

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์สซิลิกอน



นายพรชัย

ชอดจันทร์

นางสาวพันทิวา

วงษ์อนันต์

b. 4461691x  
i. ....

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 62288  
วัน,เดือน,ปี - 8 ส.ค. 2549

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Gas sensor from porous silicon**



Mr. Pornchai Yodjan  
Miss Pantiwa Wonganan

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Bachelor Of Science  
Department of Applied Physics  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง      อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์สซิลิกอน

นักศึกษา                      นายพรชัย              ยอดจันทร์  
                                    นางสาวพันทิwa        วงษ์อนันต์

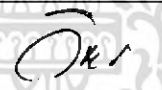

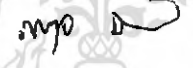


ภาควิชา                      ฟิสิกส์ประยุกต์                      คณะวิทยาศาสตร์

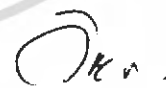
สาขาวิชา                      ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา              รศ.วิษณุ              เพชรภา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        รศ.ดร. จิติ              หนูแก้ว

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร  
บัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.วิษณุ      เดชิตธีระ	
กรรมการ	อ.ชนภรณ์      ลีลาวัฒนานนท์	
กรรมการ	อ.ภารุจ      บัณฑิตดาวิทย์	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.วิษณุ      เพชรภา	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.จิติ      หนูแก้ว	



(รองศาสตราจารย์วิษณุ เดชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์สซิลิกอน	
นักศึกษา	นายพรชัย	ยอดจันทร์
	นางสาวพันทิวา	วงษ์อนันต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2548	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิษณุ	เพชรภา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.จิตติ	หนูแก้ว

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาความสามารถของพอร์สซิลิกอนในการตรวจจับแก๊ส โดยเริ่มจากการสร้างซิลิกอนให้เป็นรูพรุน ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี โดยการกัดด้วย สารละลาย HF 48% ในเวลาที่ต่างกัน คือ 10, 15 และ 20 นาที ซึ่งจะได้ความพรุนที่แตกต่างกัน และทำการแอนนัลที่ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำขั้วแบบอินเตอร์ดิจิตให้แก่พอร์สซิลิกอน โดยการเคลือบทองคำหนา 200 นาโนเมตร ตามด้วยการแอนนัลที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 15 นาที และนำมาตรวจสอบความสามารถในการตรวจวัดแก๊สแอลกอฮอล์ อนุภาคของแก๊สก็จะลงไปอุดที่บริเวณของพอร์สทำให้เกิดค่าความต้านทานเปลี่ยนไป จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนจากกราฟ ซึ่งยิ่งซิลิกอนมีความพรุนมากก็จะสามารถตรวจจับแก๊สได้ดีกว่าเนื่องจากมีพื้นที่และเสาที่ใช้ในการเกาะกับ โมเลกุลของแก๊สมากกว่านั่นเอง

**Special Project Title** Gas sensor from porous silicon

**Name** Mr. Pornchai Yodjan  
Miss Pantiwa Wonganan

**Department** Applied Physics **Faculty of Science**

**Program** Applied Physics

**Academic Year** 2005

**Special Project Advisor** Assoc. Prof. Wisanu Pecharapa

**Special Project co-advisor** Assoc. Prof. Dr. Jiti Nukaew

### ABSTRACT

This special project is to study the ability of porous Silicon to detect gas. First, by using electrochemical etching process, silicon will be made porous with HF 48% solution in different time period of 10, 15, and 20 minutes which will give dissimilar porosity. Then annealing is done at 120 °C for 1 hour. Coat the porous silicon with 200 nanometres-thick-gold to polarize it into the interdigit polar(?), then anneal it again at 120 °C for 15 minutes. The porous silicon can be used for detecting alcohol gas. When the gas particle plug into the pore its resistance will change and can be observed by a graph. The more porous the silicon, the more efficiency in detecting gas it gives. This is due to the more area and porous in the silicon for the molecule of gas to adhere to.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ประสบกับปัญหาและอุปสรรคต่างๆมากมาย และการแก้ไขปัญหาดังกล่าวเหล่านี้จะไม่สามารถแก้ไขปัญหาและอุปสรรคดังกล่าวได้ ถ้าหากขาดบุคคลเหล่านี้

บิดา มารดา	ที่ให้ความสนับสนุนด้านทุนการศึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา
อาจารย์ วิษณุ เพชรภา	ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำและแนวทางในการแก้ปัญหา
อาจารย์ จิติ หนูแก้ว	ผู้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือทางด้านวัสดุ
รุ่นพี่ที่ QOS Lab	ผู้ช่วยเหลือทางด้านวัสดุและอุปกรณ์ และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอ
เพื่อนๆน้องๆทุกคน	ที่เป็นกำลังใจให้ตลอดมา และทำให้ชีวิตสดชื่น

นายพรชัย ยอดจันทร์  
นางสาวพันทิวา วงษ์อนันต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง-จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช-ฉ
สัญลักษณ์	ญ
ศัพท์เทคนิค	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโรงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตในการศึกษา	3
1.4 ระยะเวลาในการดำเนินการ	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโรงงานพิเศษ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	6
2.1 ผลึกซิลิกอน	6
2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิกอน	6
2.1.2 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน	9
2.1.3 ชนิดของผลึกซิลิกอน	12
2.2 พอร์สซิลิกอน	17
2.2.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน	17
2.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอน	18
2.3 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	21
2.3.1 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก	23
2.3.2 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	24
2.4 กลไกการเกิดพอร์สซิลิกอน	26
2.4.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิกอน	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิกอน	28
2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน	29
2.6 ระบบและการทำงานของพอร์สซิลิกอนในการตรวจจับแก๊ส	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	32
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (Starting wafer)	32
3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน	32
3.3 ขั้นตอนการปลูกชั้นอะลูมิเนียม	35
3.4 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน	35
3.4.1 เงื่อนไขการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน	38
3.5 การทำขั้วเพื่อใช้ในการนำไฟฟ้า	38
3.5.1 ขั้นตอนการทำ mask	40
3.5.2 ลักษณะของ mask	43
3.5.3 ขั้นตอนการติดขั้วไฟฟ้าที่เป็นทอง	44
3.6 การออกแบบและระบบแก๊สเซนเซอร์	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง	51
4.1 ผลการทดลองจากการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน	51
4.1.1 เงื่อนไขการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน	51
4.1.2 การคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแส	51
4.2 การหาค่าความพรุนของพอร์สซิลิกอน	52
4.2.1 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความพรุนของพอร์สซิลิกอน	54
4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนจากเครื่อง Scanning Electrons Microscope (SEM)	56
4.4 ขั้วไฟฟ้าของพอร์สซิลิกอน	59
4.5 กราฟแสดงการ Sensitivity ของพอร์สซิลิกอนกับแก๊สแอลกอฮอล์	61
บทที่ 5 สรุปและแนวทางการพัฒนา	72
เอกสารอ้างอิง	75



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซซิติคอน	38
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซซิติคอน	51
ตารางที่ 4.2 Etching time (s) - Recovery time (s)	68
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ohm) – Etching time (s)	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองง่ายๆของอะตอมซิลิกอน	6
รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิกอน	7
รูปที่ 2.3 แสดง unit lattice ของโครงสร้างเพชร	7
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแบบ Tetrahedral ที่อยู่ใน unit lattice ของโครงสร้างเพชร	8
รูปที่ 2.5 แสดงส่วนต่างๆของ unit lattice ของโครงสร้างเพชร	9
รูปที่ 2.6 แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีมี 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกัน	10
รูปที่ 2.7 แสดงการแตกแยกของระดับพลังงาน	11
รูปที่ 2.8 แสดงแผนภูมิแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนในมิติของ k-space	12
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์	13
รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงาน	13
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น	15
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดพี	16
รูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นซิลิกอน	17
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	18
รูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมและทิศทางการเคลื่อนที่	19
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน	21
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี	22
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส	23
รูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า	24
รูปที่ 2.20 แสดงขั้นตอนและกลไกกลทางเคมีในการกัดเนื้อซิลิกอน	27
รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน	29
รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ	30
รูปที่ 2.23 ระบบแก๊สเซนเซอร์	31
รูปที่ 2.24 แสดงการจับตัวระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับเสาพอร์สซิลิกอน	31
รูปที่ 3.1 แสดงแผ่นพอร์สซิลิกอน	32
รูปที่ 3.2 แสดงสารเคมีและเครื่อง Ultrasonic Generator	33
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน	34
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง	35
รูปที่ 3.5 แสดงการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือ	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 ระบบการกัดทางไฟฟ้าเคมี	37
รูปที่ 3.7 ภาพแสดงระบบ electroplating	39
รูปที่ 3.8 การฉายแสงลงบนแผ่นฟิล์ม	42
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของ Mask ทั้งหมดที่ออกแบบในโรงงานพิเศษนี้	43
รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของ Mask ที่ใช้ในการทำเซนเซอร์แก๊ส	44
รูปที่ 3.11 แสดงภาพการวาง Mask ลงบนเครื่อง DC sputtering	44
รูปที่ 3.12 แสดงภาพตัวอย่างอยู่ใน Chamber ก่อนเตรียมการ Sputtering	45
รูปที่ 3.13 แสดงภาพขณะ Sputtering	45
รูปที่ 3.14 ภาพพอร์สซิติคอนหลังการ sputtering	46
รูปที่ 3.15 ภาพพอร์สซิติคอนที่ตัดขั้วแล้ว	46
รูปที่ 3.16 แบบของระบบแก๊สเซนเซอร์	47
รูปที่ 3.17 ระบบแก๊สเซนเซอร์ที่ใช้งานจริง	47
รูปที่ 3.18 ภาพเครื่อง โอห์มมิเตอร์	48
รูปที่ 3.19 ภาพ Chamber ของระบบวัดแก๊ส	48
รูปที่ 3.20 แสดงภาพขวดแก้วที่ใส่แอลกอฮอล์เพื่อใช้งานในระบบ	49
รูปที่ 3.21 ภาพการเชื่อมต่อของท่อแอลกอฮอล์กับ Chamber วัดแก๊ส	49
รูปที่ 3.22 แสดงภาพเครื่องควบคุมการไหลของแก๊สแอลกอฮอล์	50
รูปที่ 4.1 รูที่ด้านล่างของถ้วยเทฟลอน	51
รูปที่ 4.2 ขนาดรูที่ด้านล่างของเทฟลอน	52
รูปที่ 4.3 แผ่นซิลิกอนก่อนการกัด	52
รูปที่ 4.4 แผ่นพอร์สซิติคอน	53
รูปที่ 4.5 แผ่นพอร์สซิติคอนหลังทำการชุบส่วนของพอร์สซิติคอนออกแล้ว	53
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลระหว่าง เวลาที่ใช้ในการ anodization กับ ค่าความพรุน (Porosity)	55
รูปที่ 4.7 แผ่นซิลิกอนที่มีผิวหน้าเกิดชั้นของพอร์สซิติคอนขึ้น โดยใช้เวลาในการกัด 10 นาที	56
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้านหน้าของพอร์สซิติคอนที่ใช้เวลาในการกัด 10 นาที	56
รูปที่ 4.9 แผ่นซิลิกอนที่มีผิวหน้าเกิดชั้นของพอร์สซิติคอนขึ้น โดยใช้เวลาในการกัด 15 นาที	57
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายด้านหน้าของพอร์สซิติคอนที่ใช้เวลาในการกัด 15 นาที	57
รูปที่ 4.11 แผ่นซิลิกอนที่มีผิวหน้าเกิดชั้นของพอร์สซิติคอนขึ้น โดยใช้เวลาในการกัด 20 นาที	58
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้านหน้าของพอร์สซิติคอนที่ใช้เวลาในการกัด 20 นาที	58
รูปที่ 4.13 ภาพแสดงชั้นต่างๆของเครื่องมือตรวจวัดแก๊สจากพอร์สซิติคอน	59
รูปที่ 4.14 ภาพพอร์สซิติคอนหลังการ Sputtering	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก	$^{\circ}\text{A}$
c	ความเร็วแสง	m/s
d	ขนาดความกว้างของรูพรุน	nm
E	พลังงานอิเล็กตรอน	eV
$E_a$	พลังงานของอะตอมสารเจือผู้รับ	eV
$E_c$	พลังงานแถบนำ	eV
$E_d$	พลังงานของอะตอมสารเจือผู้ให้	eV
$E_f$	พลังงานระดับเฟอร์มิ	eV
$E_g$	พลังงานแถบต้องห้าม	eV
$E_i$	พลังงานระดับอินทรินซิก	eV
$E_p$	พลังงานโฟนอน	eV
$E_{ps}$	พลังงานแถบต้องห้ามของพอร์สซิลิกอน	eV
$E_q$	พลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ quantum size effect	eV
$E_s$	สนามไฟฟ้ารอบๆผนังรูพรุนของพอร์สซิลิกอน	eV
$E_s'$	สนามไฟฟ้ารอบๆกันหุ้มของรูพรุน	eV
$E_v$	พลังงานแถบวาเลนซ์	eV
I	กระแสไฟฟ้า	mA
h	ค่าคงที่ของพลังค์	J.s
$I_{ps}$	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพอร์สซิลิกอน	mA
Q	ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน	C
V	ศักดาไฟฟ้า	V
$V_{com}$	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่าง ขั้วโลหะกับผลึกซิลิกอน	V
$V_d$	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer	V
$V_{elec}$	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่าง ขั้วอิเล็กโตรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก	V
$V_{SCR}$	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะนำกระแส	V
W	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส	$\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 ภาพพอร์สซิติคอนที่ติดขั้วแล้ว	60
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการ Sensitivity ของซิลิกอนกับแก๊สแอลกอฮอล์	61
รูปที่ 4.17 ขยายจากกราฟแสดงการ Sensitivity ของซิลิกอนกับแก๊สแอลกอฮอล์	61
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการ Sensitivity ของพอร์สซิติคอนที่เวลาในการกัด 10 นาที	62
รูปที่ 4.19 ขยายจากกราฟแสดงการ Sensitivity ของพอร์สซิติคอนที่เวลาในการกัด 10 นาที	63
รูปที่ 4.20 ขยายจากกราฟรูปที่ 4.19 เฉพาะในช่วงเวลา 123 - 126 s	63
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการ Sensitivity ของพอร์สซิติคอนที่เวลาในการกัด 15 นาที	64
รูปที่ 4.22 ขยายจากกราฟแสดงการ Sensitivity ของพอร์สซิติคอนที่เวลาในการกัด 15 นาที	65
รูปที่ 4.23 ขยายจากกราฟรูปที่ 4.22 เฉพาะในช่วงเวลา 122 - 126 s	65
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการ Sensitivity ของพอร์สซิติคอนที่เวลาในการกัด 20 นาที	66
รูปที่ 4.25 ขยายจากกราฟแสดงการ Sensitivity ของพอร์สซิติคอนที่เวลาในการกัด 20 นาที	67
รูปที่ 4.26 ขยายจากกราฟรูปที่ 4.24 เฉพาะในช่วงเวลา 172 - 175 s	67
รูปที่ 4.27 แสดงค่า Etching time (s) กับค่า Recovery time (s)	69
รูปที่ 4.28 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ohm) Etching time (s)	70

## ศัพท์เทคนิค

การกัดทางไฟฟ้าเคมี	Electrochemical etching
การกัดแบบพอร์ส	Porous etching
การขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า	Electro polishing
การดูดกลืน	Absorbance
กระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี	Anodization
ความพรุน	Porosity
ฐานรอง	Substrate
บริเวณปลดพาหะนำกระแส	Space charge region (SCR)
พอร์สซิลิกอน	Porous silicon
สารเจือผู้ให้	Donor
สารเจือผู้รับ	Acceptor
อิเล็กทรอนิกส์แสง	Optoelectronic



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

การพัฒนาทางด้าน IC (integrated circuit) หรือวงจรรวมในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าผลึกซิลิกอนมีความสำคัญมากที่ใช้เป็นวัสดุฐานรอง เนื่องจากเป็นวัสดุที่ราคาถูกและพบมากที่เปลือกโลกโดยประมาณ ประกอบด้วยซิลิกอนถึง 27.7 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามไม่เคยพบซิลิกอนในสภาพบริสุทธิ์เลย เมื่อทำให้บริสุทธิ์จะมีสีเทาเข้ม ซิลิกอนและเพชรมีโครงสร้างของผลึกและคุณสมบัติเหมือนกันแต่ซิลิกอนไม่โปร่งใส ซิลิกอนสามารถทำให้โตเป็นผลึกขนาดใหญ่และตัดออกเป็นแผ่นบาง ๆ (Wafer) สำหรับทำชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซิลิกอนบริสุทธิ์ ไม่ค่อยมีประโยชน์มากนัก ดังนั้นจึงต้องเพิ่มส่วนผสมด้วยฟอสฟอรัส โบรอน หรืออย่างอื่นเพื่อให้ซิลิกอนมีสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น กระบวนการอย่างนี้เรียกว่าโด๊ป (Doping) ซิลิกอน โดยซิลิกอนที่ถูกโด๊ปนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทำการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนได้เป็นจำนวนมาก เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเช่น เครื่องอำนวยความสะดวกสบายในชีวิตประจำวันของเราไม่ว่าจะเป็น โทรทัศน์ วิทยุ ตู้เย็นและอื่นๆ เป็นต้น

จากผลึกซิลิกอนที่เราใช้กันกลายมาเป็นพอร์ซซิลิกอน โดยการค้นพบเป็นครั้งแรกของ Uhler ขณะนั้นได้ทำงานอยู่ที่ Bell Laboratories ในประเทศสหรัฐอเมริกา จากการที่พยายามทำการพัฒนาเทคนิคในการขัดผิวหน้าวัสดุสารกึ่งตัวนำสองชนิด ได้แก่ เยอรมันเนียมและซิลิกอน เพื่อที่จะนำเอาสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ จึงต้องทำการขัดผิวหน้าให้เรียบ ซึ่งเทคนิคและวิธีการขัดผิวหน้าวัสดุด้วยไฟฟ้าของ Uhler นี้ ได้ผลออกมาทำให้ผิวหน้านั้นเรียบเป็นส่วนมาก แต่ในบางครั้งหลังจากการขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้าแล้ว พบว่าบนผิวหน้าของวัสดุเหล่านี้ปรากฏฟิล์มที่มีลักษณะสีดำ แดงหรือน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งฟิล์มเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นสำหรับการขัดผิวหน้า แต่ในปัจจุบันนี้ฟิล์มเหล่านี้ได้กลายมาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางด้านต่างๆที่มีความสำคัญและประโยชน์เป็นอย่างมาก เช่น ในทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงซึ่งปัจจุบันนี้มีบทบาทที่คิดว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่ เนื่องจากการติดต่อรับส่งข้อมูลโดยใช้สัญญาณแสงนั้นสามารถที่จะติดต่อรับส่งข้อมูลกันได้คราวละหลายๆในเวลาเดียวกันได้ โดยไม่มีการรบกวนกันของสัญญาณเกิดขึ้นเหมือนกับสัญญาณไฟฟ้า แต่ผลึกซิลิกอนนั้นไม่นิยมเอามาทำเป็นวัสดุพื้นฐานในด้านแสง เนื่องจากเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบอ้อม (Indirect-band gap) 1.14 eV ซึ่งไม่ได้อยู่ในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible light) ดังนั้นจึงไปสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงบนวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นแทนซิลิกอน แต่มันก็มีปัญหาหลายด้านจึงยังไม่ค่อยดีเท่าไร แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการค้นพบคุณสมบัติในการเปล่งแสง (Luminescence) ที่อุณหภูมิห้องของผลึกซิลิกอนที่มีฟิล์มบนผิวหน้าจากการขัดผิวหน้าของผลึกซิลิกอน จึงเป็นแนวทางที่จะสามารถจะนำเอามาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงได้ ฟิล์มที่อยู่บนผิวหน้าของผลึกซิลิกอนนั้นเมื่อเราสามารถนำมาขยายดูลักษณะโครงสร้างของมันพบว่ามันมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เราเรียกผลึกซิลิกอนที่มีโครงสร้างแบบนี้ว่า พอร์สซิลิกอน (Porous silicon) เนื่องจากเหตุผลที่กระบวนการในการสร้างชั้นของพอร์สซิลิกอนค่อนข้างที่จะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก และยังสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างวงจรรวม (IC) มาตรฐาน ดังนั้นพอร์สซิลิกอนจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ชนิดต่างๆ เช่น เซนเซอร์สุญญากาศ และ แก๊สเซนเซอร์ได้

เนื่องจากในปัจจุบันนี้นับโลกเรามีสารปนเปื้อนเป็นจำนวนมากซึ่งมีทั้งที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือแยกมันออกจากอากาศไม่ได้เลย และถ้าสารที่ปนเปื้อนมานั้นเป็นสารที่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์จะทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายได้โดยที่ไม่สามารถป้องกันได้เลยเพราะว่าไม่สามารถรู้ได้ว่าในสถานะอากาศนั้นมีสารปนเปื้อนอยู่หรือไม่ หรือแม้แต่ในระบบการทำงานต่างๆที่มีการใช้เครื่องมือต่างๆที่เกี่ยวข้องกับแก๊สถ้าเครื่องมือนั้นเกิดมีรอยรั่วทำให้มีแก๊สปนเปื้อนออกมาสู่ระบบภายนอกได้ ทำให้ผู้ที่ทำงานอยู่ในบริเวณนั้นได้รับสารปนเปื้อนหรือแก๊สที่เป็นอันตรายเข้าไปได้โดยไม่รู้ตัวจนเป็นอันตรายแล้ว ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงมีแนวทางที่คิดจะป้องกันการปนเปื้อนของแก๊สที่รั่วออกมาโดยการสร้างเครื่องมือที่จะทำการตรวจจับแก๊สขึ้นจากพอร์สซิลิกอนดังที่กล่าวมาแล้วเนื่องจากมีคุณสมบัติที่หน้าสนใจ ขั้นตอนในการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนมากนัก และมีราคาไม่แพงมาก มาสร้างเป็นเครื่องตรวจจับแก๊ส โดยเริ่มทดลองจากแก๊สที่หาได้ง่ายและมีอยู่ทั่วไป คือ แอลกอฮอล์ ส่วนแก๊สอื่นๆนั้นจะเป็นแนวทางสู่การพัฒนาในขั้นต่อไป คือนำไปทดลองกับแก๊สตัวอื่นๆที่มีอยู่บนโลก ทั้งที่เป็นอันตรายและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ใด ต่อไปอาจจะมีแนวทางการประยุกต์ใช้เพื่อเอาเครื่องตรวจจับนี้ไปหาแก๊สที่ต้องการหาได้และนำแนวคิดนี้ไปใช้พัฒนาในการตรวจจับสารปนเปื้อนในอากาศดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น



