

รายงานการวิจัยและการพัฒนาฉบับสมบูรณ์  
เรื่อง การพัฒนา Si Thermopile สำหรับเป็นไมโครเซ็นเซอร์



ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH  
BC  
274

ประจำปีงบประมาณ 2542

เลขหมู่ 5314 ร  
เลขทะเบียน 40389  
วัน, เดือน, ปี 11 / 08 / 2544

1110563x

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น. ถ้าหากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

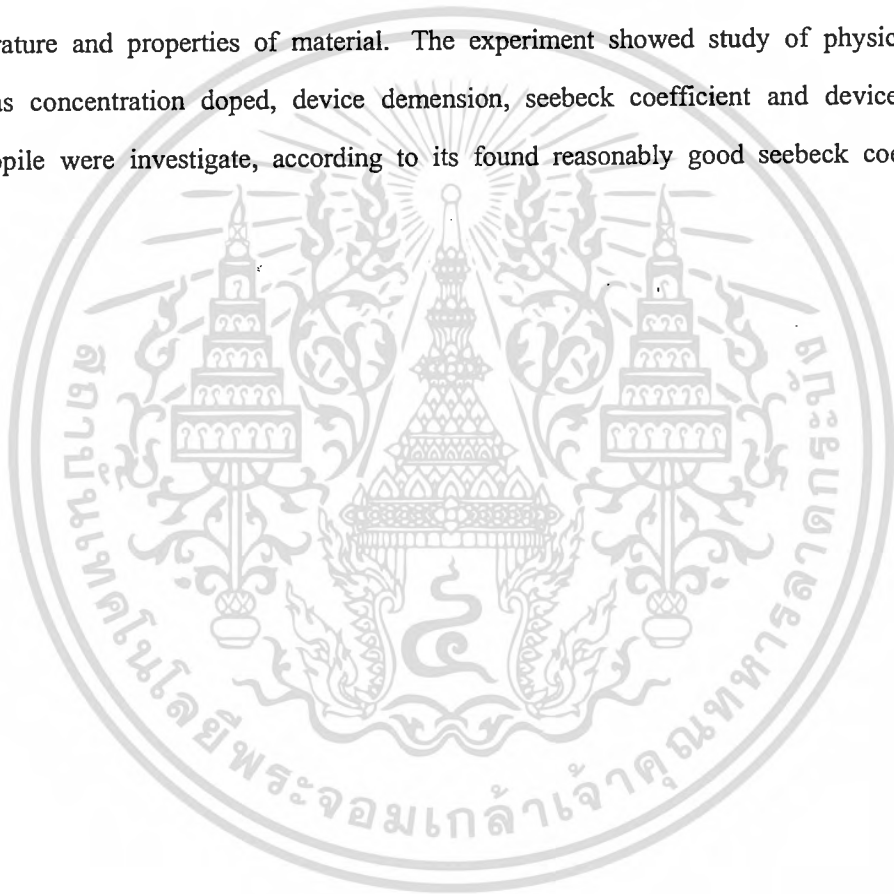
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอคุณสมบัติของซิลิคอนเทอร์โมไฟต์ ซึ่งสามารถสร้างโดยการแพร่สารเจือลงบนแผ่นซิลิคอนให้เกิดแถบของชั้นสารเจือและแถบของอูมิเนียมสร้างด้วยการระเหยในสูญญากาศ(vacuum evaporation) และยังมีส่วนของฮีตเตอร์เป็นกำเนิดความร้อนเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อร้อน(hot junction)และรอยต่อเย็น(cold junction) ซึ่งจะเกิดแรงดันตกคร่อมเทอร์โมไฟต์ โดยค่าแรงดันจะแปรผันตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิและชนิดของวัสดุ ทำให้เทอร์โมไฟต์สามารถวัดอุณหภูมิได้ โดยการทดลองได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนเทอร์โมไฟต์ที่ความเข้มข้นของสารเจือที่ต่างๆ กัน, ค่าความไวของเทอร์โมไฟต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

The thesis presents research a silicon thermopile. The silicon-base thermopile sensor as fabricated by using the silicon material, aluminium is by using the vacuum evaporation technique. The heater is also built near by and the same process is incorporated. The temperature difference between hot junction and cold junction causes development of voltage across them. The voltage is generated across the junction depend on difference temperature and properties of material. The experiment showed study of physical structure such as concentration doped, device demension, seebeck coefficient and device sensitivity thermopile were investigate, according to its found reasonably good seebeck coefficient.



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล ที่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำปรึกษาวางแผนทางในการทำวิจัย การแก้ปัญหา การคิดริเริ่มตลอดจนชี้แนะให้งานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป้าหมาย

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สมเกียรติ สุกเดช อาจารย์ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ รศ. โยอิชิ ยาซามูระ ที่กรุณาให้คำปรึกษาวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ ทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษา และขอขอบคุณ คุณวีระศักดิ์ สนเกา ที่ช่วยในการสร้างซิลิคอนไดอะแพรมบาง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์ฟิล์มโลหะ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้อง ผู้ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษากับผู้เขียนมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

รังสรรค์ เมืองเหล็ก

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์	XIII
คำนำ	XIV
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย	5
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 การเชื้อสารชนิดเอ็นและพี	6
2.2 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน	12
2.3 การถ่ายเทความร้อน	27
บทที่ 3 การวัดและวิเคราะห์โครงสร้างของเทอร์โมไฟล์และไมโครฮีตเตอร์	
3.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นและความลึกของสารเจือบนฐานรองซิลิคอนด้วย SRP	33
3.2 การวัดด้วยระบบ GPIB	40
บทที่ 4 การออกแบบและการสร้าง	
4.1 การออกแบบไดอะแฟรม	48
4.2 การออกแบบฮีตเตอร์	49
4.3 การออกแบบเทอร์โมไฟล์	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์	51
4.5 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์และเทอร์โมไฟต์อยู่ในชีพเดียวกัน	62
4.6 การแอสเซมบลีและการเก็บบรรจุ	69
<b>บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง</b>	
5.1 การวิเคราะห์การแพร่สารเจือชนิดเอ็นและพี	72
5.1.1 การศึกษาความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นและพี	72
5.1.2 การศึกษาความลึกของรอยต่อพีเอ็น	75
5.2 การศึกษาเทอร์โมไฟต์แบบสารกึ่งตัวนำซิลิคอน	76
5.2.1 ผลของโครงสร้างต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาท์พุท	76
5.2.2 ผลของความเข้มข้นสารเจือและความลึกของรอยต่อที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าเทอร์โมคัปเปิล	81
5.2.3 จำนวนเทอร์โมไฟต์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุท	79
5.3 การศึกษาไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน	80
5.3.1 การวิเคราะห์วัสดุฮีตเตอร์ Ti-Al	80
5.3.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน	81
5.3.3 ผลของ ไมโครฮีตเตอร์บนไดอะแฟรมซิลิคอน	82
5.4 การศึกษาคูณสมบัติของเทอร์โมไฟต์บนฐานไมโครฮีตเตอร์	83
5.4.1 ค่าเอาท์พุทการตอบสนอง	83
5.4.2 ผลของการเป็นเชิงเส้นของเอาท์พุทเทอร์โมไฟต์	85
5.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเทอร์โมไฟต์	86
<b>บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	87
เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก ก	90
ภาคผนวก ข	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

ประวัติผู้เขียน

หน้า

92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงชนิดของเซนเซอร์ที่แบ่งตามสัญญาณ	2
ตารางที่ 1.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติ ไฟฟ้าและความร้อน	3
ตารางที่ 1.3 เซนเซอร์ความร้อนแบบต่างๆ	4
ตารางที่ 2.1 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุ โดยที่จุดอ้างอิงอยู่ที่ $0^{\circ}\text{C}$ และจุดที่วัด $100^{\circ}\text{C}$	19
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์	81



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงระบบการวัดและแสดงผลแบบพื้นฐาน	1
รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะการทำงานของเซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณเองและ แบบผสมสัญญาณ	2
รูปที่ 1.3 แสดงตระกูลของเซนเซอร์ความร้อน	4
รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของอะตอมซิลิคอน	6
รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองพันธะ โควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิคอน	7
รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างของผลึกซิลิคอน	7
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะ โครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์	8
รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงาน	9
รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงาน	10
รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงาน	11
รูปที่ 2.8 แสดงประเภทของอินเตอร์เฟซแทรปและออกไซด์ชาร์จ	12
รูปที่ 2.9 แสดงเป็นวงจรถูกกระตุ้นกระแสไหลวน	14
รูปที่ 2.10 แสดง โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล	14
รูปที่ 2.11 แสดง โลหะแทรค	15
รูปที่ 2.12 แสดงกฎของการแทรกอุณหภูมิ	15
รูปที่ 2.13 แสดงการต่อขานานเทอร์โมคัปเปิล	16
รูปที่ 2.14 แสดงการหาผลต่างกลับขั้วของเทอร์โมคัปเปิล	16
รูปที่ 2.15 แสดงการต่อเทอร์โมคัปเปิลเพิ่ม ไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า	17
รูปที่ 2.16 แสดงการต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิล	17
รูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนระดับเฟอร์มิและแพร่ของอิเล็กตรอน	21
รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งเฟอร์มิในช่วงแบนด์กับของซิลิคอนที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ $N_D$ และ $N_A$	22

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ของค่าซีเบ็คเทียบกับสภาพความต้านทาน	24
รูปที่ 2.20 เป็นการเปรียบเทียบของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ	25
รูปที่ 2.21 แสดงวงจรการทดลองของเพลเทียร์	26
รูปที่ 2. 22 แสดงปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของวัสดุตัวนำ	26
รูปที่ 2.23 การนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่ A	29
รูปที่ 2.24 แสดงการพาความร้อนจากผิววัสดุ	31
รูปที่ 3.1 แสดงหลักการวัดของ SR-210	34
รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพส่วนประกอบต่างๆ ของ SR-210	35
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดชิ้นงานของซิลิคอนที่ถูกตัดแบ่ง	36
รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์การขีด	37
รูปที่ 3.5 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการขีด	38
รูปที่ 3.6 แสดงการวัดของ SR-210	38
รูปที่ 3.7 แสดงผลการวัดค่าสเปคตริสแตนท์ของ SR-210	39
รูปที่ 3.8 แสดงผลการวิเคราะห์การวัดของ SR-210	40
รูปที่ 3.9 แสดงแผนผังอุปกรณ์ GPIB และการต่อสัญญาณต่างๆ	42
รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์และการวัดอุณหภูมิ	43
รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์และวิธีการวัดค่าเอาท์พุทเทอร์โมไฟล์	44
รูปที่ 3.12 แสดงส่วนประกอบของบล็อคคำสั่ง	45
รูปที่ 3.13 แสดงแผนผังการทำงานโปรแกรมการวัด	46
รูปที่ 3.14 แสดงแผน โปรแกรมการวัดคุณสมบัติของเทอร์โมไฟล์	46
รูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดการกัดซิลิคอน โดยสารละลาย	48
รูปที่ 4.2 แสดงการออกแบบไมโครฮิตเตอร์	49
รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของไมโครฮิตเตอร์	50
รูปที่ 4.4 การออกแบบความกว้างและระห่างระหว่างแถบแพร่อาร์เจ็ท	50
รูปที่ 4.5 แสดงความยาวของแถบแพร่อาร์เจ็ทที่ต่างๆ กัน	51

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 แสดงภาพตัดขวางชิฟเทอร์โมไฟล์	51
รูปที่ 4.7 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก	56
รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก	57
รูปที่ 4.9 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 7	59
รูปที่ 4.10 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 11	61
รูปที่ 4.11 แสดงการสร้างแถบไทเทเนียม	62
รูปที่ 4.12 แสดงการสร้างไมโครฮีตเตอร์ชั้นสุดท้าย	62
รูปที่ 4.13 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก	62
รูปที่ 4.14 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก	64
รูปที่ 4.15 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 7	65
รูปที่ 4.16 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านชั้นตอนที่ 11	66
รูปที่ 4.17 แสดงภาพตัดขวางแถบแพร่สารเจือ	67
รูปที่ 4.18 แสดงรูปถ่ายเทอร์โมไฟล์	69
รูปที่ 4.19 แสดงภาพตัดขวางของฝาปิดและชิฟเทอร์โมไฟล์	71
รูปที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ	71
รูปที่ 5.1 แสดงการจัดชิ้นงานด้วยผงเพชร	72
รูปที่ 5.2 แสดงการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิและต่างกัน	73
รูปที่ 5.3 แสดงการแพร่สารเจือ โบรอนที่อุณหภูมิและต่างกัน	73
รูปที่ 5.4 แสดงความเข้มข้นสารเจือฟอสฟอรัสที่เวลาในการขับลึกต่างกัน	74
รูปที่ 5.5 แสดงความเข้มข้นสารเจือโบรอนที่เวลาในการขับลึกต่างกัน	74
รูปที่ 5.6 แสดงความลึกของสารเจือของฟอสฟอรัส	75
รูปที่ 5.7 แสดงความลึกของสารเจือของโบรอน	76
รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเอาท์พุทเทอร์คิปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือ	77
รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเอาท์พุทเทอร์คิปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือ	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.10 แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดเอ็น	78
รูปที่ 5.11 แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดพี	78
รูปที่ 5.12 แสดงจำนวนเทอร์โมโพล์กับค่าเอาต์พุตเทอร์โมโพล์ชนิดเอ็น	79
รูปที่ 5.13 แสดงจำนวนเทอร์โมโพล์กับค่าเอาต์พุตเทอร์โมโพล์ชนิดพี	80
รูปที่ 5.14 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย SEM	80
รูปที่ 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะด้วย EDS	81
รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความต้านทานและค่าความต้านทาน	81
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของฮีตเตอร์ ที่มีขนาด ความกว้าง (W) ต่างกัน	82
รูปที่ 5.18 แสดงการกระจายความร้อนบน ไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกัน	83
รูปที่ 5.19 แสดงการกระจายความร้อนของฮีตเตอร์ที่ขนาด 40 $\mu\text{m}$ โดยความหนาของไดอะ แฟรม 25 $\mu\text{m}$	83
รูปที่ 5.20 แสดงค่าเอาต์พุตการตอบสนองของเทอร์โมโพล์ชนิดเอ็น	84
รูปที่ 5.21 แสดงค่าเอาต์พุตการตอบสนองของเทอร์โมโพล์ชนิดพี	84
รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าเอาต์พุตเทอร์โมโพล์ชนิดเอ็น	85
รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าเอาต์พุตเทอร์โมโพล์ชนิดพี	86
รูปที่ 5.24 แสดงค่าซีบีคที่อุณหภูมิฐานรองซิลิคอนเปลี่ยนไป	86
รูปที่ 5.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมโพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 $\mu\text{m}$ เส้นที่ (d2) หนา 28 $\mu\text{m}$ และ เส้นที่ (d3) หนา 36 $\mu\text{m}$	87
รูปที่ 5.26 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความไวเทอร์โมโพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 $\mu\text{m}$ เส้นที่ (d2) หนา 28 $\mu\text{m}$ และเส้น ที่ (d3) หนา 36 $\mu\text{m}$	88
รูปที่ 5.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตเทอร์โมโพล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 $\mu\text{m}$ ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน	89

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตเทอร์โมไฟล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 $\mu\text{m}$ ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p1) 0.584 Watt	89
รูปที่ 5.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไฟล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 $\mu\text{m}$ ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p2) 0.337 Watt	90
รูปที่ 5.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไฟล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 $\mu\text{m}$ ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ (p3) 0.112 Watt	90
รูปที่ 5.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมไฟล์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม 20 $\mu\text{m}$ ที่ใช้กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน	91
รูปที่ 5.32 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ เส้นที่ (d1) หนา 20 $\mu\text{m}$ เส้นที่ (d2) หนา 28 $\mu\text{m}$ และ เส้นที่ (d3) หนา 36 $\mu\text{m}$	92
รูปที่ 5.33 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของ ก๊าซ ที่ความหนาไดอะแฟรม ต่างกันคือเส้นที่ (d1) หนา 20 $\mu\text{m}$ เส้นที่ (d2) หนา 28 $\mu\text{m}$ และเส้นที่ (d3) หนา 36 $\mu\text{m}$	92
รูปที่ 5.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ ที่ ความหนาไดอะแฟรม 20 $\mu\text{m}$ ที่กำลังงานฮีตเตอร์ต่างกัน	93
รูปที่ 5.35 แสดงอัตราเปลี่ยนแปลงของกำลังงานฮีตเตอร์เทียบกับอัตราการไหลของก๊าซ	93
รูปที่ 36 แสดงเสถียรภาพค่าเอาต์พุตเทอร์โมไฟล์ที่ยังไม่มีก๊าซไหลผ่าน	94
รูปที่ 5.37 แสดงเสถียรภาพของค่าเอาต์พุตเทอร์โมไฟล์ที่อัตราการไหล 450 sccm	95
รูปที่ 5.38 แสดงการเปรียบเทียบเสถียรภาพของระหว่างค่าเอาต์พุตเทอร์โมไฟล์ที่ไม่มีก๊าซ ไหลผ่านและมีก๊าซไหลผ่าน	95

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$a$	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก	$^{\circ}\text{A}$
$E_a$	พลังงานอะตอมสารเจือผู้รับ	eV
$E_c$	พลังงานแถบความนำ	eV
$E_f$	พลังงานระดับเฟอร์มิ	eV
$E_i$	พลังงานระดับอินทรินซิก	eV
$h$	ค่าคงที่พลังค์	eV
$I$	ค่ากระแสไฟฟ้า	mA
$J$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	mA/cm <sup>2</sup>
$J_c$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอน	mA/cm <sup>2</sup>
$n$	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	cm <sup>-3</sup>
$n_i$	ความหนาแน่นพาหะสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	cm <sup>3</sup>
$p$	ความหนาแน่นของโฮล	cm <sup>3</sup>
$q$	ประจุไฟฟ้า	C
$Q_{it}$	อินเตอร์เฟสแทรบชาร์จ	C
$Q_f$	ฟิซซ์ออกไซด์ชาร์จ	C
$Q_{ot}$	ออกไซด์แทรบชาร์จ	C
$Q_m$	โมบิลไอออนิกชาร์จ	
$T$	อุณหภูมิ	K
$V$	ศักดาไฟฟ้า	V
$\epsilon_0$	ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ	F/cm
$\rho$	สภาพความต้านทาน	$\Omega\text{-cm}$
$\lambda$	ค่าความยาวคลื่น	nm
$\alpha$	ค่าสัมประสิทธิ์ซีดบีค	V/K
$\Pi$	ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์	
$\gamma$	สัมประสิทธิ์ของทอมสัน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วมากและบทบาทสำคัญในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์เกือบทั้งหมดส่วนมากจะถูกสร้างขึ้นบนฐานรองที่เป็นผลึกซิลิคอน ทำให้ผลึกซิลิคอนกลายมาเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีความสำคัญ สำหรับนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ในงานเหล่านี้ “เซนเซอร์ (sensors)” นับเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ช่วยให้ระบบรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงของสถานะแวดล้อมจากตัวเซนเซอร์ ทำให้การควบคุมสามารถทำได้ผ่านเซนเซอร์ ในบรรดาเซนเซอร์หลายชนิดด้วยกัน ซิลิคอนเซนเซอร์นับเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่ง ซึ่งได้มีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ใช้งาน[1,2,3] เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหล และความดัน เป็นต้น

ซิลิคอนเทอร์โมไฟล์เซนเซอร์เป็นเซนเซอร์แบบความร้อน โดยอาศัยหลักของ “ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck effect)” เป็นปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน เมื่อนำวัสดุตัวนำสองชนิดต่างกันมาเชื่อมต่อกันด้านหนึ่ง และทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสอง จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตรงรอยนั้น ในปัจจุบันเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และสามารถสร้างอุปกรณ์บนไดอะแฟรม ซึ่งจุดหมายหลักของการพัฒนานั้นไปสู่โครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ให้มีความไวสูง มีความเป็นเชิงเส้นและเสถียรภาพที่ดี

ในการศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนเทอร์โมไฟล์ในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีศักยภาพในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบนฐานรองซิลิคอน เกิดความสนใจ และมีแนวความคิดที่จะทำการสร้างซิลิคอนเทอร์โมไฟล์ เซนเซอร์

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการทำวิจัยเรื่องการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติไฟฟ้าความร้อนของซิลิคอนเทอร์โมไฟล์ โดยเริ่มต้นจาก บทนำ ทฤษฎี การวิเคราะห์ การออกแบบและกระบวนการสร้าง ผลการทดลอง และสุดท้ายสรุปผลการทดลอง ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึง ความเป็นของงานวิจัย และการนำเอาซิลิคอนเทอร์โมไฟล์ประยุกต์ใช้งาน ตลอดจนวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

บทที่ 2 เนื้อหาจะกล่าวถึงทฤษฎีซิลิคอน ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน ปรากฏการณ์ซีเบ็ค ปรากฏการณ์เพลเทียร์ ปรากฏการณ์ทอมสัน และการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 3 เนื้อหาจะกล่าวถึง เทคนิคและเครื่องมือวัด ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องตรวจสอบความลึกของการแพร่สารเจือ ระบบการวัดด้วย GBIP

บทที่ 4 เนื้อหาจะกล่าวถึง การออกแบบและกระบวนการสร้างฮาร์ดแวร์ และการออกแบบ  
และกระบวนการเทอร์โมไฟล์

บทที่ 5 เป็นการทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

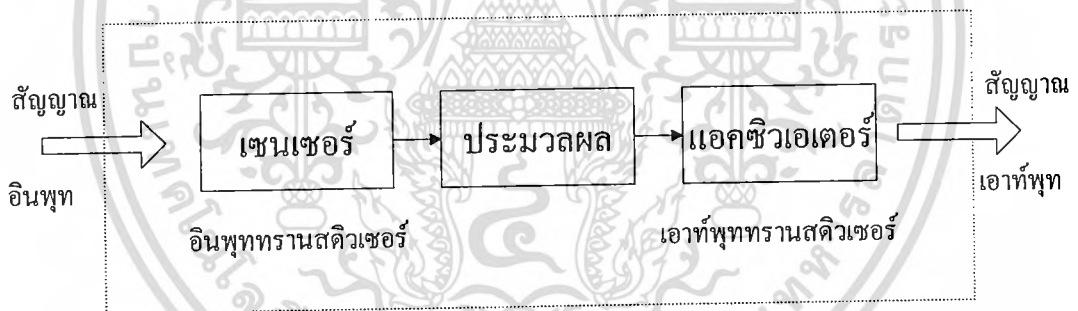


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ทรานสดิวเซอร์เป็นตัวแปลงสัญญาณอย่างหนึ่งไปเป็นสัญญาณอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์ (sensors) และ แอคชูเอเตอร์ (Actuators) เซนเซอร์เป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณในรูปต่างๆ ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนแอคชูเอเตอร์จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณอย่างอื่น จะเห็นได้ว่าทั้งเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์จะแปลงสัญญาณที่ตรงกันข้ามกันและมีความสัมพันธ์กันแสดงดังรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์จะวัดคุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมีแล้วแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งไปยังกระบวนการประมวลผลสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อที่จะส่งไปยังส่วนแอคชูเอเตอร์เพื่อที่จะแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นเอาต์พุตที่ต้องการแสดงมีด้วยกันหลายวิธีเช่น แสดงเป็นภาพ, เสียง, การสั่น, อุณหภูมิและแสงสว่าง เป็นต้น ซึ่งทำให้เราสามารถรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน นอกจากนั้นยังสามารถบันทึกข้อมูลได้



รูปที่ 1.1 แสดงระบบการวัดและแสดงผลแบบพื้นฐาน

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

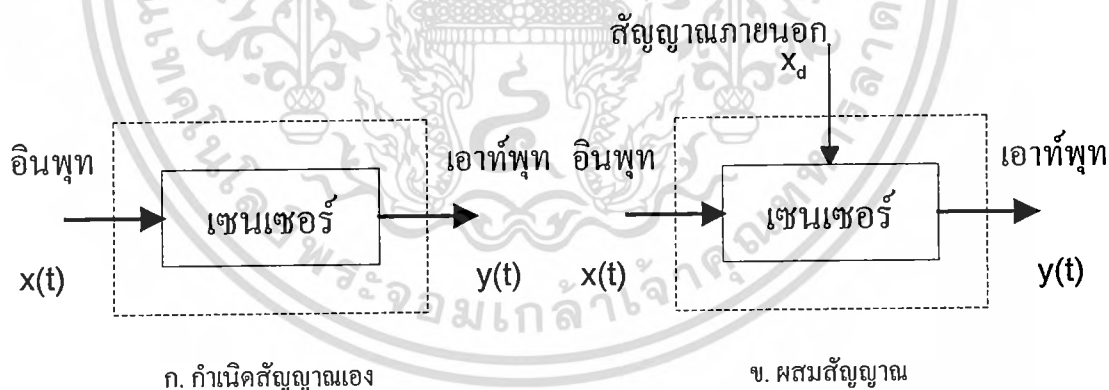
#### 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงชนิดของเซนเซอร์ที่แบ่งตามสัญญาณ

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

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



รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะการทำงานของเซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณเองและ แบบผสมสัญญาณ

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

$$y(t) = F(x(t)) \quad (1.1)$$

หรือ

$$y(t) = F(\Delta T(t)) \quad (1.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

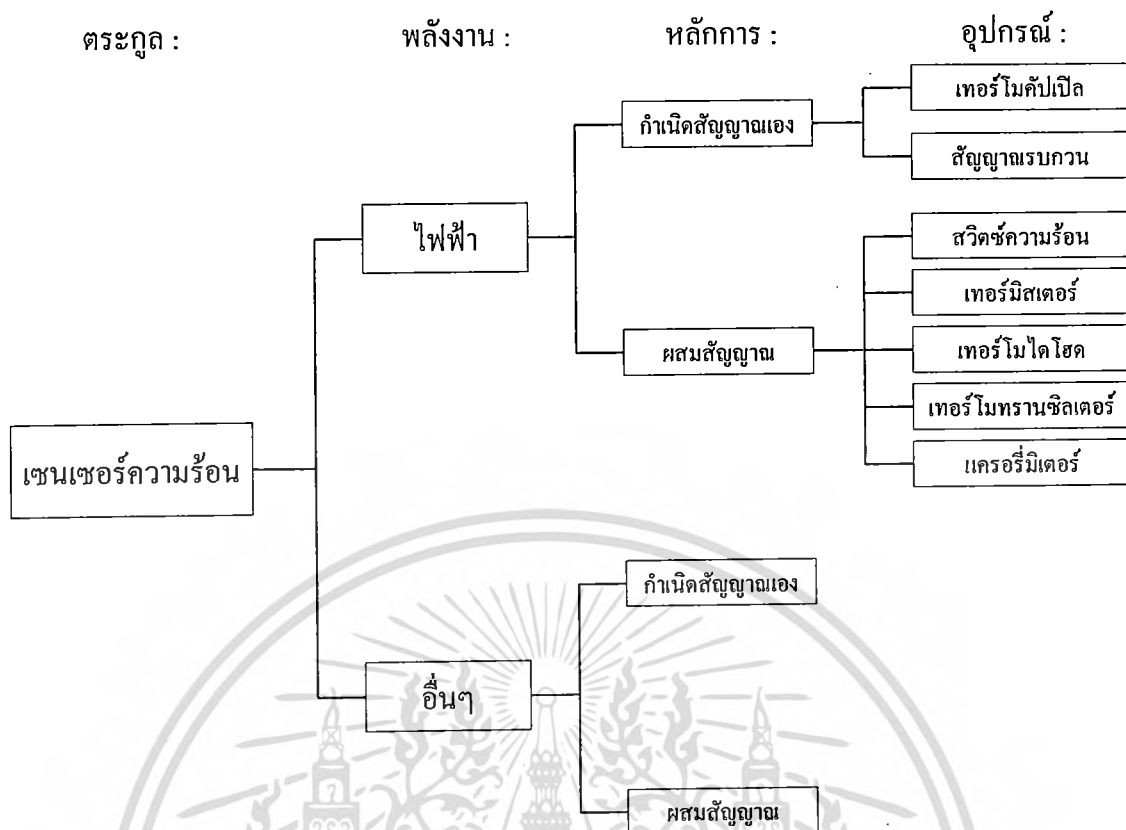
โดย  $x_d$  เป็นแหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอกเช่น กระแสหรือแรงดันไฟฟ้า

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

ตารางที่ 1.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติ ไฟฟ้าและความร้อน

ระบบ	ตัวแปร	องค์ประกอบ	กฎสเตติก	กฎไดนามิก
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) มากกว่าแบบการเกิดสัญญาณเอง สำหรับเซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณเอง ที่ยอมรับได้มีสองแบบคือเทอร์คัปเปิลและแบบความร้อนรบกวน (thermal noise) และ แบบผสมสัญญาณ เช่น เทอร์มิสเตอร์, เทอร์โมไดโอดและเทอร์โมทรานซิสเตอร์ สามารถพัฒนาเป็นไมโครเซนเซอร์ได้ อย่างไรก็ตามยังมีตัววัดอุณหภูมิอีกหลายชนิดเช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทที่ไม่สามารถทำเป็นไมโครเซนเซอร์ได้ ในที่นี่เราจะศึกษารายละเอียดจากตารางที่ 1.3 แสดงชนิดของตัววัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (contacting thermal sensor) มีช่วงการใช้งานกว้าง แต่ในขณะเดียวกันเซนเซอร์แบบไม่สัมผัส (non-contacting thermal sensor) จากตารางแสดงช่วงของการวัดอุณหภูมิที่ครอบคลุมโดยมาตรฐานการวัดและความละเอียด



