทางสามารถหาได้จากสมการของฟูริเยร์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_x = -k\frac{dT}{dx} \tag{2.23}$$

$$q_y = -k\frac{dT}{dy} \tag{2.24}$$

$$q_z = -k\frac{dT}{dz} \tag{2.25}$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วๆ ไป

$$q = -k\nabla T \tag{2.26}$$

∇ คือ 3-d grad operater

ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาสนามของอุณหภูมิ (temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตสนามของอุณหภูมินั้นคือต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิ (temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาฟลักซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้นได้ จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) การหาค่านี้ทำโดยการใช้กฎพลังงาน (energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียน (differential) ซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียนซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น ส่วนการพิจารณาตัวกลางเนื้อเดียวกันซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิ T(x,y,z) กำหนดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) โดยกำหนดปริมาตรควบคุมเล็กมากๆ dxdydz ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแล้วการนำความร้อนก็จะเกิดขึ้นข้ามแต่ละอันของผิวควบคุม อัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่ตำแหน่งโคออร์ดิเนต x, y, z จากกฎทรงพลังงาน อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของปริมาตร เท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน

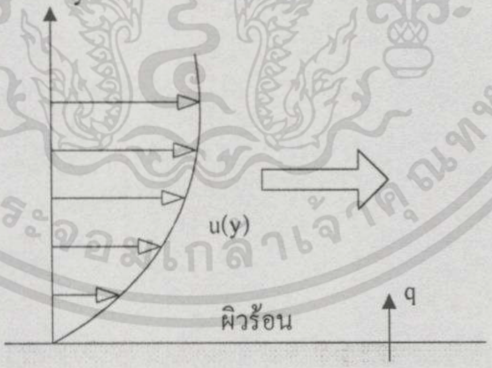
$$\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right]+\frac{q_g}{k}=c_p\rho\left[\frac{\partial T}{\partial t}\right] \tag{2.27}$$

สมการนี้เรียกว่า ฟูริเยร์ฟิลด์อีเควชั่น(Fourier field equation) และ q_g คือ อัตราการเกิดความร้อนภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การพาความร้อน (Convection)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผิวของของแข็ง กลไกลของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า "การพาความร้อน" ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมทำให้เกิดแรง (forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบ ซึ่งมีผลจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ(free or natural convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวดิ่งไว้ในอากาศเย็นที่หยุดนิ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามของอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวนหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้การคำนวนหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_w และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ตามที่แสดงในรูป 2.24 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จากกฎการเย็นตัวลงของนิวตัน (Newton's law of Cooling) ถูกกำหนดเป็น



รูปที่ 2.24 การพาความร้อนจากผิววัสดุ

$$q = h[T_w - T_f] \tag{2.28}$$

โดยที่ q เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่านเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็นกว่า (W/m^2) ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดของไหลที่ร้อนไปยังผนังที่เย็น จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = h[T_f - T_w] \tag{2.29}$$

โดยที่ q เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปที่เย็น

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ของการไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำหน่งต่างๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกลของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นพาความร้อนแบบบังคับหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

2.3.3 การแผ่รังสี

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้ว่าจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซดังนั้นโดยไม่คำนึงถึงรูปแบบของสาร การแผ่รังสีออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่าโฟตอน ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการตัวกลาง ในความเป็นจริง การถ่ายโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสูญญากาศ

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของสตีเฟนโบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q = \sigma T_s^4 \tag{2.30}$$

โดยที่ T_s^4 คือ ค่าอุณหภูมิสัมพันธ์ (K) ของผิว

σ คือ ค่าคงที่ของสตีเฟน-โบลซ์แมน 5.67×10^{-8} W/m^{2}K

โดยที่ผิวนั้นจะเรียกว่า ตัวแผ่รังสีอุดมคติหรือวัตถุดำ (blackbody) ฟลักซ์ความร้อนซึ่งถูกส่งออกโดยผิวจริงจะน้อยกว่าที่สีงออกจากตัวแผ่รังสีอุดมคติ (ideal radiator) ได้เป็น

$$q = \varepsilon \sigma T_s^4 . \tag{2.31}$$

โดยที่ ε เป็นคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิว เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Enissivity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวัดและวิเคราะห์โครงสร้างของเทอร์โมไพล์และฮีตเตอร์

3.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นสารเจือและความลึกสารเจือบนฐานรองซิลิคอน

เทคนิคการวัดการกระจายความต้านทาน (Spreading Resistance : SR) เพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะ (specific electrical resistance : ρ) และการกระจายของ ρ ในแนวระดับหรือแนวดิ่งในสารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับซิลิคอน วิธีของ SR-210 จะให้ผลการวัดค่า ρ ที่ดีกว่า วิธีการวัดการกระจายความต้านทานทางแนวดิ่งจากวัดด้วยวิธีอื่นๆ เช่น วิธี C-V, 4 เข็ม (4 tips) หรือวิธีการจากฮอลเอฟแฟค (Hall effect) โดยการนำส่วนของชิ้นงานมาทำการลอกชั้นบางๆ ออกทีละชั้น (ด้วยวิธีการขัดหรือกัด) สำหรับความสามารถของ SR-210 นั้น บอกผลของการ ρ ในแนวระดับและแนวดิ่งของสารกึ่งตัวนำได้ ดังเช่น ซิลิคอน หรือเยอร์มันเนียม สามารถหาค่าความหนาแน่นของประจุพาหะจากค่าของ ρ ได้และใช้ในการวัดค่าของ ρ ที่ส่วนแกนและแนวรัศมีของส่วนประกอบที่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น การหาค่าของ ρ แนวดิ่งเป็นต้น ชุดเครื่องมือวัดนี้จะใช้ในการวัดนี้จะใช้ได้ในส่วนของภาคการผลิต และการวิจัยเพื่อการพัฒนา ตรวจสอบกระบวนการสร้าง และประสิทธิภาพทางอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนั้น SR-210 ยังสามารถตรวจสอบการแพร่สารเจือในซิลิคอน การ implantation และการสร้างชั้น epitaxy

หลักการทำงานของ SR-210 ใช้เข็มวัดที่มีความนำไฟฟ้าสูง (เข็มเดี่ยว) รัศมีของเข็ม a ขนาดเล็กๆ (a = 1-10 μm) กดลงไปบนผิวของชิ้นงาน ที่มีค่าความต้านทานจำเพราะ (ρ) กระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านเข็มวัดเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ ทำให้ความต้านทาน R_{sr} ที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสที่วัดและสารกึ่งตัวนำเป็นสัดส่วนตรงกับค่า ρ สามารถหาได้สมการของ Holm

$$R_{sr} = \frac{\rho}{4a} \tag{3.1}$$

สำหรับการหาค่า ρ โดยใช้เข็มเดี่ยว (single probe) จะใช้กับงานบางประเภทเท่านั้น เพราะต้องการความต้านทานด้านหลังของชิ้นงานต่ำ (low-resistance back-contact) แต่กระนั้นก็ยังมีผลกับผลรวมของการกระจายความต้านทานจำเพาะ (ρ-profile) ส่วนในกรณีการวัดแบบ 2 หัวเข็มในรูปที่ 3.1 ด้วยการใช้ SR-210 เป็นการแก้ไขบกพร่องของวิธีเข็มเดี่ยว สำหรับการวัดแบบ 2 หัวเข็มคือ

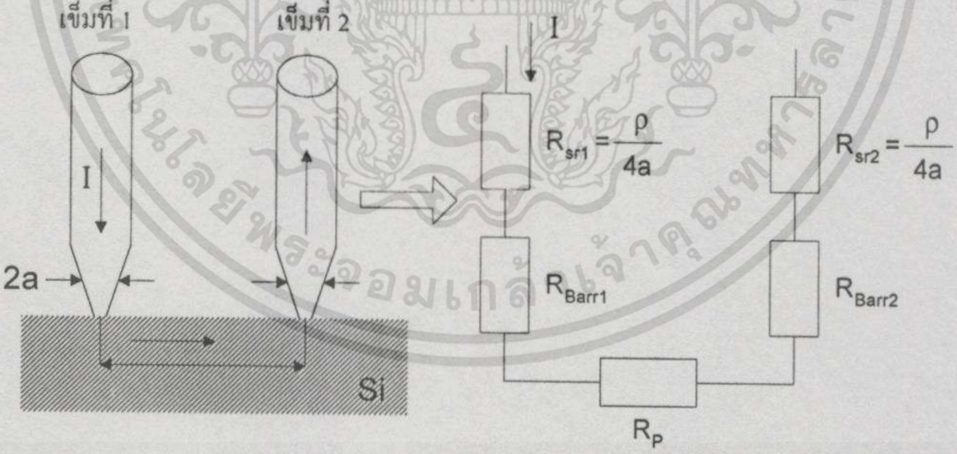
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{sr} = \frac{\rho}{2a} \tag{3.2}$$

พื้นฐานของการหาค่า ρ สำหรับการกระจายทางแนวระดับและแนวดิ่ง ด้วยวิธี SR คือการวัดผ่านค่าคามต้านทานที่แน่นนอน โดยการจำลองแบบที่ถูกตต้องทั้งหมดของจุดสัมผัส a และตัดความสัมพันธ์ของหัวเข็มกับผิวออกไป โดยวิธีการของ SR-210 ในการหาค่า ρ นั้นไม่สมบูรณ์ ด้วยพื้นฐานของผลรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) ได้มีการปรับปรุงด้วยผลของค่าความต้านทาน R_{Barr} ซึ่งจะมีผลกับค่า ρ รวมเข้ากับความต้านทาน R_{sr} แสดงดังรูปที่ 3.1 เป็นความสัมพันธ์ของส่วนต่างๆ ด้วยวงจรสมมูล โดยที่ $R_{sr1} = R_{sr2}$, $R_{Barr1} = R_{Barr2}$ และให้ความต้านทานในเนื้อสาร $R_p << R_{sr}$ และ $R_p << R_{Barr}$ ซึ่งเป็นดังสมการ

$$\Sigma R_{sr,j} + \Sigma R_{Barr,j} = R_{sr} + R_{Barr} = R_m = \frac{\rho B(\rho)}{2a} \tag{3.3}$$

เมื่อ R_m คือ ค่าความต้านทานที่ต้องการวัด และ B(ρ) คือ ค่าปรับแต่ง (calibration) ขึ้นกับค่าของ ρ ดังนั้นวิธีการวัดของ SR-210 ในการหาค่า ρ จะต้องมีการปรับแต่งจากตัวอย่างที่รู้ค่า



รูปที่ 3.1 หลักการวัดของ SR-210

โดยที่ a = รัศมีของหัวเข็ม ส่วนที่สัมผัสของซิลิคอน

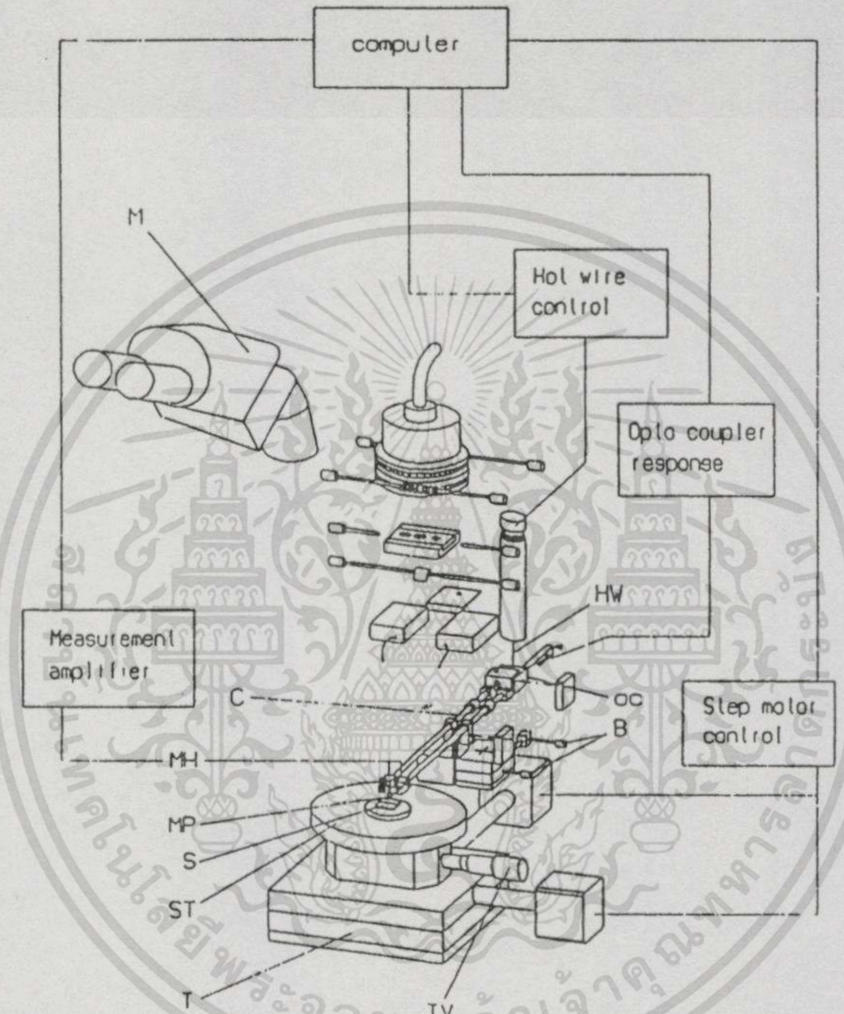
R_{sr} = Spreading resistance

R_{Barr} = Barrier resistance

R_p = Bulk resistannce

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SR-210 ประกอบด้วย สองส่วนหลัก คือ ระบบจักรกล และระบบอิเล็กทรอนิกส์ รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของทางกลของ SR-210 คือ คาน (cantilever) C ส่วนประกบเพลา (bearings) ที่ทำให้กระดก, ที่ยึดหัววัด (HM) และเข็มวัด (MP) เพลาที่ยึดคานอยู่ทางด้านขวา คานเลื่อนที่ได้สองทิศทาง (ขึ้นและลง) ของระนาบผิวชิ้นงาน ตั้งได้ฉากกับ micro-mechanical stage



รูปที่ 3.2 แผนภาพส่วนประกอบต่างๆ ของ SR-210

ดังนั้นหัวเข็มที่ใช้ในการวัดจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กับบนระนาบนี้ หัวเข็มวัดทางด้านซ้ายสามารถปรับระดับความสูงได้ ปลายเข็มที่ใช้วัดจะถูกนำลงไปในตำแหน่งที่เหมาะสมที่เหมาะสมบน micro-mechanical stage ซึ่งสามารถปรับระดับความสูงได้ ดังนั้นการคลื่อนที่ขึ้น-ลงของหัวหวัด และเข็มจะถูกควบคุมโดยคาน และระบบหมุนปรับหมุน (rotary linear system RL) ผ่านระบบ hot wire (HW) ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของเข็มที่วัดบนผิวของชิ้นงานเทียบกับจุดเริ่มต้นที่กำหนดบนจอคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับด้านหนึ่งของ opto couple (OP) นอกจากนี้ระบบเชิงกลใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

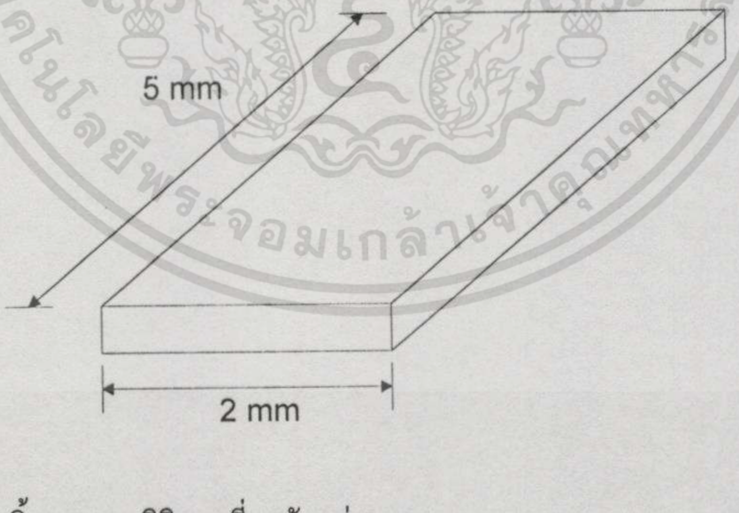
สวนของฐาน (mechanical stage : ST) สามารถเคลื่อนที่ในทิศทาง x และ y แต่ในขณะที่เข็มกำลังวัดสามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง x ด้วยการใช้ stepping motor (SM) อุปกรณ์สำหรับการเคลื่อนย้าย (TV) แท่นวางชิ้นงาน และชิ้นงาน (S) ในแนวดิ่งจะยึดติดกับฐาน ST สำหรับการกดเข็มวัดลงบนชิ้นงานสามารถสังเกต และระดับได้จากกล้องจุลทรรศน์ (microscope : M)

อุปกรณ์หลักของระบบอิเล็กทรอนิกส์ของ SR-210 คือ ชุดวัด SR, กระไฟฟ้าจ่ายให้แก่ hot wire, อิเล็กทรอนิกส์ opto couple, ชุดควบคุม stepping motor, เครื่องวัดมุม และระบบคอมพิวเตอร์ที่มีแผ่นวงจรเชื่อมต่อทั้งระบบเชิงเส้น (analog) และระบบเชิงเลข (digital)

3.1.1 การเตรียมชิ้นงาน

การหาความลึกสารเจือ (depth profile) สำหรับค่าสเปรดิงรีซิสแตนท์ (spreading resistance) จำเป็นต้องเตรียมชิ้นงานให้เป็นมุมลาด (bevel angle) คุณภาพและความถูกต้องของมุมลาดที่ใช้ในการวัดส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการวัดค่าสเปรดิงรีซิสแตนท์ ชิ้นงาน (sample) ที่ขอบของมุมลาดมีความโค้งมน หรือพื้นผิวของมุมลาดมีรอยขีดข่วนเป็นตัวอย่างหนึ่งของการเตรียมมุมลาดที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของพื้นผิวของมุมลาด นอกจากนี้ขนาดก็มีผลต่อการเตรียมชิ้นงานในแง่ของความเป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิวที่มีความเสียหาย รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการขัด (grinding time) เพื่อทำมุมลาด ขนาดที่เหมาะสมคือ 2 x 5 mm ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมได้ดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาดเล็ก โดยการตัดแผ่นเวเฟอร์ ให้มีขนาดตามต้องการดังรูปที่ 3.3



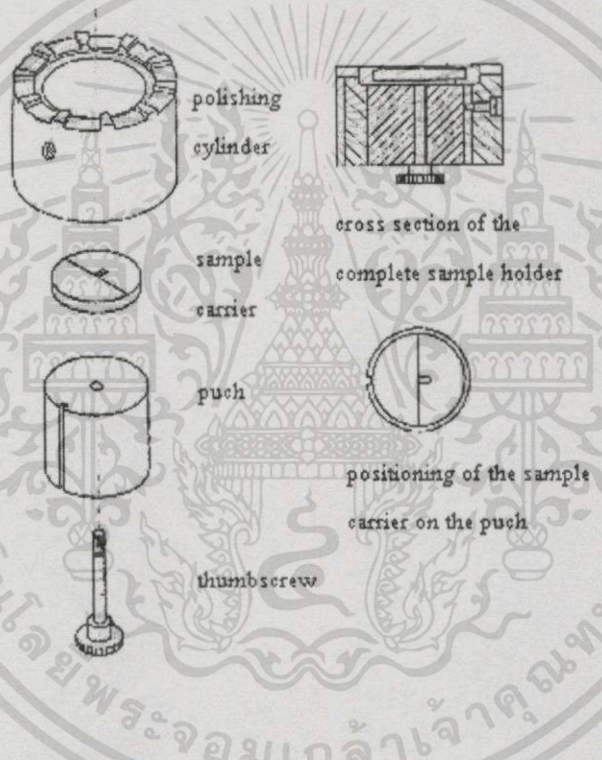
รูปที่ 3.3 ขนาดชิ้นงานของซิลิคอนที่ถูกตัดแบ่ง

2. นำชิ้นงานมาติดไว้บนแท่นยึดชิ้นงาน (sample carrier) โดยการให้ความความร้อนกับแท่นยึดชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 50 – 80 ^{o}C แล้วใช้ขี้ผึ้ง (wax) ทาบางๆ บนแท่นยึดชิ้นงาน และสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยึดชิ้นงานให้ติดอยู่บนแท่นยึดชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานติดอยู่บนแท่นยึดชิ้นงาน ในขณะที่ขี้ผึ้งกำลังละลายจะต้องปรับแต่งตำแหน่งของชิ้นงานให้ตั้งฉากกับกึ่งกลางของแท่นชิ้นงาน แล้วทิ้งไว้เย็น

3. จึงนำไปติดตั้งกับกระบอกพันซ์ (Punch) ซึ่งยึดติดด้วยตะปูควงสำหรับมือบิด (thumb screw) แสดงดังรูปที่ 3.4 ตำแหน่งในการวางชิ้นงาน และแท่นยึดชิ้นงานกระบอกพันซ์ จะต้องปรับให้ตำแหน่งของชิ้นงานอยู่ตรงกันข้ามกับร่อง (groove) กระบอกพันธ์ และด้านที่จะทำการขัดของชิ้นงาน (grinding) จะต้องตั้งฉากับเส้นกึ่งกลางบนแท่นยึดชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ได้พื้นผิวมุมลาดที่มีคุณภาพดีที่สุด จากนั้นก็นำกระบอกพันซ์ ใส่เข้าไปในการะบอกขัด (Polish cylinder) ซึ่งสกรู (screw) ของเครื่องขัดจะช่วยป้องกันการบิดตัวของกระบอกพันซ์



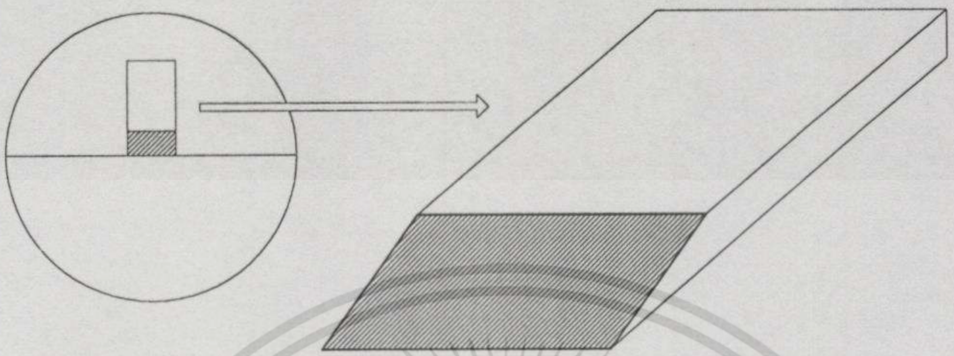
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การขัด

4. เป็นการเตรียมเครื่องขัดมัน (polishing machine) ซึ่งแผ่นแก้วละเอียด (frosted glass plate) ติดตั้งอยู่บนแผ่นรองรับที่หมุนได้ วัสดุที่ช่วยในการขัดประกอบด้วยกากเพชรขนาด 1 mm หรือ 0.25 mm ซึ่งกระจายอยู่แผ่นแก้วอย่างสม่ำเสมอ และใช้ diaplastol หยดลงบนแผ่นแก้วเล็กน้อยเพื่อเป็นตัวประสานให้กากเพชรกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น

5. เป็นกระบวนการขัด ความเร็วที่ใช้ในการขัดซิลิคอนจะตั้งประมาณ 50 รอบ/นาที ใช้เวลาในการขัดประมาณ 10 - 30 นาที หลังจากเสร็จแล้ว นำชิ้นงานที่ยังติดกับฐานรองมาทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