## 1.2 วัตถุประสงค์

เนื่องจากเราได้สังเกตเห็นแล้วว่า พอร์สซิติคอนนั้นได้เริ่มเข้ามามีบทบาทกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะนำเอามาทำเป็นชั้นฉนวนเพื่อแยกอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในวงจรรวมออกจากกัน หรือจะนำเอามาใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสง เช่น เซอร์เก็สก็ ตาม และในอนาคตนั้นพอร์สซิติคอนหน้าจะมีความสำคัญและประโยชน์ในการนำไปใช้งานเป็นอย่างมาก จึงทำให้เราสนใจที่จะศึกษาสมบัติของพอร์สซิติคอนและสร้างพอร์สซิติคอน ต่อจากนั้นทดลองนำไปประยุกต์ใช้งาน ทางด้านแก๊สเซนเซอร์ตามวัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษนี้

โดยการทำโครงการพิเศษครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อ

1. ศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอน
2. ศึกษาการสร้างพอร์สซิติคอนในแบบต่างๆ
3. สร้างพอร์สซิติคอนจากการกัดทางไฟฟ้าเคมี
4. วิเคราะห์โครงสร้างและศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้พอร์สซิติคอน
5. ประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์สซิติคอน

## 1.3 ขอบเขตในการศึกษา

สำหรับขอบเขตในการศึกษาของโครงการนี้ เราสามารถแบ่งเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

- 1.3.1 ศึกษา โครงสร้างและสมบัติของชั้นพอร์สซิติคอน
- 1.3.2 ศึกษาวิธีการสร้างพอร์สซิติคอนและอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สที่ทำจากพอร์สซิติคอน
- 1.3.3 สร้างพอร์สซิติคอน ออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์สซิติคอนและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์สซิติคอน
- 1.3.4 ศึกษาโครงสร้าง โดยเครื่อง Scanning Electrons Microscope (SEM) และนำพอร์สซิติคอนมาทดสอบใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สที่ออกแบบไว้เป็นต้น
- 1.3.5 วิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สของอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ระยะเวลาในการดำเนินการ

### เทอมที่ 1

1. ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพอร์สซาลิกอนและเทคนิควิธีการสร้างพอร์สซาลิกอน ในช่วงเดือน มิถุนายน 2548 ถึงเดือน กรกฎาคม 2548
2. สร้างพอร์สซาลิกอนในช่วงเดือน สิงหาคม 2548 ถึงเดือน กันยายน 2548
3. จัดทำรายงานและรายงานความคืบหน้าของโครงการพิเศษ ในช่วงเดือน ตุลาคม 2548

### เทอมที่ 2

1. ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สและเทคนิคการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์ซาลิกอน ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2548
2. นำพอร์ซาลิกอนที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยเครื่อง SEM ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2548
3. ออกแบบอุปกรณ์และจัดซื้ออุปกรณ์ ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2548
4. สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์ซาลิกอน ในช่วงเดือน ธันวาคม 2548 ถึงเดือน มกราคม 2549
5. นำพอร์ซาลิกอนมาทดสอบใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สที่ออกแบบไว้ ในช่วงเดือน มกราคม 2549 ถึงเดือน กุมภาพันธ์ 2549
6. สรุปและวิเคราะห์ ในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ 2549
7. จัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์ ในช่วงเดือน มีนาคม 2549

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษ

1. ได้ทราบ โครงสร้างของพอร์สซาลิกอนแบบต่างๆ
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับวิธีการสร้างพอร์สซาลิกอน
3. ได้ทราบเทคนิคในการสร้างพอร์สซาลิกอน โดยกระบวนการกัดทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี
4. ได้ทราบหลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส
5. ได้ทราบความสามารถในการตรวจวัดแก๊สของพอร์สซาลิกอน ที่ความพรุนต่างๆกัน
6. ได้ฝึกการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น
7. ได้ฝึกความอดทนต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ผลึกซิลิกอน

##### 2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิกอน

ซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุซิลิกอนหลายๆอะตอมมาอยู่ใกล้ชิดกัน โดยอะตอมดังกล่าวจะมีการยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมซิลิกอนเหล่านี้เรียกว่า พันธะ (Bond) กลไกในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดพันธะนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะที่เกิดขึ้นในผลึกซิลิกอนเท่านั้น

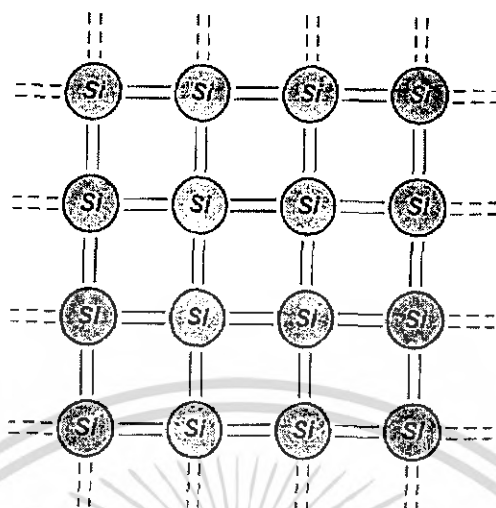
ในผลึกซิลิกอนเมื่ออะตอมของซิลิกอนเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันจะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valence electrons) อยู่ถึง 4 ตัว ดังแสดงในรูปแบบที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองง่าย ๆ ของอะตอมซิลิกอน

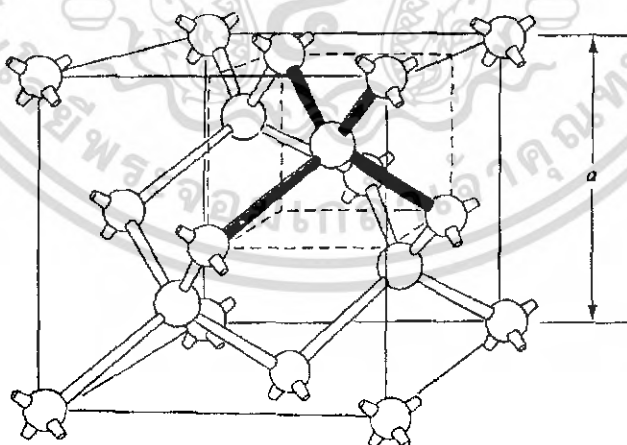
เกิดการทับซ้อนกัน อันจะทำให้เกิดพันธะแบบที่เรียกว่า พันธะ โควาเลนต์ ( Covalent bond) เกิดขึ้น โดยพันธะดังกล่าวนี้เกิดจากอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน ทั้งนี้ก็เพื่อให้อะตอมอยู่ในภาวะที่มั่นคง ดังแสดงในรูปแบบที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิกอน

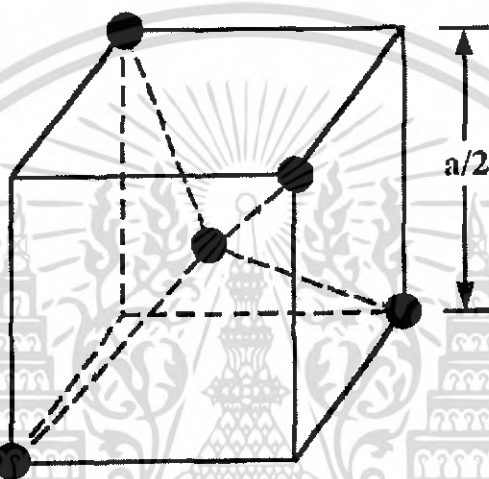
จากรูปข้างต้นจะเป็น โครงสร้างของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์ในแบบสองมิติ โดยแต่ละอะตอม จะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้ง 4 ร่วมกันกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เกิดพันธะ โควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะด้วยกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้เองทำให้อะตอมของ ซิลิกอนต่าง ๆ มีความมั่นคง และสามารถประกอบรวมกันเป็น โครงสร้างของผลึกได้ ดังแสดงในรูป ที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดง unit lattice ของโครงสร้างเพชร

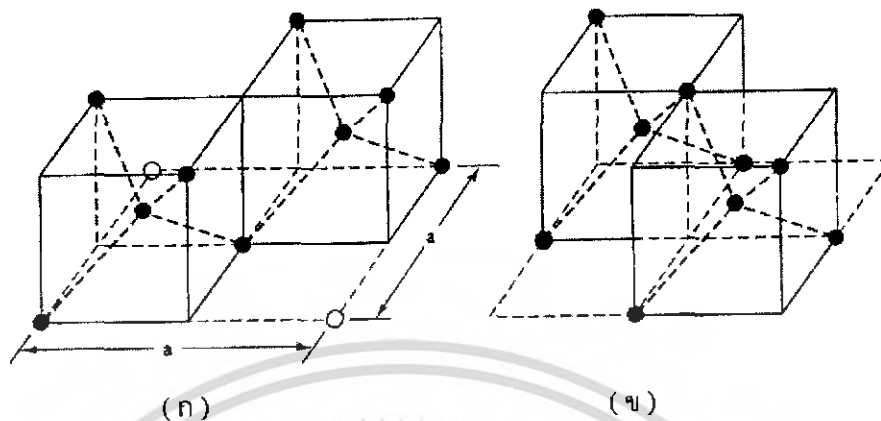
จากรูปแสดงโครงสร้าง Unit lattice ของผลึกซิลิกอนในแบบ 3 มิติ โดยมีโครงสร้างของ ผลึกเป็นแบบ เพชร (diamond structure) ซึ่งภายใน unit lattice ของโครงสร้างเพชรนี้จะประกอบไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยโครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure อยู่ภายใน โดยโครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกันกับโครงสร้างของ Body-Centered Cubic แต่จะมีข้อแตกต่างกันอยู่ตรงที่โครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure นั้นจะขาดอะตอมที่อยู่ทีมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์อยู่ถึง 4 อะตอมด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure ที่อยู่ภายใน Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร

จากรูปข้างต้นแสดงให้เห็นถึงส่วนต่างๆของ unit lattice ของ โครงสร้างเพชร โดยในรูปที่ 2.5(ก) เป็น โครงสร้างของ Tetrahedral สองส่วนที่มาเชื่อมต่อกันเป็นส่วนครึ่งล่างของ unit lattice ของโครงสร้างเพชร โดยวงกลมสีขาวในรูปจะเป็นอะตอมของซิลิกอนใน lattice ซึ่งปรากฏให้เห็นก็ต่อเมื่อมีโครงสร้าง Tetrahedral ในลักษณะแบบเดียวกันมาต่ออยู่ทั้งทางด้านซ้ายและขวาของรูป ส่วนในรูปที่ 2.5(ข) จะเป็นโครงสร้างของ Tetrahedral สองส่วนที่มาเชื่อมต่อกันเป็นส่วนครึ่งบนของ unit lattice ของโครงสร้างเพชร และเมื่อนำโครงสร้างในรูปที่ 2.5(ก) และ 2.5(ข) ทั้งสองมาประกอบรวมกันก็จะกลายเป็น unit lattice ของโครงสร้างเพชรขึ้นมา

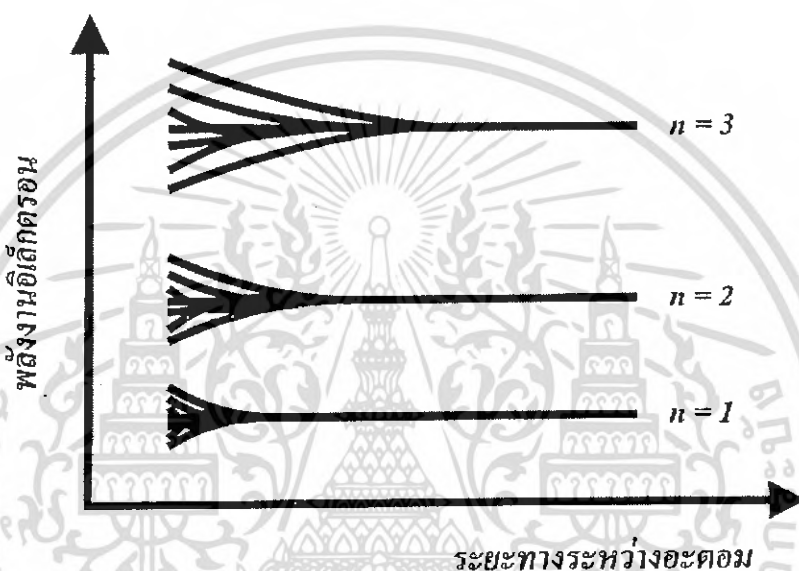


รูปที่ 2.5 แสดงส่วนต่างๆของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร โดย (ก) แสดงส่วนครึ่งล่างของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร (ข) แสดงส่วนครึ่งบนของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร

### 2.1.2 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน

ในอะตอมเดี่ยวๆของวัสดุทุกชนิด จะประกอบด้วยอิเล็กตรอนโคจรอยู่ที่ระดับพลังงานต่างๆโดยระดับพลังงานเหล่านี้เป็นระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง และจากกฎการแยกตัว (exclusion principle) ซึ่งได้บอกไว้ว่า แต่ละระดับพลังงานที่ถูกกำหนดไว้ด้วยตัวเลขควอนตัม 3 ตัว ( $n, l, m$ ) นั้น จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้เพียงสองตัว โดยที่อิเล็กตรอนสองตัวนี้ต้องมีการหมุนที่ไม่เหมือนกัน แต่เมื่อพิจารณาในรูปของผลึก ซึ่งประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากมายเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกัน จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงกลุ่มของอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่ในแถบพลังงาน ซึ่งหมายถึงระดับพลังงานจำนวนมากมายที่อยู่ใกล้ชิดกันมากจนเกิดเป็นแถบพลังงานขึ้นมา โดยแถบพลังงานเหล่านี้เกิดขึ้นจากการที่วงโคจรของอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมเดิมเกิดการทับซ้อนและเหลื่อมล้ำกันกับวงโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียง ทำให้วงโคจรหรือก็คือระดับพลังงานเดิมของแต่ละอะตอมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น กรณีอะตอมที่เหมือนกันสองอะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ๆกันทีละน้อยๆ จนกระทั่งวงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมเกิดการทับซ้อนกันเกิดขึ้น อิเล็กตรอนต่างๆซึ่งแต่เดิมมีพลังงานเท่ากันในแต่ละอะตอมเดิม จะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปอีกเล็กน้อย ทั้งนี้ก็เพราะหลักความจริงของกฎการแยกตัว ซึ่งกล่าวว่าแต่ละระดับพลังงานจะมีอิเล็กตรอนเกินสองตัวไม่ได้ ทำให้ระดับพลังงานเดิมเกิดการแตกแยกออกเป็นระดับพลังงานสองระดับ ซึ่งอยู่ใกล้กันมาก และถ้าหากอะตอมทั้งสองทั้งสองดังกล่าวยังถูกทำให้มาใกล้กันมากขึ้นอีก อิเล็กตรอนต่างๆในระดับวงโคจรถัดต่อไปข้างในของแต่ละอะตอมก็จะมีปฏิกิริยาต่อกันอีก ทำให้ระดับพลังงานเดิมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการแตกแยกออกเป็นสองระดับพลังงานอีกเช่นกัน ซึ่งจำนวนการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านี้จะมีจำนวนเท่ากับกับจำนวนของอะตอมที่ถูกนำเข้ามาให้อยู่ใกล้ชิดกัน ดังนั้นถ้าหากมีอะตอมจำนวน  $n$  อะตอมถูกนำเข้ามาให้อยู่ใกล้ชิดกันแล้ว ระดับพลังงานแต่ละระดับของอะตอมเดิมจะแตกแยกออกเป็นจำนวน  $n$  ระดับซึ่งอยู่ใกล้กันมาก เช่น กรณีมี 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีที่ 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกัน

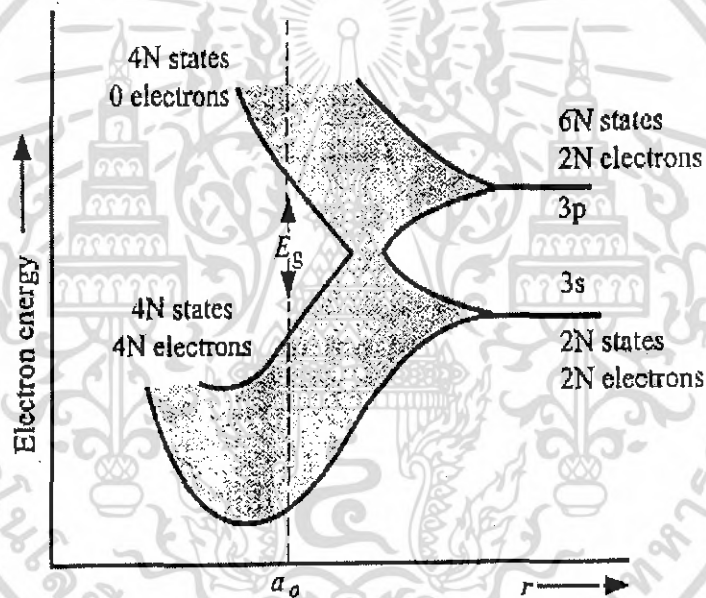
และจากความเป็นจริงสำหรับผลึกของแข็งแล้ว จำนวนอะตอมที่มีปฏิสัมพันธ์กันนั้นมีค่ามากกว่า 2 หรือ 7 อะตอมตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นอยู่มาก เช่น อาจจะเป็น  $10^{22}$  อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และช่องกว้างของแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้มีค่าราวๆ 1 eV ดังนั้นระดับพลังงาน  $10^{22}$  ระดับเหล่านี้จะอยู่ใกล้ชิดกันมากจนคล้ายกับติดกันเป็นแถบพลังงาน ระดับพลังงานภายในแถบพลังงานนี้อาจเรียกว่า ระดับพลังงานต่อเนื่องได้

ในผลึกของแข็งระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะมีได้ จะปรากฏอยู่ในลักษณะเป็นแถบของพลังงานที่แยกจากกันด้วยบริเวณต้องห้าม ซึ่งหมายถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะอยู่ไม่ได้ โดยในกรณีของผลึกซิลิกอนซึ่งมีโครงรูปอิเล็กตรอน  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$  เมื่อนำอะตอมของซิลิกอนเข้ามาใกล้กันเพื่อก่อรูปเป็นผลึก ระดับพลังงาน 3S และ 3P ซึ่งเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกสุดก็จะเกิดการแตกแยกของระดับพลังงานขึ้นดังที่ได้เคยกล่าวมาแล้ว เกิดเป็นแถบพลังงานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ และขณะที่ระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงแถบพลังงานทั้งสองจะซ้อนทับกันจนในที่สุด ถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าลดลงไปอีก แถบพลังงานที่ซ้อนทับกันอยู่จะแยกออกเป็นสองแถบ โดยแถบพลังงานทั้งสองนี้จะอยู่แยกออกจากกันด้วยแถบพลังงานต้องห้าม แต่โดยความจริงแล้วเราไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอะตอมได้อย่างต่อเนื่องตามที่เรากล่าวไว้ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าในผลึกของแข็งแต่ละชนิดมีค่าคงที่แลตทิซที่คงที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ ดังนั้น โครงสร้างของแถบพลังงานของผลึกของแข็งชนิดหนึ่งๆ ก็คือตำแหน่งหนึ่งๆบนแถบ  $a$  นั่นเอง โดยสำหรับผลึกซิลิกอนแล้วค่าคงตัวแลตทิซจะมีค่าเท่ากับ  $5.43 \text{ \AA}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.7

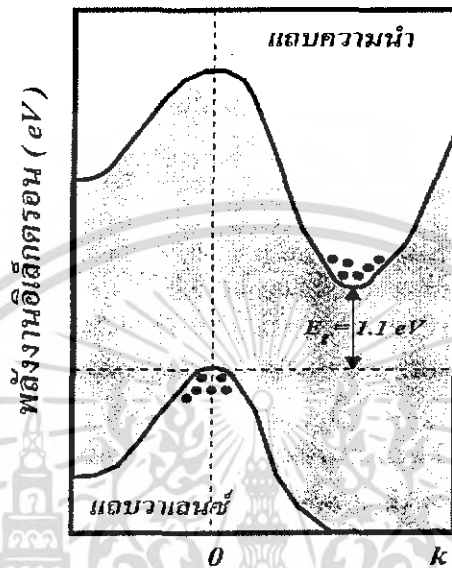


รูปที่ 2.7 แสดงการแตกแยกของระดับพลังงาน 3S และ 3P ของผลึกซิลิกอน  
ที่ตำแหน่งระยะห่างระหว่างอะตอมต่างๆ

พิจารณารูปที่ 2.7 จะเห็นว่าโครงสร้างของแถบพลังงานจะประกอบด้วยแถบอินซอมซึ่งเป็นแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ถึงสองแถบ ที่ถูกคั่นระหว่างกลางด้วยแถบต้องห้าม ซึ่งเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ โดยในสารกึ่งตัวนำแถบอินซอมแถบล่างนี้จะเรียกว่า แถบวาเลนซ์ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เกือบเต็มทุกสถานะพลังงาน ส่วนแถบบนจะเรียกว่า แถบความนำ ซึ่งจะเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เพียงเล็กน้อย ส่วนแถบพลังงานต้องห้ามจะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกช่องว่างพลังงาน โดยในผลึกซิลิกอนค่าของช่องว่างพลังงานจะมีค่าเท่ากับ 1.14 eV และโครงสร้างของแถบพลังงานในมิติของโมเมนตัม จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภูมิแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนในมิติของ k-space

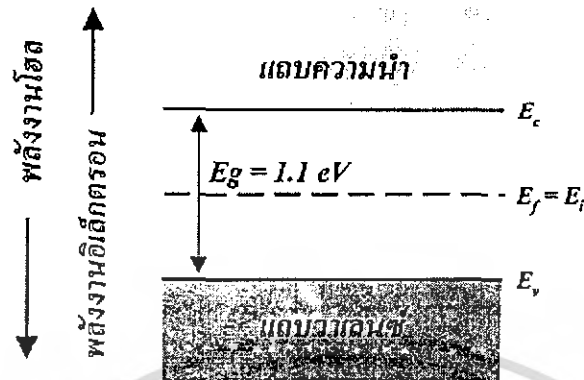
จากภาพจะเห็นได้ว่าระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะอยู่ที่ตำแหน่ง Wave number ที่  $k=0$  แต่ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำกลับอยู่ที่ตำแหน่ง  $k \neq 0$  เรียกสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะเช่นนี้ว่า สารกึ่งตัวนำแบบอ้อม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนว่าแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ สำหรับสารกึ่งตัวนำแบบอ้อม จะต้องอาศัยโฟนอนเข้าช่วย ทั้งนี้ก็เพื่อรักษาเงื่อนไขในการอนุรักษ์โมเมนตัมไว้ ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของผลึกซิลิกอน โดยจะได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2 ต่อไป