รูปที่ 1.3 แสดงตระกูลของเซนเซอร์ความร้อน

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
รอยต่อพีเอ็นซีลิคอน	4 - 500	ห้องปฏิบัติการ	0.001
เทอร์โมคัปเปิล	210 - 430	ห้องปฏิบัติการ	1
การแผ่รังสี	270 - 5,000	อุตสาหกรรม	1.0
เทอร์โมมิเตอร์			
เทอร์โมมิเตอร์แบบก๊าซ	1.5 - 1,400	ห้องปฏิบัติการ	0.002
เทอร์โมมิเตอร์แบบของเหลว	130 - 950	ทั่วไป	0.1
เทอร์โมมิเตอร์แบบโลหะคู่	130 - 700	อุตสาหกรรม	1 - 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

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

การศึกษาถึงคุณสมบัติของเทอร์โมไพสท์เพื่อประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดอัตราการไหลของก๊าซแบบซิลิคอน โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นหลักการทำงาน โดยใช้โครงสร้างเทอร์โมไพสท์เป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและมีฮีตเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน เมื่อมีก๊าซไหลผ่านตรวจวัดอัตราการไหลทำให้เกิดการพาความร้อนทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ สำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดอัตราการไหลจะต้องอาศัยกระบวนการทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำเทคโนโลยีแบบระนาบ (planar technology) ร่วมกับ โครงสร้างกลไกขนาดเล็ก (micromachining)

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

จากอดีตที่ผ่านมาเทอร์โมคัปเปิลมีความสำคัญและมีประโยชน์มากในการวัดอุณหภูมิ สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ได้ในงานวิจัย โดยโครงการทำวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์

1. ศึกษาโครงสร้างของเทอร์โมไพสท์
2. ศึกษาคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์
3. ศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไพสท์
4. ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้เป็นตัววัดอัตราการไหลของก๊าซ

## บทที่ 2

## ทฤษฎี

### 2.1 วัสดุซิลิคอน

#### 2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน

ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นด้วยจากอะตอมของธาตุซิลิคอนหลายๆ อะตอมมาอยู่ใกล้ชิดกัน โดยอะตอมดังกล่าวจะมีการยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมซิลิคอนเหล่านี้เรียกว่า พันธะ (bond) กลไกในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดพันธะนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะที่เกิดขึ้นในผลึกซิลิคอนเท่านั้น

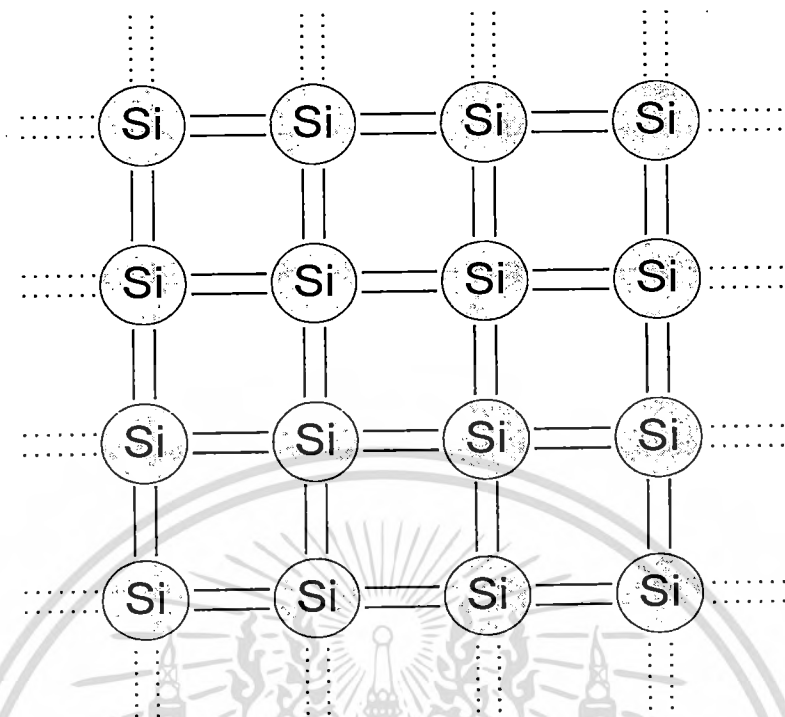
ในผลึกซิลิคอนเมื่ออะตอมของซิลิคอนเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันจะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมซิลิคอนซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) อยู่ถึง 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของอะตอมซิลิคอน

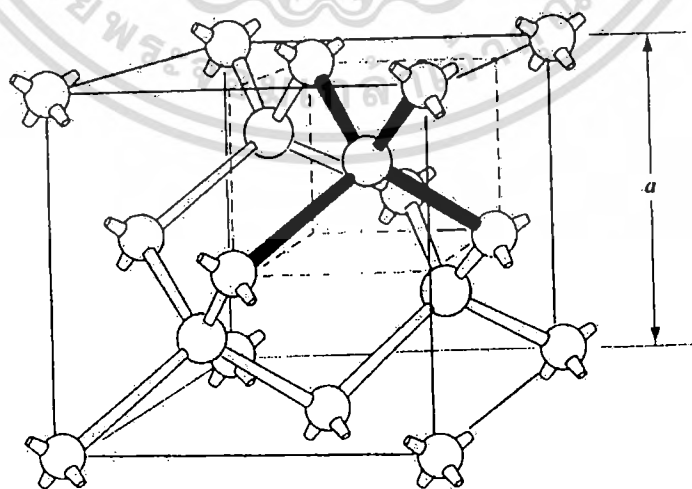
เกิดการทับซ้อนกัน อันจะทำให้เกิดพันธะแบบที่เรียกว่า พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เกิดขึ้น โดยพันธะดังกล่าวนี้เกิดจากอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน ทั้งนี้ก็เพื่อให้อะตอมอยู่ในภาวะที่มั่นคง ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิคอน

จากรูปข้างต้นจะเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์ในสองมิติ โดยอะตอมจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้ง 4 ร่วมกันกับอิเล็กตรอนนี้เองทำให้อะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะด้วยกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้เองทำให้อะตอมของซิลิคอนต่างๆ มีความมั่นคง และสามารถประกอบรวมกันเป็น โครงสร้างของผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

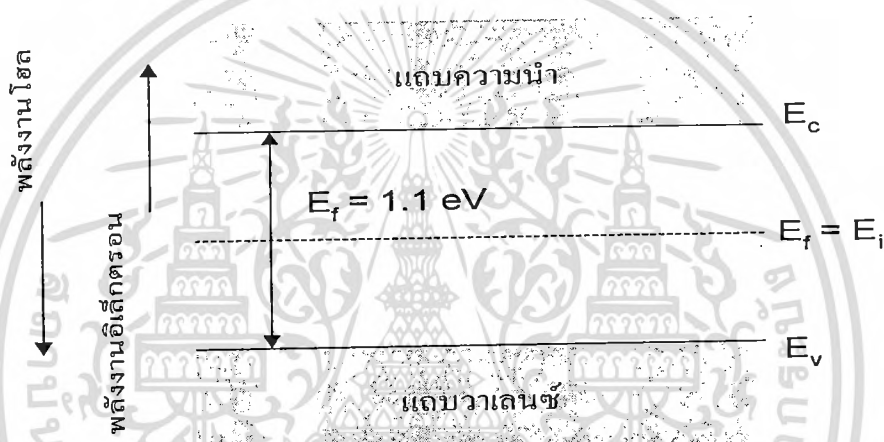
### 2.1.1 ชนิดของผลึกซิลิคอน

ผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ ได้คือ ซิลิคอนบริสุทธิ์และซิลิคอนเจือปน

#### 2.1.1.1 ซิลิคอนบริสุทธิ์ (Intrinsic Silicon)

ผลึกซิลิคอนซึ่งไม่ได้ถูกเติมหรือเจือปนด้วยอะตอมสารเจือของธาตุอื่น ในบางครั้งนิยมเรียกว่าอะตอมสารเจือ (impurity atom) จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.4

จากภาพเป็นลักษณะโครงสร้างพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบความนำและแถบพลังงานต้องห้าม โดยระดับพลังงานซึ่งแสดงเป็นเส้นโค้งที่อยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำ คือระดับพลังงานเฟอร์มี สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์แล้ว



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะ โครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์

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

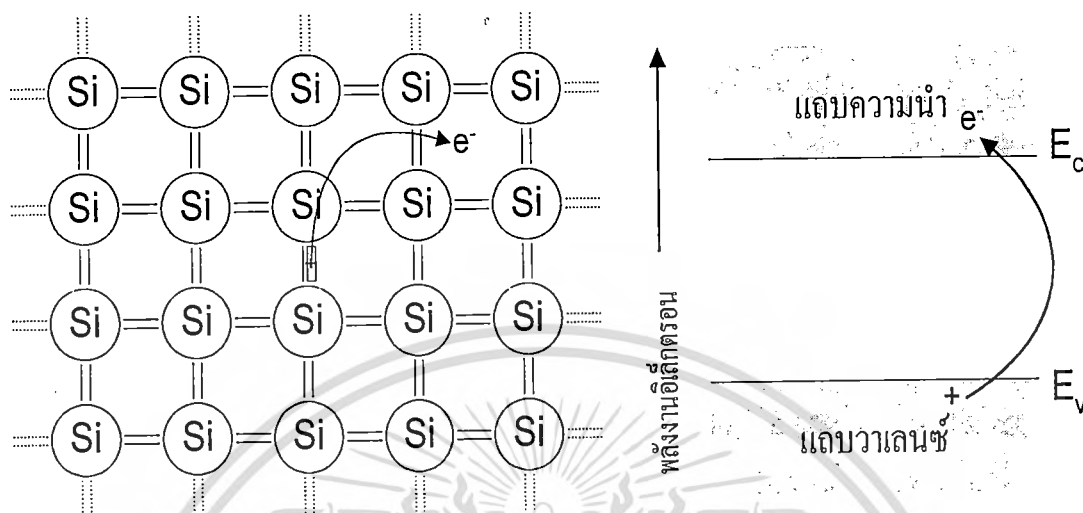
$$n = p = n_i \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $n$  = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

$p$  = ความหนาแน่นของ โฮล

$n_i$  = ความหนาแน่นอินทรินซิก



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงาน

### 2.1.1.2 ซิลิคอนเจือปน(Extrinsic Silicon)

ซิลิคอนบริสุทธิ์หรือที่เรียกว่าอินทรินซิกซิลิคอนนั้น ตามความจริงแล้วจะถูกนำไปใช้งานเพื่อการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้น้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอนบริสุทธิ์มีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำและมีค่าจำกัด โดยค่าความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงได้ก็เฉพาะในกรณีที่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอกเช่น ความร้อนหรือแสง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มสภาพความนำไฟฟ้าให้เกิดแก่ผลึกซิลิคอนจึงมีการเติมอะตอมสารเจือธาตุอื่นเข้าไปในผลึกด้วย ผลึกซิลิคอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมของธาตุปน (impurity atom) ถูกเรียกว่า ซิลิคอนเจือปน หรือ เอ็กทรินซิกซิลิคอน ทำให้ผลึกซิลิคอนดังกล่าวมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ

สำหรับอะตอมของธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือปน (impurity) เดิมลงไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 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)

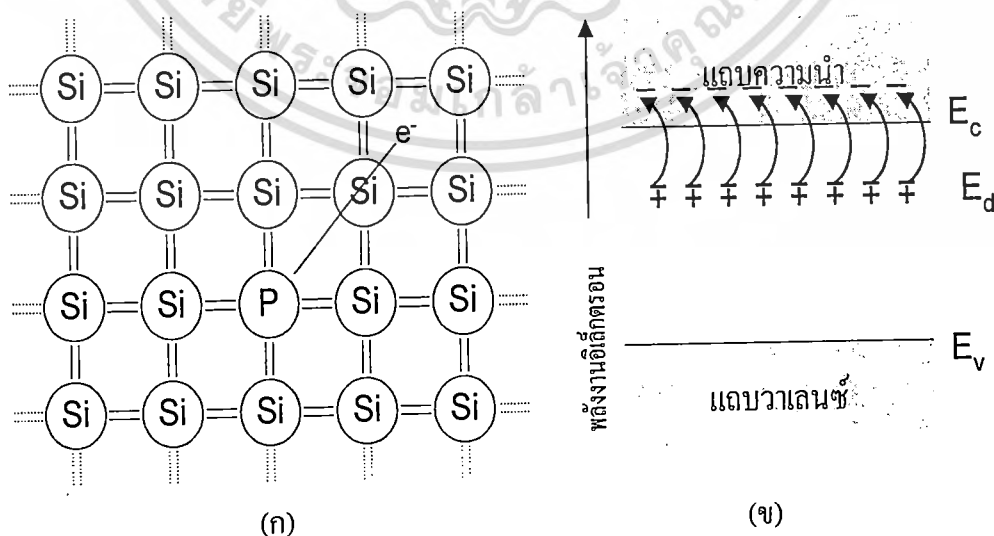
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่อะตอมธาตุเจอร์เมเนียมในหมู่ที่ 3 ของตารางธาตุเช่น โบรอน อะลูมิเนียม อินเดียม เป็นต้น เมื่อเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์แล้ว จะทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดพี สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกจำนวนมาก อะตอมสารเจอร์เมเนียมนี้ถูกเรียกว่าอะตอมผู้รับ (acceptor atom)

ส่วนซิลิคอนเจือปนที่ได้หลังจากการเติมอะตอมสารเจือแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

### 1. ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจอร์เมเนียม หรืออะตอมผู้ให้ เช่น อะตอมของ ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 5 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวเมื่ออะตอมถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ซึ่งอยู่รอบๆ เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะ ดังนั้นจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งไม่มีพันธะจับอยู่ อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะอยู่ในอิทธิพลของนิวเคลียสด้วยแรงยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อยเกือบจะเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องปกติพลังงานจลน์จากร้อนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวได้รับพลังงานและหลุดออกมาเป็นอิสระได้เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างเสรีกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ในสภาพเช่นนี้ปรากฏการณ์พันธะแตกเนื่องจากพลังงานความร้อนก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนต์หลุดมาเป็นอิสระได้เช่นกัน และทิ้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าชนิดบวกเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ แต่ปริมาณโฮล และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะแตกนี้จะมีจำนวนน้อย ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงมีปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอนที่มากกว่าโฮล ทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดลบ (Negative charge) ดังนั้นเราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่าผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n : ย่อมาจาก negative) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้ และลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

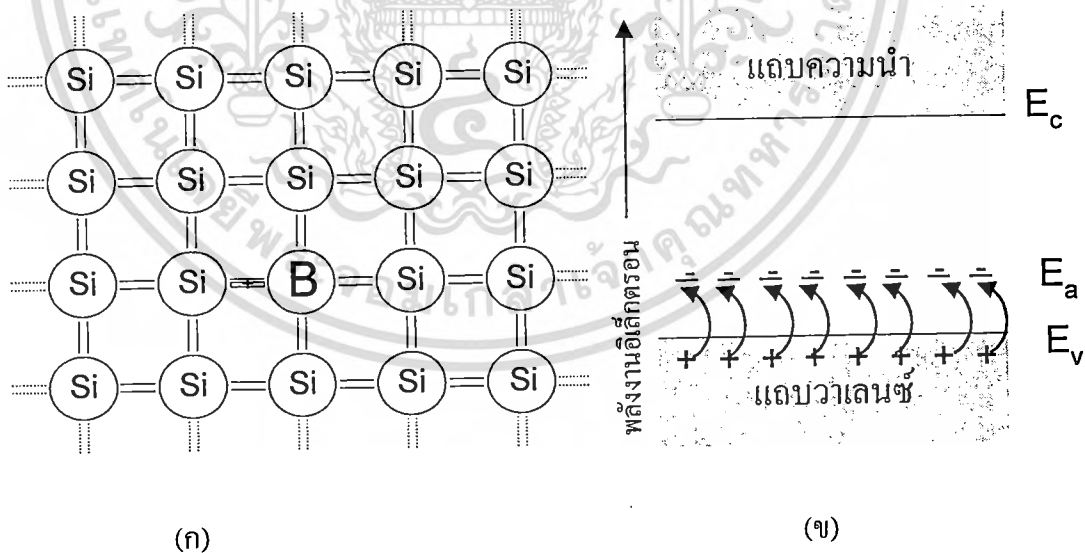


รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลึกซิลิคอนชนิดพี (p-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี หรือที่เรียกว่า อะตอมผู้รับ เช่น อะตอมของโบรอน ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียง 3 ตัว เมื่ออะตอมสารเจือผู้รับถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมของผลึกซิลิคอนที่อยู่ข้างเคียงอีก 4 อะตอม แต่อะตอมสารเจือชนิดนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ดังนั้นจึงสามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ได้เพียง 3 ตัวพันธะเท่านั้น ส่วนอีกหนึ่งพันธะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนซ์ใกล้ๆ มีโอกาสที่จะเข้าไปอยู่ในที่ดังกล่าวเพื่อทำให้เป็นพันธะที่สมบูรณ์ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากพันธะโควาเลนซ์ก็จะทำให้เกิดโฮลขึ้นมา โฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกสามารถนำไฟฟ้าได้ อะตอมของสารเจือชนิดนี้ เมื่อได้อิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามาก็จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนและโฮลจำนวนเล็กน้อยที่สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากพลังงานจากความร้อนซึ่งทำให้พันธะแตกออก ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดพีจึงมีปริมาณของประจุพาหะ โฮลมากกว่าจำนวนของอิเล็กตรอน และสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดบวก (positive charge) เราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่าผลึกซิลิคอนชนิดพี ( p : ย่อมาจาก positive) การเกิดโฮลเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้รับและลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดพีแสดงได้ดังในรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

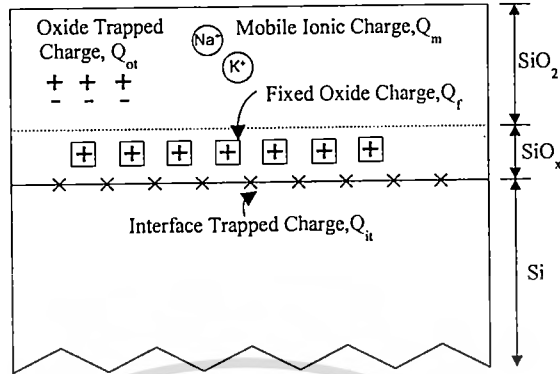


รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงาน

2.1.1.3 อินเทอร์เฟซแทรพ (Interface trap) และออกไซด์ชาร์จ (Oxide charge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำแนกประเภทพื้นฐานของประพาหะและแตรบเหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ชนิดด้วยกันคือ



รูปที่ 2.8 แสดงประเภทของอินเตอร์เฟสแตรบและออกไซด์ชาร์จ

### 1. อินเตอร์เฟสแตรบชาร์จ (Interface trapped charge, $Q_{it}$ )

อินเตอร์เฟสแตรบชาร์จ  $Q_{it}$  เกิดเนื่องจากคุณสมบัติของรอยต่อของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์และขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของรอยต่อทั้งสอง ตำแหน่งที่ตั้งของแตรบเหล่านี้อยู่ที่รอยเชื่อมต่อของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีระดับพลังงานอยู่ในแถบต้องห้ามของซิลิคอน

### 2. ฟิกซ์ออกไซด์ชาร์จ (Fixed oxide charge, $Q_f$ )

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

### 3. ออกไซด์แตรบชาร์จ (Oxide trapped charge, $Q_{ot}$ )

ออกไซด์แตรบชาร์จ  $Q_{ot}$  เกี่ยวข้องกับจุลีสัย ในซิลิคอนไดออกไซด์ ประจุเหล่านี้เกิดจากสาเหตุดังเช่น การแผ่รังสีเอ็กซ์ หรือ high-energy electron bombardment แตรบเหล่านี้จะกระจายอยู่ทั่วไปในชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์

### 4. โมบิลไอออนิกชาร์จ (Mobile ionic charge, $Q_m$ )

โมบิลไอออนิกชาร์จ  $Q_m$  ดังเช่น โซเดียมหรือไอออนิกของธาตุอัลคาไลด์อื่นๆ จะเคลื่อนที่ภายในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้าที่สูง

## 2.2 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน (Thermoelectric Effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนและไฟฟ้า เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ปรากฏการณ์คือ

### 1. ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

เป็นปรากฏการณ์นี้สังเกตได้จากการทดลองเมื่อนำวัสดุตัวนำต่างกัน 2 ชนิด โดยการนำปลายทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน และปลายทั้งสองถูกทำให้มีอุณหภูมิต่างกัน ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรโลหะ

### 2. ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงวัสดุตัวนำต่างกัน 2 ชนิด ที่ปลายทั้งสองด้านถูกเชื่อมต่อกัน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อที่ถูกเชื่อม โดยความร้อนจะถูกคายออกมาด้านหนึ่งและปลายอีกด้านหนึ่งดูดความร้อน ซึ่งจะขึ้นกับทิศทางกระแสที่ไหล

### 3. ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงวัสดุตัวนำที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุแห่งตัวนำ จะเกิดการดูดความร้อนและคายความร้อน

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 2.1

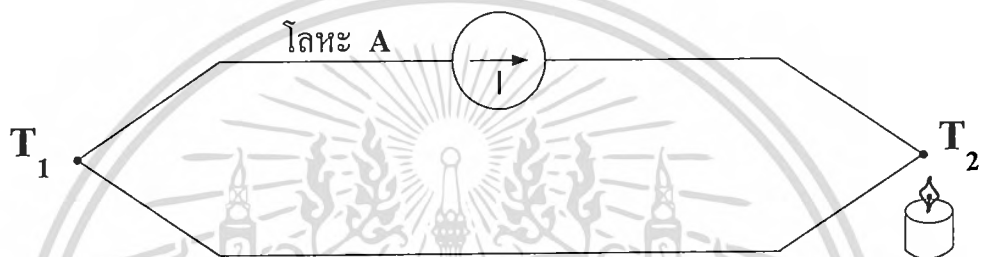
$$V_{AB} = \alpha_{AB}(T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อนำเทอร์โมคัปเปิลมาใช้งานโดยการนำรอยต่อ AB ไปยังจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิและปลายอีกด้านหนึ่งอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิที่รู้ค่า ทำให้เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัปเปิลดำเนินต่อมาจนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.9 แสดงเป็นวงจรปิดจะเกิดกระแสไหลวน



รูปที่ 2.10 แสดง โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล

### 2.2.1.1 กฎการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Laws)[4]

#### 1. กฎของวงจรโลหะชนิดเดียวกัน (Law of the Homogeneous Circuit)

เป็นวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยโลหะชนิดเดียวกัน จะไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อเกิดความต่างของอุณหภูมิ ณ ปลายจุดทั้งสอง

แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดในกรณีทีลวดทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกันเท่านั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้าง

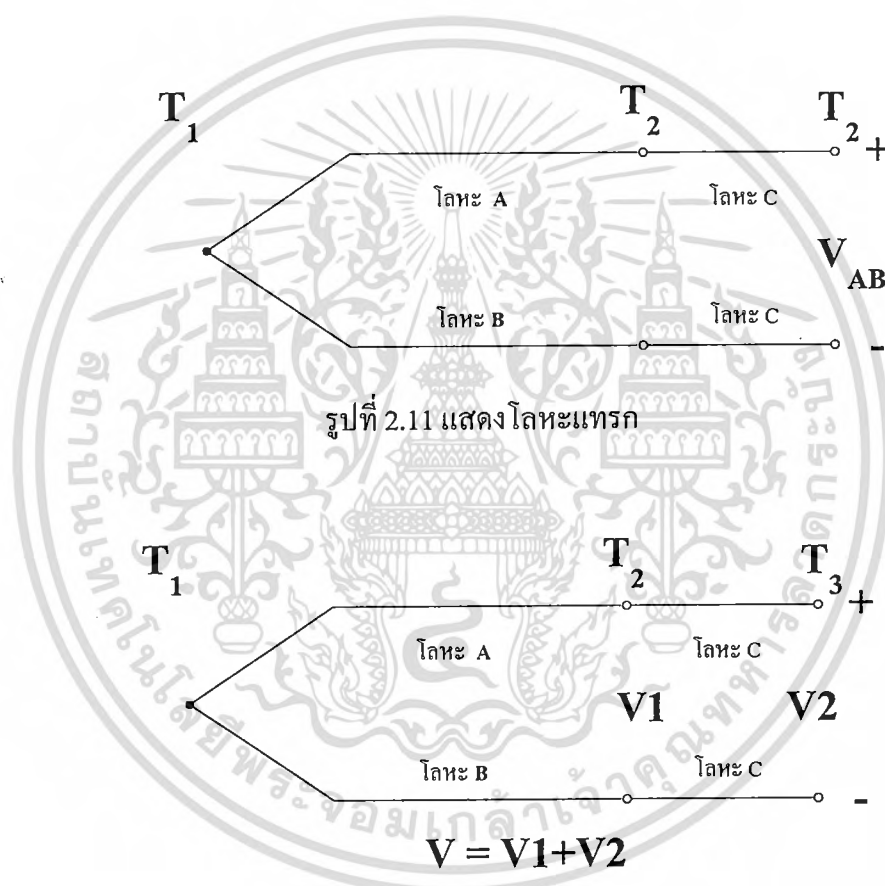
#### 2. กฎของโลหะ (Law of Intermediate Metals)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

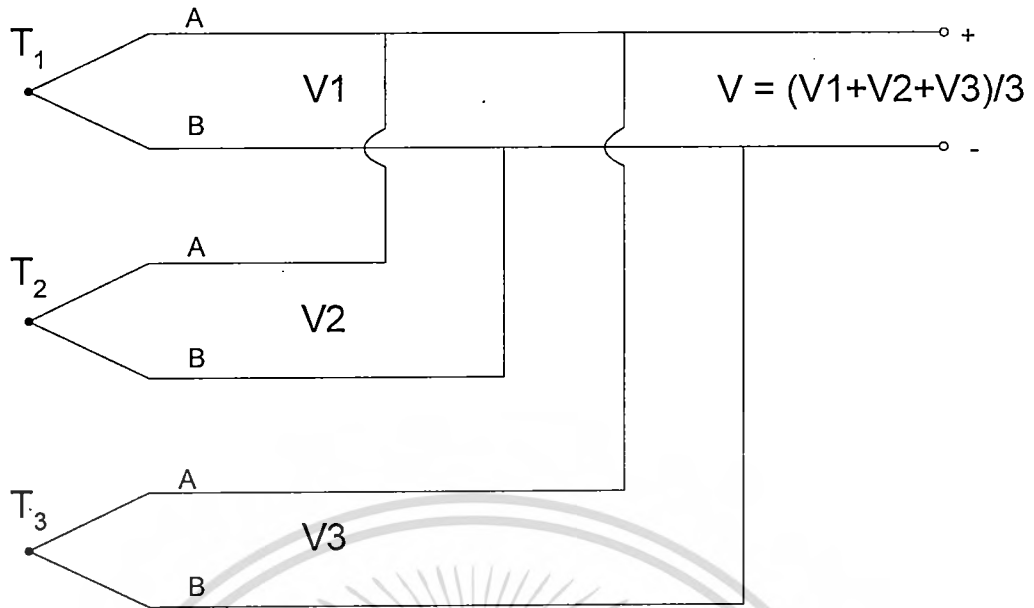
### 3. กฎของอุณหภูมิแทรก (Law of Intermediate Temperature)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลชุดใดๆ ที่มีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกัน จะมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลชุดนั้น ตามรูปที่ 2.12 คือ ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลรวมเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองชุด



#### 2.2.1.2 ผลของการนำเอาเทอร์คัปเปิลมาต่อกันจะได้ดังนี้

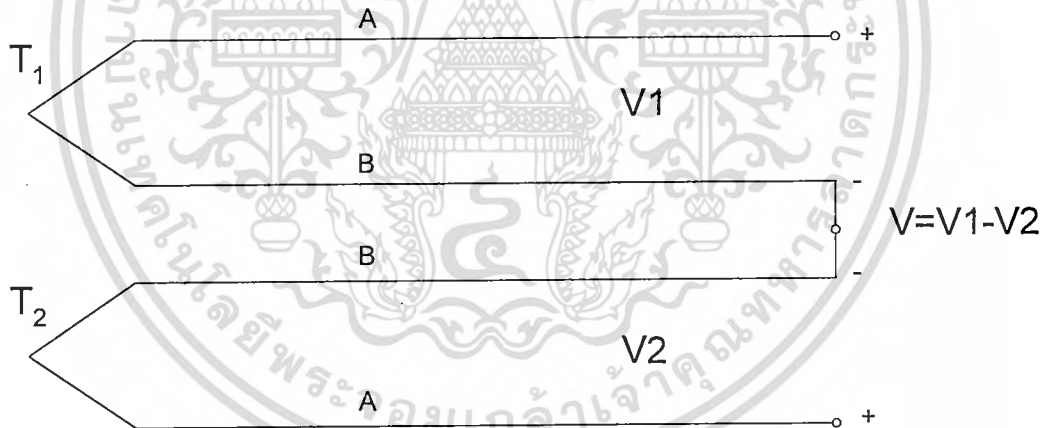
1. การนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่อขนานกัน ผลที่ได้คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการต่อขนานเทอร์โมคัปเปิล