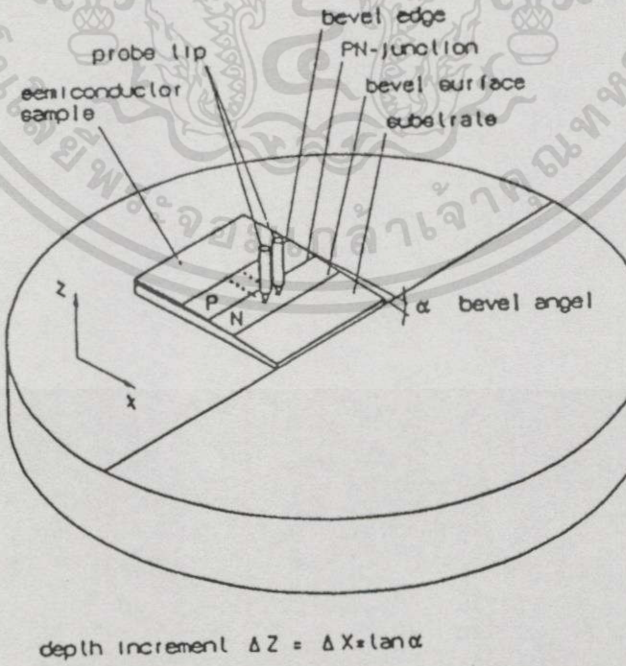
และเป่าด้วยก๊าซ แล้วนำไปตรวจสอบคุณภาพของพื้นผิวที่ได้จากการขัด ซึ่งรูปที่ได้จะมีลักษณะดัง รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ผ่านการขัด

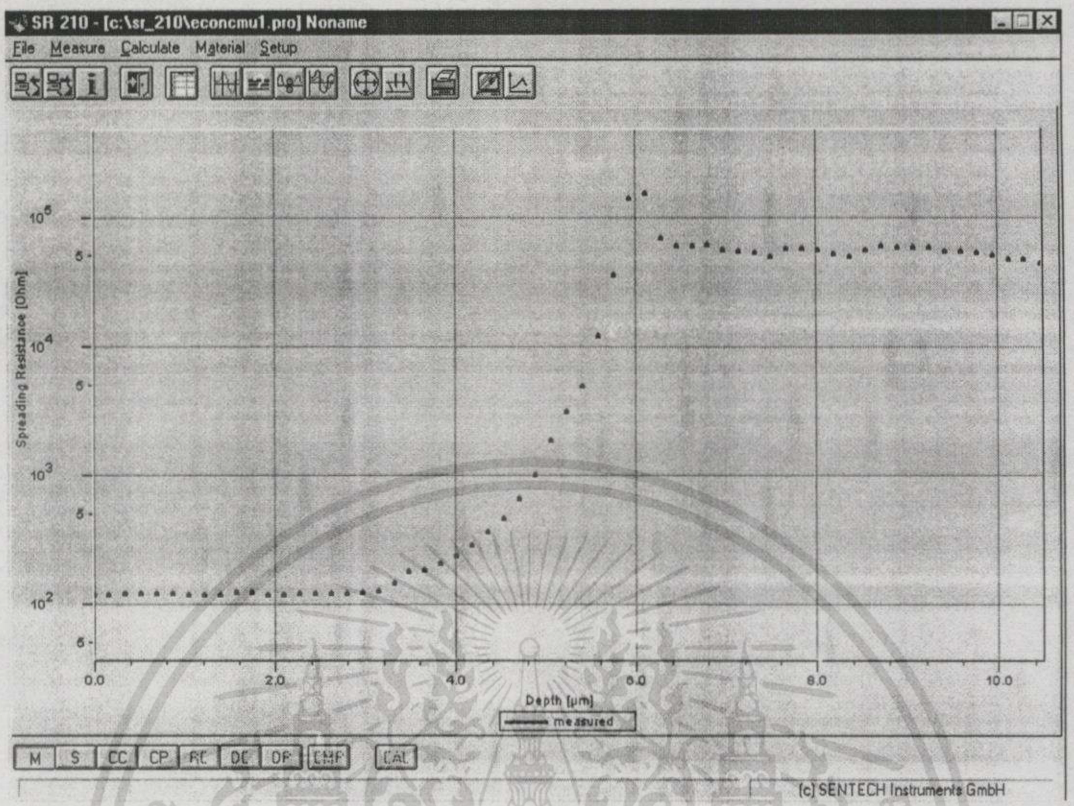
3.1.2 การวัดด้วย SR-210

ใช้โปรแกรม WinResi ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อใช้ในการควบคุมชุดเครื่องมือวัด SR-210 โดยแสดงการวัดดังรูปที่ 3.6 ซึ่งโปรแกรมการจะบันทึกข้อมูลการวัดทั้งหมดเป็นความต้านทานแสดงรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นหน้าต่างหลักของโปรแกรม WinResi



รูปที่ 3.6 การวัดของ SR-210

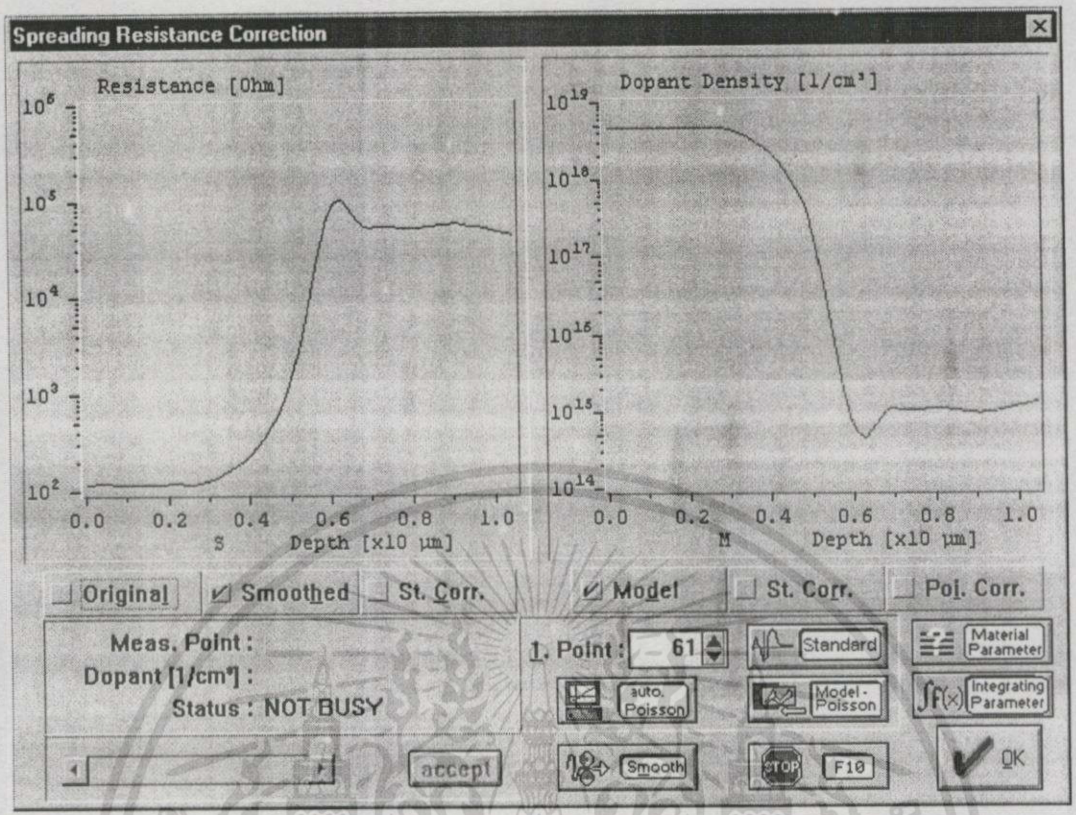
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ผลการวัดค่าสเปรดิงรีซิสแตนท์ของ SR-210

สำหรับวิธีการวัดค่าสเปรดิงรีซิสแตนท์ด้วย SR-210 โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดมาวางบนแท่น (ST) แล้วเลื่อนแท่นให้ชิ้นงานไปอยู่ใต้โพรบโดยใช้โปแกรม "sample Movement" ในการควบคุมการเคลื่อนของชิ้นงาน หลังจากนั้นปรับหัวเข็มทั้งสองลงให้อยู่ระยะการวัดและก็ปรับระยะความสูงของแท่นให้เหมาะด้วยมือโดยการทำอย่างระมัดระวัง แล้วใช้โปรแกรม "Optimal Sample Adjustment" เป็นตัวตรวจสอบระยะห่างระหว่างชิ้นงานและหัวเข็ม โดยการปรับค่าเบี่ยงให้อยู่ในช่วง ±5 ไมครอน หลังจากนั้นทำการวัดมุมที่เกิดจากการขัด (bevel angle) โดยใช้โปรแกรม "Bevel Angle Measurement" ซึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนจากไมโครสโคปทางด้านขวาออกแล้วสวมเทเลสโคปเข้าไปแทนเพื่อวัดมุมของชิ้นงาน แล้วทำการวัดค่าสเปรดิงรีซิสแตนท์ของชิ้นงานที่แต่ละความลึกของชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรม "Lateral Measurement" จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเปรดิงรีซิสแตนท์และค่าความลึกสารเจือจากผิวของชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้จากวัดค่าสเปรดิงรีซิสแตนท์จะถูกนำไปประมวลผลเป็นค่าความเข้มข้นสารเจือต่างๆ ที่ความลึกจากผิวหน้าชิ้นงานแสดงผลดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์การวัดของ SR-210

3.2 ระบบ GPIB

ในระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาเครื่องมือวัดที่ควบคุมด้วยระบบดิจิตอลได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นจำนวนมาก เครื่องมือวัดเหล่านี้มีความสามารถในการรับและส่งข้อมูล ปัญหาที่เกิดขึ้นถ้าเครื่องมือวัดเหล่านี้ต้องการส่ง หรือรับข้อมูลให้กับอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่น เช่น พรินเตอร์ หรืออุปกรณ์แสดงผลร่วมกับอุปกรณ์เครื่องวัดอื่นๆ หรือใช้ฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ร่วมกัน เราจะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน เราจะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกันอย่างไร ถ้าเป็นอุปกรณ์เครื่องมือวัดอาจจะมีการต่อแบบวิธีพิเศษ แต่ถ้าเป็นอุปกรณ์ต่างยี่ห้อกันดูเหมือนว่าจะไม่มีทางออกจึงได้มีการพัฒนามาตราฐานการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดเหล่านี้ขึ้นมา โดยทางบริษัท Helett-Packard ได้พัฒนา HPIB (Helett-Packard Interface Bus) ขึ้นมา เพื่อเป็นมาตราฐานในการเชื่อมต่อและควบคุมอุปกรณ์เครื่องวัดของ Helett-Packard เอง เป็นเหตุให้ผู้ผลิตเครื่องมือวัดรายอื่นทำตามมาตราฐานนี้ ซึ่งต่อมาสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แห่งสหรัฐอเมริกา (Institute of Electrical and Electronic Engineers : IEEE) ซึ่งขอมรับเข้าเป็นมาตราฐาน และวัดเข้าในลำดับที่ IEEE488 แต่เนื่องจากในคุณลักษณะสมบัติของ IEEE488 นี้ มีความหมายถึงบัสอินเตอร์เฟสที่ใช้งานได้ทั่วไปจึงมีผู้นิยมเรียกใช้คำว่า GPIB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GPIB มีชื่อเต็มว่า General Purpose Interface Bus เป็นสัญญาณมาตราฐานที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ได้หลายเครื่อง โดยมีข้อพิเศษสำหรับผู้ใช้ก็คือ ในกรณีที่ต้องการขยายอุปกรณ์เพิ่มเติมเข้ามาในระบบผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มเติมส่วนวงจรหรืออุปกรณ์อื่นๆ เพียงแต่ผู้ใช้เพิ่มสายเคเบิ้ลเชื่อมต่อเข้ามาขนานกับสายเคเบิ้ลหรือขั้วเดิมเท่านั้น โดยการแก้ไขเฉพาะส่วนของซอฟต์แวร์เท่านั้น ในระบบที่ไม่ใหญ่โตนัก GPIB นั้นสามารถต่อเข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องมืออื่นๆ ได้สูงสุด 15 เครื่อง โดยการใช้สายสัญญาณเพียงเส้นเดียวเท่านั้นต่อขนานกันไปเรื่อยๆ ดังนั้นบัสสัญญาณของ GPIB จึงเป็นบัสขนาน โดยมีสัญญาณควบคุมร่วมด้วยเพื่อควบคุมทิศทางและเลือกตัวที่ต้องการติดต่อ

โครงสร้างของ GPIB

ส่วนประกอบพื้นฐานของ GPIB แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 กล่าวคือ GPIB จะประกอบไปด้วยผู้ส่ง (talker) ผู้รับ (listener) และผู้ควบคุม (controller)

ผู้ส่ง (talker) ทำหน้าที่ในการส่งข้อมูลโดยสามารถที่จะนำผู้ส่ง (talker) จำนวนมากๆ ใส่ไว้ในระบบ แต่จะมีผู้ส่ง (talker) เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่กำลังทำงานอยู่

ผู้รับ (listener) ทำหน้าที่รับข้อมูลผู้รับ (listener) ก็เช่นเดียวกับผู้ส่ง (talker) คือสามารถนำไปใส่ในระบบได้จำนวนมากและผู้รับ (listener) ยังสามารถทำงานพร้อมกันในเวลาเดียวกันได้จำนวนมากขึ้น ดังนั้นจึงมีระบบที่ประกอบด้วยผู้ส่ง (talker) 1 ตัว และมีผู้รับ (listener) หลายตัว

ผู้ควบคุม (controller) เป็นควบคุมสัญญาณต่างๆ บนบัส โดยรับความต้องการของอุปกรณ์ที่จะส่งข้อมูล หรือกำหนดผู้ส่ง (talker) ให้ทำการส่งหรือกำหนดผู้รับ (listener) ทำการรับข้อมูลโครงสร้างของ GPIB

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของ GPIB

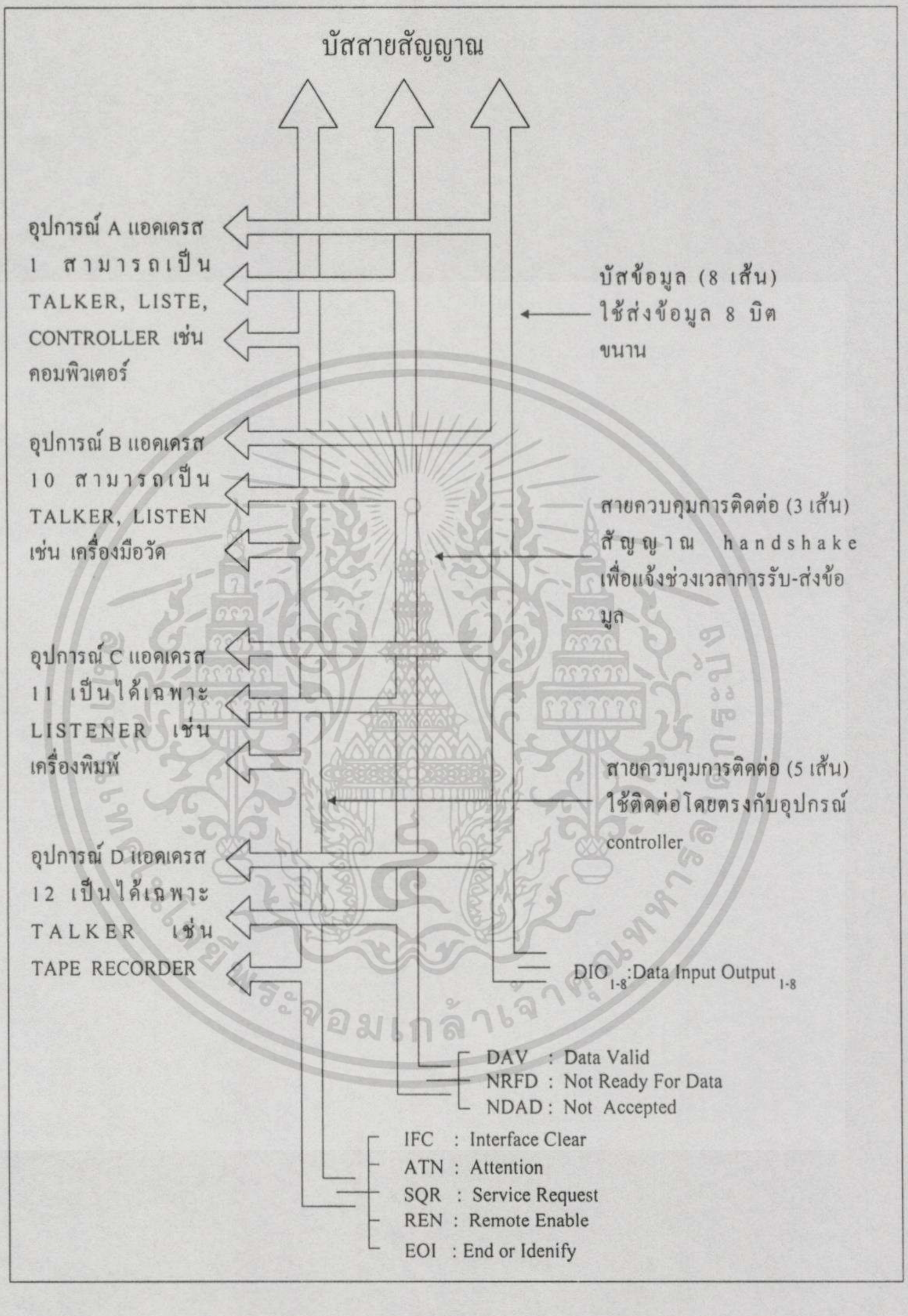
คุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของ GPIB นั้นมีดังนี้คือ

1. จำนวนอุปกรณ์ (talker, listener, controller) ที่ต่อสายสัญญาณ (bus) 1 เส้น จะต้องมีไม่เกิน 15 เครื่อง

2. สายเคเบิ้ลที่ใช้ต่อระหว่างอุปกรณ์แต่ละตัวต้องยาวไม่เกิน 4 เมตร และความยาวรวมของสายเคเบิ้ลทั้งหมดต้องไม่เกิน 20 เมตร

3. ความเร็วในการส่งข้อมูลต้องไม่สูงเกิน 1 Mb/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

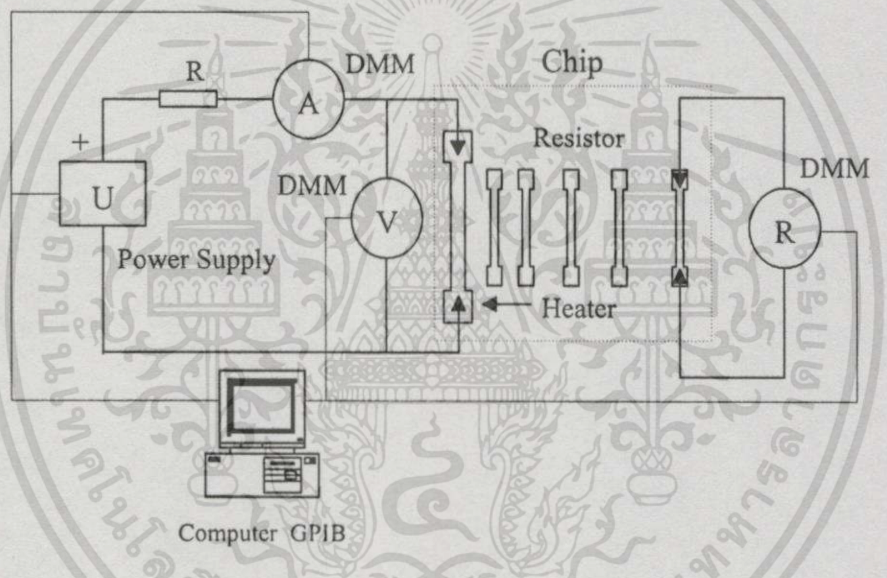


รูปที่ 3.9 แผนผังอุปกรณ์ GPIB และการต่อสัญญาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การวัดคุณสมบัติของฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์

ในการวัดเพื่อหาอุณหภูมิของฮีตเตอร์ เมื่อให้กระแสไหลผ่านตัวความต้านทานจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยอุปกรณ์การวัดซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ดังผังวงจรแสดงดังรูปที่ 3.10 ประกอบด้วย HP 34401A ดิจิตอลมัสติมิเตอร์ (Digital multimeter) 3 ตัว และ HP E3631A แหล่งจ่ายกำลัง (Power supply) 1 ตัว ซึ่งทั้งหมดถูกต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ ในการวัดนั้นแหล่งจ่ายกระกระแสคงที่ (constant current) ที่จะถูกต่อกับขาทั้ง 2 ข้างของฮีตเตอร์ เพื่อจ่ายกระแสผ่านฮีตเตอร์ 0 – 200 mA โดยเพิ่มทีละ 10 mA ทำให้อุณหภูมิตรงบริเวณฮีตเตอร์เพิ่มขึ้นและแพร่ไปยังบริเวณรอบๆ ซึ่งจะมีตัวความต้านทานที่สร้างจากฟิล์มอลูมิเนียมเป็นตรวจวัดการกระจายความร้อน โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการวัด การแสดงผล และบันทึกข้อมูล

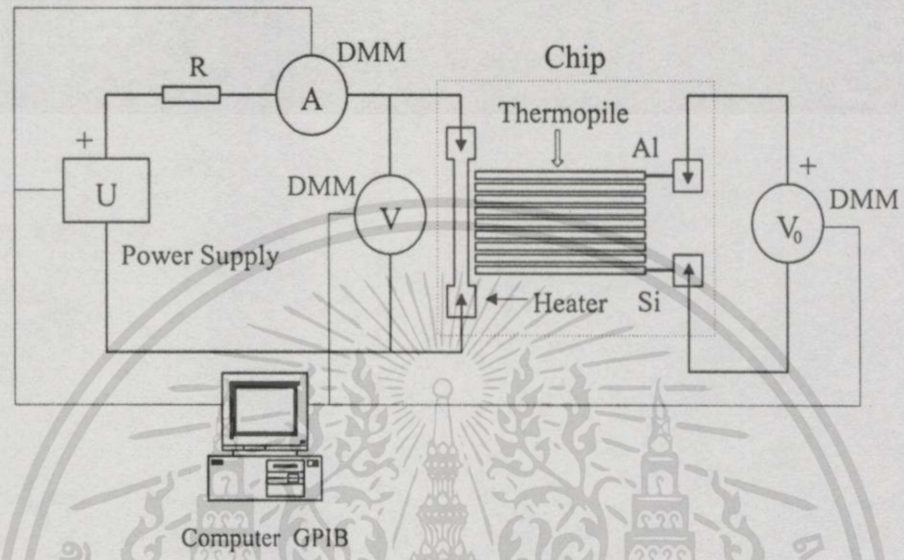


รูปที่ 3.10 อุปกรณ์และการวัดอุณหภูมิ

ในการวัดเพื่อหาค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานค่าแรงดันไฟฟ้าต่อการตอบสนองอุณหภูมิ โดยทั่วไปจะนำเทอร์โมคัปเปิลมาเป็นตัววัดอุณหภูมิ เมื่อต้องการค่าเอาท์พุทสูงขึ้นโดยการนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่ออนุกรมกันทำให้ได้เทอร์โมไพล์ การวัดเอาท์พุทของเทอร์โมไพล์เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าเทอร์โมไพล์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้หรือไม่ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเทียบกับผลต่างของอุณหภูมิ ชุดอุปกรณ์วัดทดสอบดังรูปที่ 3.11 ประกอบด้วย HP 34401A ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter) 3 ตัว และ HP E3631A แหล่งจ่ายกำลัง (Power suppy) ซึ่งทั้งหมดถูกต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการวัด การแสดงผล และบันทึกข้อมูล โดยการทดลองนี้จะใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบกระแสคงที่ (constant current) 0-200 mA โดยเพิ่มทีละ 10 mA ให้กับฮีตเตอร์ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างรอยต่อร้อน (hot junction) และรอยต่ออ้างอิง (reference junction) ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเทอร์โมไพล์ซึ่งจะขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์และวิธีการวัดค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์

3.2.2 โปรแกรม HP VEE Evaluation

โปรแกรม HP VEE Evaluation เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นมา เพื่อใช้ติดต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัด ซึ่งการวัดที่จะสามารถติดต่อกับเครื่องมือวัดได้ต้องมีสาย GPIB (GPIB bus) โดยที่สาย GPIB นี้จะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัด ทำให้สามารถติดต่อและควบคุมเครื่องมือวัดผ่านตัวโปรแกรมที่ได้เขียนไว้ สำหรับโปรแกรม HP VEE Evaluation จะเป็นโปรแกรมมีลักษณะเป็น บล็อก (block) ซึ่งคำสั่งแต่ละบล๊อกจะทำหน้าที่ต่างกัน โดยที่แต่ละบล๊อกคำสั่งจะมีอินพุท (input) และเอาท์พุท (output) เป็นตัวเชื่อมต่อกันเพื่อกำหนดขั้นตอนการทำงานของตัวโปรแกรม และรับส่งข้อมูลกันระหว่างที่ตัวโปรแกรมทำงาน ซึ่งบล๊อคคำสั่งและส่วนต่างๆ ของบล๊อคแสดงดังรูปที่ 3.12

