

รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

เครื่องวัดปริมาณแอลกอฮอล์จากลมหายใจที่ใช้เทคโนโลยี

นาโนพอร์สซิลิคอนเป็นตัวเซ็นเซอร์ตรวจวัด

**Alcohol Breath Sensor Development from
Nanoporous Silicon Technology**

จัดทำโดย

นายรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก

เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2550

RCH

TP

514

%๒๕๓๐

เลขหมู่.....

84492

เลขทะเบียน.....

13 ต.ค. 2551

วันเดือนปี.....

๑๑๙๖๐๕๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการทำ
วิจัย จากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2550

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความ
ร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

1 มิถุนายน 2551

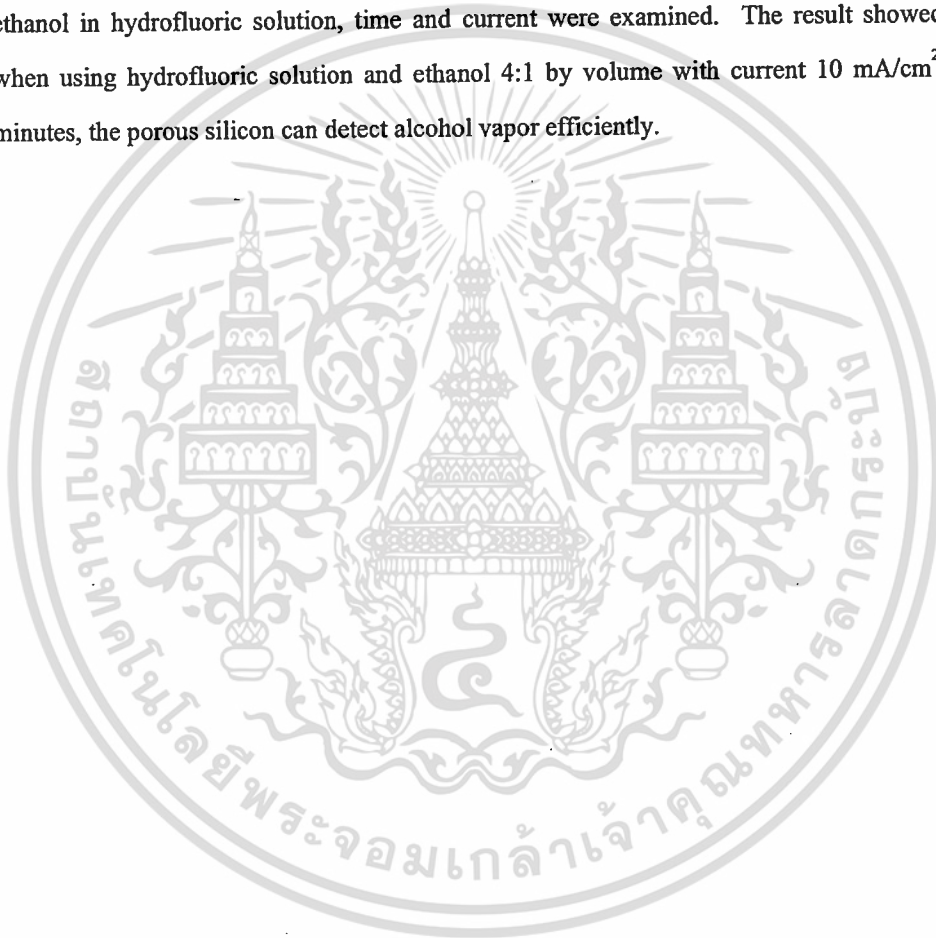
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิกอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่มีจุดเด่นอยู่ที่ สามารถสร้างได้ง่าย สร้างบนเนื้อซิลิกอน ใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นพอร์สซิลิกอนกับขั้วลูมิเนียม 2 ขั้ว โดยทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการเอโนไคซ์เซชันบนแผ่นซิลิกอนชนิดพี และทำการสร้างขั้วลูมิเนียมบนชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 500 μm ซึ่งชั้นพอร์สซิลิกอนจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองศึกษาการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการเอโนไคซ์เซชัน โดยคำนึงถึงผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน แล้วทำการทดลองตรวจจับไอแอลกอฮอล์ พบว่าชั้นพอร์สซิลิกอนที่ใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