2. การนำเทอร์โมคัปเปิลสองชุดมาต่อกลับขั้วกันจะให้ผลของเอาต์พุตลดลงแสดงดังรูปที่

2.14

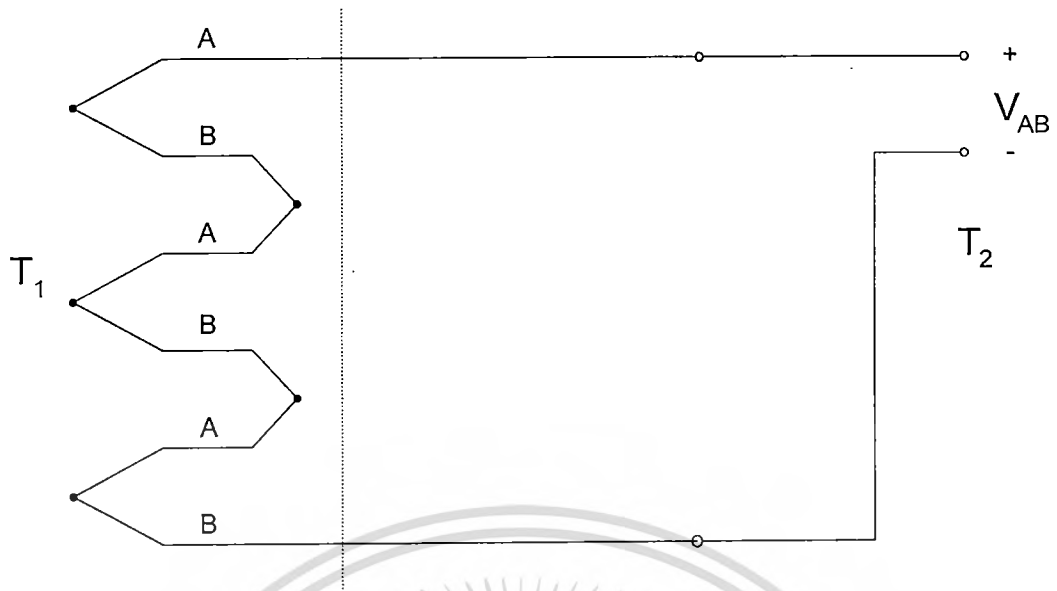


รูปที่ 2.14 แสดงการหาผลต่างกั้วขั้วของเทอร์โมคัปเปิล

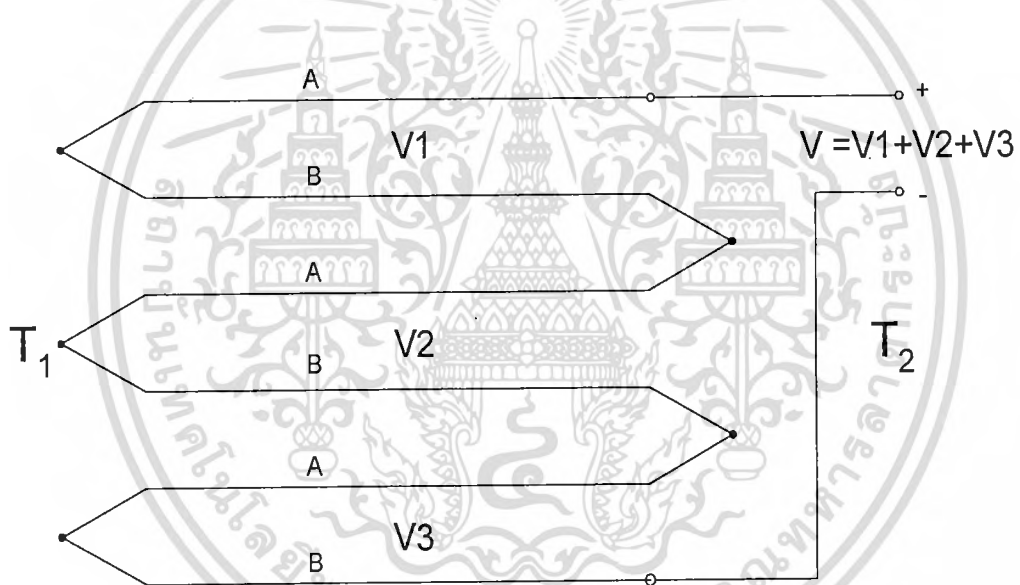
3. การเพิ่มจำนวนเทอร์โมคัปเปิลมาต่อกัน จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.15

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงการต่อเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า



รูปที่ 2.16 แสดงการต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิล

ปัจจุบันคุณสมบัติของปรากฏการณ์ซีเบ็คได้ถูกศึกษากันอย่างกว้างขวาง[5] แต่อย่างไรก็ตามการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายโครงสร้างของอิเล็กตรอนและการกระเจิงของอิเล็กตรอน (electron scattering) ที่เป็นไปตามทฤษฎีและผลการทดลอง และบ่อยครั้งก็ไม่เป็นไปตามทฤษฎีและผลการทดลอง ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ซีเบ็คนั้นต้องรู้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามตำแหน่งวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างดังนี้

ก. การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มี (change of fermi level)

ระดับเฟอร์มีมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ทำให้ปลายทั้งสองมีระดับเฟอร์มีไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ข. การเปลี่ยนแบนด์แก๊ป (band gap change)

ในสภาวะของแข็งอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารภมีพลังงานได้หลายสถานะ ในแถบพลังงานของโลหะจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม ในการตรงกันข้ามของสารกึ่งตัวนำและฉนวน โดยที่แถบวาเลนซ์แบนด์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและแถบคอนดักชันแบนด์ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย ความกว้างของแถบพลังงานขึ้นกับอุณหภูมิ ทำให้เกิดการไหลของประจุพาหะระหว่างปลายทั้งสองของแท่งวัสดุ

#### ค. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะ (change carrier concentration gradient change)

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของประจุพาหะเปลี่ยนไปส่งผลให้เกิดการแพร่ประจุพาหะ

#### ง. การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient change)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาของอนุภาคและค่าความพร่องตัวของประจุพาหะ จากที่กล่าวมาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นสาเหตุของการแพร่ของประจุพาหะตามแท่งของวัสดุ

#### จ. การแพร่ของความร้อน (thermal diffusion)

พลังงานจลน์ของอนุภาคและประจุพาหะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยที่ปลายด้านร้อนอนุภาคจะมีพลังงานสูงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนไปยังบริเวณที่เย็นกว่าและจะมีการสะสมของอนุภาคและประจุพาหะที่ปลายทั้งของวัสดุ

#### ช. การลากของโฟนอน (Phonon)

เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีฟลักซ์ (flux) ความร้อนไหลตามแท่งวัสดุ ฟลักซ์ความร้อนจะถูกพาไปโดยประจุพาหะและโฟนอน โดยที่โฟนอนเป็นผลจากการสั่นของแลตทิซ (lattice) ทั้งประจุพาหะและโฟนอนจะมีความสัมพันธ์และอิทธิพลต่อกัน ซึ่งประจุพาหะจะถูกลากโดยโฟนอนไปยังบริเวณที่เย็นกว่า

#### ซ. การสะสมของประจุพาหะ (change accumulation)

จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสาเหตุของการสะสมของประจุพาหะที่อยู่ปลายทั้งสองของแท่งวัสดุจะมีขั้วประจุต่างกันเป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ในกรณีที่เป็นวงจรเปิดสนามไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะสมดุล จากปรากฏการณ์ทั้งหมดมีผลครอบคุมค่าซีเบ็คของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

### 2.2.1.3 ปรากฏการณ์ซีเบ็คของโลหะ (Seebeck effect in metal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะเป็นวัสดุตัวนำซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะที่นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ดังนั้นปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นคุณสมบัติของวัสดุทุกตัว แต่การวัดค่าซีเบ็คของวัสดุตัวนำต้องมีรอยต่อของวัสดุที่ต่างกัน ดังนั้นนิยามของซีเบ็คคือ

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

$\alpha_A$  คือค่าซีเบ็คของโลหะ A และ  $\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ A ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าซีเบ็คของโลหะต่างกันของโลหะ A และ B ถูกนิยามโดยสมการที่ (2.2) จะได้ว่า

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

ในการกำหนดค่าซีเบ็คของโลหะตัวนำต่างๆ ต้องเลือกโลหะตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวอ้างอิงในการหาค่าซีเบ็ค โดยต้องมีค่าซีเบ็คต่ำๆ Pt ถูกเลือกเป็นโลหะอ้างอิงในการวัดค่าซีเบ็คของโลหะต่างๆ และรู้คุณสมบัติเป็นอย่างดี ที่อุณหภูมิสูงๆ Pt มีเสถียรภาพดี แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุ โดยที่จุดอ้างอิงอยู่ที่ 0 °C และจุดที่วัด 100 °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
Thallium	+0.58	Antimony	+4.89
Iridium	+0.65		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการพิจารณาในกรณีการเกิดปรากฏการณ์ซีbeckเนื่องจากการแพร่ของความร้อน(จ) เมื่ออิเล็กตรอนได้รับความร้อนที่ปลายแท่งโลหะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากบริเวณที่ปลายร้อนไปยังปลายด้านเย็นเพราะว่าอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบทำให้ปลายด้านเย็นมีประค่าเป็นลบและปลายด้านร้อนมีค่าเป็นบวก จะได้ผลค่าซีbeckเป็นลบซึ่งเป็นไปตามผลที่คาดการณ์ไว้ แต่กลไกการแพร่ความร้อนยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่ตารางที่ 2.1 เพราะว่าโลหะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระแต่อย่างไรก็ตามยังมีโลหะบางชนิดมีค่าซีbeckเป็นบวกและนั่นหมายถึงอิเล็กตรอนไปสะสมที่ปลายร้อนของแท่งโลหะ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการทางไฟฟ้าของโลหะทำให้เกิดปรากฏการณ์ซีbeckคือ การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ(ก) การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่(ง) และการแพร่ของความร้อน(จ) ในสถานะสมดุลของปรากฏการณ์จะถูกชดเชยด้วยสนามไฟฟ้าสาเหตุเนื่องมาจากการสะสมของประจุไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ(ซ) การเปลี่ยนอุณหภูมิทำให้ระดับเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงเพราะกฎการแยกตัวเพาลี (Pauli exclusion principle) ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์สถานะของพลังงานอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิที่จะมีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่และที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับเฟอร์มิขึ้นไปจะมีแต่ความว่างเปล่ากล่าวคืออิเล็กตรอนมีพลังงานไม่เกินระดับเฟอร์มิ ที่อุณหภูมิใดๆ สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนถูกควบคุมโดยฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิไดเรค (fermi-dirac distribution function)

$$f_{ED}(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]} \quad (2.5)$$

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

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

โดยที่  $N(E)dE$  คือจำนวนสถานะพลังงานที่จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในช่วงพลังงาน  $E$  ถึง  $dE$  ที่อุณหภูมิ  $0\text{ K}$  สถานะของพลังงานทั้งหมดจะอยู่ที่  $E_F(0)$  ที่ระดับพลังงานสูงกว่า  $E_F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

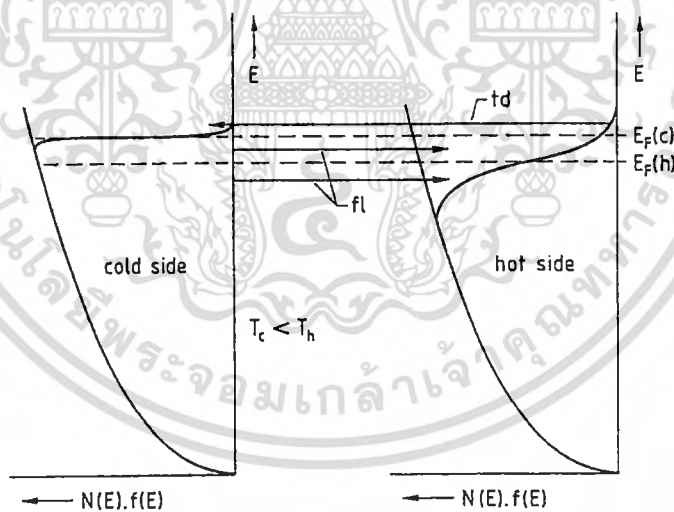
(0) จะมีแต่ความว่าง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนที่ครอบครองพลังงานที่ต่ำกว่า  $E_F$  ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนสามารถขึ้นไปครอบครองสถานะพลังงานที่สูงกว่า  $E_F$  เป็นสาเหตุของการโค้งงอของระดับ การลดลงของระดับเฟอร์มิมีแสดงดังสมการคือ

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

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป

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

จากสมการอธิบายการลดลงของระดับเฟอร์มิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่ปลายแท่งโลหะได้รับความร้อนมีผลให้ระดับเฟอร์มิอยู่ต่ำกว่าปลายด้านเย็นมีให้อิเล็กตรอนไหลจากปลายด้านร้อนไปยังปลายด้านเย็นทำให้ค่าซีเบ็คเป็นบวกซึ่งตรงกันข้ามกรณีของการแพร่ของประจุพาหะเมื่อได้รับความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.17

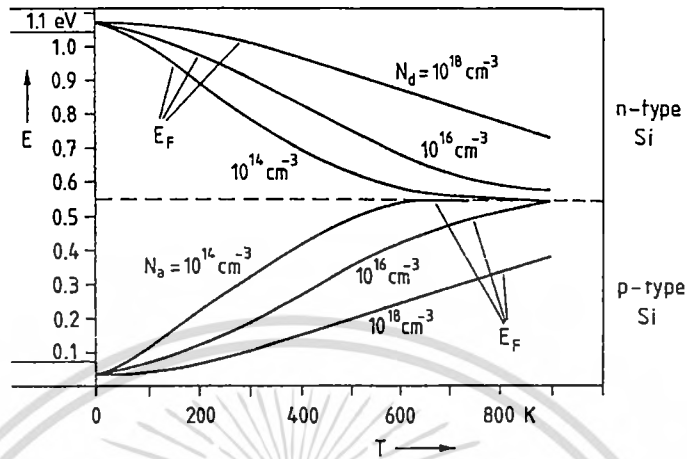


รูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนระดับเฟอร์มิและแพร่ของอิเล็กตรอน

### 2.2.1.4 ปรากฏการณ์ซีเบ็คในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

ในการเปรียบเทียบขนาดซีเบ็คระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะนั้นสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงกว่าโลหะมาก ซึ่งซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่น่าไปใช้สร้างเป็นวงจรรวม (IC) นอกจากนี้ยังมีประโยชน์อีกข้อหนึ่งของซิลิคอนมีคุณสมบัติคือสามารถพัฒนาใช้กับโครงสร้างใหม่ๆ ได้และพัฒนาใช้กับโครงสร้างใหม่ได้กับเทคโนโลยีระดับสูงได้ เมื่อนำแท่งซิลิคอนมาทำให้มีความแตกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มิที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของสารเจือแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งเฟอร์มิในช่วงแบนด์กับของซิลิคอนที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ  $N_d$  และ  $N_a$

จากรูปที่ 2.18 สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มิ ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับเฟอร์มิจะมีผลต่อค่าซีเบ็คมาก สำหรับซิลิคอนชนิดเอ็นจะได้ค่าซีเบ็คเป็นลบและซิลิคอนชนิดพีได้ค่าซีเบ็คเป็นบวก ดังนั้นการวัดค่าซีเบ็คสามารถใช้บอกชนิดและความเข้มข้นของสารเจือซิลิคอนได้

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งเป็นสาเหตุทำให้มีประจุพาหะเพิ่มขึ้นเพราะว่าโฮลและอิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนที่ต่างกัน (ค และ ง) และขนาดของแบนด์เองก็มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิผลต่อตำแหน่งของเฟอร์มิ (ก) สามารถประค่าซีเบ็คสำหรับซิลิคอนชนิดเอ็น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่  $s$  คือความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการชนเฉลี่ยระหว่างการชนและพลังงานงานของประจุพาหะ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเกิดการไหลของโฟนอนจากปลายด้านร้อนไปด้านเย็น(ข) การสั่นของโฟนอนสามารถถ่ายเทโมเมนตัมของประจุพาหะทำให้เกิดการลาก(drag)ของประจุพาหะแสดงดังสมการ

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

โดยที่  $\phi$  คือค่าการการลากของโฟนอน

สำหรับซิลิคอนชนิดเอ็นได้ค่าซีเบ้รวมเป็น

$$\alpha = -\frac{k}{q} \left( \ln \frac{N_c}{N_a} + \frac{5}{2} + S_n + \phi_n \right) \quad (2.12)$$

สำหรับซิลิคอนชนิดพีได้ค่าซีเบ้รวมเป็น

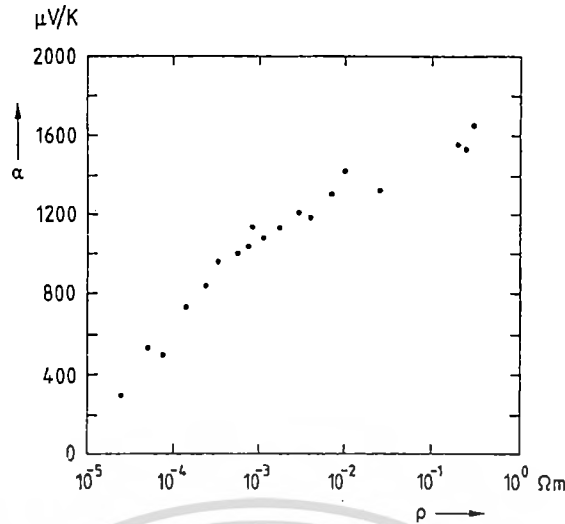
$$\alpha = -\frac{k}{q} \left( \ln \frac{N_v}{N_a} + \frac{5}{2} + S_p + \phi_p \right) \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติการหาค่าซีเบ้จะใช้ความสัมพันธ์ของสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity)  $\rho$  ซึ่งสามารถประมาณได้ดังสมการ

$$\alpha_s = \frac{mk}{q} \ln \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่  $m$  คือค่าคงที่ มีค่าประมาณ 2.6 และ  $\rho_0$  เป็นค่าสภาพความต้านทานคงที่  $5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  ดังแสดงรูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีเบ้ของซิลิคอนผลึกเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 300 องศาเคลวิน กับสภาพความต้านทานที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



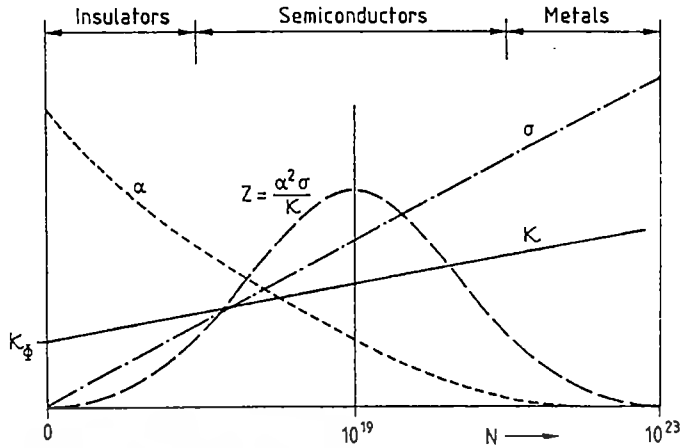
รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ของค่าซีเบ็คเทียบกับสภาพความต้านทาน

ปรากฏการณ์ซีเบ็คในสารกึ่งตัวนำและโลหะ โดยค่าซีเบ็คของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงกว่าโลหะมาก 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  $\alpha$  คือค่าซีเบ็ค  $\sigma$  คือค่าความนำไฟฟ้าและ  $k$  คือค่าการนำความร้อน สำหรับประสิทธิภาพของ power converters ของวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าสูงและการนำความร้อนต่ำจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิสูง แต่ในทางปฏิบัติคุณสมบัติการนำทั้งสองอย่างขึ้นตรงกับความหนาแน่นของประจุพาหะ สำหรับวัสดุที่เหมาะสมคือสารกึ่งตัวนำสามารถเติมอะตอมสารเจือให้มีค่าความเข้มข้นสูงเพราะว่าคุณสมบัติของวัสดุจะมีโฟนอนที่ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง จากรูปที่ 2.20 เป็นการเปรียบเทียบของ อนุกรม สารกึ่งตัวนำและโลหะ ความสำคัญของค่าคงที่  $Z$  ที่ได้จากการคำนวณจาก figure of merit  $Z$  ได้แสดงความสัมพันธ์ของ  $Z$  และ ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ โดย  $k_p$  คือค่าโฟนอน  $k$  คือค่าการนำความร้อนนี้ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุพาหะ

จากความสัมพันธ์ของกราฟทำให้คาดการณ์ความสัมพันธ์ความหนาแน่นของประจุพาหะที่เพิ่มขึ้นและถ้าความหนาแน่นประจุพาหะเพิ่มขึ้นทำให้ค่า  $Z$  ก็เพิ่มขึ้นด้วยเพราะว่าระดับของเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าซีเบ็คลดลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเจือ จากกราฟแสดงค่า  $Z$  สูงสุดในช่วงความหนาแน่นของสารเจือระหว่าง  $10^{18}$  ถึง  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 2.20 เป็นการเปรียบเทียบของ จำนวน สารกึ่งตัวนำและ โลหะ

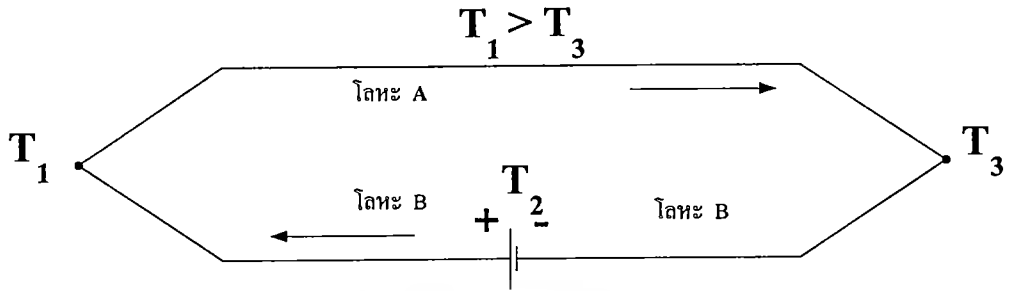
2.2.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ ฌอง ซี เอ เพลเทียร์ (Jean C. A. Peltier) ในปี ค.ศ. 1834 เมื่อนำวัสดุตัวนำ 2 ชนิดต่างกัมนำปลายทั้งเชื่อมต่อกัน พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจร จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของจุดเชื่อมต่อแตกต่างกัน โดยที่ปลายด้านหนึ่งจะคลายความร้อนและอีกปลายด้านหนึ่งดูดความร้อน วงจรการทดลองของเพลเทียร์แสดงดังรูปที่ 2.21 ถ้าเราเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม ซึ่งอาจเป็น ไปได้ที่จะทำให้น้ำเป็นน้ำแข็งหรือเดือดที่จุ่มรอยต่อนั้นเพียงแค่เปลี่ยนทางการไหลของกระแสเท่านั้น ทำให้ได้รับความสนใจอย่างมาก เพราะเชื่อว่ามีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องปรับอากาศในฤดูร้อนและเครื่องกำเนิดความร้อนในฤดูหนาว แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าอุปกรณ์นี้มีประสิทธิภาพต่ำ จึงทำให้อุปกรณ์ของเพลเทียร์ได้รับความสนใจน้อยลง แต่ก็ยังมีการใช้อยู่ในระบบเล็กๆ ที่ใช้พลังงานน้อย เช่นระบบทำความเย็นเฉพาะจุด ปรากฏการณ์เพลเทียร์เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานประจุพาหะที่เคลื่อนที่จากวัสดุ A ไปยังอีกวัสดุ B ซึ่งรอยต่อมีระดับพลังงานต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.22 อิเล็กตรอนซึ่งมีระดับพลังงาน  $E_a$  จะเคลื่อนที่จากวัสดุ A ไปยัง B ทำให้อิเล็กตรอนจำเป็นต้องการพลังงานเพิ่มขึ้น โดยการดูดพลังงานเพื่อเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนให้มีพลังงานเท่ากับระดับพลังงาน  $E_b$  และเมื่ออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากวัสดุ B ไปวัสดุ A ทำให้อิเล็กตรอนอิเล็กตรอนต้องคายพลังงานออกมาก ซึ่งจะทำให้หาความสัมพันธ์ความหนาแน่นของกระแส (J) ที่รอยต่อวัสดุ A และ B ได้ดังนี้

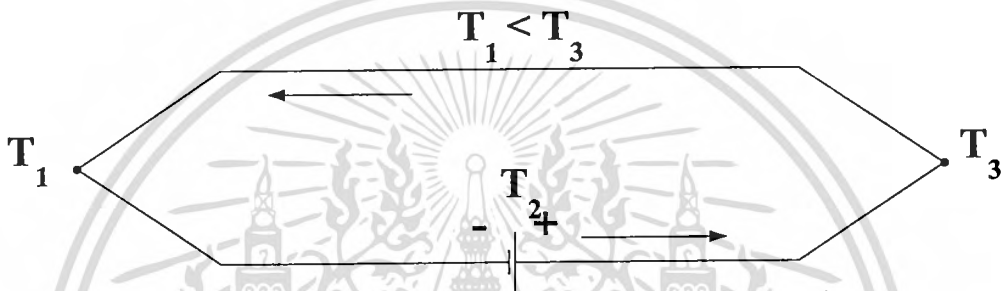
$$J_a - J_b = \Delta J_h = n_a E_a v_a - n_b E_b v_b \tag{2.16}$$

เพราะว่ากระแสไหลผ่านวัสดุ A และ B จะมีค่าเท่ากันและ q คือประจุของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

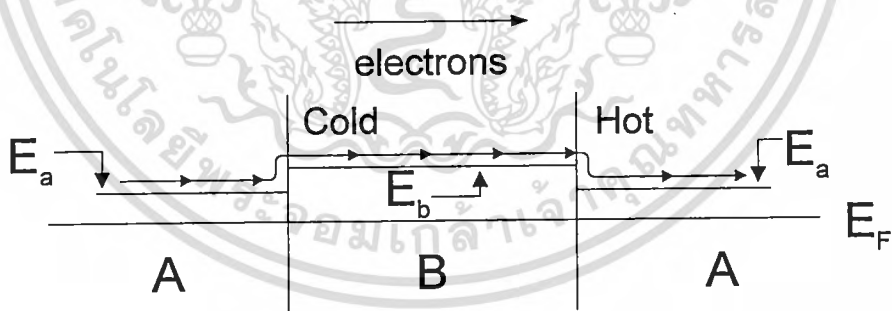


แหล่งจ่ายกระแสจากภายนอก



แหล่งจ่ายกระแสจากภายนอก

รูปที่ 2.21 แสดงวงจรการทดลองของเพลเทียร์



$$\Pi_{AB} = (E_a - E_b)/q$$

$$\Pi_{BA} = (E_b - E_a)/q$$

รูปที่ 2.22 แสดงปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของวัสดุตัวนำ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของเพลเทียร์ (Peltier coefficient)  $\Pi_{ab}$  ระหว่างวัสดุ 2 ชนิด คือ ปริมาณความร้อนที่ดูดหรือคายต่อหนึ่งหน่วยกระแส

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

### 2.2.3 ปรากฎการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

ตามกฎความร้อนของจูล เมื่อกระแสไหลผ่านวัสดุตัวนำจะทำให้เกิดความร้อน อย่างไรก็ตามสำหรับแท่งวัสดุตัวนำที่มีอุณหภูมิตลอดทั้งแท่งไม่เท่ากัน เพราะว่าที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เอง เมื่อให้กระแสไหลผ่านจะทำให้พลังงานของประจุพาหะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งบนแท่งวัสดุตัวนำ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานของประจุพาหะจะสัมพันธ์กับการสั้นของแลตทิซบนแท่งวัสดุ ซึ่งประจุพาหะอาจดูดความร้อนหรือคายความร้อนให้กับแลตทิซ ดังนั้นปรากฏการณ์ทอมสันแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

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

โดยที่  $\Delta J_h$  คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่ดูดหรือคาย  $\gamma$  คือ สัมประสิทธิ์ของทอมสัน (Thomson coefficient)  $\Delta T$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ และ  $J_e$  คือ ความหนาแน่นของกระแส

## 2.3 การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer)[6]

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์(thermodynamic) ลักษณะของพลังงานนั้นจะระบุสถานะของระบบ โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าพลังงานจะสร้างขึ้นมาหรือทำลายไม่ได้ เพียงแต่มีความสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ ดังนั้นความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและรูปอื่นๆ ของพลังงาน แต่ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ การถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีการทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถวัดได้โดยการสังเกตยังพบว่าเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นในระบบแล้วจะมีการไหลของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการไหลของความร้อนจากบริเวณเกิดขึ้นได้เมื่อไรก็ตามที่มีความแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง  $x$  กฎของฟูรีเยร์กำหนดเป็น

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

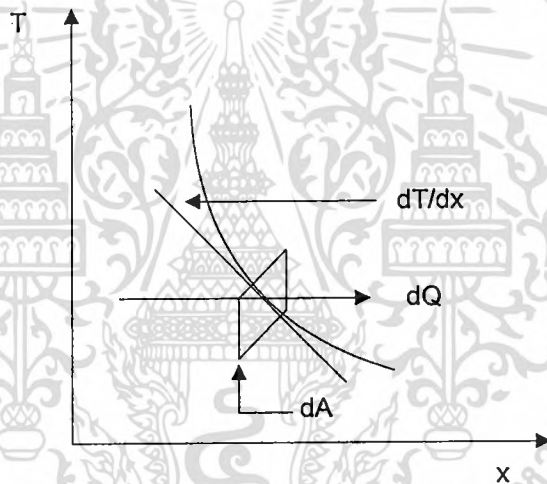
$Q_x$  คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่  $A$  ในทิศทางบวก  $x$

$k$  คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity of material)

$A$  คือ พื้นที่ที่ที่ความร้อนเคลื่อนผ่านและตั้งฉากกับทิศทางของ  $x$

$dT/dx$  คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

จากสมการที่ (2.21) เครื่องหมายลบแสดงว่าแสดงว่าความร้อนที่ไปในทิศทางที่อุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่  $A$

สมการของฟูรีเยร์อาจเขียนอยู่ในรูปของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.23)$$

$$q_y = -k \frac{dT}{dy} \quad (2.24)$$

$$q_z = -k \frac{dT}{dz} \quad (2.25)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วๆ ไป

$$q = -k \nabla T \quad (2.26)$$

$\nabla$  คือ 3-d grad operator

ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาสนามของอุณหภูมิ (temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตสนามของอุณหภูมินั้นคือต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิ (temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาฟลักซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้นได้ จากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law) การหาค่านี้ทำโดยการใช้กฎพลังงาน (energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียล (differential) ซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น ส่วนการพิจารณาตัวกลางเนื้อเดียวกันซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิ  $T(x,y,z)$  กำหนดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) โดยกำหนดปริมาตรควบคุมเล็กๆมาๆ  $dx dy dz$  ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแล้วการนำความร้อนก็จะเกิดขึ้นข้ามแต่ละอันของผิวควบคุม อัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่ตำแหน่ง โคออร์ดิเนต  $x, y, z$  จากกฎทรงพลังงาน อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของปริมาตร เท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน

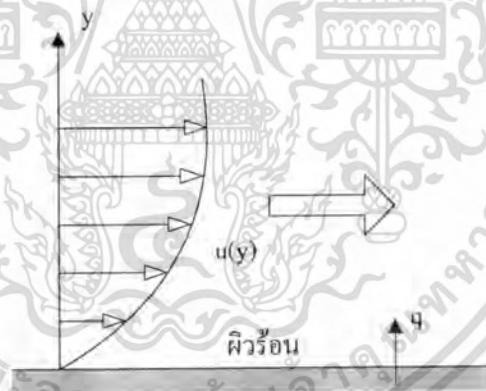
$$\left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q_g}{k} = c_p \rho \left[ \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (2.27)$$

สมการนี้เรียกว่า ฟูรีเยร์ฟิลด์อีควชัน (Fourier field equation) และ  $q_g$  คือ อัตราการเกิดความร้อนภายใน

### 2.3.2 การพาความร้อน (Convection)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมทำให้เกิดแรง (forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบซึ่งมีผลจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free or natural convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่หยุดนิ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามของอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน  $T_w$  และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ  $T_f$  ตามที่แสดงในรูป 2.24 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of Cooling) ถูกกำหนดเป็น



รูปที่ 2.24 แสดงการพาความร้อนจากผิววัสดุ

$$q = h[T_w - T_f] \quad (2.28)$$

โดยที่  $q$  เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็นกว่า ( $W/m^2$ ) ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดของไหลที่ร้อนไปยังผนังที่เย็น จะได้ว่า

$$q = h[T_f - T_w] \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $q$  เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปที่เย็น  
ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  (Convective heat transfer coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ของการไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นพาความร้อนแบบบังคับหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

### 2.3.3 การแผ่รังสี

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้ว่าจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซด้วย โดยไม่คำนึงถึงรูปแบบของสาร การแผ่รังสีออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบของอะตอมหรือ โมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่าโฟตอน ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการตัวกลาง ในความเป็นจริง การถ่ายโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสุญญากาศ

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของสเติเฟน-โบลซ์แมน(Stefan-Boltzmann Law)

$$q = \sigma T_s^4 \quad (2.30)$$

โดยที่  $T_s$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์(K)ของผิว

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเติเฟน-โบลซ์แมน  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$

โดยที่ผิวนั้นจะเรียกว่า ตัวแผ่รังสีอุดมคติหรือวัตถุดำ (blackbody) ฟลักซ์ความร้อนซึ่งถูกส่งออกโดยผิวจริงจะน้อยกว่าที่ส่งออกจากตัวแผ่รังสีอุดมคติ(ideal radiator) ได้เป็น

$$q = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.31)$$

โดยที่  $\epsilon$  เป็นคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิว เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity)

### บทที่ 3

## การวัดและวิเคราะห์โครงสร้างของเทอร์โมโพลีและฮีตเตอร์

### 3.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นสารเจือและความลึกสารเจือบนฐานรองซิลิคอน

เทคนิคการวัดการกระจายความต้านทาน (Spreading Resistance : SR) เพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะ (specific electrical resistance :  $\rho$ ) และการกระจายของ  $\rho$  ในแนวระดับหรือแนวตั้งในสารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับซิลิคอน วิธีของ SR-210 จะให้ผลการวัดค่า  $\rho$  ที่ดีกว่า วิธีการวัดการกระจายความต้านทานทางแนวตั้งจากวัดด้วยวิธีอื่นๆ เช่น วิธี C-V, 4 เข็ม (4 tips) หรือวิธีการจากฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall effect) โดยการนำส่วนของชิ้นงานมาทำการลอกชั้นบางๆ ออกทีละชั้น (ด้วยวิธีการกัดหรือกัด) สำหรับความสามารถของ SR-210 นั้น บอกผลของการ  $\rho$  ในแนวระดับและแนวตั้งของสารกึ่งตัวนำได้ ดังเช่น ซิลิคอน หรือเยอรมันเนียม สามารถหาค่าความหนาแน่นของประจุพาหะจากค่าของ  $\rho$  ได้และใช้ในการวัดค่าของ  $\rho$  ที่ส่วนแกนและแนวรัศมีของส่วนประกอบที่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น การหาค่าของ  $\rho$  แนวตั้งเป็นต้น ชุดเครื่องมือวัดนี้จะใช้ในการวัดนี้ จะใช้ได้ในส่วนของการผลิต และการวิจัยเพื่อการพัฒนา ตรวจสอบกระบวนการสร้าง และประสิทธิภาพทางอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ SR-210 ยังสามารถตรวจสอบการแพร่สารเจือในซิลิคอน การ implantation และการสร้างชั้น epitaxy

หลักการการทำงานของ SR-210 ใช้เข็มวัดที่มีความนำไฟฟ้าสูง (เข็มเดี่ยว) รัศมีของเข็ม  $a$  ขนาดเล็กๆ ( $a = 1-10 \mu\text{m}$ ) กดลงไปบนผิวของชิ้นงาน ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ไหลผ่านเข็มวัดเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ ทำให้ความต้านทาน  $R_{sr}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสที่วัดและสารกึ่งตัวนำเป็นสัดส่วนตรงกับค่า  $\rho$  สามารถหาได้สมการของ Holm

$$R_{sr} = \frac{\rho}{4a} \quad (3.1)$$

สำหรับการหาค่า  $\rho$  โดยใช้เข็มเดี่ยว (single probe) จะใช้กับงานบางประเภทเท่านั้น เพราะต้องการความต้านทานด้านหลังของชิ้นงานต่ำ (low-resistance back-contact) แต่กระนั้นก็ยังีผลกับผลรวมของการกระจายความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ -profile) ส่วนในกรณีการวัดแบบ 2 หัวเข็มในรูปที่ 3.1 ด้วยการใส่ SR-210 เป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของวิธีเข็มเดี่ยว สำหรับการวัดแบบ 2 หัวเข็มคือ

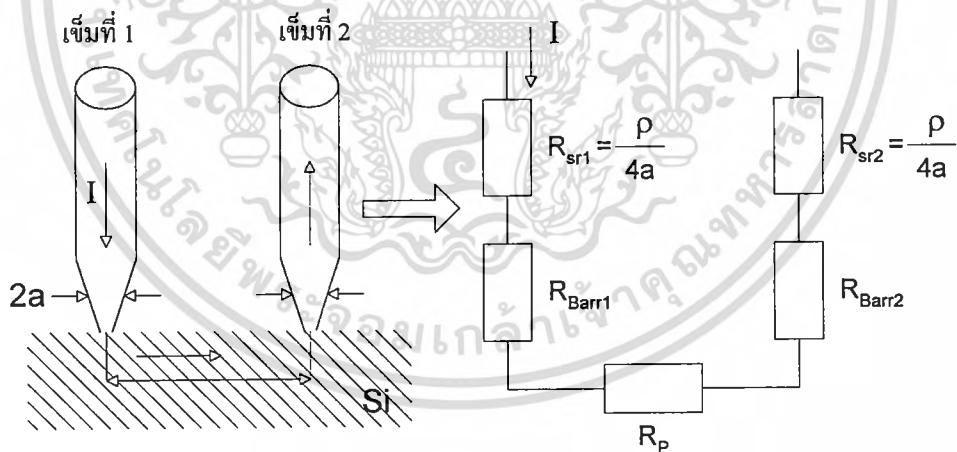
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{sr} = \frac{\rho}{2a} \quad (3.2)$$

พื้นฐานของการหาค่า  $\rho$  สำหรับการกระจายทางแนวระดับและแนวตั้ง ด้วยวิธี SR คือการวัดผ่านค่าความต้านทานที่แน่นอน โดยการจำลองแบบที่ถูกตัดต่อทั้งหมดของจุดสัมผัส  $a$  และตัดความสัมพันธ์ของหัวเข็มกับผิวออกไป โดยวิธีการของ SR-210 ในการหาค่า  $\rho$  นั้นไม่สมบูรณ์ ด้วยพื้นฐานของผลรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) ได้มีการปรับปรุงด้วยผลของค่าความต้านทาน  $R_{Barr}$  ซึ่งจะมีผลกับค่า  $\rho$  รวมเข้ากับค่าความต้านทาน  $R_{sr}$  แสดงดังรูปที่ 3.1 เป็นความสัมพันธ์ของส่วนต่างๆ ด้วยวงจรสมมูล โดยที่  $R_{sr1} = R_{sr2}$ ,  $R_{Barr1} = R_{Barr2}$  และให้ความต้านทานในเนื้อสาร  $R_p \ll R_{sr}$  และ  $R_p \ll R_{Barr}$  ซึ่งเป็นดังสมการ

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

เมื่อ  $R_m$  คือ ค่าความต้านทานที่ต้องการวัด และ  $B(\rho)$  คือ ค่าปรับแต่ง (calibration) ขึ้นกับค่าของ  $\rho$  ดังนั้นวิธีการวัดของ SR-210 ในการหาค่า  $\rho$  จะต้องมีปรับแต่งจากตัวอย่างที่รู้ค่า



รูปที่ 3.1 แสดงหลักการวัดของ SR-210

โดยที่  $a$  = รัศมีของหัวเข็ม ส่วนที่สัมผัสของซิลิคอน

$R_{sr}$  = Spreading resistance

$R_{Barr}$  = Barrier resistance

$R_p$  = Bulk resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



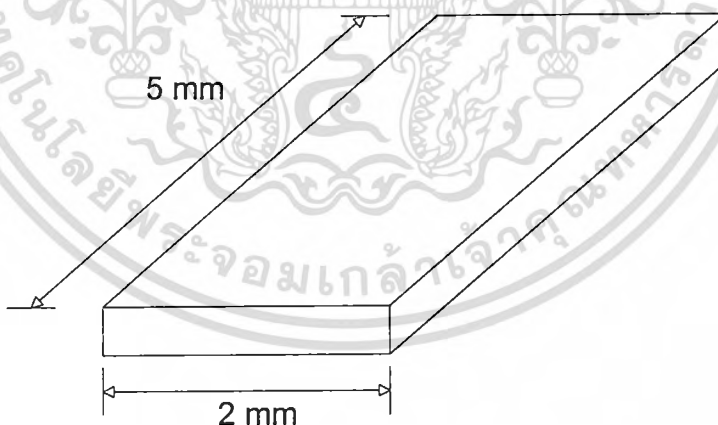
สวนของฐาน (mechanical stage : ST) สามารถเคลื่อนที่ในทิศทาง x และ y แต่ในขณะที่เข็มกำลังวัดสามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง x ด้วยการ ใช้ stepping motor (SM) อุปกรณ์สำหรับการเคลื่อนย้าย (TV) แทนวางชิ้นงาน และชิ้นงาน (S) ในแนวตั้งจะยึดติดกับฐาน ST สำหรับการกดเข็มวัดลงบนชิ้นงานสามารถสังเกต และระดับได้จากกล้องจุลทรรศน์ (microscope : M)

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

### 3.1.1 การเตรียมชิ้นงาน

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

1. เตรียมชิ้นงานขนาดเล็ก โดยการตัดแผ่นเวเฟอร์ ให้มีขนาดตามต้องการดังรูปที่ 3.3

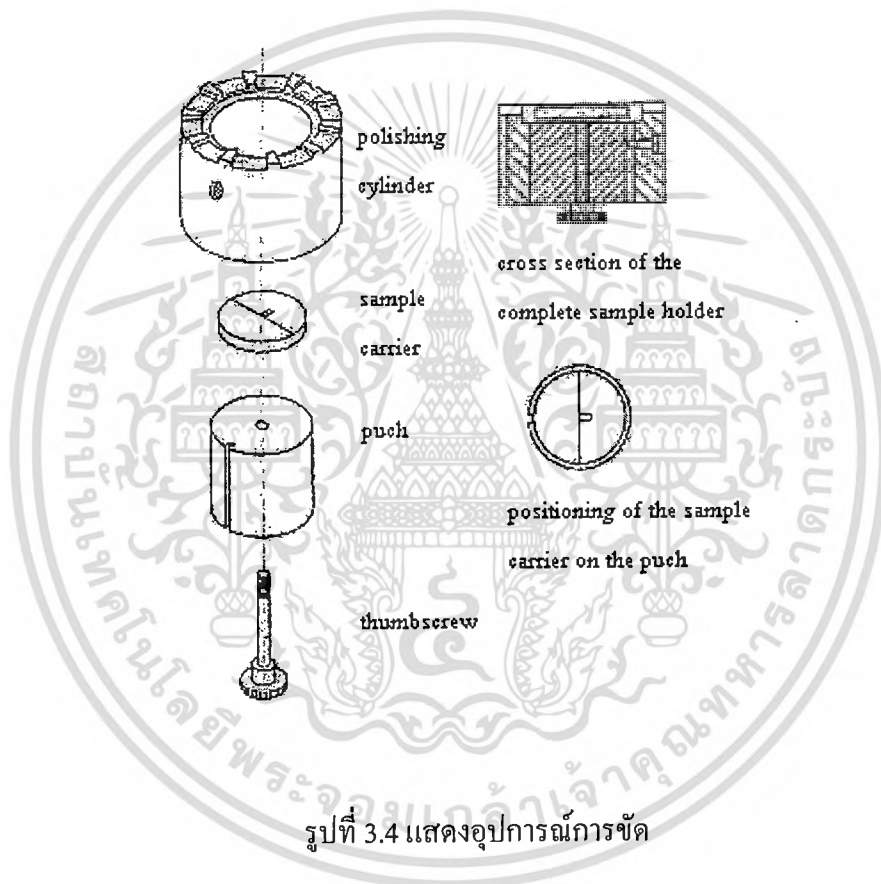


รูปที่ 3.3 แสดงขนาดชิ้นงานของซิลิคอนที่ถูกตัดแบ่ง

2. นำชิ้นงานมาติดไว้บนแท่นยึดชิ้นงาน (sample carrier) โดยการให้ความความร้อนกับแท่นยึดชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 50 – 80 °C แล้วใช้ขี้ผึ้ง (wax) ทาบางๆ บนแท่นยึดชิ้นงาน และสามารถ

ยึดชิ้นงานให้ติดอยู่บนแท่นยึดชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานติดอยู่บนแท่นยึดชิ้นงาน ในขณะที่ซี่ผึ้งกำลังละลายจะต้องปรับแต่งตำแหน่งของชิ้นงานให้ตั้งฉากกับกึ่งกลางของแท่นชิ้นงาน แล้วทิ้งไว้เย็น

3. จึงนำไปติดตั้งกับกระบอกลูกปืน (Punch) ซึ่งยึดติดด้วยตะปูควงสำหรับมือบิด (thumb screw) แสดงดังรูปที่ 3.4 ตำแหน่งในการวางชิ้นงาน และแท่นยึดชิ้นงานกระบอกลูกปืน จะต้องปรับให้ตำแหน่งของชิ้นงานอยู่ตรงกันข้ามกับร่อง (groove) กระบอกลูกปืน และด้านที่จะทำการขัดของชิ้นงาน (grinding) จะต้องตั้งฉากกับเส้นกึ่งกลางบนแท่นยึดชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ได้พื้นผิวมุมลาดที่มีคุณภาพดีที่สุด จากนั้นก็นำกระบอกลูกปืน ใส่เข้าไปในกระบอกลูกขัด (Polish cylinder) ซึ่งสกรู (screw) ของเครื่องขัดจะช่วยป้องกันการบิดตัวของกระบอกลูกปืน



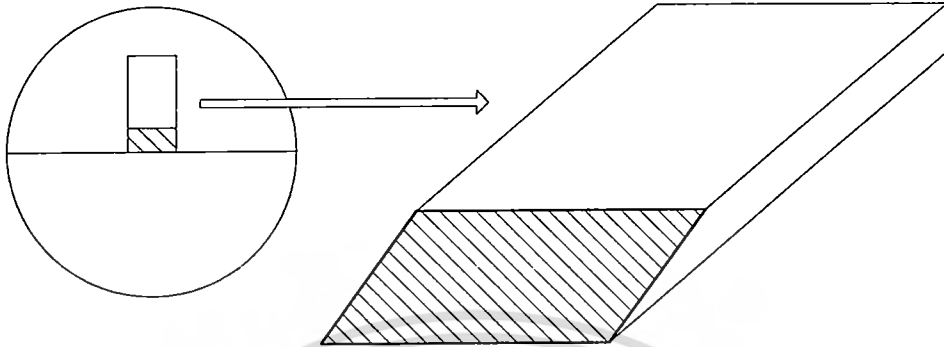
รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์การขัด

4. เป็นการเตรียมเครื่องขัดมัน (polishing machine) ซึ่งแผ่นแก้วละเอียด (frosted glass plate) ติดตั้งอยู่บนแผ่นรองรับที่หมุนได้ วัสดุที่ช่วยในการขัดประกอบด้วยกากเพชรขนาด 1 mm หรือ 0.25 mm ซึ่งกระจายอยู่บนแผ่นแก้วอย่างสม่ำเสมอ และใช้ diaplacol หยดลงบนแผ่นแก้วเล็กน้อย เพื่อเป็นตัวประสานให้กากเพชรกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

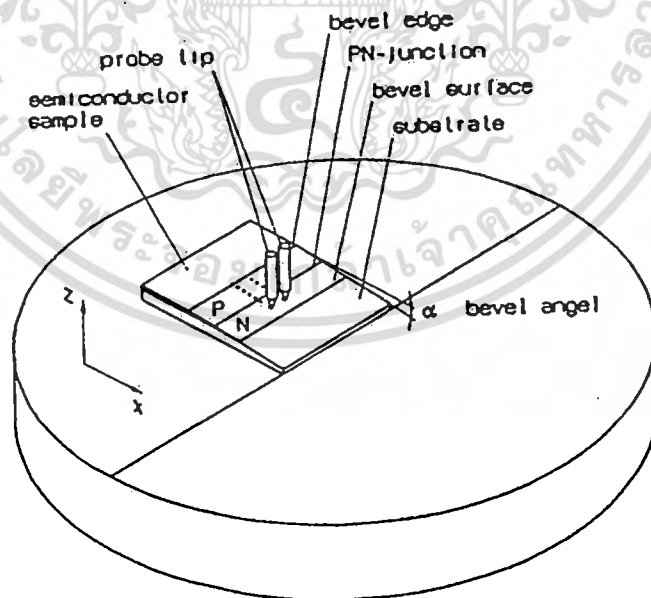
และเป่าด้วยก๊าซ แล้วนำไปตรวจสอบคุณภาพของพื้นผิวที่ได้จากการขัด ซึ่งรูปที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการขัด

### 3.1.2 การวัดด้วย SR-210

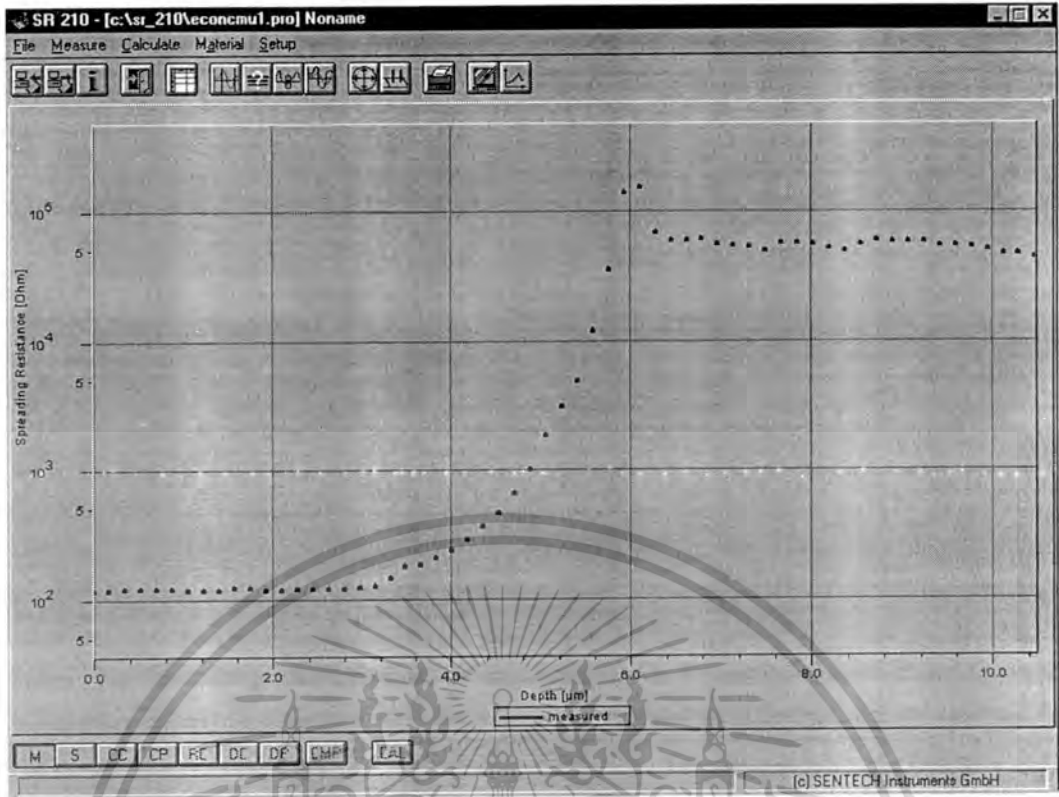
ใช้โปรแกรม WinResi ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อใช้ในการควบคุมชุดเครื่องมือวัด SR-210 โดยแสดงการวัดดังรูปที่ 3.6 ซึ่งโปรแกรมการจะบันทึกข้อมูลการวัดทั้งหมดเป็นความต้านทานแสดงรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นหน้าต่างหลักของโปรแกรม WinResi



$$\text{depth increment } \Delta Z = \Delta X \cdot \tan \alpha$$

รูปที่ 3.6 แสดงการวัดของ SR-210

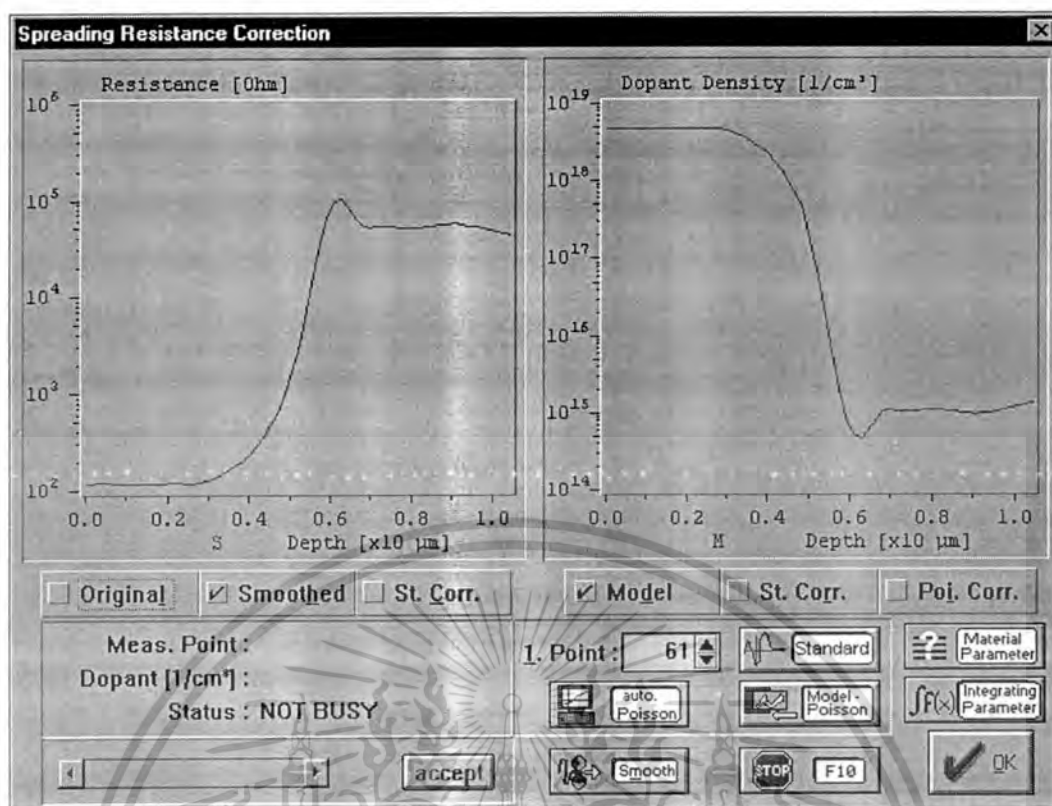
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงผลการวัดค่าสเปรดิ้งรีซิสแตนซ์ของ SR-210

สำหรับวิธีการวัดค่าสเปรดิ้งรีซิสแตนซ์ด้วย SR-210 โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดมาวางบนแท่น (ST) แล้วเลื่อนแท่นให้ชิ้นงานไปอยู่ใต้โพรบโดยใช้โปรแกรม “sample Movement” ในการควบคุมการเคลื่อนของชิ้นงาน หลังจากนั้นปรับหัวเข็มทั้งสองลงให้อยู่ระยะการวัดและก็ปรับระยะความสูงของแท่นให้เหมาะสมด้วยมือโดยการทำอย่างระมัดระวัง แล้วใช้โปรแกรม “Optimal Sample Adjustment” เป็นตัวตรวจสอบระยะห่างระหว่างชิ้นงานและหัวเข็ม โดยการปรับค่าเบี่ยงให้อยู่ในช่วง  $\pm 5$  ไมครอน หลังจากนั้นทำการวัดมุมที่เกิดจากการขีด (bevel angle) โดยใช้โปรแกรม “Bevel Angle Measurement” ซึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนจากไมโครสโคปทางด้านขวาออกแล้วสวมเทเลสโคปเข้าไปแทนเพื่อวัดมุมของชิ้นงาน แล้วทำการวัดค่าสเปรดิ้งรีซิสแตนซ์ของชิ้นงานที่แต่ละความลึกของชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรม “Lateral Measurement” จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเปรดิ้งรีซิสแตนซ์และค่าความลึกสารเจือจากผิวของชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้จากวัดค่าสเปรดิ้งรีซิสแตนซ์จะถูกนำไปประมวลผลเป็นค่าความเข้มข้นสารเจือต่างๆ ที่ความลึกจากผิวหน้าชิ้นงานแสดงผลดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงผลการวิเคราะห์การวัดของ SR-210

### 3.2 ระบบ GPIB

ในระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาเครื่องมือวัดที่ควบคุมด้วยระบบดิจิทัล ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นจำนวนมาก เครื่องมือวัดเหล่านี้มีความสามารถในการรับและส่งข้อมูล ปัญหาที่เกิดขึ้นถ้าเครื่องมือวัดเหล่านี้ต้องการส่ง หรือรับข้อมูลให้กับอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่น เช่น พริ้นเตอร์ หรืออุปกรณ์แสดงผลร่วมกับอุปกรณ์เครื่องวัดอื่นๆ หรือใช้ฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ร่วมกัน เราจะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน เราจะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกันอย่างไร ถ้าเป็นอุปกรณ์เครื่องมือวัดอาจจะมีการต่อแบบวิธีพิเศษ แต่ถ้าเป็นอุปกรณ์ต่างยี่ห้อกันดูเหมือนว่าจะไม่มีทางออก จึงได้มีการพัฒนามาตรฐานการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดเหล่านี้ขึ้นมา โดยทางบริษัท Helett-Packard ได้พัฒนา HPIB (Helett-Packard Interface Bus) ขึ้นมา เพื่อเป็นมาตรฐานในการเชื่อมต่อและควบคุมอุปกรณ์เครื่องวัดของ Helett-Packard เอง เป็นเหตุให้ผู้ผลิตเครื่องมือวัดรายอื่นทำตามมาตรฐานนี้ ซึ่งต่อมาสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แห่งสหรัฐอเมริกา (Institute of Electrical and Electronic Engineers : IEEE) ซึ่งยอมรับเข้าเป็นมาตรฐาน และวัดเข้าในลำดับที่ IEEE488 แต่เนื่องจากในคุณลักษณะสมบัติของ IEEE488 นี้ มีความหมายถึงบัสอินเตอร์เฟสที่ใช้งานได้ทั่วไปจึงมีผู้นิยมเรียกใช้คำว่า GPIB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GPIO มีชื่อเต็มว่า General Purpose Interface Bus เป็นสัญญาณมาตรฐานที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ได้หลายเครื่อง โดยมีข้อพิเศษสำหรับผู้ใช้ก็คือ ในกรณีที่ต้องการขยายอุปกรณ์เพิ่มเติมเข้ามาในระบบผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มเติมส่วนวงจรหรืออุปกรณ์อื่นๆ เพียงแต่ผู้ใช้เพิ่มสายเคเบิลเชื่อมต่อเข้ามาขนานกับสายเคเบิลหรือขั้วเดิมเท่านั้น โดยการแก้ไขเฉพาะส่วนของซอฟต์แวร์เท่านั้น ในระบบที่ไม่ใหญ่โตนัก GPIO นั้นสามารถต่อเข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องมืออื่นๆ ได้สูงสุด 15 เครื่อง โดยการใช้สายสัญญาณเพียงเส้นเดียวเท่านั้นต่อขนานกันไปเรื่อยๆ ดังนั้นบัสสัญญาณของ GPIO จึงเป็นบัสขนาน โดยมีสัญญาณควบคุมร่วมด้วยเพื่อควบคุมทิศทางและเลือกตัวที่ต้องการติดต่อ

