ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250187

# รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

# การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆโดยอาศัยหลักการตอบสนองทางกระแสและการเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน

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

จัดทำโดย
นายนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ประจำปีงบประมาณ 2554

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250187
b00256468

# รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

## เรื่อง

# การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆโดยอาศัยหลักการตอบสนองทางกระแสและการเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน

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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย

**จัดทำโดย**
**นายนรินทร์ 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

250187

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่มีจุดเด่นอยู่ที่ สามารถสร้างได้ง่าย สร้างบนเนื้อผลึกซิลิคอน ใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนกับขั้วอลูมิเนียม 2 ขั้ว โดยทำการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันบนแผ่นซิลิคอนชนิดพี และทำการสร้างขั้วอลูมิเนียมบนชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 500 μm ซึ่งชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองศึกษาการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยคำนึงถึงผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน แล้วทำการทดลองตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ พบว่าชั้นพอรัสซิลิคอนที่ใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเป็น 48% โดยปริมาตร เวลา 10 นาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 $mA/cm^2$ เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน พบว่าชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนสามารถตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆที่มีความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆที่ต่างๆ กันได้ ซึ่งเหมาะที่จะนำมาพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ต่อไป

# Abstract

250187

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. Nanoorous 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 นาโนพอรัสซิลิคอน.....5
2.1 ทฤษฎีนาโนพอรัสซิลิคอน.....5
2.1.1 โครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิอน.....5
2.1.2 การแบ่งประเภทของนาโนพอรัสซิลิคอน.....6
2.1.3 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอรัสซิลิคอน.....8
2.2 เทคนิคการสร้างนาโนพอรัสซิลิคอน.....11
2.2.1 การสร้างนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบย้อมสี.....11
2.1.2 การสร้างนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....12
2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....14
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....15
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....19

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี....................................20

2.4 กลไกในการเกิดพอรัสซิลิคอน......................................................................22

2.4.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน...........................22

2.4.2 การเกิดรูพรุนของนาโนพอรัสซิลิคอน ........................................24

2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิคอน...............................28

2.5 ความพรุนของนาโนพอรัสซิลิคอน..............................................................31

บทที่ 3 การตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน..........................34

3.1 นิยามของเซนเซอร์.......................................................................34

3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี...................................................................34

3.1.2 เซนเซอร์ทางฟิสิกส์...............................................................35

3.2 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ..................................35

3.3 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน.........36

3.3.1 หลักการดูดซับและควบแน่นในรูพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน...........37

3.3.2 การเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน.41

บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด..................................................................45

4.1 กระบวนการสร้าง...........................................................................45

4.1.1 การสร้างนาโนพอรัสซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....................45

4.1.2 การสร้างตัวตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน....46

4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....................................................49

4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน...........................49

4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..................................................50

4.2.3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก

การตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ................................................51

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง......53

5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน......53

5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน......57

5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอรัส ซิลิคอน......64

5.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของ สารเคมี......71

5.4.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี......75

5.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการ แอโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี......81

5.5 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆโดยใช้ชั้นนาโน พอรัสซิลิคอน......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 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน

(ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน....................................................2

2.1 โครงสร้างนาโนพอรัสซิลิคอน

(ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง....................................................6

2.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่มีขนาดต่างๆ กัน....................................................7

2.3 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ....................................................9

2.4 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ

(ก) เนื้อผลึกซิลิคอน (ข) ควอนตัมในเชิง 2 มิติ

(ค) ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (ง) ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ…………………………….10

2.5 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอรัสซิลิคอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอน…………………11

2.6 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน………………15

2.7 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง

(ก) แบบแอโนดิก (ข) แบบแคโทดิก……………………………………………16

2.8 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก…………………………17

2.9 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิก…..19

2.10 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก…………………...…….20

2.11 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี......................21

2.12 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน....................................................23

2.13 แบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ

(ก) ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า

(ข) ลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดพอรัสซิลิคอน....................................................26

2.14 การเคลื่อนที่พาหะโฮลที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพล

ของสนามไฟฟ้า....................................................26

2.15 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน....................27

2.16 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน....................................................28

2.17 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน....................................................29

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.18 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน........................................................................29

2.19 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนชนิดพี โดยที่

(ก) โครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิคอน และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล

(ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอนผ่าน

เข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิคอน

(ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะโฮล จากผลึกซิลิคอนผ่านไป

ยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน.........................30

2.20 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิคอนที่สร้าง

จากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่

(ก) โครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิคอนที่มีขนาดมากว่า 2W

(ข) โครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิคอนที่มีขนาดน้อยว่า 2W..................................................32

2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อ

ความพรุนของนาโนพอรัสซิลิคอน...........................................................................................33

2.22 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างนาโนพอรัสซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ......34

3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี.............................................................................34

3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์.........................................................................35

3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน...............37

3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน

(ก) ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาเกาะ

(ข) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุน

(ค) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้นโมโนเลเยอร์

(ง) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นมัลติเลเยอร์

(จ) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน

(ฉ) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน

(ช) ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกไปหมดแล้ว.................38

3.5 แบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน……………………41

3.6 แบบจำลองการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน

(ก) ก่อนตรวจจับไอระเหยของสารเคมี (ข) ขณะตรวจจับไอระเหยของสารเคมี…………….42

# สารบัญรูป (ต่อ)


รูปที่ หน้า

3.7 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน
(ก) ช่วงที่ไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี
(ข) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน
(ค) ช่วงที่เกิดการอิ่มตัวในการตรวจจับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี
(ง) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน
(จ) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกไปหมดแล้ว....................................................43

4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน......44

4.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน
(ก) การเตรียมแผ่นซิลิคอน (ข) การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหลัง
(ค) การสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน (ง) การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหน้า.................................48

4.3 อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน....................................49

4.4 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี...........................................51

4.7 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี......................................51

5.1 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที....................................58

5.2 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที..................................59

5.3 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที..................................59

5.4 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที..................................60

5.5 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที..............................60

5.6 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที............................61

5.7 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที............................61

5.8 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที............................62

5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนกับเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน.............................................................................................................63

5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนกับเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน.63

5.11 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 $mA/cm^2$..........66

5.12 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 $mA/cm^2$........66

5.13 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 $mA/cm^2$........67

# สารบัญรูป (ต่อ)


รูปที่ หน้า

5.14 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm$^2$........67

5.15 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm$^2$.......68

5.16 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm$^2$.....68

5.17 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm$^2$.....69

5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน.....70

5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน.....70

5.20 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....71

5.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน.....71

5.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน.....72

5.23 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน (ก) กระแสไฟฟ้าก่อนเปิดไอระเหยของสารเคมี (ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอระเหยของสารเคมี (ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิ่มตัว (ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอระเหยของสารเคมี (จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม.....73

5.24 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน.....73

5.25 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอรัสซิลิคอน.....74

5.26 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 5 นาที.....75

5.27 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที.....76

5.28 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 15 นาที.....77

5.29 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที.....78

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.30 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 25 นาที.............................................79

5.31 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน............................................80

5.32 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน.........81

5.33 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 $mA/cm^2$.....82

5.34 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 $mA/cm^2$...83

5.35 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 15 $mA/cm^2$...84

5.36 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 20 $mA/cm^2$...85

5.37 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 25 $mA/cm^2$...86

5.38 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 30 $mA/cm^2$...87

5.39 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน........88

5.40 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน..........................................................................................................89

5.41 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ทำการวัดแบบต่อเนื่อง.......................................................................90

5.45 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอสารเคมีต่างชนิดกันของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.........................................................................................91