



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทาน (RTD)  
โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

ดร.รังสรรค์ เมืองเทลือ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการใช้ของก๊าซแบบความต้านทาน (RTD)

โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความ  
ต้านทาน (RTD) โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 720,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ หัวหน้าโครงการ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทาน โดยการใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซในการศึกษานี้ได้ออกแบบให้ใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค(MEMS)ร่วมกับเทคโนโลยีวงจรรวม(IC) นำแผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ (100) มาสร้างไดอะแฟรมด้วยกระบวนการกัดเนื้อซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกในสารละลาย เมื่อได้ไดอะแฟรมแล้วสร้างไมโครฮีตเตอร์และตัวความต้านทาน โดยการสร้างฟิล์มบางโลหะ ไททาเนียมและทองคำ ในระบบสุญญากาศ โดยไมโครฮีตเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-295 °C สำหรับการใช้เป็นตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ โดยให้ก๊าซไหลผ่าน 0-1000 sccm พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : อุณหภูมิ, ทองคำ, ไมโครฮีตเตอร์, ไดอะแฟรม

**Research Title:** Fabrication of gas flow microsensor based on Resistance Temperature Detector (RTD) using MicroElectroMechanical Systems(MEMS) technology

**Researcher:** Dr.Rangson Muanghlua

**Faculty:** Engineering **Department:** Electronic  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

This research presents Fabrication of gas flow microsensor based on Resistance Temperature Detector (RTD) using MicroElectroMechanical Systems(MEMS). The gas flow microsensor in this study was designed by using the MEMS and Integrated Circuit technology (IC). The microheater and the resistor were fabricated on the (100) crystal plane of P-type Si diaphragm. The anisotropic etching was used in this process. The titanium film was applied by evaporation process and then the gold film was applied as a second layer on the titanium film. This microheater can generate the temperature between 25-295 °C. In the gas flow rate between 0 to 1000 sccm, the temperature of the microsensor decreased with increasing the flow rate of the gas.

Keywords : temperature, Au, microheater, diaphragm

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้สถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบพระคุณ ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัยจนบรรลุเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ และ นักศึกษา ทุกท่าน ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัยจนบรรลุเป้าหมาย

ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	7
2.1 วัสดุซิลิคอน.....	7
2.2 การถ่ายเทความร้อน.....	13
2.3 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค.....	19
2.4 การกักซิลิคอนในสารละลายแบบแอนไอโซโทรปิก.....	20
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	31
3.1 การออกแบบไดอะแฟรม.....	31
3.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์.....	32
3.3 กระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ด้วยฟิล์มอลูมิเนียม.....	34
3.4 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์ด้วยฟิล์มโลหะทองคำ.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	50
4.1 การสร้างไดอะแฟรมซิลิคอน.....	50
4.2 การศึกษาอลูมิเนียมไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน.....	52
4.3 การศึกษาทองคำไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน.....	55
4.4 การประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65

## สารบัญ(ต่อ)

5.2	ข้อเสนอแนะ.....	67
บทที่ 6	ผลผลิต.....	68
6.1	ผลงานเชิงวิชาการ.....	68
6.2	ผลงานเชิงสาธารณะ.....	68
6.3	ผลงานที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการ.....	68
	เอกสารอ้างอิง.....	69
	ประวัตินักวิจัย.....	71

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มุมระหว่างระนาบ {HKL} และ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของแต่ละระนาบต่างๆ.....	24
2.2 ตัวอย่างสารละลายกีดสำหรับซิลิคอน และหน้ากากป้องกันที่เหมาะสม.....	26
4.1 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์อลูมิเนียม.....	54
4.2 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ทองคำ.....	56
5.1 แสดงขนาดไมโครฮีตเตอร์อลูมิเนียม กำลังงาน และอุณหภูมิ.....	66
ที่ความหนาไดอะแฟรมซิลิคอน 25 ไมครอน และกระแส 200 mA	
ความหนาของไมโครฮีตเตอร์อลูมิเนียม 1.2 ไมครอน	
5.1 แสดงขนาดไมโครฮีตเตอร์ทองคำ กำลังงาน และอุณหภูมิ.....	67
ที่ความหนาไดอะแฟรมซิลิคอน 20 ไมครอน และกระแส 200 mA	
ความหนาของไมโครฮีตเตอร์ทองคำ 0.276 ไมครอน	

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างเสมือนอะตอมซิลิคอน.....	8
2.2 แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิคอน.....	8
2.3 แสดงโครงสร้างของผลึกซิลิคอน.....	9
2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์.....	10
2.5 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงาน.....	11
2.6 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดเอ็น.....	12
2.7 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดพี.....	13
2.8 แสดงการนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่ A.....	15
2.9 แสดงการพาความร้อนจากผิววัสดุ.....	17
2.10 แสดงหลักการทำงานของเซนเซอร์.....	20
2.11 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ x y z.....	21
2.12 แสดงหน่วยเซลล์ระนาบ (100).....	22
2.13 แสดงพันธะในอะตอมซิลิคอนระนาบต่าง ๆ (ก) ระนาบ(100) (ข) ระนาบ(110)..... (ค) ระนาบ(111) (ลูกศรแสดงทิศทางการเข้าไปกีดของสารละลายไอโซโทรปิก)	23
2.14 แสดงลักษณะคล้ายผิวสัมผัสของไดอะแพรมซิลิคอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย..... EPD อัตราส่วน 50 : 8 : 16 ที่ 100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 200 เท่า)	29
2.15 แสดงซิลิคอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50 : 12 : 16..... ที่ 100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 400 เท่า)	29
2.16 แสดงภาพ SEM ของภาคตัดขวางไดอะแพรมซิลิคอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย..... อัตราส่วน 50 : 8 : 16 ที่ 100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงความลาดเอียง	30
3.1 รายละเอียดการกัดซิลิคอนโดยสารละลาย.....	32
3.2 การออกแบบไมโครฮีดเตอร์.....	33
3.3 โครงสร้างของไมโครฮีดเตอร์.....	34
3.4 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก.....	34
3.5 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก.....	35
3.6 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7.....	39
3.7 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11.....	40
3.8 แสดงการสร้างแถบไททานเนียม.....	41
3.9 แสดงภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีดเตอร์ขั้นสุดท้าย.....	43

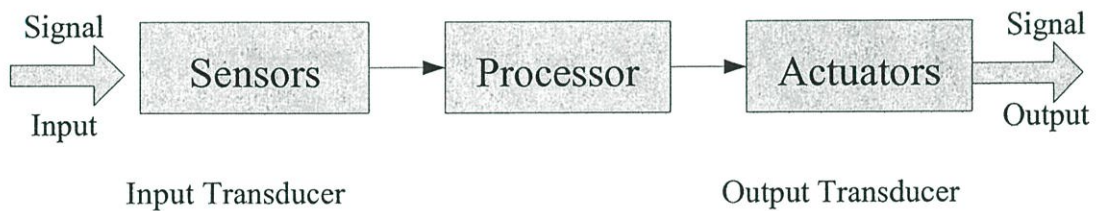
## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.10 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก.....	43
3.11 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก.....	45
3.12 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7.....	46
3.13 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11.....	47
3.14 แสดงภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีดเตอร์ทองคำ.....	48
3.15 แสดงไมโครฮีดเตอร์ทองคำ จำนวน 1 ตัว.....	49
4.1 แสดงลักษณะของไดอะแฟรมที่ได้จากการกัดด้วยสารละลาย EPD.....	52
4.2 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย SEM.....	53
4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะด้วย EDS.....	53
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างไมโครฮีดเตอร์และค่าความต้านทาน.....	54
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของไมโครฮีดเตอร์ ที่มีขนาดความกว้าง (W) ต่างกัน.....	55
4.6 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย เครื่อง veeco optical profiler.....	56
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างไมโครฮีดเตอร์และค่าความต้านทาน.....	57
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 40 ไมครอน.....	58
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 40 ไมครอน.....	58
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 60 ไมครอน.....	59
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 60 ไมครอน.....	60
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 80 ไมครอน.....	60
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 80 ไมครอน.....	61
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 100 ไมครอน.....	62
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 100 ไมครอน.....	62
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับอุณหภูมิของไมโครฮีดเตอร์ ทองคำบนฐานรองซิลิคอน.....	64

## บทที่ 1

### บทนำ

ทรานสดิวเซอร์(transducer)เป็นตัวแปลงสัญญาณอย่างหนึ่งไปเป็นสัญญาณอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งมี 2 ประเภท คือ เซนเซอร์ หรือ ตัวตรวจรู้(sensors) และ แอคชูเอเตอร์ (Actuators) เซนเซอร์เป็นตัวทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณในรูปอื่นๆ ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนแอคชูเอเตอร์จะเป็นตัวทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณอื่นๆ อาจกล่าวได้ว่าทั้งเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์จะแปลงสัญญาณที่มีลักษณะตรงกันข้ามกันและมีความสัมพันธ์กันแสดงดังภาพที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์จะวัดคุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมี แล้วแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งไปยังกระบวนการประมวลผลสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อที่จะส่งไปยังส่วนแอคชูเอเตอร์เพื่อที่จะแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นเอาต์พุตที่ต้องการแสดงมีด้วยกันหลายวิธีเช่น แสดงเป็นภาพ, เสียง, การสั่น, อุณหภูมิและแสงสว่าง เป็นต้น ซึ่งทำให้เราสามารถรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน



ภาพที่ 1.1 ระบบการวัดและแสดงผล

เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับระบบการวัดและควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแสดงผลแทนการตอบสนองของระบบประสาทรมนุษย์ที่มีขีดจำกัดในการรับรู้ที่มีระบบประสาทสัมผัสทั้ง 5 คือ หูรับฟังเสียง, ร่างกายรับการสัมผัส, จมูกใช้ดมกลิ่น, ลิ้นใช้การลิ้มรสและตาใช้ในการมอง ซึ่งถ้าสิ่งที่ใช้สัมผัสมีปริมาณมากเกินไปจะเป็นอันตรายต่อร่างกายและถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปก็ไม่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงได้

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามามีบทบาทในงานด้านต่างๆ มากมาย และมีความสำคัญต่อการควบคุมอัตโนมัติในระบบการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมทางด้านพลังงาน ในงานเหล่านี้ “เซนเซอร์(Sensor) หรือ ตัวตรวจรู้” นับเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำคัญที่ช่วยให้ระบบรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงของสถานะแวดล้อมจากการกระตุ้นผ่านตัวตรวจรู้ ทำให้การควบคุมสามารถการทำงานของเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ ได้โดยผ่านตัวเซนเซอร์

ตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ ที่มีขายในท้องตลาดและใช้งานในอุตสาหกรรมนั้นมีหลายแบบด้วยกันและมีวิธีการวัดอัตราการไหลที่แตกต่างกันไป แต่ส่วนใหญ่แล้วมิใช่การวัดค่าอัตราการไหลของก๊าซโดยตรงแต่จะวัดหาค่าความเร็วของการไหลของก๊าซ แล้วคำนวณออกมาเป็นอัตราการไหลของก๊าซ แต่ถ้าต้องการวัดอัตราการไหลของก๊าซที่ปริมาณต่ำๆ นั้น อุปกรณ์ที่วัดอัตราการไหลของก๊าซใช้ในปัจจุบันไม่สามารถวัดอัตราการไหลของก๊าซได้ถูกต้อง เพราะเนื่องจากการไหลผ่านของก๊าซที่ปริมาณต่ำ ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทำการวิจัยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซที่ปริมาณต่ำๆ โดยวิธีการหาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อก๊าซไหลผ่าน โดยการใช้หลักการทางความร้อนเนื่องการพาความร้อนของก๊าซที่ไหลผ่านตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า วิธีการหาความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการใช้หลักทางความร้อน ซึ่งอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นหลักการทำงาน โดยใช้ตัวความต้านทานเป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและมีฮีตเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน เมื่อมีก๊าซไหลผ่านตัวตรวจวัดอัตราการไหลของก๊าซทำให้เกิดการพาความร้อนทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ แสดงการทำงานของตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทาน(RTD) เมื่อมีก๊าซไหลผ่านตัวตรวจรู้แบบความต้านทานก็จะส่งผลให้ค่าความต้านทานนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าต้องการให้ตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ ได้นั้นจะต้อง ลดขนาดของตัวตรวจรู้และขนาดของท่อก๊าซลงนั้นจะทำให้ระดับหนึ่ง แต่ถ้าต้องลดขนาดตัวตรวจรู้ให้เล็ก ระดับมิลลิเมตร ไปถึง ระดับไมโครเมตร จะต้องเปลี่ยนวัสดุมาเป็นวัสดุซิลิคอน และ เปลี่ยนเทคโนโลยีในการสร้างมาเป็นเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวม(IC) ร่วมกับเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาพ(MEMS)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสร้างฟิล์มบางโลหะโดยใช้ Silicon planar technology
2. ศึกษาเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อการสร้าง ฟิล์มบาง เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุด
3. พัฒนาเป็นขั้นตอนการสร้าง ฟิล์มบาง เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสร้าง อุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์
4. ศึกษาการสร้างไดอะแพรมบางซิลิคอนโดยการกัดด้วยสารละลาย
5. เพื่อออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซด้วยเทคโนโลยี MicroElectroMechanical Systems (MEMS) ได้
6. การประยุกต์โครงสร้างของตัวตรวจรู้แบบความต้านทานให้เหมาะสมกับตัวตรวจรู้ความ

ร้อน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สามารถใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมและเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ในการสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทานได้

ห้องศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. เป็นหน่วยงานที่ทำวิจัยเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นรากฐานสำหรับการสร้างวงจรรวม ประกอบด้วยกระบวนการต่าง ดังนี้

1. กระบวนการออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ
2. กระบวนการทำความสะอาด
3. กระบวนการออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ
4. กระบวนการออกซิเดชัน
5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
6. กระบวนการฟิล์มบางโลหะ
7. กระบวนการกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย

สำหรับกระบวนการที่เราจะทำวิจัยนี้เป็นกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะ ซึ่งทางศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์สามารถสร้างด้วยกัน 4 กระบวนการ คือ

1. กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะ
2. กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ ด้วยเครื่องระเหยแบบความ ร้อน

3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
4. กระบวนการกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย

MEMS ย่อมาจาก Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) กล่าวคือการรวมคุณสมบัติทางกลกับทางไฟฟ้าเข้าด้วยกันแล้วทำให้มีขนาดเล็ก ดังนั้นความหมายที่ได้ “MEMS” คือ ประดิษฐ์กรรมขนาดไมโครมิเตอร์ซึ่งรวมส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าและเครื่องกลเข้าด้วยกัน ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสร้างโดยอาศัยเทคโนโลยีการผลิตวงจรรานซิสเตอร์ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ไมโครมิเตอร์ถึงมิลลิเมตร ระบบดังกล่าวนี้สามารถตรวจวัด, ควบคุมและกระตุ้นในระดับต่ำและสามารถทำงานทั้งในแบบอิสระหรือแบบขบวนเพื่อให้มีผลในระดับสูงขึ้น นอกจากนี้กล่าวถึงภาพรวมของเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคและการนำไปใช้ประโยชน์โดยเน้นการใช้ประโยชน์ทางด้านแสงการใช้ประโยชน์ของระบบนี้สามารถใช้ได้ในหลายสาขา อาทิ เทคโนโลยียานยนต์กรรม เทคโนโลยีการแพทย์ชีวภาพเทคโนโลยีระบบสื่อสาร ระบบหุ่นยนต์ ระบบอากาศยาน เป็นต้น

#### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	งบประมาณปี 2556												
	ตค.	พย.	ธค.	มค.	กพ.	มีค.	เมย.	พค.	มิย.	กค.	สค.	กย.	
1.ดำเนินการจัดซื้อวัสดุ													
2.ออกแบบลวดลายและสร้างกระจกต้นแบบ													
3.สร้างไดอะแฟรมบางซิลิคอน ด้วยเงื่อนไขต่างๆ													
4.ทดสอบคุณสมบัติของไดอะแฟรมบาง													
5. สร้างฟิล์มบางโลหะด้วยเงื่อนไขต่างๆ													

6. ทดสอบคุณสมบัติของ ทางกายภาพและไฟฟ้า ฟิล์มบางโลหะ												
7. ทดสอบและทำการ ปรับปรุงเงื่อนไขต่างๆ ในขั้นตอนที่ 2-4 ให้ได้ เงื่อนไขที่ดีที่สุด												
8. ทดสอบสมบัติทาง กายภาพและไฟฟ้าของ ฟิล์มบางโลหะ												
9. ทดสอบสมบัติในการ วัดอัตราการไหลของก๊าซ												
10. เขียนรายงานฉบับ สมบูรณ์												

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มความรู้ความสามารถและประสบการณ์ทางด้านเทคโนโลยีฟิล์มบางโลหะของบุคลากร เพื่อฝึกฝนทักษะการวิจัยและถ่ายทอดความรู้รวมทั้งเทคนิคต่างๆ ไปสู่บุคลากรรุ่นใหม่ให้มีความรู้ความเชี่ยวชาญในเรื่องที่เกี่ยวข้องในระดับสูงเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะเป็นกำลังสำคัญของการพัฒนาทาง การวิทยาศาสตร์และวงการอุตสาหกรรมของประเทศสืบต่อไป นำไปสู่การพัฒนาประเทศไทยที่ยั่งยืน

2. เป็นการกระตุ้นให้มีการพัฒนาอุปกรณ์แบบฟิล์มบางขึ้นในประเทศ

3. เป็นพื้นฐานเทคโนโลยีที่พัฒนาประเทศ

4. เป็นพื้นฐานของการวิจัยด้านฟิล์มบาง และวัสดุสารกึ่งตัวนำ

5. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับประเทศ

สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอการทำวิจัยเรื่องการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์และการประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจรั้อัตราการไหลของก๊าซ โดยเริ่มต้นจาก บทนำ ทฤษฎี การออกแบบและกระบวนการสร้าง ผลการทดลอง และสุดท้ายสรุปผลการทดลอง ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึง ความเป็นของงานวิจัย และการนำเอาซิลิคอนประยุกต์ใช้งาน ตลอดจนวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

บทที่ 2 เนื้อหาจะกล่าวถึงทฤษฎีซิลิคอน การถ่ายเทความร้อน ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค และการกัดซิลิคอน

บทที่ 3 เนื้อหาจะกล่าวถึง การออกแบบและกระบวนการสร้างฮีตเตอร์ และการออกแบบ และการประยุกต์ใช้งาน

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 6 ผลผลิต

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุซิลิคอน ชนิดของผลึกซิลิคอน ได้แก่ ซิลิคอนบริสุทธิ์ ซิลิคอนเจือปน การถ่ายเทความร้อนนั้นเกิดขึ้น 3 แบบ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสี ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นเป็นการรวมคุณสมบัติทางกลกับทางไฟฟ้าเข้าด้วยกันแล้วทำให้มีขนาดเล็ก การกัตซิลิคอนในสารละลายแบบแอนไอโซทรอปิก เพื่อให้ได้ไดอะแฟรมของซิลิคอน

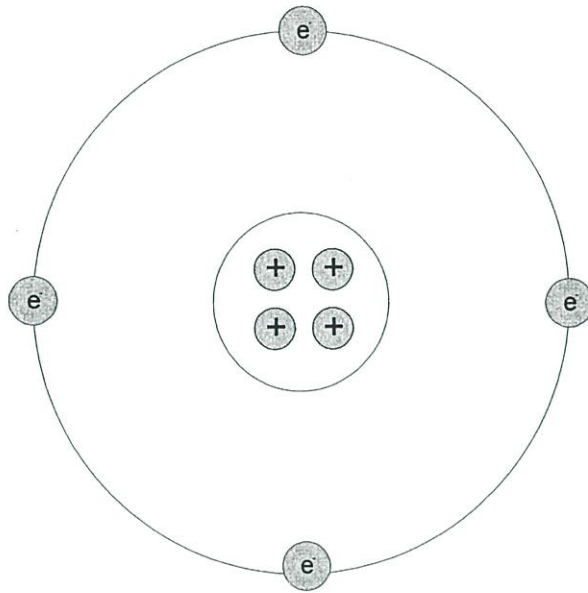
#### 2.1 วัสดุซิลิคอน

##### 2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน[1]

ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุซิลิคอนหลายๆ เมื่อพิจารณาอะตอมซิลิคอน มีโครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนที่เป็น นิวเคลียส และมีอิเล็กตรอนวงโคจรรอบๆ ที่นิวเคลียสประกอบด้วยโปรตรอน 14 ตัว แต่ละตัวมีประจุไฟฟ้าบวก อิเล็กตรอนทั้งหมด 14 ตัว มีประจุเป็นลบ ดังนั้นภายในอะตอมซิลิคอนจึงอยู่ในสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า คือ ไม่แสดงสมบัติทางไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนซึ่งโคจรอยู่ในวงโคจรนอกสุดนี้ เรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน สำหรับซิลิคอนมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว และวงโคจรชั้นนอกสุด เรียกว่า วงวาเลนซ์ ซึ่งวงโคจรอยู่ในวงจรชั้นใน ซึ่งอยู่ใกล้กับนิวเคลียสจะถูกนิวเคลียสดึงดูดเอาไว้จนไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้า และเนื่องจากวาเลนซ์อิเล็กตรอนโคจรอยู่นอกสุดจึงถูกนิวเคลียสดึงดูดไว้ ซึ่งไม่มากนัก มีโอกาสที่จะหลุดออกไปจากอะตอมและเป็นอิสระได้ ถ้าหากได้รับแรงหรือพลังงานจากภายนอกและเมื่อไรก็ตามที่อะตอมสูญเสียวาเลนซ์อิเล็กตรอนไปจะทำให้ โปรตรอน และอิเล็กตรอนในอะตอมไม่เท่ากัน มีผลทำให้อะตอมเริ่มมีสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งขาดอิเล็กตรอนไป เรียกว่าอะตอมถูกไอออนไนซ์ และอะตอมนี้ถูกเรียกว่า เป็น ไอออนบวก ส่วนอะตอมใดได้รับอิเล็กตรอนมาเพิ่ม เรียกว่าอะตอมนั้นถูกไอออนไนซ์ แต่ละอะตอมจะเรียกว่า ไอออนลบ