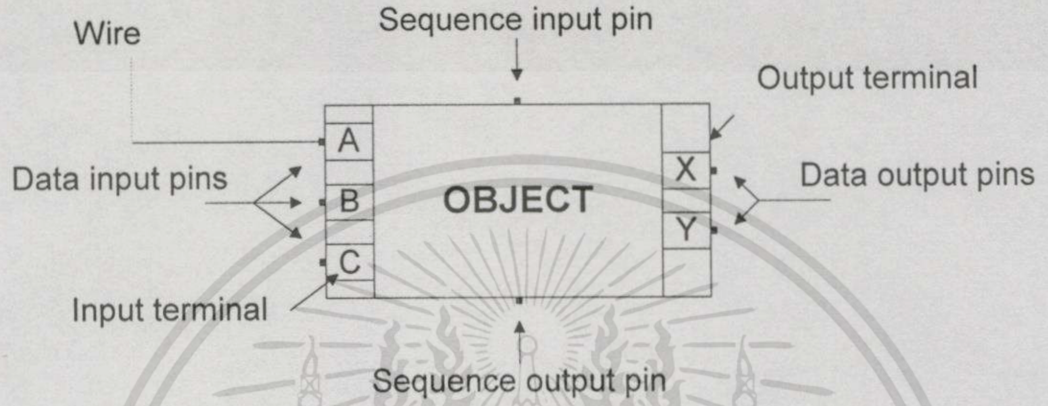
-Data input pins เป็นตัวที่รับข้อมูลในระหว่างการวัด เช่นค่ากระแส (I) หรือ แรงดัน (V) ซึ่งในการรับข้อมูลมาเก็บไว้นี้ จะนำข้อมูลมาเก็บไว้นี้ จะนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงค่าเป็นกราฟ หรือบันทึก (save) ค่าไว้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของโปรแกรมหรือผู้ใช้งาน

-Data output pins เป็นตัวที่คอยส่งข้อมูลที่รับเข้ามาเก็บไว้ออกไป เช่น นำไปพล๊อตกราฟ นำค่าไปประมวลผล หรือนำไปแสดงเป็นตาราง

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-Sequence input pins เป็นตัวเชื่อมระหว่างบล๊อคคำสั่ง เพื่อควบคุมให้แต่ละบล๊อคทำหน้าที่ตามลำดับขั้นตอน หรือทำหน้าที่ให้สัมพันธ์กับบล๊อคอื่นๆ

-wire เป็นเส้นที่ลากเชื่อมระหว่างบล๊อกคำสั่ง เพื่อควบคุมให้แต่ละบล๊อคทำงานสัมพันธ์กันเป็นลำดับขั้นตอน



รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของบล๊อคคำสั่ง

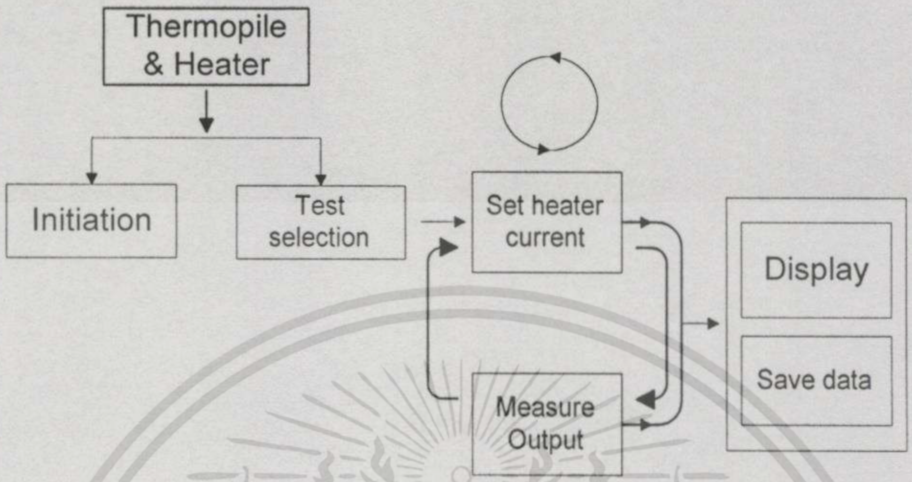
ภายในโปรแกรม HP VEE Evaluation จะเป็นการกำหนดตำแหน่ง (address) ของเครื่องมือวัด เมื่อต้องการใช้เครื่องมือวัดชนิดใดควรจะระบุเครื่องมือวัดที่ต้องการใช้ ซึ่งจะมีบล๊อคของเครื่องมือวัดภายในโปรแกรมซึ่งติดตั้งไว้แล้ว โดยภายในบล๊อคเครื่องมือวัดนั้นจะสามารถควบคุมให้เครื่องมือวัดทำการวัดได้นั้นต้องมีการำหนดค่าต่างๆ ให้ เช่น เครื่องมือวัดจำพวกแหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) จะต้องควบคุมให้จ่ายแรงดันแรงหรือลบ หรืออุปกรณ์มัลติมิเตอร์นั้นจะต้องมีการควบคุมด้วยว่าจะใช้วัดในลักษณะใด

การทำงานของโปรแกรมการวัดคุณสมบัติของฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์

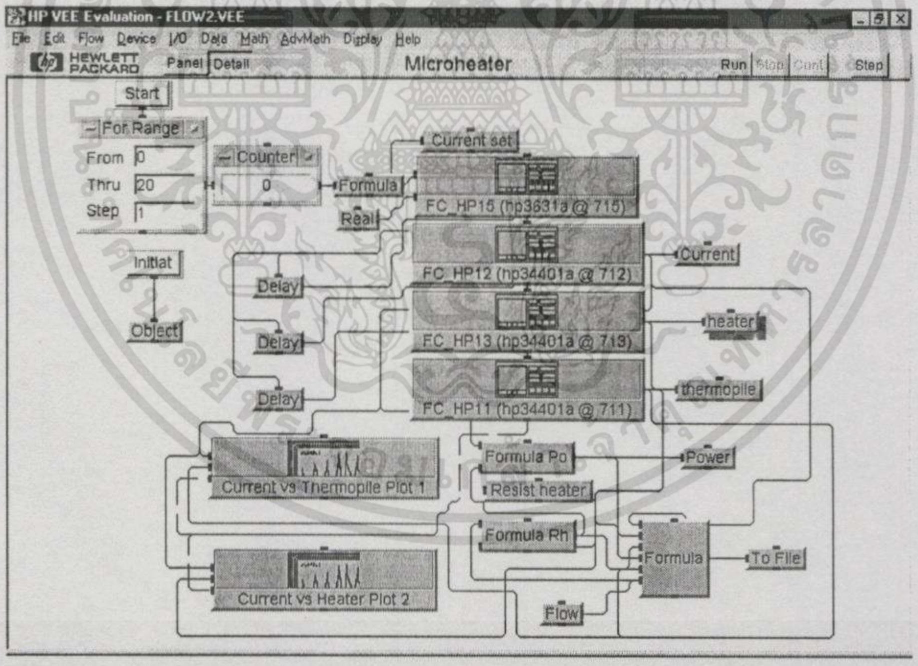
การทำงานของโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวัดคุณบัติของเทอร์โมไพล์ จะใช้โปรแกรม HP VEE Evaluation เป็นซอฟแวร์ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งมีหลักการทำงานดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 แสดงการเขีนนโปรแกรมโดยการนำบล๊อกมาต่อกัน โดยการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มจากการกำหนดโหมดความพร้อมเบื้องต้นของเครื่องมือวัดซึ่งประกอบด้วย ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 3 ตัว และแหล่งจ่ายกำลัง ที่บล๊อคของ Initiation โดยที่ FC_HP11(hp34401@711) อยู่ในโหมดของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า FC_HP12(hp34401@712) อยู่ในโหมดของการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฮีตเตอร์ FC_HP13(hp34401@713) อยู่ในโหมดของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฮีตเตอร์ และ FC_HP15(hp3631a@715) อยู่ในโหมดของแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ซึ่งจะทำให้โปรแกรมพร้อมที่จะทำงานได้ และก็ต้องกำหนดรูปแบบการวัดมาที่บล๊อค Test selection ซึ่งจะเป็นการกำหนดเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเริ่มจ่ายกระแสดงที่เป็นชุดตัวเลขตามต้องการแล้วตามต้องการก็สามารถวัดค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ได้ ในระหว่างการวัดจะมีการแสดงผลข้อมูลและบันทึกข้อมูลตลอดเวลา



รูปที่ 3.13 แผนผังการทำงานโปรแกรมการวัด



รูปที่ 3.14 แผนโปรแกรมการวัดคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

การออกแบบและสร้างต้นแบบ จะต้องพิจารณาโครงสร้างและทฤษฎี ซึ่งประกอบด้วยส่วนของไมโครฮีตเตอร์ (microheater) และเทอร์โมไพล์ (thermopile) โดยเริ่มต้นจากการกำหนดคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ แล้วจึงนำคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์มาออกแบบให้มีขนาดความกว้างและยาวเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์ที่ความเข้มข้นของสารเจือที่ต่างๆ กัน กำหนดขนาดความกว้างยาวและระยะห่างระหว่างแถบสารเจือจำนวนเทอร์โมไพล์ต่อพื้นที่

เมื่อได้ลวดลายต้นแบบแล้วจึงนำไปผลิตเป็นกระจกมาส์ก (photographic masks) โดยการถ่ายย่อส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างบนผลึกซิลิคอน ซึ่งกระบวนการสร้างจะเริ่มต้นจากการเลือกชนิดความหนา และสภาพความต้านทานของผลึกฐานรองซิลิคอน หลังจากนั้นจะนำแผ่นผลึกเข้าไปในกระบวนการสร้างที่เป็นลำดับขั้นตอนที่มาตราฐานของการสร้างเทอร์โมไพล์และไมโครฮีตเตอร์ เช่น การทำความสะอาดแผ่นผลึกเริ่มแรก กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการสปัตเตอร์ริ่ง กระบวนการกัดฐานรองเพื่อสร้างไดอะแฟรม กระบวนการแพร่สารเจือ กระบวนการเมตัลไลเซชัน เป็นต้น ซึ่งเมื่อจบขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้ แล้วจึงนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไมโครฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์

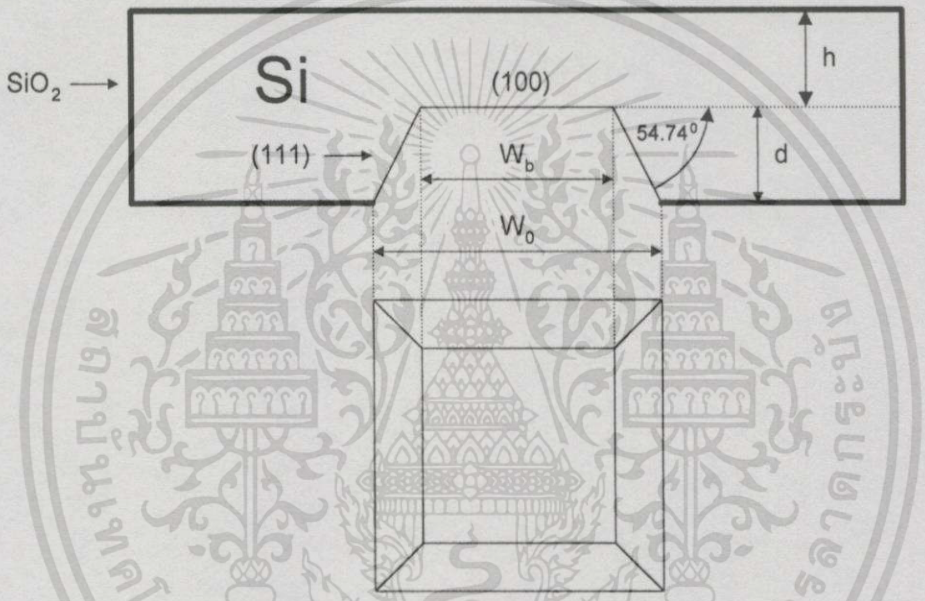
ดังนั้นจากที่กล่าวมาสามารถลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์

1. การออกแบบและผลิตกระจกต้นแบบ
2. กระบวนการสร้างบนแผ่นผลึก
3. กระบวนการแอสแซมบลีและการเก็บบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การออกแบบไดอะแฟรม[7,8]

ไดอะแฟรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของซิลิคอนซึ่งเกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ในสารละลายซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิคให้เป็นไดอะแฟรมบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) ซึ่งต้นแบบของไดอะแฟรมได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) หลุมที่เกิดจากการกัดจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยจะต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมขนานแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รายละเอียดการกัดซิลิคอน โดยสารละลาย

แสดงรายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) หรือตั้งฉากกับทิศทาง [110] ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

$$W_b = W_0 - 2d \cot 54.74^{\circ}$$
$$\approx w_0 - \sqrt{2d} \qquad (4.1)$$

โดยที่ W_0 คือ ขนาดของต้นแแบบ

W_b คือ ขนาดของไดอะแฟรมหลังการกัด

d คือ ความลึกของไดอะแฟรม

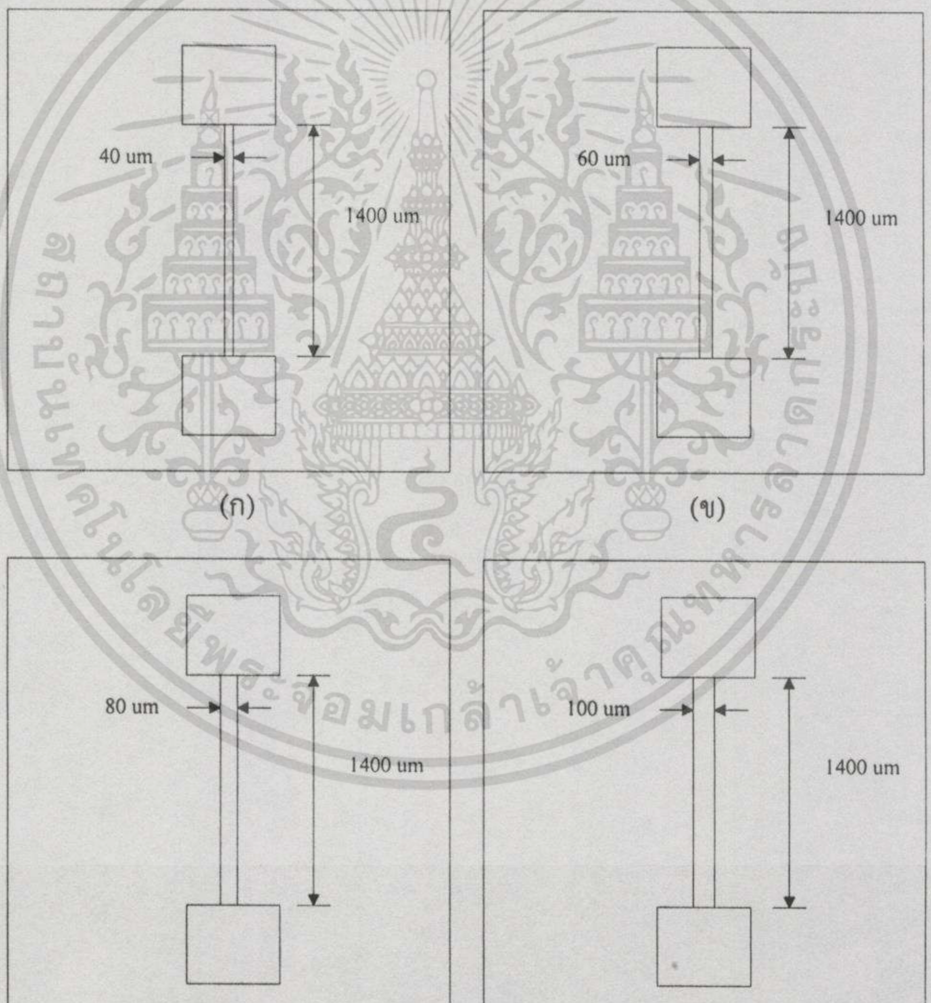
h คือ ความหนาของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดค่าความหนาของไดอะแฟรมให้มีความหนาน้อยกว่า 50 μm โดยต้องการให้ขนาดของช่องไดอะแฟรมหลังการกัดมีขนาด 1400x1800 μm^2 เมื่อใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนหนา 450 μm ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขนาดไดอะแฟรมต้นแบบ (W_0) จากสมการ 4.1 ซึ่งได้เป็น 1966 และ 2366 μm ตามดับ

4.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์

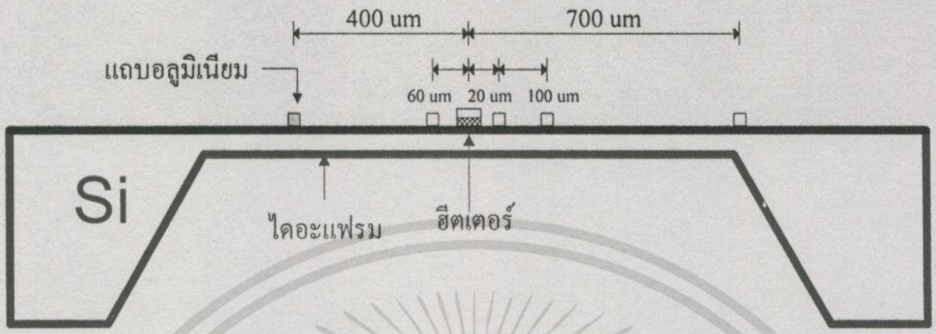
ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์จากไททาเนียมและอลูมิเนียม 4 ชุดให้มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 μm แสดงดังรูปที่ 4.2 และโดยมีขนาดความยาวเท่ากันคือ 1400 μm



รูปที่ 4.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

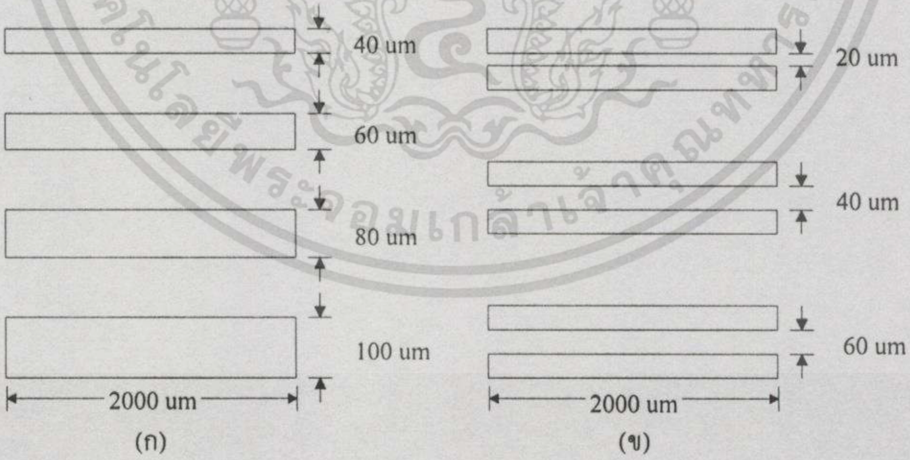
และยังมีแถบความต้านทานที่สร้างจากฟิล์มของอลูมิเนียมมีขนาดความกว้าง 20 μm และยาว 1200 μm อยู่ห่างจากไมโครฮีตเตอร์ 20, 60, 100, 400 และ 700 μm ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับความร้อน โดยโครงสร้างทั้งหมดจะอยู่บนไดอะแฟรมของซิลิคอนมีขนาด 1400x1800 μm^2 มีขนาดความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ 25, 40 และ 60 μm แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์

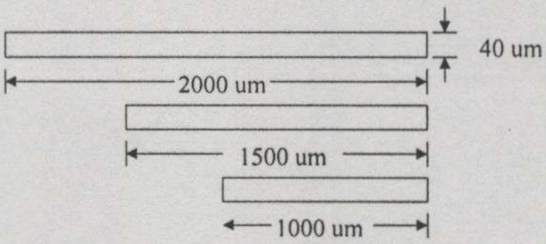
4.3 การออกแบบเทอร์โมไพล์

ในการออกแบบเทอร์โมไพล์จะกำหนดขนาดความกว้างยาวของแถบแพร่สารเจือ, ระยะห่างระหว่างแถบแพร่สารเจือ โดยการกำหนดแถบแพร่สารเจือเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง 40 60, 80 และ 100 μm แสดงดังรูป 4.4 มีรอยต่อสัมผัสที่ต่างกันคือ 20, 40 และ 60 μm ตามลำดับ



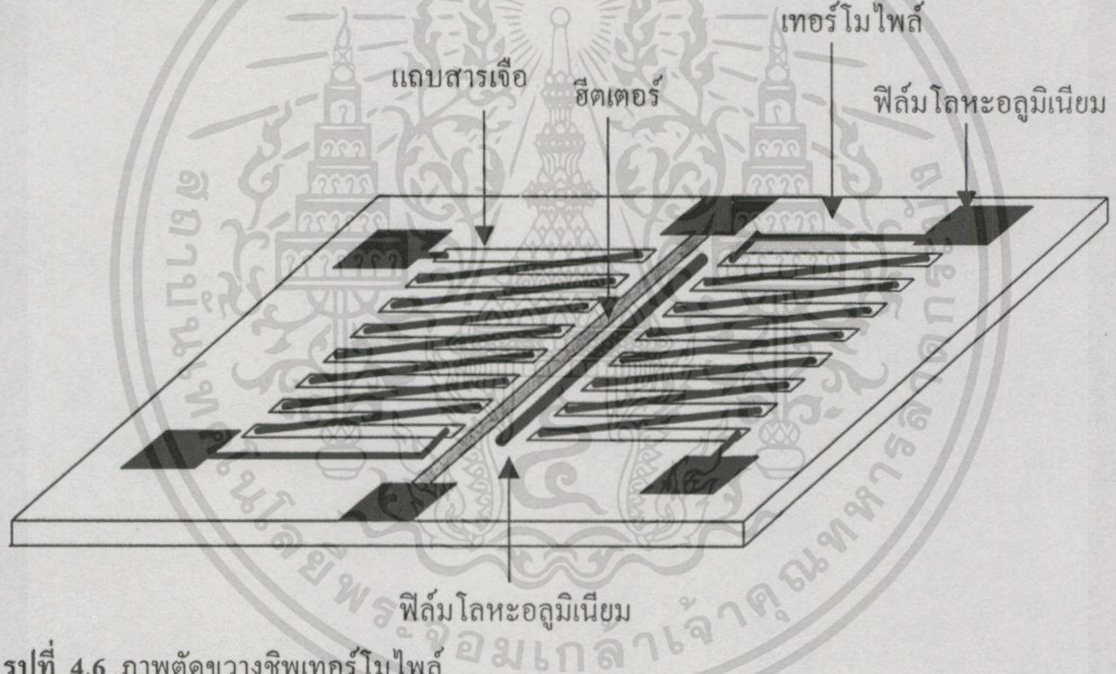
รูปที่ 4.4 การออกแบบความกว้างและระยะห่างระหว่างแถบแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความยาวของแถบแพร่สารเจือที่ต่างๆ กัน

ในการกำหนดพื้นที่ของเทอร์โมไพล์ที่สามารถมีจำนวนเทอร์โมคัปเปิลได้นั้น โดยการใช้พื้นที่ 1200 x1400 μm^2 และมีจำนวนเทอร์โมคัปเปิลได้ 5, 10, 15 และ 20 ตัว ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.6 แสดงภาพตัดขวางชิพเทอร์โมไพล์



รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางชิพเทอร์โมไพล์

4.4 กระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์

ในกระบวนการสร้างฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อนอยู่บนโครงสร้างไดอะแฟรมนั้น จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนการผลิตกระจกมาส์กต้นแบบและขั้นตอนการสร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอน

4.4.1 การผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ

เมื่อได้ต้นแบบของไมโครฮีตเตอร์จึงนำต้นแบบนั้นมาเขียนลวดลายต่าง ๆ ลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยการออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริง ด้วยการออกแบบลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลายทุกชิ้นลงบนกระดาษกราฟต้นแบบแผ่นเดียวกัน เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อน จากนั้นจึงนำไปทาบด้วยแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาร์ชีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตนั้นจะใช้ไมโครคัตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร

4.4.2 มาส์กต้นแบบไมโครฮีตเตอร์

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์กต้นแบบทั้งหมด 4 มาส์ก ด้วยกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาส์กที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม

มาส์กที่ 2 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะไทเทเนียม

มาส์กที่ 3 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียม

มาส์กที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียมสำหรับวัดการกระจายความร้อน

4.4.3 มาส์กต้นแบบเทอร์โมไพล์

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์กต้นแบบทั้งหมด 4 มาส์ก ด้วยกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาส์กที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม

มาส์กที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอนหรือฟอสฟอรัสสร้างแถบสารเจือ

มาส์กที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอลูมิเนียม

มาส์กที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะไทเทเนียม

มาส์กที่ 5 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอลูมิเนียม

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ในการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์ แผ่นผลึกซิลิคอนนั้นก็จะทำการสร้างเป็นสองขั้นตอน คือ การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ และลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างเทอร์โมไพล์

การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

สำหรับการสร้างอุปกรณ์นี้ได้ โดยใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่นิยมกันมาก โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีขั้นตอนการสร้างพื้นฐานดังนี้ คือ

1. การออกซิเดชัน (oxidation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี
3. การแพร่สารเจือ
4. การสร้างลวดลายโลหะ
5. สปัตเตอร์ริ่ง

กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในอุณหภูมิ 1000-1200 ^{0}C โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไป

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

$$Si + O_2 \longrightarrow SiO_2 \qquad (4.7)$$

2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

$$Si + 2H_2O \longrightarrow SiO_2 + 2H_2 \qquad (4.8)$$

สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประเภทแรกคือใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิคอน และป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้ทำไปฏิกิริยากับผิวซิลิคอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้ากากป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนเกทที่เรียกว่าเกทออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟท เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิคอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวของซิลิคอนในส่วนอื่น ๆ และจากวัตถุประสงค์ในการใช้งานชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กล่าวมา ทำให้ต้องการที่จะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกันเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่จะใช้เป็นหน้ากากป้องกันการแพร่อะตอมสารเจือ จำเป็นที่จะต้องมีความหนาประมาณ 4000-5000 Å ขึ้นไปและชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้เป็นหน้ากากป้องกันสารเคมีที่ใช้กัดซิลิคอนให้เป็นไดอะแฟรมต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 10000 Å ซึ่งความหนาขนาดนี้ การสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียวจะทำให้ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีของออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากากจะทำการสร้าง โดยใช้วิธีการสร้างโดยวิธีการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบชื้นและแบบแห้งอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้าง ซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้นสามารถสร้างความหนาได้เร็ว แต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นจะต้องสร้างสลับกับการสร้างแบบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพต้นแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้น้ำยาไวแสง เพื่อเปิดช่องซิลิคอนสำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและมีความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับการปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟฟีจะกล่าวถึงในหัวข้อลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น โดยที่แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือสามารถแบ่งได้ตามประเภทของอะตอมสารเจือ 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เช่น พลวง , สารหนู , ฟอสฟอรัสและแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เช่น โบรอน โดยในแต่ละประเภทก็จะสามารถแบ่งได้ตามสถานะของแหล่งจ่ายสารเจือ 3 ประเภท คือ 1) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็งอย่างเช่น Sb_2O_3 As_2O_3 และ SiP_2O_7 เป็นต้น 2) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของเหลวอย่างเช่น $POCl_3$ หรือ Bbr_3 เป็นต้น 3) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดก๊าซอย่างเช่น AsH_3 PH_3 และ B_2H_2 เป็นต้น สำหรับในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลือกที่จะใช้แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็นเป็น SiP_2O_7 และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เป็น BN ซึ่งทั้งสองชนิดมีสถานะเป็น ของแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็ง ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษเนื่องจากก๊าซพิษที่แพร่ออกมาจากปฏิกิริยาน้อยที่สุด และยังสะดวกอย่างยิ่งในการใช้งาน

สำหรับขั้นตอนในการปฏิบัติของกระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การ Predeposition เป็นการแพร่ขั้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

2. การ Drive-in เป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อและกำหนดการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิคหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่จะเคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ทำให้เกิดรอยผิวสัมผัสกับซิลิคอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี

สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะเลือกใช้โลหะ (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ 1 μm แล้วจึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยขบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี และกัดเป็นลวดลายตามที่ออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านขบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 ^{o}C ประมาณ 12 นาที เพื่อให้ รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิค

สปัตเตอร์ริ่ง (Sputtering)

สปัตเตอร์ริ่งเป็นเทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศอีกวิธีหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวรการสร้างวงจรรวม ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมา โดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงซึ่งจะทำให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการที่อนุภาควิ่งเข้าชนสารเคลือบเป็นเป้า ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ

1. เป้าโลหะ (target) ใช้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าจนมีการปล่อยอะตอมสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นฐานรองรับ

2. อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจจะเป็นกลางทางไฟฟ้าก็ได้ แต่การทำให้อนุภาคเป็นกลางทางไฟฟ้า เพื่อใช้ในการสปัตเตอร์ริ่งทำได้ค่อนข้างยาก จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการเร่งประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตอนก็เป็นประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ง่ายต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่ว่าอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของเป้าสารเคลือบมากและไม่สามารถทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอร์ริ่งได้ ดังนั้นการชนกันระหว่างอนุภาคจะต้องเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุด เมื่อมวลของอนุภาคมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนของก๊าซอาร์กอน (Ar^+) ในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเขาชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งจะทำให้อัตราการปลดปล่อยอนุภาคสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

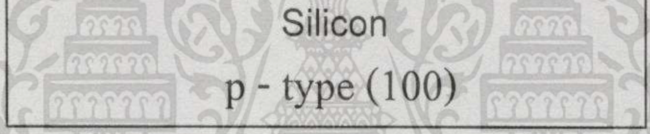
3. อนุภาคพลังงานสูงต้องถูกผลิตอยางต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบฟิล์มเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการโกลว์ดิสชาร์ท

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดพีระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิกัดความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึก 400 μm โดยภาพตัดขวางแสดงดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอททิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

เพื่อการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ให้มีความหนาไม่ต่ำกว่า 7000 Å จึงทำการออกซิเดชัน โดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.8

รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการอบให้แห้ง แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาส์ก I สำหรับรายละเอียดของ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat มีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที ที่ด้านหลัง
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉายแสงผ่านกระจกมาส์กที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แแสงอุลตราไวโอเลต ออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี่ λ = 5000 Å เป็นเวลา 10 วินาที ที่ด้านหลัง
- การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1.5 นาที จุ่มน้ำยาทำความสะอาด (Isopropyl) 3 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ทาด้านหน้าแผ่นผลึกด้วย Waycoat
- อบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

6. การลอกชั้นสารไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

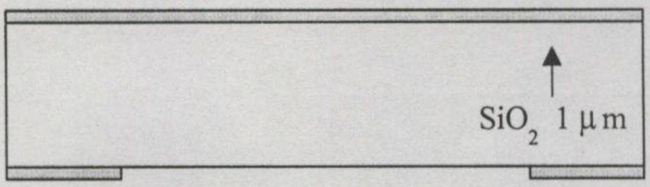
- ต้มในกรดซัลฟุริค (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโครโลเอททิลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซีโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อถึงขั้นตอนนี้ จะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

8. กระบวนการกัดเป็นไดอะแฟรมบาง

ใช้น้ำยาส่วนผสมของ Ethylene diamine : Pyrocatechol : DI Water (EPD) ในอัตราส่วน 50:8:16 ในขณะกัดจะใช้อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส กัดให้ได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการ

9. การลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

ทำเหมือนข้อ 5

10. ทำความสะอาดผิวผลึก

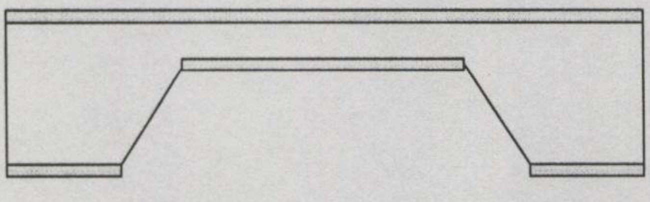
ทำเหมือนข้อ 7

11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

เมื่อได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ได้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. การเคลือบชั้นไททาเนียม (Ti)ในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นไททาเนียม หนาประมาณ 0.5 μm

13. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี II

ใช้กระจกมาส์กที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไททาเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาส์กที่ II ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

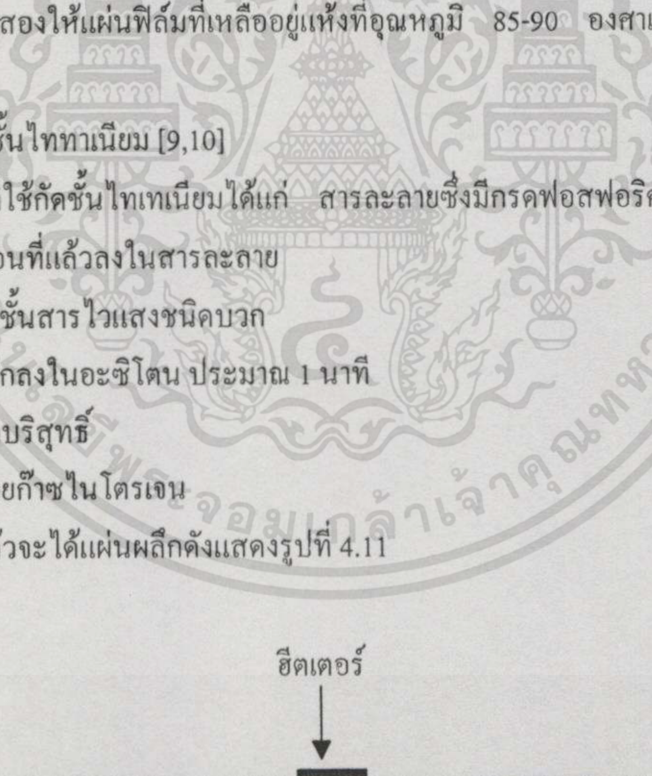
14. การกัดชั้นไททาเนียม [9,10]

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริคเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

15. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การสร้างแถบไททาเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm

17. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี III

ทำเหมือนข้อ 13

18. การกัดชั้นอลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริคเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 นาที

19. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- ทำเหมือนข้อ 15

20. เคลือบชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

โดยเครื่องสปัตเตอร์ริ่ง (sputtering) ทำการเคลือบชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

21. การเคลือบชั้นอลูมิเนียม

ทำเหมือนข้อ 12

22. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี IV

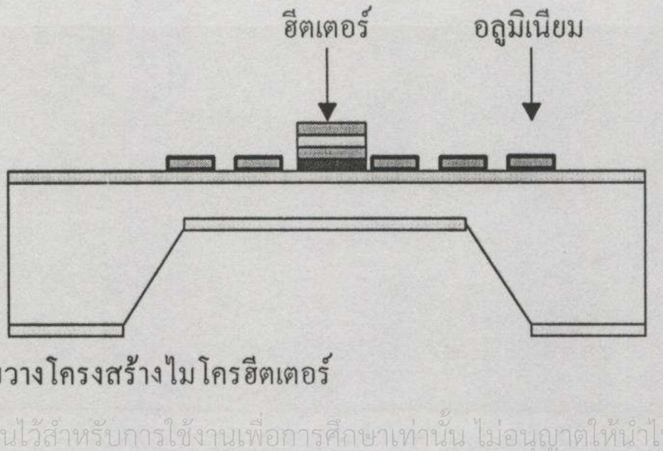
ทำเหมือนข้อ 13

23. ทำการลอกน้ำยาไวแสงชนิดบวก

ทำเหมือนข้อ 15

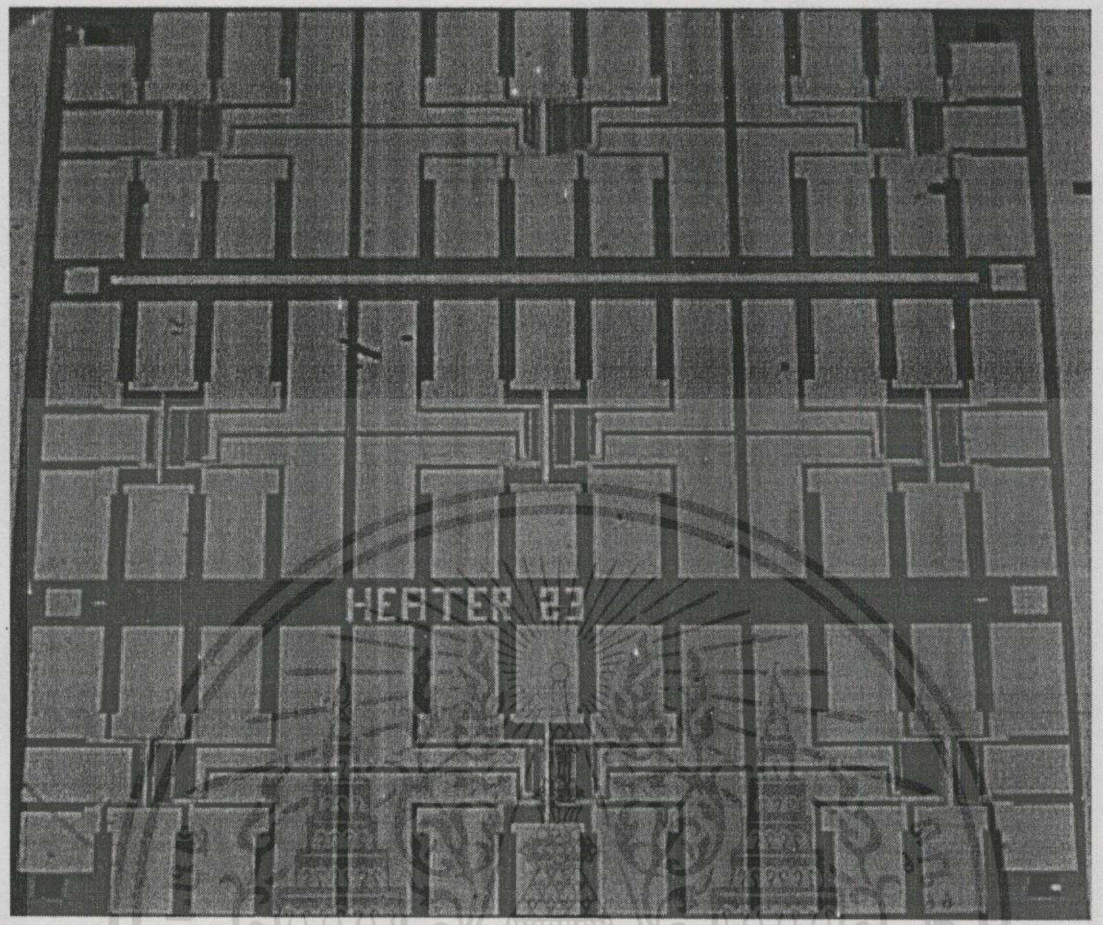
24. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

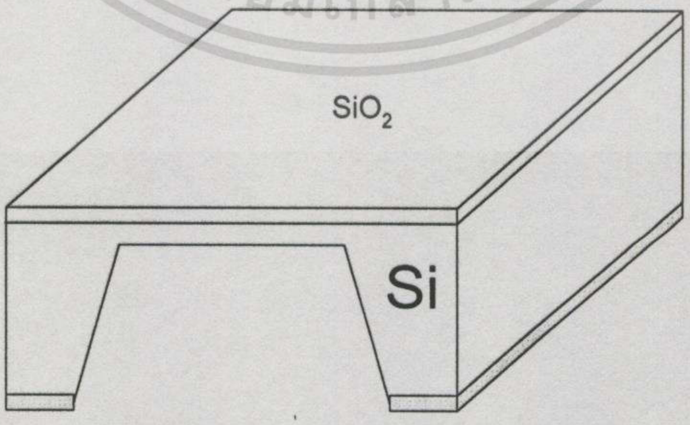


รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีตเตอร์ขั้นสุดท้าย

4.5 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น

จากกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 11 ดังที่กล่าวมาแล้วจะทำให้ได้ชิ้นงานดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี II

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องแพร่สารเจือ ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ II โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งจะทำเหมือนกับข้อ 4

13. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

14. การลอกชั้นสารไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน จะทำเหมือนกับข้อ 6

15. ทำความสะอาดผิวผลึก

ทำเหมือนข้อ 7

16. กระบวนการ n deposition

เป็นการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ SiP_2O_7(PH1000) ที่อุณหภูมิ 1040 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.8 ลิตรต่อนาที เมื่อผ่านขั้นตอนนี้จะได้อะตอมสารเจือที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ กัน

17. การลอกชั้น Phosphorous glass

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% นาน 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

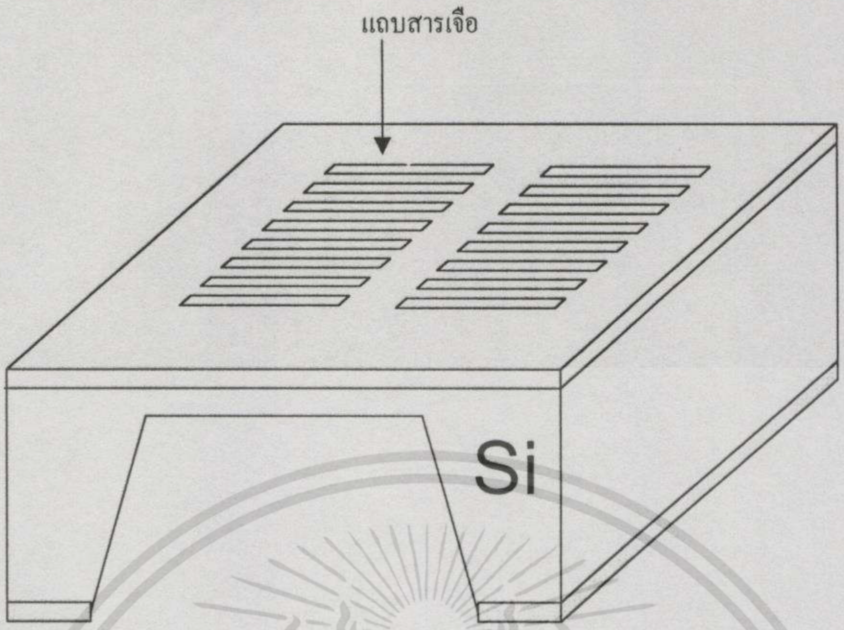
18. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

19. กระบวนการ n drive-in

ทำการขับลึกฟอสฟอรัสพร้อมทั้งทำสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางแถบแพร่สารเจือ

20. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี III

เพื่อทำการเปิดช่องรอยต่อสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนและขั้วโลหะ ซึ่งทำเหมือนข้อ 4

21. การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

22. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

23. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

24. การเคลือบชั้นไททาเนียม (Ti)ในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นไทเทเนียม หนา ประมาณ 0.5 μm

25. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี I V

ใช้กระจกมาส์กที่ IV เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไททาเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉายแสงผ่านมาส์กที่ I V ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที

- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

26. การกัดชั้นไททาเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไททาเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริคเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

27. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

28. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm

29. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี V

เพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียม ซึ่งทำเหมือนข้อ 25

30. การกัดชั้นอลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไททาเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริคเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

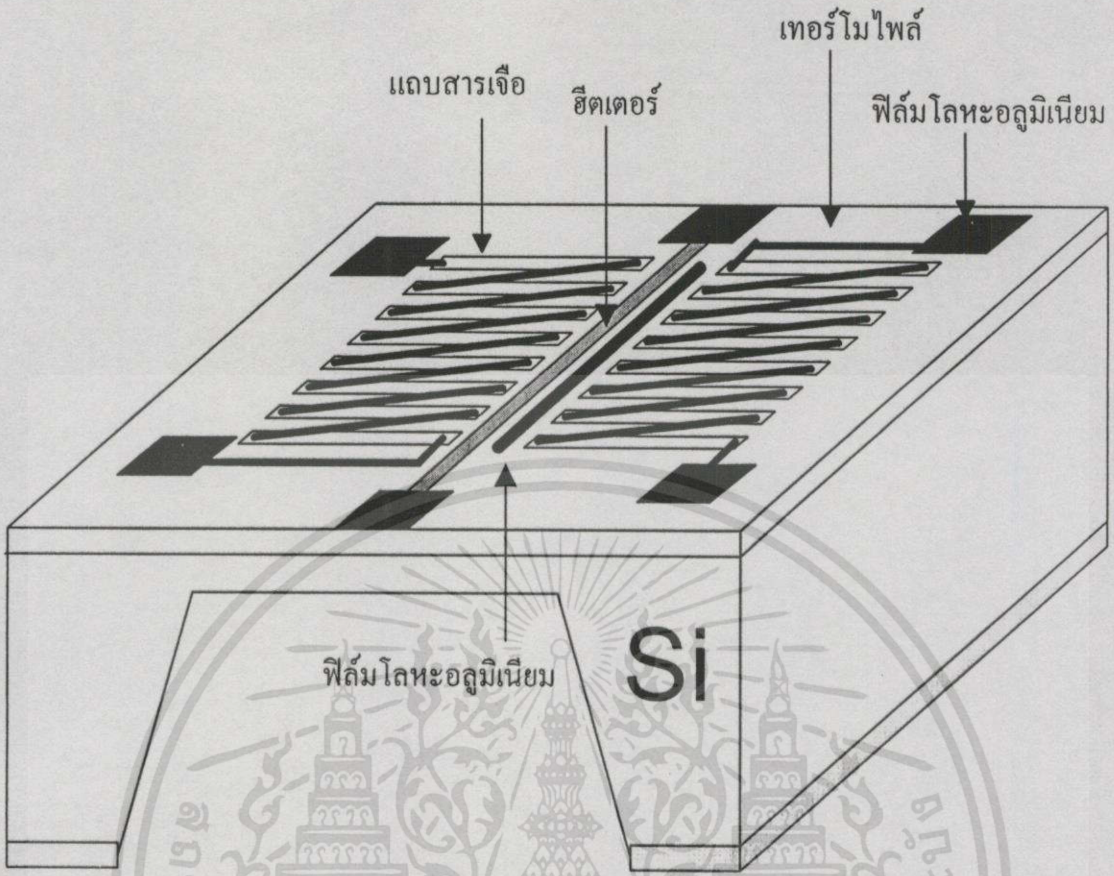
31. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

ทำเหมือนข้อ 27

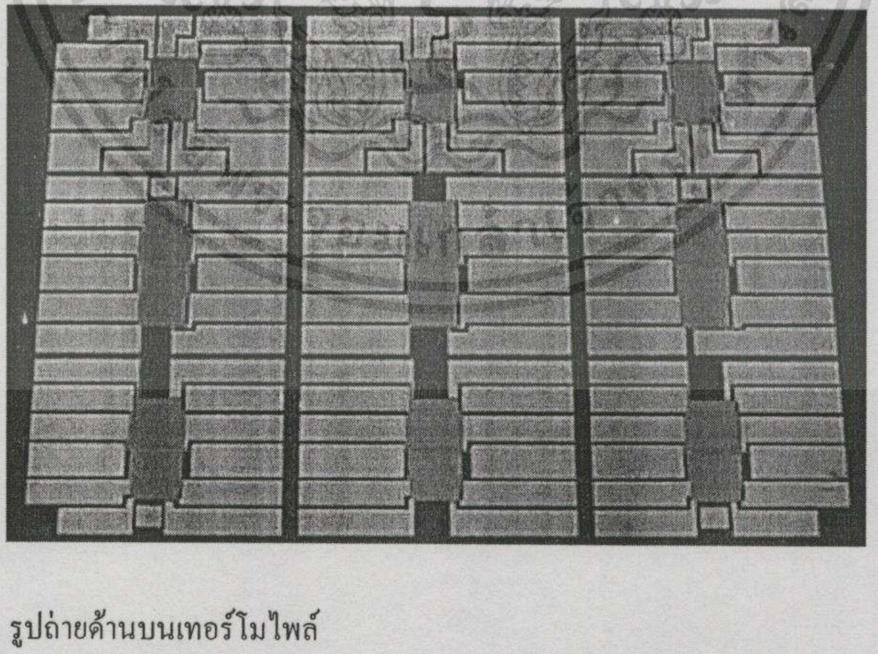
32. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกแสดงดังรูปที่ 4..16 และ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ภาพตัดขวางเทอร์โมไพล์