Abstract

The purpose of this research is to present the fabrication process and electrical characteristics of porous silicon sensor in alcohol vapor. The advantage of this device are simple process compatible in silicon technology and usable in room temperature. The device consists of porous silicon layer which is deposited by aluminum film with 500 μm electrode gap. Porous silicon is used as the alcohol vapor sensing element. In this study, the porous silicon was formed by anodization of silicon wafer in hydrofluoric solution and the effect of mixing ethanol in hydrofluoric solution, time and current were examined. The result showed that when using hydrofluoric solution and ethanol 4:1 by volume with current 10 mA/cm^2 in 2 minutes, the porous silicon can detect alcohol vapor efficiently.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	I
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ทฤษฎีของงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 พอร์สซิติคอน.....	6
2.1 ทฤษฎีพอร์สซิติคอน.....	6
2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซิติคอน.....	6
2.1.2 การแบ่งประเภทของพอร์สซิติคอน.....	7
2.1.3 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิติคอน.....	9
2.2 เทคนิคการสร้างพอร์สซิติคอน.....	12
2.2.1 การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบย้อนมิติ.....	12
2.2.2 การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	13
2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	15
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	16
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิติคอนกับ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	20
2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	23
2.4.1 ปฏิกริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน.....	23
2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิคอน	25
2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน.....	29
2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน.....	32
บทที่ 3 การตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	35
3.1 นิยามของเซนเซอร์.....	35
3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี.....	35
3.1.2 เซนเซอร์ทางฟิสิกส์.....	36
3.2 หลักการตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์.....	36
3.3 หลักการตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	37
3.3.1 หลักการดูดซับและควมแน่นในรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	38
3.3.2 หลักการเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิคอน...	42
บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด	
4.1 กระบวนการสร้าง.....	46
4.1.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	46
4.1.2 การสร้างอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน.....	47
4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	50
4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	50
4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	51
4.2.3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก การตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	
5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นพอร์ซเซิลิกอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์.....	54
5.1.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์.....	58
5.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยใช้ไพทาเนียมไดออกไซด์กับใช้เซ็นเซอร์ส ซิลิกอน.....	2
2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้เซ็นเซอร์สวิตติคอน	
(ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน.....	2
2.1 โครงสร้างพอร์สซีลิกอน	
(ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง.....	6
2.2 ภาพจำลองโครงสร้างของเซ็นเซอร์สวิตติคอนที่มีขนาดต่างๆ กัน.....	7
2.3 ภาพจำลองรูพรุนของพอร์สซีลิกอนลักษณะต่าง ๆ กัน	
(ก) ลักษณะเป็นรูตันและไม่มีกั้นการแยกของรูพรุน	
(ข) ลักษณะเป็นรูตันและมีกั้นการแยกของรูพรุน	
(ค) ลักษณะเป็นโพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน	
(ง) ลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกไปยังอีกด้าน.....	8
2.4 ภาพจำลองรูพรุนของพอร์สซีลิกอนรูปร่างต่าง ๆ	
(ก) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก	
(ข) รูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำหมึก	
(ค) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย	
(ง) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์	
(จ) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด.....	9
2.5 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซีลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	9
2.6 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ	
(ก) เนื้อผลึกซีลิกอน (ข) ควอนตัมในเชิง 2 มิติ	
(ค) ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (ง) ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ.....	10
2.7 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซีลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซีลิกอน.....	11
2.8 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบย้อมสี.....	12
2.9 ภาพพื้นผิวของเซ็นเซอร์สวิตติคอนที่ได้จากการกัดแบบย้อมสี.....	13
2.10 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน	
(ก) เซลล์แห้งกึ่งตัวนำในแนวตั้ง	
(ข) เซลล์แห้งกึ่งตัวนำในแนวนอน	
(ค) เซลล์แห้งกึ่งตัวนำในแนวนอน.....	14
2.11 ภาพพื้นผิวของเซ็นเซอร์สวิตติคอนที่ได้จากกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน.....	15