### 2.1.3 ชนิดของผลึกซิลิกอน

ผลึกซิลิกอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆคือ

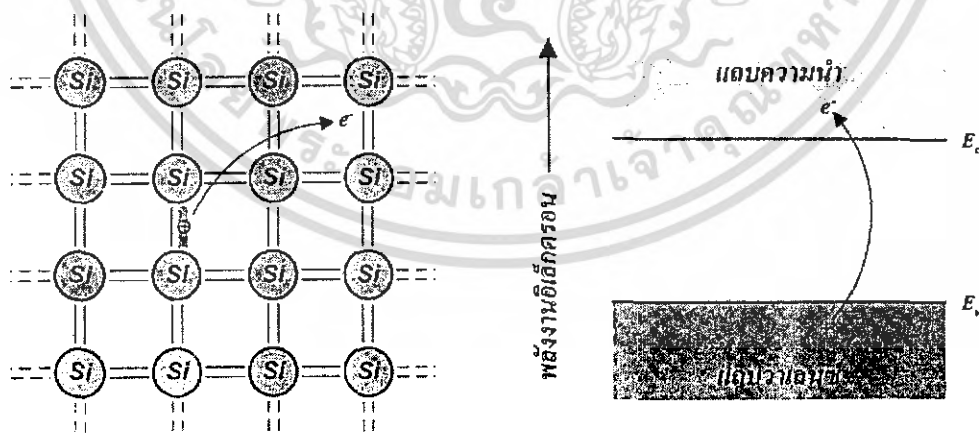
#### 1. ซิลิกอนบริสุทธิ์

ผลึกซิลิกอนซึ่งไม่ได้ถูกเติมหรือเจือปนด้วยอะตอมของธาตุอื่น ที่ในบางครั้งนิยมเรียกว่า อะตอมสารเจือ จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.9 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์

จากภาพเป็นลักษณะโครงสร้างพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์ ที่ประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบความนำ และแถบพลังงานคั่นห้าม โดยระดับพลังงานซึ่งแสดงเป็นเส้นตรงที่อยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำ คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี โดยสำหรับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์แล้วระดับพลังงานนี้จะถูกเรียกเป็นระดับพลังงานอินทรนซิค เมื่อพิจารณาจะเห็นว่ากรณีที่อิเล็กตรอนภายในแถบวาเลนซ์ที่ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้นมากพอที่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความนำของซิลิกอนบริสุทธิ์จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์นี้ ซึ่งการเกิดประจุพาหะในซิลิกอนบริสุทธิ์จะเกิดได้เฉพาะในกรณีนี้เท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำ จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนจำนวน โฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์สามารถเขียนได้เป็น

$$n = p = n_i$$

$n$  = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

$p$  = ความหนาแน่นของโฮล

$n_i$  = ความหนาแน่นของอินทรินซิก

## 2. ซิลิกอนเจือปน

ผลึกซิลิกอนที่ถูกเจือปนด้วยธาตุอะตอมของธาตุเจือปนถูกเรียกว่า ซิลิกอนปน หรือ เอ็กทริ นซิกซิลิกอน ทำให้ผลึกซิลิกอนดังกล่าวมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ

สำหรับอะตอมของธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือปน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

### 1. อะตอมสารเจือปนชนิดเอ็น (N-type impurity atom)

ได้แก่อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ 5 ของตารางพริออดิก เมื่อเติมเข้าไปจะได้ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากมาย อะตอม สารเจือชนิดนี้จะถูกเรียกว่าอะตอมผู้ให้ (Donor atom)

### 2. อะตอมธาตุเจือปนชนิดพี(P-type impurity atom)

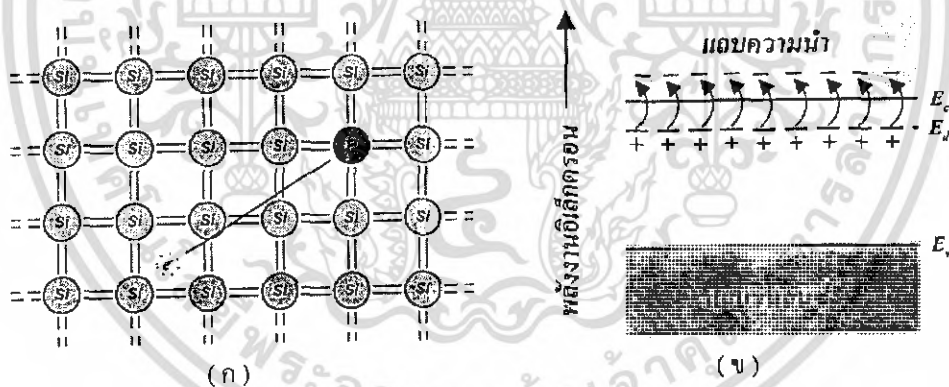
ได้ผลึกซิลิกอนชนิดพี สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกจำนวนมากมาย อะตอมสารเจือชนิดพีนี้จะถูกเรียกว่าอะตอมผู้รับ (Acceptor atom)

ส่วนซิลิกอนเจือปนที่ได้รับหลังจากการเติมสารเจือแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

### 1. ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (N-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิกอนที่ถูกเจือด้วยอะตอมของสารเจือชนิดเอ็น หรืออะตอมผู้ให้เช่นอะตอมของฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ 5 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เมื่ออะตอมถูกเติมเข้าไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในผลึกซิลิกอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ซึ่งอยู่รอบๆเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะ ดังนั้นจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งไม่มีพันธะจับอยู่ อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะอยู่ในอิทธิพลของนิวเคลียสด้วยแรงยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อยจนจะเกือบเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องปกติพลังงานจากการความร้อนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวได้รับพลังงานแล้วหลุดออกมาเป็นอิสระได้ เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างรวดเร็วกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ในสภาพเช่นนี้อะตอมของฟอสฟอรัสซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนไปก็จะกลายเป็นไอออนบวก นอกจากนี้ปรากฏการณ์พันธะแตกเนื่องจากพลังงานความร้อนก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนต์หลุดออกมาเป็นอิสระได้เหมือนกัน และทิ้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าชนิดบวกเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ แต่ปริมาณ โฮล และ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะแตกนี้ จะมีจำนวนน้อย ดังนั้นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นนี้ จึงมีปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอนที่มากกว่าโฮล ทำให้จึงเสมือนว่านำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดลบ ดังนั้นจึงเรียกว่า ผลึกชนิดเอ็น ย่อมาจาก Negative การเกิดอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้ และลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 1.11(ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 (ก) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

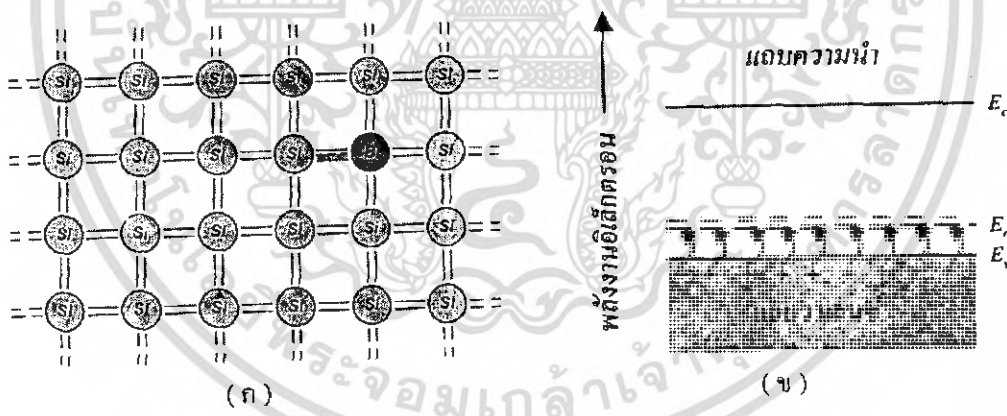
(ข) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

2. ผลึกซิลิกอนชนิดพี(P-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิกอนที่ถูกเติมด้วยสารเจือชนิดพี หรือที่เรียกว่า อะตอมผู้รับ เช่น อะตอมของโบรอน ซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ 3 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียง 3 ตัว เมื่ออะตอมสารเจือผู้รับถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิกอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมของผลึกซิลิกอนที่อยู่ข้างเคียงอีก 4 อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อะตอมสารเจือนี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ดังนั้นจึงสามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ได้เพียง 3 พันธะเท่านั้น ส่วนอีกหนึ่งพันธะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากการขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนท์มีโอกาสที่จะเข้าไปอยู่ในที่ดังกล่าวเพื่อทำให้เป็นพันธะที่สมบูรณ์ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากพันธะโควาเลนท์ก็จะทำให้เกิดโฮลขึ้นมา ดังนั้นแต่ละอะตอมของสารเจือผู้รับจะทำให้เกิดโฮลขึ้นมา โฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกสามารถนำไฟฟ้าได้ และอะตอมของสารเจือชนิดนี้ เมื่อได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามาก็จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนและโฮลจำนวนเล็กน้อยก็จะสามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากพลังงานจากความร้อนซึ่งทำให้พันธะแตกออก ดังนั้นในผลึกซิลิกอนชนิดพีจึงมีปริมาณของประจุพาหะโฮลมากกว่าจำนวนของอิเล็กตรอน และสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดบวก เราจึงเรียกผลึกซิลิกอนชนิดนี้ว่า ผลึกซิลิกอนชนิดพี การเกิดโฮลเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้รับและลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดพี แสดงในรูปที่ 2.12(ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 (ก) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดพี  
(ข) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดพี

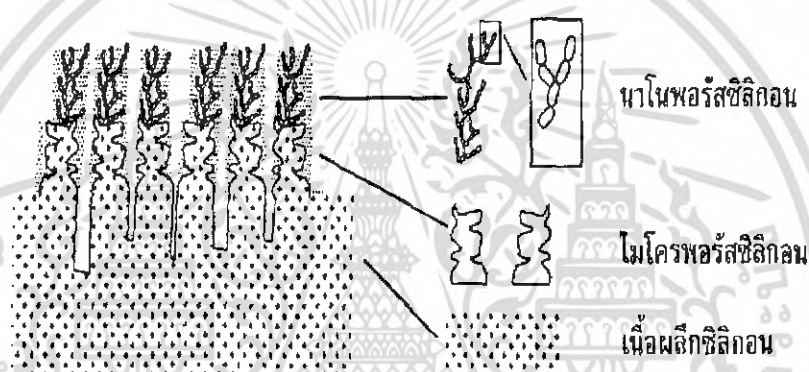
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

### 2.2 พอร์สซิลิกอน

#### 2.2.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนนั้นคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร อยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน

จากภาพจะเห็นได้ว่าชั้นของพอร์สซิลิกอนจะประกอบไปด้วย

1. โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่อยู่ติดกับเนื้อของผลึกซิลิกอน

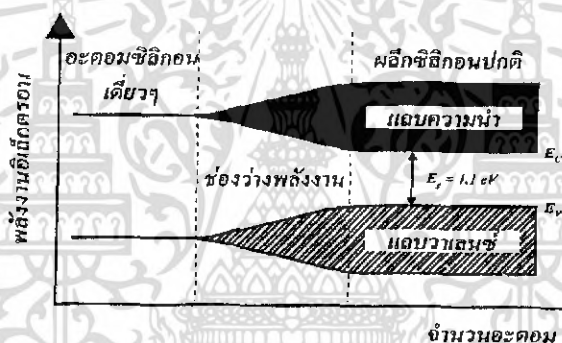
2. โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้าง อยู่ในช่วงประมาณ 10 นาโนเมตร ลงไป

โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนทั้งสองนั้น เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีซึ่งได้ทำการอธิบายเอาไว้ ในหัวข้อกลไกในการเกิดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน นอกจากนี้แล้ว จากการศึกษาค่าคว่ำโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน โดยเฉพาะส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนยังพบต่ออีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิกอน หรือซิลิกอนออกไซด์ปกคลุมอยู่ที่ผิว โดยทั่วไปอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอลิซิลิกอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อที่ 2.1.2 ถึงการเกิดแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน ดังที่ได้แสดงมาแล้วในรูปที่ 2.6 จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมี จำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนของช่องว่างพลังงานที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอน ( ซึ่งมีจำนวนอะตอมซิลิกอนอยู่ภายในประมาณ  $10^{22}$  อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปข้างต้นเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกว่าปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ quantum confinement effect ซึ่งค่าพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์นี้จะมีค่าเท่ากับ

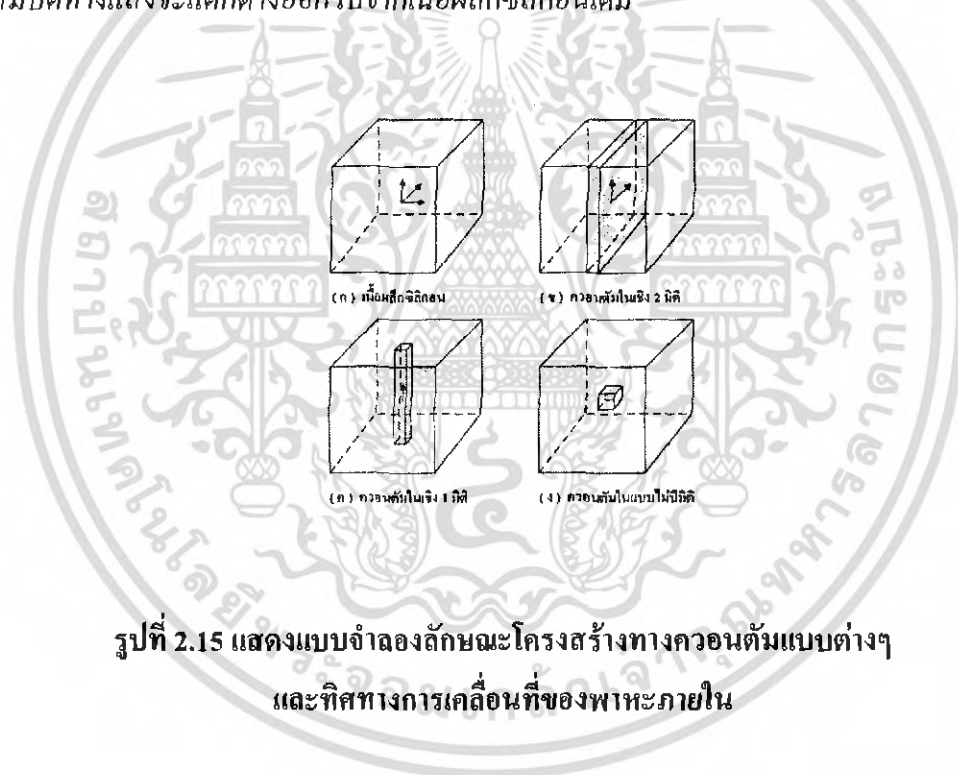
$$E_q = \Delta E_c + \Delta E_v \quad (2.1)$$



โดยที่  $E_c$  เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ quantum confinement effect  
 $\Delta E_c$  เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุด  
 ของแถบความนำเดิมของผลึกซิลิกอน

$\Delta E_v$  เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานสูงสุด  
 ของแถบความนำเดิมของผลึกซิลิกอน

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายใน โครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่  
 ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่  
 ในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) มีผลทำให้คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ และ  
 คุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างออกไปจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม



ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับด้วยลักษณะ  
 และขนาดของโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ quantum  
 confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

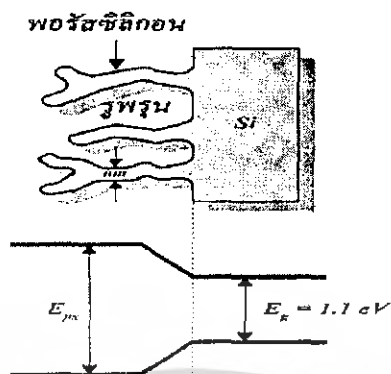
1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (QUANTUM WELL) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มี  
 ลักษณะเป็นชั้นที่มีความบางมากๆ ในระดับชั้นของ โมเลกุล 30-50 ชั้น โมเลกุล (< 100 nm) พาหะ

นำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างแบบ 2 มิติเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (QUANTUM WIRE) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีความหนาอยู่ในระดับของนาโนเมตร ( $< 10 \text{ nm}$ ) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปในโครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของโครงสร้างที่เป็นเส้นหรือเสานี้เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15(ค) ซึ่งลักษณะช่องว่างพลังงานของโครงสร้าง 1 มิติแบบนี้จะมีขนาดความกว้างช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในลักษณะนี้จะมีขนาดเล็กกว่า และมีจำนวนอะตอมที่อยู่ภายในที่น้อยกว่าในโครงสร้างแบบ 2 มิติ นั่นเอง

3. ควอนตัมในแบบ ไม่มีมิติ (QUANTUM DOT) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมากๆ ( $< 1 \text{ nm}$ ) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ภายในโครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.15(ง) อะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างจุดเล็กๆเหล่านี้จะมีจำนวนที่น้อยกว่าในโครงสร้างสองแบบแรก มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของโครงสร้างที่เป็นจุดนี้จะมีขนาดกว้างที่มากกว่าในโครงสร้างสองแบบแรกด้วย

เมื่อย้อนกลับมาพิจารณาถึงโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีระดับอยู่ในระดับนาโนเมตร ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.1 ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน จึงจัดอยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง โดยจะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งความกว้างของช่องว่างพลังงาน ( $E_{ps}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดโครงสร้างนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอนนั่นเอง



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน

### 2.3 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เราจะศึกษานั้นจะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอน (Si) ซึ่งถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (HF) โดยในที่นี้ได้แก่สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกและมีขั้วไฟฟ้าของทองแดง (Cu) ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเช่นกัน การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ

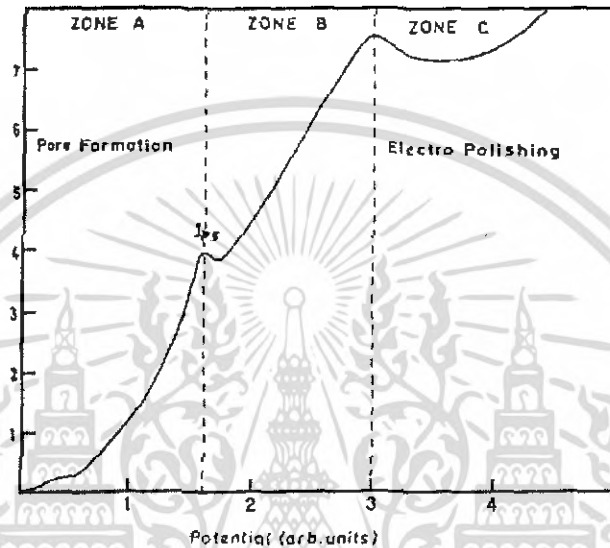
#### 1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองแดงจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิกอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้ผลึกซิลิกอนสามารถถูกกัดได้

#### 2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองแดงจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิกอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดผลึกซิลิกอนขึ้น

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี เฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias ของทั้งผลึกซิลิกอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่ามีลักษณะความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี  
ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias

จากรูปจะประกอบไปด้วยขดกราฟอยู่ 2 จุด ด้วยกัน โดยขดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่แตกต่างกัน ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 บริเวณด้วยกันคือ

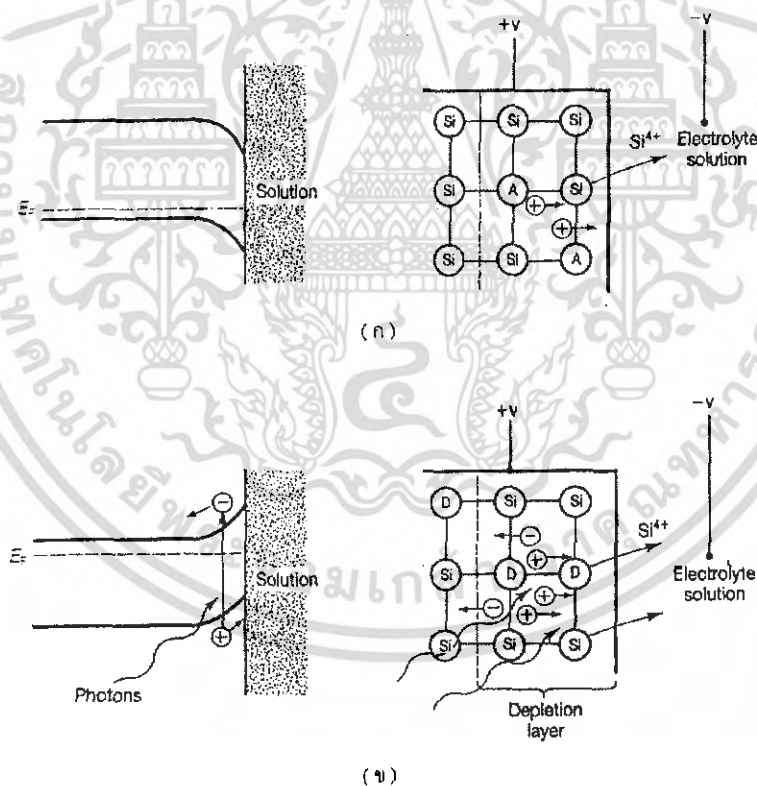
1. บริเวณ A (Porous Silicon Formation Regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของซิลิกอนถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆซึ่งจะมีผลทำให้เกิด โครงสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนขึ้นมาก็ต่อเมื่อค่ากระแส ( $I$ ) ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ขดกราฟแรก ( $I_{ps}$ )

2. บริเวณ B (Transition Regions) จะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของพอร์สซิลิกอน จากการกัดแบบพอร์สซิลิกอน ไปสู่ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้า ซึ่งอยู่ในบริเวณ C

3. บริเวณ C (Electropolishing Regions) จะเป็นการกัดในแบบลักษณะการขัดผิวหน้าของเนื้อซิลิกอนแทนการกัดในแบบลักษณะที่เกิดโครงสร้างของพอร์ซิลิกอนในบริเวณ A และบริเวณ B

**2.3.1 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก**

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น เป็นที่ทราบกันแล้วว่าที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะมีลักษณะเป็นแบบ Schottly interface โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.18



**รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก**

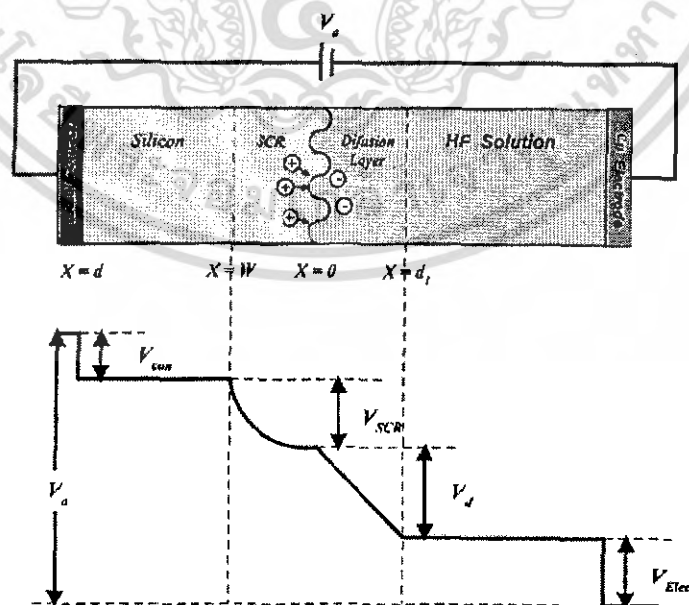
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

ในผลึกซิลิกอนชนิดพี การโค้งงอของพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบไปหน้า ทำให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนอย่างต่อเนื่องขึ้น ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก)

ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากกว่าเดิมเมื่อผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบ Anodic bias ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการ anodization จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้แก่ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสภายในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข)