รูปที่ 4.17 รูปถ่ายด้านบนเทอร์โมไพล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมไพล์ชนิดพี

ลำขั้นตอนการสร้างก็จะทำเหมือนกับลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น เพียงแต่เปลี่ยนฐานรองจากซิลิคอนชนิดพี มาเป็นชนิดเอ็นแล้วทำการแพร่สารเจือโบรอน

4.6 การแอสเซมบี

เมื่อเสร็จกระบวนการสร้างเทอร์โมไพล์ลงบนแผ่นซิลิคอนแล้ว ก่อนที่จะนำแผ่นซิลิคอนไปเข้ากระบวนการแอสเซมบลี (Assembly) จะต้องทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมไพล์เบื้องต้นก่อน ด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค หลังจากนั้นนำแผ่นซิลิคอนเทอร์โมไพล์มาเข้ากระบวนการต่างดังนี้

- การตัดแยกชิพ

เป็นขั้นตอนการนำแผ่นซิลิคอนเทอร์โมไพล์ที่ผ่านกระบวนการตรวจสอบสมบัติแล้ว มาแยกเป็นชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าชิพหรือดาย (chip or die) เพื่อทำการเก็บบรรจุในขั้นสุดท้าย วิธีการตัดแยกชิพจะให้เครื่องตัด (sawing machine) ซึ่งใช้ใบเลื่อยเพชรที่มีลักษณะกลมหมุนด้วยความเร็วสูงตัดแผ่นซิลิคอนออกเป็นชิ้นๆ ตามต้องการ

- การติดตั้งชิพบนฐานรอง

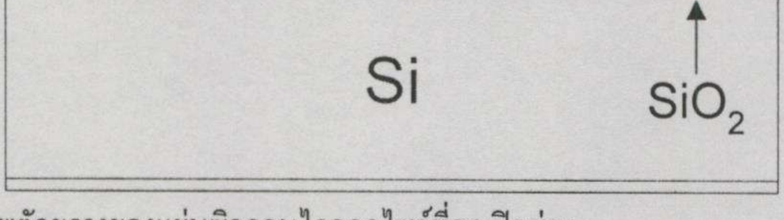
เป็นขั้นตอนการนำชิพที่ผ่านการตัดมาติดบนฐานรอง (แผ่นปริ้นสำเร็จรูป) ด้วยตัวเชื่อมเป็นอีบอกซี

- การต่อสายลวดตัวนำ

เป็นขั้นตอนการต่อสายเส้นลวดลายอลูมิเนียมจากขั้วไฟฟ้าบนชิพไปยังขาโลหะที่อยู่ติดกับฐานรอง

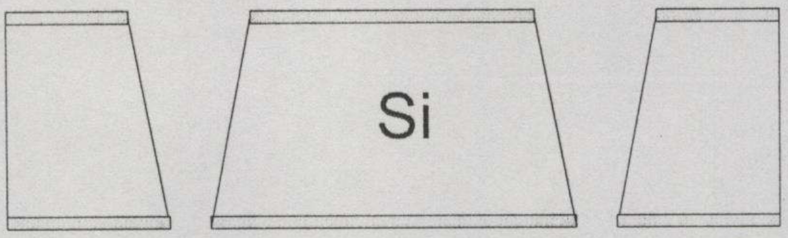
4.7 การเก็บบรรจุ

เป็นขั้นตอนการสร้างช่องอุโมงค์เพื่อเป็นฝาปิดตัวซิลิคอนเทอร์โมไพล์ จากกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 11 ดังที่กล่าวมาแล้วจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีภาพตัดขวางดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลคอนไดออกไซด์ที่ถูกเปิดช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

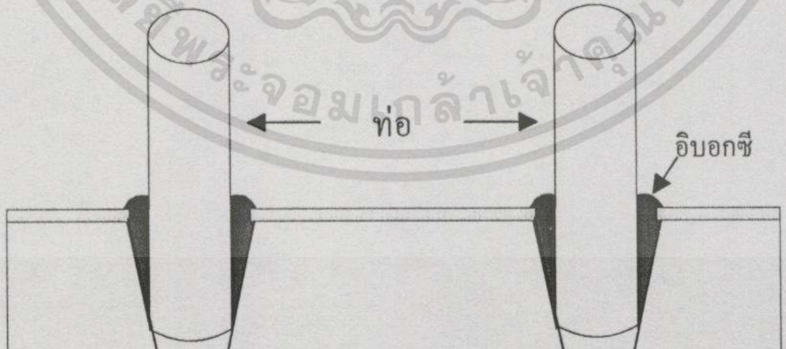


รูปที่ 4.19 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลคอนเป็นรูที่ถูกกัดด้วยสารละลาย

12. ทำการกัดช่องอุโมงค์ด้วยสารละลายเพื่อให้ก๊าซไหลผ่าน ซึ่งมีขนาด 4500 x 1400 x20 μm^3 แสดงดังรูปที่ 4.20

รูปที่ 4.20 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลิคอนเป็นช่องอุโมงค์

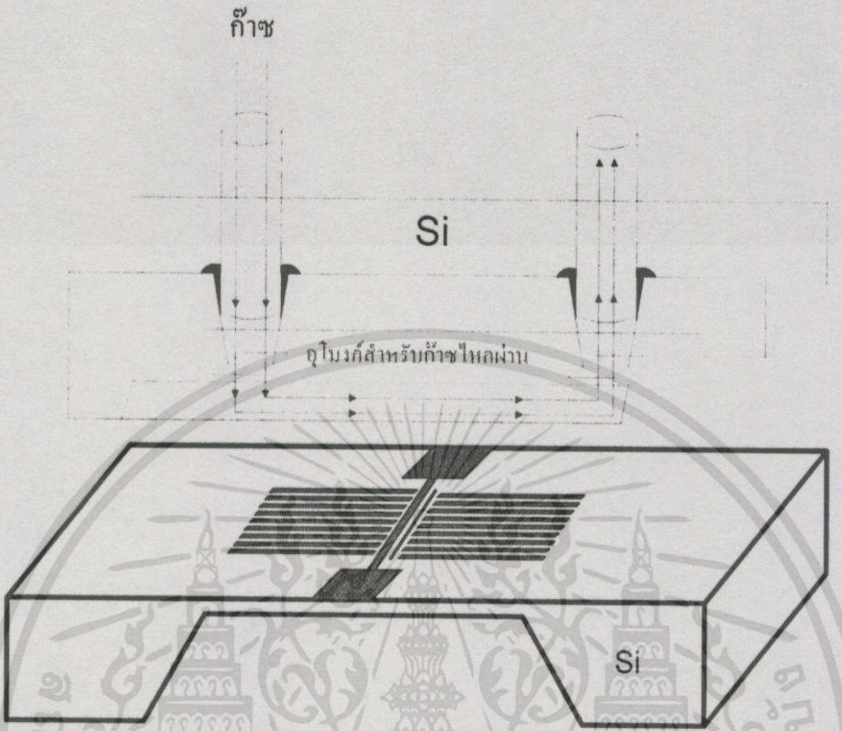
13. นำท่อมาต่อเข้ากับรูของซิลิคอนที่ได้จากกัด โดยการเชื่อมต่อด้วยกาวอิบอกซี แสดงดังรูปที่ 4.21



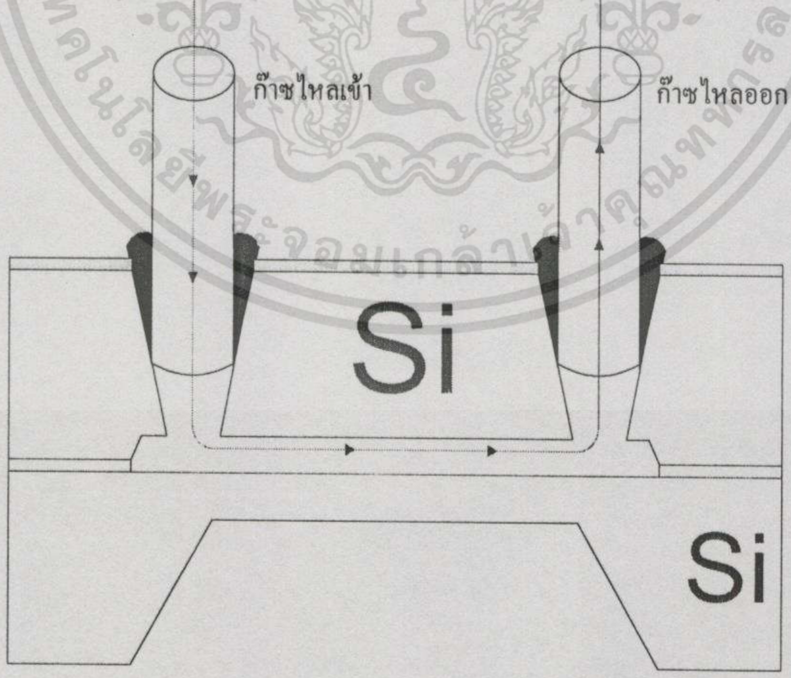
รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลิคอนเป็นช่องอุโมงค์ที่ถูกต่อท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 นำฝาปิดที่รูปที่ 4.21 ไปประกอบเข้ากับเทอร์โมไพล์ ได้ดังรูปที่ 4.20 บริเวณรอบๆ ระหว่างฝาปิดชิพซิลิคอนด้วยตัวเชื่อมซึ่งเป็นอิบอกซี แสดงดังรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24

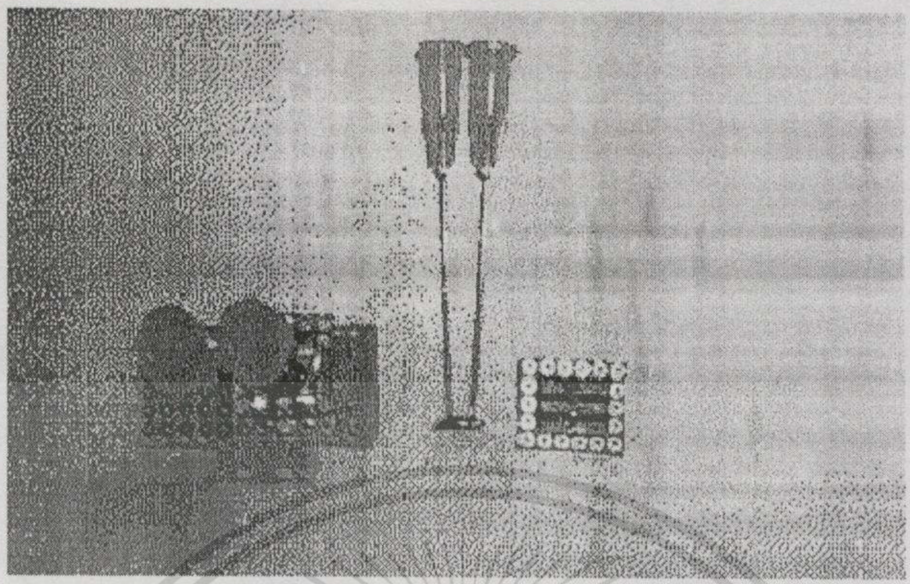


รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลิคอนเป็นช่องอุโมงค์และเทอร์โมไพล์



รูปที่ 4.23 ภาพตัดขวางของแผ่นซิลิคอนเป็นช่องอุโมงค์ที่ถูกกับชิพเทอร์โมไพล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์การแพร่สารเจือชนิดเอ็นและพี

5.1.1 การศึกษาความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นและชนิดพี

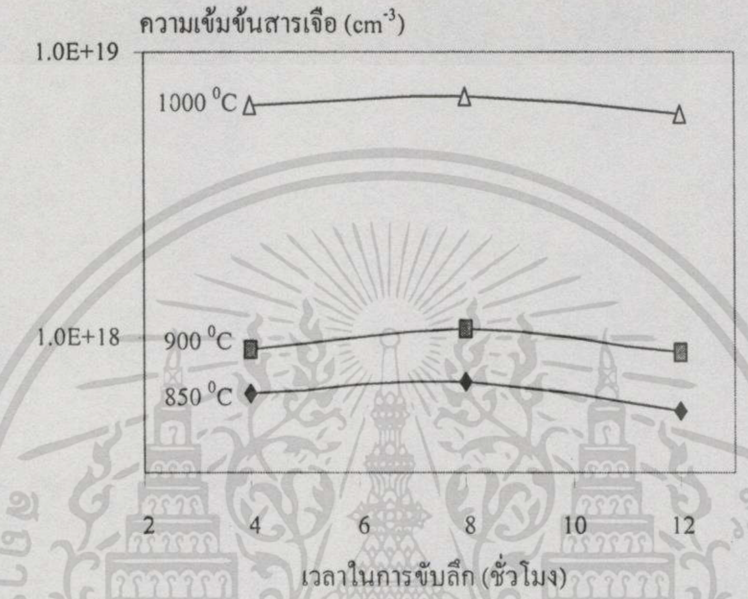
ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นและพี ที่ได้จากการแพร่สารเจือ ถูกนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นสารเจือด้วยเครื่อง SR-210 (Spreading Resistance Profiler-210) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดตรวจสอบความเข้มข้นสารเจือที่ลึกลงไปจากผิวระนาบ โดยการเริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนมาตัดให้มีขนาดเล็กประมาณ 2 X 5 $mm.^2$ แล้วนำชิ้นงานไปขัดด้วยเครื่องขัด แสดงดังรูปที่ 5.1

รูปที่ 5.1 ชิ้นงานที่ถูกขัดด้วยผงเพชร

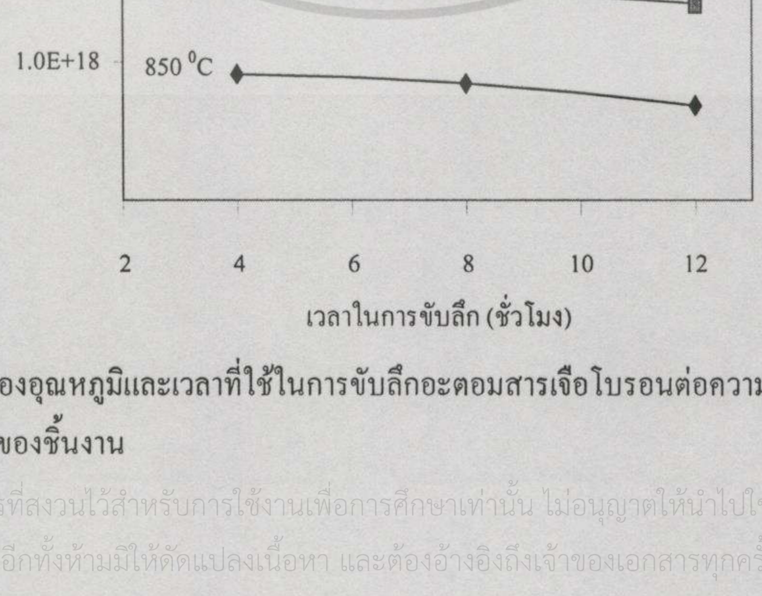
จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวที่ได้จากการขัดผิวหน้าด้วยผงเพชรขนาด 0.25 μm แล้วนำชิ้นงานนี้ไปวัดด้วยเครื่อง SR-210 จากรูปที่ 5.2 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขับลึกอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน โดยการแพร่สารเจือเป็นเวลา 5 นาที และใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน แล้วทำการขับลึกที่อุณหภูมิ 1100 ^{0}C และเวลาต่างๆ กันคือ 4, 8 และ 12 ชั่วโมง เห็นว่าในช่วงแรกของขับลึกค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้นเพราะว่าสารเจือฟอสฟอรัสเกิดการแพร่ออกมาที่ผิว (out of diffusion) และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวหน้าลดลง ส่วนรูปที่ 5.3 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขับลึกอะตอมสารเจือโบรอนต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงานโดยทำการแพร่สารเจือเป็นเวลา 5 นาที และใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน แล้วทำการขับลึกที่อุณหภูมิ 1100 ^{0}C และเวลาในการขับลึกต่างๆ กันคือ 4, 8 และ 12 ชั่วโมง จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวจะมีค่าลดลง



รูปที่ 5.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขับลึกอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน

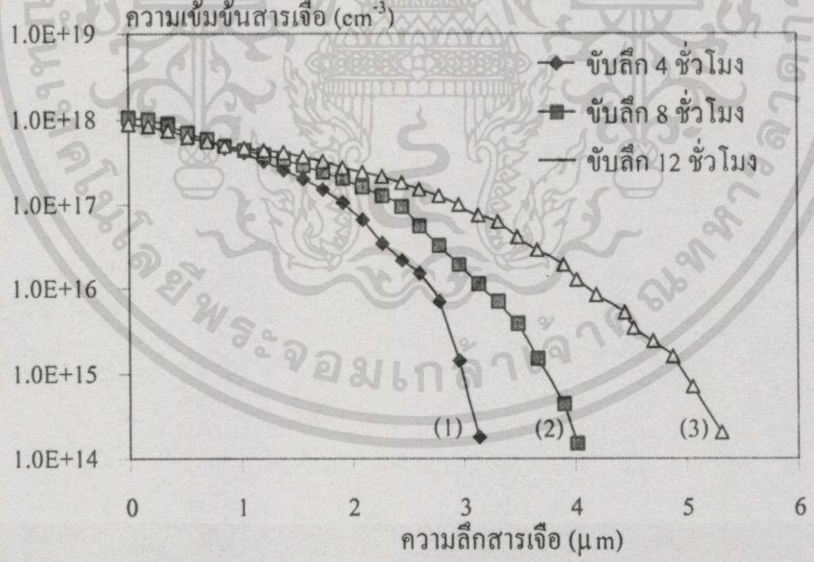


รูปที่ 5.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขับลึกอะตอมสารเจือโบรอนต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

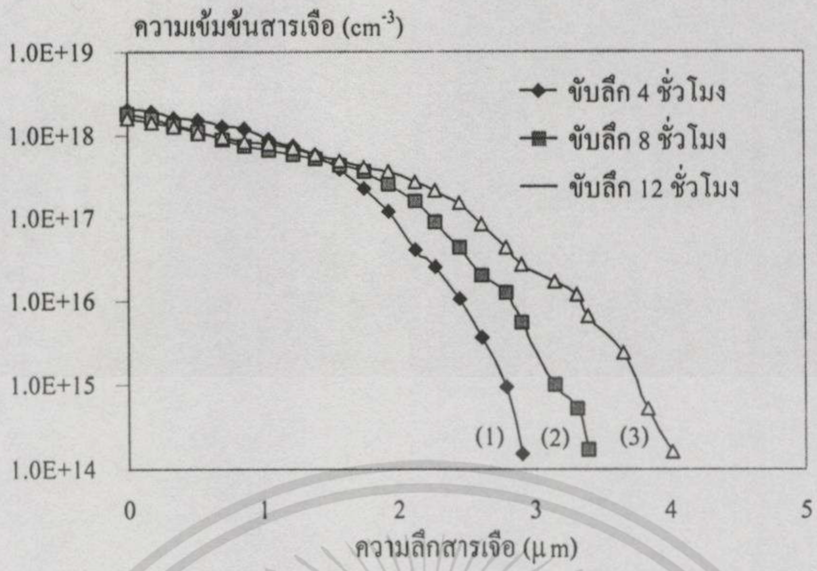
5.2.2 การศึกษาความลึกของรอยพีเอ็น

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาความลึกของรอยต่อพีเอ็น โดยการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 900 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการขับลึกที่อุณหภูมิ 1100 ^{0}C ใช้เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.4 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสที่ใช้เวลาขับลึกต่างกันโดยเส้นที่ 1 แสดงการขับลึกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เส้นที่ 2 แสดงการขับลึกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเส้นที่ 3 แสดงการขับลึกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการขับลึก ค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวและใต้ผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการขับลึกใช้เวลานานขึ้นค่าความเข้มข้นสารเจือจะเริ่มลดลงและสารเจือแพร่ลงในผิวซิลิคอนจะเพิ่มมากขึ้น โดยการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิ 900 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการขับลึกที่อุณหภูมิ 1100 ^{0}C ใช้เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.5 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือโบรอนที่ใช้เวลาขับลึกต่างกันโดยเส้นที่ 1 แสดงการขับลึกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เส้นที่ 2 แสดงการขับลึกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเส้นที่ 3 แสดงการขับลึกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าการขับลึกใช้เวลานานขึ้นค่าความเข้มข้นสารเจือจะเริ่มลดลงและสารเจือจะแพร่ลงในผิวซิลิคอนจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5.4 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสที่ใช้เวลาขับลึกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



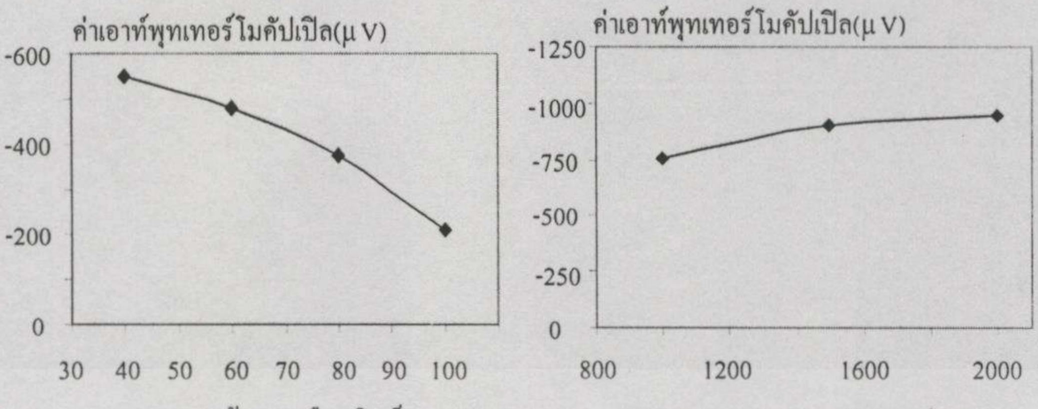
รูปที่ 5.5 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือโบรอนที่ใช้เวลาขับลึกต่างกัน

5.2 การศึกษาเทอร์โมคัปเปิลแบบสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

5.2.1 ผลของโครงสร้างต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาท์พุท

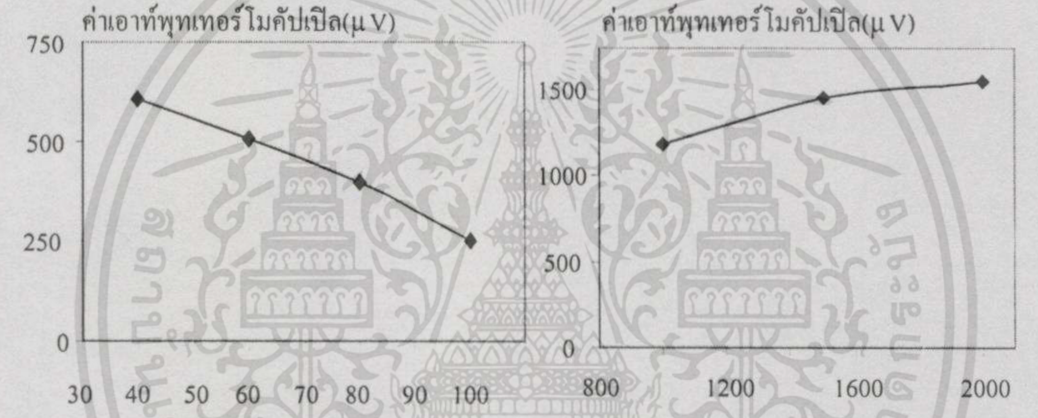
เมื่อทำการแพร่สารเจือเพื่อสร้างเป็นแถบสารเจือแล้วจะทำการสร้างฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อน ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แถบความกว้างสารเจือต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 μm และทุกตัวมีความยาวแถบสารเจือเท่ากัน 6000 μm และเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวสารเจือต่างกันคือ 1000, 1500 และ 2000 μm และทุกตัวมีขนาดความกว้างแถบสารเจือ 40 μm แสดงผลดังรูปที่ 5.6(ก) และ 5.6(ข) ซึ่งแสดงค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของแถบสารเจือชนิดเอ็น ซึ่งค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลเป็นลบ สำหรับรูปที่ 5.7(ก) และ 5.7(ข) แสดงค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของแถบสารเจือชนิดพี มีค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลเป็นบวก เห็นได้ว่าเมื่อแถบความกว้างสารเจือมีขนาดเล็กลงและยาวขึ้นจะทำให้ได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าทั้งเป็นบวกและเป็นลบ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้บอกชนิดของสารเจือได้ ว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี โดยที่ค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistace) 15 Ω/□ และลึก 3.4 μm ของสารเจือฟอสฟอรัส และค่าความต้านทานแผ่น 20 Ω/□ และลึก 3.0 μm ของสารเจือโบรอน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. แถบความกว้างสารเจือชนิดเอ็น (μm) ข. แถบความยาวสารเจือชนิดเอ็น (μm)

รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือชนิดเอ็น



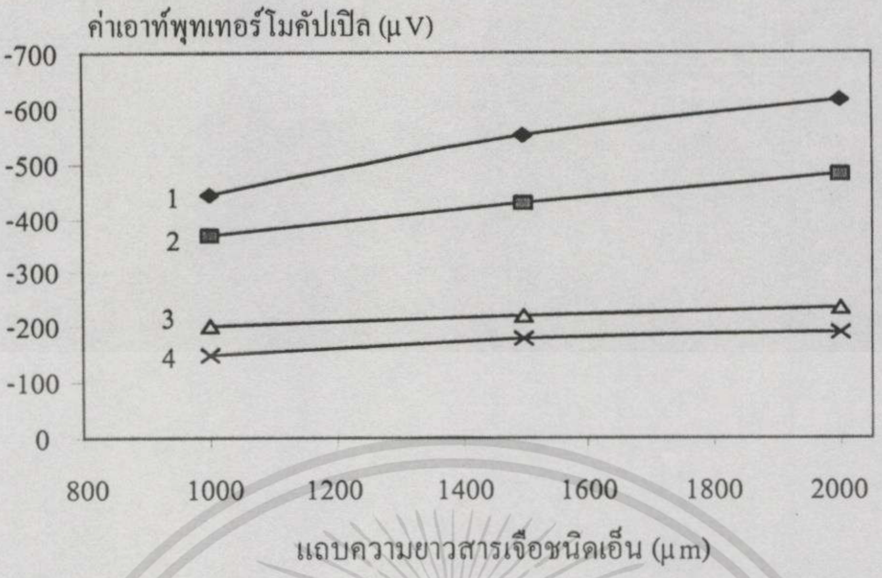
ก. แถบความกว้างสารเจือชนิดพี (μm) ข. แถบความยาวสารเจือชนิดพี (μm)

รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือชนิดพี

5.2.2 ผลของความเข้มข้นสารเจือและความลึกของรอยต่อสารเจือที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเทอร์โมคัปเปิล

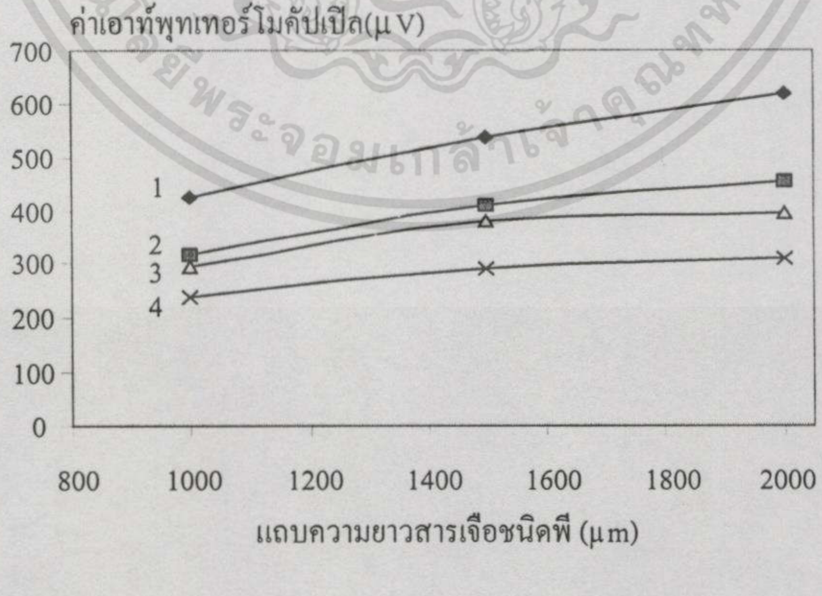
ในการทดลองนี้จะมีค่าความเข้มข้นสารเจือและความลึกสารเจือทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี แสดงดังรูปที่ 5.8 แสดงค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดเอ็น และ รูปที่ 5.8 แสดงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ของสารเจือซิลิคอนชนิดพี จะเห็นได้ว่าค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือจะมีแนวน้อมค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มขึ้นเมื่อสภาพความต้านทานผิวมากขึ้นและความลึกเพิ่มขึ้น แต่บางครั้งก็ไม่เป็นตามที่คาดการณ์ ทั้งนี้เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ (change of fermi energy) การกระเจิงของประจุพาหะ (scattering of the charge carrier) และการดรากโฟนอน(phonon drag)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดเอ็น

1. α = 1053 μV/K, ρ = 0.06 Ωcm, ρ_{sh} = 134 Ω/□
2. α = 811 μV/K, ρ = 0.02 Ωcm, ρ_{sh} = 59 Ω/□
3. α = 226 μV/K, ρ = 0.0014 Ωcm, ρ_{sh} = 3 Ω/□
4. α = 699 μV/K, ρ = 0.01 Ωcm ρ_{sh} = 32.9 Ω/□



รูปที่ 5.9 ค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. α = 811 µV/K, ρ = 0.02 Ωcm ρ_{sh} = 78.21 Ω/□

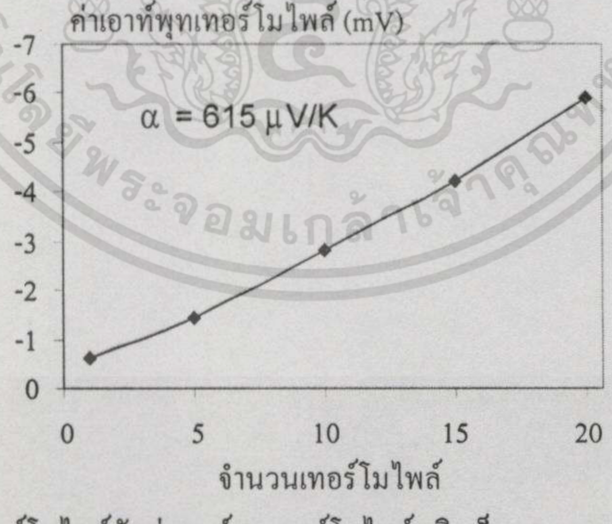
2. α = 824 µV/K, ρ = 0.023 Ωcm ρ_{sh} = 92.8 Ω/□

3. α = 748 µV/K, ρ = 0.015 Ωcm ρ_{sh} = 33.7 Ω/□

4. α = 379 µV/K, ρ = 0.0028 Ωcm ρ_{sh} = 8.75 Ω/□

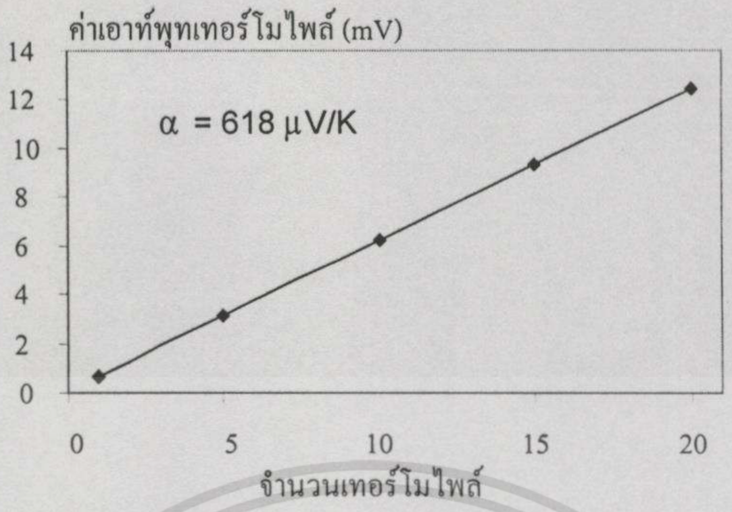
5.2.3 จำนวนเทอร์โมไพล์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์

เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิชนิดหนึ่ง ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อต้องการให้ได้ค่าเอาท์พุทสูงขึ้น โดยการนำเทอร์คัปเปิลมาต่ออนุกรมกัน ได้เป็นเทอร์โมไพล์และได้ค่าเอาท์พุทสูงขึ้นตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่นำมาต่ออนุกรมกัน แสดงดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ซึ่งจะมีจำนวนเทอร์โมคัเปิลมาต่ออนุกรมกัน 1,5, 10, 15 และ 20 ตัว รูปที่ 5.10 สร้างด้วยการแพร่สารเจือชนิดเอ็น จะได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ $V_{th} \cong 0.5N\alpha\Delta T$ โดยที่ N คือจำนวนเทอร์โมคัปเปิล ที่ได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็นไม่เป็นไปตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่นำต่ออนุกรมกัน เนื่องจากในหว่างกระบวนการสร้าง จากสาเหตุที่กล่าวมาทั้งหมดจะมีประจุบวกอยู่ที่ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนให้มาอยู่ที่ผิว ทำให้เกิดชั้นสารเจือซิลิคอนชนิดเอ็นที่ผิวของซิลิคอนแถบสารเจือเสมือนต่อกันอยู่ระหว่างแถบสารเจือ รูปที่ 5.11 เป็นเทอร์โมไพล์ชนิดพี สร้างด้วยการแพร่สารเจือโบรอน จะได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดพีเป็นไปตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน $V_{th} = N\alpha\Delta T$



รูปที่ 5.10 จำนวนเทอร์โมไพล์กับค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

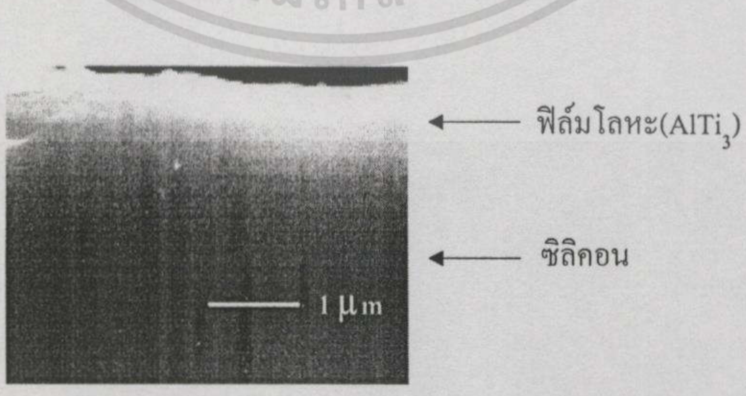


รูปที่ 5.11 จำนวนเทอร์โมไพล์กับค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดพี

5.3 การศึกษาไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน

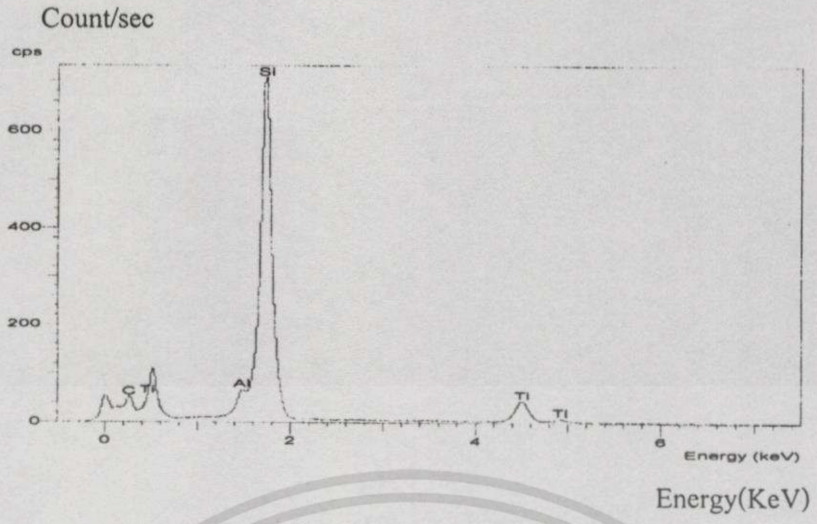
5.3.1 การวิเคราะห์วัสดุไมโครฮีตเตอร์ Al-Ti

การเตรียมฟิล์มโลหะไททาเนียมและอลูมิเนียม ซึ่งถูกระเหยในระบบสุญญากาศ โดยการระเหยไททาเนียมและตามด้วยการระเหยอลูมิเนียม ซึ่งลักษณะเนื้อฟิล์มของไททาเนียมจะมีสีเทา และถ้านำไปซินเตอร์ริ่งในบรรยากาศของไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์(TiN) ซึ่งมีสีทอง เมื่อนำฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม ไปซินเตอร์ริ่งที่อุณหภูมิ 450 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที จะได้อัลลอยด์ของ $TiAl_3$ โดยอยู่ระหว่างฟิล์มไทเทเนียมและอลูมิเนียม สีที่ผิวของอลูมิเนียมฟิล์มยังเป็นสีเงินซึ่งเป็นสีของอลูมิเนียมฟิล์ม แสดงได้ว่าที่ผิวด้านบนยังเป็นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม รูปที่ 5.12 แสดงการถ่ายภาพตัดขวางถ่ายด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) ได้ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียม 0.8 μm และไททาเนียม 0.4 μm และรูปที่ 5.13 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะ($AlTi_3$) ด้วย EDS (Energy Dispersive Spectrometer)



รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



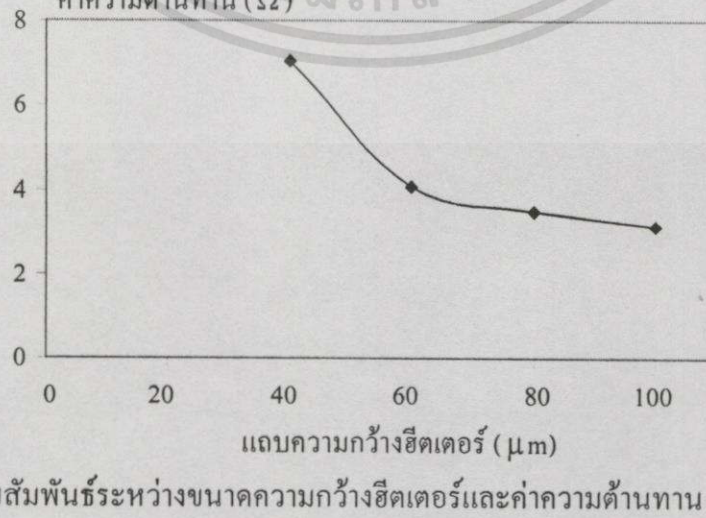
รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะด้วย EDS

5.3.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบขนาดความกว้างฮีตเตอร์ให้มีขนาดต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 μm ตามลำดับ และมีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 4 ชุด คือ 1400 μm ที่ขนาดฮีตเตอร์ต่างกันทำให้ค่าความต้านทานต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.14

ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์

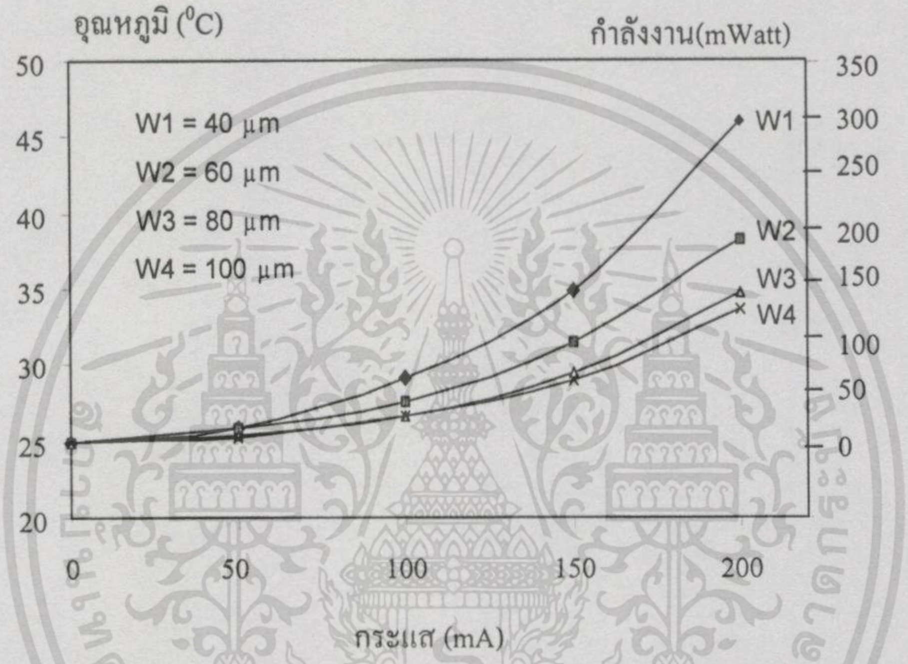
ไมโครฮีตเตอร์ชุดที่	ขนาดความกว้างไมโครฮีตเตอร์ (μm)	ค่าความต้านทาน (Ω)
1	40	7.03072
2	60	4.05873
3	80	3.48872
4	100	3.12810



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างฮีตเตอร์และค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮีตเตอร์ก็คือตัวความต้านทาน เมื่อให้กระแสไหลผ่านตัวความต้านทานจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการทดลองนี้จ่ายกระแสในช่วง 0 – 200 mA และความหนาไดอะแฟรม 25 μm แสดงดังรูปที่ 5.15 การกระจ่ายความร้อนบนไดอะแฟรมที่ฮีตเตอร์มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 μm ตามลำดับ ในช่วงแรกของการจายกระแสจะไม่ค่อยเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่เมื่อให้กระแสสูงขึ้นจะเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ที่ขนาดความกว้าง 40 μm จะให้อุณหภูมิและพลังงานสูงสุด

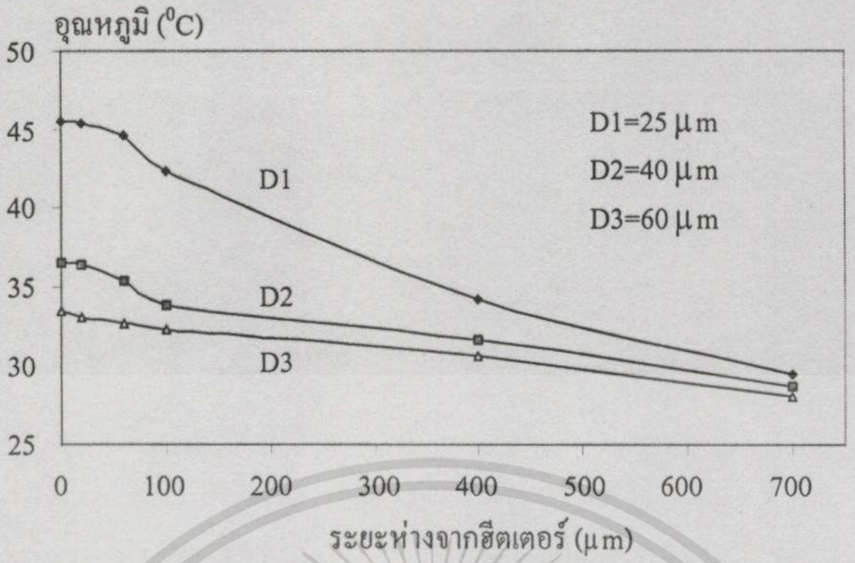


รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของฮีตเตอร์ ที่มีขนาดความกว้าง (W) ต่างกัน

5.3.3 ผลของไมโครฮีตเตอร์บนไดอะแฟรม

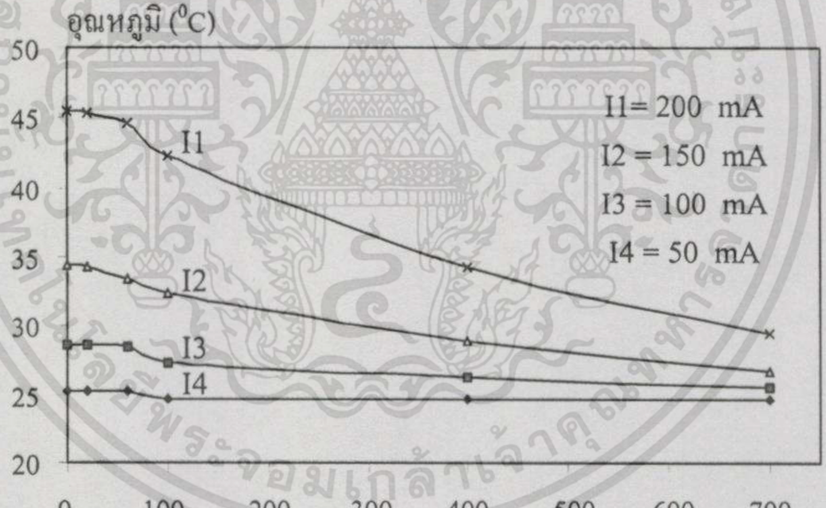
ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการกระจายความร้อนของฮีตเตอร์ที่ความหนาต่างกันคือ 25, 40 และ 60 μm ตามลำดับ และยังมีตัวตรวจวัดการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมซิลิคอนเป็นฟิล์มอลูมิเนียมที่มีระยะห่างจากไมโครฮีตเตอร์ 0, 20, 60, 100, 400 และ 700 μm ตามลำดับ จากรูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกันคือ 25, 40 และ 60 μm ใช้ฮีตเตอร์ขนาดความกว้าง 40 μm โดยการจ่ายกระแสคงที่ 200 mA จากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าที่ขนาดความหนาไดอะแฟรม 25 μm พบว่าจะให้อุณหภูมิของฮีตเตอร์และการกระจายความร้อนที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าไดอะแฟรมที่หนากว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 การกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่ความหนาต่างกัน

จากรูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความร้อนที่จ่ายขนาดกระแสต่างกัน คือ 50, 100, 150 และ 200 mA



รูปที่ 5.17 การกระจายความร้อนของฮีตเตอร์ที่ขนาด 40 μm โดยความหนาของไดอะแฟรม 25 μm

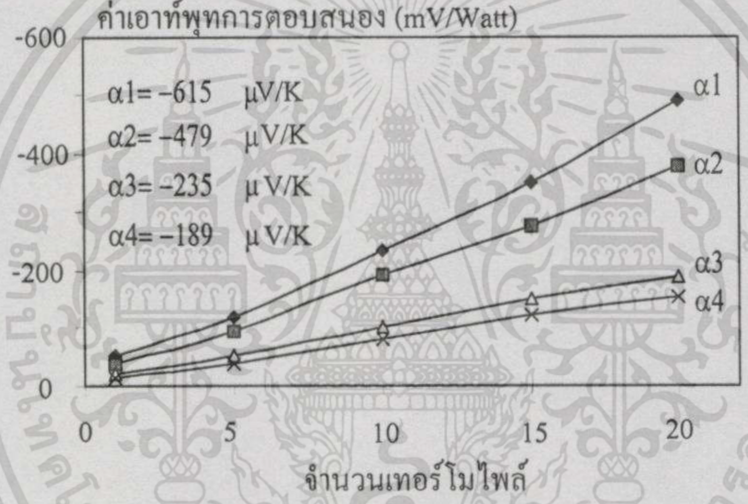
5.4 การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไพล์บนฐานรองไมโครฮีตเตอร์