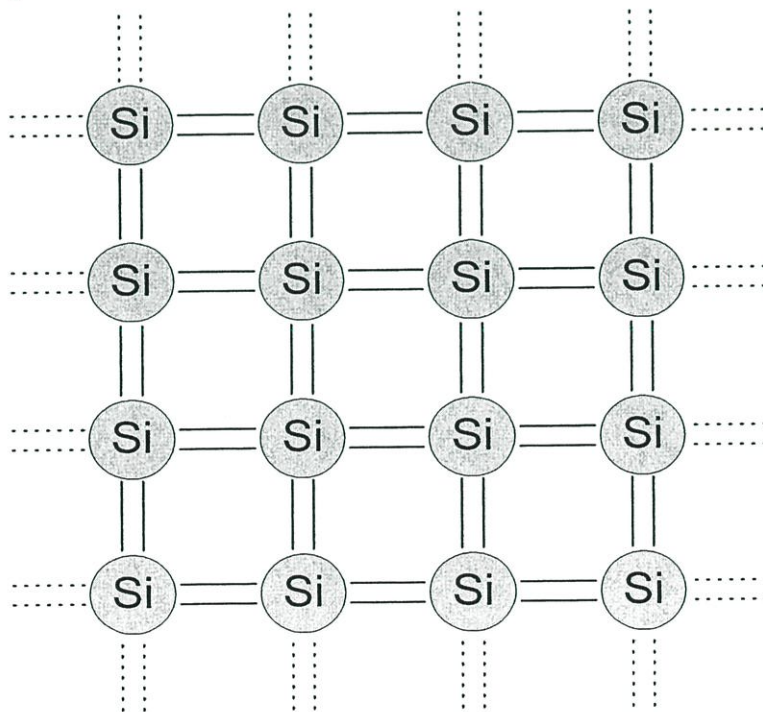
เมื่ออะตอมดังกล่าวจะมีการยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมซิลิคอนเหล่านี้เรียกว่า พันธะ (bond) กลไกในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดพันธะนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะที่เกิดขึ้นในผลึกซิลิคอนเท่านั้น

ในผลึกซิลิคอนเมื่ออะตอมของซิลิคอนเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันจะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมซิลิคอนซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) อยู่ถึง 4 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.1



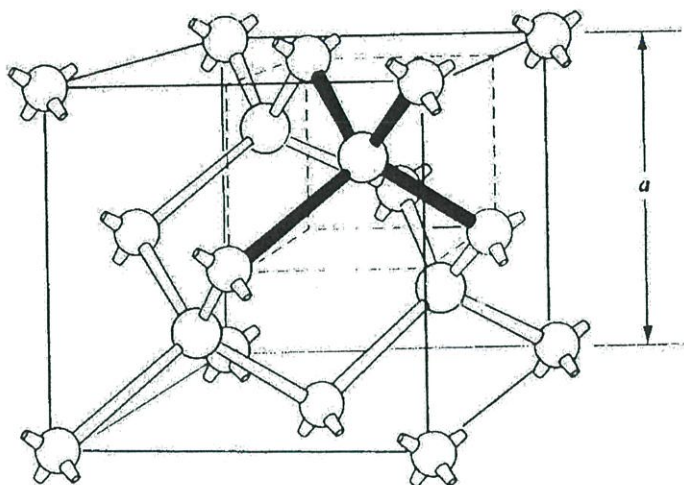
ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างเหมือนอะตอมซิลิคอน

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



ภาพที่ 2.2 แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิคอน

จากภาพข้างต้นจะเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์ในสองมิติ โดยอะตอมจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้ง 4 ร่วมกันกับอิเล็กตรอนนี้เองทำให้อะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะด้วยกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้เองทำให้อะตอมของซิลิคอนต่างๆ มีความมั่นคง และสามารถประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอน ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของผลึกซิลิคอน

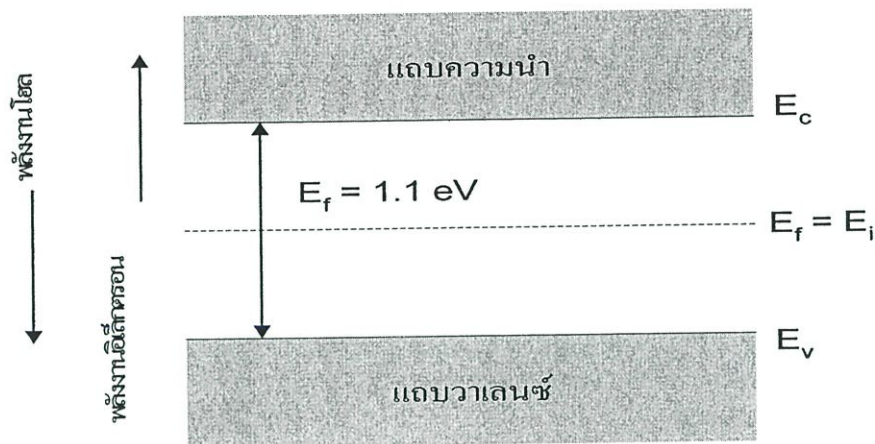
### 2.1.1 ชนิดของผลึกซิลิคอน

ผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ ได้คือ ซิลิคอนบริสุทธิ์ และซิลิคอนเจือปน

#### 2.1.1.1 ซิลิคอนบริสุทธิ์ (Intrinsic Silicon)

ผลึกซิลิคอนซึ่งไม่ได้ถูกเติมหรือเจือปนด้วยอะตอมสารเจือของธาตุอื่น จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในภาพที่ 2.4

จากภาพเป็นลักษณะโครงสร้างพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบความนำและแถบพลังงานต้องห้ามโดยระดับพลังงานซึ่งแสดงเป็นเส้นประโคจรที่อยู่ระหว่างกึ่งกลางแถบวาเลนซ์และแถบความนำ คือระดับพลังงานเฟอร์มิ สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์



ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิคอนบริสุทธ์

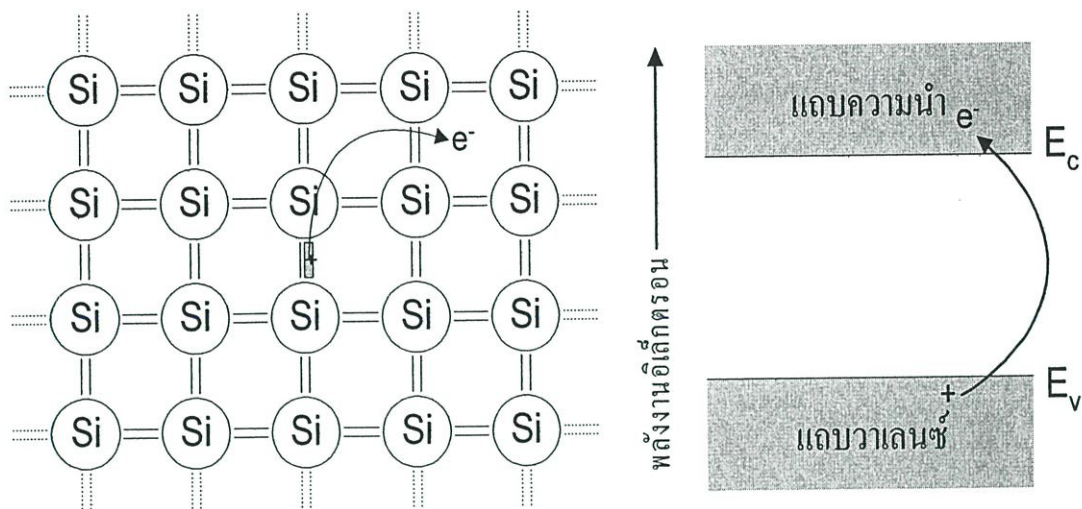
ระดับพลังงานนี้จะถูกเรียกว่าเป็นระดับพลังงานอินทรีนซิค และเมื่อทำการพิจารณา แถบพลังงานของซิลิคอนบริสุทธ์ การที่พันธะโควาเลนซ์ถูกแตกออกเนื่องจากการกระตุ้นด้วยพลังงาน ภายนอก นั่นก็คือการที่อิเล็กตรอนภายในแถบวาเลนซ์ ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้นมากพอที่จะ เปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ในระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดที่ว่าง (โฮล) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยสภาพความนำไฟฟ้าของซิลิคอนบริสุทธ์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ จำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์นี้ ซึ่งการเกิดประจุพาหะในซิลิคอน บริสุทธ์จะเกิดได้เฉพาะในกรณีนี้เท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำ จะมี จำนวนเท่ากับจำนวนของโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์สามารถเขียนสมการได้เป็น

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

โดยที่  $n$  = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

$p$  = ความหนาแน่นของโฮล

$n_i$  = ความหนาแน่นอินทรีนซิค



ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงาน

### 2.1.1.2 ซิลิคอนเจือปน (Extrinsic Silicon)

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

สำหรับอะตอมของธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือปน (impurity) เติมลงไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

#### 1. อะตอมธาตุเจือปนชนิดเอ็น (n-type impurity atom)

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

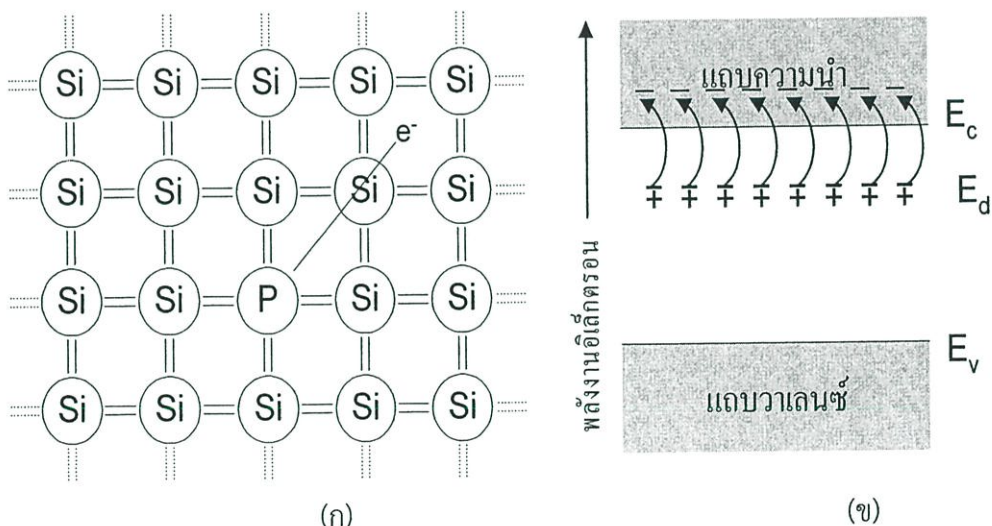
#### 2. อะตอมธาตุเจือชนิดพี (p-type impurity atom)

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

ส่วนซิลิคอนเจือปนที่ได้หลังจากการเติมอะตอมสารเจือแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดเอ็น หรืออะตอมผู้ให้ เช่น อะตอมของ ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 5 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวเมื่ออะตอมถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ซึ่งอยู่รอบๆ เกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ชั้น 4 พันธะ ดังนั้นจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งไม่มีพันธะจับอยู่ อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะอยู่ในอิทธิพลของนิวเคลียสด้วยแรงยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อยเกือบจะเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องปกติพลังงานจากความร้อนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวได้รับพลังงานและหลุดออกมาเป็นอิสระได้ เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างเสรีกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ในสภาพเช่นนี้ปรากฏการณ์พันธะแตกเนื่องจากพลังงานความร้อนก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนซ์หลุดมาเป็นอิสระได้เช่นกัน และทิ้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าชนิดบวกเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ แต่ปริมาณโฮล และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะแตกนี้จะมีจำนวนน้อย ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงมีปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอนที่มากกว่าโฮล ทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดลบ (Negative charge) ดังนั้นเราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่าผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n : ย่อมาจาก negative) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้ และลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังในภาพที่ 2.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

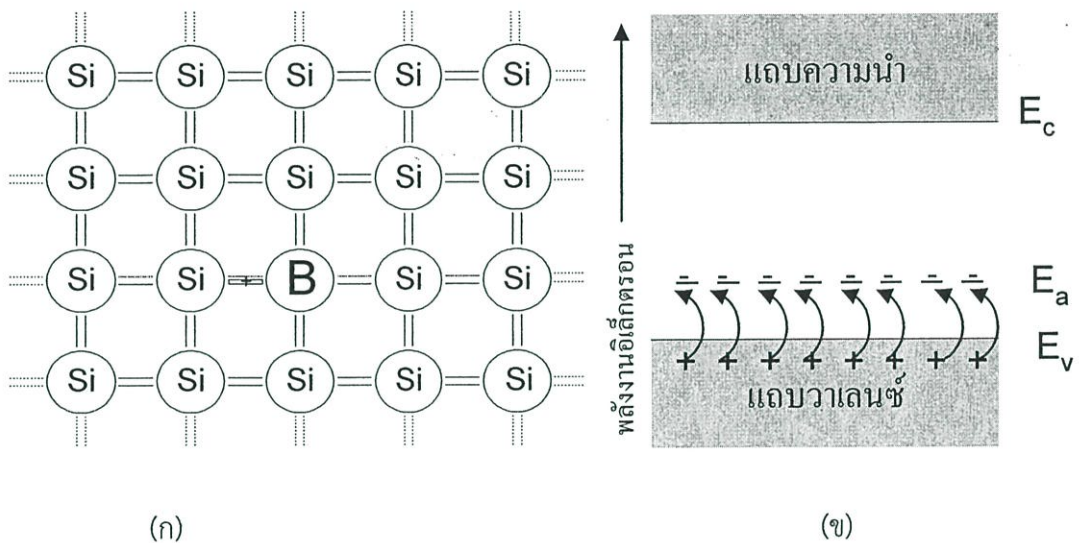


ภาพที่ 2.6 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดเอ็น

2. ผลึกซิลิคอนชนิดพี (p-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี หรือที่เรียกว่า อะตอมผู้รับ เช่น อะตอมของโบรอน ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียง 3 ตัว เมื่ออะตอมสารเจือผู้รับถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมของผลึกซิลิคอนที่อยู่ข้างเคียงอีก 4 อะตอม แต่อะตอมสารเจือชนิดนี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ดังนั้นจึงสามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ได้เพียง 3 ตัวพันธะเท่านั้น ส่วนอีกหนึ่งพันธะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากขาด

อิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนต์เสีย มีโอกาสที่จะเข้าไปอยู่ในที่ดังกล่าวเพื่อทำให้เป็นพันธะที่สมบูรณ์ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากพันธะโควาเลนต์ก็จะทิ้งให้เกิดโฮลขึ้นมา โฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกสามารถนำไฟฟ้าได้ อะตอมของสารเจือชนิดนี้ เมื่อได้อิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามากก็จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนและโฮลจำนวนเล็กน้อยที่สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากพลังงานจากความร้อนซึ่งทำให้พันธะแตกออก ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดพีจึงมีปริมาณของประจุพาหะโฮลมากกว่าจำนวนของอิเล็กตรอน และสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดบวก (positive charge) เราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่า ผลึกซิลิคอนชนิดพี ( p : ย่อมาจาก positive) การเกิดโฮลเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้รับและลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดพีแสดงได้ดังในภาพที่ 2.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 2.7 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดพี

## 2.2 การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer)[2]

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์(thermodynamic) ลักษณะของพลังงานนั้นจะระบุสถานะของระบบ โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าพลังงานจะสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายไม่ได้ เพียงแต่มีความสามารถเปลี่ยนจากภาพหนึ่งไปเป็นอีกภาพหนึ่งได้ ดังนั้นความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและภาพอื่นๆ ของพลังงาน แต่ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ การถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีการทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถวัดได้โดยการสังเกต พบว่าเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นในระบบแล้วจะมีการไหลของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการไหลของ

ความร้อนจากบริเวณเกิดขึ้นได้เมื่อไรก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิในระบบจึงจำเป็นมาก ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและถ้าทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ทำให้สามารถหาฟลักซ์ความร้อน(heat flux) ซึ่งเป็นค่าของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้จากกฎหรือสมการซึ่งเกี่ยวข้องกับระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

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

การถ่ายเทความร้อนคือ การเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 3 แบบ

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

การกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบตามที่กล่าวมาแต่ตามความเป็นจริงนั้นไม่สามารถจะแยกแบบหนึ่งแบบใดได้โดยสิ้นเชิงจาก 3 แบบ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะแยกพิจารณาเป็นแบบใดแบบหนึ่งได้

### 2.2.1 การนำความร้อน (conduction)

การนำความร้อน เป็นภาพหนึ่งของการถ่ายความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังมีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ (kinetic motion) หรือเป็นการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในการไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะมีการไหลของกระแสอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นมา สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายเคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก เป็นต้น อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนเหล่านี้

จากกฎสัมพันธของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์จากการสังเกตจากผลการทดลอง โดยกำเนิดจากบิโอท์ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูรีเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง  $x$  กฎของฟูรีเยร์กำหนดเป็น

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

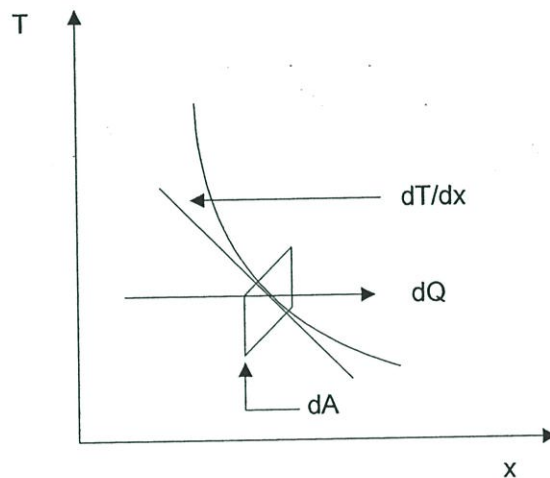
$Q_x$  คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่  $A$  ในทิศทางบวก  $x$

$k$  คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity of material)

$A$  คือ พื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนผ่านและตั้งฉากกับทิศทางของ  $x$

$dT/dx$  คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

จากสมการที่ (2.2) เครื่องหมายลบแสดงว่าแสดงว่าความร้อนที่ไปในทิศทางที่อุณหภูมิที่ลดลงแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดงการนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่  $A$

สมการของฟูรีเยร์อาจเขียนอยู่ในภาพของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

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

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

$$q_y = -k \frac{dT}{dy} \quad (2.5)$$

$$q_z = -k \frac{dT}{dz} \quad (2.6)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในภาพทั่วๆ ไป

$$q = -k \nabla T \quad (2.7)$$

$\nabla$  คือ 3-d grad operator

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

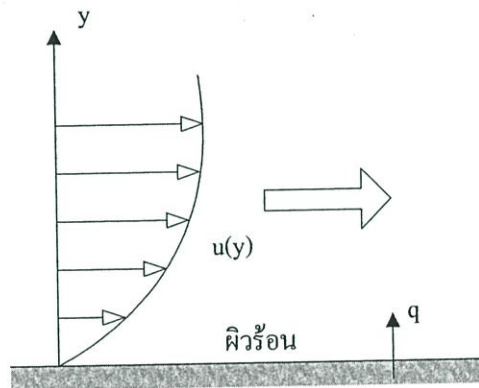
$$\left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q_g}{k} = c_p \rho \left[ \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (2.8)$$