### 2.3.2 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 2.19 แผนภาพการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เซลไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบ Porous etching จะประกอบด้วยผลึกซิลิกอน ซึ่งถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมและมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.19 จากภาพจะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณต่างๆภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ

- ในเนื้อของผลึกซิลิกอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับผลึกซิลิกอน ( $V_{com}$ )
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะนำกระแส ( $V_{SCR}$ )

- ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ( $V_{Elec}$ )
4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer ( $V_d$ )

ถ้าให้  $V_a$  เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้ารวมของระบบได้ดังนี้คือ

$$V_a = V_d + V_{SCR} + V_{com} + V_{elec} \quad (2.2)$$

ศักดาไฟฟ้า  $V_{com}$  กับ  $V_{elec}$  ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของพอร์ซิลิกอนแบบเดียวกัน จะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นทำให้สมการที่ 2.2 สามารถเขียนได้เป็น

$$V_a = V_d + V_{SCR} + \text{Constant} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer ( $V_d$ ) กับ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Space-charge region ( $V_{SCR}$ ) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

ในผลึกชนิดพี เนื่องจากการไบอัสไปข้างหน้าทำให้ไม่เกิดบริเวณ Space-charge region ขึ้นในผลึกซิลิกอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer นั้นเอง โดย  $V_d$  นั้นจะควบคุมอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณ diffusion layer

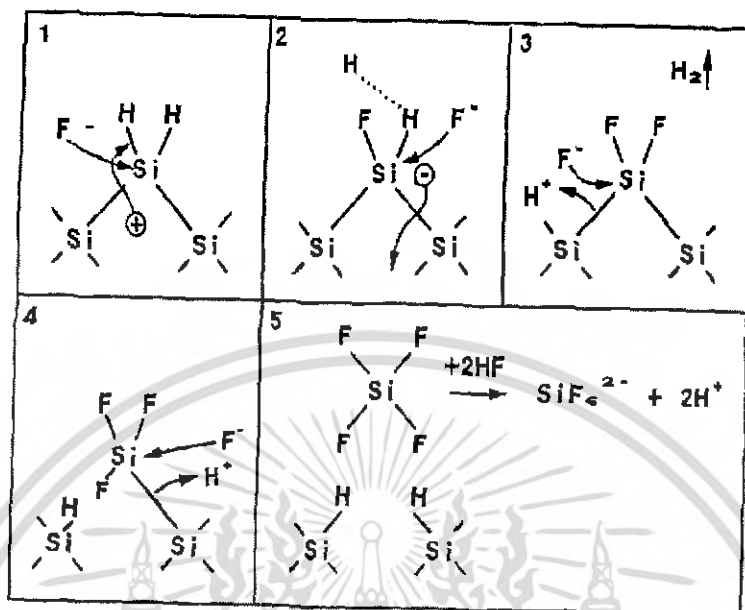
ในผลึกชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณ Space-charge region ขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณนี้ โดย Space-charge region นี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในผลึกซิลิกอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัดและ โครงสร้างของพอร์ซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้น

## 2.4 กลไกในการเกิดพอร์ซิลิกอน

### 2.4.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิกอน

เพื่อที่จะเข้าใจถึงกลไกในการเกิดพอร์ซิลิกอน ก่อนอื่นจำเป็นที่จะต้องทราบถึงปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ที่อยู่ภายใต้การไบอัสแบบ Anodic bias ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในสภาวะปกติเมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิกอนลงไป ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัดแต่อย่างใด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ผลึกซิลิกอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบ anodic bias แล้ว ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นของพอร์ซิลิกอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปแบบที่ 2.20





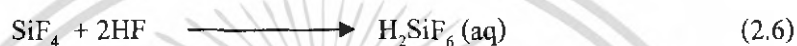
รูปที่ 2.20 แสดงขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน

จากรูปข้างต้นแสดงให้เห็นถึงกลไกในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ที่ทำให้เกิดชั้นของพอร์ซิลิกอนขึ้นมา เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกรไบอัสแบบ anodic bias ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วแอโนด ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ anodic bias โดยมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วแอโนดจนพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้อิออนของฟลูออรีน อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลเข้ามาทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนที่อยู่ถัดเข้ามา มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็น

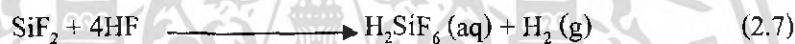
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิกอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิกอน พร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิกอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวม ใหม่ได้เป็น



จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 2.4 ที่มีผลึกซิลิกอนเป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้จำเป็นต้องอาศัย ( $\text{h}^+$ ) ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด  $\text{SiF}_2$  ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอน ต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีกับ  $\text{SiF}_2$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ 2.5 ได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $\text{SiF}_4$  หลุดออกมาจากผิวของผลึกของซิลิกอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สังเกตได้ว่า จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่ถูกกัดท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{SiF}_4$  กับกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายก็คือสารละลาย  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ 2.6

#### 2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์ซซิลิกอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ผลึกซิลิกอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะไม่ถูกสารละลายกัดแต่อย่างใด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบ Anodic bias แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ให้กระแสไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ

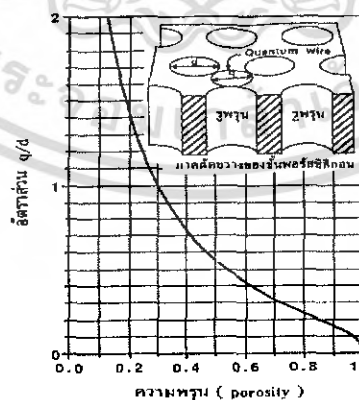
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบ electro polishing คือการกัดแบบขั้วผิวหน้าของซิลิกอนซึ่งจะไม่ทำให้เกิดรูพรุนของพอร์สซิลิกอนแต่จะทำให้ผิวหน้ามีความเรียบมากขึ้น
2. แบบ porous etching คือการกัดแบบพอร์สทำให้บริเวณที่ผิวหน้าของซิลิกอนที่มีความไม่เรียบอยู่แล้วเกิดเป็นหลุมเป็นรูขึ้นมากกว่าเดิมทำให้เกิดเสาของพอร์สซิลิกอนขึ้น

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการ anodization โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการกัดทั้งสองลักษณะ ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ ดังนั้นการเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิกอนนั้นได้มาจากการกัดแบบ porous etching

## 2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน

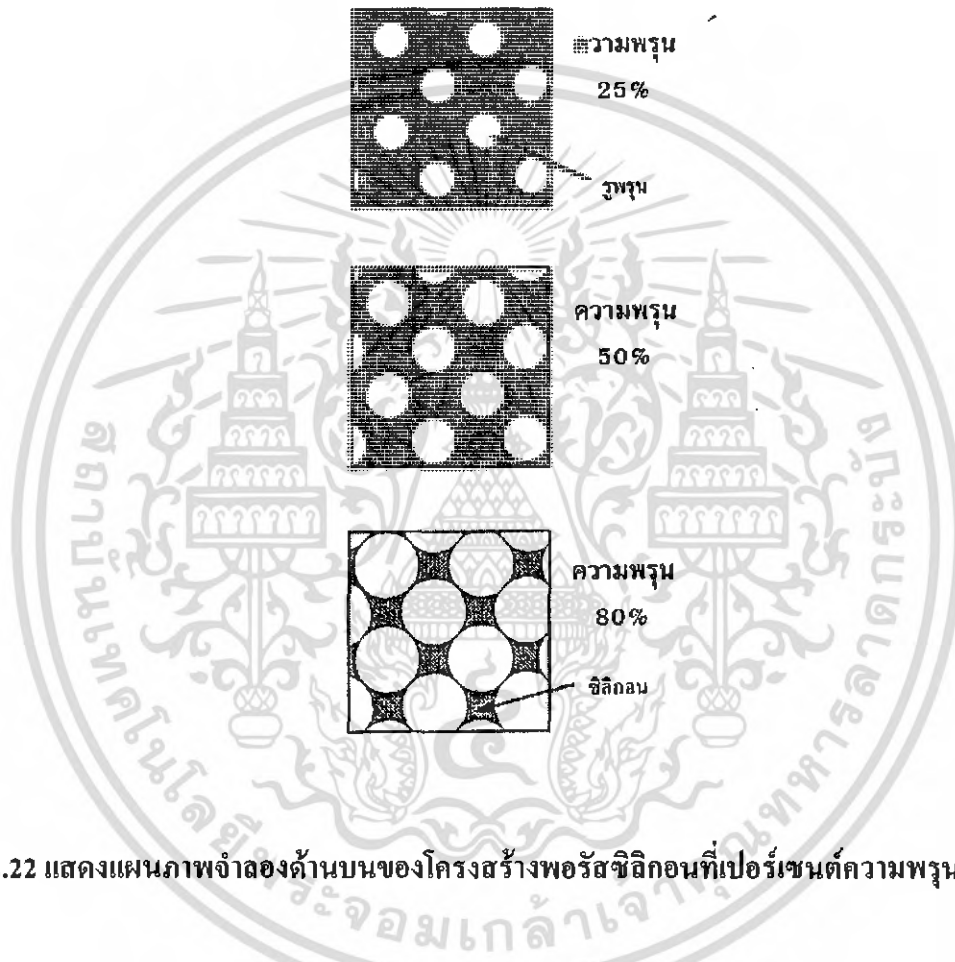
เป็นที่ทราบกันแล้วว่า พอร์สซิลิกอนนั้นก็คือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอนที่เหลือ และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน ( $q$ ) กับขนาดของรูพรุน ( $d$ ) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกักจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.22



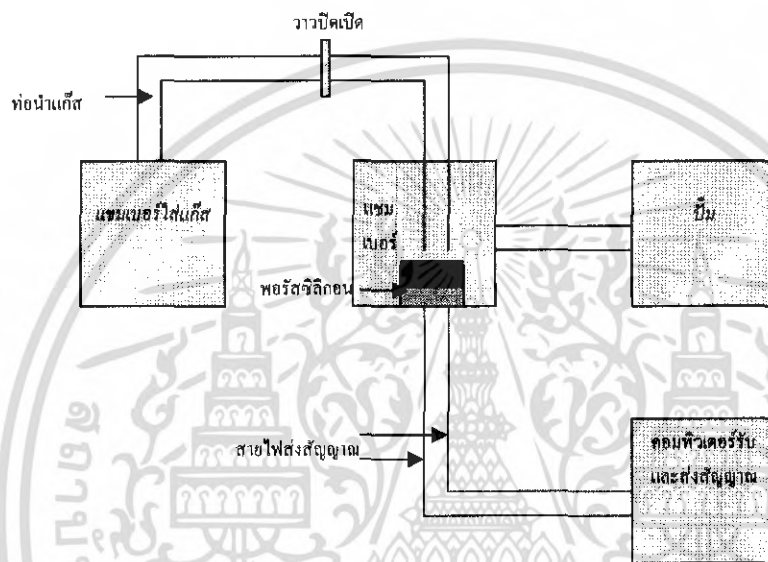
รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

## 2.6 ระบบและการทำงานของพอร์สซิลิกอนในการตรวจจับแก๊ส

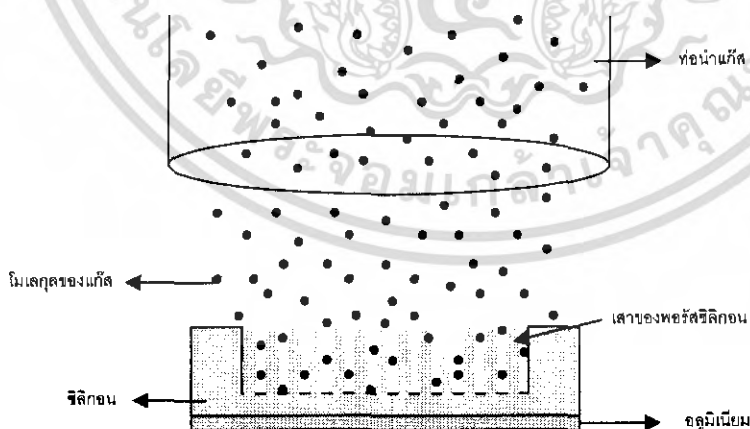
ในระบบที่ออกแบบขึ้นมานั้น ดังรูปที่ 2.23 เมื่อทำการป้อนโวลต์เข้าไปผ่านพอร์สซิลิกอนที่ได้ผ่านกระบวนการดัดขั้วการนำไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิตแล้วจะเสมือนว่ามันเป็นตัวต้านทานตัวหนึ่งซึ่งจะให้ค่ากระแสออกมาที่ค่าหนึ่งและเมื่อเราทำการ โพล์แก๊สเข้าไปที่ท่อหน้าแก๊สเข้าสู่ระบบแก๊สจะเคลื่อนที่ผ่านมายังผิวหน้าของพอร์สซิลิกอนและผ่านลงไปตามเสาของพอร์สซิลิกอนทำให้มันเกิดการเปลี่ยนค่าความต้านทานของพอร์สซิลิกอนอันเนื่องมาจากการรวมตัวของแก๊สที่เข้าไปปกคลุมเสาของพอร์สซิลิกอนทำให้มันไปเปลี่ยนแปลงค่าทางควอนตัมของผลึกซิลิกอน ซึ่งมีผลทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานของพอร์ซาลิกอนเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่คงที่จากเดิมมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในที่นี้ระบบที่ใช้จะเป็นระบบที่เป็นสุญญากาศเพื่อป้องกันการรบกวนของสถานะสิ่งแวดล้อมต่างๆที่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของพอร์ซาลิกอนซึ่งจะทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนไปได้ เพราะค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นไม่ได้เกิดขึ้นจากการโฟลแกสเข้าไปเพียงอย่างเดียวเป็นผลที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระหว่างการทำโครงการพิเศษนี้



รูปที่ 2.23 ระบบแก๊สเซนเซอร์



รูปที่ 2.24 แสดงการจับตัวระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับเสาพอร์ซาลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอน

ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนที่มีผิวด้านหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดพี ที่มีระนาบ (100) ที่ต้องใช้ระนาบนี้เพราะเป็นระนาบที่ทำให้เกิดเสาชของพอร์ซซิลิกอนในแนวตั้งตรง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผ่นผลึกซิลิกอน

#### 3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

1. ไคลอโรโรมีเทน ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )
2. อะซิโตน ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ )
3. เมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

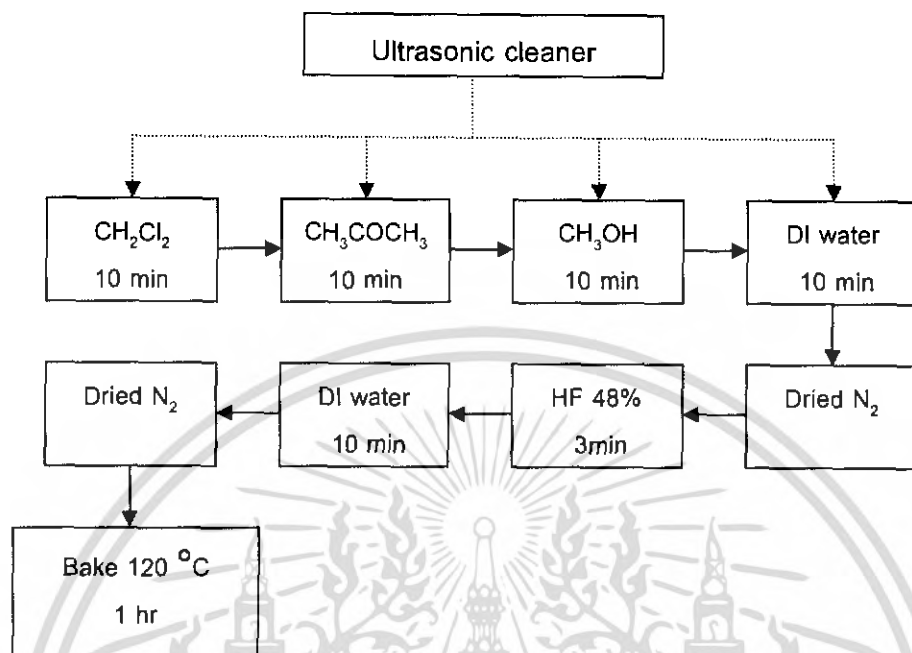
4. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF 48%)
5. น้ำไร้ประจุ (deionized water)
6. เครื่อง Ultrasonic cleaner
7. บีกเกอร์, ถาดพลาสติก, คลิปหนีบ
8. ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ )
9. เคาอบ



รูปที่ 3.2 แสดงสารเคมีและเครื่อง Ultrasonic Generator

รูปที่ 3.2 แสดงสารเคมีและเครื่อง Ultrasonic Generator ที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน สำหรับแผ่นซิลิกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นชนิดพี และมีขั้นตอนในการทำความสะอาดตามขบวนการดังรูปที่ 3.3 โดยมีขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

1. ทำการขัดผิวด้านหลัง ด้วยกระดาษทรายอย่างละเอียด เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่อาจจะเป็นฉนวน
2. จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultrasonic Generator ตามขั้นตอนดังนี้
  - 2.1 ล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (deionized water; DI water) 3 นาที
  - 2.2 ล้างไขมันบนแผ่นซิลิกอนด้วยไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane;  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) เป็นเวลา 10 นาที
  - 2.3 ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone;  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) 10 นาที เพื่อกำจัดไขมันที่เหลือ
  - 2.4 จากนั้นล้างด้วยเมทานอล (Methanol;  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) เป็นเวลา 10 นาที
  - 2.5 จากนั้นล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (deionized water; DI water) 10 นาที และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
3. ขั้นตอนต่อไป จะทำการกัดชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF 48%) เป็นเวลา 3 นาที
4. แล้วล้างด้วยน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 10 นาที และเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
5. จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. หลังจากอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้เปิดเตาอบทิ้งไว้ก่อนอย่าเพิ่งนำเอาแผ่นซิลิกอนออกจากเตาอบ

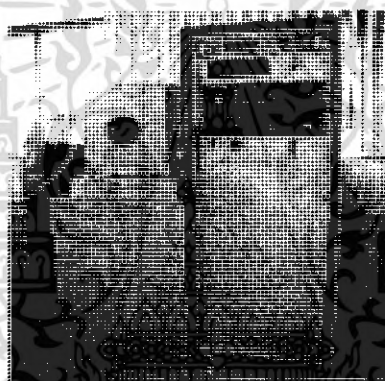
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในทันทีให้ร่องอนุกรมในเตาอบลดลงจนถึงอนุกรมห้องจึงนำออกจากเตาอบได้

### 3.3 ขั้นตอนการปลูกข้าวลุมิเนียม

ซิลิกอนที่ผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปปลูกข้าวลุมิเนียมที่ด้านหลัง ความหนา 200 นาโนเมตร ด้วยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง(RF magnetron sputtering) ดังรูปที่ 3.4 เพื่อช่วยให้การฉีดกระแสในระหว่างขบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีดีขึ้น หลังจากนั้น จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวลุมิเนียมยึดเกาะกับแผ่นซิลิกอนดียิ่งขึ้น



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

### 3.4 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน

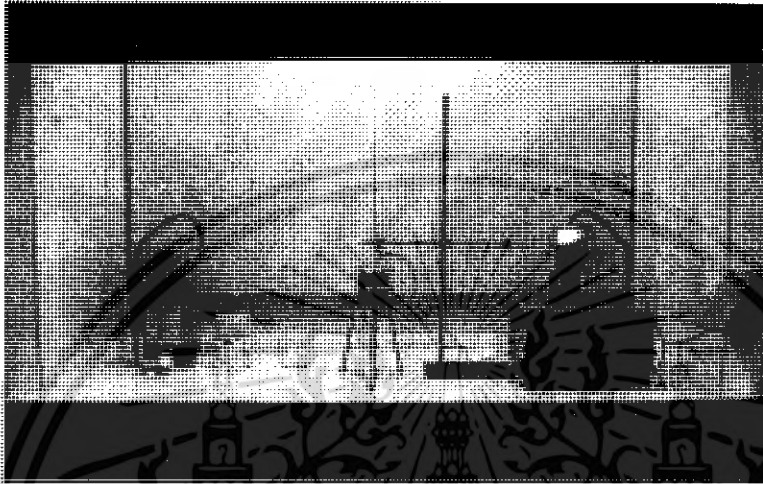
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน

1. Power supply
2. ขั้วทองแดง
3. เอทานอล
4. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF 48%)
5. น้ำไร้ประจุ (deionized water)
6. ถ้วยเทฟลอน (Teflon cup)
7. บีกเกอร์, ถาดพลาสติก, คลิปหนีบ, สายไฟ, นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ )

9. เคาอบ



รูปที่ 3.5 แสดงการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือ

สร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) โดยวิธีการสร้างมีดังนี้

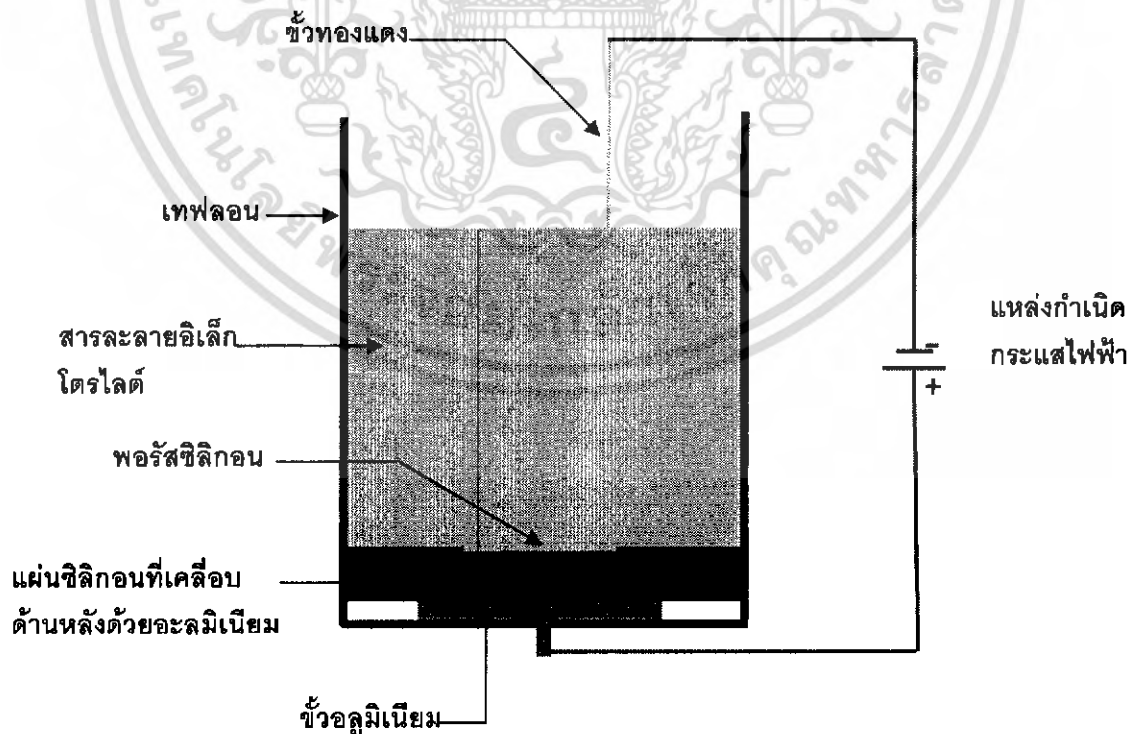
1. นำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการล้างและปลุกข้าวลุมิเนียมตามขั้นตอนต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้ว มาตัดออกเป็นชิ้นมีพื้นที่ประมาณ  $1.5 \times 1.5$  ตารางเซนติเมตร
2. จากนั้นนำซิลิกอนที่ถูกตัดเป็นชิ้นแล้วเข้าไปในไว้ในระบบดังรูปที่ 3.6
3. เติมนสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างกรดไฮโดรฟลูออริก ( $HF$  48%) : เอทานอล : น้ำ ในอัตราส่วนผสม 1 : 2 : 1 โดยปริมาตร
4. นำขั้วลบที่ทำจากลวดทองแดงขดเป็นแบบก้นห้อยมาใส่ดังรูปที่ 3.6 (ที่ทำเป็นก้นห้อยเพื่อให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ anodization ลอยออกมาได้)
5. จากนั้นนำขั้วลุมิเนียมที่ทำไว้สำหรับเป็นขั้วบวกมาใส่เข้าไปในระบบดังรูปที่ 3.6
6. นำภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่เป็นเทฟลอน (Teflon) ( เนื่องจากสามารถทนการกัดของกรดไฮโดรฟลูออริก :  $HF$  ได้) มาเติมนสารละลายอิเล็กโตรไลต์
7. กำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความพรุน (porosity) ของพอร์สซิลิกอนคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เวลาในการ anodization
2. ความหนาแน่นกระแส
3. ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
4. ชนิด และสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซัลฟิด

ในที่นี้เราจะให้ความสำคัญหนาแน่นกระแสและเวลาในการ anodization เป็นตัวกำหนดความพรุนของพอร์ซซัลฟิดคอนได้ตารางที่ 3.1 ออกมา

8. ป้อนกระแสค่าต่างๆเพื่อกำหนดความหนาแน่นของกระแสหรือ เพิ่มและลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการ anodization
9. บันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในข้อ 8. ลงในตารางที่ 3.1
10. หลังจากเสร็จสิ้นการสร้างชั้นพอร์ซซัลฟิดคอนแล้ว พอร์ซซัลฟิดคอนจะถูกนำไปล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (DI) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
11. และจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
12. จากนั้นเปิดเตาอบทิ้งไว้จนอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิจึงนำออกจากเตาอบได้
13. เมื่อผ่านขั้นตอนต่างๆแล้วก็จะได้แผ่นผลึกซัลฟิดคอนที่บริเวณผิวหน้าเกิดชั้นของพอร์ซซัลฟิดคอนขึ้นมาดังรูปที่ 4.7, 4.9 และ 4.11



รูปที่ 3.6 ระบบการกัดทางไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 เงื่อนไขการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

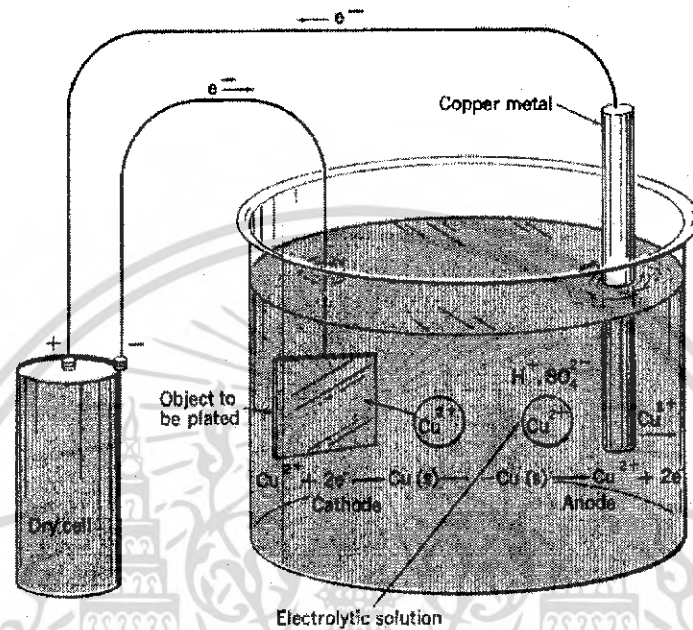
ตัวอย่าง	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm <sup>2</sup> )	เวลาที่ใช้ในการกัด (min)	กระแสไฟฟ้า (A)	แหล่งกำเนิด ไฟฟ้า
1	200	10	0.19	กระแส
2	200	15	0.19	
3	200	20	0.19	

ในที่นี้จะศึกษาทั้งหมด 3 ตัวอย่างด้วยกันเนื่องจากมีแผ่นซิลิกอนจำนวนจำกัดจึงต้องศึกษาและใช้พารามิเตอร์ทุกอย่างเหมือนกันยกเว้นพารามิเตอร์เวลา ซึ่งจะเป็นตัวแยกความแตกต่างของพอร์สซิลิกอนทั้ง 3 ตัวอย่างออกจากกัน

### 3.5 การทำขั้วเพื่อใช้ในการนำไฟฟ้า

ในโครงการพิเศษนี้ใช้กระบวนการทำ Mask แบบ Electroplating คือ กระบวนการเคลือบผิวของวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยโลหะ โดยระบบของการทำ electroplating จะนำโลหะที่จะใช้เคลือบต่อเป็นขั้วบวก (Anode) กับแหล่งจ่ายกระแส และนำวัสดุที่ต้องการจะเคลือบต่อเป็นขั้วลบ (Cathode) กับแหล่งจ่ายกระแส โดยทั้งโลหะทั้งสองชิ้นจะแช่อยู่ในสารละลายที่เป็นองค์ประกอบของสารเคลือบ ดังแสดงในรูปภาพที่ 3.7

ตัวอย่างในรูปภาพที่ 3.7 จะแสดงระบบที่ทำการเคลือบแผ่นโลหะด้วยทองแดง (Cu) จะเห็นได้ว่าทองแดงซึ่งเป็นโลหะที่ใช้เคลือบจะถูกต่ออยู่ทางด้านขั้วบวกของแหล่งจ่าย ในขณะที่แผ่นโลหะที่จะถูกเคลือบต่ออยู่ทางขั้วลบ โดยสารละลายที่ใช้จะคือ คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO<sub>4</sub>) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีองค์ประกอบของทองแดงซึ่งจะนำมาเคลือบ



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงระบบ electroplating

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเกิดพร้อมกันทั้งสองขั้วคือ

ทางด้านขั้วบวก ทองแดง(Cu) จะแตกตัวเป็นไอออนทองแดง( $\text{Cu}^{2+}$ ) ซึ่งจะลงไปลอยอยู่ในสารละลาย และให้อิเล็กตรอนออกมา 2 ตัว ดังสมการเคมี



ทางด้านขั้วลบ ไอออนของทองแดง( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ลอยอยู่ในสารละลายจะรับ อิเล็กตรอน 2 ตัวจากขั้วลบเกิดเป็นทองแดง (Cu) เกาะติดอยู่บนโลหะที่เคลือบ ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยท้ายที่สุดจะพบว่าทองแดงที่ขั้วบวกจะเกิดการสึกกร่อน ในขณะที่โลหะที่ขั้วลบจะมีการเกาะติดของทองแดงมากขึ้น โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดการเกาะของสารจะขึ้นกับ

1. กระแสที่จ่าย
2. ความเข้มข้นของสารละลาย
3. เวลาที่ใช้ในการทำ electroplating

### 3.5.1 ขั้นตอนการทำ mask

ขั้นตอนการทำ ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียม substrate
2. การออกแบบลาย และ การฉายแสง
3. การ develop และการเตรียมทำ electroplate
4. การทำ electroplate
5. การ lift off เพื่อนำ mask ออกมาให้งาน

### รายการอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำ Electroplating

#### สารเคมี

1. dry film
2. นิกเกิลเม็ด
3. น้ำยา Developer โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
4. น้ำยาสร้างชั้นออกไซด์ โพแทสเซียมไดโครเมท ( $\text{K}_2\text{CrO}_7$ )
5. น้ำยา Lift Off โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )
6. น้ำยาเคลือบนิกเกิลเงา
7. น้ำ DI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์

1. Bigger ขนาด 1 ลิตร	1 ใบ
2. ถาดพลาสติก	4 ใบ
3. แผ่นสแตนเลส	1 ชิ้น
4. ผ้าขาวกรองตะกอน	1 แผ่น
5. สายไฟ ปากคียบ	2 เส้น
6. กระจกใส	2 แผ่น
7. Current Source	1 เครื่อง
8. เตารีด	1 เครื่อง
9. หลอดไฟ 100 watt	1 ดวง
10. เครื่องสร้างฟองอากาศตู้ปลา	1 เครื่อง

### 1. การเตรียม substrate

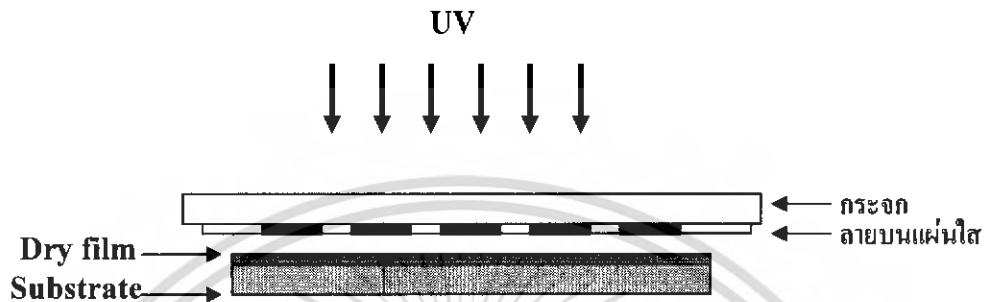
- ทำความสะอาด substrate (stainless) เพื่อกำจัดคราบไขมันหรือสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บน Substrate ซึ่งอาจก่อให้เกิดฟองอากาศเวลาดริคฟิล์ม ซึ่งจะทำให้ลายขาดได้
- นำ dry film ที่มีขนาดใหญ่กว่า Substrate เล็กน้อย ลอกพลาสติกออกหนึ่งด้าน แล้วนำมา ทาบบน substrate
- รีดด้วยใช้เครื่องรีดบัตรหรือเตารีดเพื่อให้ฟิล์มติดอยู่กับ substrate (laminat) ระวังอย่าใช้ ความร้อนมากเกินไปเนื่องจากจะทำให้ฟิล์มละลายและเสื่อมสภาพได้
- เมื่อทำการรีดฟิล์มเรียบร้อยแล้วนำมาตรวจดูฟองอากาศ ถ้าพบให้นำเข็มมาเจาะออกแล้ว ทำการรีดฟิล์มใหม่อีกครั้ง เพื่อให้ Substrate มีฟองอากาศน้อยที่สุด

### 2. การออกเบลาเย และ การฉายแสง

- นำ substrate ที่รีดฟิล์มเรียบร้อยแล้วมาวางทาบด้วยลายที่ต้องการ
- นำไปฉายแสงจากหลอดไฟ 100 Watt ประมาณ 15 - 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทำลวดลายทำได้ด้วย program L- edit (ถ้าต้องการความละเอียดระดับไมครอน) โดยตำแหน่งที่ต้องการให้ฟิล์มติดอยู่บน substrate ให้เป็นลายโปร่งแสง (อาจสลับกันขึ้นกับชนิดของฟิล์ม) UVSubstrateDry film กระจกฉายบนแผ่นใส



รูปที่ 3.8 การฉายแสงลงบนแผ่นฟิล์ม

### 3. การ develop ฟิล์มที่ไม่ต้องการออก และการทำชั้น oxide

- นำ substrate ที่ผ่านการฉายแสงแล้วมาแช่ในน้ำยา develop ที่ให้มา กับ dry film
- develop ด้วย  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (น้ำกลั้บมาใหม่ได้)
- ล้างด้วยน้ำ Di ถ้าฟิล์มยังไม่ออกให้ไปแช่ใหม่ ทำไปเรื่อยๆจนฟิล์มที่ไม่ต้องการออกหมด
- นำ substrate ที่ develop แล้วมาแช่ใน  $\text{K}_2\text{CrO}_7$  ประมาณ 15-20 นาที เพื่อสร้างชั้น oxide บางๆ ที่บริเวณ substrate ที่ไม่มีฟิล์มติดเพื่อให้ขยับต่อการลอกเอา mask ออกหลังจากการทำ electroplate

### 4. การทำ electroplating

- นำแผ่น Ni ไว้ที่ด้าน anode (ตัวจ่ายสารเกาะ)
- นำ substrate ไว้ที่ด้าน cathode (ตัวถูกเคลือบ)
- สารละลายที่ใช้คือ  $\text{NiSO}_4$  (1 kg/น้ำ Di 3 lit) +  $\text{NiCl}$  + บอริก 30-50 g/lit + น้ำยาฟีน (3 cc) + น้ำยาเงา (3 cc)
- ไฟที่ใช้ใช้จาก current source (DC) ใช้กระแส 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



0.15 A (30 นาที)

0.30 A (30 นาที)

0.90 A (เวลาขึ้นกับความหนาที่ต้องการ)

- ใส่เครื่องให้ฟองอากาศเพื่อคนให้สารละลายทั่วถึงกัน
- substrate ที่จะลงไปเคลือบควรติดสติกเกอร์ด้านหลังด้วยเพื่อป้องกันการถูกเคลือบ

### 5. การ lift off เพื่อนำ mask ออกมาให้งาน

- นำ substrate ที่ทำการ electroplate เรียบร้อยแล้วมาแช่ด้วย NaOH เพื่อทำให้ชั้น oxide หลุดออกจาก substrate
- ลอกแผ่น Ni mask ออกมา พยายามลอกทั้งสองด้านพร้อมกันเพื่อไม่ให้แผ่น Ni ยึดไม่เท่ากัน
- จะได้แผ่น Ni mask ที่จะให้งาน ได้ออกมา

### 3.5.2 ลักษณะของ mask

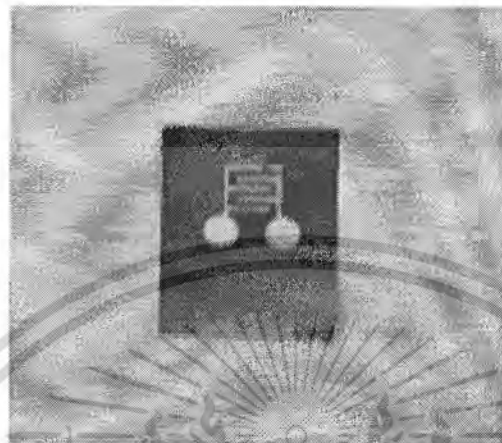
Mask มีมากมายหลายแบบแล้วแต่การออกแบบหรือขึ้นอยู่กับนำไปใช้ และต้องเหมาะสมกับผิวหน้าของชิ้นงานนั้นๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้มีดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของ Mask ทั้งหมดที่ออกแบบในโครงการพิเศษนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mask ที่เลือกใช้ในการทำเซนเซอร์แก๊สนี้คือรูปที่ 3.10 ซึ่งมีความเหมาะสมกับผิวหน้าของพอร์สซีลิกอนที่เป็นวงกลมรัศมีเท่ากับ 5.5 cm ของชิ้นงาน



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของ Mask ที่ใช้ในการทำเซนเซอร์แก๊ส

### 3.5.3 ขั้นตอนการติดขั้วไฟฟ้าที่เป็นทอง

ในที่นี้เราจะติดขั้วทอง โดยการ DC sputtering โดยมีขั้นตอนดังนี้

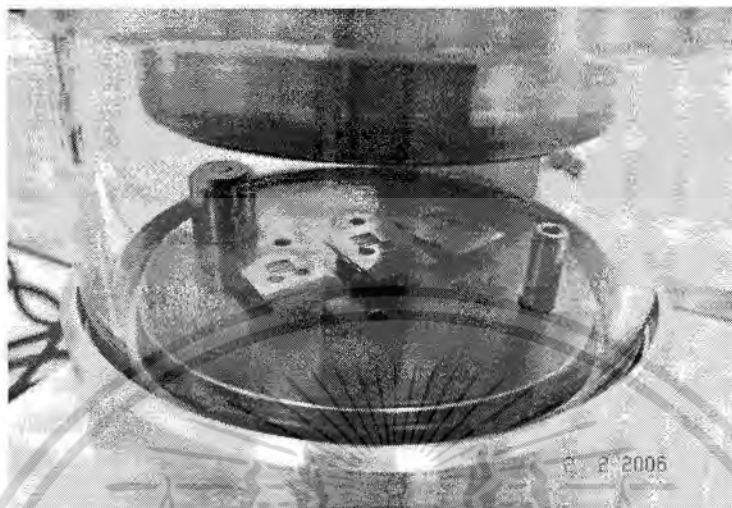
1. เราย่นำ mask ที่ได้จากหัวข้อที่ 3.5.1 มาติดที่ด้านหน้าของพอร์สซีลิกอนดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงภาพการวาง Mask ลงบนเครื่อง DC sputtering

2. จากนั้นนำเข้าไปใน chamber ดังรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงภาพตัวอย่างอยู่ใน Chamber ก่อนเตรียมการ Sputtering

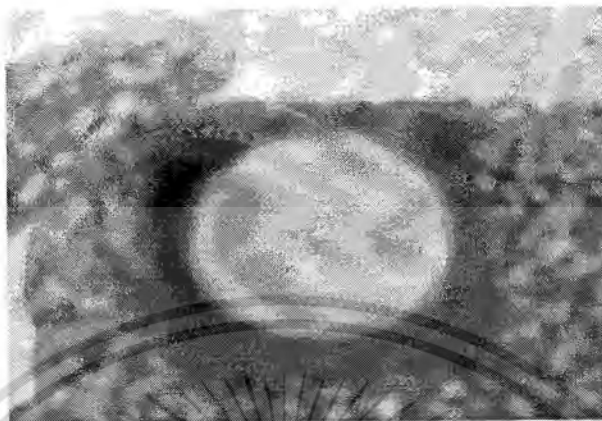
3. ทำการ sputtering โดยในที่นี้เราจะ sputtering ทั้งหมด 9 รอบ เพื่อให้ได้ความหนา 200 นาโนเมตรจากการคำนวณต้อง sputtering 8 รอบ แต่เราจะ sputtering เพิ่มอีก 1 รอบเพื่อความหนาจะได้ไม่ถึง 200 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงภาพขณะ Sputtering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ได้พอร์สซลิคอนที่มีขั้วทองติดดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ภาพพอร์สซลิคอนหลังการ sputtering

5. นำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศา เป็นเวลา 15 นาที  
 6. นำมาติดขั้วสายไฟเพื่อสะดวกแก่การนำไปใช้งานทางด้านตรวจจับแก๊สทั้งสามตัวอย่างได้  
 ออกมาดังรูปที่ 3.15

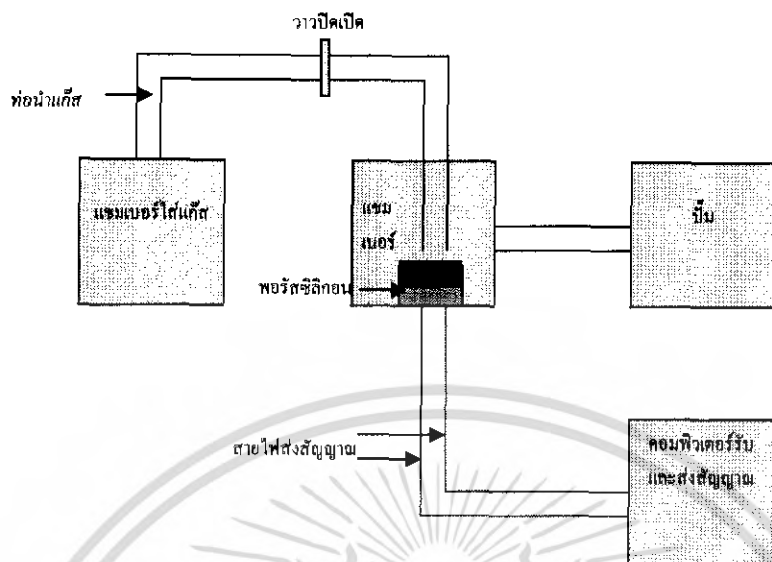


รูปที่ 3.15 ภาพพอร์สซลิคอนที่ติดขั้วแล้ว

### 3.6 การออกแบบและระบบแก๊สเซนเซอร์

ระบบของแก๊สเซนเซอร์ที่ได้ออกแบบมานั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นระบบที่ถูกรออกแบบมาแบบง่ายๆก่อนจะทำระบบจริงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แบบของระบบแก๊สเซนเซอร์

รูปที่ 3.17 เป็นระบบแก๊สเซนเซอร์จริงที่ใช้ทำการทดลองในโครงการพิเศษนี้



รูปที่ 3.17 ระบบแก๊สเซนเซอร์ที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.18 – 3.22 จะแสดงส่วนประกอบภายในระบบแก๊สเซนเซอร์ทั้งหมด



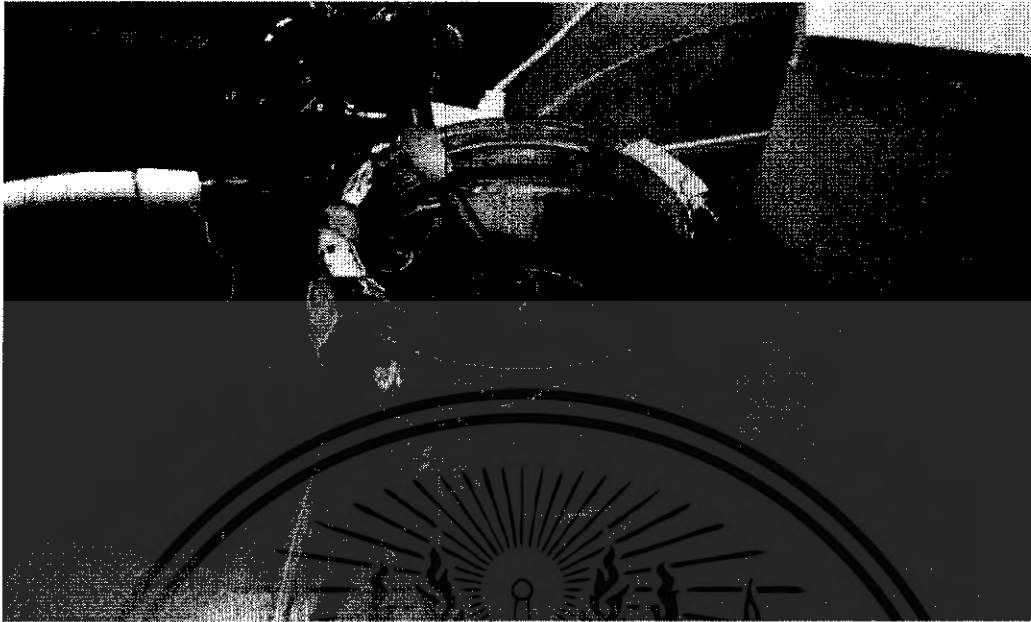
รูปที่ 3.18 ภาพเครื่องมัลติมิเตอร์



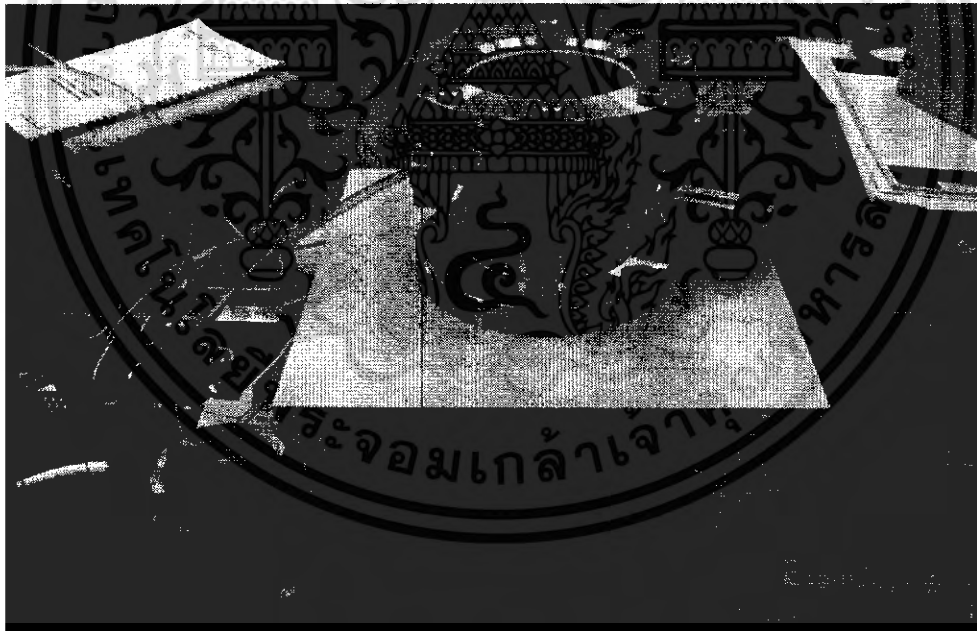
รูปที่ 3.19 ภาพ Chamber ของระบบวัดแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