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 ลักษณะการ ไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง	
(ก) แบบแอนโอดิก (ข) แบบแคโทดิก.....	16
2.13 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นขั้วลิกอน	
(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	17
2.14 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอนโอดิก.....	19
2.15 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นขั้วลิกอน	
(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	20
2.16 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	21
2.17 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นขั้วลิกอน.....	23
2.18 แบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกขั้วลิกอนทั้งสองลักษณะ	
(ก) ลักษณะการกัดแบบกัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า	
(ข) ลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดพอร์ซขั้วลิกอน.....	26
2.19 การเคลื่อนที่พาหะ โอลที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า.....	26
2.20 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผงังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกขั้วลิกอน.....	27
2.21 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆ ผงังของรูพรุน.....	28
2.22 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆ ผงังของรูพรุน.....	29
2.23 การกระจายตัวของกระแสรอบๆ ผงังของรูพรุน.....	29
2.24 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอร์ซขั้วลิกอนชนิดพี โดยที่	
(ก) โครงสร้างของพอร์ซขั้วลิกอน และทิศทางเคลื่อนที่ของพาหะ โอล	
(ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะ โอลจากผลึกขั้วลิกอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของพอร์ซขั้วลิกอน	
(ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะ โอล จากผลึกขั้วลิกอนผ่านไปยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน.....	30

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25	แผนภาพบริเวณปลอดภัยนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่
(ก)	โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า 2W
(ข)	โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W.....32
2.26	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพูน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน.....33
2.27	แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ กัน34
3.1	ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี.....35
3.2	ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์.....36
3.3	โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน.....38
3.4	แบบจำลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน
(ก)	ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาเกาะ
(ข)	โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพูน
(ค)	โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้นโมโนเลเยอร์
(ง)	โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นมัลติเลเยอร์
(จ)	โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นภายในรูพูน
(ฉ)	โมเลกุลไอแอลกอฮอล์เกิดการระเหยออกไปจากชั้นพอร์สซิลิคอน
(ช)	ชั้นพอร์สซิลิคอนที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ระเหยออกไปหมดแล้ว.....39
3.5	แบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิคอน.....42
3.6	แบบจำลองการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิคอน
(ก)	ก่อนตรวจจับไอแอลกอฮอล์ (ข) ขณะตรวจจับไอแอลกอฮอล์.....43
3.7	ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน
(ก)	ช่วงที่ไม่มีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์
(ข)	ช่วงที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพูนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเกิดการควบแน่นภายในรูพูน
(ค)	ช่วงที่เกิดการอิมิตวในการตรวจจับโมเลกุลไอแอลกอฮอล์
(ง)	ช่วงที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์เกิดการระเหยออกไปจากชั้นพอร์สซิลิคอน
(จ)	ช่วงที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ระเหยออกไปหมดแล้ว.....44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท่งกึ่งเดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโอดิซเซชัน.....	46
4.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิกอน	
(ก) การเตรียมแผ่นซิลิกอน (ข) การสร้างขั้วอูมิเนียมด้านหลัง	
(ค) การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน (ง) การสร้างขั้วอูมิเนียมด้านหน้า.....	49
4.3 อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิกอน.....	50
4.4 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด.....	51
4.5 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์.....	52
4.7 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์.....	52
5.1 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์.....	54
5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอน.....	55
5.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิกอน.....	55
5.4 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิกอน	
(ก) กระแสไฟฟ้าช่วงก่อนเปิดไอแอลกอฮอล์ (ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอแอลกอฮอล์	
(ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิ่มตัว (ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอแอลกอฮอล์	
(จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม.....	56
5.5 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิด ไอแอลกอฮอล์ของ	
อุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอน.....	57
5.6 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิด ไอแอลกอฮอล์ของ	
อุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิกอน.....	57
5.7 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด ไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ	
ไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโอดิซเซชัน 5 นาที.....	58
5.8 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด ไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ	
ไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโอดิซเซชัน 10 นาที.....	59
5.9 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด ไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ	
ไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโอดิซเซชัน 15 นาที.....	60
5.10 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด ไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ	
ไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโอดิซเซชัน 20 นาที.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 25 นาที่.....	62
5.12 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน.....	63
5.13 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน.....	64
5.14 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm ²	65
5.15 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm ²	66
5.16 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชัน 15 mA/cm ²	67
5.17 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชัน 20 mA/cm ²	68
5.18 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชัน 25 mA/cm ²	69
5.19 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชัน 30 mA/cm ²	70
5.20 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน.....	71
5.21 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอสอลล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ ระดับอ้างอิงเดียวกัน.....	72
6.1 อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอสอลล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ปรับปรุงโครงสร้างแล้ว.....	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