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

### 2.2.2 การพาความร้อน (Convection)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อน

แบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปัมหรือพัดลมทำให้เกิดแรง (forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบ ซึ่งมีผลจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free or natural convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่หยุดนิ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามของอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน  $T_w$  และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ  $T_f$  ตามที่แสดงในภาพ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton’s law of Cooling) ถูกกำหนดเป็น



ภาพที่ 2.9 แสดงการพาความร้อนจากผิววัสดุ

$$q = h[T_w - T_f] \quad (2.9)$$

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

$$q = h[T_f - T_w] \quad (2.10)$$

โดยที่  $q$  เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปที่เย็น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  (Convective heat transfer coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล ภาพทรงของวัตถุ พื้นที่ของการไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล

อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นพาความร้อนแบบบังคับหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

### 2.2.3 การแผ่รังสี(radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอนจนถึงแม้ว่าจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซดังนั้นโดยไม่คำนึงถึงภาพแบบของสาร การแผ่รังสีออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่าโฟตอน ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการตัวกลาง ในความเป็นจริง การถ่ายโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสุญญากาศ

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของสตีเฟน-โบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q = \sigma T_s^4 \quad (2.11)$$

โดยที่  $T_s^4$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ (K) ของผิว

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

โดยที่ผิวนั้นจะเรียกว่า ตัวแผ่รังสีอุดมคติหรือวัตถุดำ (blackbody) ฟลักซ์ความร้อนซึ่งถูกส่งออกโดยผิวจริงจะน้อยกว่าที่ส่งออกจากตัวแผ่รังสีอุดมคติ (ideal radiator) ได้เป็น

$$q = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.12)$$

โดยที่  $\epsilon$  เป็นคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิว เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี(Emissivity)

## 2.3 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MicroElectroMechanical Systems : MEMS) ซึ่งเป็นชื่อเรียกในแถบอเมริกาเหนือ โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ในส่วนอื่นๆ ของโลกก็มีการเรียกชื่อที่แตกต่างกันไป เช่นในประเทศแถบยุโรปจะเรียกว่า เทคโนโลยีระบบจุลภาค (Microsystem Technology : MST) หรือในประเทศญี่ปุ่นจะเรียกว่า กลไกจุลภาค (Micromachines) แต่ทั้งหมดก็หมายความว่าถึงสิ่งเดียวกัน คือ เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและสร้างเทคนิคของการสร้างขนาดเล็ก (Microfabrication) เพราะว่าเทคโนโลยีการผลิตมีลักษณะคล้ายกับกับการผลิตวงจรรวม ทำให้ผลิตได้ปริมาณมาก และราคาถูก[3.4]

MEMS ย่อมาจาก Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) กล่าวคือการรวมคุณสมบัติทางกลกับทางไฟฟ้าเข้าด้วยกันแล้วทำให้มีขนาดเล็ก ดังนั้นความหมายที่ได้ “MEMS” คือ ประดิษฐ์กรรมขนาดไมโครมิเตอร์ซึ่งรวมส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าและเครื่องกลเข้าด้วยกัน ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสร้างโดยอาศัยเทคโนโลยีการผลิตวงจรทรานซิสเตอร์ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ไมโครมิเตอร์ถึงมิลลิเมตร ระบบดังกล่าวนี้สามารถตรวจวัด, ควบคุมและกระตุ้นในระดับต่ำและสามารถทำงานทั้งในแบบอิสระหรือแบบขบวนเพื่อให้ผลในระดับสูงขึ้น นอกจากนี้กล่าวถึงภาพรวมของเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคและการนำไปใช้ประโยชน์โดยเน้นการใช้ประโยชน์ทางด้านแสงการใช้ประโยชน์ของระบบนี้สามารถใช้ได้ในหลายสาขา อาทิ เทคโนโลยีย่นตกรรม เทคโนโลยีการแพทย์ชีวภาพเทคโนโลยีระบบสื่อสาร ระบบหุ่นยนต์ ระบบอากาศยาน เป็นต้น

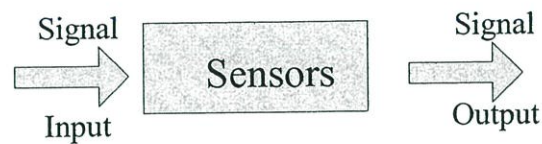
ความแตกต่างระหว่างระบบกลไฟฟ้าจุลภาค(MEMS) และวงจรรวม(IC) โดยที่เทคโนโลยีทั้งสองแบบสามารถใช้วิธีการประดิษฐ์โดยทั่วไปร่วมกันได้ แต่ก็มี ความแตกต่างกันในเรื่องของการออกแบบ(design) และการบรรจุ(packaging) หลายประการดังต่อไปนี้

1. วงจรรวมจะใช้เพียงผลึกสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน หรือสารประกอบกึ่งตัวนำ แต่ MEMS นั้นนอกจากจะใช้ซิลิคอนเป็นฐานรองแล้วยังสามารถใช้วัสดุชนิดอื่น เช่น โพลีเมอร์ วัสดุโลหะ
2. MEMS จะถูกออกแบบให้ทำหน้าที่ต่างๆ มากกว่าวงจรรวม ซึ่งจะถูกรออกแบบมาให้ทำหน้าที่เกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าเท่านั้น
3. MEMS ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ เช่น ไมโครวาล์ว(microvalves) ไมโครปั๊ม เป็นต้น แต่สำหรับวงจรรวมนั้นจะไม่ส่วนที่มีการเคลื่อนที่
4. วงจรรวมจะถูกวางอยู่บนพื้นผิวของซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานรอง ในขณะที่ MEMS มีโครงสร้าง 3 มิติ ที่ซับซ้อน ต้องใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมเชิงกล
5. ในการบรรจุ นั้นวงจรรวมจะแยกออกตัวออกจากสิ่งแวดล้อม แต่ส่วนของ MEMS บางส่วนจะต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นตัวกลางในการทำงาน ดังนั้นการบรรจุจึงซับซ้อนกว่าการบรรจุของวงจรรวม

เทคโนโลยี MEMS แบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1. เซนเซอร์ขนาดจุลภาค หรือ ไมโครเซนเซอร์ (Microsensors)
2. ตัวกระตุ้นขนาดจุลภาค (Microactuators)

ไมโครเซนเซอร์ (Microsensors)



Input Transducer

ภาพที่ 2.10 แสดงหลักการทำงานของเซนเซอร์

ไมโครเซนเซอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานอื่นๆ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้ว ไมโครเซนเซอร์จะถูกสร้างเพื่อตรวจจับปริมาณพลังงานอื่นๆ ที่ไม่ใช่พลังงานไฟฟ้า เช่น ไมโครไบโอเซนเซอร์ (microbio sensors), ไมโครเซนเซอร์ทางเคมี (microchemacl sensors), ไมโครเซนเซอร์ทางความร้อน (microthermal sensor), ไมโครเซนเซอร์แรงดันแรงดัน (micropressure sensor) เป็นต้น

ตัวกระตุ้นขนาดจุลภาค (Microactuators)

เป็นการทำงานของ MEMS อีกภาพแบบหนึ่งที่มีลักษณะการทำงานตรงกันข้ามกับไมโครเซนเซอร์ โดยทั่วไปแล้วจะทำงานควบคู่กับไมโครเซนเซอร์ เช่น วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น ไมโครแอคทูเอเตอร์ได้แก่ โลหะผสมจำภาพ (shape memory alloy) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะภาพร่างตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ผลึกเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric crystal) ที่สามารถปรับเปลี่ยนไปมาระหว่างแรงทางไฟฟ้ากับแรงเชิงกล

## 2.4 การกัตซิลิคอนในสารละลายแบบแอนไอโซทรอปิก[5]

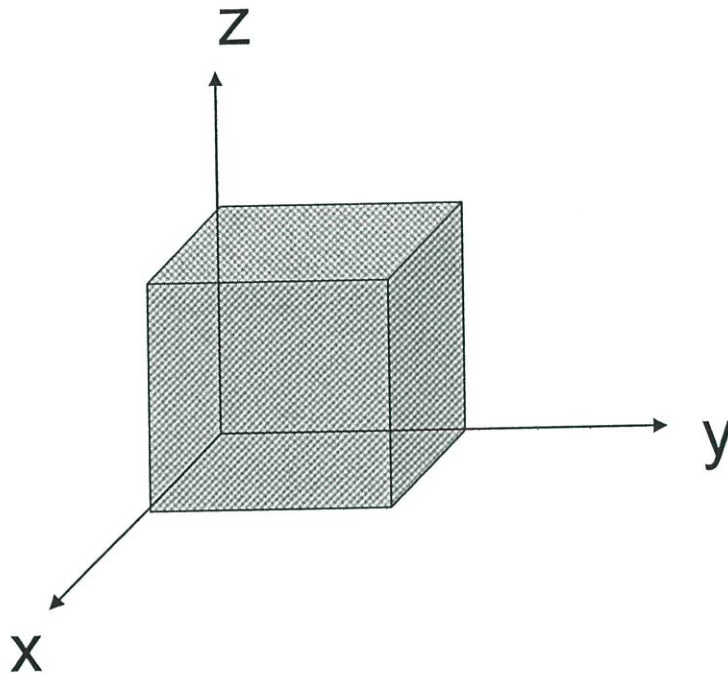
### 2.4.1 โครงสร้างซิลิคอน

ระบบผลึกในซิลิคอน หรือ โอเรียนเตชันของผลึกซิลิคอน

โครงสร้างผลึกมีอยู่หลายแบบ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามภาพร่างของหน่วยเซลล์ โดยให้จุดกำเนิดของแกน xyz อยู่ที่มุมใดมุมหนึ่งของหน่วยเซลล์ แกน x y และ z ระนาบของผลึกซิลิคอนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก สำหรับงานการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะผลึกซิลิคอน ระนาบ (100) ซึ่งวิธีการแสดงระนาบของผลึก คือ โดยการแสดงด้วยค่า “ดัชนีมิลเลอร์” (Miller Indices) ซึ่ง ดัชนีมิลเลอร์ ของระนาบของซิลิคอนจะถูกกำหนดโดยตำแหน่งจุดที่ระนาบนั้นตัดแกน x, y และ z

วิธีการหาทรานซ์มิลเลอร์ สำหรับระนาบผลึกสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

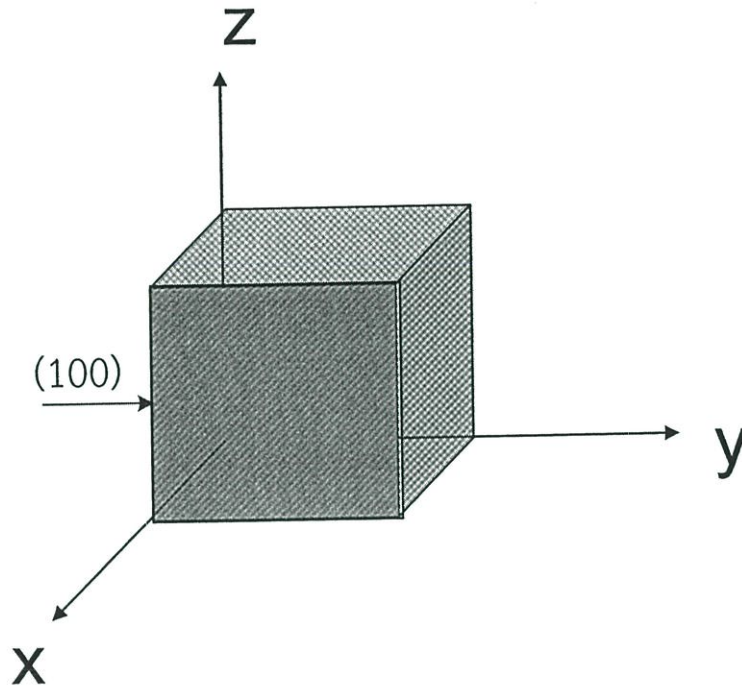
1. เลือกระนาบที่ไม่ผ่านจุด  $(0,0,0)$
2. หาจุดตัดแกน  $x, y, z$
3. ทำจุดตัดให้เป็นส่วนกลับ  $(1/x \ 1/y \ 1/z)$
4. ทำให้ผลหารเป็นเลขจำนวนเต็มทีลงตัวน้อยๆ
5. ใส่ใน ( ) โดยไม่มีจุดภาค ( , ) กั้น
6. ถ้าติดลบให้ใส่ขีดเส้นไว้เหนือตัวเลขนั้น



ภาพที่ 2.11 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ  $x y z$

ดังนั้นดัชนีมิลเลอร์ของระนาบซึ่งตัดแกน  $x = 1$  ,  $y = \infty$  ,  $z = \infty$  เขียนได้ (100) หรือ

เรียกว่า ระนาบ (100) แสดงดังภาพ

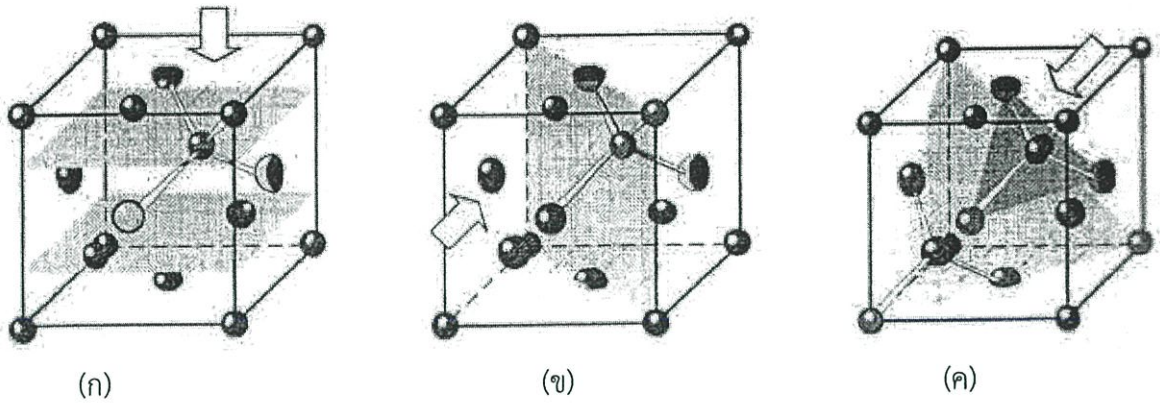


ภาพที่ 2.12 แสดงหน่วยเซลล์ระนาบ (100)

ในโครงสร้างอะตอมซิลิคอนจะมีระนาบต่างๆ กัน เช่น ระนาบ(100) ระนาบ(111) ระนาบ (110) จะมีจำนวนพันธะที่ถูกกัดออกไปก่อน และจำนวนพันธะที่จะถูกดึงออกสู่สารละลาย ไม่เท่ากัน ดังจะกล่าวต่อไปนี้

1. ระนาบ(100) อะตอมที่ถูกกัดออกจะมี 2 อะตอมที่อยู่ใต้ผิวระนาบและมี 2 อะตอมที่ถูกกัดออกก่อน ดังนั้นการที่จะดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึง 2 พันธะ
2. ระนาบ(111) จะมี 3 อะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมี 1 อะตอม ที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้านี้จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด
3. ระนาบ(110) จะมี 3 อะตอมอยู่ที่ผิวหน้า 1 อะตอมอยู่ใต้ผิวหน้า และ 1 อะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้านี้ แม้ว่าจะมี 2 อะตอมที่มีพันธะร่วมกับอะตอมตรงกลางที่บนผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดไปพร้อมกันกับ ระนาบ(100) จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงน้อยกว่าระนาบ(100) และระนาบ(111)

ภาพที่ 2.13 แสดงจำนวนพันธะในแต่ละระนาบของซิลิคอน ซึ่งแบ่งความใกล้เคียง จากสารละลายเป็น 3 ระดับ คือ อะตอมที่ถูกกัดไปก่อน อะตอมที่กำลังถูกกัด อะตอมที่จะถูกกัดเป็นอันดับต่อไป



ภาพที่ 2.13 แสดงพันธะในอะตอมซิลิคอนระนาบต่าง ๆ (ก) ระนาบ(100) (ข) ระนาบ(110)  
 (ค) ระนาบ(111) (ลูกศรแสดงทิศทางการเข้าไปกัดของสารละลายไอโซทรอปิก)  
 ที่มา : วิทยานิพนธ์, ศรีเมฆ รัตนชัย, 2542

เนื่องจากการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกนั้นเป็นการเลือกกัดแต่ละระนาบไม่เท่ากัน ดังนั้น ร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นภาพทรงเรขาคณิตที่แน่นอนอน ในตารางที่ 2.1 เป็นความสัมพันธ์ของมุมระหว่างระนาบ  $\{HKL\}$  และ  $\{hkl\}$  ซึ่งเป็นตารางที่ใช้ตรวจสอบว่า ระนาบที่เหลือจากการกัดควรเป็นระนาบใดบ้าง

ตารางที่ 2.1 มุมระหว่างระนาบ {HKL} และ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของแต่ละระนาบต่างๆ [6,7]

{HKL}	{hkl}	มุมระหว่างระนาบ {HKL} และ {hkl}				
100	100	0.00	90.00			
	110	45.00	90.00			
	111	54.74				
	210	26.56	63.43	90.00		
	211	35.26	65.90			
	221	48.19	70.53			
	310	18.43	71.56	90.00		
	311	25.24	72.45			
	110	110	0.00	60.00	90.00	
		111	35.26	90.00		
210		18.43	50.77	71.56		
211		30.00	54.74	73.22	90.00	
221		19.47	45.00	76.37	90.00	
310		26.56	47.87	63.43	77.08	
311		31.48	64.76	90.00		
411		10.00				
113		64.7				
115		74.2				
	117	78.6				

#### 2.4.2 ปฏิบัติการกัดซิลิคอน

การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกได้กลายมาเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจากซิลิคอน กระบวนการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก คือ กระบวนการที่สารละลาย(Etchant) กัดเนื้อสารซิลิคอนในแต่ละระนาบของซิลิคอนไม่เท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าอัตราการของสารละลายแปรตามระนาบของซิลิคอน

สารเคมีที่ใช้กัดซิลิคอนได้นั้นส่วนใหญ่จะประกอบด้วยผสมกับน้ำ เช่น โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เอธิลีนไดเอมีน(Ethylenediamine) ไฮดราซีน(Hydrazine) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น ตัวกัดเหล่านี้มีทั้งที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิก(Isotropic etching) หรือ แอนไอโซทรอปิก(anisotropic etching) ซึ่งอัตราการกัดอาจจะขึ้นกับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิสารละลาย

ตัวกัดเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆกันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกหน้ากากป้องกันการกัดที่เหมาะสม แสดงในตาราง 2.2

สารละลายกัดที่สำคัญที่มีการรายงานกันส่วนมากก็คือ สารละลาย Ethylenediamine ผสม Pyrocatechol ในน้ำ DI หรือ ใช้ชื่อย่อว่า EPD นั้นมีข้อดีหลายประการคือ

1. เป็นตัวกัดประแอนไอโซทรอปิก
2. เป็นตัวกัดที่มีการเลือกกัดได้เด่นชัดที่สุด สามารถใช้หน้ากากป้องกันการกัดได้หลายชนิด
3. ขึ้นกับความเข้มข้น ซึ่งอัตราการกัดน้อยมากถ้าความเข้มข้นสารเจือปนสูง

สารละลาย KOH ที่อาจผสม Isotropy alcohol ก็ได้ ซึ่งเป็นตัวกัดที่ขึ้นกับทิศทางระนาบ และมีอัตราของการกัดที่ระนาบ (100) ต่อ ระนาบ (111) สูงที่สุด และเกิด undercutting ได้ชั้นออกไซด์ต่ำที่สุด แต่มีจุดด้อยเนื่องจาก KOH นั้นกัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยอัตราที่สูงจึงทำให้การกัดด้วย KOH ต้องอาศัยหน้ากากหรือการป้องกันแบบอื่น

สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(Hydrofluoric acid) + กรดไนตริก(Nitric acid) + กรดอะซิติก(Acetic acid) หรือเรียกว่า HNA นั้นเป็นสารละลายประเภท ไอโซทรอปิก ซึ่งอัตราการกัดแปรผันอย่างมากและยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือปน อัตราส่วนผสมที่ต่างกันจะให้อัตราการกัดที่เปลี่ยนแปลงมาก หน้ากากสำหรับกรด HNA นั้น ทั้ง  $\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  นั้นไม่สามารถป้องกันการกัดระยะยาวได้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารละลายกัดสำหรับซิลิคอน และหน้ากากป้องกันที่เหมาะสม[8]