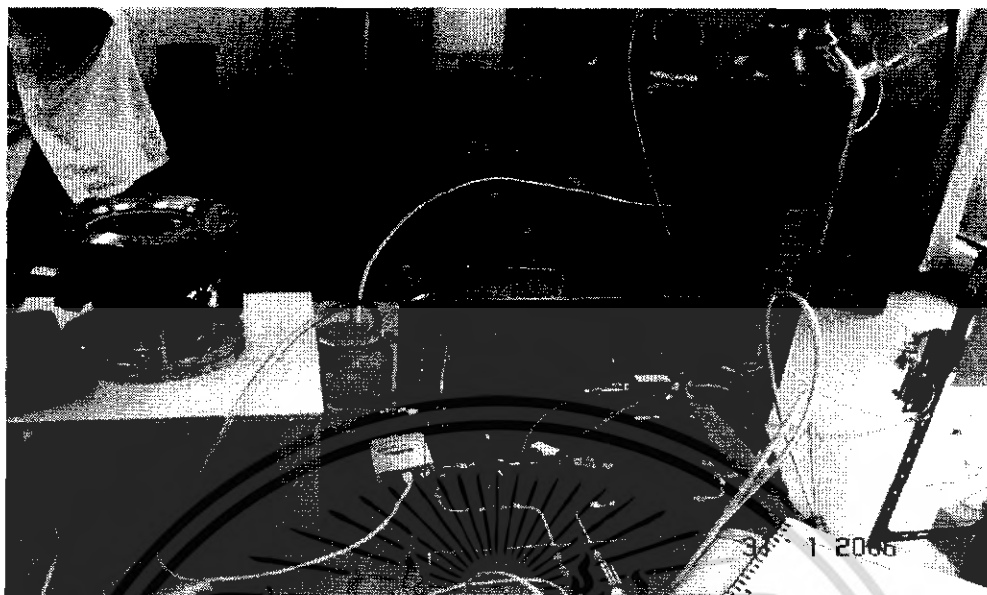


รูปที่ 3.20 แสดงภาพขวดแก้วที่ใส่แอลกอฮอล์เพื่อใช้งานในระบบ



รูปที่ 3.21 ภาพการเชื่อมต่อของท่อแอลกอฮอล์กับ Chamber วัดแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 แสดงภาพเครื่องควบคุมการไหลของแก๊สแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองจากการสร้างชั้นพอร์สซิดิกอน

##### 4.1.1 เงื่อนไขการสร้างชั้นพอร์สซิดิกอน

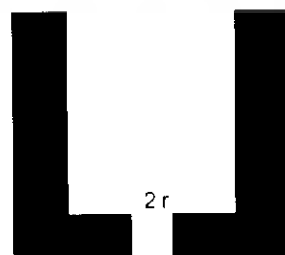
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิดิกอน

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm <sup>2</sup> )	เวลาที่ใช้ในการกัด (min)	กระแสไฟฟ้า (A)	แหล่งกำเนิด ไฟฟ้า
1	200	10	0.19	กระแส
2	200	15	0.19	
3	200	20	0.19	

แสดงตารางที่ใช้ในการกัดพอร์สซิดิกอน โดยมีเงื่อนไขต่างๆเหมือนกันแต่จะมีเวลาที่ใช้ในการกัดต่างกันก็เพื่อที่จะแยกความแตกต่างของพอร์สซิดิกอนแต่ละตัวอย่างออกจากกันได้

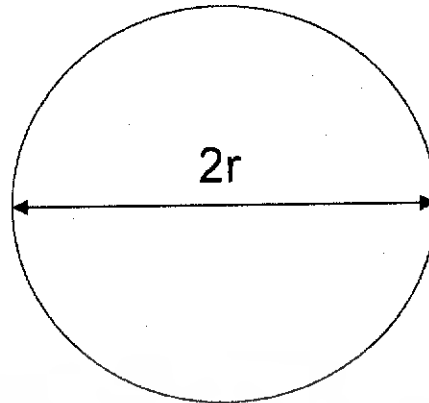
##### 4.1.2 การคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแส

จากสูตรหาความหนาแน่นกระแส  $D = I/A$  และ  $D = I/(7r^2)$  พิจารณาพื้นที่หน้าตัดเฉพาะส่วนที่เป็นพอร์สซิดิกอนนั่นก็คือวงกลมที่เจาะรูไว้ที่ด้านล่างของเพฟลอน



รูปที่ 4.1 รูที่ด้านล่างของถ้วยเพฟลอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$2r = 1.1 \text{ cm} \quad r = 5.5 \text{ cm}$$

### รูปที่ 4.2 ขนาดรูปที่ด้านข้างของเทฟลอน

ค่าคงที่ที่มีคือ  $r = 5.5 \text{ cm}, \pi = 3.141$

จากสมการ  $D = m / V$  (4.1)

ที่  $I = 0.19 \text{ A}$  จะได้  $D$  เท่ากับ

แทนค่าใน(4.1)

$$D = 0.19 / (3.141) (5.5)^2 \text{ A/cm}^2$$

$$D = 200 \text{ mA/cm}^2$$

จากการทดลองในบทที่ 3 เราได้ พอร์สซิติกอนที่ได้จากการกัดทางไฟฟ้าเคมีทั้งหมด 3 ตัวอย่างดังตารางที่ 4.1

### 4.2 การหาค่าความพรุนของพอร์สซิติกอน

- การหาค่าความพรุนของพอร์สซิติกอนหรือ Porosity ค่าที่ใช้ในการหาเปอร์เซ็นต์ความพรุนคือ

1. น้ำหนักซีลิกอน(ก่อนการกัด)



### รูปที่ 4.3 แผ่นซีลิกอนก่อนการกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. น้ำหนักพอร์สซิติคอน



รูปที่ 4.4 แผ่นพอร์สซิติคอน

## 3. น้ำหนักซิติคอนที่จุดเสาะของพอร์สซิติคอนออกจนหมด



รูปที่ 4.5 แผ่นพอร์สซิติคอนหลังทำการขูดส่วนของพอร์สซิติคอนออกแล้ว

- สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 = \text{เปอร์เซ็นต์ความพรุน} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$m_1$  = มวลของซีลิกอน (กรัม)

$m_2$  = มวลของพอร์สซีลิกอน (กรัม)

$m_3$  = มวลหลังชุบชั้นพอร์สซีลิกอนออก (กรัม)

- พารามิเตอร์ที่ผลต่อความพรุนของพอร์สซีลิกอน

1. เวลาในการกัด (anodization)
2. ความหนาแน่นกระแส
3. ชนิด และสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซีลิกอน
4. ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

ในที่นี้ค่าที่ใช้เป็นตัวแบ่งแยกความแตกต่างคือเวลาที่ใช้ในการกัดหรือเวลาในการ anodization โดยในการทดลองของเรานั้นใช้ทั้งหมด 3 เงื่อนไข คือ 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้ง่ายกว่าค่าอื่นๆ ค่าพารามิเตอร์ที่เราคงที่คือ

1. ความหนาแน่นกระแส  $200 \text{ mA/cm}^2$
2. ชนิด และสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซีลิกอนเป็นผลึกซีลิกอนชนิด P-type
3. ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกใช้ 48%

#### 4.2.1 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความพรุนของพอร์สซีลิกอน

ตัวอย่างการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของพอร์สซีลิกอนเราจะยกตัวอย่างที่เวลาในการกัด 10 นาทีหรือที่  $t = 10$  นาที จะได้เปอร์เซ็นต์ความพรุน เท่ากับ 43.836 %

- แสดงวิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ใช้เวลาในการกัด 10 นาที

นำค่าต่างๆของแผ่นซีลิกอนที่ใช้เวลาในการกัด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$m_1 =$  น้ำหนักซีลิกอน (ก่อนการกัด) = 0.21385 กรัม

$m_2 =$  น้ำหนักพอร์ซซีลิกอน = 0.21353 กรัม

$m_3 =$  น้ำหนักซีลิกอนที่หลุดเสาะของพอร์ซซีลิกอนออกจนหมด = 0.21312 กรัม

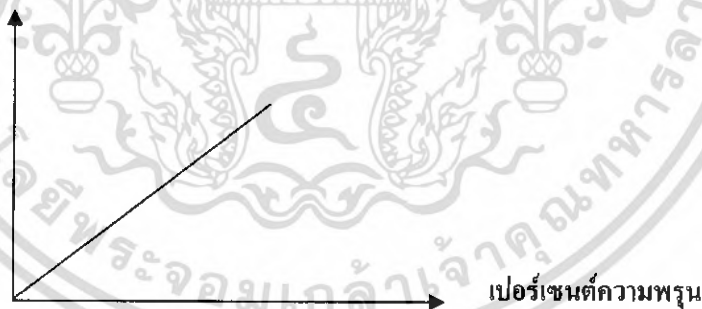
แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4.2

$$\frac{0.21385 - 0.21353}{0.21385 - 0.21312} \times 100 = 43.836 \%$$

เราจะได้เปอร์เซ็นต์ความพรุนที่เวลาในการกัด 10 นาที = 43.836 %

เนื่องจากการกัดพอร์ซซีลิกอนนั้นคือการทำให้เนื้อผลึกของซีลิกอนหลุดออกไปแล้วเกิดความพรุนขึ้นโดยขึ้นกับเงื่อนไขการกัดแบบต่างๆในโครงการพิเศษนี้ ซึ่งในที่นี้ใช้เวลาในการกัดเป็นตัวกำหนดความพรุน จึงได้ว่ายิ่งเวลาในการ anodization มากก็จะทำให้ซีลิกอนถูกกัดได้นานขึ้นก็แสดงว่าซีลิกอนจะมีความพรุนเพิ่มขึ้นดังกราฟ

เวลาในการ anodization (นาที)



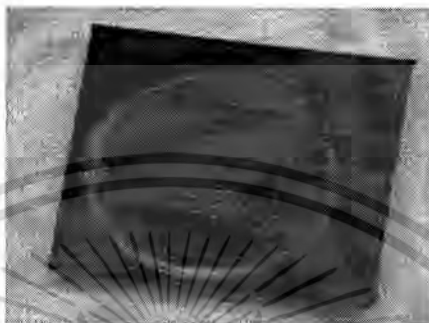
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลระหว่าง เวลาที่ใช้ในการ anodization กับ ค่าความพรุน (Porosity)

จากรูปกราฟที่ 2.22 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซีลิกอนที่ถูกกัดหายไปและขนาดของเวลาที่ใช้ในการ anodization (t) มีผลต่อความพรุนของพอร์ซซีลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซีลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นพอร์ซซีลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

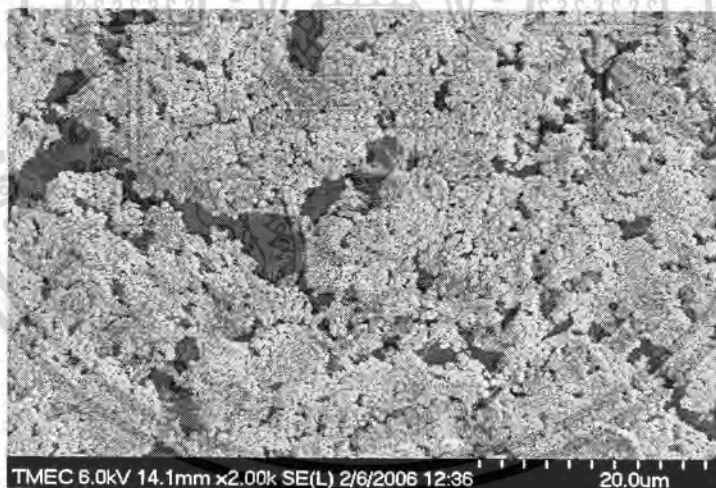
### 4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนจากเครื่อง Scanning Electrons Microscope (SEM)

#### 4.3.1 ตัวอย่างที่ 1 ใช้เวลาในการกัด 10 นาที (ใช้เวลาในการ anodization 10 นาที)



รูปที่ 4.7 แผ่นซิลิกอนที่มีผิวหน้าเกิดชั้นของพอร์สซิลิกอนขึ้นโดยใช้เวลาในการกัด 10 นาที

- ภาพถ่ายจากเครื่อง Scanning Electrons Microscope (SEM)



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้านหน้าของพอร์สซิลิกอนที่ใช้เวลาในการกัด 10 นาที

จากภาพที่ 4.7 จะมองไม่เห็นถึงความ เป็นพอร์สซิลิกอนเลยแต่ถ้าเรามองที่รูป 4.8 จะเห็นได้ ว่าผิวหน้าของซิลิกอนนั้นเริ่มมีการถูกกัดเป็นรูลึกลงไปตามรูปคือตรงที่เป็นสีดำๆแต่ยังไม่เห็นถึง เสาของพอร์สซิลิกอนที่ชัดเจนมากนักแต่ก็พอที่จะสามารถมองเห็นว่ามีการกัดที่ผิวหน้าของ ซิลิกอนบ้างแล้ว

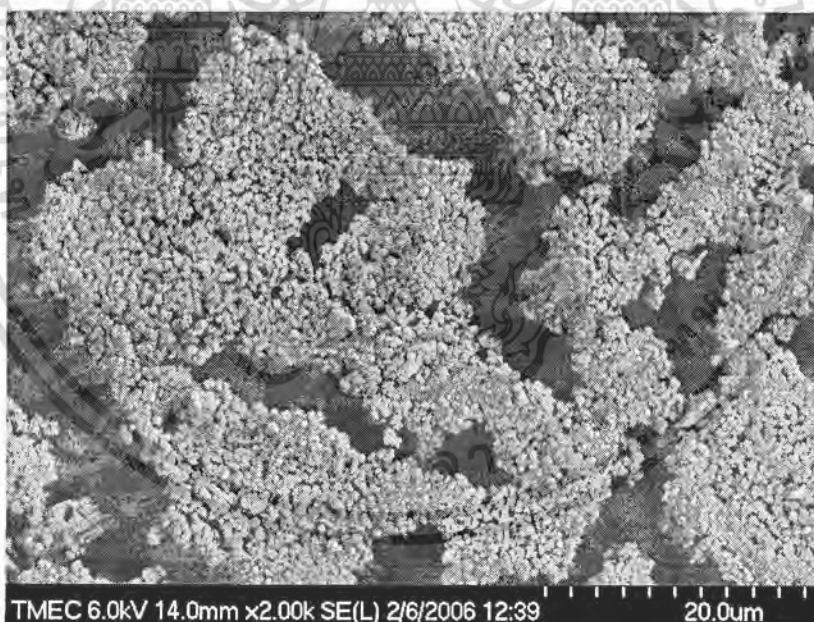
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ตัวอย่างที่ 2 ใช้เวลาในการกัด 15 นาที (ใช้เวลาในการ anodization 15 นาที)



รูปที่ 4.9 แผ่นซัลฟอนที่มีผิวหน้ากัดชั้นของพอร์ซัลฟอนขึ้นโดยใช้เวลาในการกัด 15 นาที

- ภาพถ่ายจากเครื่อง Scanning Electrons Microscope (SEM)



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายด้านหน้าของพอร์ซัลฟอนที่ใช้เวลาในการกัด 15 นาที

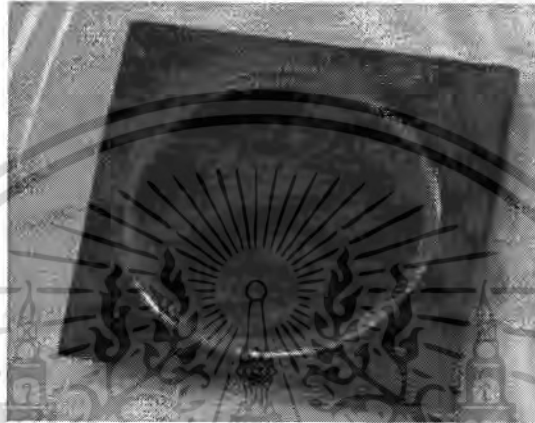
จากภาพที่ 4.9 จะมองเห็นเป็นเพียงที่ผิวหน้าในวงกลมมีสีดำแต่ถ้าเรามองที่รูป 4.10 จะเห็นได้ว่าผิวหน้าของซัลฟอนนั้นมีการถูกกัดเป็นรูกลึกลงไปตามรูปมากกว่ารูปที่ 4.8 คือจะเห็นถึงเสาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



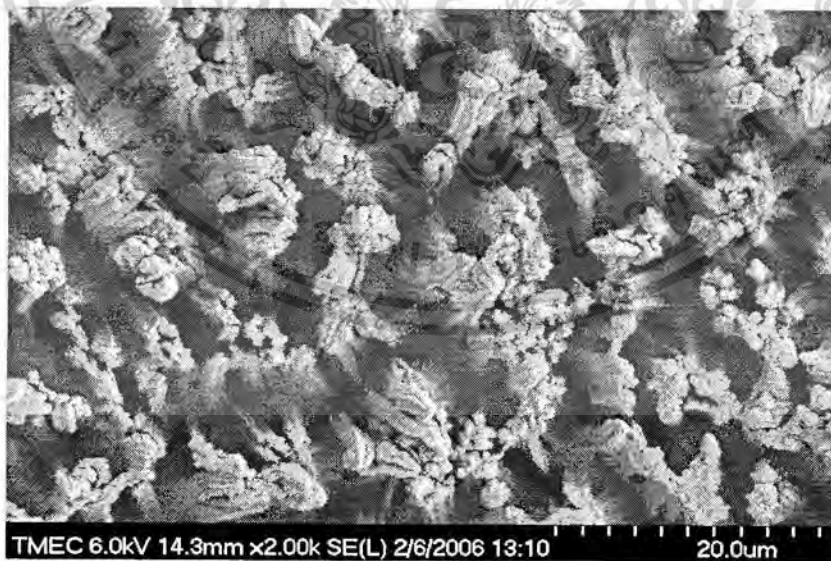
พอร์สซิติคอนบั้งแล้วจากรูปที่ 4.10 ชัดเจนกว่ามีความพรุนมากกว่ารูปที่ 4.8 ดังนั้นที่เวลาในการกัด 15 นาที จะมีความพรุนมากกว่าที่เวลาในการกัด 10 นาที

4.3.3 ตัวอย่างที่ 3 ใช้เวลาในการกัด 20 นาที (ใช้เวลาในการ anodization 20 นาที)



รูปที่ 4.11 แผ่นซิลิกอนที่มีผิวหน้าเกิดชั้นของพอร์สซิติคอนขึ้นโดยใช้เวลาในการกัด 20 นาที

- ภาพถ่ายจากเครื่อง Scanning Electrons Microscope (SEM)



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้านหน้าของพอร์สซิติคอนที่ใช้เวลาในการกัด 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

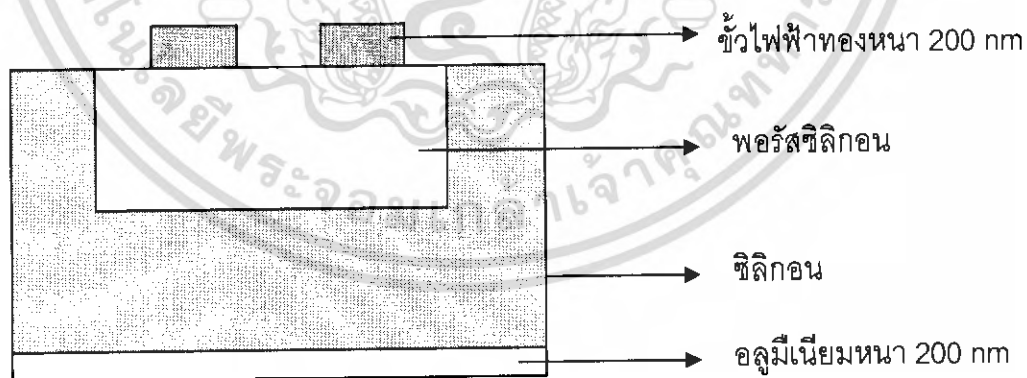


จากภาพที่ 4.11 จะมองเห็นว่าที่ในวงกลมนั้นมีสีดำที่เข้มขึ้นแต่ถ้าเรามองที่รูป 4.12 จะเห็นได้ว่าผิวหน้าของซิลิกอนนั้นมีการถูกกัดเป็นรูลึกลงไปตามรูปที่ 4.12 ซึ่งในรูปนี้ก็จะเห็นถึงเสาของพอร์สซิลิกอนที่ชัดเจนมากเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.10 และ 4.8 เราประมาณได้ว่าเสาของพอร์สนั้นอยู่ในระดับไมโครเมตรจากรูปที่ 4.12

เวลาที่ใช้ในการกัดหรือการ anodization และจากภาพถ่ายที่ได้จากเครื่อง Scanning Electrons Microscope (SEM) ทั้ง 3 รูป คือ 4.8, 4.10 และ 4.12 เราจะเห็นได้ชัดถึงความเป็นรูพรุนของซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเวลาที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าเกิดเป็นพอร์สซิลิกอน ซึ่งถ้ายังใช้เวลาในการกัดนาน เนื้อของผลึกซิลิกอนที่ถูกกัดออกไปก็จะมากตามไปด้วย จากรูป SEM ที่ได้มานั้นยืนยันได้ว่าที่เวลาในการกัดหรือการ anodization มากนั้นส่งผลให้พอร์สซิลิกอนมีความพรุนมากขึ้น จากรูปที่ 4.8, 4.10 และ 4.12 จึงสามารถที่จะบอกได้ว่าที่เวลาในการกัด 20 นาที นั้นมีความพรุนมากกว่าที่เวลาในการกัด 10 และ 15 นาที

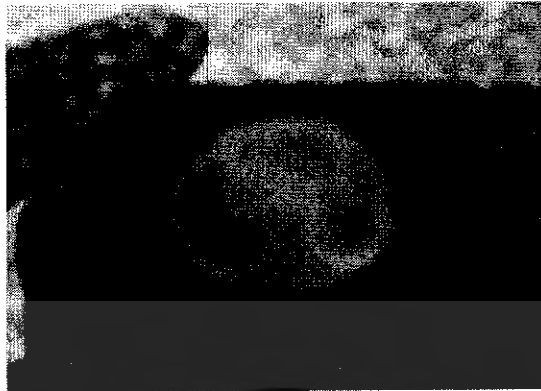
#### 4.4 ขั้วไฟฟ้าของพอร์สซิลิกอน

จากหัวข้อที่ 3.5.3 ขั้นตอนการติดขั้วนำไฟฟ้าที่เป็นทองเราได้ผลออกมาดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงชั้นต่างๆของเครื่องมือตรวจวัดแก๊สจากชั้นพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ภาพพอร์สซิลิกอนหลังการ Sputtering

และหลังจากนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศา เป็นเวลา 15 นาทีเพื่อให้ Contact นั้นติดกัน  
แน่นขึ้นจากนั้นก็นำมาติดขั้วสายไฟให้ยื่นออกมาเพื่อสะดวกแก่การนำไปใช้งานทางด้านตรวจจับ  
แก๊สทั้งสามตัวอย่างได้ออกมาดังรูปที่ 4.15.