### โครงสร้างของ GPIO

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

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

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

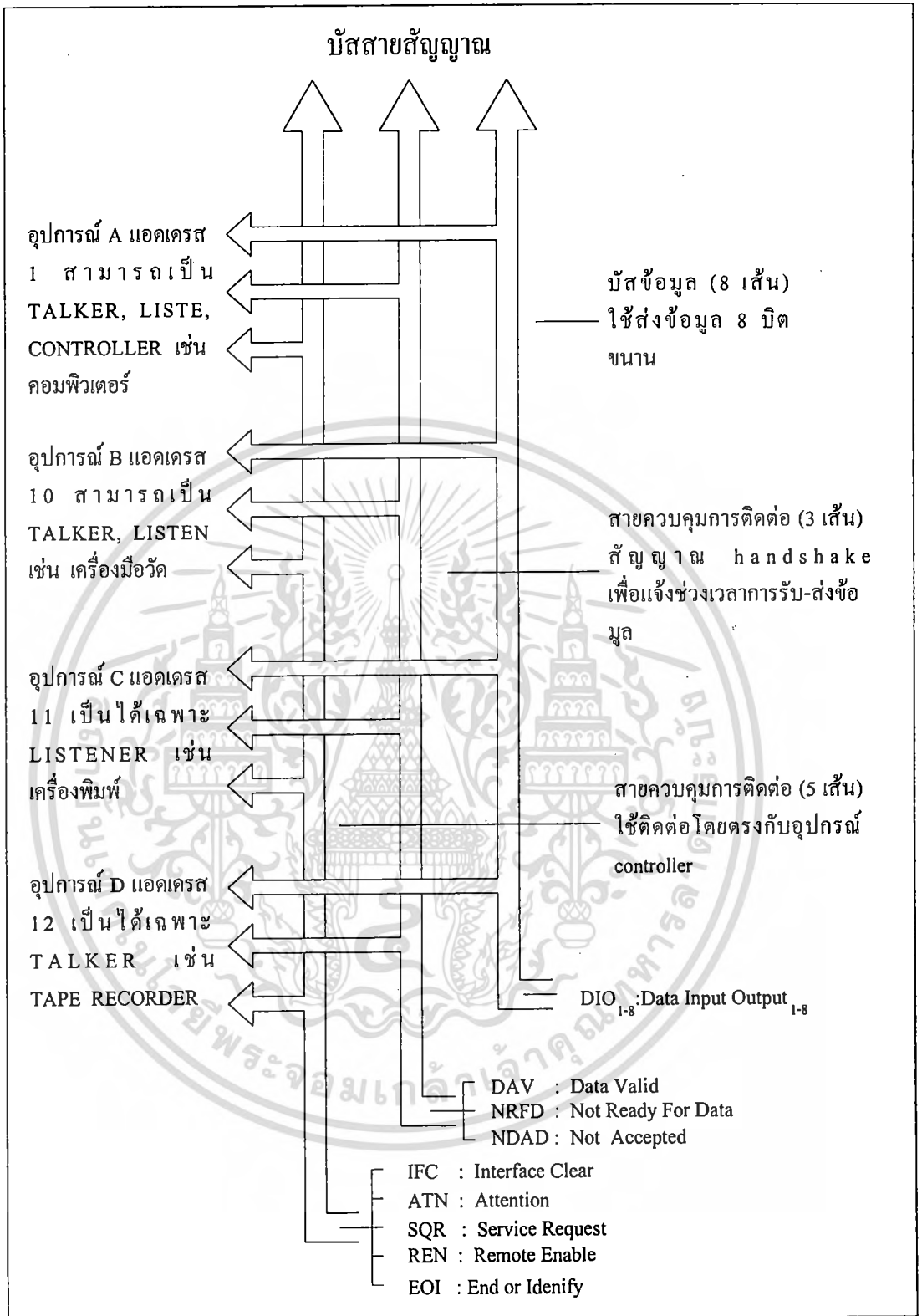
ผู้ควบคุม (controller) เป็นควบคุมสัญญาณต่างๆ บนบัส โดยรับความต้องการของอุปกรณ์ที่จะส่งข้อมูล หรือกำหนดผู้ส่ง (talker) ให้ทำการส่งหรือกำหนดผู้รับ (listener) ทำการรับข้อมูล

โครงสร้างของ GPIO

### คุณลักษณะทางไฟฟ้าของ GPIO

คุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของ GPIO นั้นมีดังนี้คือ

1. จำนวนอุปกรณ์ (talker, listener, controller) ที่ต่อสายสัญญาณ (bus) 1 เส้น จะต้องไม่เกิน 15 เครื่อง
2. สายเคเบิลที่ใช้ต่อระหว่างอุปกรณ์แต่ละตัวต้องยาวไม่เกิน 4 เมตร และความยาวรวมของสายเคเบิลทั้งหมดต้องไม่เกิน 20 เมตร
3. ความเร็วในการส่งข้อมูลต้องไม่สูงเกิน 1 Mb/sec

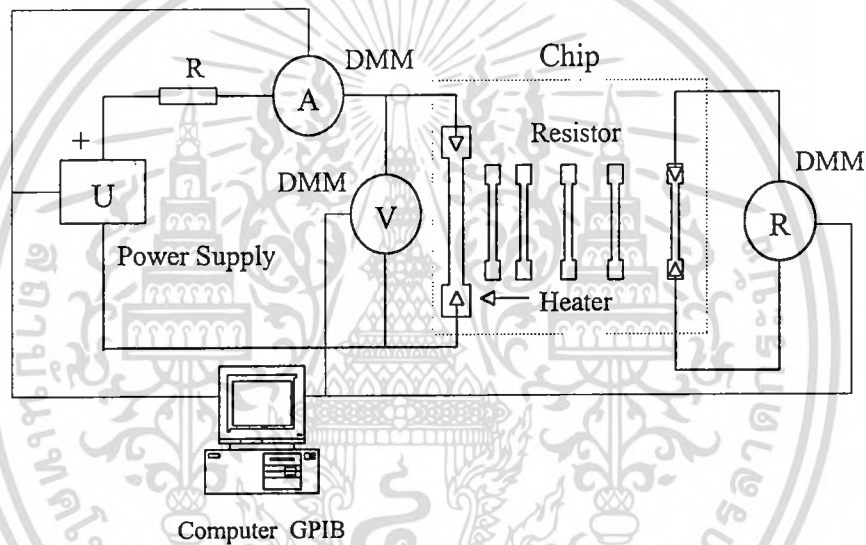


รูปที่ 3.9 แสดงแผนผังอุปกรณ์ GPIB และการต่อสัญญาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การวัดคุณสมบัติของฮีตเตอร์และเทอร์โมไฟต์

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

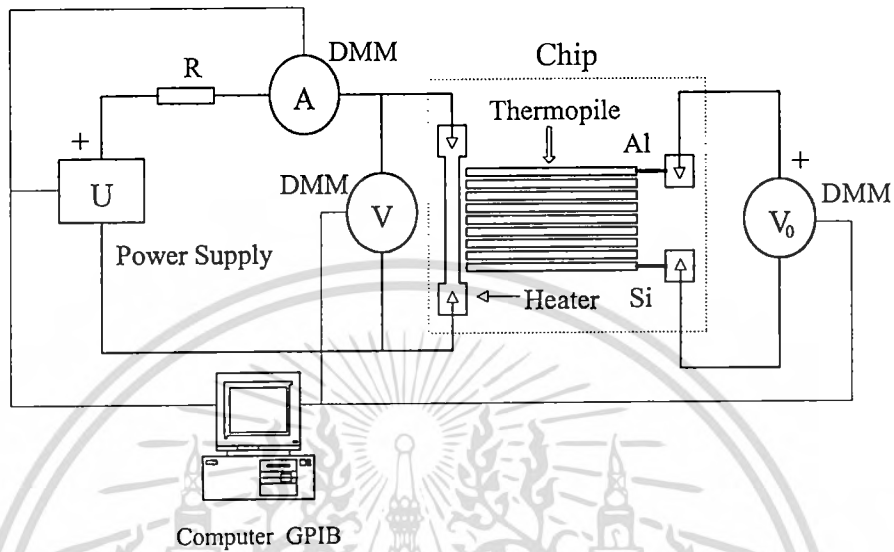


รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์และการวัดอุณหภูมิ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์และวิธีการวัดค่าเอาต์พุตเทอร์โมโพลีต์

### 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) ซึ่งคำสั่งแต่ละบล็อกจะทำหน้าที่ต่างกัน โดยที่แต่ละบล็อกคำสั่งจะมีอินพุต (input) และเอาต์พุต (output) เป็นตัวเชื่อมต่อกันเพื่อกำหนดขั้นตอนการทำงานของตัวโปรแกรม และรับส่งข้อมูลกันระหว่างที่ตัวโปรแกรมทำงาน ซึ่งบล็อกคำสั่งและส่วนต่างๆ ของบล็อกแสดงดังรูปที่ 3.12

-Data input pins เป็นตัวที่รับข้อมูลในระหว่างการวัด เช่นค่ากระแส (I) หรือ แรงดัน (V) ซึ่งในการรับข้อมูลมาเก็บไว้ นี้ จะนำข้อมูลมาเก็บไว้ นี้ จะนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงค่าเป็นกราฟ หรือ บันทึก (save) ค่าไว้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของโปรแกรมหรือผู้ใช้งาน

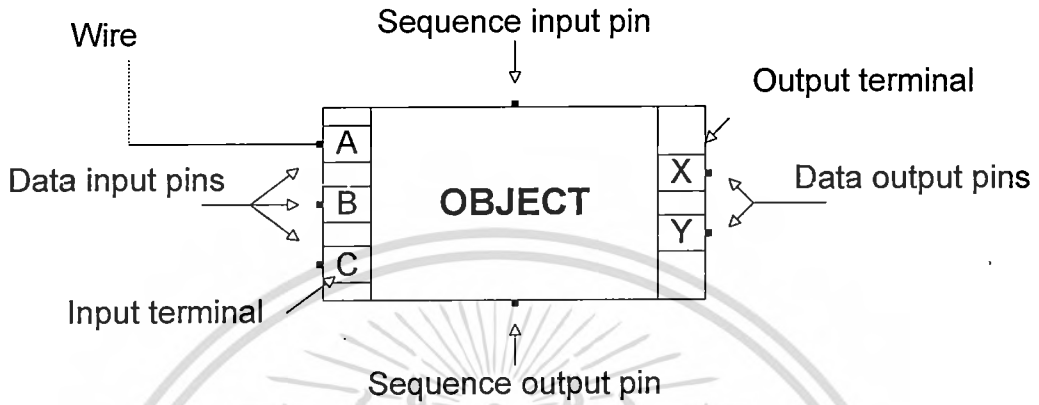
-Data output pins เป็นตัวที่คอยส่งข้อมูลที่รับเข้ามาเก็บไว้ออกไป เช่น นำไปพล็อตกราฟ

นำค่าไปประมวลผล หรือนำไปแสดงเป็นตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-Sequence input pins เป็นตัวเชื่อมระหว่างบล็อกคำสั่ง เพื่อควบคุมให้แต่ละบล็อกทำหน้าที่ตามลำดับขั้นตอน หรือทำหน้าที่ให้สัมพันธ์กับบล็อกอื่นๆ

-wire เป็นเส้นที่ลากเชื่อมระหว่างบล็อกคำสั่ง เพื่อควบคุมให้แต่ละบล็อกทำงานสัมพันธ์กันเป็นลำดับขั้นตอน



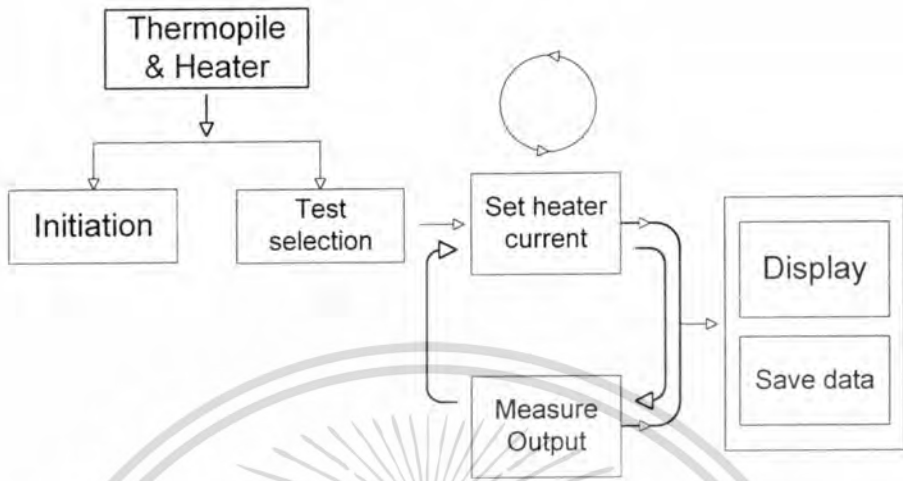
รูปที่ 3.12 แสดงส่วนประกอบของบล็อกคำสั่ง

ภายในโปรแกรม HP VEE Evaluation จะเป็นการกำหนดตำแหน่ง (address) ของเครื่องมือวัด เมื่อต้องการใช้เครื่องมือวัดชนิดใดควรระบุเครื่องมือวัดที่ต้องการใช้ ซึ่งจะมีบล็อกของเครื่องมือวัดภายใน โปรแกรมซึ่งติดตั้งไว้แล้ว โดยภายในบล็อกเครื่องมือวัดนั้นจะสามารถควบคุมให้เครื่องมือวัดทำการวัดได้นั้นต้องมีการกำหนดค่าต่างๆ ให้ เช่น เครื่องมือวัดจ่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) จะต้องควบคุมให้จ่ายแรงดันแรงหรือลบ หรืออุปกรณ์มัลติมิเตอร์นั้นจะต้องมีการควบคุมด้วยว่าจะใช้วัดในลักษณะใด

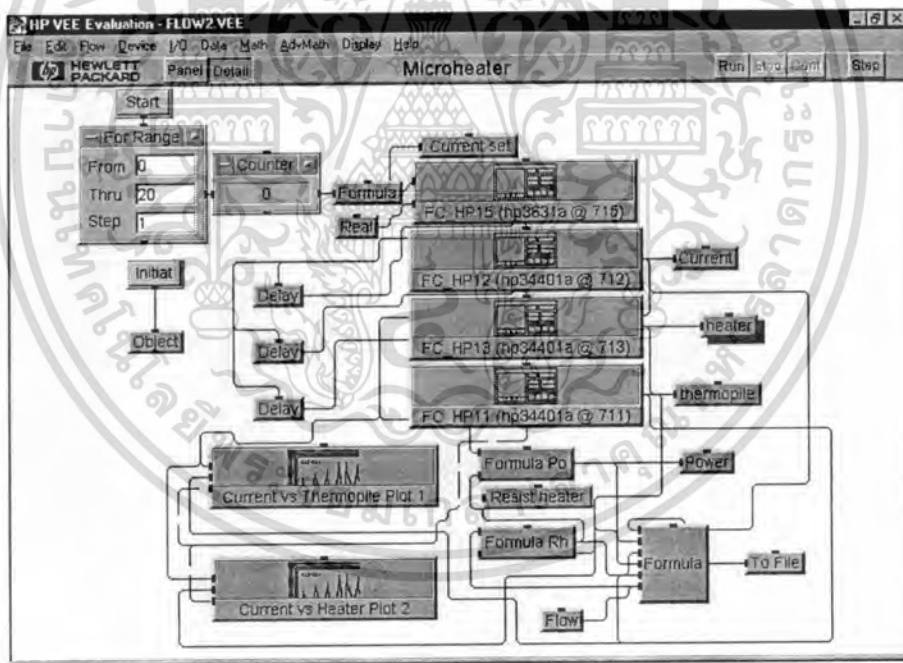
การทำงานของโปรแกรมการวัดคุณสมบัติของฮีตเตอร์และเทอร์โมไฟล์

การทำงานของโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวัดคุณสมบัติของเทอร์โมไฟล์ จะใช้โปรแกรม HP VEE Evaluation เป็นซอฟต์แวร์ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งมีหลักการทำงานดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 แสดงการเขียนโปรแกรมโดยการนำบล็อกมาต่อกัน โดยการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มจากการกำหนดโหมดความพร้อมเบื้องต้นของเครื่องมือวัดซึ่งประกอบด้วย ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 3 ตัว และแหล่งจ่ายกำลัง ที่บล็อกของ Initiation โดยที่ FC\_HP11(hp34401@711) อยู่ในโหมดของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า FC\_HP12(hp34401@712) อยู่ในโหมดของการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฮีตเตอร์ FC\_HP13(hp34401@713) อยู่ในโหมดของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฮีตเตอร์ และ FC\_HP15(hp3631a@715) อยู่ในโหมดของแหล่งจ่ายกระแสที่ ซึ่งจะทำให้โปรแกรมพร้อมที่จะทำงานได้ และก็ต้องกำหนดรูปแบบการวัดมาที่บล็อก Test selection ซึ่งจะเป็นการกำหนดเงื่อนไข เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเริ่มจ่ายกระแสคงที่เป็นชุดตัวเลขตามต้องการแล้วตามต้องการก็สามารถวัดค่าเอาต์พุตเทอร์โมโพล์ได้ ในระหว่างการวัดจะมีการแสดงผลข้อมูลและบันทึกข้อมูลตลอดเวลา



รูปที่ 3.13 แสดงแผนผังการทำงาน โปรแกรมการวัด



รูปที่ 3.14 แสดงแผน โปรแกรมการวัดคุณสมบัติของเทอร์โมโพล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบและกระบวนการสร้าง

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

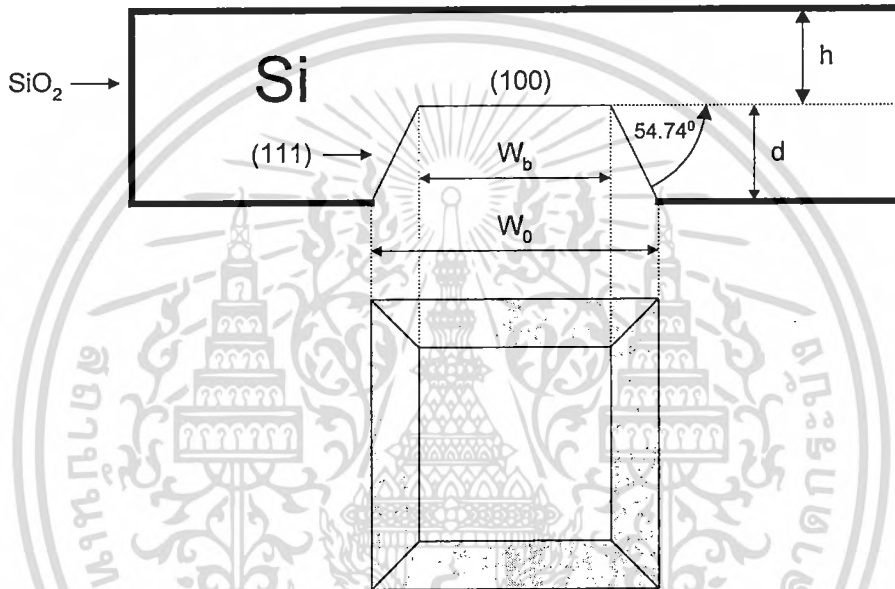
เมื่อได้ลวดลายต้นแบบแล้วจึงนำไปผลิตเป็นกระจกมาสก์ (photographic masks) โดยการถ่ายย่อส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งกระบวนการสร้างจะเริ่มต้นจากการเลือกชนิดความหนา และพิกัดความต้านทานของฟิล์มฐานรองซิลิคอน หลังจากนั้นจะนำแผ่นฟิล์มเข้าไปในกระบวนการสร้างที่เป็นลำดับขั้นตอนที่แน่นอนเช่น การทำความสะอาดแผ่นฟิล์มเริ่มแรก กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการสปีเตอร์ริง กระบวนการกัดฐานรองเพื่อสร้างไดอะแฟรม กระบวนการแพร์สารเจือ กระบวนการเมทัลไลเซชัน เป็นต้น ซึ่งเมื่อจบขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้ แล้วจึงนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไมโครฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์

ดังนั้นจากที่กล่าวมาสามารถลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเทอร์โมไพล์

1. การออกแบบและผลิตกระจกต้นแบบ
2. กระบวนการสร้างบนแผ่นฟิล์ม
3. กระบวนการแอสแซมบลีและการเก็บบรรจุ

4.1 การออกแบบไดอะแฟรม[7,8]

ไดอะแฟรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของซิลิคอนซึ่งเกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ในสารละลายซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกให้เป็นไดอะแฟรมบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) โดยต้นแบบของไดอะแฟรมได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) หลุมที่เกิดจากการกัดจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยจะต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมขนานแสดงรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดการกัดซิลิคอนโดยสารละลาย

แสดงรายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) หรือตั้งฉากกับทิศทาง [110] ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

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

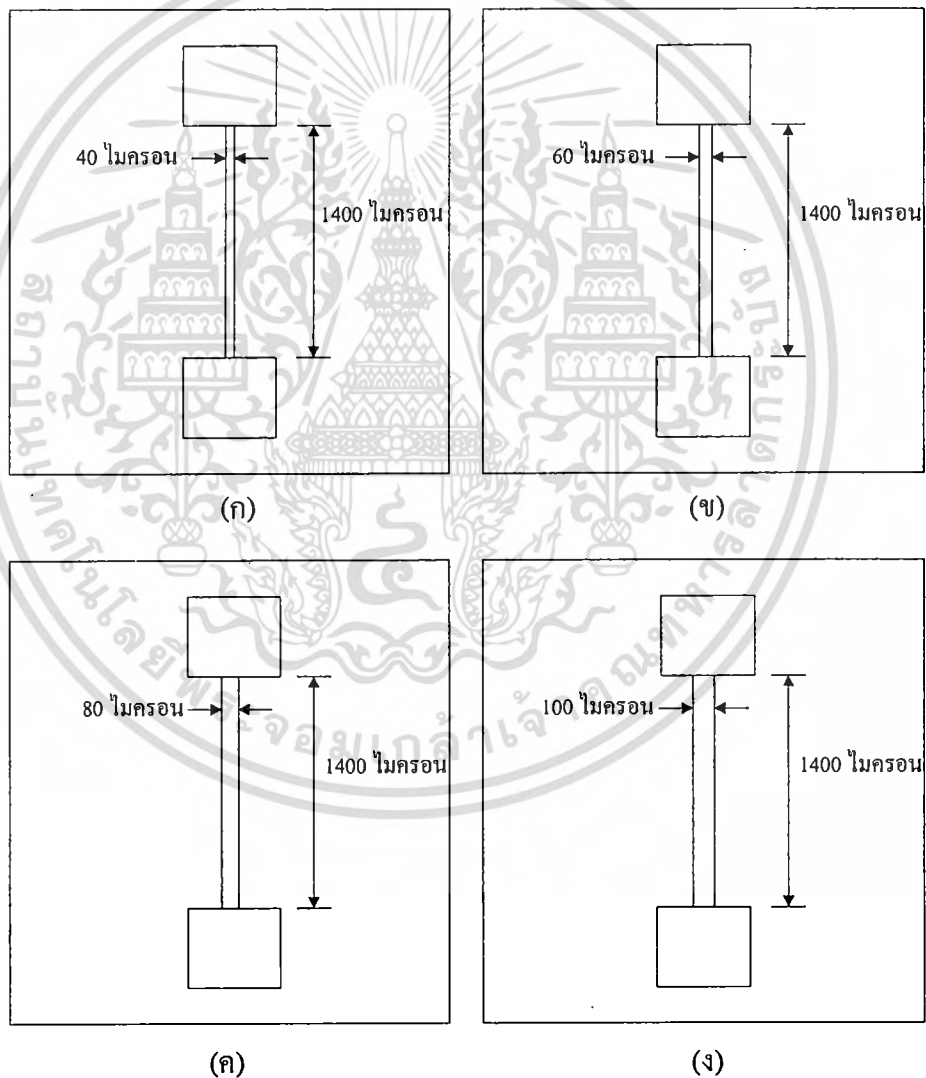
- โดยที่  $W_0$  คือ ขนาดของต้นแบบ
- $W_b$  คือ ขนาดของไดอะแฟรมหลังการกัด
- $d$  คือ ความลึกของไดอะแฟรม
- $h$  คือ ความหนาของไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดค่าความหนาของโคอะเฟรมให้มีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร โดยต้องการให้ขนาดของช่องโคอะเฟรมหลังการกัดมีขนาด 1400x1800 ไมโครเมตร เมื่อใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนหนา 450 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขนาดโคอะเฟรมต้นแบบ ( $W_0$ ) จากสมการ 4.1 ซึ่งได้เป็น 1966 และ 2366 ไมโครเมตร ตามดับ

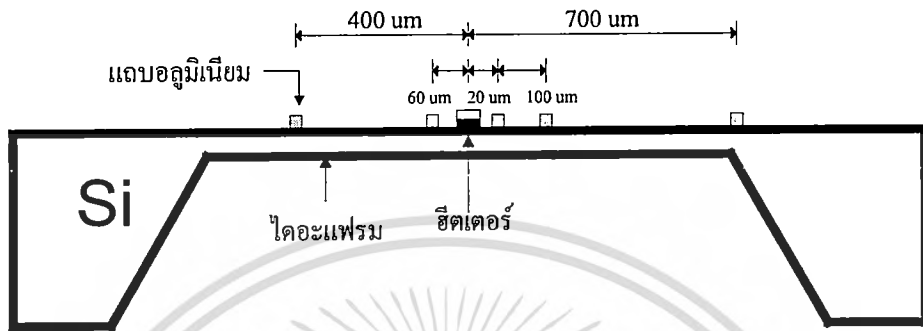
#### 4.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์จากไทเทเนียมและอลูมิเนียม 4 ชุดให้มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40 60 80 และ 100 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.2 และโดยมีขนาดความยาวเท่ากันคือ 1400 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.2 แสดงการออกแบบไมโครฮีตเตอร์

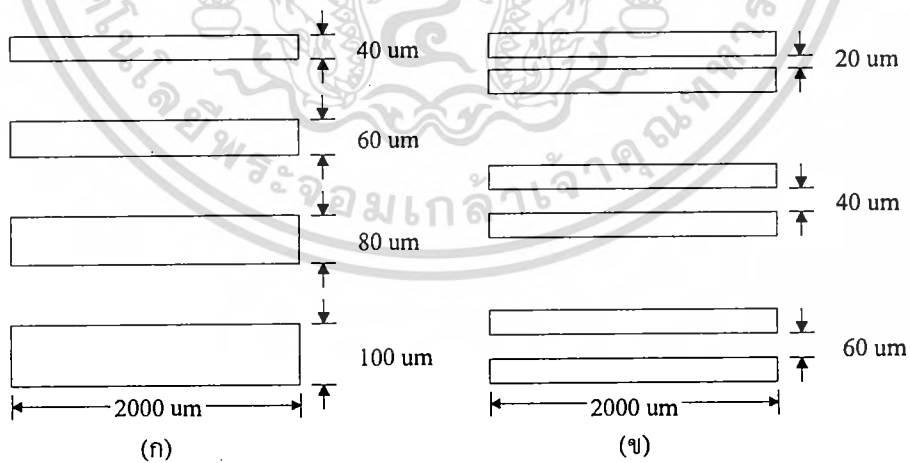
และยังมีแถบความต้านทานที่สร้างจากฟิล์มของอลูมิเนียมมีขนาดความกว้าง 20 ไมครอน และยาว 1200 ไมครอน อยู่ห่างจากไมโครฮีตเตอร์ 20 60 100 400 และ 700 ไมครอน ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับความร้อน โดยโครงสร้างทั้งหมดจะอยู่บนไดอะแฟรมของซิลิกอนมีขนาด 1400x1800 ไมครอน มีขนาดความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ 25 40 และ 60 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 4.3



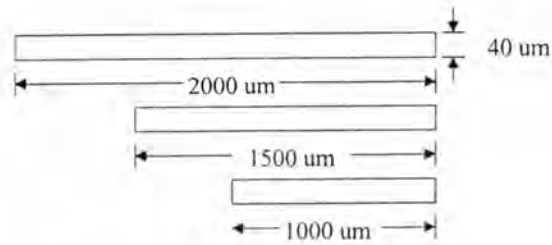
รูปที่ 4.3 แสดง โครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์

#### 4.3 การออกแบบเทอร์โมไฟล์

ในการออกแบบเทอร์โมไฟล์จะทำการกำหนดขนาดความกว้างยาวของแถบแพร่อารเจือ, ระยะห่างระหว่างแถบแพร่อารเจือ โดยการกำหนดแถบแพร่อารเจือเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง 40 60 80 และ 100 ไมครอน แสดงดังรูป 4.4 ยังมีรอยต่อสัมผัสที่ต่างกันคือ 20 40 และ 60 ไมครอน ตามลำดับ

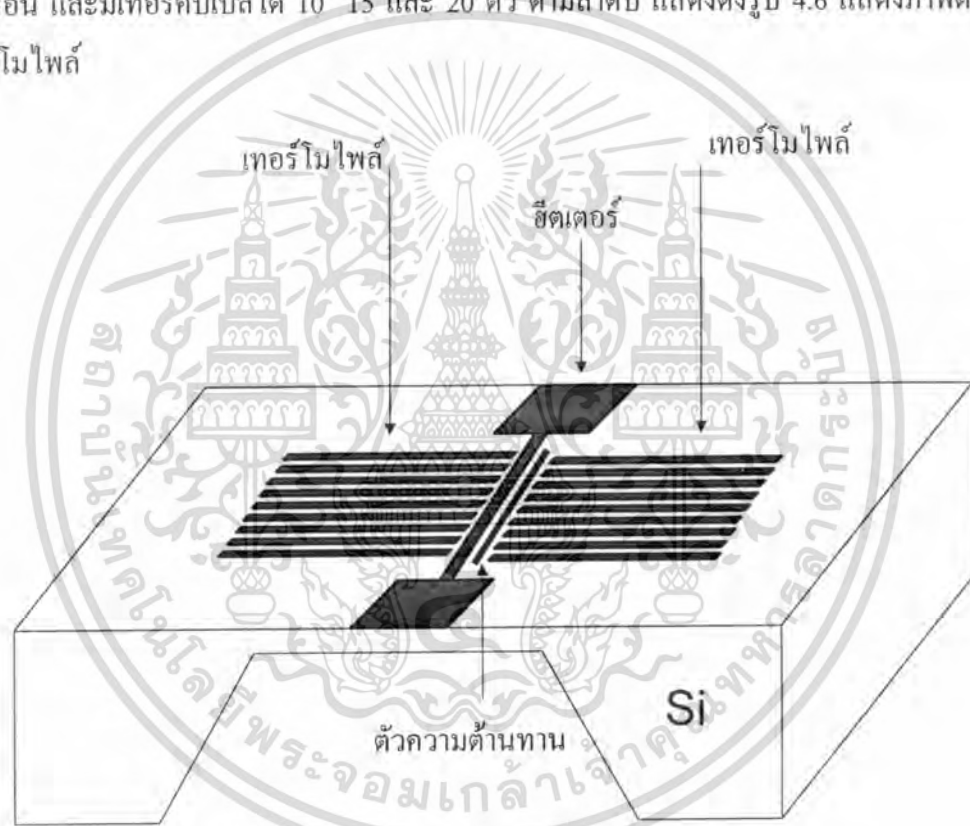


รูปที่ 4.4 การออกแบบความกว้างและระยะห่างระหว่างแถบแพร่อารเจือ



รูปที่ 4.5 แสดงความยาวของแถบแพร่สารเจือที่ต่างๆ กัน

ในการกำหนดพื้นที่ของเทอร์โมไฟล์ที่สามารถมีเทอร์โมคัปเปิลได้นั้น โดยการใช้พื้นที่ 1200 x1400 ไมครอน และมีเทอร์คัปเปิลได้ 10 15 และ 20 ตัว ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.6 แสดงภาพตัดขวางเทอร์โมไฟล์