สารละลายกัด	ส่วนผสม	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการกัด (um/min)	อัตราการกัด แอนไซ ทรอปิก (100)/(111)	ความอิสระ ต่อความ เข้มข้นของ สารเจือ	หน้ากากกัน
HF HNO3 (water+ CH <sub>3</sub> COOH)	10 ml 30 ml 80 ml  25 ml 50 ml 25 ml  25 ml 50 ml 25 ml	22   22   22	0.7-3.0   40   7.0	1:1   1:1   1:1	≤ 10 <sup>17</sup> cm <sup>3</sup> หรือ p จะลด อัตราการกัดลง 150 เท่าไม่ ขึ้นกับความ เข้มข้นสารเจือ  ----	SiO <sub>2</sub> (300Å/min)  Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>   SiO <sub>2</sub> (700Å/min)
Ethylene diamine Purocatechol (น้ำ)	750 ml 120 ml 100 ml  750 ml 120 ml 240 ml	115   115	0.75   1.25	35:1   35:1	boron ≥ 7x10 <sup>9</sup> cm-3 จะลด อัตราการกัดลง ประมาณ 50 เท่า	SiO <sub>2</sub> (2Å/min) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (1Å/min) Au,Cr,Ag, Cu,Ta
KOH (น้ำหรือ isopropanol)	44 gr 100 ml  50 gr 100 ml	85   85	1.4   1.0	400:1   400:1	boron ≥ 7x10 <sup>20</sup> cm-3 จะลดอัตราการ กัดลงประมาณ 20 เท่า	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> (14Å/min)
H <sub>2</sub> N <sub>4</sub> (น้ำหรือ isopropanol)	100 gr 100 ml	100	2.0	---	ไม่ขึ้นกับความ เข้มข้นสารเจือ	SiO <sub>2</sub> Al
NaOH	10 gr 100 ml	65	0.250-1.0	---	boron ≥ 7x10 <sup>20</sup> cm-3 จะลดอัตราการ กัดลงประมาณ 10 เท่า	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub> (7Å/min)

กลไกการกัดซิลิคอนนั้นมี 4 ขั้นตอน

1. การฉีกโฮลจากสารละลายเข้าสู่ซิลิคอน เพื่อยกระดับสถานะออกซิเดชัน(oxidation state) ของซิลิคอนเป็น  $\text{Si}^+$
2. การรวมตัวของอนุมูล  $\text{OH}^-$  และ  $\text{Si}^+$  เป็นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำได้
3. การรวมตัวของซิลิคอนและองค์ประกอบในสารละลายกลายเป็น complex agent
4. การดึงซิลิคอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายออกสู่น้ำ ทำให้ซิลิคอนถูกกัดออกไปจากชั้นตอนทั้งสี่ สารเคมีที่จะกัดซิลิคอนได้ต้องแตกตัวเป็นโฮลกับซิลิคอนและตัวมันเองต้องมีอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้น รวมทั้ง complex agent นั้นต้องสามารถละลายได้ด้วยน้ำ ใน HNA นั้นกรดไนตริกจะเป็นผู้จ่ายโฮล และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลออกมอย่างรุนแรงมากในขณะที่ฟลูออรีนใน HF จะรวมตัวกลายเป็น  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  ที่ละลายน้ำได้

สำหรับสารละลาย EPD นั้นเป็น Ethylene diamine จะรวมกับน้ำและให้โฮลแก่ซิลิคอน Pyrocatechol จะรวมกับซิลิคอนกลายเป็น  $\text{Si}(\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2)_3$  ที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นถ้าไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ EPD จะไม่สามารถกัดซิลิคอนได้

สำหรับ KOH การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก นั้นไม่ทราบกลไกที่แท้จริง แต่คาดว่ามีการกัดดังต่อไปนี้

1. อนุมูลไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับกับแขนว่างของซิลิคอน สำหรับแขนยื่นของซิลิคอนในระนาบ (100) มีสองแขน ในขณะที่มีเพียงแขนเดียวในซิลิคอนระนาบ(111) ขั้นตอนนี้ใช้พลังงานไอออนไนเซชัน 0.35 อิเล็กตรอนโวลต์
2. พันธะซิลิคอนหลัก(back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป(เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ(100) และเท่ากับ 3 สำหรับ ระนาบ(111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น  $\text{Si}(\text{OH})_2^+$  หรือ  $\text{SiOH}^3^-$  (เรียกอนุมูลซิลิคอนไฮดรอกไซด์)
3. ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย
4. กรด Orthosilic acid แตกตัวเพื่อรวมกับน้ำเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน

#### 2.4.3 การกัดซิลิคอนด้วยสารเคมี EPD[5]

เอธิลีนไดอะมีน(E) ผสมไพโรแคทีคอล(P) น้ำบริสุทธิ์(D)

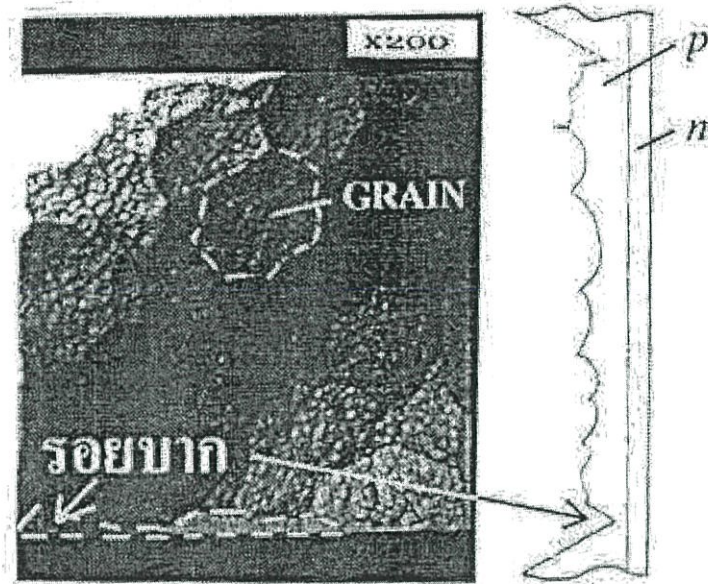
เอธิลีนไดอะมีนเป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง และมีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีจุดเดือดประมาณ  $120^\circ\text{C}$  เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดการออกซิไดซ์กับอากาศแล้วสีของสารเคมีจะคล้ำขึ้น โดยจะมีการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนไพโรแคทีคอลเป็นเกลือของแชนจ์ มีสีเทาควันบุรี่ ซึ่งสามารถดูดความชื้นได้ดี เมื่อผสมกับ เอธิลีนไดอะมีน และน้ำบริสุทธิ์จะได้สีน้ำตาลเข้ม สารละลาย EPD ที่ได้จะมีสีชาแก่จนถึงสีน้ำตาลไหม้ถ้าเติมไพโรแคทีคอลมากขึ้น การเตรียมสารละลายเป็นเวลานานขึ้นจะทำให้ได้สีเข้มขึ้น

การเตรียมสารละลาย EPD ในบีกเกอร์ให้ความร้อนโดย Hot plate แล้วทำการกวนสารละลายตลอดเวลาด้วยแท่งแม่เหล็กกวน ทำการกัดซิลิคอนอิพิเซียลชนิด n บนฐานรองซิลิคอนชนิด p หนา (100) ซึ่งมีสภาพความต้านทานชั้นอิพิเซียลประมาณ 8-12 โอห์ม-เซนติเมตรและมีสภาพความต้านทานของฐานรองซิลิคอนประมาณ 12 โอห์ม-เซนติเมตร ต่อจากนั้นสร้างมาร์คต้นแบบที่มีลวดลาย(แพทเทิร์น)ทดสอบเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2x2 mm. โดยเริ่มจากนำแผ่นซิลิคอนมาสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง 3 ชั่วโมง ตามด้วยแบบชื้น 2 ชั่วโมง และแบบแห้ง 1 ชั่วโมง ซึ่งได้ความหนาประมาณ 6,000 อังสตรอม โดยสามารถทนต่อการกัดด้วย EPD ได้ประมาณ 3,000 นาที ที่อุณหภูมิ 100 °C ก่อนเริ่มกระบวนการกัดต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกรดไนตริกร้อน 5 นาที ล้างด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ล้างไขมันด้วยไตรคลอโรเอธิลีนและอะซิโตน ทำความสะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งจุ่มในสารละลาย HF 10% ล้างออกด้วยน้ำ DI และเป่าด้วยก๊าซให้แห้ง

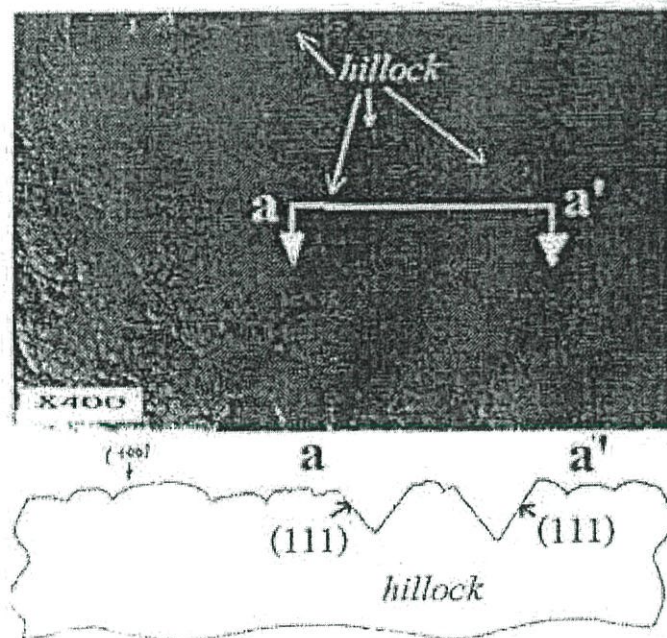
#### ผลของความเข้มข้นของ EPD

อัตราส่วนที่เป็นที่นิยมกันทั่วไป คือ E 50 ml. : P 8 กรัม : DI 16 ml. โดยเริ่มทำการกัดซิลิคอนที่อุณหภูมิ 100 °C และกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที แล้วสังเกตชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 1 และ 2 ชั่วโมง ผิวงานที่ได้มีลักษณะเป็นแบบผิวส้มแสดงดังภาพที่ 2.14 ลักษณะเป็นปุ่มของผิว สัมเรียกว่าเม็ดเกรน(Gain) พบว่าเมื่ออัตราส่วน E 50 ml. : P 8 กรัม : DI 16 ml. แต่เปลี่ยนปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จาก 8 กรัม เป็น 12 กรัม และ 15 กรัม ตามลำดับ พบว่าเกิดฟองอากาศหนาแน่นมากขึ้น ณ บริเวณที่ถูกกัด พื้นผิวจะขรุขระมากขึ้น(ขนาดของเกรนจะใหญ่ขึ้น) เมื่อวัดอัตราการกัดด้วยการวัดความลึกของหลุมที่ถูกกัด พบว่าจะมีอัตราการกัดเพิ่มขึ้นจากประมาณ 1.4 เป็น 1.6 และ 1.7 ไมครอนต่อชั่วโมง ตามลำดับ แต่จะเกิดหลุมปริมาตรซึ่งเรียกว่า hillock ขึ้นบนไดอะแฟรม ดังภาพที่ 2.15 จะพบพฤติกรรมที่คล้ายกันถ้าทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วน เอธิลีนไดอะมินต่างๆกันไป พบว่าอัตราส่วน E : P ต่ำกว่า 50 : 8 จะทำให้เกิด hillock มากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สำคัญสำหรับปฏิกิริยาหลักซึ่งจะดึงซิลิคอนให้กลายเป็นสารประกอบออกซาลิกซึ่งสามารถละลายน้ำได้ จากการทดลองจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิวและอัตราการกัดเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนด้วย DI ไม่ว่าอัตราส่วนใดๆพื้นผิวไดอะแฟรมจะมีความลาดเอียงจากขอบด้านหนึ่งของไดอะแฟรมไปอีกด้านหนึ่งเสมอ แสดงดังภาพที่ 2.16 นอกจากนี้ตรงขอบจะเกิดรอยบาก(notch)(ภาพ 2.14) ซึ่งเป็นข้อควรระวังในการกัดไดอะแฟรมที่มีความหนาต่ำกว่า 15 ไมครอนเนื่องจากไดอะแฟรมจะขาดเสียก่อน

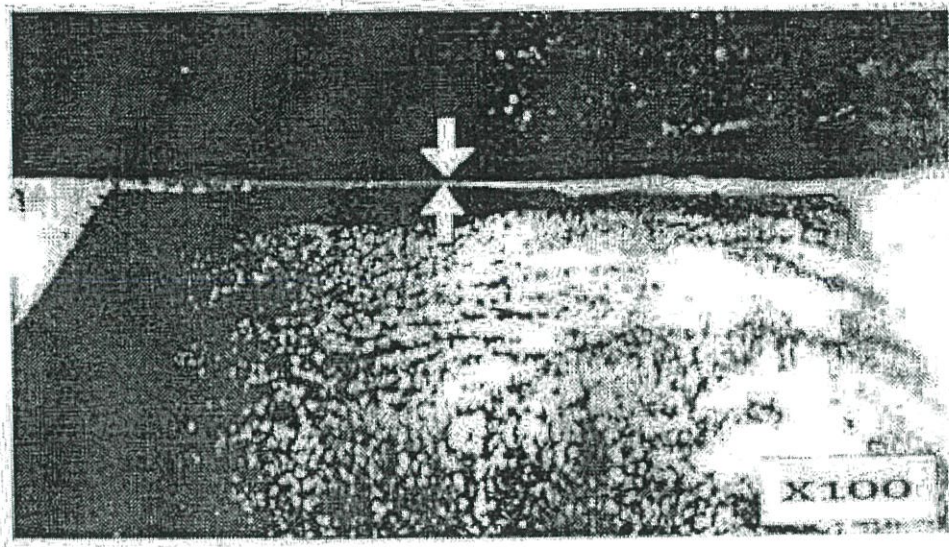
เทคนิคการควบคุมความหนาของไดอะแฟรมก็คือกัดแผ่นซิลิคอนไปจนกระทั่งแสงสามารถทะลุจนเห็นไดอะแฟรมได้ ซึ่งต้องใช้ร่วมกับการคำนวณเวลากัด



ภาพที่ 2.14 แสดงลักษณะคล้ายผิวส้มของไดอะแฟรมซิงค์คอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50 : 8 : 16 ที่  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 200 เท่า)  
ที่มา : วิทยานิพนธ์, ศรีเมฆ รัตนชัย, 2542



ภาพที่ 2.15 แสดงซิงค์คอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50 : 12 : 16 ที่  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 400 เท่า)  
ที่มา : วิทยานิพนธ์, ศรีเมฆ รัตนชัย, 2542



ภาพที่ 2.16 แสดงภาพ SEM ของภาคตัดขวางไดอะแฟรมซิลิโคนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วยอัตราส่วน 50 : 8 : 16 ที่  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงความลาดเอียงที่มาก : วิทยานิพนธ์, ศรีเมฆ รัตนชัย, 2542

## บทที่ 3

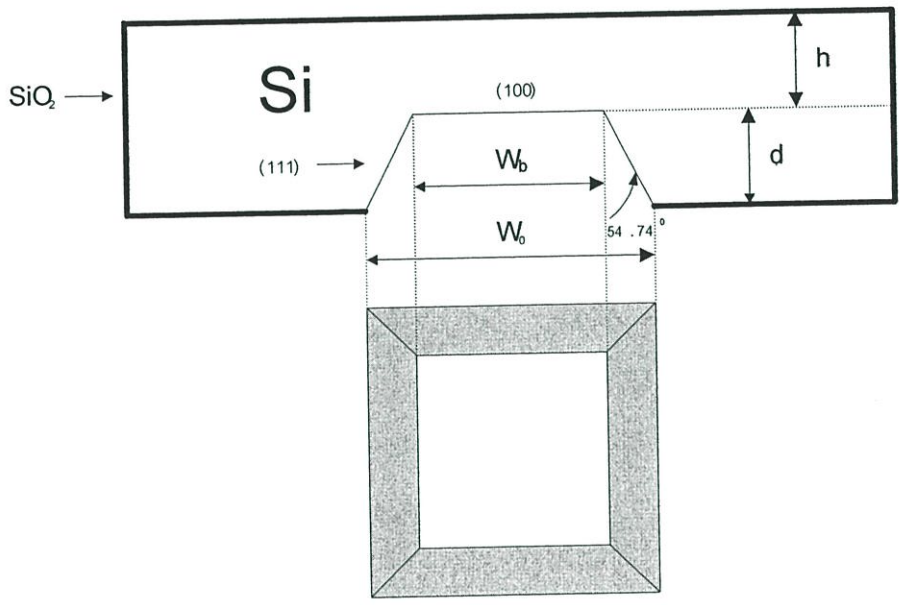
### การออกแบบและกระบวนการสร้าง

การออกแบบและสร้างต้นแบบไมโครฮีตเตอร์(microheater) โดยเริ่มต้นจากการกำหนดคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ แล้วจึงนำคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์มาออกแบบให้มีขนาดความกว้างและยาวเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการแล้ว

เมื่อได้ลวดลายต้นแบบแล้วจึงนำไปผลิตเป็นกระจกมาสก์ (photographic masks) โดยการถ่ายย่อส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างบนผลึกซิลิคอน ซึ่งกระบวนการสร้างจะเริ่มต้นจากการเลือกชนิดความหนา และพิกัดความต้านทานของผลึกฐานรองซิลิคอน หลังจากนั้นจะนำแผ่นผลึกเข้าไปในกระบวนการสร้างที่เป็นลำดับขั้นตอนที่แน่นอนเช่น การทำความสะอาดแผ่นผลึกเริ่มแรก กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการกัดฐานรองเพื่อสร้างไดอะแฟรม กระบวนการเมทัลไลเซชัน เป็นต้น ซึ่งเมื่อจบขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้ แล้วจึงนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไมโครฮีตเตอร์และการประยุกต์เป็นตัวตรวจจรั้อตราการไหลของก๊าซ

#### 3.1 การออกแบบไดอะแฟรม

ไดอะแฟรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของซิลิคอนซึ่งเกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ในสารละลายซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกให้เป็นไดอะแฟรมบางภาพสี่เหลี่ยมโดย มีผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) โดยต้นแบบของไดอะแฟรมได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) หลุมที่เกิดจากการกัดจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยจะต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมขนานแสดงดังภาพที่ 3.1 โดยฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) จะถูกกัดเป็นโครงสร้างซิลิคอนไดอะแฟรมเพื่อลดการสูญเสียความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ โดยสารละลายที่ใช้กัดคือ สารละลาย Ethylenediamine ผสม Pyrocatechol ในน้ำ DI เรียกย่อๆว่า EPD โดยมีอัตราส่วน E:P:D 750 cc :120 g:100 cc จะมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก[5,9,10]



ภาพที่ 3.1 รายละเอียดการกัดซิลิคอนโดยสารละลาย

ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแพรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

$$W_b = W_0 - 2d \cot 54.74^\circ$$

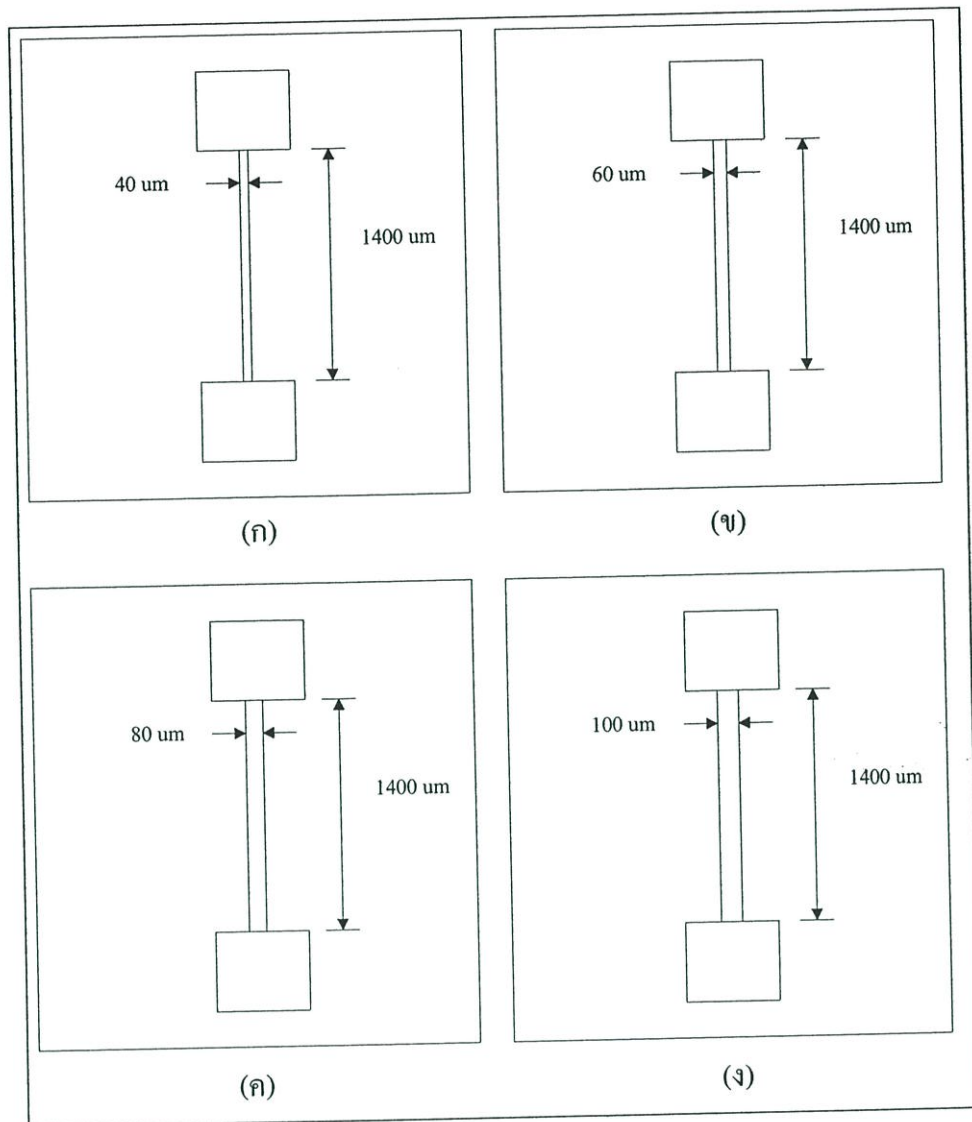
$$W_b \approx W_0 - \sqrt{2}d \tag{3.1}$$