5.4.1 ค่าเอาท์พุทการตอบสนองเทอร์โมไพล์

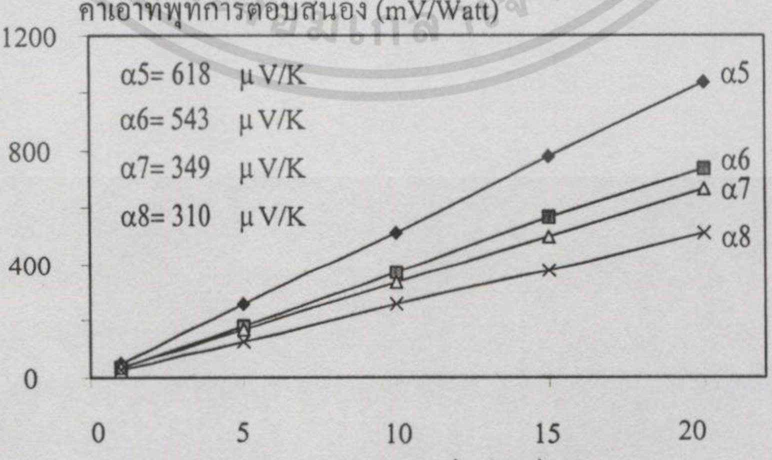
ในการหาค่าเอาท์พุทการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลและเทอร์โมไพล์หาได้จากส่วนเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ (Volt) กับกำลังงานของฮีตเตอร์ (Watt) โดยการให้กระแสกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮีตเตอร์ เพื่อกำเนิดความร้อนให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อร้อน (hot junction) และรอยต่ออ้างอิง (reference junction) ใช้จำนวนเทอร์โมไพล์ 1,5, 10, 15 และ 20 ตัว แสดงดังรูปที่ 5.18 แสดงค่าเอาท์พุทการตอบสนองเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คต่างกันคือ เส้นที่ ($\alpha 1$) -615 μV/K เส้นที่ ($\alpha 2$) -479 μV/K เส้นที่ ($\alpha 3$) -235 μV/K และเส้นที่ ($\alpha 4$) -189 μV/K โดยแกน X เป็นจำนวนเทอร์โมไพล์และแกน Y เป็นค่าเอาท์พุทการตอบสนองเทอร์โมไพล์ ค่าเอาท์พุทการตอบสนองเทอร์โมไพล์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเทอร์โมไพล์เพิ่มขึ้น แต่มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของการคำนวน รูปที่ 5.19 แสดงค่าเอาท์พุทการตอบสนองเทอร์โมไพล์ชนิดพี มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คต่างกันคือ เส้นที่ ($\alpha 5$) 618 μV/K เส้นที่ ($\alpha 6$) 543 μV/K เส้นที่ ($\alpha 7$) 349 μV/K และเส้นที่ ($\alpha 8$) 310 μV/K ค่าเอาท์พุทการตอบสนองเทอร์โมไพล์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเทอร์โมไพล์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.18 ค่าเอาท์พุทการตอบสนองของเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น

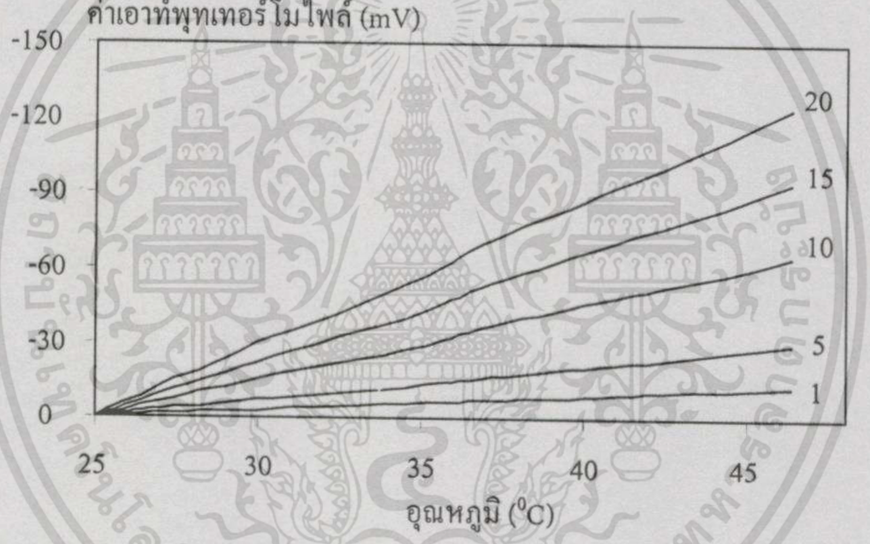


รูปที่ 5.19 ค่าเอาท์พุทการตอบสนองของเทอร์โมไพล์ชนิดพี

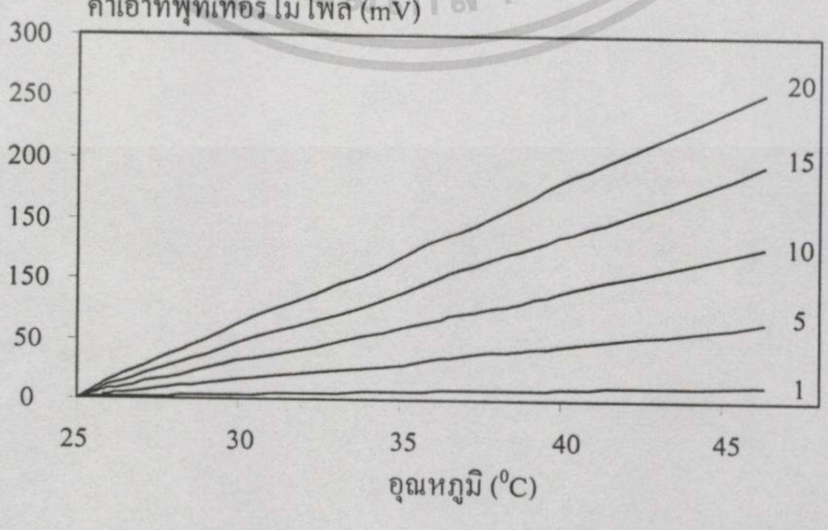
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 ผลของการเป็นเชิงเส้นของเอาท์พุทเทอร์โมไพล์

เทอร์โมคัปเปิลเป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยวัสดุตัวนำสองชนิดต่างกันคือ ซิลิคอนและอลูมิเนียม โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้ง ซึ่งจะเป็นไปสมการ $V_{AB} = \alpha_{AB}(T_2-T_1)$ และเมื่อต้องการค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยการนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่ออนุกรมกันได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน แสดงดังสมการ $V_{AB} = N\alpha_{AB}(T_2-T_1)$ โดยที่ N คือจำนวนเทอร์คัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีจำนวนเทอร์โมไพล์ 1, 5, 10, 15 และ 20 ตัว รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดพีกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีจำนวนเทอร์โมไพล์ 1 5 10 15 และ 20 ตัว



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ชนิดพี

เอกสารนี้... ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเทอร์โมไพล์

การทดลองนี้จะใช้แท่งฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อนทำให้อุณหภูมิฐานรองเปลี่ยน เปลี่ยน 50, 100 และ 150 ^{0}C รูปที่ 5.22 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่อุณหภูมิฐานรองซิลิคอนเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าลดลง

รูปที่ 5.22 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่อุณหภูมิฐานรองซิลิคอนเปลี่ยนไป

5.5 การประยุกต์ใช้เทอร์โมไพล์สำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซ

5.5.1 ผลของไดอะแฟรมต่ออัตราการไหลของก๊าซ

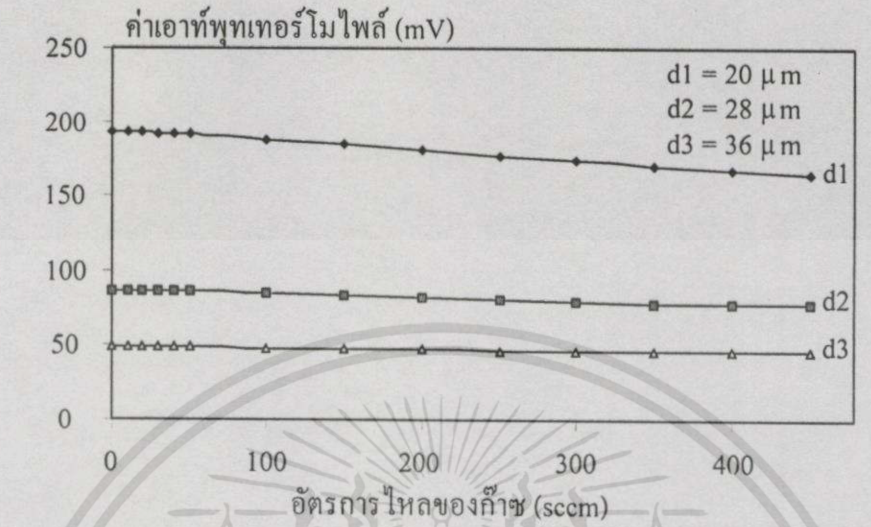
ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซ โดยการวัดทั้งหมดจะใช้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 450 sccm ช่องอุโมงค์สำหรับให้ก๊าซไหลผ่านมีขนาด 1200 X 2400 X 20 μm ใช้ขนาดความหนาไดอะแฟรม 20, 28 และ 36 μm รูปที่ 5.23 และ รูปที่ 5.24 เป็นผลของการวัดค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์และค่าความไวของการวัดอัตราการไหลของที่ความหนาไดอะแฟรมหนา ต่างกัน ซึ่งค่ากำลังงานที่ให้กับฮีตเตอร์มีค่าเท่ากัน คือ 0.584 Watt

ที่ความหนาไดอะแฟรม (d1) 20 μm มีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ 192.99 – 164.63 mV ที่ความหนาไดอะแฟรม (d2) 28 μm มีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ 86.34 – 78.1 mV และความหนาไดอะแฟรม (d3) 36 μm มีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ 49.21 – 46.03 μm จากรูปเห็นได้ค่าความหนาไดอะแฟรม 20 μm จะมีผลตอบสนองต่ออัตราการไหลดีที่สุด

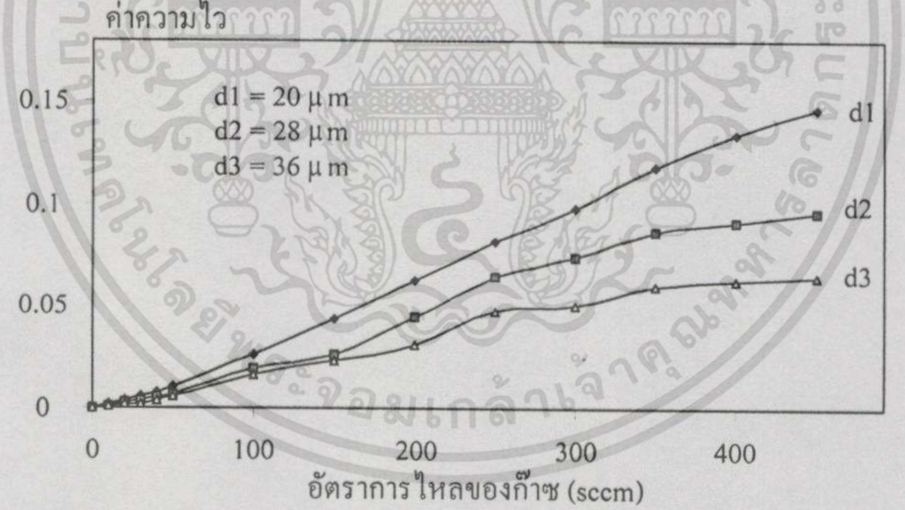
ค่าความไวการวัดอัตราการไหลของก๊าซคือส่วนเปลี่ยนแปลงของค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่อัตราการไหลนั้นๆ กับค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ยังไม่มีก๊าซไหลผ่าน ที่ความหนาไดอะแฟรม 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μm มีค่าความไว 0.147 ที่ความหนาไดอะแฟรม 28 μm มีค่าความไว 0.095 และที่ความหนาไดอะแฟรม 36 μm มีค่าความไว 0.059



รูปที่ 5.23 การเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 μm เส้นที่ (d2) หนา 28 μm และเส้นที่ (d3) หนา 36 μm

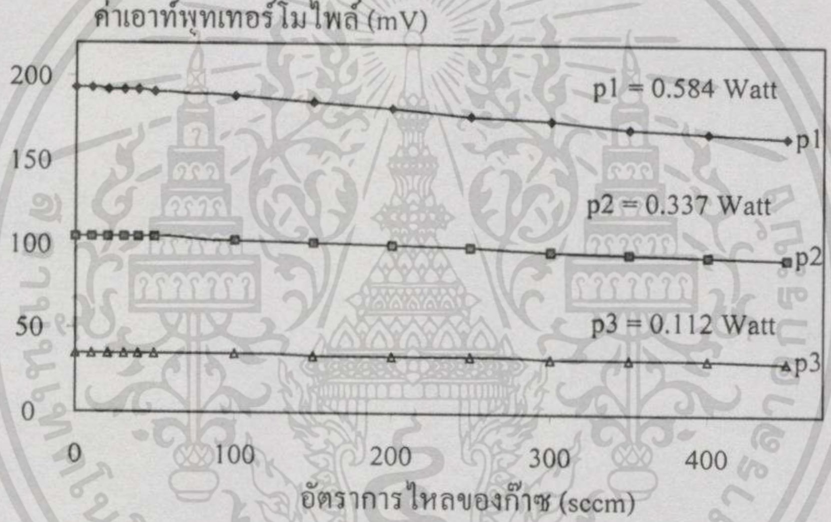


รูปที่ 5.24 การเปลี่ยนแปลงค่าความไวเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 μm เส้นที่ (d2) หนา 28 μm และเส้นที่ (d3) หนา 36 μm

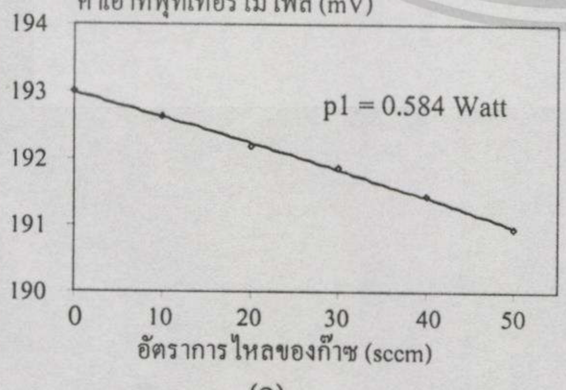
ในการทดลองนี้เพื่อศึกษาขนาดกำลังงานที่มีต่อการวัดอัตราการไหลของก๊าซ จากรูปที่ 5.25 แสดงผลของการวัดอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรมขนาด 20 μm ซึ่งจะมีกราฟแสดงผล 3 เส้น คือ เส้นที่ (p1) ใช้กำงานฮีตเตอร์ 0.584 Watt และแสดงดังรูปที่ 5.26 โดยค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ไม่มีก๊าซไหลผ่าน 192.99 mV และเมื่อมีก๊าซไหลผ่านจะทำให้ค่าอาท์พุทเทอร์โม

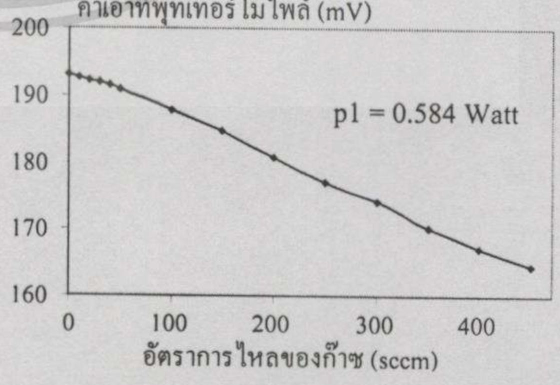
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไพล์มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 192.99 – 164.63 เส้นที่ (p2) ใช้กำงานฮีตเตอร์ 0.337 Watt และแสดงดังรูปที่ 5.27 โดยค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ไม่มีก๊าซไหลผ่าน 104.53 mV และเมื่อมีก๊าซไหลผ่านจะทำให้ค่าอาท์พุทเทอร์โมไพล์มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 104.53 – 92.51 และ เส้นที่ (p3) ใช้กำงานฮีตเตอร์ 0.122 Watt และแสดงดังรูปที่ 5.28 โดยค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ไม่มีก๊าซไหลผ่าน 35.11 mV และมีก๊าซไหลผ่านจะทำให้ค่าอาท์พุทเทอร์โมไพล์มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 35.11 – 32.02 mV จากผลการวัดอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ระดับค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์มีค่าต่ำ (เส้นที่ p3) เมื่อมีก๊าซไหลผ่านต่ำกว่า 50 sccm เทอร์โมไพล์จะไม่เปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุท แต่ถ้าให้ค่ากำลังฮีตเตอร์เพิ่มขึ้นและค่าเทอร์โมไพล์มีค่าสูง (เส้นที่ p3) จะสามารถวัดอัตราการไหลที่ต่ำกว่า 50 sccm สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์แบ่งได้เป็น 2 ช่วง ช่วงแรกคือ 0 – 50 sccm และช่วงที่สอง 50 – 450 sccm



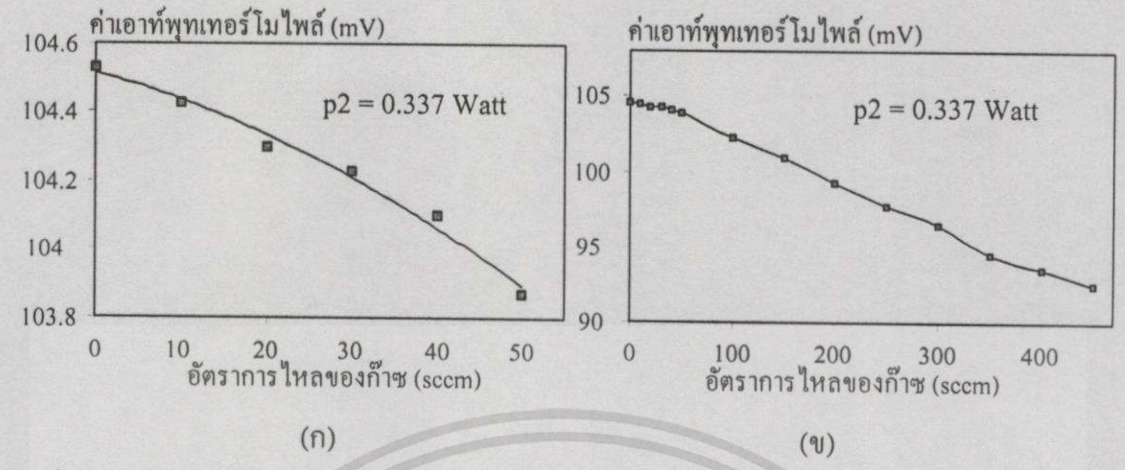
รูปที่ 5.25 การเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน



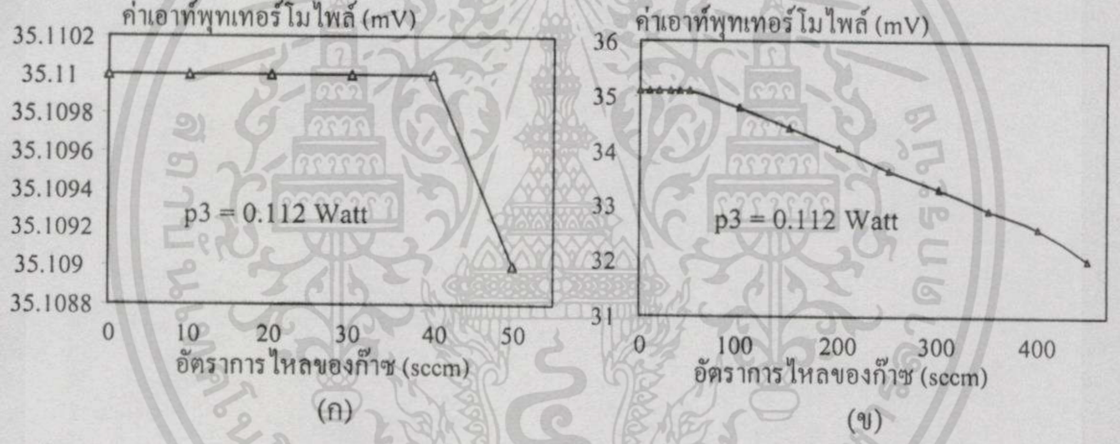


รูปที่ 5.26 การเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p1) 0.584 Watt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีลิขสิทธิ์ ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



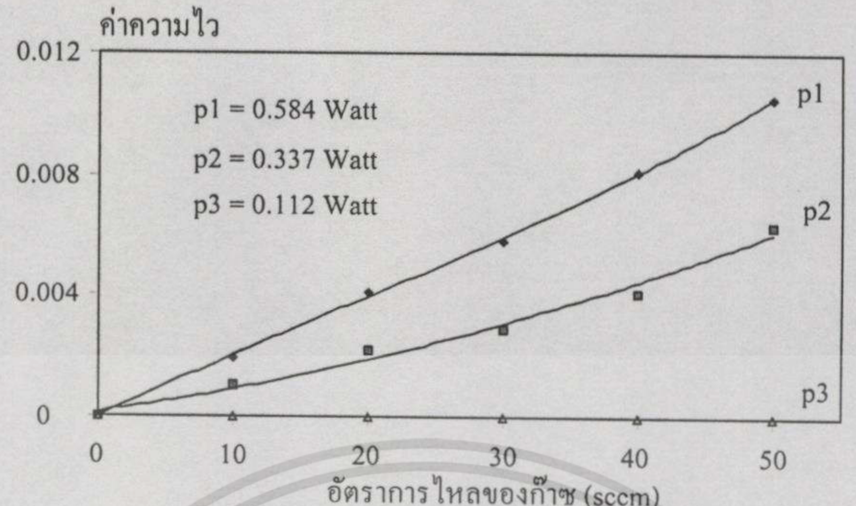
รูปที่ 5.27 การเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p2) 0.337 Watt



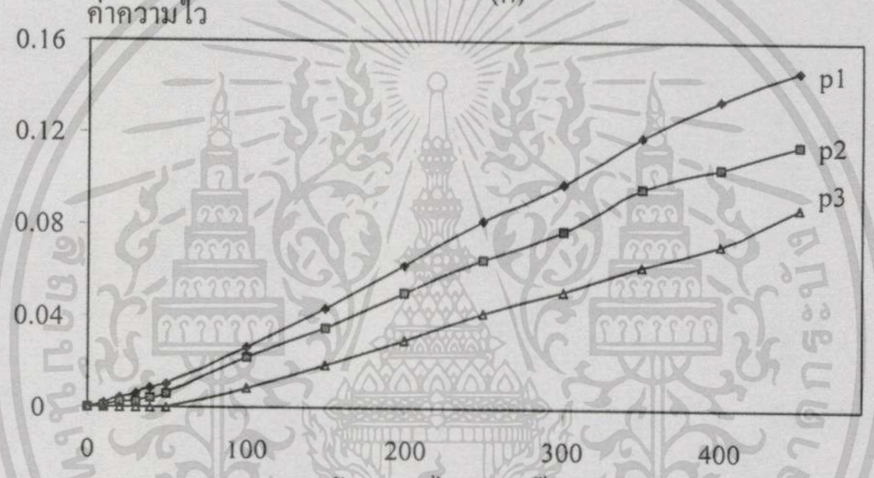
รูปที่ 5.28 การเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p3) 0.112 Watt

สำหรับค่าความไวเทอร์โมไพล์ แสดงดังรูปที่ 5.29 ซึ่งเป็นผลของค่าความไวของการวัดอัตราการไหลของที่อัตราการไหลที่ความหนาไดอะแฟรมหนา 20 μm ช่วงอัตราการไหล 0 – 450 sccm และมีค่ากำลังงานที่ให้กับฮีตเตอร์ต่างกันคือ เส้นที่ (p1)ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ 0.584 Watt เส้นที่ (p2)ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ 0.337 Watt และ เส้นที่ (p3) ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ 0.122 Watt จากกราฟความสัมพันธ์ค่าความไวของการวัดอัตราการไหลของก๊าซ เส้นที่ (p1) มีค่าความไว 0.147 เส้นที่ (p2) มีค่าความไว 0.115 และเส้นที่ (p3) มีค่าวความไว 0.088 ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วง ช่วงแรก 0-50 sccm และช่วงที่สอง 50-400 sccm ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าความไวกับอัตราการไหลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

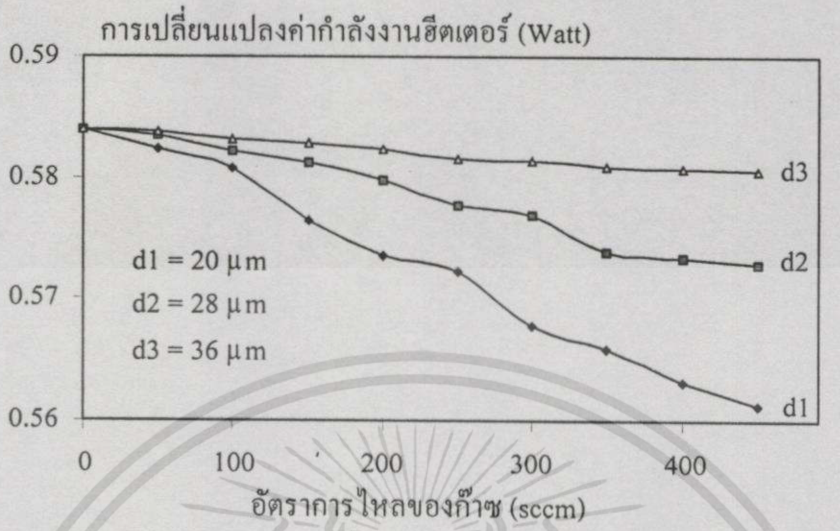
รูปที่ 5.29 การเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน

5.5.2 ผลของไมโครฮีตเตอร์ต่ออัตราการของก๊าซ

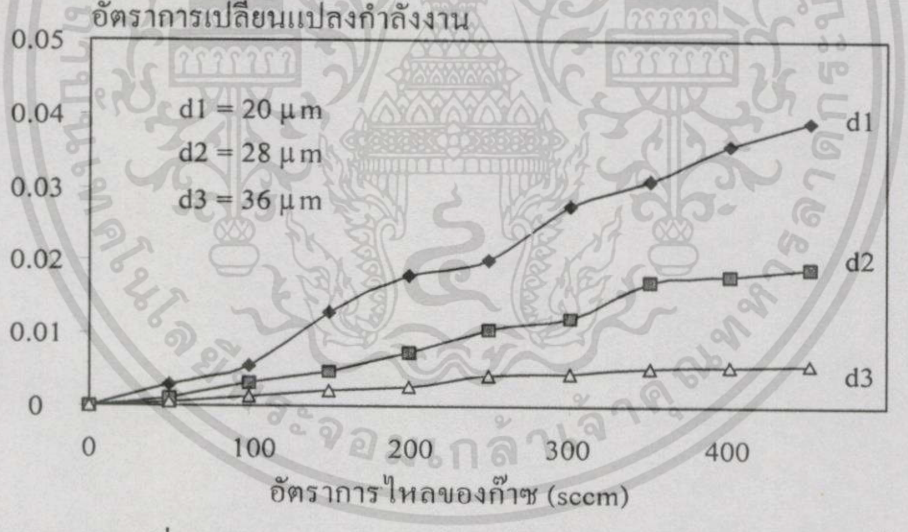
รูปที่ 5.30 และ รูปที่ 5.31 เป็นผลของการวัดค่ากำลังงานฮีตเตอร์และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของการวัดอัตราการไหลที่ความหนาไดอะแฟรมหนาต่างกัน ซึ่งค่ากำลังงานที่ให้กับฮีตเตอร์มีค่าเท่ากัน คือ 0.584 Watt ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm มีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานฮีตเตอร์ 0.584 – 0.562 Watt ที่ความหนาไดอะแฟรม 28 μm มีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานฮีตเตอร์ 0.584 – 0.572 Watt และความหนาไดอะแฟรม 36 μm มีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานฮีตเตอร์ 0.584 – 0.581 Watt จากรูปเห็นได้ค่าความหนาไดอะแฟรม 20 μm จะมีผลตอบสนองต่ออัตราการไหลดีที่สุด และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังงาน 0.039 ที่ความหนาไดอะแฟรม 28 μm มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังงาน 0.0019 และที่ความหนาไดอะแฟรม 36 μm มีอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังงาน 0.0058



รูปที่ 5.30 การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 μm เส้นที่ (d2) หนา 28 μm และเส้นที่ (d3) หนา 36 μm

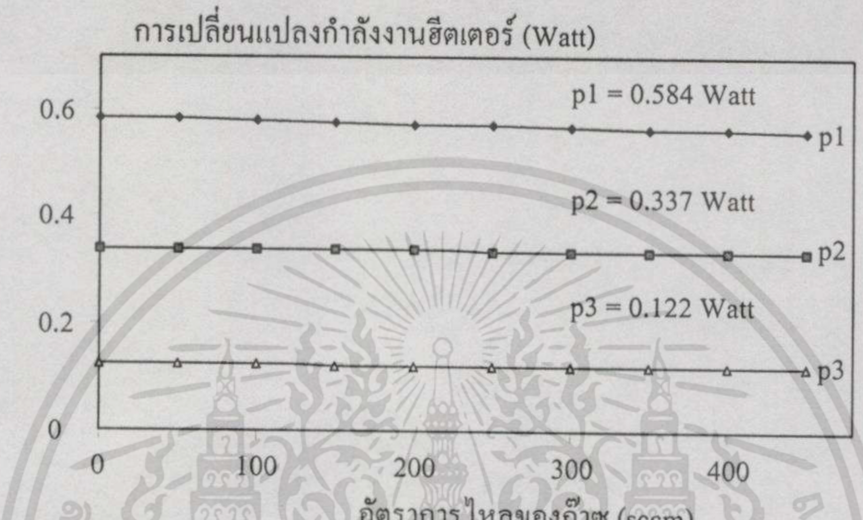


รูปที่ 5.31 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม ต่างกันคือเส้นที่ (d1) หนา 20 μm เส้นที่ (d2) หนา 28 μm และเส้นที่ (d3) หนา 36 μm

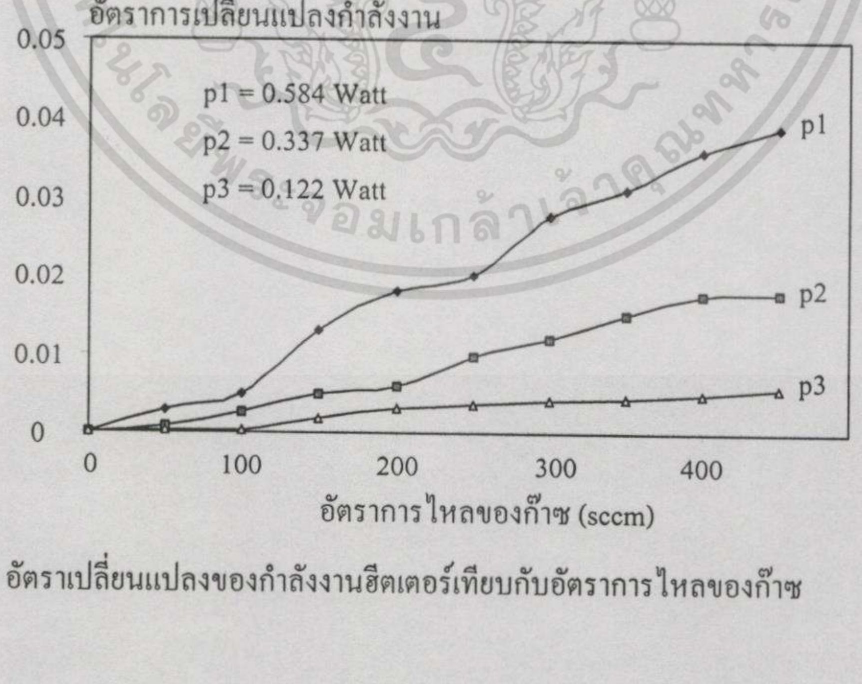
จากรูปที่ 5.32 แสดงผลของการวัดอัตราการไหลของก๊าซที่ความหนาไดอะแฟรมขนาด 20 μm โดยมีก๊าซไหลผ่าน 0 - 450 sccm ซึ่งจะมีกราฟแสดงผล 3 เส้น คือ เส้นที่ (p1) ใช้กำงานฮีตเตอร์ 0.584 Watt มีช่วงการเปลี่ยนกำลังงานฮีตเตอร์ 0.584 - 0.562 Watt เส้นที่ (p2) ใช้กำงานฮีตเตอร์ 0.337 Watt มีช่วงการเปลี่ยนกำลังงานฮีตเตอร์ 0.337 - 0.331 Watt และเส้นที่ (p3) ใช้กำงานฮีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์ 0.122 Watt มีช่วงการเปลี่ยนกำลังงานฮีตเตอร์ 0.122 - 0.121 Watt รูปที่ 5.33 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่ใช้กำลังงานต่างกัน จากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่ากราฟ เส้นที่ (p1) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังงาน 0.039 เส้นที่ (p2) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังงาน 0.018 และเส้นที่ (p3) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังงาน 0.006



รูปที่ 5.32 การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm ที่กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน



รูปที่ 5.33 อัตราเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ

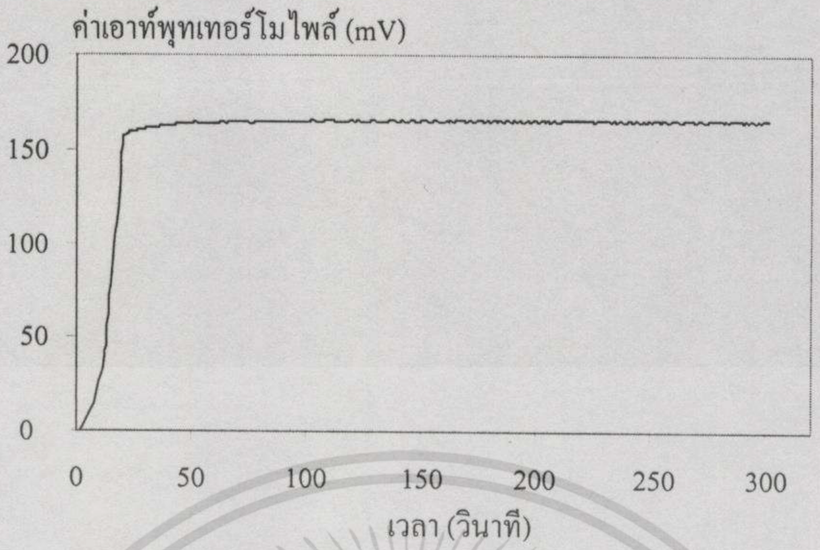
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.3 ผลของเสถียรภาพของอัตราการไหลของก๊าซ

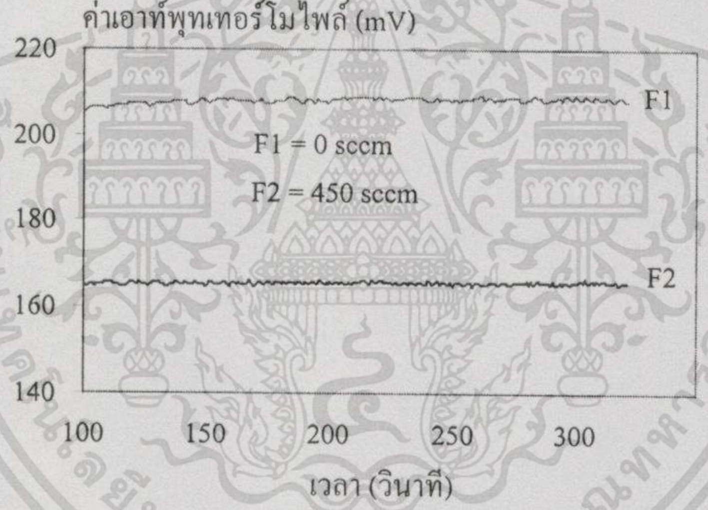
การวัดเสถียรภาพของอัตราการไหลของค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์เป็นการทดลองเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ ในสภาวะที่ยังไม่มีก๊าซไหลผ่านและมีก๊าซไหลผ่าน ผลของการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ถูกบันทึกสองแกน X และ Y โดยที่แกน X คือเวลามีหน่วยเป็นวินาที และ Y เป็นค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.34 และ 5.35 รูปที่ 5.34 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ไม่มีก๊าซไหลผ่าน ผลการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์เมื่อเวลาผ่านไปค่าเอาท์พุทจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 0.208 mV/sec และช่วงที่ 2 ก็จะเริ่มคงที่และมีเสถียรภาพ รูปที่ 5.35 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ไม่มีก๊าซไหลผ่าน ผลการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์เมื่อเวลาผ่านไปค่าเอาท์พุทจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 0.125 mV/sec และช่วงที่ 2 ก็จะเริ่มคงที่และมีเสถียรภาพ จากรูปที่ 5.36 แสดงการเปรียบเทียบเสถียรภาพของระหว่างค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ไม่ก๊าซไหลผ่าน (อัตรการไหลของก๊าซ 0 sccm) และมีก๊าซไหลผ่าน 450 sccm

รูปที่ 34 เสถียรภาพค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ยังไม่มีก๊าซไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 เสถียรภาพของค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่อัตราการไหล 450 sccm



รูปที่ 5.36 การเปรียบเทียบเสถียรภาพของระหว่างค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ที่ไม่ก๊าซไหลผ่านและมีก๊าซไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและวิจารณ์

เทอร์โมไพล์จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีหลักการทำงานช่นเดียวกับเทอร์โมคัปเปิลจะประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดต่างกันคือ ซิลิคอนแและอลูมิเนียม นอกจากนี้ยังมีส่วนของฮีตเตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยที่ซิลิคอนเทอร์โมไพล์และฮีตเตอร์จะถูกสร้างบนไดอะแฟรมบาง แผ่นฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) พื้นที่ส่วนที่รับรู้ความร้อนและแหล่งกำเนิดความร้อนจะอยู่บนไดอะแฟรมบางถูกสร้างด้วยกระบวนการกัดซิลิคอนในสารละลาย โดยใช้เทคนิคการจับเวลา แถบสารเจือทั้งชนิดเอ็นและพีถูกสร้างขึ้นด้วยการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสและโบรอนด้วยความร้อนเสร็จแล้วจะทำการสร้างฮีตเตอร์โดยการระเหยโลหะในระบบสุญญากาศ ชิพเทอร์โมไพล์ถูกติดลงบนแผ่นปริ้นท์อเนกประสงค์และถูกต่อสายเข้ากับแท่งโลหะแล้วสร้างอุโมงค์เพื่อให้ก๊าซไหลผ่านตัวชิพ โดยสร้างจากซิลิคอนซึ่งถูกกัดให้เป็นช่องทะลุที่ปลายทั้งสองแล้วถูกต่อด้วยเข็มฉีดยาเพื่อให้ก๊าซไหลเข้าและออกผ่านได้ ผลที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของซิลิคอนมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของโลหะมาก และสามารถนำประยุกต์เป็นตัววัดอัตราการไหลของก๊าซ

ผลที่ได้จากการทำวิจัยทำให้ได้ทราบข้อมูลทางเทคนิค อุปสรรค และปัญหาบางประการซึ่งเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาลักษณะคุณสมบัติซิลิคอนเทอร์โมไพล์ ดังสามารถสรุปได้ดังนี้

เนื่องจากทรานสดิวเซอร์แบบความร้อนประกอบด้วยเทอร์โมไพล์และฮีตเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะเป็นตัวบอกคุณสมบัติพื้นฐานของเทอร์โมไพล์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คสามารถเปลี่ยนแปลงด้วยการเปลี่ยนความเข้มเข้นสารเจือและความลึกสารเจือและยังสามารถบอกชนิดของสารเจือว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นสารเจือชนิดเอ็น และถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงว่าเป็นสารเจือชนิดพี ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ขนาดแถบสารเจือสารเจือที่เหมาะสมกันการนำไปใช้งาน 40 X 2000 μm จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นสารเจือน้อยและความสารเจือมากขึ้น ค่าสัมประสิทธ์ซีเบ็คจะมีค่าสูงขึ้น แต่บ้างครั้งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คกี่ไม่เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเฟคเตอร์ 3 เฟคเตอร์ คือ ประการแรกคือ การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ ประการที่สองคือ การกระเจิงของประจุพาหะ และประการสุดท้าย คือ โฟนอนดราก ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 150 – 600 μV/K ซึ่งในทางทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของสารเจือจะมีค่าประมาณ 1 mV/K ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการสร้างที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคโนโลยีการสร้างของซีมอส สำหรับกระบวนการสร้างซิลิคอนเทอร์โมไพล์ที่เหมาะคือเทคโนโลยีการสร้างของทรานซิสเตอร์ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คสูงขึ้น

เทอร์โมไพล์ประกอบด้วยจำนวนเทอร์โมคัปเปิลหลายตัวมาต่ออนุกรมกัน ทำให้ได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์สูงขึ้น ($V_{th} = N\alpha\Delta T$) ตามจำนวนเท่าของเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน แต่สำหรับซิลิคอนเทอร์โมไพล์ชนิดเอ็น จะได้ค่าเอาท์พุทไม่เป็นไปตามจำนวนเท่าของเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการสร้างที่ใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพี เมื่อผ่านกระบวนการออกซิเดชันได้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีประจุบวกอยู่ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยสาเหตุของกระบวนการสร้าง ทำให้ประจุบวกเหนี่ยวนำประจุลบจนเกิดชั้นเอ็นที่ผิวของแผ่นซิลิคอน ทำให้ได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์ไม่เป็นไปตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน แต่ได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์เป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน ($V_{th} = 0.5N\alpha\Delta T$) ส่วนซิลิคอนเทอร์โมไพล์ชนิดพีจะมีค่าเอาท์พุทเป็นจำนวนเท่าของจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน

ฮีตเตอร์คือตัวความต้านทานที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการผ่านกระแสผ่านตัวความต้านทาน ซึ่งฮีตเตอร์ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียม และ ไททาเนียม ถูกระเหยในระบบสุญญากาศได้เป็นฟิล์มโลหะ ทำให้ฮีตเตอร์เตอร์ทนกระแสได้สูงขึ้น ถ้าใช้ฟิล์มไททาเนียมอย่างเดียวโดยไม่มีฟิล์มอลูมิเนียมคุมอยู่ที่ผิวหน้า ทำให้ไททาเนียมไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากกระบวนการสร้างต้องผ่านกระบวนการซินเตอร์ริ่งและจะได้ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน โดยโครงสร้างฮีตเตอร์จะอยู่บนไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกันคือ 25 , 40 และ 60 μm เมื่อจ่ายกระแสมากขึ้นพบว่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์จะสูงขึ้น และฮีตเตอร์ขนาด 40 μm ให้อุณหภูมิสูงสุด สำหรับการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมค่าอุณหภูมิจะลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดความร้อนเพิ่มมากขึ้น ที่ไดอะแฟรมหนา 25 μm ให้อุณหภูมิสูงสุด 45.5 ^{0}C และการกระจายความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเทียบกับไดอะแฟรมที่หนากว่า เพราะแหล่งกำเนิดความร้อนมีปริมาณจำกัด และยังต้องสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำความร้อน และถ้าขนาดไดอะแฟรมมีความหนาลดลง จะทำให้ฮีตเตอร์กำเนิดอุณหภูมิสูงได้สูงขึ้นขณะที่ใช้พลังงานเท่ากัน แนวทางการประใช้งานฮีตเตอร์จะเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่มีหลักการทำงานที่อาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิและสามารถใช้พัฒนาร่วมกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

ค่าความไวของเทอร์โมไพล์หาได้ส่วนเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทเทอร์โมไพล์กับกำลังงานฮีตเตอร์ ซึ่งโครงสร้างจะอยู่บนไดอะแฟรม คุณสมบัติของไดอะแฟรมและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะมีผลต่อค่าความไว ถ้าไดอะแฟรมบางก็จะทำให้ได้ฮีตเตอร์กำเนิดความร้อนได้สูงขึ้น ได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์สูงขึ้นในขณะที่ใช้กำลังงานเท่ากันและถ้าจำนวนเทอร์โมไพล์มากขึ้นจะได้ค่าความไวมากขึ้น ในการทดลองนี้ใช้จำนวนเทอร์โมไพล์สูงสุด 20 ตัว ค่าเอาท์พุทเทอร์โมไพล์จะแปรฝันตรงกับจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกันและผลต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อร้อนและเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้เทอร์โมไพล์เป็นตัววัดอัตราการไหลของก๊าซ มีโครงสร้างส่วนสำคัญคือช่องอุโมงค์สำหรับให้ก๊าซไหลผ่านไดอะแฟรม ซึ่งในการทดลองนี้จะสามารถให้ก๊าซไหลผ่านได้สูงสุด 450 sccm เนื่องจากขีดจำกัดของช่องอุโมงค์สำหรับให้ก๊าซไหลผ่านมีพื้นที่หน้าตัด 1400 X 20 μm ไดอะแฟรมที่ใช้มีความหนาต่างกันคือ 20, 28 และ 36 μm ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 μm จะให้ค่าความไวในการวัดอัตราการไหลของเทอร์โมไพล์สูงสุด 0.147 และค่าความไวในการวัดอัตราการไหลของกำลังงานฮีตเตอร์สูงสุด 0.039 ในขณะเดียวกันค่าความไวเทอร์โมไพล์ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซสูงกว่า ค่าความไวกำลังงานฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] G.R. Lahiji, Kensall D. Wise. "A Batch-Fabricated Silicon Thermopile Infrared Detector." IEEE transactions on electron devises. vol ed-29. Jan 1982. pp. 14-22.

[2] David Moser and Henry Baltes. "A high sinsitivity CMOS gas flow sensor on a thin dielectric membrane." Sensors and Actuators. A37-38, 1993. pp. 33-37.

[3] U. Diller, E. Kessler, S. Poser, V. Baier, J. Muller. "Low power consumption thermal gas-flow sensor basee on thermopiles of highly effective materials." Sensors and Actuators. A60, 1997. pp. 1-4.

[4] สมศักดิ์ กีรติวุฒิเศรษฐ์. หลักการวัดและใช้งานเคลื่อนมือวัดอุตหกรรม. กรุงเทพฯ : บริษัท ส.เอเซียเพรส จำกัด. 2536.

[5] S. Middelhoek, S.A. Audet. Silicon Sensors. Times Acadmic press, Inc, 1989.

[6] นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์. 2526.

[7] นิมิต ชมนาวัง สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และ สมเกียรติ ศุชเดช, "การศึกษาการกัดซิลิกอนด้วยสารละลาย KOH," วิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 11 ฉบับที่1, หน้า 53-56 มิถุนายน 2537.

[8] M.P. Wu, Q. H. Wu, and W.H. Ko, "A Study on Deep Etching of Silicon Using Ethylenediamine-Pyrocatechol-Water," Sensors and Actuators,Vol 9, pp. 333, 1986.

[9] A. Accorst G. Delapierre C. Vauchier and D. Charit, "A New Microsensor for Environmental Measurements," Sensors and Actuators B, 4, pp. 539-543, 1991.

[10] C. Y. Ting and B. L. Crowder, "Electrical Properties of Al/Ti Contact Metallurgy for VLSI Application," J. Elecrochem. Soc., Vol 129, No. 11, pp. 2590-2594, November 1982.

พระจอมเกล้าเจ้าคุณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญญาลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน	q	$1.60x10^{-19}$	C
ค่าคงที่ของโบลซ์แมน	k	$1.38x10^{23}$	J/K
ค่าคงที่ของแพลงค์	h	$6.63x10^{-34}$	J-S
ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของอากาศ	ε_0	$8.85x10^{-14}$	F/cm
ค่าคงที่สตีเฟนโบลซ์แมน	σ	$5.67x10^{-8}$	W/m^2K

2. คุณสมบัติของซิลิคอน

เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	
ความหนาแน่นอะตอม	$2.96x10^{22}$	cm^3
ความหนาแน่น	2.328	g/cm^3
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	eV
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	$-2.3x10^{-4}$	$eV/^0C$
จุดหลอมเหลว	1417	^0C
ดัชนีหักเห	3.420	
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	2.6x10-6	$(^0C)^{-1}$
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	^0A
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	$0.98x10^{12}$	cm^2/dyn
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นพาหะของซิลิคอนบริสุทธิ์	1.54x1010	cm^{-3}
ความดันไอ	$2.8x10^{-4}$	mm Hg
โครงสร้างผลึก	F_{CC} , diamond	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ทางวิชาการ

1. รังสรรค์ เมืองเหลือ, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, Yoichi Yasumura และ สมเกียรติ ศุภเดช, "การออกแบบและสร้างเทอร์โมไพล์แบบซิลิคอนชนิดเอ็น", วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 2541. หน้า 12-17.
2. รังสรรค์ เมืองเหลือ, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุลและ สมเกียรติ ศุภเดช, "การออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรม", วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 17 ฉบับที่ 3, กันยายน 2543. หน้า 58-63.
3. R. Muanghlua, S. Cheersirikul and S. Supadech. "Stydy of Silicon Thernopile." IEEE 2000 TENCON POOCEEDINGS, Malasia, Sep,2000. pp. III226-229.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายรังสรรค์ เมืองเหลือ
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2513
ภูมิลำเนา	พิจิตร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวัสดุศาสตร์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2535
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	รายละเอียดในภาคผนวก ข.
ประวัติการณ์ทำงาน	ปัจจุบันรับราชการตำแหน่ง เจ้าหน้าที่วิจัย 4 ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้