รูปที่ 4.6 แสดงภาพตัดขวางชิพเทอร์โมไฟล์

#### 4.4 กระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์

ในกระบวนการสร้างฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อนอยู่บนโครงสร้างไดอะแฟรมนั้น จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนการผลิตกระจกมาส์กต้นแบบและ ขั้นตอนการสร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 การผลิตกระจกมาสักต้นแบบ

เมื่อได้ต้นแบบของไมโครฮีดเตอร์จึงนำต้นแบบนั้นมาเขียนลวดลายต่าง ๆ ลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยการออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริง ด้วยการออกแบบลวดลายทุกชิ้นลงบนกระดาษกราฟต้นแบบแผ่นเดียวกัน เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อน จากนั้นจึงนำไปทาบบด้วยแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาร์ซีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตนั้นจะใช้ไมโครคัตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร

#### 4.4.2 มาสักรุ่นแบบไมโครฮีดเตอร์

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาสักต้นแบบทั้งหมด 4 มาสักร่วมกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาสักที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม

มาสักที่ 2 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะไทเทเนียม

มาสักที่ 3 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียม

มาสักที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียมสำหรับวัดการกระจายความร้อน

#### 4.4.3 มาสักรุ่นแบบเทอร์โมไฟล์

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาสักต้นแบบทั้งหมด 4 มาสักร่วมกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาสักที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม

มาสักที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอนหรือฟอสฟอรัสสร้างแถบสารเจือ

มาสักที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอลูมิเนียม

มาสักที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะไทเทเนียม

มาสักที่ 5 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอลูมิเนียม

#### ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ในการสร้างไมโครฮีดเตอร์และเทอร์โมไฟล์ แผ่นผลึกซิลิคอนนั้นก็จะทำการสร้างเป็นสองขั้นตอน คือ การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้างไมโครฮีดเตอร์ และลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างเทอร์โมไฟล์

#### การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

สำหรับการสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ ได้ใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่นิยมกันมาก โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

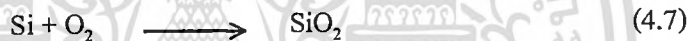
สารกึ่งตัวนำซิลิคอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีขั้นตอนการสร้างพื้นฐานดังนี้ คือ

1. การออกซิเดชัน (oxidation)
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี
3. การแพร่สารเจือ
4. การสร้างลวดลายโลหะ
5. สเป็คเตอร์ริง

#### กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำ ในอุณหภูมิ  $1000-1200\text{ }^\circ\text{C}$  โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไปนี้

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประเภทแรกคือใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิคอน และป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้ทำปฏิกิริยากับผิวซิลิคอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนกึ่งที่เรียกว่าเกตออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนียวทำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิคอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวของซิลิคอนในส่วนอื่น ๆ และจากวัตถุประสงค์ในการใช้งานชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กล่าวมา ทำให้ต้องการที่จะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกันเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่จะใช้เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่อะตอมสารเจือ จำเป็นที่จะต้องมีความหนาประมาณ  $4000-5000\text{ \AA}$  ขึ้นไปและชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้เป็นหน้ากักป้องกันสารเคมีที่ใช้กัดซิลิคอนให้เป็นไดอะแพรมต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า  $10000\text{ \AA}$  ซึ่งความหนาขนาดนี้ การสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียวจะทำให้ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีของออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากักจะทำการสร้าง โดยใช้วิธีการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบชื้นและแบบแห้งทับอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้นสามารถสร้างความหนาได้เร็ว แต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นต้องสร้างสลับกับการสร้างแบบแห้ง

### กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพต้นแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้ฉายแสง เพื่อเปิดช่องซิลิคอนสำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและมีความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับ การปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีจะกล่าวถึงในหัวข้อลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

### กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น โดยที่แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือสามารถแบ่งได้ตามประเภทของอะตอมสารเจือ 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เช่น ฟอสฟอรัส , สารหนู , ฟอสฟอไรต์และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี 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  $B_2H_6$  เป็นต้น สำหรับในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลือกที่จะใช้แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็นเป็น  $SiP_2O_7$  และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เป็น BN ซึ่งทั้งสองชนิดมีสถานะเป็น ของแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็ง ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษเนื่องจากก๊าซพิษที่แพร่ออกมาจากปฏิกิริยาน้อยที่สุด และยังคงสะดวกอย่างยิ่งในการทำงาน

สำหรับขั้นตอนในการปฏิบัติของกระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การ Predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ
2. การ Drive-in เป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อและกำหนดการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

## กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวมหรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซึลิกอนไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซึลิกอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่จะเคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ทำให้เกิดรอยผิวสัมผัสกับซึลิกอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซึลิกอนไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี

สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะเลือกใช้โลหะ (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ 1 ไมครอน แล้วจึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยขบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกัดเป็นลวดลายตามที่ต้องการแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านขบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ประมาณ 12 นาที เพื่อให้ รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซึลิกอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

## สปีดเตอร์ริง (Sputtering)

สปีดเตอร์ริงเป็นเทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศอีกวิธีหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการสร้างวงจรรวม ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมา โดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงซึ่งจะทำให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการที่อนุภาควิ่งเข้าชนสารเคลือบเป็นเป้า ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ

1. เป้าโลหะ (target) ใช้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้านี้จะมีการปล่อยอะตอมสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นฐานรองรับ

2. อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจจะเป็นกลางทางไฟฟ้าก็ได้ แต่การทำให้อนุภาคเป็นกลางทางไฟฟ้า เพื่อใช้ในการสปีดเตอร์ริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการเร่งประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนก็เป็นประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ย่อยต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทำให้เกิดกระบวนการสปีดเตอร์ริงได้ ดังนั้นการชนกันระหว่างอนุภาคจะต้องเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุด เมื่อมวลของอนุภาคมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงใช้ไอออนของก๊าซอาร์กอน ( $Ar^+$ ) ในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเขาชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งจะให้อัตราการปลดปล่อยอนุภาคสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. อนุภาคลังงานจะต้องถูกผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบฟิล์มเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการ โกลด์ดิสชาร์ท

### ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

#### 1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดพีระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิคัดความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกเป็น 400 ไมโครเมตร โดยภาพตัดขวางแสดงดังในรูปที่ 4.7



P-type Silicon

รูปที่ 4.7 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก

#### 2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

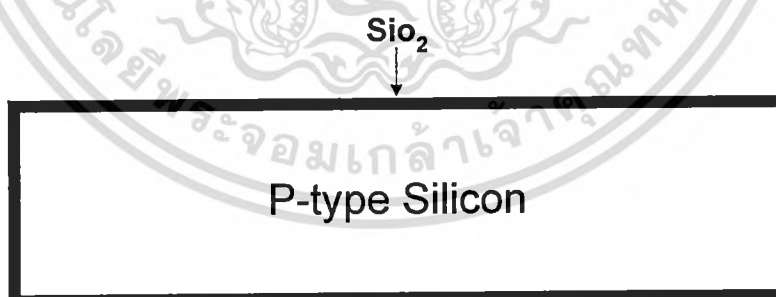
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลโรเอททีลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

เพื่อการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 7000 Å จึงทำ การออกซิเดชัน โดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ที่งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร ต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

### 4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบให้แห้ง แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาสก์ I สำหรับรายละเอียดของ กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat มีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลื่อนน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที ที่ด้านหลัง
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาสก์ที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลต ออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  เป็นเวลา 10 วินาที ที่ด้านหลัง
- การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1.5 นาที จุ่มน้ำยาทำความสะอาด (Isopropyl) 3 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันที ด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 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

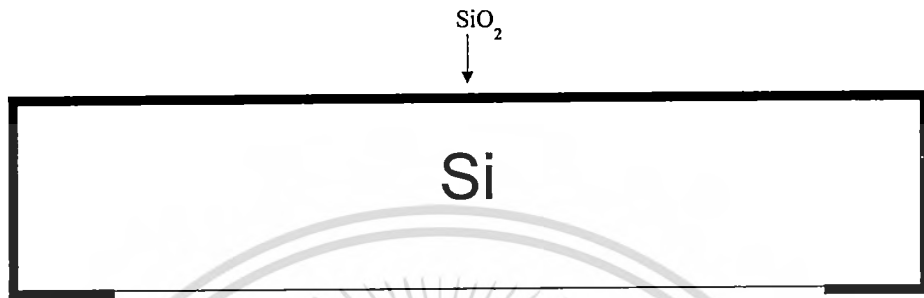
- ต้มในกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโครโลเอททีลินเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซีโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
  - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
  - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- เมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

#### 8. กระบวนการกัดเป็น ไดอะแฟรมบาง

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

#### 9. การลอกชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ที่ปกคลุม

ทำเหมือนข้อ 5

#### 10. ทำความสะอาดผิวผลึก

ทำเหมือนข้อ 7

#### 11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

เมื่อได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ได้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

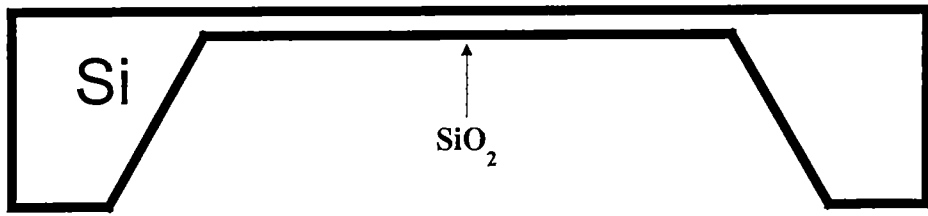
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร ต่อนาที

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

## 12. การเคลือบชั้นไทเทเนียม (Ti) ในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นไทเทเนียม หนา ประมาณ 0.5 ไมครอน

## 13. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

ใช้กระจกมาสก์ที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไทเทเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้น้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก 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
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ II ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์

แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

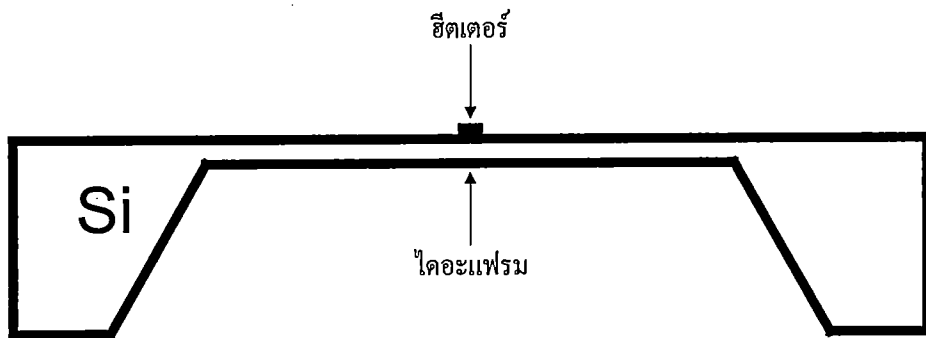
## 14. การกัดชั้นไทเทเนียม [9,10]

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

## 15. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการสร้างแถบไทเทเนียม

16. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร

17. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี III

ทำเหมือนข้อ 13

18. การกัดชั้นอลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 นาที

19. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- ทำเหมือนข้อ 15

20. เคลือบชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์

โดยเครื่องสปัตเตอร์ริง (sputtering) ทำการเคลือบชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์

21. การเคลือบชั้นอลูมิเนียม

ทำเหมือนข้อ 12

22. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี IV

ทำเหมือนข้อ 13

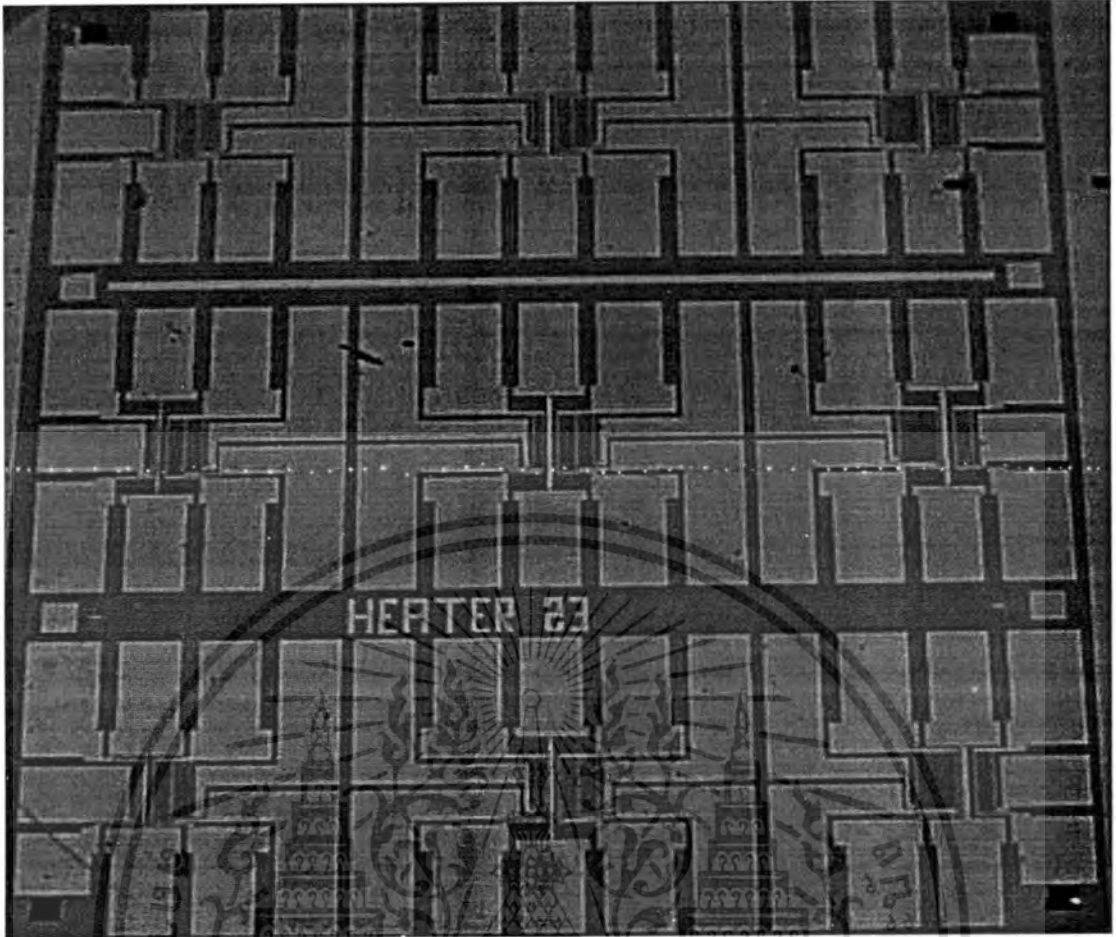
23. ทำการลอกน้ำยาไวแสงชนิดบวก

ทำเหมือนข้อ 15

24. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีตเตอร์ขั้นสุดท้าย

#### 4.5 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์และเทอร์โมไฟล์อยู่ในชิพเดียวกัน

##### ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมไฟล์ชนิดเอ็น

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

##### 1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดที่ระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิ้งค์ความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกเป็น 400 ไมโครเมตร โดยภาพตัดขวางแสดงดังในรูปที่ 4.13

P-type Silicon

รูปที่ 4.13 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

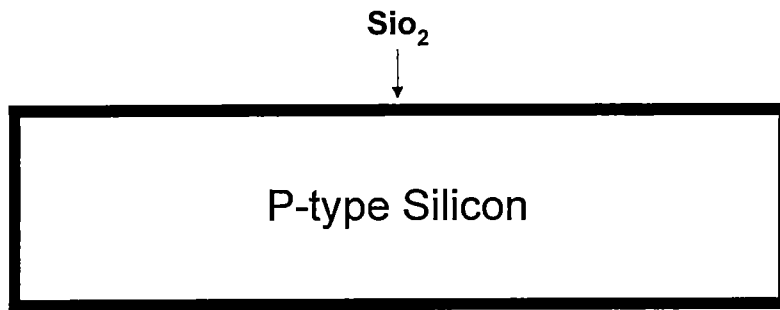
- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## 3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

เพื่อการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า  $7000 \text{ \AA}$  จึงทำการออกซิเดชันโดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $1100$  องศาเซลเซียส

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน  $1.2$  ลิตร ต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน  $1.0$  ลิตร ต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน  $1.2$  ลิตร ต่อนาที

แผ่นผลึกดังแสดง รูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

#### 4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการรอบให้แห้ง แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาส์ก I สำหรับรายละเอียดของ กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat มีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อ ไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที ที่ด้านหลัง
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาส์กที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเล็ตออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  เป็นเวลา 10 วินาที ที่ด้านหลัง
- การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1.5 นาที จุ่มน้ำยาทำความสะอาด (Isopropyl) 3 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันที ด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ทาด้านหน้าแผ่นผลึกด้วย Waycoat
- อบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

#### 5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้ว

เป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

#### 6. การลอกชั้นสารไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ต้มในกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) เป็นเวลา 10 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโครโลเอททีลินเป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที

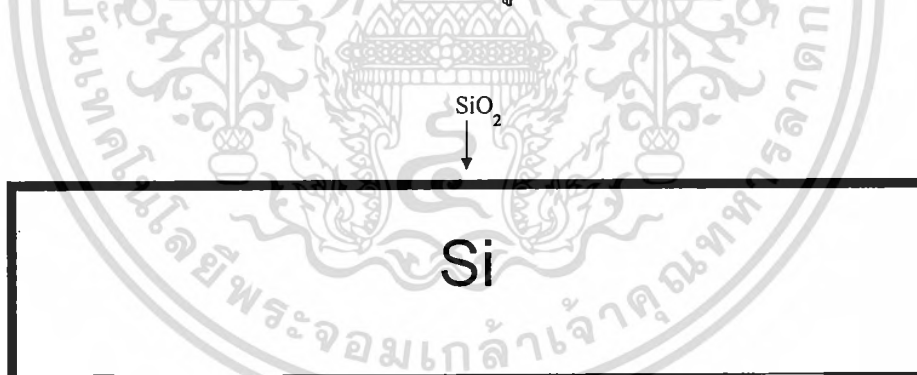
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

#### 8. กระบวนการกักเป็นไดอะเฟรมบาง

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

#### 9. การลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

เพื่อทำการกักชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ออก เพราะว่าออกไซด์มีคุณภาพลดลง ซึ่งทำเหมือนข้อ 5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10. ทำความสะอาดผิวผลึก

ทำเหมือนข้อ 7

## 11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

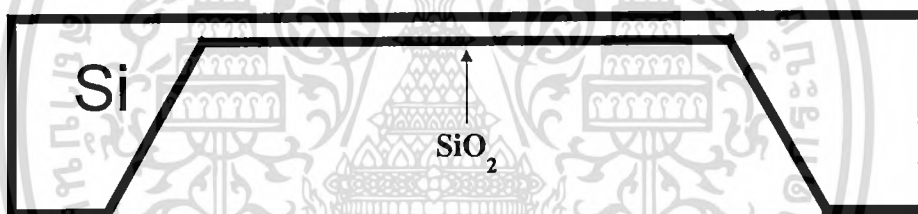
เมื่อได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ได้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร ต่อนาที

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

## 12. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องแพร่สารเจือ ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ II โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งจะทำเหมือนกับข้อ 4

## 13. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

## 14. การลอกชั้นสารไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน จะทำเหมือนกับข้อ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 15. ทำความสะอาดผิวผลึก

ทำเหมือนข้อ 7

## 16. กระบวนการ n deposition

เป็นการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ  $\text{SiP}_2\text{O}_7$ (PH1000) ที่อุณหภูมิ 1040 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.8 ลิตรต่อนาที เมื่อผ่านชั้นตอนนี้จะได้อะตอมสารเจือที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ กัน

## 17. การลอกชั้น Phosphorous glass

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% นาน 20 วินาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

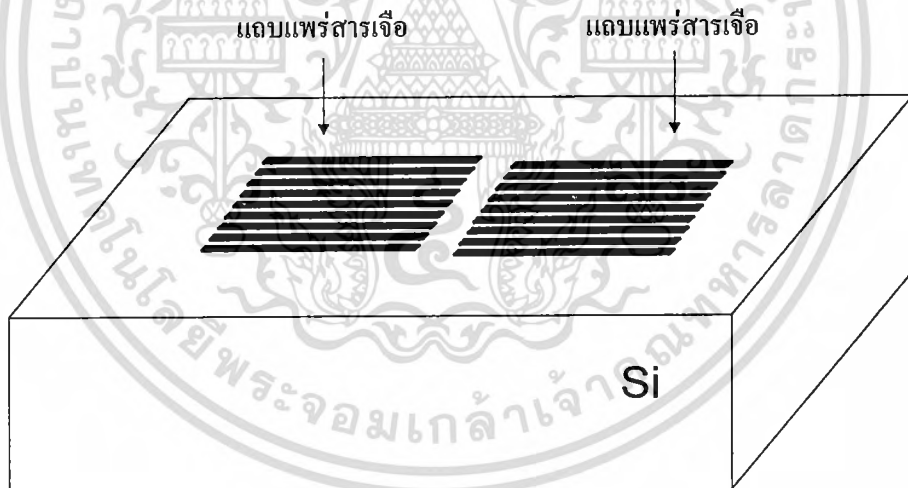
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## 18. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

## 19. กระบวนการ n drive-in

ทำการขับลึกฟอสฟอรัสพร้อมทั้งทำสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงภาพตัดขวางแถบแพร่สารเจือ

## 20. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี III

เพื่อทำการเปิดช่องรอยต่อสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนและขั้วโลหะ ซึ่งทำเหมือนข้อ 4

## 21. การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

## 22. การลอกชั้นสารไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนข้อ 6

23. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

24. การเคลือบชั้นไทเทเนียม (Ti) ในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นไทเทเนียม หนา ประมาณ 0.5 ไมครอน

25. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี I V

ใช้กระจกมาสก์ที่ IV เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไทเทเนียม 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
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ 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. การกัดชั้นไทเทเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

27. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

28. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนา ประมาณ 1 ไมโครเมตร

29. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี V

เพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียม ซึ่งทำเหมือนข้อ 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 30. การกัดชั้นอลูมิเนียม

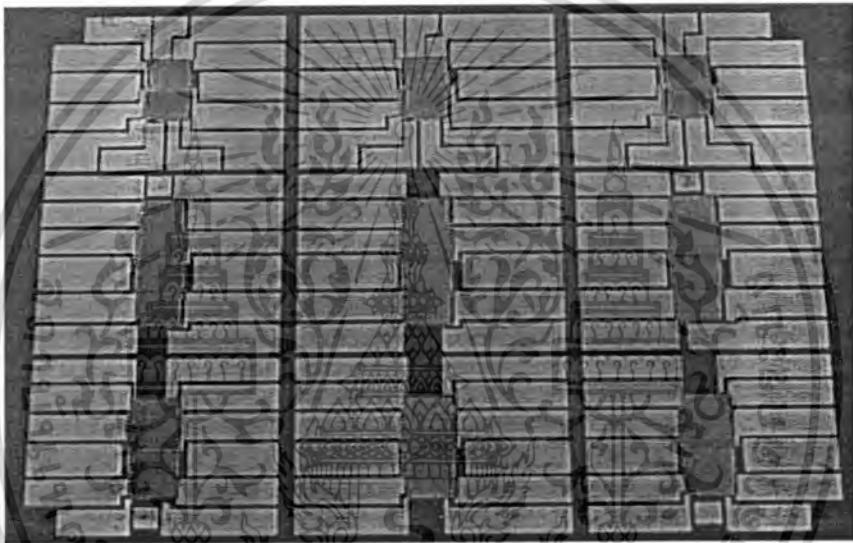
สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

### 31. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

ทำเหมือนข้อ 27

### 32. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงรูปถ่ายด้านบนเทอร์โมไฟล์

### ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมไฟล์ชนิดพี

ลำดับขั้นตอนการสร้างก็จะทำเหมือนกับลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมไฟล์ชนิดพี เพียงแต่เปลี่ยนฐานรองจากซิลิคอนชนิดพี มาเป็นชนิดเอ็นแล้วทำการแพร่สารเจือโบรอน

## 4.6 การแอสเซมบลีและการเก็บบรรจุ

เมื่อเสร็จกระบวนการสร้างเทอร์โมไฟล์บนแผ่นซิลิคอนแล้ว ก่อนที่จะนำแผ่นซิลิคอนไปเข้ากระบวนการแอสเซมบลี (Assembly) และการเก็บบรรจุ (Packaging) จะต้องทำการตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมไพล์เบื้องต้นก่อน ด้วยการวัดค่าซีเบ็ค หลังจากนั้นนำแผ่นซิลิคอนเทอร์โมไพล์มาเข้ากระบวนการต่างดังนี้

- การตัดแยกชิพ

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

- การติดตั้งชิพบนฐานรอง

เป็นขั้นตอนการนำชิพที่ผ่านการตัดมาติดบนฐานรอง (แผ่นปริ้นสำเร็จรูป) ด้วยตัวเชื่อมเป็นอียอกซี

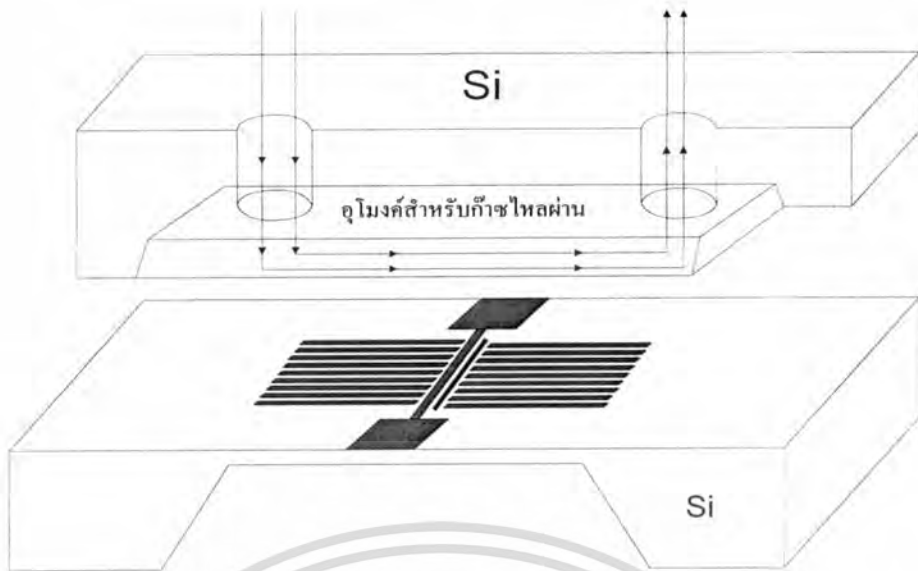
- การต่อสายลวดตัวนำ

เป็นขั้นตอนการต่อสายเส้นลวดลายอลูมิเนียมจากขั้วไฟฟ้าบนชิพไปยังขั้วโลหะที่อยู่ติดกับฐานรอง

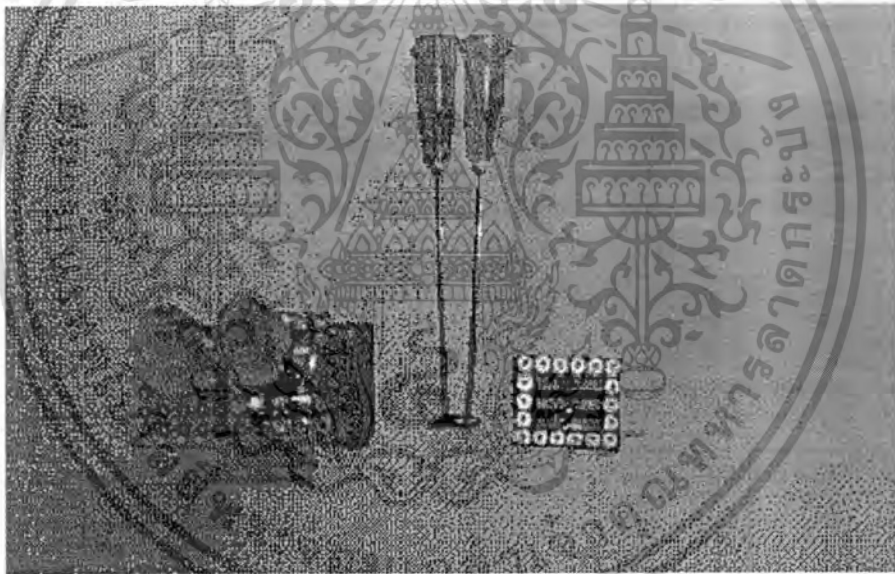
ผ่านกระบวนการแอสเซมบลีแล้ว ชิพซึ่งถูกติดตั้งบนฐานรองพร้อมด้วยการต่อสายลวดตัวนำ หลังจากนั้นจึงไปทำการเก็บบรรจุเป็นขั้นตอนนี้สุดท้ายก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติฯ ต่อไป