- โดยที่  $W_0$  คือ ขนาดของต้นแบบ
- $W_b$  คือ ขนาดของไดอะแพรมหลังการกัด
- $d$  คือ ความลึกของไดอะแพรม
- $h$  คือ ความหนาของไดอะแพรม

การทดลองในงานวิจัยฉบับนี้ ได้กำหนดค่าความหนาของไดอะแพรมให้มีความหนาน้อยกว่า 50 ไมครอน โดยต้องการให้ขนาดของช่องไดอะแพรมหลังการกัดมีขนาด  $1400 \times 1800 \mu\text{m}^2$  เมื่อใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนหนา 450 ไมครอน ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขนาดไดอะแพรมต้นแบบ ( $W_0$ ) จากสมการ 4.1 ซึ่งได้เป็น 1966 และ 2366 ไมครอน ตามดับ

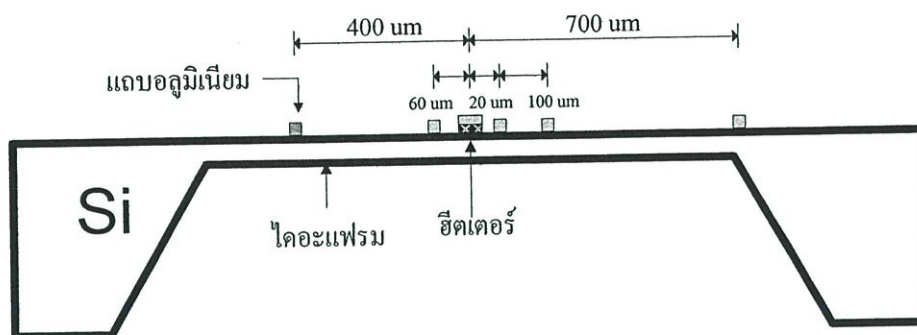
### 3.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์ ให้มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน แสดงดังภาพที่ 3.2 และโดยมีขนาดความยาวเท่ากันคือ 1400 ไมครอน



ภาพที่ 3.2 การออกแบบไมโครชิตเตอร์

และยังมีแถบความต้านทานที่สร้างจากฟิล์มของโลหะมีขนาดความกว้าง 20 ไมครอน และยาว 1200 ไมครอน อยู่ห่างจากไมโครชิตเตอร์ 20 60 100 400 และ 700 ไมครอน ตามลำดับ โดยโครงสร้างทั้งหมดจะอยู่บนไดอะแฟรมของซิลิคอนมีขนาด  $1400 \times 1800$  ไมครอน  $\times$  ไมครอน มีขนาดความหนาไดอะแฟรมคือ 25 ไมครอน แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์

### 3.3 กระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ด้วยฟิล์มอลูมิเนียม

ในกระบวนการสร้างฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อนอยู่บนโครงสร้างไดอะแฟรมนั้น จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนการผลิตกระจกมาสก์ต้นแบบและ ขั้นตอนการสร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอน

#### 3.3.1 การผลิตกระจกมาสก์ต้นแบบ

เมื่อได้ต้นแบบของไมโครฮีตเตอร์จึงนำต้นแบบนั้นมาเขียนลวดลายต่าง ๆ ลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยการออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริง ด้วยการออกแบบลวดลายทุกชิ้นลงบนกระดาษกราฟต้นแบบแผ่นเดียวกัน เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อน จากนั้นจึงนำไปทาบด้วยแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาร์ซีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตนั้นจะใช้ไมโครคัตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งปัจจุบันไม่ได้ใช้แล้ว

ซึ่งปัจจุบันการออกแบบลวดลายด้วยคอมพิวเตอร์ มีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายด้วยการสร้างมาสก์ต้นแบบลงแผ่นพลาสติก แล้วนำแผ่นต้นแบบไปติดกับกระจกขนาด 3x3 นิ้ว

#### 3.3.2 มาสก์ต้นแบบไมโครฮีตเตอร์

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาสก์ต้นแบบทั้งหมด 4 มาสก์ ด้วยกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาสก์ที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม เพื่อเปิดช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนระนาบ 100 เพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการกัดด้วยสารละลาย EPD เพื่อให้ได้เป็นโครงสร้างไดอะแฟรม

มาสก์ที่ 2 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะไทเทเนียม

มาสก์ที่ 3 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียม

มาสก์ที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียมสำหรับวัดการกระจายความร้อน

## ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ในการสร้างไมโครฮาร์ดแวร์ ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอนนั้นก็จะทำการสร้างเป็นสองขั้นตอน คือ การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้างไมโครฮาร์ดแวร์

### การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

สำหรับการสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ ได้ใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่มีนิยมนกันมาก โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีขั้นตอนการสร้างพื้นฐานดังนี้ คือ

1. การออกซิเดชัน (oxidation)
2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
3. การสร้างลวดลายโลหะ

### กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในอุณหภูมิ  $1000-1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไป

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประเภทแรกคือ ใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิคอน และป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับผิวซิลิคอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนกึ่งที่เรียกว่าเกตออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนียวนำไปเกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิคอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวของซิลิคอนในส่วนอื่น ๆ และจากวัตถุประสงค์ในการใช้งานชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กล่าวมา ทำให้ต้องการที่จะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกันเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่จะใช้เป็นหน้ากัก

ป้องกันการแพร่ระดมสารเจือ จำเป็นที่จะต้องมีความหนาประมาณ 4000-5000 Å ขึ้นไปและชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้เป็นหน้ากักป้องกันสารเคมีที่ใช้กัดซิลิคอนให้เป็นไดอะเพรมต้องมี ความหนาไม่ต่ำกว่า 10000 Å ซึ่งความหนาขนาดนี้ การสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียวจะทำให้ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีของออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากักจะทำการสร้าง โดยใช้วิธีการสร้างโดยวิธีการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบขึ้นและแบบแห้งอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้าง ซิลิคอนไดออกไซด์แบบขึ้นสามารถสร้างความหนาได้เร็ว แต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นจะต้องสร้างสลับกับการสร้างแบบแห้ง

### กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพต้นแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้ลำแสง เพื่อเปิดช่องซิลิคอนสำหรับการแพร่ระดมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและมีความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับ การปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีจะกล่าวถึงในหัวข้อลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

### กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวมหรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่จะเคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

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

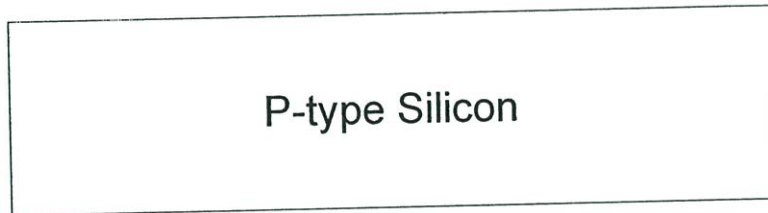
สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะเลือกใช้โลหะ (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ 1  $\mu\text{m}$  แล้วจึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยขบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกัดเป็นลวดลายตามที่ต้องการออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านขบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ประมาณ 12 นาที เพื่อให้ รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

## ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไมโครฮาร์ดดิสก์ด้วยโลหะอลูมิเนียม

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

### 1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดที่ระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิโกัดความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกเป็น 450 ไมโครเมตร โดยภาพตัดขวางแสดงดังในภาพที่ 3.4



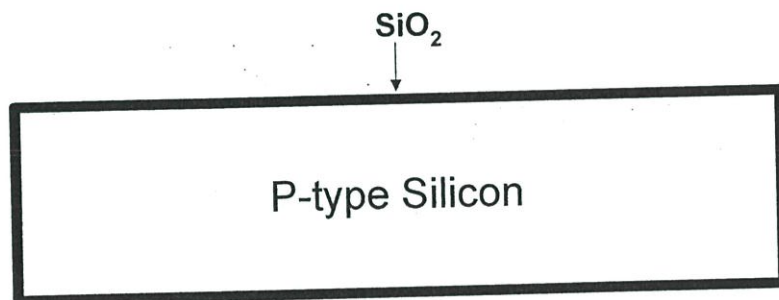
ภาพที่ 3.4 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก

2. ทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้
  - ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
  - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
  - กัดผิวหน้า ด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
  - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
  - ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
  - 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 Å จึงทำการออกซิเดชันโดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ที่ไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 °C

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

### 4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการอบให้แห้งแล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาส์ก I สำหรับรายละเอียดของ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีของน้ำยาไวแสง(Photo resist) มีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาทีที่ด้านหลัง
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาส์กที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลตออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  เป็นเวลา 10 วินาทีที่ด้านหลัง

- การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ 2 ครั้ง ๆ ละ 1.5 นาที จุ่มน้ำยาทำจุ่มในน้ำยา developer 2 แก้ว ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
  - รอบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เคลือบอยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
  - ทาด้านหน้าแผ่นผลึกด้วย น้ำยาไวแสง
  - รอบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

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

#### 6. การลอกชั้นสารไวแสง

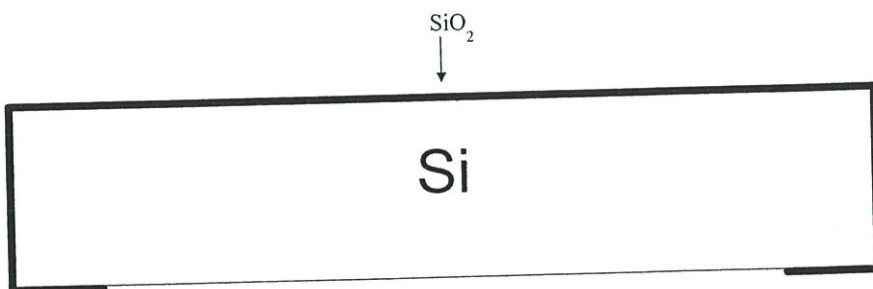
สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มไนโตรโครโกลเอททีลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

## 8. กระบวนการกัดเป็นไดอะแฟรมบาง

ใช้น้ำยาส่วนผสมของ Ethylene diamine : Pyrocatechol : DI Water (EPD) ในอัตราส่วน 50:8:16 ในขณะที่กัดจะใช้อุณหภูมิ 95-100 °C กัดให้ได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการ

## 9. การลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

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

## 10. ทำความสะอาดผิวผลึก

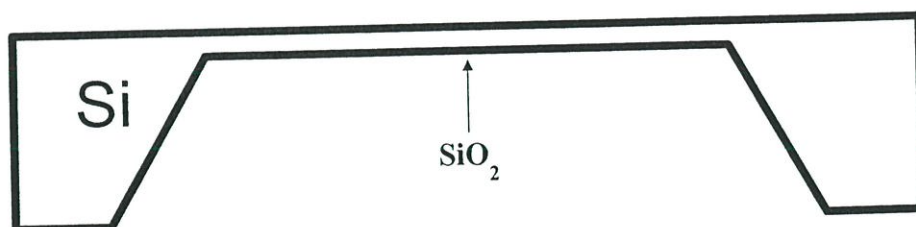
- ต้มในไตรโครโลเอททิลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## 11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

เมื่อได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

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

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

## 12. การเคลือบชั้นไทเทเนียม (Ti) ในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นไทเทเนียม หนา ประมาณ  $0.5 \mu\text{m}$

## 13. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

ใช้กระจกมาสก์ที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไทเทเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ  $85-90^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที
- เคลื่อน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ  $85-90$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ II ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์

แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ  $85-90^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที

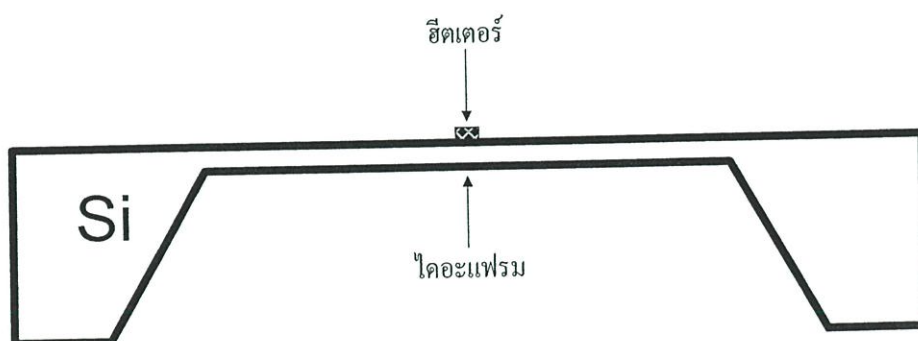
## 14. การกัดชั้นไทเทเนียม [11,12]

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

## 15. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แสดงการสร้างแถบไททาเนียม

#### 16. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1  $\mu\text{m}$

#### 17. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี III

ใช้กระจกมาสก์ที่ III เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไทเทเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ III ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่า

แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

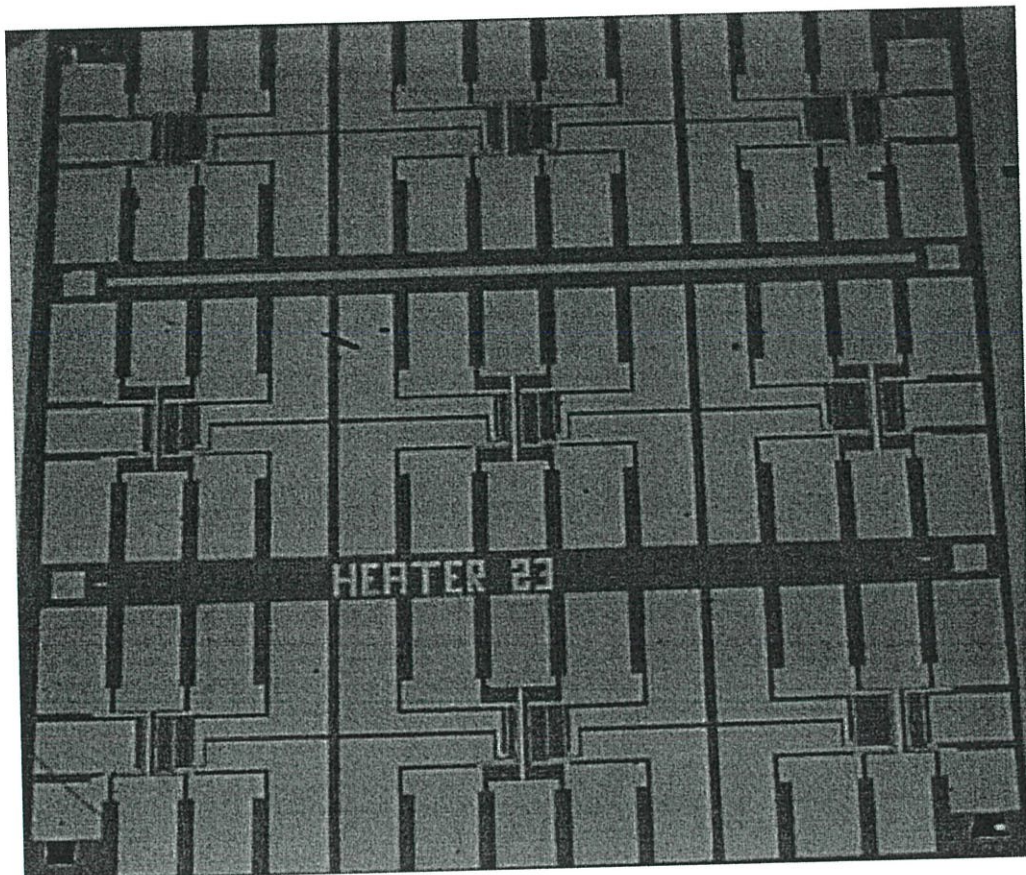
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที

#### 18. การกัดชั้นอลูมิเนียม กระจกมาสก์ที่ IV

สารละลายที่ใช้กัดชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 °C เป็นเวลา 1-2 นาที

#### 19. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนข้อสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังภาพที่ 3.9



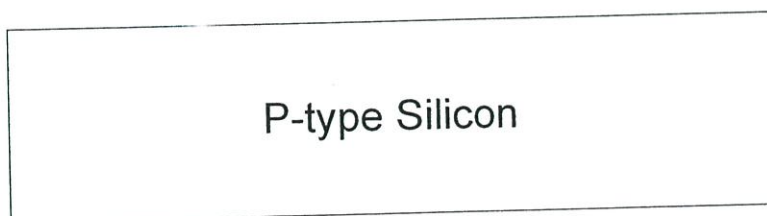
ภาพที่ 3.9 แสดงภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีตเตอร์ขั้นสุดท้าย

### 3.4 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์ด้วยฟิล์มโลหะทองคำ

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

#### 1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดพีระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิถีความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกเป็น 450 ไมโครเมตร โดยภาพตัดขวางแสดงดังในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก

#### 2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

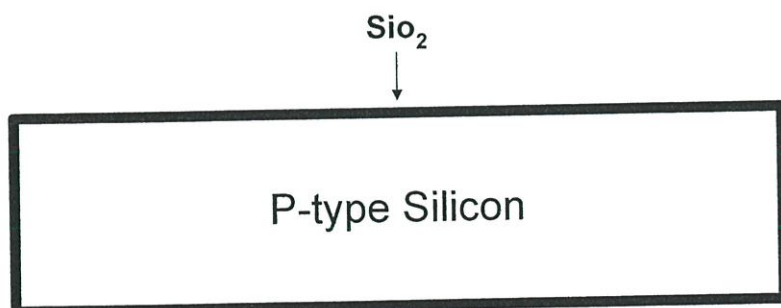
- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- 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  $7000 \text{ \AA}$  จึงทำการออกซิเดชัน โดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $1100^\circ\text{C}$

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อ นาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร ต่อ นาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อ นาที แผ่นผลึกดังแสดง ภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

#### 4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี I

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

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C 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 2 ครั้ง ๆ ละ 1.5 นาที จุ่มน้ำยาทำความสะอาด developer 2 แก้ว ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ทาด้านหน้าแผ่นผลึกด้วย น้ำยาไวแสง
- อบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที

#### 5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

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

#### 6. การลอกชั้นสารไวแสง

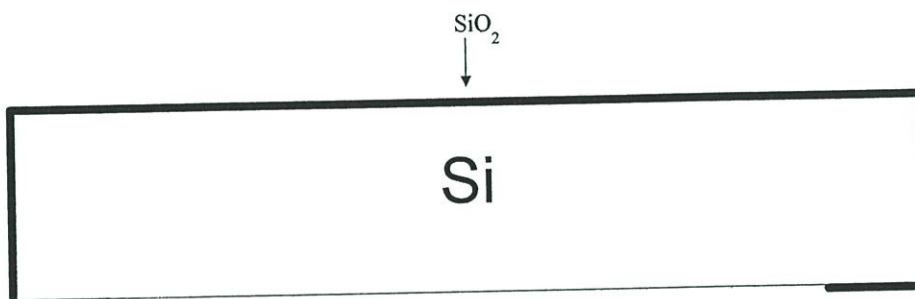
สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ต้มในกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโครโลเอททีลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
  - จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
  - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
  - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- เมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

