

รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆโดยอาศัย
หลักการตอบสนองทางกระแสและการเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุ
ของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

**Development of Chemical Vapour Elements Sensor by Current
Response and Capacitance of Nanoporous Silicon Layer**

จัดทำโดย

นายณรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2554

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัยเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2554

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ของทางสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

กรกฎาคม 2555

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่มีจุดเด่นอยู่ที่ สามารถสร้างได้ง่าย สร้างบนเนื้อผลึกซิลิกอน ใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนกับขั้วอลูมิเนียม 2 ขั้ว โดยทำการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันบนแผ่นซิลิกอนชนิดพี และทำการสร้างขั้วอลูมิเนียมบนชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า $500\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองศึกษาการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยคำนึงถึงผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน แล้วทำการทดลองตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ พบว่าชั้นพอร์สซิลิกอนที่ใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเป็น 48% โดยปริมาตร เวลา 10 นาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน พบว่าชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนสามารถตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่มีความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่ต่างๆ กันได้ ซึ่งเหมาะที่จะนำมาพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ต่อไป

Abstract

The purpose of this research is to present the fabrication process and electrical characteristics of nanoporous silicon sensor in chemical vapor. The advantage of this device are simple process compatible in silicon technology and usable in room temperature. The device consists of nanoporous silicon layer which is deposited by aluminum film with 500 μm electrode gap. Nanoporous silicon is used as the chemical vapor sensing element. In this study, the nanoporous silicon was formed by anodization of silicon wafer in hydrofluoric solution and the effect of hydrofluoric solution, time and current were examined. The result showed that when using hydrofluoric solution 48% by volume with current 10 mA/cm^2 in 10 minutes, the nanoporous silicon can detect chemical vapor efficiently. Studying on electrical characteristics of nanoporous silicon, it was found that the nanoporous silicon layer can detect the different chemical vapor concentrations. Therefore, the nanoporous silicon in chemical vapor sensor is important to develop other applications in the future.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	I
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
รายการคำย่อ.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎีของงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 นาโนพอร์สซิลิคอน.....	5
2.1 ทฤษฎีนาโนพอร์สซิลิคอน.....	5
2.1.1 โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	5
2.1.2 การแบ่งประเภทของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	6
2.1.3 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	8
2.2 เทคนิคการสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน.....	11
2.2.1 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมลิ.....	11
2.1.2 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	12
2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	14
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	15
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับ	
สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	20
2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	22
2.4.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน.....	22
2.4.2 การเกิดรูพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน	24
2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	28
2.5 ความพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	31
บทที่ 3 การตรวจจําไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	34
3.1 นิยามของเซนเซอร์.....	34
3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี.....	34
3.1.2 เซนเซอร์ทางฟิสิกส์.....	35
3.2 หลักการตรวจจําไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ.....	35
3.3 หลักการตรวจจําไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	36
3.3.1 หลักการดูดซับและความแน่นในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	37
3.3.2 การเหนี่ยวนําพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	41
บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	45
4.1 กระบวนการสร้าง.....	45
4.1.1 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	45
4.1.2 การสร้างตัวตรวจจําไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน....	46
4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	49
4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	49
4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	50
4.2.3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก การตรวจจําไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ.....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	53
5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน.....	53
5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน.....	57
5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์ส ซิลิกอน.....	64
5.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของ สารเคมี.....	71
5.4.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	75
5.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการ แอโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	81
5.5 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆโดยใช้ชั้นนาโน พอร์สซิลิกอน.....	90
5.5.1 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆต่อการ ตรวจจับแบบต่อเนื่อง.....	90
5.5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆต่อ อุปกรณ์ตรวจจับ.....	91
5.5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของไอระเหยของสารเคมีต่างชนิดกันต่ออุปกรณ์ ตรวจจับ.....	93
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	17

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน (ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน.....	2
2.1 โครงสร้างนาโนพอร์สซิลิกอน (ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง.....	6
2.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดต่างๆ กัน.....	7
2.3 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	9
2.4 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ (ก) เนื้อผลึกซิลิกอน (ข) ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (ค) ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (ง) ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ.....	10
2.5 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน.....	11
2.6 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่ได้จากกระบวนการเอโนไคซ์เซชัน.....	15
2.7 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง (ก) แบบแอโนดิก (ข) แบบแคโทดิก.....	16
2.8 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	17
2.9 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิก....	19
2.10 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	20
2.11 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	21
2.12 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิกอน.....	23
2.13 แบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนทั้งสองลักษณะ (ก) ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า (ข) ลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดพอร์สซิลิกอน.....	26
2.14 การเคลื่อนที่พาหะ โหลดที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพล ของสนามไฟฟ้า.....	26
2.15 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอน.....	27
2.16 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	28
2.17 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน.....	29
2.19 กลไกในการหยุดกักโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนชนิดพี โดยที่	
(ก) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอน และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล	
(ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิกอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอน	
(ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะโฮล จากผลึกซิลิกอนผ่านไป	
ยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน.....	30
2.20 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น โดยที่	
(ก) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดมากกว่า 2W	
(ข) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W.....	32
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิกอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของนาโนพอร์สซิลิกอน.....	33
2.22 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ.....	34
3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี.....	34
3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์.....	35
3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน.....	37
3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน	
(ก) ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาเกาะ	
(ข) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุน	
(ค) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้นโมโนเลเยอร์	
(ง) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นมัลติเลเยอร์	
(จ) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน	
(ฉ) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน	
(ช) ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกไปหมดแล้ว.....	38
3.5 แบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน.....	41
3.6 แบบจำลองการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน	
(ก) ก่อนตรวจจับไอระเหยของสารเคมี (ข) ขณะตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ก) ช่วงที่ไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี	
(ข) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน	
(ค) ช่วงที่เกิดการอ้อมตัวในการตรวจจับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี	
(ง) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(จ) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกไปหมดแล้ว.....	43
4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์เท็งก์เดียวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน.....	44
4.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ก) การเตรียมแผ่นซิลิคอน	
(ข) การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหลัง	
(ค) การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ง) การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหน้า.....	48
4.3 อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	49
4.4 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	51
4.7 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	51
5.1 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที.....	58
5.2 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที.....	59
5.3 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที.....	59
5.4 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที.....	60
5.5 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที.....	60
5.6 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที.....	61
5.7 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที.....	61
5.8 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที.....	62
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน.....	63
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน.....	63
5.11 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm ²	66
5.12 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm ²	66
5.13 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm ²	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm ²	67
5.15 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm ²	68
5.16 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm ²	68
5.17 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm ²	69
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน.....	70
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน.....	70
5.20 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	71
5.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	71
5.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	72
5.23 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ก) กระแสไฟฟ้าก่อนเปิดไอระเหยของสารเคมี (ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอระเหยของสารเคมี (ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิ่มตัว (ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอระเหยของสารเคมี (จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม.....	73
5.24 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	73
5.25 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	74
5.26 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 5 นาที.....	75
5.27 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที.....	76
5.28 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 15 นาที.....	77
5.29 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที.....	78

สารบัญรูป (ต่อ)

[illegible]