- การเก็บบรรจุ

เป็นขั้นตอนการปิดฝาปิดกับตัวชิพ ซึ่งฝาปิดนี้ทำจากซิลิคอนที่เกิดจากการกัดด้วยสารละลายให้มีขนาด 4500 x 1400 x 20 ไมครอน แสดงด้วยภาพตัดขวางดังรูปที่ 4.19 ซึ่งภาพด้านบนจะเป็นฝาปิดและภาพล่างเป็นเทอร์โมไพล์ชิพ ในการเก็บบรรจุได้ทำการผนึก บริเวณรอบๆ ระหว่างฝาปิดชิพซิลิคอนด้วยตัวเชื่อมซึ่งเป็นอียอกซี จะได้ชิพที่เป็นตัววัดอัตราการไหลได้ผ่านกระบวนการสร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอนถึงกระบวนการเก็บบรรจุจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปทดสอบ มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.21 ตัวแรกเป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์แล้ว ตัวที่สองเป็นฝาปิดที่ต่อเชื่อม และสุดท้ายเป็นชิพเทอร์โมไพล์



รูปที่ 4.19 แสดงภาพตัดขวางของฝาปิดและชิปเทอร์โมไฟล์



รูปที่ 20 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 การวิเคราะห์การแพร่สารเจือชนิดเอ็นและพี

##### 5.1.1 การศึกษาความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นและชนิดพี

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นและพี ที่ได้จากการแพร่สารเจือ ถูกนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นสารเจือด้วยเครื่อง SR-210 (Spreading Resistance Profiler-210) เป็นเครื่องมือวัดตรวจสอบความเข้มข้นสารเจือที่ตกลงไปจากผิวระนาบ โดยการเริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนมาตัดให้มีขนาดเล็กประมาณ 2 X 5 มม. แล้วนำชิ้นงานไปขัดด้วยเครื่องขัด แสดงดังรูปที่

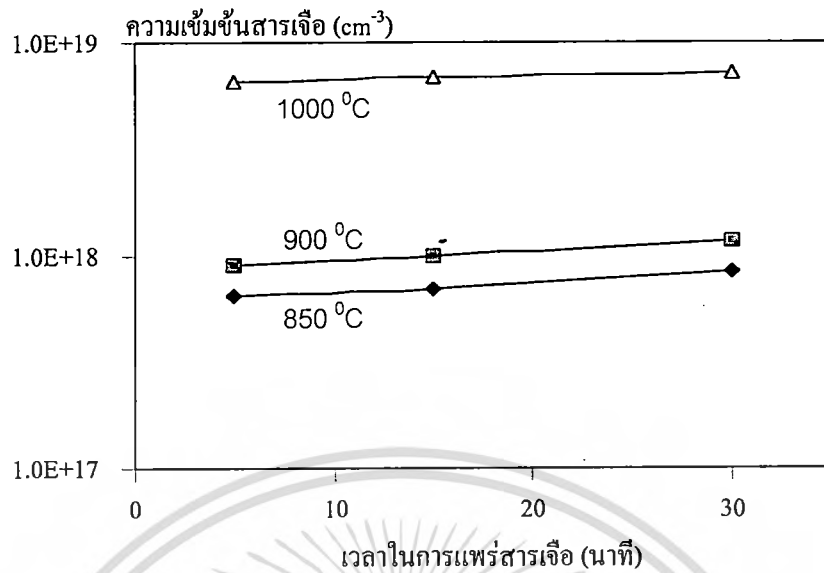
5.1



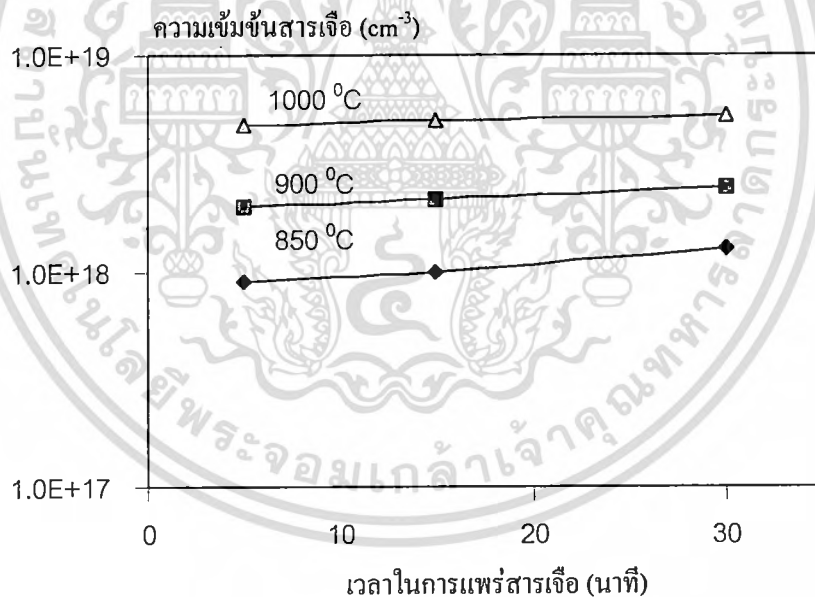
รูปที่ 5.1 แสดงการขัดชิ้นงานด้วยผงเพชร

จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวที่ได้จากการขัดผิวหน้าด้วยผงเพชรขนาด 0.25 ไมครอน แล้วนำชิ้นงานนี้ไปวัดด้วยเครื่อง SR-210 ในการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิต่างๆ กัน 850, 900 และ 1000 °C มีระยะในการแพร่สารเจือต่างกันคือ 5, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ และทำการขัปลึกที่เวลาเดียวกันคือ 4 ชั่วโมง ทั้งฟอสฟอรัสและโบรอน แสดงดังรูปที่ 5.2 และ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน

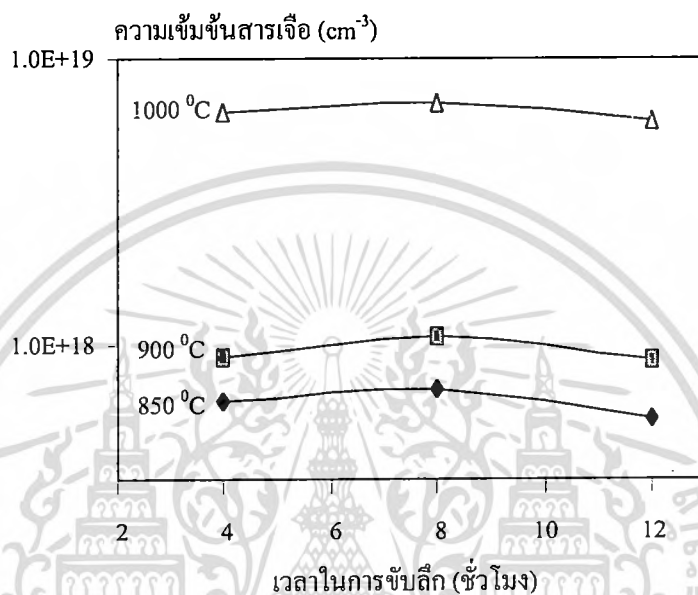


รูปที่ 5.3 แสดงการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน

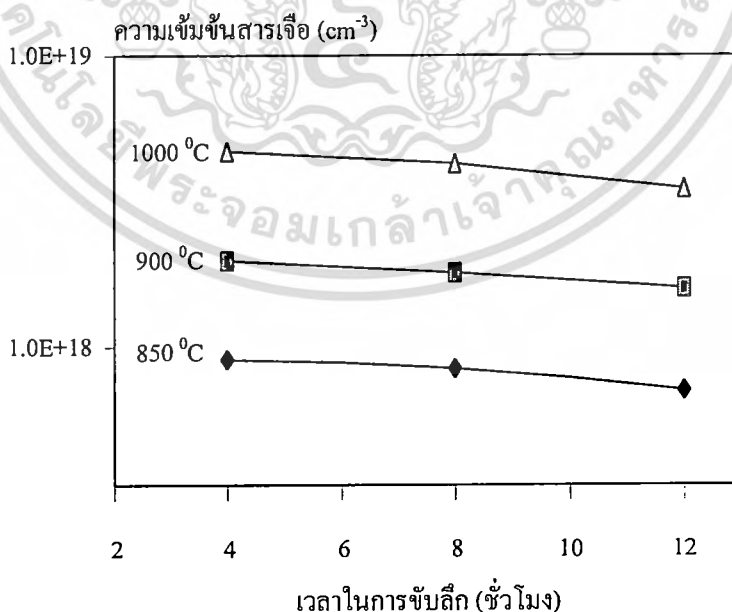
จากรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน แล้วทำการขับเคลื่อนที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อใช้เวลาในการแพร่สารเจือนานขึ้นความเข้มข้นสารเจือจะเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 5.4 แสดงการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิต่างกัน โดยการแพร่สารเจือเป็นเวลา 5 นาที และใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน แล้วทำการขับเคลื่อนที่อุณหภูมิ 1100 °C และเวลาต่างกันคือ 4, 8 และ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง เห็นว่าในช่วงแรกของขั้บลึกค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้นเพราะว่าสารเจือฟอสฟอรัสเกิดการแพร่ออกมาที่ผิว (out of diffusion) และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวหน้าลดลง ส่วนรูปที่ 5.5 แสดงการแพร่สารเจือโบรอนที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ กัน โดยทำการแพร่สารเจือเป็นเวลา 5 นาที และใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน แล้วทำการขั้บลึกที่อุณหภูมิ 1100 °C และเวลาในการขั้บลึกต่างกันคือ 4, 8 และ 12 ชั่วโมง จะเห็นว่าพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวจะมีค่าลดลง



รูปที่ 5.4 แสดงความเข้มข้นสารเจือฟอสฟอรัสที่ใช้เวลาในการขั้บลึกต่างกัน

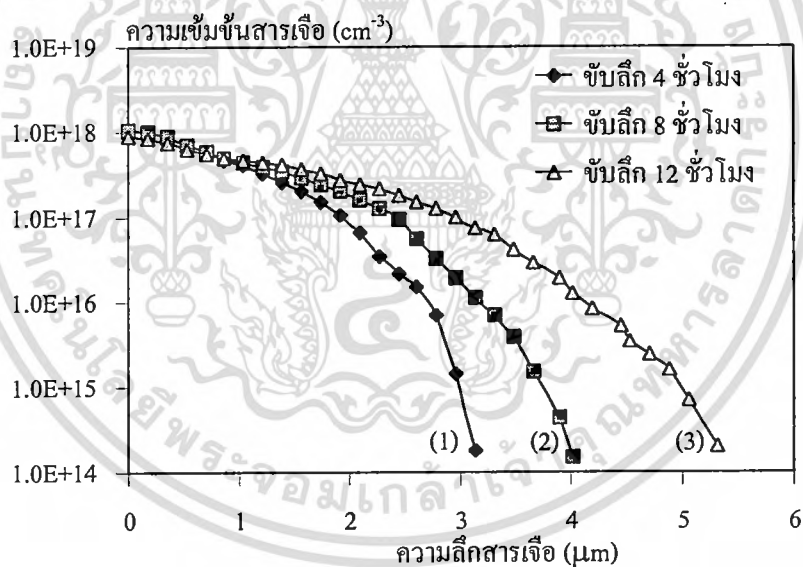


รูปที่ 5.5 แสดงความเข้มข้นสารเจือโบรอนที่ใช้เวลาในการขั้บลึกต่างกัน

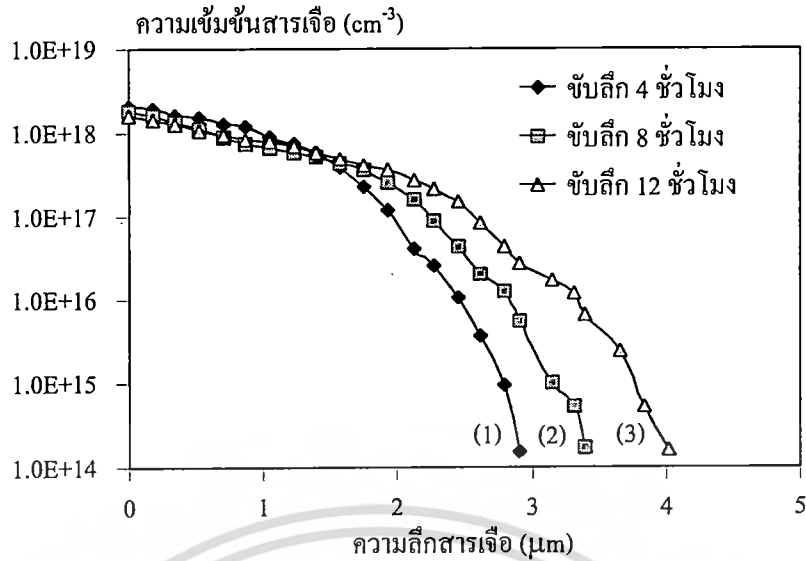
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 การศึกษาความลึกของรอยฟิเอิน

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาความลึกของรอยต่อฟิเอิน โดยการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการขัปลึกที่อุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.6 เป็นรูปแสดงความลึกของการแพร่สารเจือ โดยเส้นที่ 1 แสดงการขัปลึกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เส้นที่ 2 แสดงการขัปลึกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเส้นที่ 3 แสดงการขัปลึกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการขัปลึก ค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวและใต้ผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการขัปลึกใช้เวลานานขึ้นค่าความเข้มข้นสารเจือจะเริ่มลดลงและสารเจือแพร่ลงในผิวซิลิคอนจะเพิ่มมากขึ้น ในการแพร่สารเจือ โบรอนที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการขัปลึกที่อุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.7 เป็นรูปแสดงความลึกของการแพร่สารเจือ โดยเส้นที่ 1 แสดงการขัปลึกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เส้นที่ 2 แสดงการขัปลึกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเส้นที่ 3 แสดงการขัปลึกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่าการขัปลึกใช้เวลานานขึ้นค่าความเข้มข้นสารเจือจะเริ่มลดลงและสารเจือจะแพร่ลงในผิวซิลิคอนจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5.6 แสดงความลึกของสารเจือฟอสฟอรัส



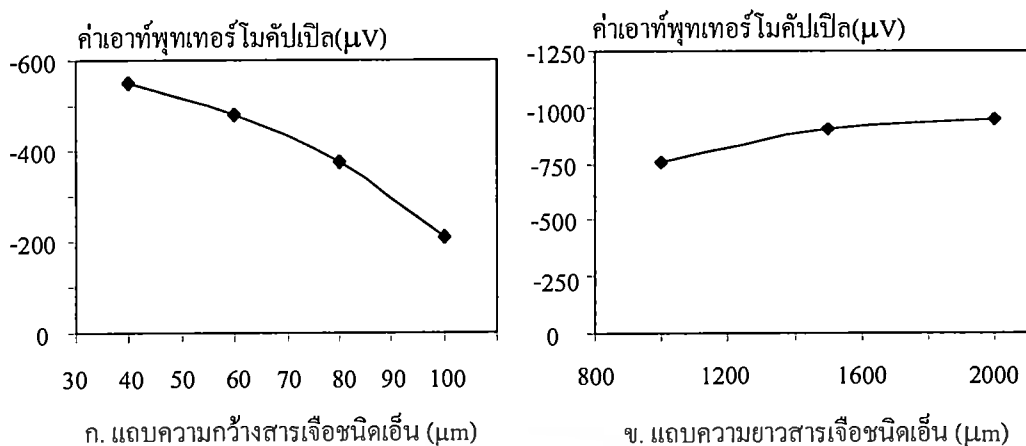
รูปที่ 5.7 แสดงความลึกของสารเจือโบรอน

## 5.2 การศึกษาเทอร์โมคัปเปิลแบบสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

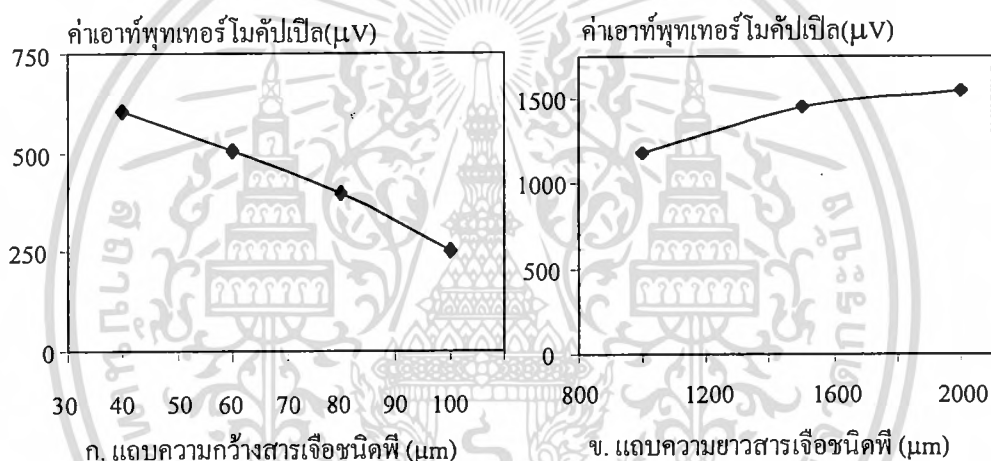
### 5.2.1 ผลของโครงสร้างต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาท์พุท

เมื่อทำการแพร่สารเจือเพื่อสร้างเป็นแถบสารเจือแล้วจะทำการสร้างฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อน ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แถบความกว้างสารเจือต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100  $\mu\text{m}$  และทุกตัวมีความยาวแถบสารเจือเท่ากัน 6000  $\mu\text{m}$  และเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวสารเจือต่างกันคือ 1000, 1500 และ 2000  $\mu\text{m}$  และทุกตัวมีขนาดความกว้างแถบสารเจือ 40  $\mu\text{m}$  แสดงผลดังรูปที่ 5.8(ก) และ 5.8(ข) แสดงค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของแถบสารเจือชนิดเอ็น ซึ่งค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลเป็นลบ รูปที่ 5.9(ก) และ 5.9(ข) แสดงค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของแถบสารเจือชนิดพี มีค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลเป็นบวก เห็นได้ว่าเมื่อแถบความกว้างสารเจือมีขนาดเล็กและยาวขึ้นจะทำให้ได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าทั้งเป็นบวกและเป็นลบ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้บอกชนิดของสารเจือได้ ว่าเป็นชนิดเอ็นหรือว่าชนิดพี โดยที่ค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) 15  $\Omega/\square$  และลึก 3.4 ไมครอน ของสารเจือฟอสฟอรัส และค่าความต้านทานแผ่น 20  $\Omega/\square$  และลึก 3.0 ไมครอน ของสารเจือโบรอน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือ

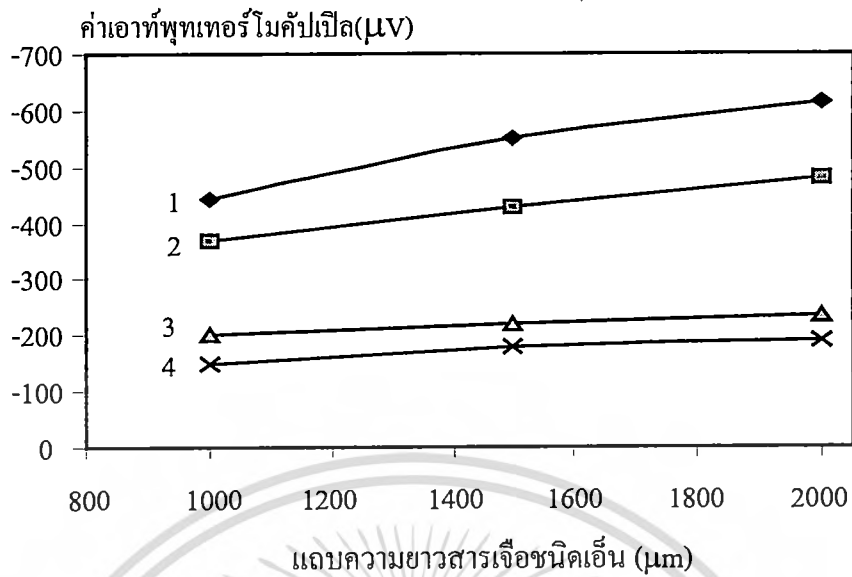


รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือ

### 5.2.2 ผลของความเข้มข้นสารเจือและความลึกของรอยต่อสารเจือที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเทอร์โมคัปเปิล

ในการทดลองนี้จะมีค่าความเข้มข้นสารเจือและความลึกสารเจือทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี แสดงดังรูปที่ 5.10 แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดเอ็น และ รูปที่ 5.11 แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดพี จะเห็นได้ว่าค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือจะมีแนวโน้มค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มขึ้นเมื่อสภาพความต้านทานผิวมากขึ้นและความลึกเพิ่มขึ้น แต่บางครั้งก็ไม่เป็นตามที่คาดการณ์ ทั้งนี้เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ (change of fermi energy) การกระเจิงของประจุพาหะ (scattering of the charge carrier) และการลากของประจุพาหะ(phonon drag)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



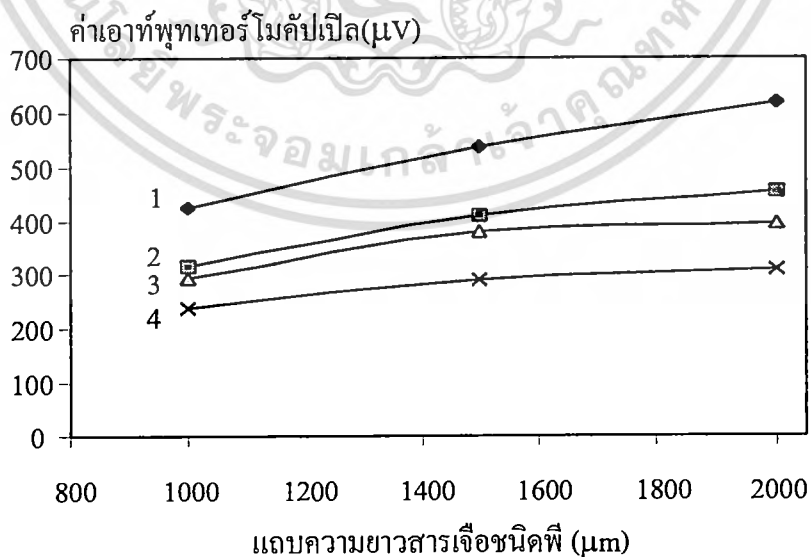
รูปที่ 5.10 แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือชนิดเอ็น

1.  $\alpha = 1053 \mu\text{V/K}$ ,  $\rho = 0.06 \Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{\text{sh}} = 134 \Omega/\square$ ,  $d = 6.12 \mu\text{m}$

2.  $\alpha = 811 \mu\text{V/K}$ ,  $\rho = 0.02 \Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{\text{sh}} = 59 \Omega/\square$ ,  $d = 6.24 \mu\text{m}$

3.  $\alpha = 226 \mu\text{V/K}$ ,  $\rho = 0.0014 \Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{\text{sh}} = 3 \Omega/\square$ ,  $d = 4.8 \mu\text{m}$

4.  $\alpha = 699 \mu\text{V/K}$ ,  $\rho = 0.01 \Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{\text{sh}} = 32.9 \Omega/\square$ ,  $d = 2.44 \mu\text{m}$



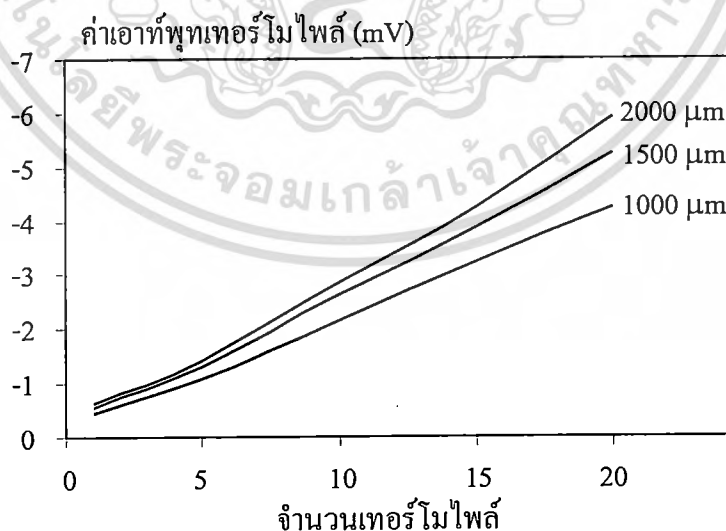
รูปที่ 5.11 แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

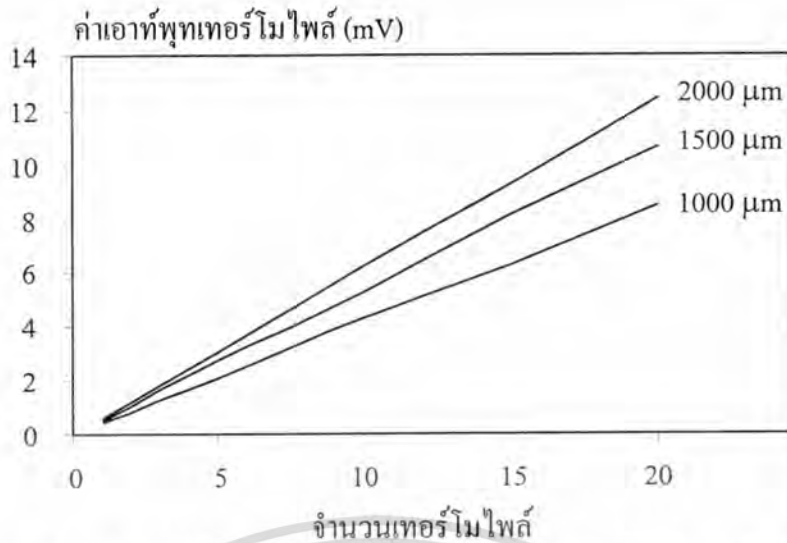
1.  $\alpha = 811 \mu\text{V/K}$ ,  $\rho = 0.02 \Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{sh} = 78.21 \Omega/\square$ ,  $d = 2.4 \mu\text{m}$
2.  $\alpha = 824 \mu\text{V/K}$ ,  $\rho = 0.023 \Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{sh} = 92.8 \Omega/\square$ ,  $d = 3 \mu\text{m}$
3.  $\alpha = 748 \mu\text{V/K}$ ,  $\rho = 0.015 \Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{sh} = 33.7 \Omega/\square$ ,  $d = 3.4 \mu\text{m}$
4.  $\alpha = 379 \mu\text{V/K}$ ,  $\rho = 0.0028 \Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{sh} = 8.75 \Omega/\square$ ,  $d = 4.1 \mu\text{m}$

### 5.2.3 จำนวนเทอร์โมโพลต์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์

เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิชนิดหนึ่ง ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อต้องการให้ได้ค่าเอาท์พุทสูงขึ้น โดยการนำเทอร์คัปเปิลมาต่ออนุกรมกัน ได้เป็นเทอร์โมโพลต์และได้ค่าเอาท์พุทสูงขึ้นตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่นำมาต่ออนุกรมกัน แสดงดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ซึ่งจะมีจำนวนเทอร์โมคัปเปิลมาต่ออนุกรมกัน 1, 5, 10, 15 และ 20 ตัว รูปที่ 5.12 สร้างด้วยการแพร่สารเจือชนิดเอ็น จะได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์  $V_{th} \approx 0.5N\alpha\Delta T$  โดยที่  $N$  คือจำนวนเทอร์โมคัปเปิล ที่ได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์ชนิดเอ็นไม่เป็นไปตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่นำต่ออนุกรมกัน เนื่องจากในหว่างกระบวนการสร้าง จากสาเหตุที่กล่าวมาทั้งหมดจะมีประจุบวกอยู่ที่ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนให้มาอยู่ที่ผิว ทำให้เกิดชั้นสารเจือซิลิคอนชนิดเอ็นที่ผิวของซิลิคอนแถบสารเจือเสมือนต่อกันอยู่ระหว่างแถบสารเจือ รูปที่ 5.13 เป็นเทอร์โมโพลต์ชนิดพี สร้างด้วยการแพร่สารเจือโบรอน จะได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์ชนิดพีเป็นไปตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่นำต่ออนุกรมกัน  $V_{th} = N\alpha\Delta T$



รูปที่ 5.12 แสดงจำนวนเทอร์โมโพลต์กับค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์ชนิดเอ็น

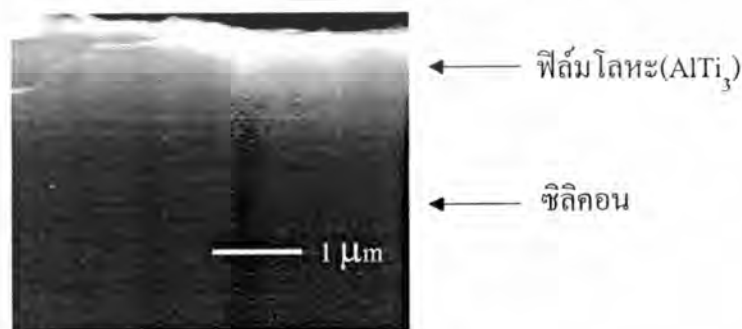


รูปที่ 5.13 แสดงจำนวนเทอร์โมไฟล์กับค่าเอาต์พุตเทอร์โมไฟล์ชนิดพี

### 5.3 การศึกษาไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิกอน

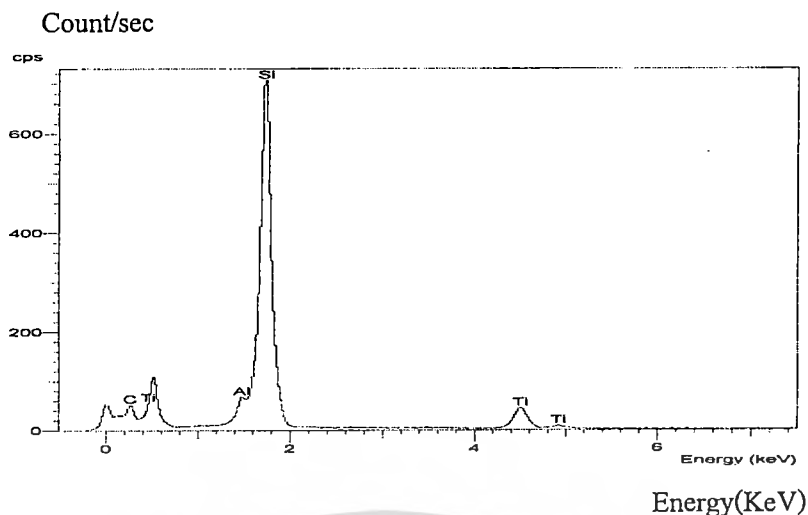
#### 5.3.1 การวิเคราะห์วัสดุไมโครฮีตเตอร์ Al-Ti