#### 8. กระบวนการกัดเป็นไดอะแฟรมบาง

ใช้น้ำยาส่วนผสมของ Ethylene diamine : Pyrocatechol : DI Water (EPD) ในอัตราส่วน 50:8:16 ในขณะที่กัดจะใช้อุณหภูมิ 95-100 °C กัดให้ได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการ

#### 9. การลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

เพื่อทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออก เพราะว่าออกไซด์มีคุณภาพลดลง ซึ่งทำเหมือนข้อ 5

#### 10. ทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโครโลเอพทิลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

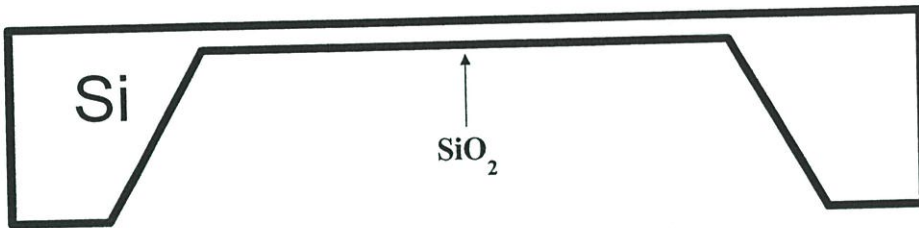
#### 11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

เมื่อได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อ นาที

- ออกซิเดชันแบบขึ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร ต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

### 13. การเคลือบชั้นไทเทเนียม (Ti) ในสุญญากาศและชั้นทองคำ(Au)

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นไทเทเนียม หนา ประมาณ หนา 300 Å Ti/Au มีความหนารวมประมาณ 0.276  $\mu\text{m}$

### 14. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

ใช้กระจกมาสก์ที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไทเทเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ II ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์

แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เคลือบอยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที

### 15. การกัดชั้นไทเทเนียม และชั้นทองคำ

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

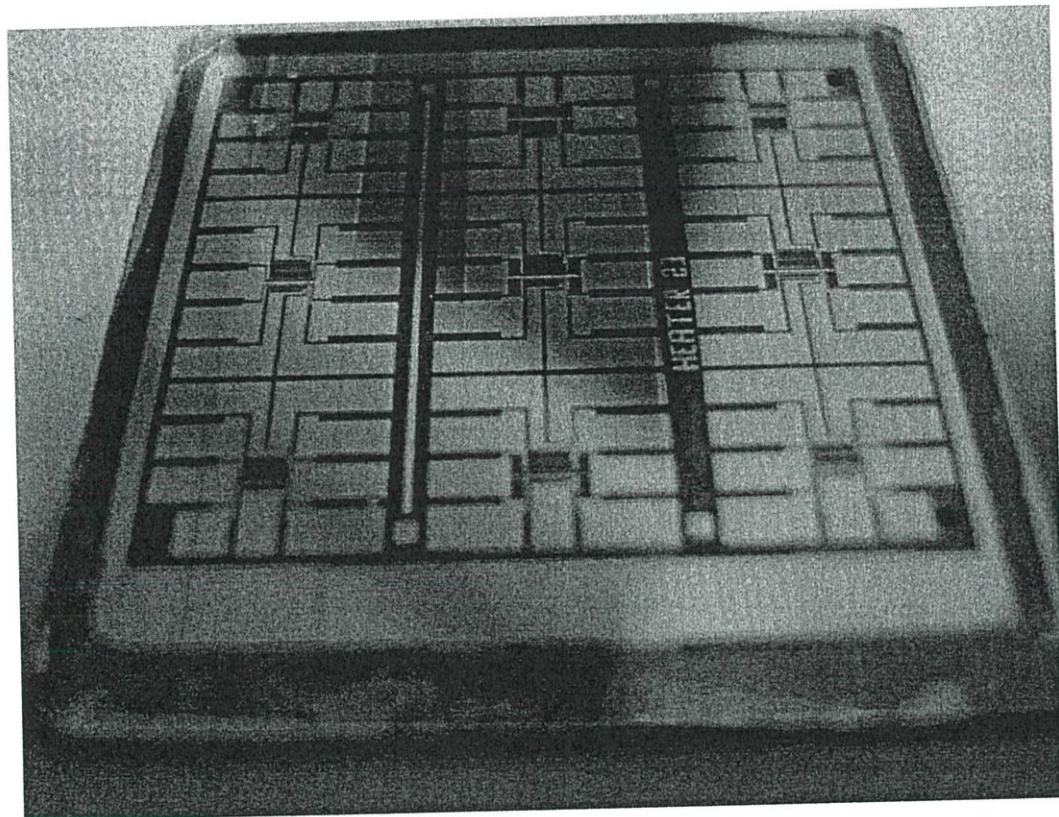
### 16. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที

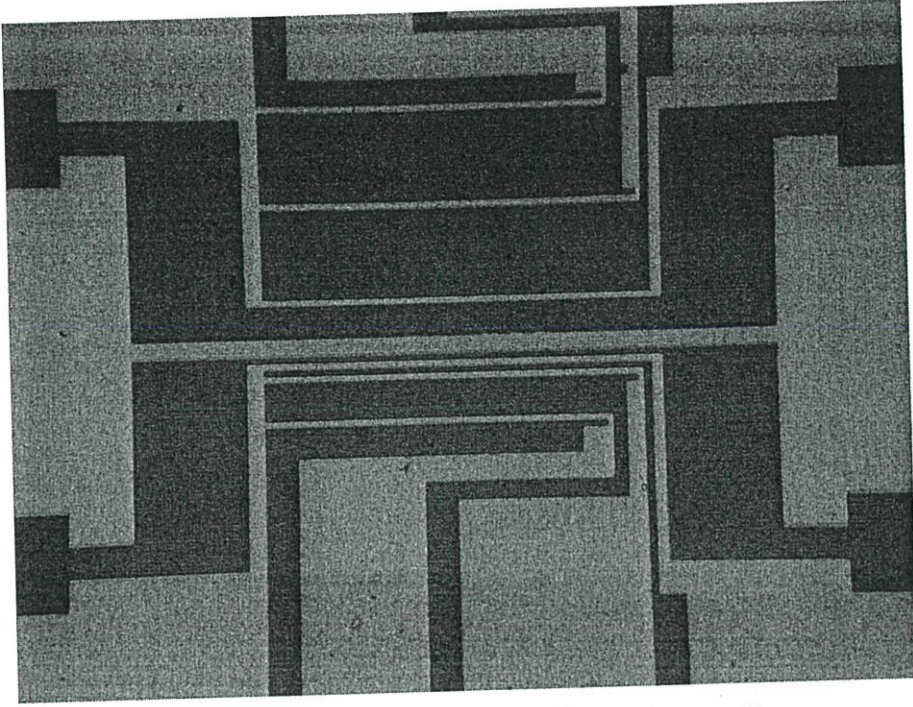
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 16. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกแสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 แสดงภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีตเตอร์ทองคำ



ภาพที่ 3.15 แสดงไมโครฮาร์ดแวร์ทองคำ จำนวน 1 ตัว

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทานโดยการใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยการเริ่มสร้างไดอะแฟรมบางซิลิคอนเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาค(MEMS) โดยอาศัยเทคนิคการกัดเนื้อซิลิคอน ด้วยสารละลาย EPD เพื่อให้เกิดไดอะแฟรมบาง ด้วยเทคนิคการจับเวลา โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกัน

เมื่อได้ไดอะแฟรมบางซิลิคอนบางแล้วใช้เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ในการสร้างฟิล์มบางโลหะ ซึ่งจะได้ไมโครฮีตเตอร์ และแถบความต้านทาน อยู่บนไดอะแฟรมบางซิลิคอน ต่อจากนั้นทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน และการตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ

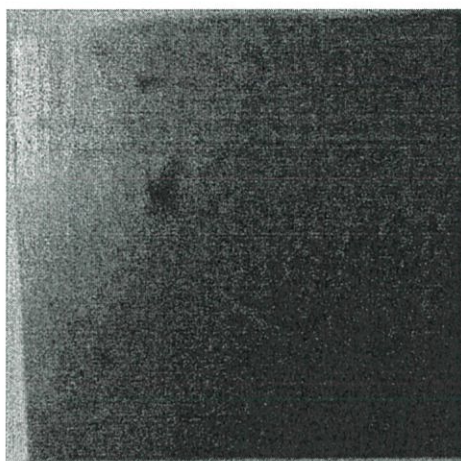
#### 4.1 การสร้างไดอะแฟรม

การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ เริ่มจากการสร้างไดอะแฟรมบางซิลิคอนใช้กระบวนการกัดซิลิคอน ซึ่งได้จากการกัดซิลิคอนในสารละลาย โดยไดอะแฟรมซิลิคอนถูกกัดให้เป็นรูสี่เหลี่ยมตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยการกัดสารละลายเอซีทีเอ็นไดอะมีน(E) ผสมไพโรเครีคอลล(P) และน้ำบริสุทธิ(D)

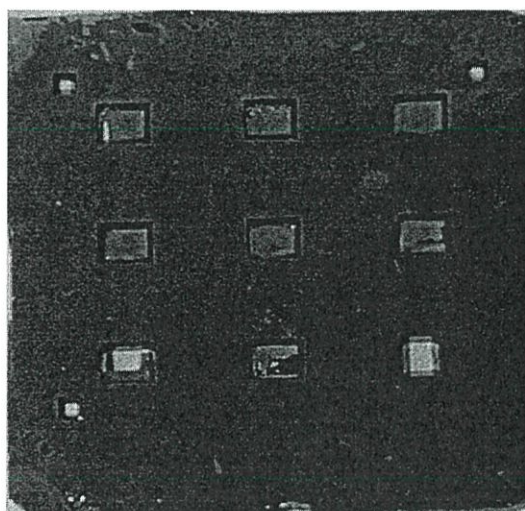
เอซีทีเอ็นไดอะมีนเป็นของเหลวเหลวใสไม่มีสี ไพโรเครีคอลลเป็นเกล็ดของแข็งมีสีเทาควันบุรีเมื่อนำผสมกัน เอซีทีเอ็นไดอะมีน(E) ผสมไพโรเครีคอลล(P) และน้ำบริสุทธิ(D) ทำให้ได้สารละลายสีน้ำตาลเข้ม ที่เรียกว่า สารละลาย EPD

การสร้างไดอะแฟรมด้วยการกัดด้วยสารละลาย EPD เริ่มจากการเตรียมสารละลาย EPD ในบีกเกอร์และให้ความร้อนโดยใช้ Hot plate ทำการกวนสารละลายตลอดเวลา ที่อุณหภูมิ 95-100 °C นำแผ่นซิลิคอนชนิด P หนา(100) ซึ่งมีสภาพความต้านทาน 8-12 โอห์ม เซนติเมตร หนา 450 ไมครอน มาสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิชั่นแบบแห้ง 3 ชั่วโมง แล้วตามด้วยแบบชื้น 3 ชั่วโมง และแบบแห้ง 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ได้ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1 ไมครอน ไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ และก่อนนำแผ่นซิลิคอนมากัด ต้องทำความสะอาดด้วยการล้างไขมันด้วยไตรคลอโรเออีทีเอ็นและอะซิโตนด้วยน้ำ DI และเป่า

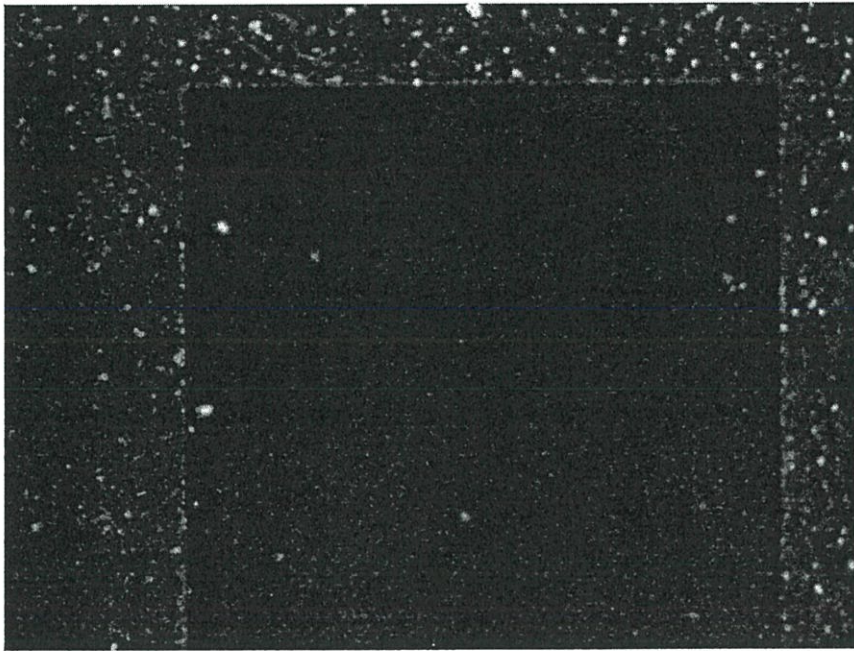
แห้ง จุ่มด้วยสารละลาย HF 5% ล้างด้วย DI และเป่าแห้ง แล้วนำแผ่นซิลิคอนไปจุ่มในสารละลาย EPD โดยเทคนิคการจับเวลา ซึ่งมีอัตราการกัดเนื้อซิลิคอนประมาณ 1 ไมครอน/นาที่ แสดงดังภาพที่ 4.1 ซึ่งได้ความหนาประมาณ 20 ไมครอน และขนาดไดอะแพรม 1400x1800 ไมครอนxไมครอน หลังจากได้ไดอะแพรมซิลิคอนแล้วนำแผ่นซิลิคอนมาลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) เนื่องจากชั้นไดออกไซด์เก่าไม่สะอาด จากแล้วทำความสะอาด และสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่หนา 5000 Å ด้วยกระบวนการออกซิชั่นแบบแห้ง 3 ชั่วโมง แล้วตามด้วยแบบชื้น 1 ชั่วโมง และแบบแห้ง 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งการเป่าแห้งต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก โดยมีผลต่อความเสียหายของไดอะแพรมอย่างมาก



(ก) แผ่นซิลิคอนชนิด พี ด้านหลัง



(ข) แผ่นซิลิคอนชนิด พี ด้านหลังที่สร้างไดอะแพรมด้วยการกัดด้วยสารละลาย EPD



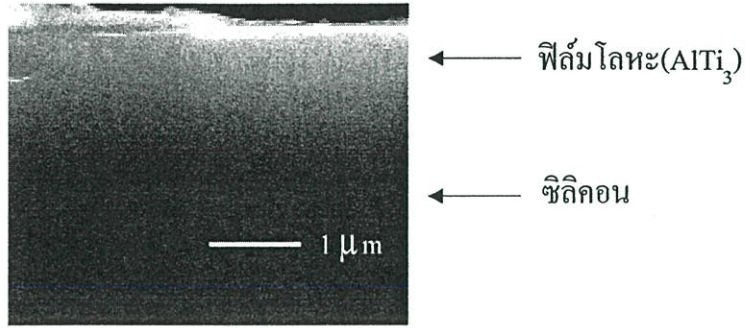
(ค) ภาพขนาดโตอะแพรม ขนาด 60X

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะของโตอะแพรมที่ได้จากการกัดด้วยสารละลาย EPD

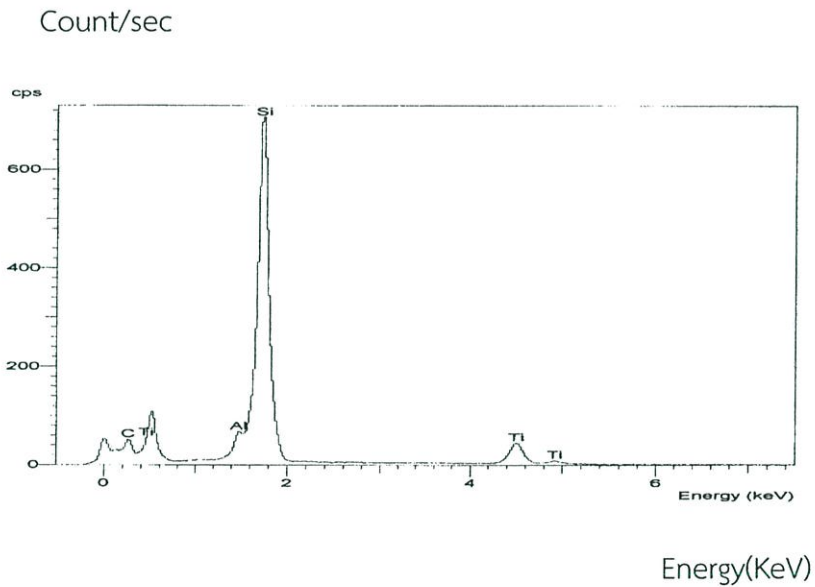
## 4.2 การศึกษาอลูมิเนียมไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน

### 4.2.1 การวิเคราะห์วัสดุไมโครฮีตเตอร์ Al-Ti

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้จากการสร้างโตอะแพรมมาทำการสร้างฟิล์มโลหะไททาเนียมและอลูมิเนียม ซึ่งจะถูกระเหยในระบบสุญญากาศ โดยการระเหยไททาเนียมและตามด้วยการระเหยอลูมิเนียม ซึ่งลักษณะเนื้อฟิล์มของไททาเนียมจะมีสีเทาและถ้านำไปขึ้นเตอร์ริงในบรรยากาศของไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์(TiN) ซึ่งมีสีทอง ต่อจากนั้นนำแผ่นไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี หลังจากนั้นนำฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม ไปขึ้นเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 10 นาที จะได้อัลลอยด์ของ  $TiAl_3$  โดยอยู่ระหว่างฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม สีที่ผิวของอลูมิเนียมฟิล์มยังเป็นสีเงินซึ่งเป็นสีของอลูมิเนียมฟิล์ม แสดงได้ว่าที่ผิวด้านบนยังเป็นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม ภาพที่ 4.2 แสดงการถ่ายภาพตัดขวางถ่ายด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) ได้ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียม 0.8 ไมครอน และไททาเนียม 0.4 ไมครอน และภาพที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะ( $AlTi_3$ ) ด้วย EDS (Energy Dispersive Spectrometer)



ภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย SEM



ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะด้วย EDS

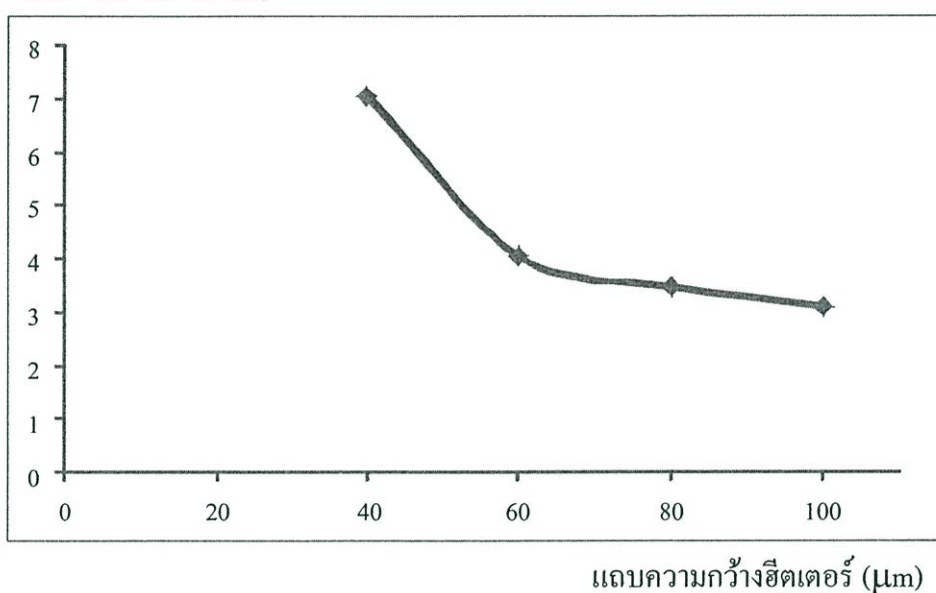
#### 4.3.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบขนาดความกว้างไมโครฮีตเตอร์ให้มีขนาดต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน ตามลำดับ และมีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 4 ชุด คือ 1400 ไมครอน ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ต่างกันทำให้ค่าความต้านทานต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ลูมิเนียม