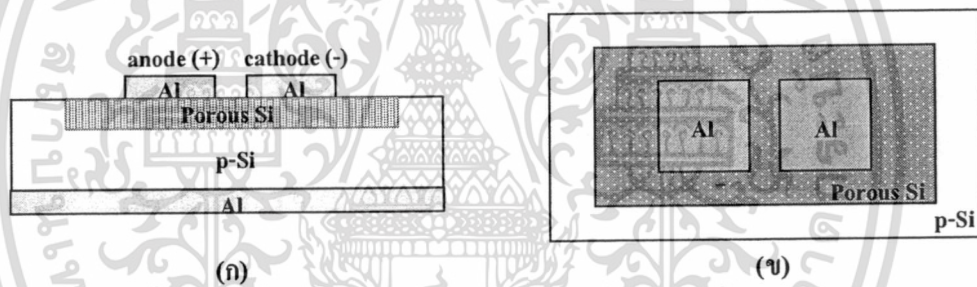
พอร์สซิลิคอน (porous silicon หรือ porous Si) คือเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1956 ในขณะที่ทำการทดลองการกัดทางไฟฟ้าเคมีของแผ่นซิลิคอน ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกโดย Uhlir [1] จนมาถึงปี ค.ศ. 1990 ได้มีการรายงานการค้นพบสมบัติเปล่งแสง ณ ที่อุณหภูมิห้องของพอร์สซิลิคอนเป็นครั้งแรกโดย Canham [2] ซึ่งการค้นพบคุณสมบัติเปล่งแสงของพอร์สซิลิคอนนี้ ได้ทำให้เกิดแนวความคิดและความเป็นไปได้ที่จะนำเอาพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuits : ICs) มาตรฐาน ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อศึกษาพอร์สซิลิคอนและนำเอาไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆ มากมาย ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ไอโซเลชัน (electronic isolation) [3,4] โดยมีการนำเอาชั้นพอร์สซิลิคอนมาใช้งานสร้างเป็นฉนวนในงานวิจัยทางด้านซิลิคอนบนฉนวน (Silicon-On-Insulator : SOI) นอกจากนี้ยังใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน [5] และยังสามารถใช้เป็นตัวตรวจจับไอสารอินทรีย์ [6] ได้อีกด้วย

ในปัจจุบันอุบัติเหตุบนท้องถนนเป็นสาเหตุสำคัญอันดับหนึ่งของการเสียชีวิตของคนไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งคนในวัยหนุ่มสาว จากการคาดการณ์หากไม่มีมาตรการรองรับแล้ว ในอนาคตตัวเลขผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนท้องถนนจะพุ่งขึ้นสูงถึงกว่า 3 คนต่อชั่วโมง (มากกว่า 2.6 หมื่นคนต่อปี) และเป็นที่น่าเสียดายว่า สาเหตุส่วนใหญ่ กว่าครึ่งหนึ่งเกิดจากผู้ขับขี่ที่มีอาการเมาสุรา ซึ่งจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับแอลกอฮอล์ในเลือดกับโอกาสเกิดอุบัติเหตุพบว่าผู้ที่มีแอลกอฮอล์ในเลือดสูงกว่า 50 มิลลิกรัม% จะมีโอกาสเกิดอุบัติเหตุ สูงกว่าผู้ไม่ดื่มสุราถึง 2 เท่า และหากสูงถึง 100 มิลลิกรัม% โอกาสเสี่ยงจะเพิ่มขึ้นเป็นถึง 6 เท่า เพื่อป้องกันอุบัติเหตุบนท้องถนนอันเนื่องมาจากผู้ขับขี่ขาดยานพาหนะในขณะที่มีเมามา จึงได้มีการตั้งด่านตรวจระดับแอลกอฮอล์ในเลือดของผู้ขับขี่ เพื่อให้ทราบว่าผู้ขับขี่อยู่ในสภาพที่จะสามารถขับขี่ยานพาหนะต่อไปได้อีกหรือไม่ โดยการตรวจระดับแอลกอฮอล์ในเลือดมีหลายวิธี ได้แก่ การตรวจวัดทางลมหายใจ การตรวจวัดจากเลือด และการตรวจวัดจากปัสสาวะ ซึ่งทั้ง 3 วิธีนี้ วิธีการตรวจวัดทางลมหายใจ เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากทำได้สะดวกรวดเร็ว และสามารถทราบผลได้ทันที การตรวจวัดระดับ