การเตรียมฟิล์มโลหะไททาเนียมและอลูมิเนียม ซึ่งถูกระเหยในระบบสุญญากาศ โดยการระเหยไททาเนียมและตามด้วยการระเหยอลูมิเนียม ซึ่งลักษณะเนื้อฟิล์มของไททาเนียมจะมีสีเทาและนำไปซินเตอร์ริงในบรรยากาศของไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ซึ่งมีสีทอง เมื่อนำฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม ไปซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 5 นาที จะได้อัลลอยด์ของ  $TiAl_3$  โดยอยู่ระหว่างฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม สีที่ผิวของอลูมิเนียมฟิล์มยังเป็นสีเงินซึ่งเป็นสีของอลูมิเนียมฟิล์ม แสดงได้ว่าที่ผิวด้านบนยังเป็นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม รูปที่ 5.14 แสดงการถ่ายภาพตัดขวางถ่ายด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) ได้ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียม 0.8 μm และไททาเนียม 0.4 μm และรูปที่ 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะ (AlTi<sub>3</sub>) ด้วย EDS (Energy Dispersive Spectrometer)



รูปที่ 5.14 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



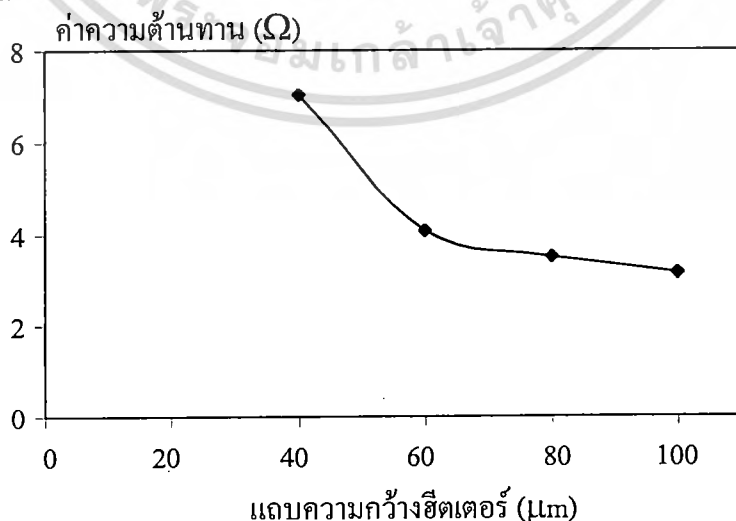
รูปที่ 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะด้วย EDS

### 5.3.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบขนาดความกว้างฮีตเตอร์ให้มีขนาดต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ และมีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 4 ชุด คือ 1400  $\mu\text{m}$  ที่ขนาดฮีตเตอร์ต่างกันทำให้ค่าความต้านทานต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.16

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความต้านทานของ ไมโครฮีตเตอร์

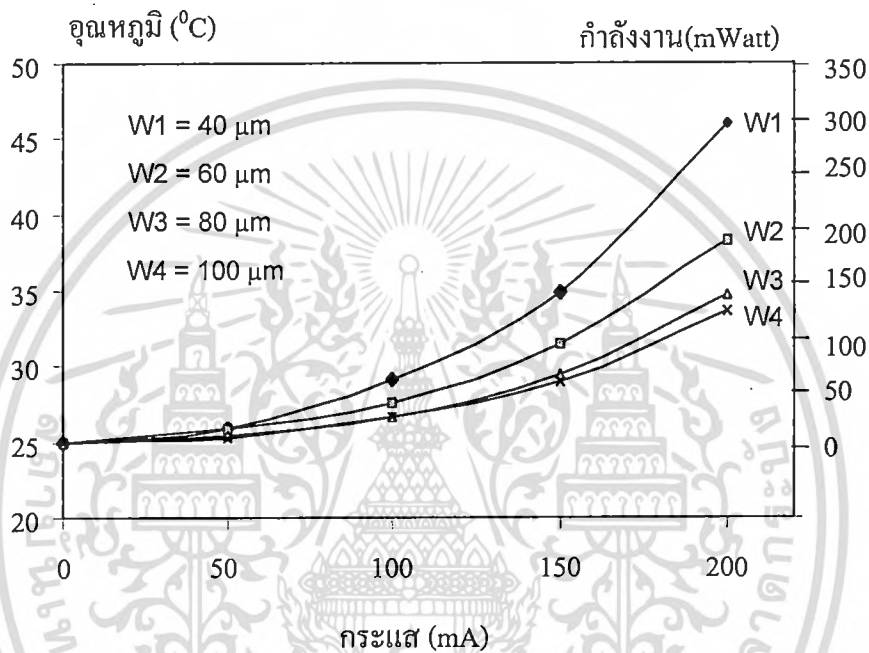
ไมโครฮีตเตอร์ชุดที่	ขนาดความกว้าง ไมโครฮีตเตอร์ ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )
1	40	7.03072
2	60	4.05873
3	80	3.48872
4	100	3.12810



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างฮีตเตอร์และค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

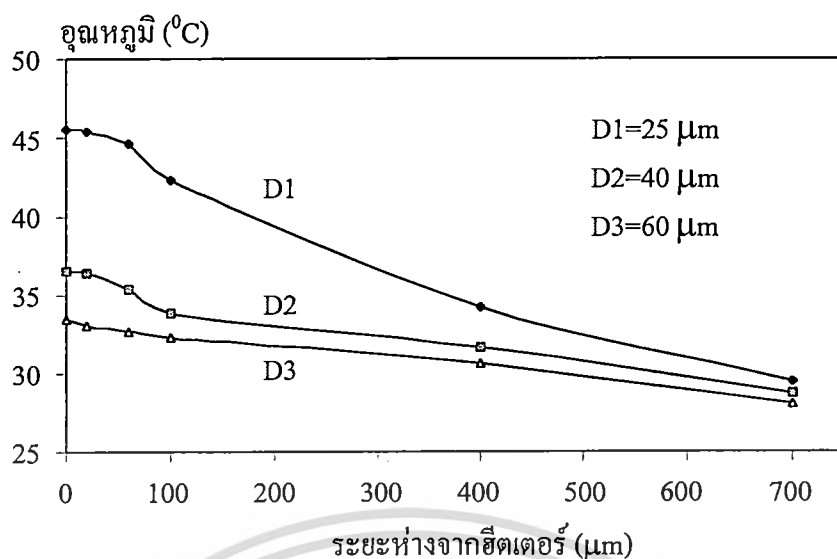
ฮีตเตอร์ก็คือตัวความต้านทาน เมื่อให้กระแสไหลผ่านตัวความต้านทานจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการทดลองนี้จ่ายกระแสในช่วง 0 – 200 mA และความหนาไดอะแฟรม 25  $\mu\text{m}$  แสดงดังรูปที่ 5.17 การกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่ฮีตเตอร์มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ในช่วงแรกของการจ่ายกระแสจะไม่ค่อยเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่เมื่อให้กระแสสูงขึ้นจะเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ที่ขนาดความกว้าง 40  $\mu\text{m}$  จะให้อุณหภูมิและพลังงานสูงสุด



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของฮีตเตอร์ ที่มีขนาดความกว้าง (W) ต่างกัน

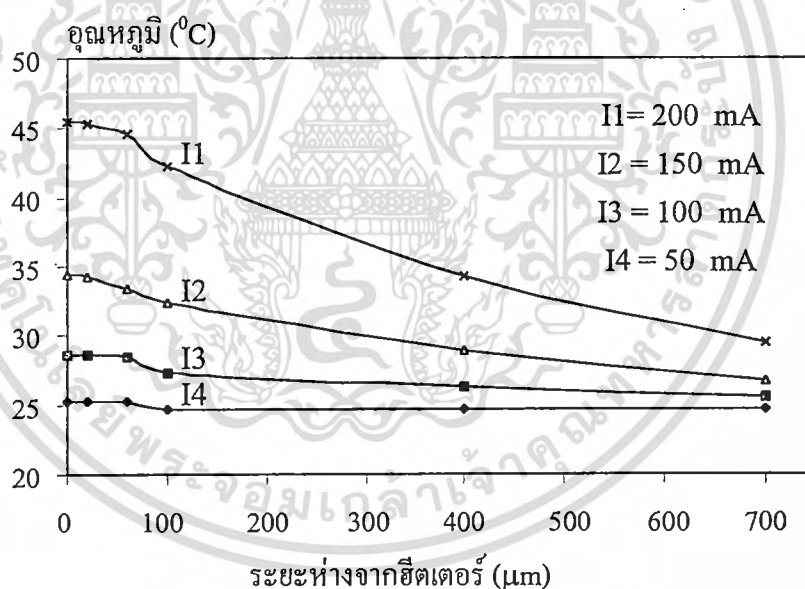
### 5.3.3 ผลของไมโครฮีตเตอร์บนไดอะแฟรม

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการกระจายความร้อนของฮีตเตอร์ที่มีความหนาต่างกันคือ 25, 40, และ 60  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ และยังมีตัวตรวจวัดการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมชนิดคอนเป็นฟิล์มอลูมิเนียมที่มีระยะห่างจากไมโครฮีตเตอร์ 0, 20, 60, 100, 400 และ 700  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ จากรูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกันคือ 25, 40 และ 60  $\mu\text{m}$  ใช้ฮีตเตอร์ขนาดความกว้าง 40  $\mu\text{m}$  โดยการจ่ายกระแสคงที่ 200 mA จากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าที่ขนาดความหนาไดอะแฟรม 25  $\mu\text{m}$  พบว่าจะให้อุณหภูมิของฮีตเตอร์และการกระจายความร้อนที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าไดอะแฟรมที่หนากว่า



รูปที่ 5.18 แสดงการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกัน

จากรูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความร้อนที่จ่ายขนาดกระแสต่างกัน คือ 50, 100, 150 และ 200 mA



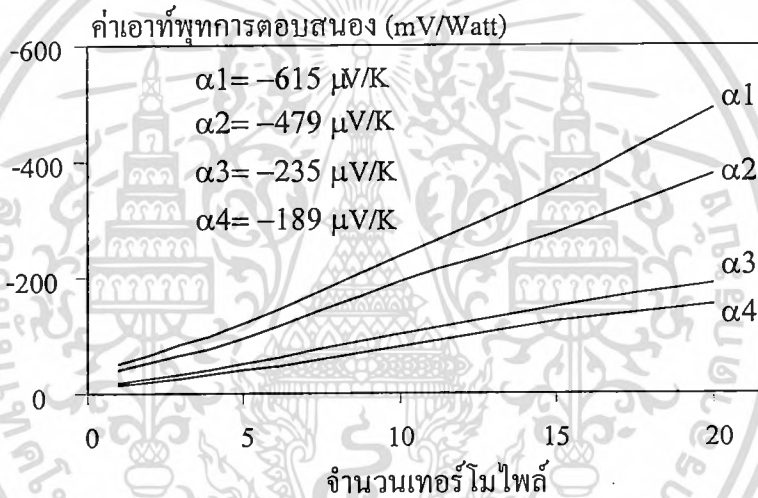
รูปที่ 5.19 แสดงการกระจายความร้อนของฮีตเตอร์ที่ขนาด 40 μm โดยความหนาของไดอะแฟรม 25 μm

## 5.4 การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมไฟลด์บนฐานรองไมโครฮีตเตอร์

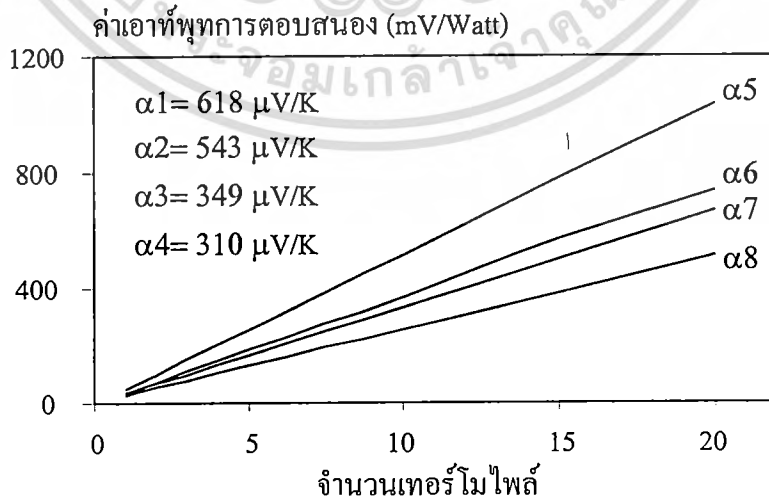
### 5.4.1 ค่าเอาต์พุตการตอบสนองเทอร์โมไฟลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่าเอาต์พุตการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลและเทอร์โมโพล์ทำได้จากส่วนเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตเทอร์โมโพล์ (Volt) กับกำลังงานของฮีตเตอร์ (Watt) โดยการให้กระแสกับฮีตเตอร์ เพื่อกำเนิดความร้อนให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อร้อน (hot junction) และรอยต่ออ้างอิง (reference junction) ใช้จำนวนเทอร์โมโพล์ 1, 5, 10, 15 และ 20 ตัว แสดงดังรูปที่ 5.20 แสดงค่าเอาต์พุตการตอบสนองเทอร์โมโพล์ชนิดเอ็น มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คต่างกันคือ เส้นที่ ( $\alpha_1$ )  $-615 \mu\text{V/K}$  เส้นที่ ( $\alpha_2$ )  $-479 \mu\text{V/K}$  เส้นที่ ( $\alpha_3$ )  $-235 \mu\text{V/K}$  และเส้นที่ ( $\alpha_4$ )  $-189 \mu\text{V/K}$  โดยแกน X เป็นจำนวนเทอร์โมโพล์และแกน Y เป็นค่าเอาต์พุตการตอบสนองเทอร์โมโพล์ ค่าเอาต์พุตการตอบสนองเทอร์โมโพล์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเทอร์โมโพล์เพิ่มขึ้น แต่มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของการคำนวณ รูปที่ 5.21 แสดงค่าเอาต์พุตการตอบสนองเทอร์โมโพล์ชนิดพี มีค่าซีเบ็คต่างกันคือ เส้นที่ ( $\alpha_5$ )  $618 \mu\text{V/K}$  เส้นที่ ( $\alpha_6$ )  $543 \mu\text{V/K}$  เส้นที่ ( $\alpha_7$ )  $349 \mu\text{V/K}$  และเส้นที่ ( $\alpha_8$ )  $310 \mu\text{V/K}$  ค่าเอาต์พุตการตอบสนองเทอร์โมโพล์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเทอร์โมโพล์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.20 แสดงค่าเอาต์พุตการตอบสนองของเทอร์โมโพล์ชนิดเอ็น

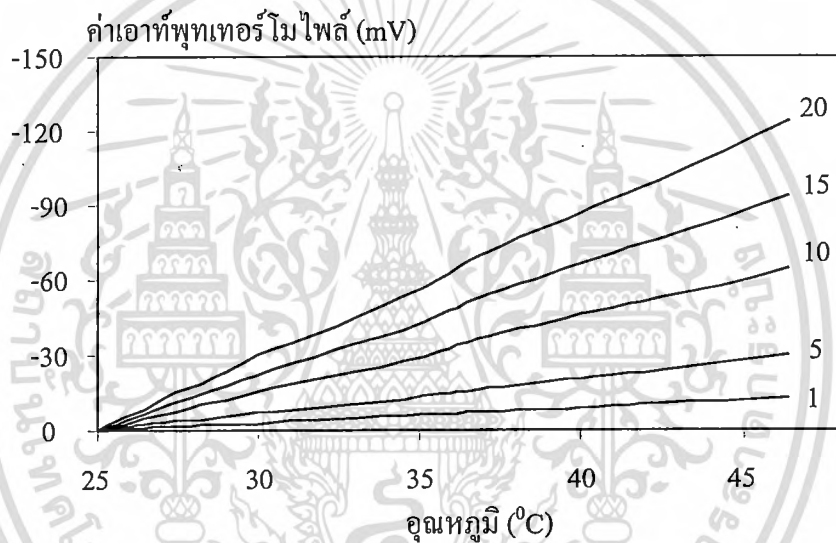


รูปที่ 5.21 แสดงค่าเอาต์พุตการตอบสนองของเทอร์โมโพล์ชนิดพี

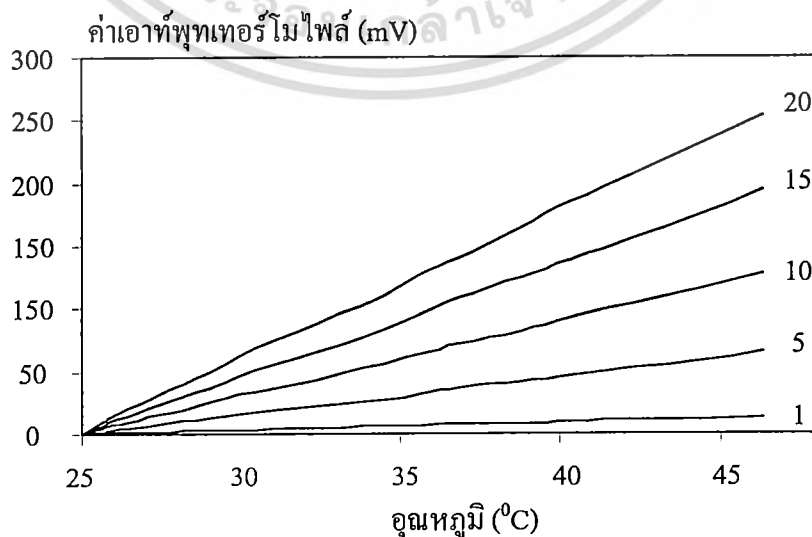
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4.2 ผลของการเป็นเชิงเส้นของเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์

เทอร์โมคัปเปิลเป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยวัสดุตัวนำสองชนิดต่างกันคือ ซิลิคอนและอลูมิเนียม โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้ง สอง ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ  $V_{AB} = \alpha_{AB}(T_2 - T_1)$  และเมื่อต้องการค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยการนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่ออนุกรมกันได้ค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์ตามจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน แสดงดังสมการ  $V_{AB} = N\alpha_{AB}(T_2 - T_1)$  โดยที่  $N$  คือจำนวนเทอร์โมคัปเปิลที่มาต่ออนุกรมกัน รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์ชนิดเอ็นเอ็นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีจำนวนเทอร์โมโพลต์ 1, 5, 10, 15 และ 20 ตัว รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์ชนิดพีกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีจำนวนเทอร์โมโพลต์ 1, 5, 10, 15 และ 20 ตัว



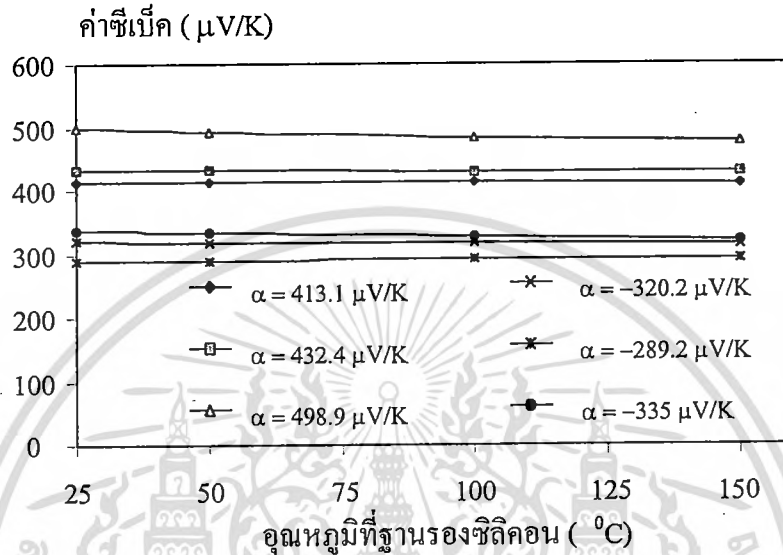
รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าเอาท์พุทเทอร์โมโพลต์ชนิดเอ็นเอ็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเทอร์โมไฟต์

การทดลองนี้จะใช้แท่งซีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อนทำให้อุณหภูมิฐานรองเปลี่ยนแปลง 50, 100 และ 150 °C รูปที่ 5.24 แสดงค่าซีเบ็คที่อุณหภูมิฐานรองซีตคอนเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าซีเบ็คมีค่าลดลง



รูปที่ 5.24 แสดงค่าซีเบ็คที่อุณหภูมิฐานรองซีตคอนเปลี่ยนไป

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์

อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์แบบความร้อน ประกอบด้วยส่วนของเซนเซอร์และแอกซิเวเตอร์ อยู่ในชิพเดียวกัน ทั้งเทอร์โมโพลีและฮีตเตอร์จะทำหน้าที่ต่างกันคือ เทอร์โมโพลีจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเทอร์โมคัปเปิลจะประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดต่างกันคือ ซิลิคอนและอลูมิเนียม ส่วนฮีตเตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยที่ซิลิคอนเทอร์โมโพลีและฮีตเตอร์จะถูกสร้างบนไดอะแฟรมบาง แผ่นฐานรองซิลิคอนนระนาบ (100) พื้นที่ส่วนที่รับรู้ความร้อนและแหล่งกำเนิดความร้อนจะอยู่บนไดอะแฟรมบางถูกสร้างด้วยกระบวนการกัดซิลิคอนในสารละลาย โดยใช้เทคนิคการจับเวลา แถบสารเจือทั้งชนิดเอ็นและพีถูกสร้างขึ้นด้วยการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสและ โบรอนด้วยความร้อนเสร็จแล้วจะทำการสร้างฮีตเตอร์โดยการระเหยโลหะในระบบสุญญากาศ ชิพทรานสดิวเซอร์ ถูกติดตั้งบนแผ่นปริ้นท์อเนกประสงค์และถูกต่อสายเข้ากับแท่งโลหะเสร็จแล้วสร้างอุโมงค์เพื่อให้ก๊าซไหลผ่านตัวชิพ โดยสร้างจากซิลิคอนซึ่งถูกกัดให้เป็นช่องทะลุที่ปลายทั้งสองแล้วถูกต่อด้วยเข็มฉีดยาเพื่อให้ก๊าซไหลเข้าและออกผ่านได้ ผลที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคของซิลิคอนมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของโลหะมาก และสามารถนำประยุกต์เป็นตัววัดอัตราการไหลของก๊าซ

ผลที่ได้จากการทำวิจัยทำให้ได้ทราบข้อมูลทางเทคนิค อุปสรรค และปัญหาบางประการซึ่งเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาลักษณะคุณสมบัติซิลิคอนเทอร์โมโพลี ดังสามารถสรุปได้ดังนี้

เนื่องจากทรานสดิวเซอร์แบบความร้อนประกอบด้วยเทอร์โมโพลีและฮีตเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคจะเป็นตัวบอกคุณสมบัติพื้นฐานของเทอร์โมโพลี ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคสามารถเปลี่ยนแปลงด้วยการเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือและความลึกสารเจือและยังสามารถบอกชนิดของสารเจือว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคมีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นสารเจือชนิดเอ็น และถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงว่าเป็นสารเจือชนิดพี ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ขนาดแถบสารเจือสารเจือที่เหมาะสมกันการนำไปใช้งาน  $40 \times 2000 \mu\text{m}$  จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นสารเจือน้อยและความสารเจือมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคจะมีค่าสูงขึ้น แต่บางครั้งค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคก็ไม่เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยฟลักเตอร์ 3 ฟลักเตอร์ คือ ประการแรกคือ การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ ประการที่สองคือ การกระเจิงของประจุพาหะ และประการสุดท้าย คือ การลากของประจุพาหะ ค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง  $150 - 600 \mu\text{V/K}$  ซึ่งในทางทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคของสารเจือจะมีค่าประมาณ  $1 \text{ mV/K}$  ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G.R. Lahiji, Kensall D. Wise. "A Batch-Fabricated Silicon Thermopile Infrared Detector." IEEE transactions on electron devices. vol ed-29. Jan 1982. pp. 14-22.
- [2] David Moser and Henry Baltes. "A high sensitivity 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 กীরติวุฒิสเรษฐ. หลักการวัดและใช้งานเคลื่อนมือวัดอุณหภูมิ. กรุงเทพฯ : บริษัท ส.เอเซียเพรส จำกัด. 2536.
- [5] S. Middelhoek, S.A. Audet. Silicon Sensors. Times Acadmic press, Inc, 1989.
- [6] นกสิทธิ์ ภูวัฒนชัย. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์. 2526.
- [7] นิमित ชมนาวัง สมศักดิ์ เขียวศรีกุล และ สมเกียรติ สุขเดช, "การศึกษาการกัดซิลิกอนด้วยสารละลาย KOH," วิศวกรรมลาดกระบัง 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. Electrochem. Soc., Vol 129, No. 11, pp. 2590-2594, November 1982.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## 1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน	$q$	$1.60 \times 10^{-19}$	C
ค่าคงที่ของ โบลซ์แมน	$k$	$1.38 \times 10^{-23}$	J/K
ค่าคงที่ของแพลงค์	$h$	$6.63 \times 10^{-34}$	J-S
ค่าเพอร์มิตติวิตีของอากาศ	$\epsilon_0$	$8.85 \times 10^{-14}$	F/cm
ค่าคงที่สเตฟาน โบลซ์แมน	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$	$W/m^2K$

## 2. คุณสมบัติของซิลิคอน

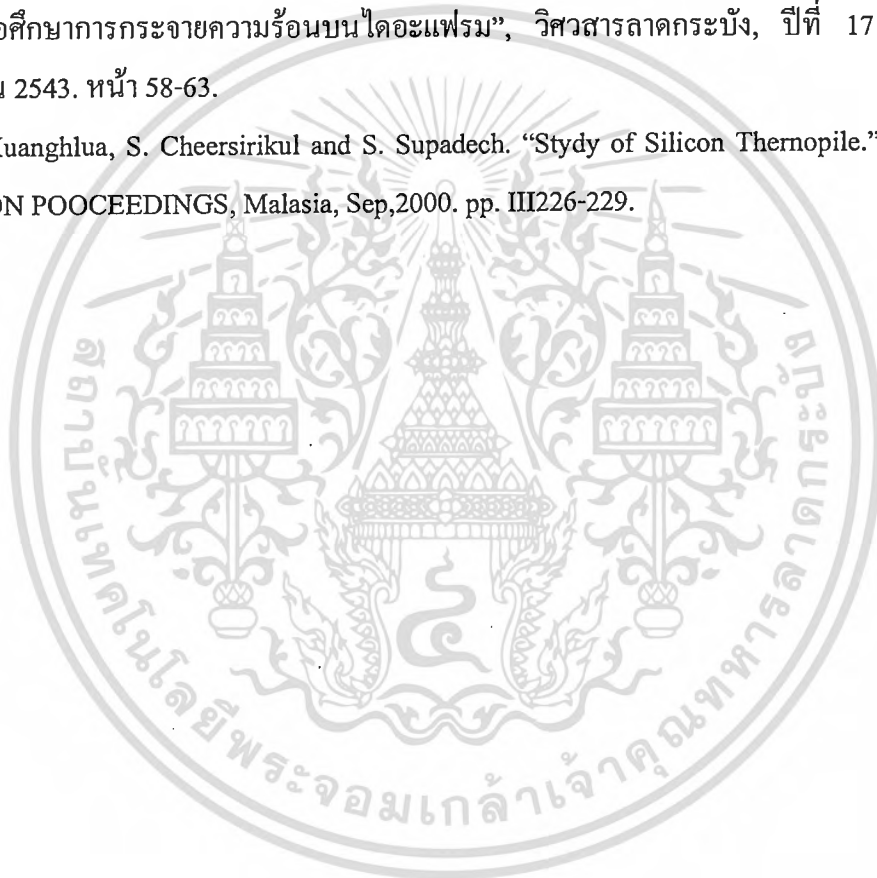
เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	
ความหนาแน่นอะตอม	$2.96 \times 10^{22}$	$cm^3$
ความหนาแน่น	2.328	$g/cm^3$
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	eV
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	$-2.3 \times 10^{-4}$	$eV/^{\circ}C$
จุดหลอมเหลว	1417	$^{\circ}C$
ดัชนีหักเห	3.420	
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	$2.6 \times 10^{-6}$	$(^{\circ}C)^{-1}$
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	$^{\circ}A$
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	$0.98 \times 10^{12}$	$cm^2/dyn$
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นพาหะของซิลิคอนบริสุทธิ์	$1.54 \times 10^{10}$	$cm^{-3}$
ความดันไอ	$2.8 \times 10^{-4}$	mm Hg
โครงสร้างผลึก	$F_{CC}$ , diamond	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ทางวิชาการ

- 1 รังสรรค์ เมืองเหลือ, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, Yoichi Yasumura และ สมเกียรติ สุภเดช, “การออกแบบและสร้างเทอร์โมไฟล์แบบซิลิคอนชนิดเอ็น”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 2541. หน้า 12-17.
2. รังสรรค์ เมืองเหลือ, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุลและ สมเกียรติ สุภเดช, “การออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรม”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17 ฉบับที่ 3, กันยายน 2543. หน้า 58-63.
3. R. Muanghlua, S. Cheersirikul and S. Supadech. “Stydy of Silicon Thermopile.” IEEE 2000 TENCON POCCEEDINGS, Malasia, Sep,2000. pp. III226-229.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้