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

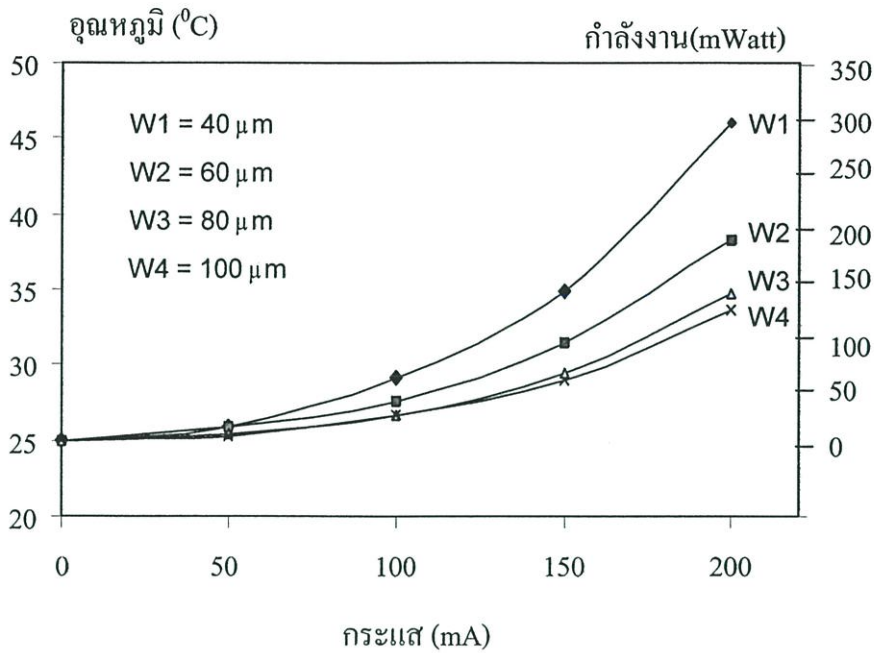
ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )



ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างไมโครฮีตเตอร์และค่าความต้านทาน

#### 4.3.3 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และอุณหภูมิ

ไมโครฮีตเตอร์ก็คือตัวความต้านทาน เมื่อให้กระแสไหลผ่านตัวความต้านทานจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการทดลองนี้จ่ายกระแสในช่วง 0 – 200 mA และความหนาไดอะแฟรม 25 ไมครอน แสดงดังภาพที่ 4.5 อุณหภูมิบนไดอะแฟรมที่ไมโครฮีตเตอร์มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน ตามลำดับ ในช่วงแรกของกระแสจะไม่ค่อยเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่เมื่อให้กระแสสูงขึ้นจะเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ที่ขนาดความกว้าง 40 ไมครอน จะให้อุณหภูมิและพลังงานสูงสุด [13]



ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของไมโครฮีตเตอร์ที่มีขนาดความกว้าง (W) ต่างกัน ที่ความหนาไดอะแฟรม 25 ไมครอน

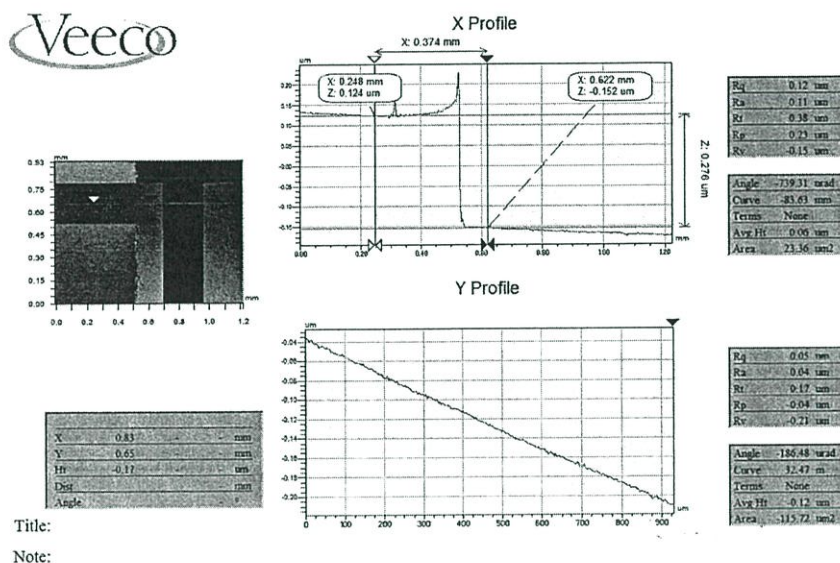
ไมโครฮีตเตอร์เป็นตัวความต้านทาน ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยไมโครฮีตเตอร์ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียม และ ไททาเนียม ถูกกระเหยในระบบสุญญากาศ มีผลให้ไมโครฮีตเตอร์สามารถทนกระแสได้สูงขึ้น โดยโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์อยู่บนไดอะแฟรมหนา 25 ไมครอน และไมโครฮีตเตอร์ขนาด 40 ไมครอน ให้อุณหภูมิสูงสุด 45.5 °C

#### 4.3 การศึกษาทองคำไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน

##### 4.3.1 การวิเคราะห์วัสดุไมโครฮีตเตอร์ Au-Ti

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้จากการสร้างไดอะแฟรมมาการสร้างฟิล์มโลหะไททาเนียมและทองคำ ซึ่งจะถูกระเหยในระบบสุญญากาศ โดยการระเหยไททาเนียมและตามด้วยการระเหยทองคำ แล้วนำฟิล์มไททาเนียมและทองคำไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี หลังจากนั้นนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 10 นาที สีที่ผิวของทองคำ ฟิล์มยังเป็นสีทองซึ่งเป็นสีของทองคำฟิล์ม แสดงได้ว่าที่ผิวด้านบนยังเป็นฟิล์มโลหะทองคำ

ไมโครฮีดเตอร์ที่สร้างจากชั้นฟิล์ม Ti/Au มีความหนาประมาณ 0.276 ไมครอน เคลือบบนฐานซิลิคอนไดออกไซด์ ภาพที่ 4.6 ระดับความหนาที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง veeco optical profiler



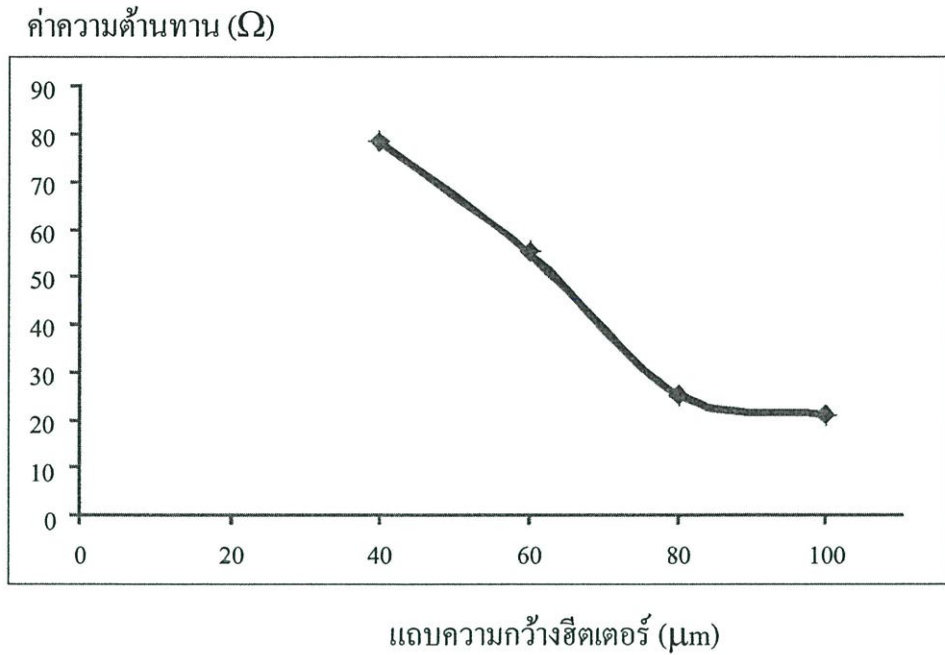
ภาพที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย เครื่อง veeco optical profiler

#### 4.3.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีดเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบขนาดความกว้างไมโครฮีดเตอร์ให้มีขนาดต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน ตามลำดับ และมีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 4 ชุด คือ 1400 ไมครอน ที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ต่างกันทำให้ค่าความต้านทานต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.7

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานของไมโครฮีดเตอร์ทองคำ

ไมโครฮีดเตอร์ชุดที่	ขนาดความกว้างไมโครฮีดเตอร์ ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )
1	40	78.25
2	60	55
3	80	25.4
4	100	21.14

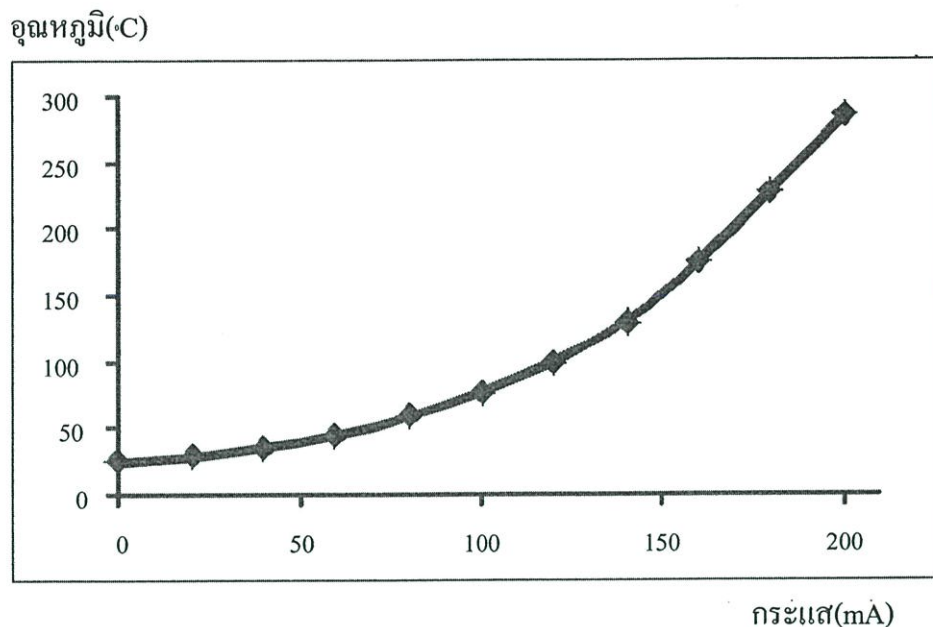


ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างไมโครฮีตเตอร์และค่าความต้านทาน

#### 4.3.3 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และอุณหภูมิ

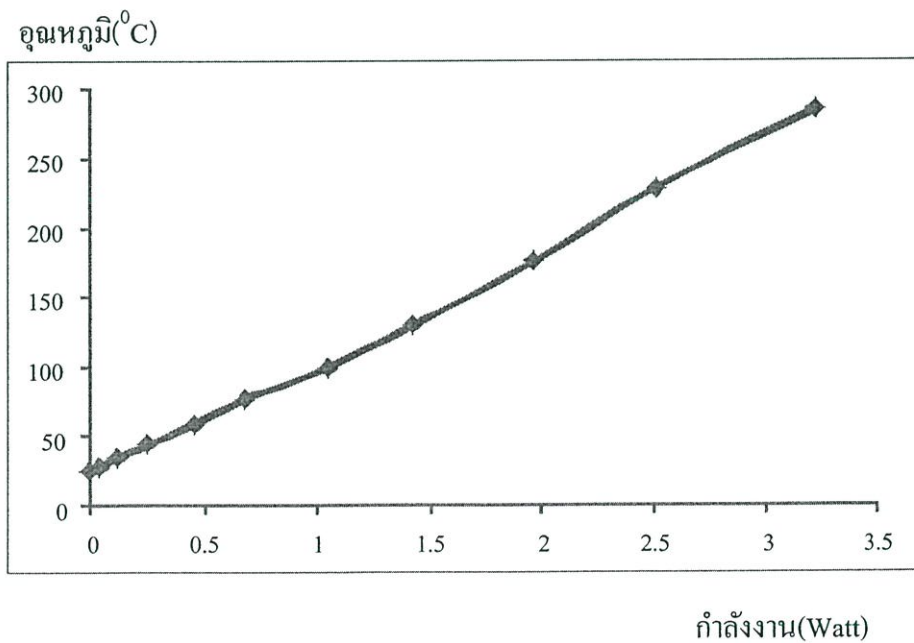
ในการทดสอบคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ ซึ่งไมโครฮีตเตอร์มีขนาดต่างๆ กัน คือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน โดยการทดลองนี้จะจ่ายกระแสให้กับไมโครฮีตเตอร์ในช่วง 0-200 mA ที่ความหนาไดอะแฟรมซิลิคอน 20 ไมครอน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

จากภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิ ในช่วงกระแสน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก แต่เมื่อให้กระแสมากกว่า 80 mA การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และให้อุณหภูมิสูง  $295\text{ }^{\circ}\text{C}$



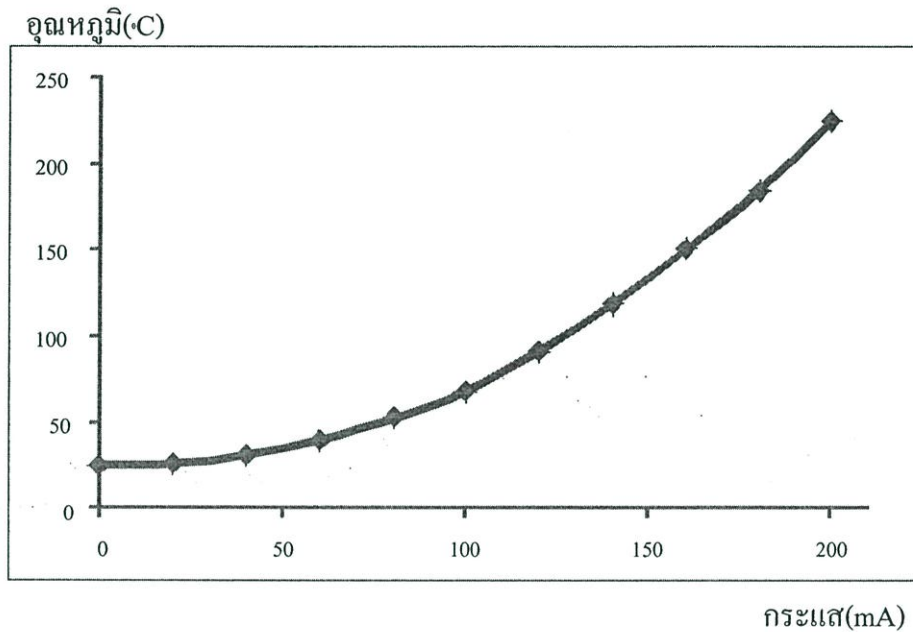
ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 40 ไมครอน

จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ให้อุณหภูมิสูง  $295^{\circ}\text{C}$  ที่กำลังงาน 3.22 watt



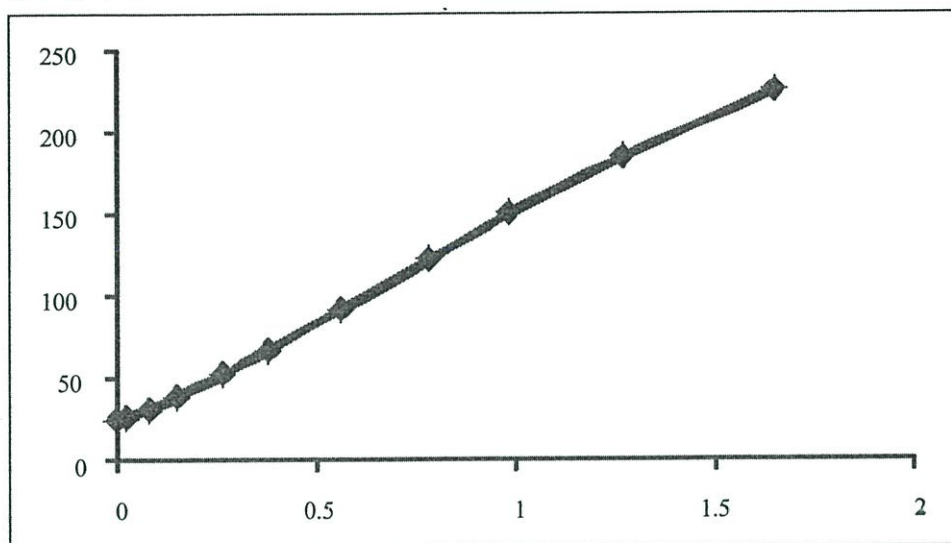
ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 40 ไมครอน

จากภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิ ในช่วงกระแสน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก แต่เมื่อให้กระแสมากกว่า 80 mA การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และให้อุณหภูมิสูง 230 °C



ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 60 ไมครอน

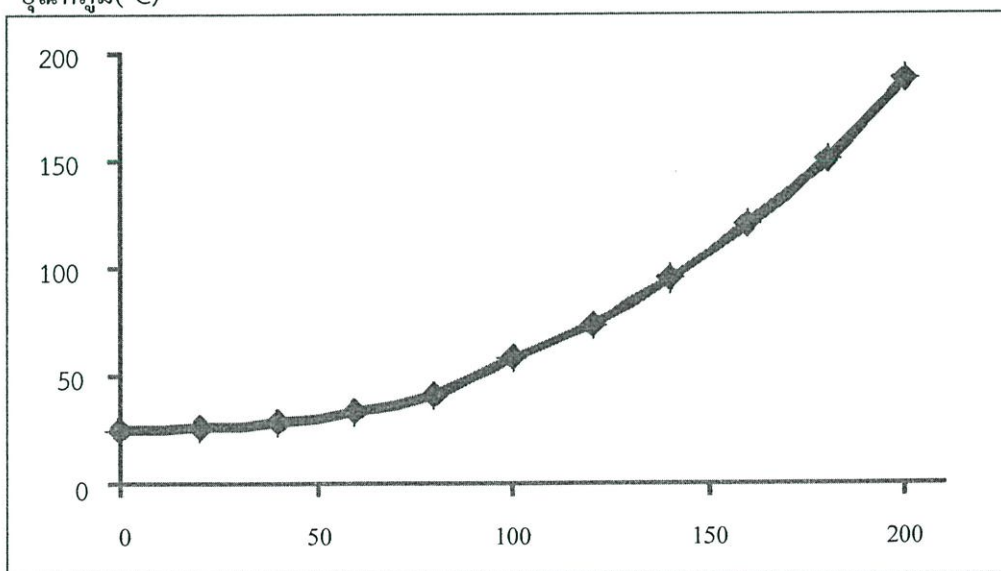
จากภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ให้อุณหภูมิสูง 230 °C ที่กำลังงาน 1.65 watt

อุณหภูมิ( $^{\circ}\text{C}$ )

กำลังงาน(Watt)

ภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 60 ไมครอน

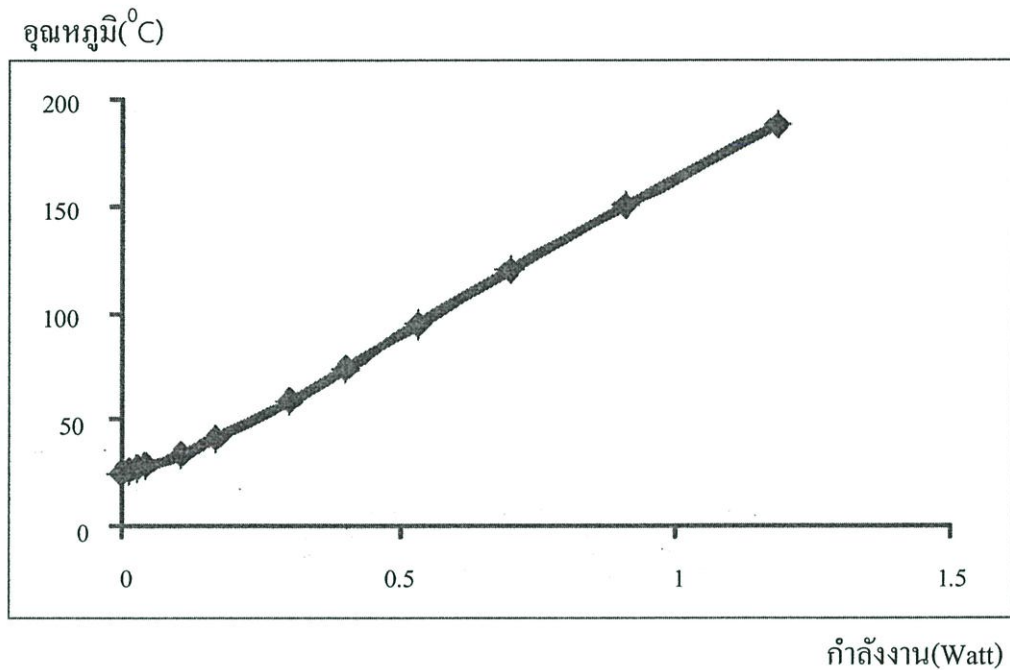
จากภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิ ในช่วงกระแสน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก แต่เมื่อให้กระแสมากกว่า 80 mA การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และให้อุณหภูมิสูง  $190^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ( $^{\circ}\text{C}$ )

กระแส(mA)