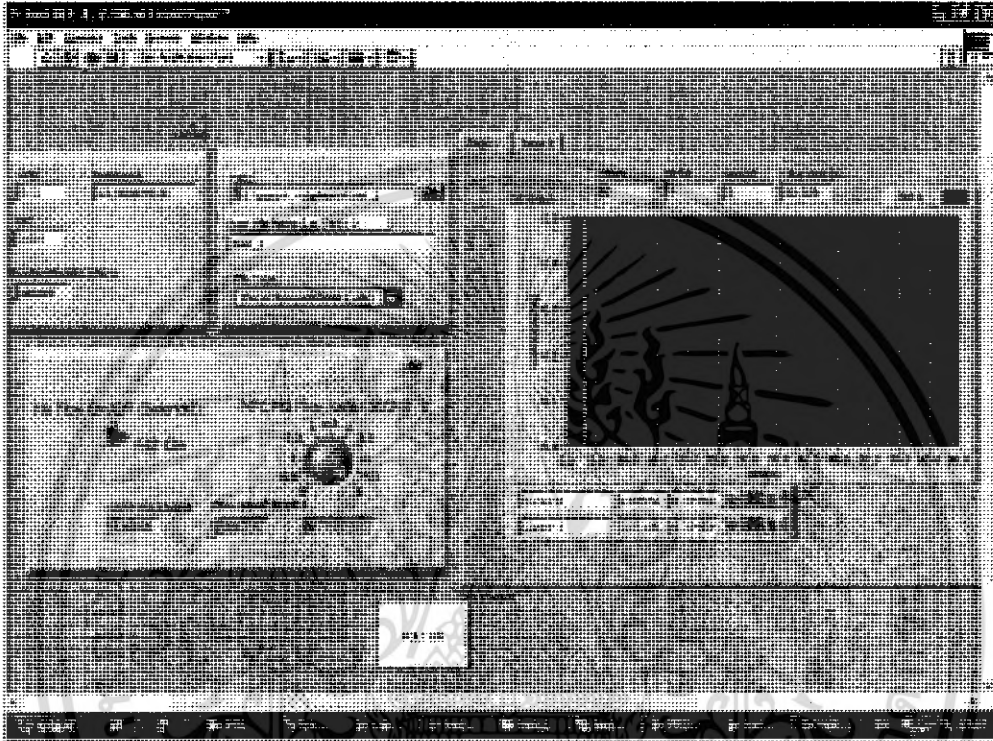


รูปที่ 4.15 ภาพพอร์สซิลิกอนที่ติดขั้วแล้ว

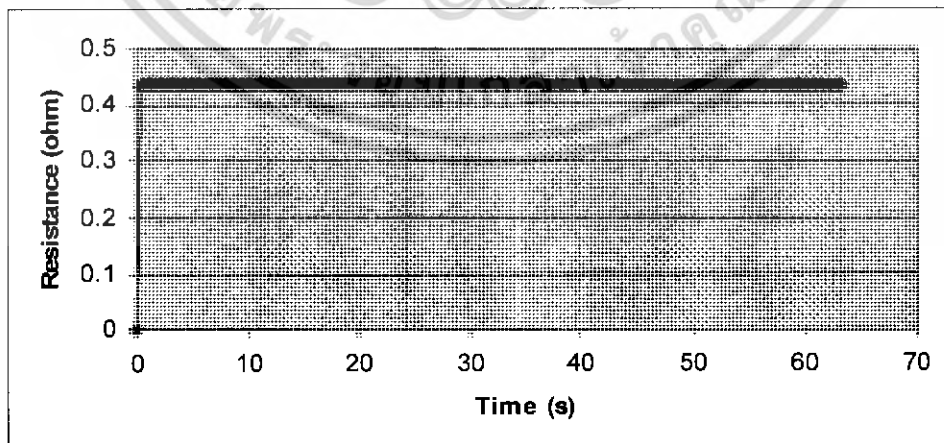
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 กราฟแสดงการตอบสนองของพอร์ตซิลิกอนกับแก๊สแอลกอฮอล์

##### 4.5.1 ในกรณีที่แผ่นซิลิกอนติดขั้วไฟฟ้าธรรมดาไม่มีชั้นของพอร์ตซิลิกอน



รูปที่ 4.16 ภาพแสดงการตอบสนองของซิลิกอนกับแก๊สแอลกอฮอล์

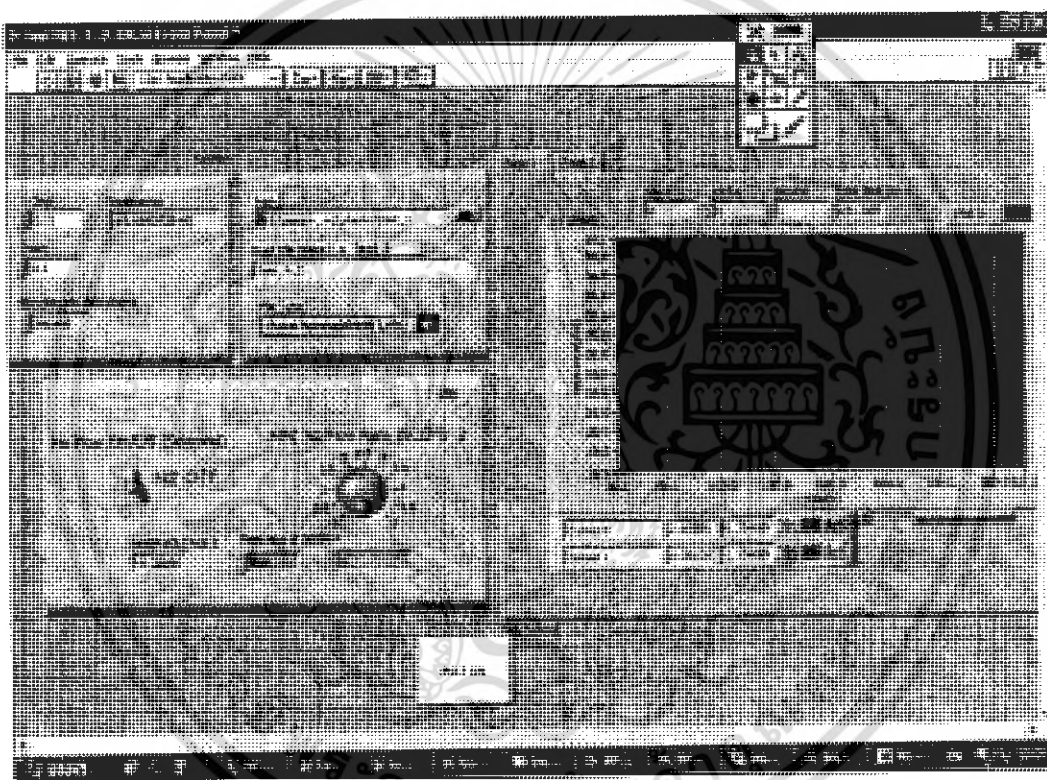


รูปที่ 4.17 ขยายจากภาพแสดงการตอบสนองของซิลิกอนกับแก๊สแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

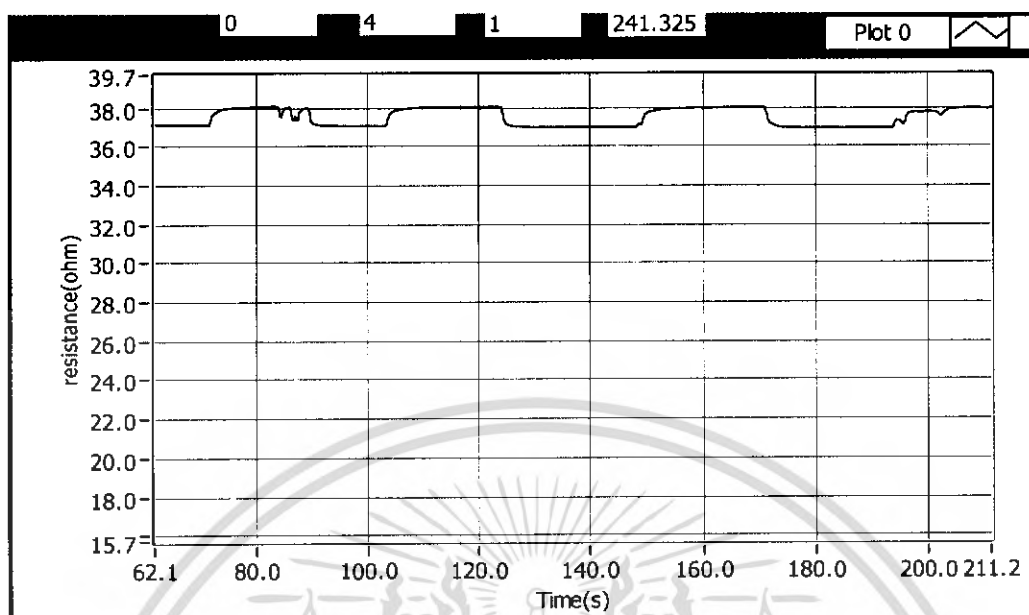
จากภาพที่ 4.16 แสดงการตอบสนองต่อแก๊สของซิลิกอนธรรมชาติโดยในรูปเราจะป้อนแรงดัน 0.1 โวลต์ เข้าไป จากนั้นทำการปล่อยแก๊สผ่านที่ผิวหน้าของซิลิกอนจะได้กราฟดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ที่รูป 4.17 จะเป็นภาพขยายจากรูปที่ 4.16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่มีการตอบสนองต่อแก๊สเลย เมื่อมีการโพล์แก๊สเข้าไปที่ซิลิกอนจากรูปไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเลยมีเพียงรอยหยักเล็กน้อยที่หน้าจะเกิดขึ้นจากสิ่งรบกวนบางอย่างเช่น ที่รอยต่อของขั้วไฟฟ้าอาจไม่แน่น

#### 4.5.2 ตัวอย่างที่ 1 ใช้เวลาในการกัด 10 นาที (ใช้เวลาในการ anodization 10 นาที)



รูปที่ 4.18 ภาพแสดงการตอบสนองของพอร์ซซิลิกอนที่เวลาในการกัด 10 นาที

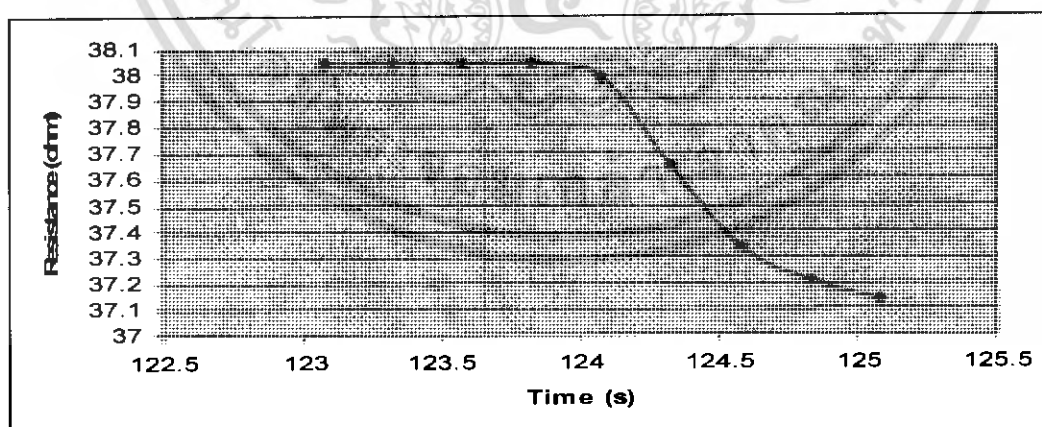
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ขยายจากภาพแสดงการตอบสนองของพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการกัด 10 นาที

จากรูปที่ 4.19 เราทำการขยายสเกลตรงช่วงเวลาข้างของค่าความต้านทานคือจากจุดสูงสุดของค่าความต้านทานถึงจุดต่ำสุดของค่าความต้านทานเราจะสามารถคำนวณหาค่า recovery time ได้ดังนี้

จากกราฟรูปที่ 4.19 เราขยายช่วงเวลาที 123 - 126 s ได้กราฟและตารางตามข้างล่าง



รูปที่ 4.20 ขยายจากรูปที่ 4.19 เฉพาะในช่วงเวลา 123 - 126 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้เวลาในการกลับมาที่ค่าความต้านทานเดิมคือที่ 123.328 s (ค่าความต้านทานสูงสุด 38.04435 ohm) ถึง 125.078 s (ค่าความต้านทานต่ำสุด 37.13707 ohm)

- สูตรการหาเวลาที่ใช้ในการ Recovery time คือ  $t_2 - t_1$  (4.3)

ให้  $t_2 = 125.078$  s,  $t_1 = 123.328$  s แทนค่า ลงในสมการที่ 4.3

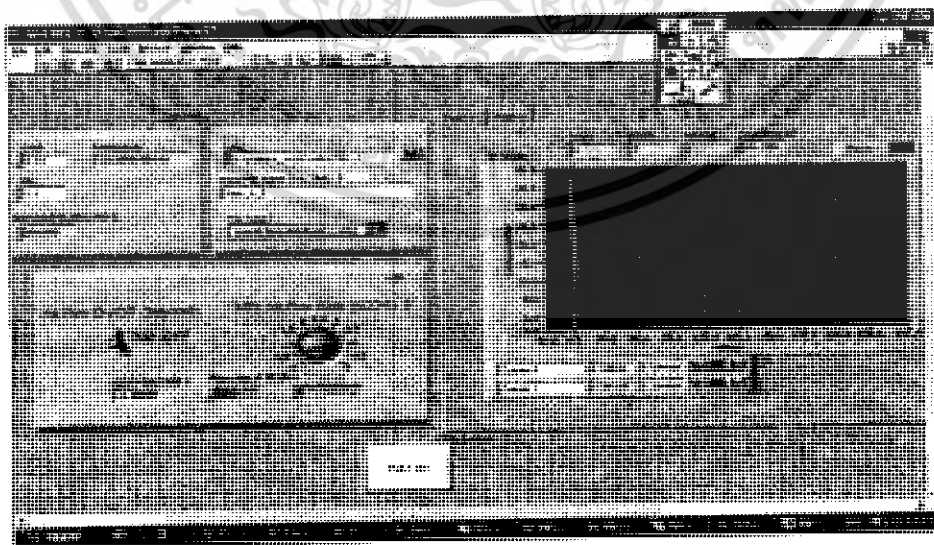
Recovery time =  $125.078 - 123.328$  s

Recovery time = 1.75 s

จากค่า Recovery time ข้างต้นทำให้สามารถหาค่า Recovery time ที่ขาขึ้นและขาลงของรูปที่ 4.18 ได้อีกดังนี้ คือ 1.738 และ 1.751 s เพราะฉะนั้นจะหาค่า Recovery time เฉลี่ยของพอร์สซิลิกอนที่ใช้เวลาในการกัด 10 นาที ได้คือ

$$(1.75 + 1.738 + 1.751) / 3 = 1.746 \text{ s}$$

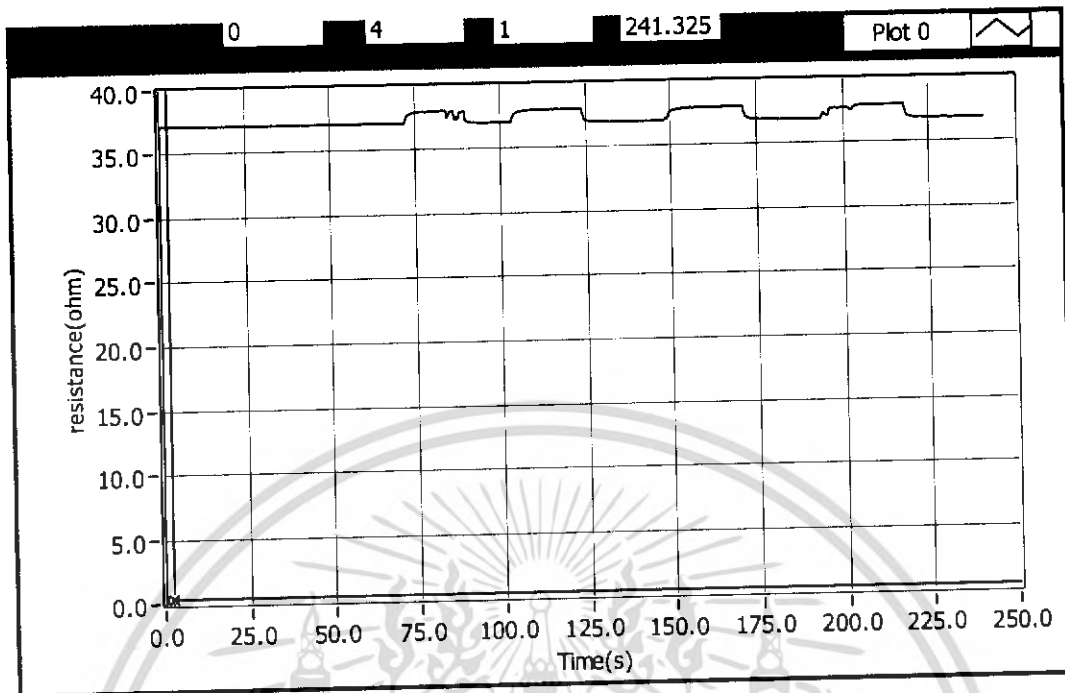
4.5.3 ตัวอย่างที่ 2 ใช้เวลาในการกัด 15 นาที (ใช้เวลาในการ anodization 15 นาที)



รูปที่ 4.21 ภาพแสดงการตอบสนองของพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการกัด 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

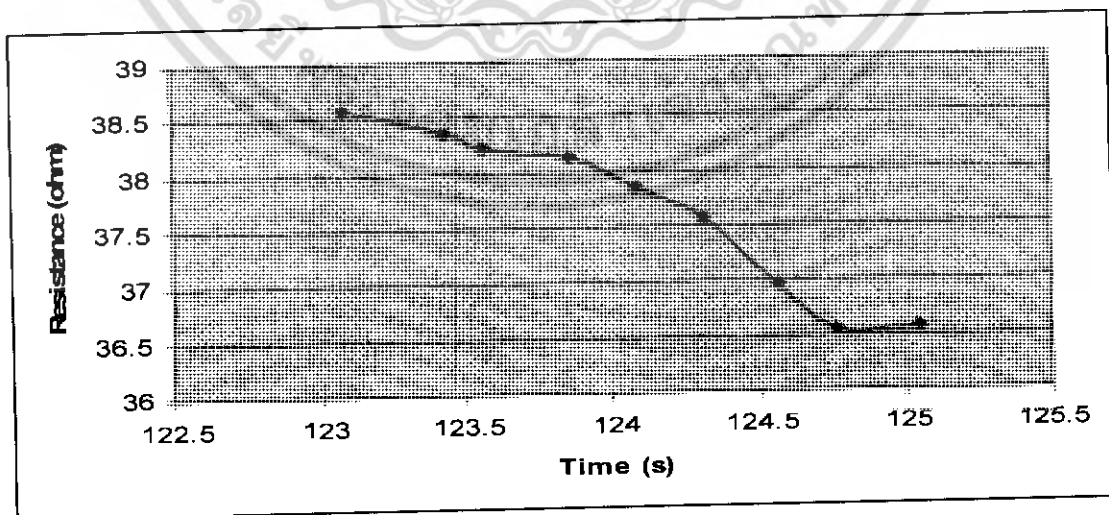




รูปที่ 4.22 ขยายจากภาพแสดงการตอบสนองของพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการกัด 15 นาที

จากรูปที่ 4.22 เราทำการขยายสเกลตรงช่วงเวลาที่ลดลงของค่าความต้านทานคือจากจุดสูงสุดของค่าความต้านทานถึงจุดต่ำสุดของค่าความต้านทานเราจะสามารถคำนวณหาค่า recovery time ได้ดังนี้

จากกราฟรูปที่ 4.22 เราขยายช่วงเวลาที่ 122 - 126 s ได้กราฟและตารางตามข้างล่าง



รูปที่ 4.23 ขยายจากรูปที่ 4.22 เฉพาะในช่วงเวลา 122 - 126 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้เวลาในการกลับมาที่ค่าความต้านทานเดิมคือที่ 123.078 s (ค่าความต้านทานสูงสุด 38.5672 ohm) ถึง 124.759 s (ค่าความต้านทานต่ำสุด 36.5374 ohm)

- สูตรการหาเวลาที่ใช้ในการ Recovery time คือ  $t_2 - t_1$  (4.3)