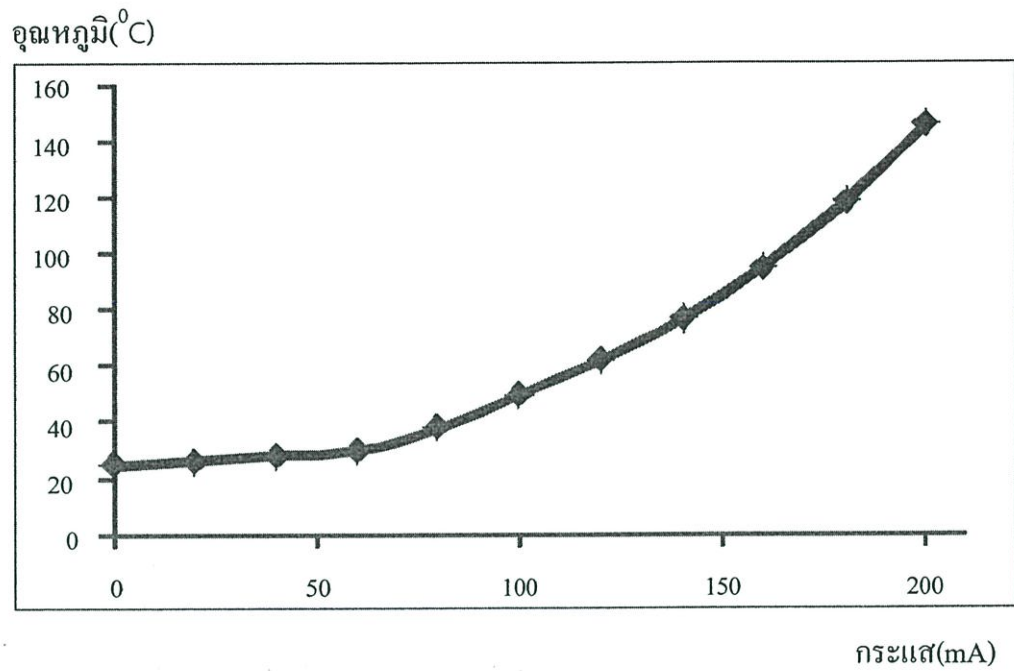
ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 80 ไมครอน

จากภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ให้อุณหภูมิสูง  $190^{\circ}\text{C}$  ที่กำลังงาน  $1.19\text{ watt}$



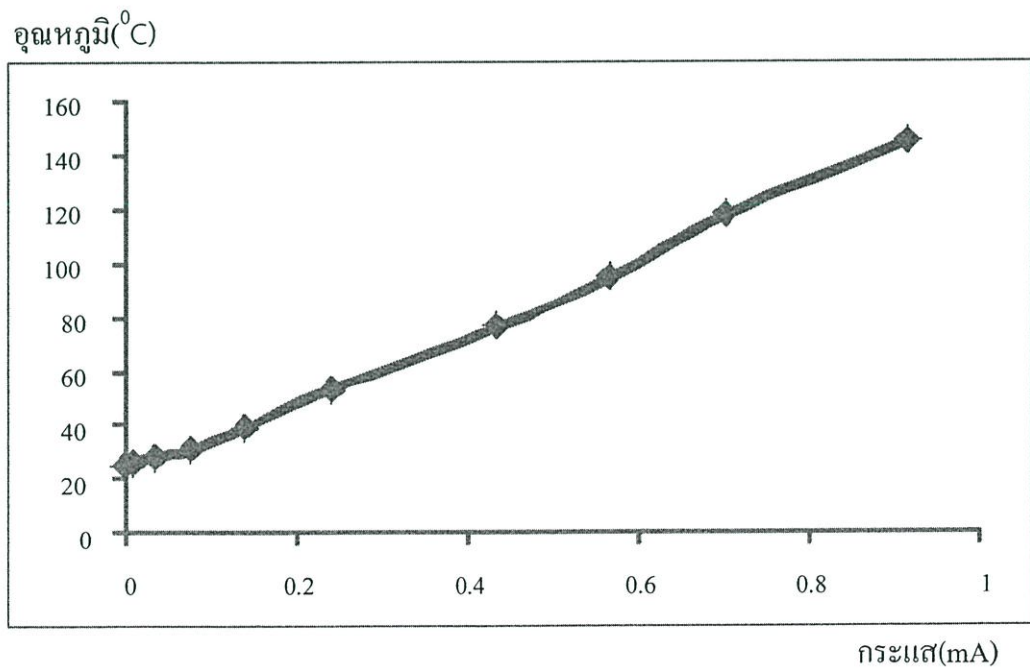
ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์  $80\text{ ไมครอน}$

จากภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิ ในช่วงกระแสน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก แต่เมื่อให้กระแสมากกว่า  $80\text{ mA}$  การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และให้อุณหภูมิสูง  $145^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 100 ไมครอน

จากภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ให้อุณหภูมิสูง  $145^{\circ}\text{C}$  ที่กำลังงาน 0.92 watt



ภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีดเตอร์ 100 ไมครอน

#### 4.4 การประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ

ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซ โดยการวัดทั้งหมดจะใช้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 1000 sccm ซึ่งเป็นท่อซิลิโคนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ที่ขนาดความหนาไดอะแฟรม 20 ไมครอน และไมโครฮีตเตอร์ขนาด 40 ไมครอน เป็นการวัดอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขณะก๊าซไหลผ่านตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบตัวความต้านทาน(RTD) ก็จะมีผลทำให้อุณหภูมิของไดอะแฟรมซิลิโคนลดลงเนื่องจากการพาความร้อนแบบบังคับไปของก๊าซซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซที่ไหลผ่านตัวตรวจรู้แสดงดังภาพที่ 4.16

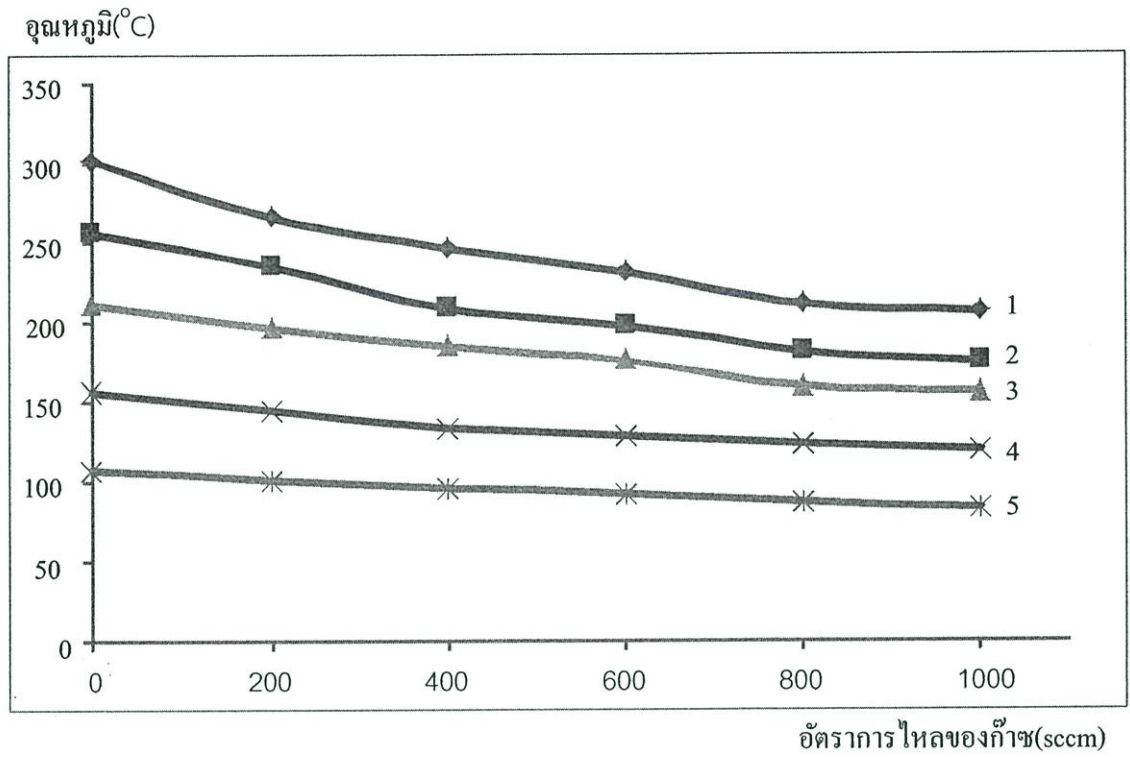
เส้นที่ 1 เริ่มที่อุณหภูมิ 302 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 302 – 205 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 10.4 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 13.75 °C/100 sccm

เส้นที่ 2 เริ่มที่อุณหภูมิ 257 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 257 – 165 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 9.2 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 12 °C/100 sccm

เส้นที่ 3 เริ่มที่อุณหภูมิ 212 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 212 – 146 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 6.6 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 6.5 °C/100 sccm

เส้นที่ 4 เริ่มที่อุณหภูมิ 157 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 157 – 114 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 4.3 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 5.75 °C/100 sccm

เส้นที่ 5 เริ่มที่อุณหภูมิ 109 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 109 – 79 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 3.0 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 3.0 °C/100 sccm



ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับอุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์

ทองคำบนฐานรองซิลิคอน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค(MEMS) ได้รับความสนใจและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนสามารถใช้ได้กับวัสดุหลายชนิด แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้ซิลิคอนชนิดพีระนาบ(100) เป็นวัสดุหลัก และเป็นที่ทราบกันดีว่าซิลิคอนเป็นวัสดุในการผลิตวงจรรวมที่มีการพัฒนาและเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มจากนำแผ่นซิลิคอนมาสร้างซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อให้เป็นหน้ากากป้องกันการกัดของสารละลาย EPD ซึ่งจะได้ไดอะแพรมซิลิคอนรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ที่มีขนาดพื้นที่ 1400 x 1800 ไมครอน เป็นพื้นที่รับร่องทูลูมิ ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการกัดด้วยสารละลาย EPD โดยการใช้เทคนิคการควเวลเวลาและอุณหภูมิ

ตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทานมีโครงสร้างประกอบด้วย ไมโครฮีตเตอร์และแถบความต้านทาน ซึ่งมีไมโครฮีตเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยทั้งไมโครฮีตเตอร์และแถบความต้านทานจะถูกสร้างอยู่บนไดอะแพรมบางซิลิคอน ซึ่งการสร้างจะใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค พื้นที่ของไดอะแพรมเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและพื้นที่รับความร้อน การเริ่มสร้างไดอะแพรมซิลิคอนจะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ(100) ด้วยกระบวนการกัดซิลิคอนในสารละลาย EPD โดยการใช้เทคนิคการจับเวลา เสร็จแล้วทำการสร้างไมโครฮีตเตอร์และแถบความต้านทานโดยการระเหยฟิล์มบางโลหะในระบบสุญญากาศแล้วทำการวัดคุณสมบัติต่างๆ และนำไปประยุกต์เป็นตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ

จากการทำวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การสร้างไดอะแพรมบางซิลิคอน โดยการกัดด้วยสารละลาย EPD ที่อุณหภูมิ 95 – 100 °C และมีอัตราการกัดเนื้อซิลิคอนประมาณ 1 ไมครอน/นาที่ มีพื้นที่ของไดอะแพรมเป็นรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้า 1400 x 1800 ไมครอน ซึ่งความหนาบางของไดอะแพรมจะมีผลต่ออุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์เนื่องมาจากมวลของไดอะแพรมที่แตกต่างกัน

2. ไมโครฮีตเตอร์ นั้นเป็นตัวกำเนิดความร้อน โดยเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการให้กระแสไหลผ่านตัวความต้านทาน ซึ่งไมโครฮีตเตอร์ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียม และ ไททานเนียม ถูกกระเหยในระบบสุญญากาศได้เป็นฟิล์มโลหะ ทำให้ฮีตเตอร์เทอร์ทนกระแสได้สูงขึ้น โดยโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์จะอยู่บนไดอะแฟรมที่มีความหนาคือ 25 ไมครอน เมื่อจ่ายกระแส(0-200 mA)มากขึ้นพบว่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์จะสูงขึ้น และไมโครฮีตเตอร์ขนาด 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน ให้อุณหภูมิสูงสุดที่  $45.5^{\circ}\text{C}$  แสดงดังตารางที่ 5.1 ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ขนาด 40 ไมครอน

ตารางที่ 5.1 แสดงขนาดไมโครฮีตเตอร์อลูมิเนียม กำลังงาน และอุณหภูมิ ที่ความหนาไดอะแฟรมซิลิคอน 25 ไมครอน และกระแส 200 mA ความหนาของไมโครฮีตเตอร์อลูมิเนียม 1.2 ไมครอน

ขนาดไมโครฮีตเตอร์ ( $\mu\text{m}$ )	กำลังงาน(วัตต์)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
40	0.30	45.5
60	0.19	38.0
80	0.14	34
100	0.13	33

เพื่อให้ได้อุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกได้ทำการเปลี่ยนวัสดุจากฟิล์มโลหะอลูมิเนียมเป็นฟิล์มโลหะทองคำ ซึ่งไมโครฮีตเตอร์ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ ทองคำ และ ไททานเนียม ถูกกระเหยในระบบสุญญากาศได้เป็นฟิล์มโลหะ ทำให้ฮีตเตอร์เทอร์ทนกระแสได้สูงขึ้นกว่าเดิม โดยโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์จะอยู่บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 20 ไมครอน และมีขนาดฮีตเตอร์ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน พบว่าเมื่อจ่ายกระแส(0-200 mA) อุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์จะสูงสุดถึง  $295^{\circ}\text{C}$  และกำลังงาน 3.22 วัตต์ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 40 ไมครอน

ตารางที่ 5.2 แสดงขนาดไมโครฮีตเตอร์ทองคำ กำลังงาน และอุณหภูมิ ที่ความหนาไดอะแฟรมซิลิคอน 20 ไมครอน และกระแส 200 mA ความหนาของไมโครฮีตเตอร์ทองคำ 0.276 ไมครอน

ขนาดไมโครฮีตเตอร์ ( $\mu\text{m}$ )	กำลังงาน(วัตต์)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
40	3.22	295
60	1.65	230
80	1.19	190
100	0.92	145

3. ในการทดสอบตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซโดยอาศัยหลักการของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเมื่อให้ก๊าซไหลผ่านไดอะแฟรมซิลิคอนในขณะที่ไมโครฮีตเตอร์ที่มีความร้อน(อุณหภูมิ) เมื่อมีก๊าซไหลผ่านไดอะแฟรมแล้วจะมีผลทำให้ความร้อนบริเวณไดอะแฟรมนั้นลดลง เนื่องมาจากการพาความร้อนก๊าซที่ไหลผ่าน ซึ่งในทดลองนี้ให้ก๊าซผ่านในช่วง 0 - 1000 sccm โดยใช้ไมโครฮีตเตอร์ขนาด 40 ไมครอน และไดอะแฟรมซิลิคอนหนา 20 ไมครอน ที่อุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์เริ่มต้นที่ 302 °C จะทำให้อุณหภูมิลดลงเหลือ 205 °C ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1000 sccm

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ขนาดความหนาของไดอะแฟรมบางซิลิคอน มีผลต่อคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ แต่ในการวิจัยนี้ให้การกัดแบบเปียกในสารละลาย EPD ซึ่งมีขีดจำกัดในการสร้างไดอะแฟรมให้หนาน้อยกว่านี้ ต้องเปลี่ยนไปใช้การแบบแห้ง จึงจะได้ความหนาไดอะแฟรมระดับต่ำกว่า 10 ไมครอน นอกจากนั้นแล้ว การทำความสะอาดไดอะแฟรมบางซิลิคอนต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ ซึ่งอาจทำให้ไดอะแฟรมบางเสียหายได้

## บทที่ 6

### ผลผลิต

ในบทนี้จะนำเสนอผลผลิตที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบไปด้วยผลงานเชิงวิชาการ ผลงานเชิงสาธารณะ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ ในวารสารเชิงวิชาการ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 6.1 ผลงานเชิงวิชาการ

ผลงานวิจัยที่เกิดขึ้นบางส่วนได้นำไปประยุกต์ใช้สอนในกระบวนวิชาการของนักศึกษา สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ นอกจากนี้ประสบการณ์ที่ได้จากงานวิจัยยังสามารถนำไปประยุกต์อบรม นักศึกษาปริญญาโท-เอก เจ้าหน้าที่ และผู้ช่วยวิจัยให้มีทักษะและความชำนาญมากยิ่งขึ้น ก่อให้เกิดองค์ความรู้ในองค์กร ผลงานวิจัยส่วนใหญ่สามารถนำเสนอและตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการที่เกี่ยวข้อง ช่วยให้เป็นแนวโน้มนำในการทำวิจัยแก่นักวิจัยรุ่นใหม่ต่อไป

#### 6.2 ผลงานเชิงสาธารณะ

โครงการวิจัยนี้ได้เกิดเครือข่ายงานวิจัยกับหลากหลายภาคส่วนด้วยกันทั้งในองค์กร ภายในสถาบันและองค์กรนอกสถาบัน อาทิเช่น ผศ.ดร. นราธิป วิทยากร จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และคุณอนุชา เรืองพานิช นักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

#### 6.3 ผลงานที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการ

ได้ส่งผลงานไปร่วมประชุมวิชาการและเสนอผลงาน The 40th Congress on Science and Technology of Thailand December 2 - 4, 2014 at Hotel Pullman Khon Kaen Raja Orchid, Khon Kaen, Thailand เรื่อง “THE FABRICATION OF MICROHEATER WITH GOLD FILM ON SILICON DIAPHRAGM”

และกำลังดำเนินการอยู่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ศุขเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [2] นกสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์. 2526.
- [3] สิริวิชัย เตชะเจษฎารังษี, “MEMS และ ระบบจุลภาค,” วิศวกรรมสาร มช. ปีที่ 32 ฉบับที่3, หน้า 53-56 พฤษภาคม – มิถุนายน 2548.
- [4] เกษรรัตน์ อักษรรัตน์, “ระบบไฟฟ้ากลจุลภาค,” ; วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. ปีที่ 9 ฉบับที่1, มกราคม – เมษายน 2556.
- [5] ศรีเมฆ รัตนชัย. “เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิกอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Gropel, W., Hesse I, Zemel, J.N.editors, *Sensors: A Comprehensive Survey*, vol.7, VCH Publication, 1994, pp.340.
- [7] W.R. Runyan, “Semiconductor Measurements and Instrumentation,” Mc.GrawHill, 1975.
- [8] Kurt E. Petersen, “Silicon as a mechanical material,” *Processing of the IEEE*, vol.70,No.5,May 1979. Pp.420-456
- [9] นิमित ขมनावัง สมศักดิ์ เขียวศิริกุล และ สมเกียรติ ศุขเดช, “การศึกษาการกัดซิลิกอนด้วยสารละลาย KOH,” *วิศวกรรมลาดกระบัง* ปีที่ 11 ฉบับที่1, หน้า 53-56 มิถุนายน 2537.
- [10] 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.
- [11] A. Accorst G. Delapierre C. Vauchier and D. Charit, “A New Microsensor for Environmental Measurements,” *Sensors and Actuators B*, 4, pp. 539-543, 1991.

- [12] 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.
- [13] รังสรรค์ เมืองเหลือ, สมศักดิ์ เขียวศิริกุลและ สมเกียรติ ศุภเดช, "การออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรม", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17 ฉบับที่ 3, กันยายน 2543. หน้า 58-63

## ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ  
(ภาษาอังกฤษ) Dr.RANGSON MUANGHLUA
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3660100854710
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520  
โทร. 2-329-8344 โทรสาร 2-329-8346  
E-mail : kmrangso@kmitl.ac.th
5. ประวัติการศึกษา

วุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถาบัน
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต วศ.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	2553	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	2544	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาศาสตร์บัณฑิต วท.บ.(วัสดุศาสตร์)	2535	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา

- ศึกษาและวิจัยการสร้างฟิล์มบางโดยเครื่องสเปคโตรริง และ เครื่องระเหยฟิล์มโลหะในระบบสุญญากาศ
- ศึกษาและวิจัยพร้อมทั้งศึกษาสมบัติของฟิล์มบางชนิดต่างๆ
- ศึกษาและวิจัยกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ และเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวม
- ศึกษาและวิจัยกระบวนการสร้างเซนเซอร์ชนิดต่างๆร่วมกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ
- ศึกษาและวิจัยกระบวนการสร้างเซรามิกขั้นสูง
- ศึกษาและวิจัยสมบัติเชิงไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เซนเซอร์ชนิดต่างๆ เซรามิกสมบัติไพโซอิเล็กทริกและสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบ PZT-BT
- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเตรียม โครงสร้างจุลภาค และสมบัติของสารอิเล็กโทรเซรามิก
- ศึกษาและวิจัยสมบัติไฟฟ้าของ MOSFET และสร้างแบบจำลองการทำงานของ MOSFET