ให้  $t_2 = 124.759$  s,  $t_1 = 123.078$  s แทนค่า ลงในสมการที่ 4.3

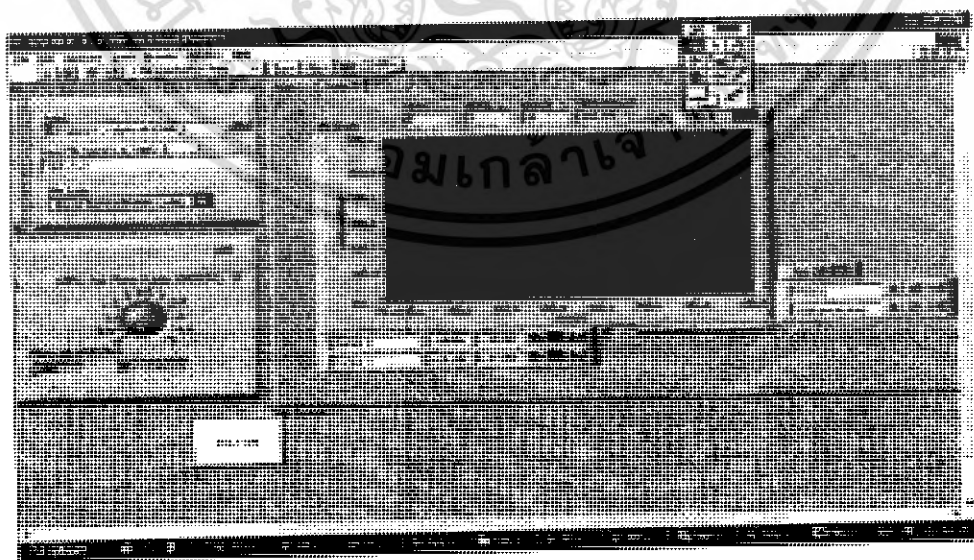
$$\text{Recovery time} = 124.759 - 123.078 \text{ s}$$

$$\text{Recovery time} = 1.681 \text{ s}$$

จากค่า Recovery time ข้างต้นทำให้สามารถหาค่า Recovery time ที่ขาขึ้นและขาลงของรูปที่ 4.18 ได้อีกดังนี้ คือ 1.667 และ 1.672 s เพราะฉะนั้นจะหาค่า Recovery time เฉลี่ยของพอร์สซิลิกอนที่ใช้เวลาในการกัด 15 นาทีได้คือ

$$(1.667 + 1.672 + 1.681) / 3 = 1.673 \text{ s}$$

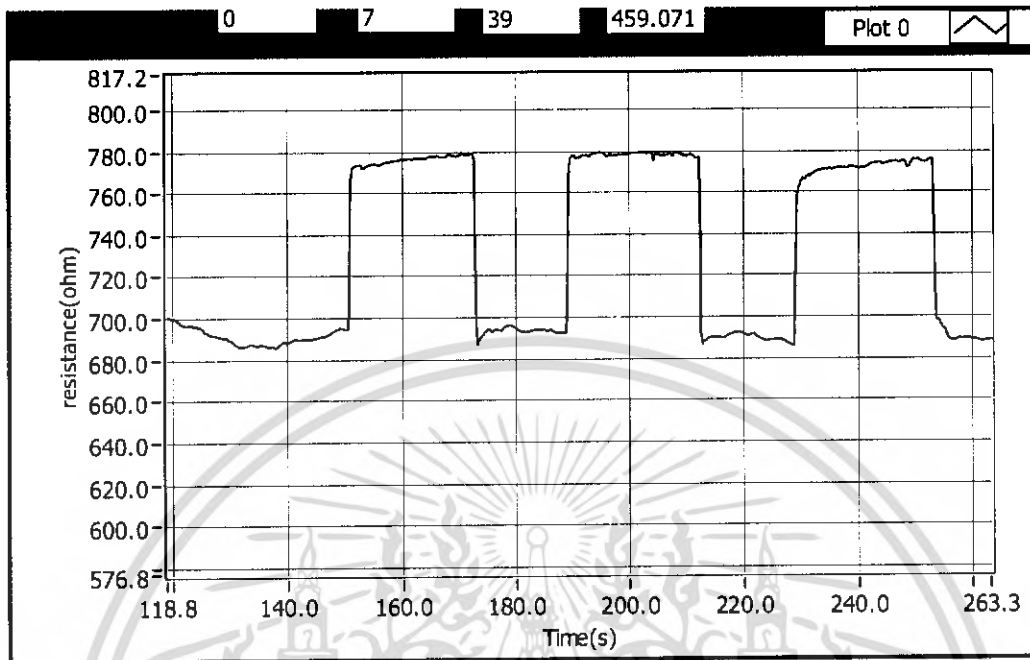
4.3.3 ตัวอย่างที่ 3 ใช้เวลาในการกัด 20 นาที (ใช้เวลาในการ anodization 20 นาที)



รูปที่ 4.24 ภาพแสดงการตอบสนองของพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการกัด 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

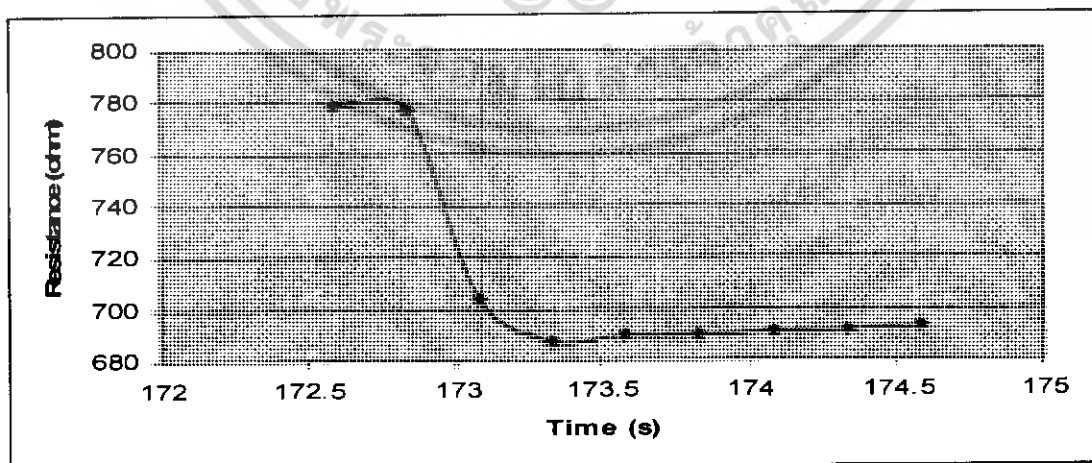




รูปที่ 4.25 ขยายจากภาพแสดงการตอบสนองของพอร์ซซิติกอนที่เวลาในการกัก 20 นาที

จากรูปที่ 4.25 เราทำการขยายสเกลตรงช่วงเวลาหลังของค่าความต้านทานคือจากจุดสูงสุดของค่าความต้านทานถึงจุดต่ำสุดของค่าความต้านทานเราจะสามารถคำนวณหาค่า recovery time ได้ดังนี้

จากกราฟรูปที่ 4.25 เราขยายช่วงเวลา 172 - 175 s ได้กราฟและตารางตามข้างล่าง



รูปที่ 4.26 ขยายจากรูปที่ 4.24 เฉพาะในช่วงเวลา 172 - 175 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะใช้เวลาในการกลับมาที่ค่าความต้านทานเดิมคือที่ 172.580 s (ค่าความต้านทานสูงสุด 778.3409 ohm) ถึง 174.080 s (ค่าความต้านทานต่ำสุด 690.8723 ohm)

- สูตรการหาเวลาที่ใช้ในการ Recovery time คือ  $t_2 - t_1$  (4.3)

ให้  $t_2 = 174.329$  s,  $t_1 = 172.829$  s แทนค่า ลงในสมการที่ 4.3

Recovery time = 174.080 – 172.580 s

Recovery time = 1.5 s

จากค่า Recovery time ข้างต้นทำให้สามารถหาค่า Recovery time ที่ขาขึ้นและขาลงของรูปที่ 4.18 ได้อีกดังนี้ คือ 1.586 และ 1.542 s เพราะฉะนั้นจะหาค่า Recovery time เฉลี่ยของพอร์สซิลิกอนที่ใช้เวลาในการกัด 10 นาทีได้คือ

$$(1.542 + 1.586 + 1.5) / 3 = 1.543 \text{ s}$$

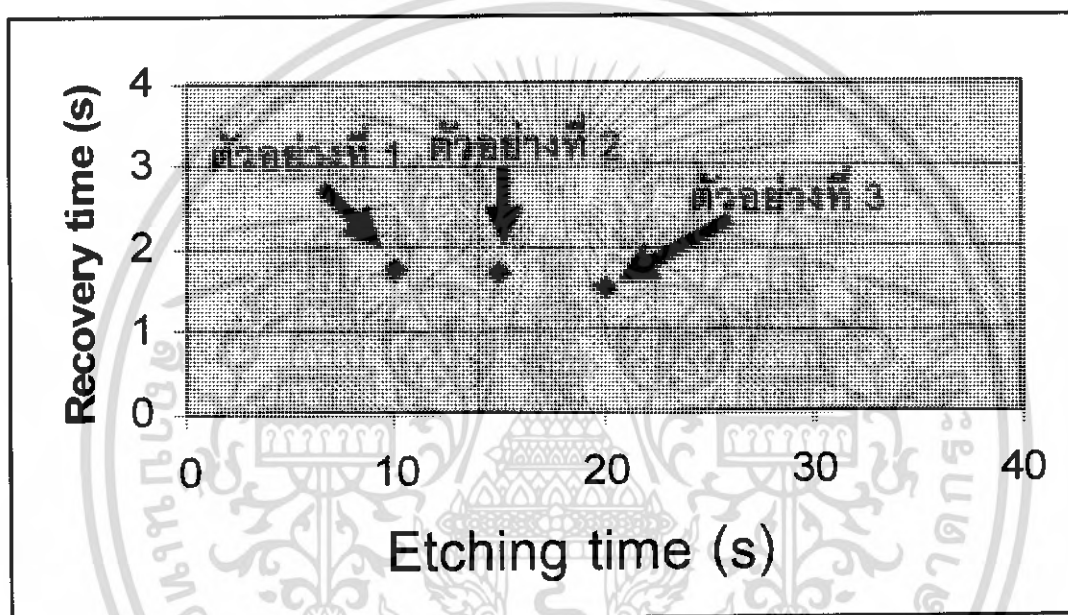
จากค่า Recovery time ของตัวอย่างทั้งสามนั้นสามารถนำมาเขียนลงในตารางที่ 4.5 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 Etching time (s) - Recovery time (s)

Etching time (s)	Recovery time (s)
10	1.746
15	1.673
20	1.543

จากตารางที่ 4.2 จะสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.27 และจากค่า Recovery time พอที่จะสรุปได้ว่าค่า Recovery time นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งต่างกันเพียงประมาณไม่มากนักคือประมาณ 0.1 s ถึง 0.2 s ทำให้พอจะบอกได้ว่าค่า Recovery time ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความพรุนมากนัก แต่ขึ้นอยู่กับพันธะในการเกาะของโมเลกุลแก๊สกับเสาของพอร์สซิลิกอนซึ่งทั้งสามตัวอย่างจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการเกาะแบบเดียวกันเนื่องจากเป็นซิลิกอนแบบเดียวกันและแก๊สชนิดเดียวกัน มีผลทำให้ค่า Recovery time มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จากตัวอย่างทั้งสามนั้นที่ตัวอย่างที่ 3 นั้นมีค่า Recovery time ที่เร็วที่สุดคือ 1.543 s ต่อมาที่เป็นตัวอย่างที่ 2 คือ 1.673 s และตัวอย่างที่ 1 ช้าสุดคือ 1.746 s ซึ่งต่างกันไม่มากนัก จากค่าทั้งสามทำให้น้ำจะเห็นว่าความพรุนมีผลกระทบต่อค่า Recovery time บ้าง โดยจากตัวอย่างทั้งสามจะเห็นได้ว่าที่ตัวอย่างที่ 3 มีความพรุนมากที่สุดและค่า Recovery time เร็วสุด ต่อมาคือตัวอย่างที่ 2 และ 3 ตามลำดับความพรุนมากและความเร็วในการ Recovery time



รูปที่ 4.27 แสดงค่า Etching time (s) กับค่า Recovery time (s)

จากกราฟที่ 4.19, 4.22 และ 4.25 จะเห็นว่าค่าความต้านทานของแต่ละตัวอย่างนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่คงที่คือมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดสามารถหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดังนี้

- ที่ตัวอย่างที่ 1 ค่าความต้านทานสูงสุดคือ 38.04435 ohm ค่าความต้านทานต่ำสุดคือ 37.13707 ohm  
ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปคือ  $38.04435 - 37.13707 \text{ ohm} = 0.90728 \text{ ohm}$

- ที่ตัวอย่างที่ 2 ค่าความต้านทานสูงสุดคือ 38.5672 ohm ค่าความต้านทานต่ำสุดคือ 36.5374 ohm  
ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปคือ  $38.5672 - 36.5374 \text{ ohm} = 2.0298 \text{ ohm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

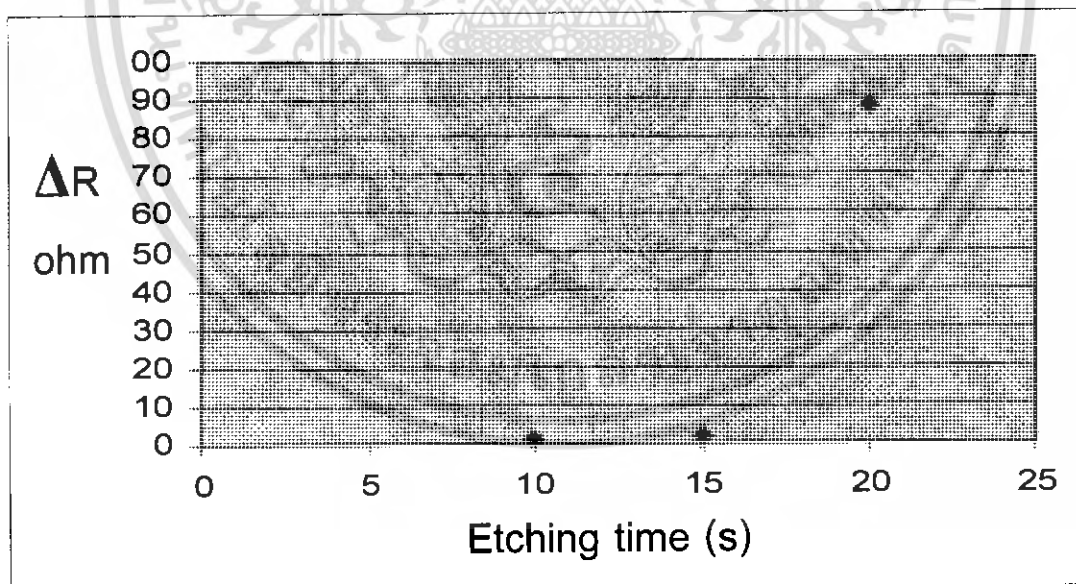
- ที่ตัวอย่างที่ 3 ค่าความต้านทานสูงสุดคือ 778.3409 ohm ค่าความต้านทานต่ำสุดคือ 690.8723 ohm  
ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปคือ  $778.3409 - 690.8723 \text{ ohm} = 87.4686 \text{ ohm}$

นำค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปของแต่ละตัวอย่างกับค่าเวลาในการกัดหรือเวลาในการ anodization มาเขียนลงในตารางที่ 4.6 จะได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ohm) – Etching time (s)

Etching time (s)	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ohm)
10	0.90728
15	2.02980
20	87.4686

จากตารางที่ 4.3 เราจะสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ohm) กับ Etching time (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.28 จะได้ว่าที่ตัวอย่างที่ 3 นั้นจะมีค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปสูงสุดคือ 87.4686 ohm ดูจากกราฟที่ 4.25 จะเห็นได้ชัดเจนมากกว่าค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปเป็นพีคที่สูงกว่ากราฟที่ 4.19 และ 4.22 และที่ตัวอย่างที่ 2 นั้นมีค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปรองลงมาคือ 2.0298 ohm จากนั้นคือตัวอย่างที่ 1 มีค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปต่ำสุดคือ 0.90728 ohm จากตัวอย่างทั้ง 3 และค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้สรุปได้ว่า ตัวอย่างที่ 3 นั้นมีความสามารถในการตรวจจับแก๊สได้ดีที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งความสามารถในการตรวจจับแก๊สนั้นขึ้นอยู่กับค่าความพรุนของพอร์สซิลิกอน ยังมีค่าความพรุนมากก็จะทำให้ความสามารถในการตรวจจับแก๊สได้ดีขึ้น ดังในตัวอย่างที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนา

#### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง เราสามารถสรุปผลได้ว่าพอร์สซิลิกอนสามารถตรวจจับแก๊สได้จริง และความสามารถในการตรวจวัดแก๊สนั้นก็ขึ้นอยู่กับความพรุนที่เกิดจากการกัดพอร์ซิลิกอนที่แตกต่างกัน ซึ่งในการทดลองนั้นเราให้ความหนาแน่นกระแสคงที่คือ  $200 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$  หาได้จากสูตร  $D = I/A$  เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ในการกัดเป็นวงกลมจึงได้ว่า  $A = \pi r^2$  และเงื่อนไขที่เราใช้กำหนดค่า% ความพรุนนั้นมีได้หลายวิธีแต่ในที่โครงการพิเศษนี้คือเวลา โดยจะใช้เวลาในการกัดคือ 10, 15 และ 20 นาที ตามตารางที่ 4.1 ทำให้ได้ความพรุนที่แตกต่างกันออกไปซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนได้จากสมการ  $\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100\%$  เราจึงได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนจากการคำนวณในสมการที่ 4.2 โดยที่ในการกัดหรือการ anodization เป็นเวลา 10 นาที เราได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเท่ากับ 43.836 % ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนก็จะแตกต่างกันไปตามเวลาที่ใช้ในการกัดหรือการ anodization และจากภาพถ่ายที่ได้จากเครื่อง Scanning Electrons Microscope (SEM) นั้น เราจะเห็นได้ชัดถึงความเป็นรูพรุนของซิลิกอนที่ถูกกัด โดยเวลาที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าเกิดเป็นพอร์ซิลิกอนจริง ซึ่งถ้ายิ่งใช้เวลานาน เนื้อของผลึกซิลิกอนที่ถูกกัดออกไปก็จะมากตามไปด้วย จากรูป SEM ที่ได้มานั้นยืนยันได้ว่าที่เวลาในการกัดหรือการ anodization มากนั้นส่งผลให้พอร์ซิลิกอนมีความพรุนมากขึ้น จากรูปที่ 4.8, 4.10 และ 4.12 ลักษณะความเป็นรูพรุนยังไม่อยู่ในระดับของนาโนเมตรเท่าไรนักซึ่งอาจจะต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาให้ดีกว่านี้ในคราวต่อไป แต่ก็สามารถทำให้เห็นถึงความแตกต่างของความพรุนได้อย่างชัดเจน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ผลต่อความพรุนของพอร์ซิลิกอน มีดังนี้

1. เวลาในการ anodization
2. ความหนาแน่นกระแส
3. ชนิด และสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอน
4. ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำพอร์สซลิคอนที่ได้มาติดขั้วไฟฟ้าเพื่อนำไปตรวจวัดแก๊สตามจุดประสงค์ของโครงการพิเศษนี้ โดยในการทดลองนี้จะใช้แก๊สไนโตรเจนในโพล์เข้าไปในแอลกอฮอล์เพื่อเป็นการนำพาแอลกอฮอล์ให้ไหลผ่านท่อมายังผิวหน้าของพอร์สซลิคอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของพอร์สเท่ากับ 1.1 เซนติเมตร ให้กระแส 0.1 แอมแปร์ จากรูปที่ 4.18, 4.21 และ 4.24 ทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหลังจากที่มีการโพล์แก๊สแอลกอฮอล์เข้าไป ซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟรูปที่ 4.18 – 4.26 และเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะเห็นความแตกต่างของการตรวจจับแก๊สอย่างชัดเจน สาเหตุที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมก็เนื่องมาจากโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่ถูกพามาจะมาอุดและเกาะกับเสาของพอร์สซลิคอนที่บริเวณผิวหน้าและส่วนที่เป็นรูพรุนของพอร์สซลิคอน ทำให้ความต้านทานของพอร์สซลิคอนเพิ่มขึ้นจากเดิมเนื่องจากมีโมเลกุลของแอลกอฮอล์อยู่ด้วยสรุปก็คือ โมเลกุลของแอลกอฮอล์นั้นไปทำให้คุณสมบัติหรือ properties ของพอร์สซลิคอนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้ และเมื่อเราเปรียบเทียบกราฟการ sensitivity ของพอร์สซลิคอนที่ใช้เวลาในการกัดหรือ anodization แตกต่างกันนั้น พบว่า ความต้านทานของพอร์สซลิคอนที่ใช้เวลาในการกัดหรือ anodization 20 นาที นั้นจะเห็นว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ชัดเจนมากที่สุด โดยในที่นี้จากกราฟรูปที่ 4.19, 4.22 และ 4.25 จึงสรุปได้ว่ายิ่งพอร์สซลิคอนมีความพรุนมากก็จะทำให้ความสามารถที่มีต่อการตรวจจับแก๊สนั้นมากขึ้นด้วย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปของกราฟรูปที่ 4.19, 4.22 และ 4.25 และ ในช่วงที่เราทำการปิดวาวไม่ให้มีแก๊สแอลกอฮอล์ผ่านนั้นจะเห็นว่าค่าความต้านทานมีการลดลงกลับลงมาที่เดิม แสดงให้เห็นถึงความ stable จากกราฟเห็นได้ชัดเจนว่าช่วงเวลาที่ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงกลับมาสู่ที่สภาพเดิมนั้นใช้เวลาไม่นานนัก แสดงว่าพอร์สซลิคอนมีช่วง recovery time ที่ไวซึ่งในตัวอย่างที่ 3 คือ 1.543 s ตัวอย่างที่ 2 คือ 1.673 s และตัวอย่างที่ 3 คือ 1.746 s สรุปได้ว่าโครงการพิเศษนี้นั้นสามารถสร้างพอร์สซลิคอนที่ได้จากการกัดทางไฟฟ้าเคมีตามเงื่อนไขต่างๆคือที่ 10, 15 และ 20 นาทีทำให้ได้ความพรุนต่างกันทั้งสามตัวอย่างและ สามารถนำไปตรวจวัดแก๊สแอลกอฮอล์ได้จริงอีกทั้งยังมีความไวในการตรวจวัดแก๊สที่ดี โดยที่ตัวอย่างที่ 3 มีความสามารถในการตรวจจับแก๊สที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 1

## แนวทางในการพัฒนา

ในอนาคตข้างหน้าสามารถทำอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สจากพอร์สซิลิกอน และศึกษาการป้องกันการเกิดออกไซด์บนผิวของพอร์สซิลิกอน อาจจะต้องทำการหาเงื่อนไขการสร้างพอร์สพอร์สซิลิกอนให้อยู่ในระดับนาโนเมตรให้ได้มากกว่านี้ หรืออาจจะใช้ธาตุอย่างอื่นนอกจากซิลิกอน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดออกไซด์นั่นเองและมีการประยุกต์ใช้แก๊สตัวอื่นแทนแก๊สแอลกอฮอล์ ทดสอบกับแก๊สหลายๆชนิดเพื่อดูขอบเขตความสามารถในการตรวจวัดแก๊สใดได้บ้างและแก๊สใดไม่ได้ จัดทำเป็นอุปกรณ์สำเร็จรูปที่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ต่อจากนั้นอาจมีการนำแนวคิดนี้ไปใช้พัฒนาในการตรวจจับสารปนเปื้อนในอากาศได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## เอกสารอ้างอิง

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, การศึกษาคุณสมบัติภูมิเนสเซนซ์ของซิลิโคน,  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.

Leigh Canham, *Properties of porous silicon*, 1997.

สมเกียรติ สุขเดช, อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2521.

สักริยา ชิตวงศ์, วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2544.

[www.google.com](http://www.google.com)

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้