แอลกอฮอล์ จากลมหายใจ อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อกระแสเลือดไหลไปที่ปอด เพื่อฟอกเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากร่างกาย แอลกอฮอล์ในกระแสเลือดบางส่วนจะซึมผ่านเข้าไปในปอด ระดับของแอลกอฮอล์ในปอด จะสัมพันธ์โดยตรงกับระดับแอลกอฮอล์ในเลือด เมื่อหายใจออก แอลกอฮอล์จะถูกขับออกมาจากปอดเช่นเดียวกัน

โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ส่วนใหญ่จะใช้ชั้นเซรามิก [7-9] เช่น ไททานเนียมไดออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นตัวจับไอแอลกอฮอล์ ซึ่งชั้นไททานเนียมไดออกไซด์นี้มีวิธีการสร้างที่ยุ่งยาก สร้างบนผิวของ Al_2O_3 ใช้ต้นทุนการผลิตสูง และทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 300-500 °C

โดยงานวิจัยนี้ได้มีความคิดที่จะนำชั้นพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ [10] เนื่องจากชั้นพอร์สซิลิคอนนั้นสร้างในเนื้อซิลิคอนจึงสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก ทำให้ผลิตได้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ราคาต่ออุปกรณ์ถูก กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนทำได้ง่าย และสามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างแบบง่าย คือมีชั้นพอร์สซิลิคอน และชั้นซิลิคอนอยู่บนชั้นพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน

(ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ กับใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน

อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์	อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน
- วิธีการสร้างยุ่งยาก	- วิธีการสร้างง่าย
- สร้างบนผิวของ Al_2O_3	- สร้างในเนื้อซิลิคอน
- ใช้ต้นทุนการผลิตสูง	- ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ
- ทำงานที่อุณหภูมิ 300-500 °C	- ทำงานที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการเอโนโคไซด์เซชัน
2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีเอโนโคไซด์เซชัน
3. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน
4. เพื่อศึกษาผลของเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนต่อลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของการตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์
5. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้น ไอแอลกอฮอล์ เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ ต่อกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

สมมติฐานของงานวิจัยนี้ คือ ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการเอโนโคไซด์เซชันสามารถควบคุม ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในการสร้างเพื่อให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ จากนั้นนำชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้มาศึกษาถึงสมบัติในการตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์ โดยใช้พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากของพอร์สซิลิคอนเป็นบริเวณที่ใช้ในการตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์ [11-13] เมื่อ โมเลกุลของ ไอแอลกอฮอล์มารวมตัวกันในรูพรุนของพอร์สซิลิคอนก็จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าบริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิคอน และด้วยคุณสมบัตินี้เองจึง ได้นำชั้นพอร์สซิลิคอนมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์

1.4 ทฤษฎีของงานวิจัย

จากสมมติฐานที่กล่าวข้างต้น ชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์ได้โดยใช้หลักการที่พื้นผิวที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากสามารถดูดซับ โมเลกุลแอลกอฮอล์ได้ดีและมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่าพื้นผิวที่เป็นพื้นราบเรียบ เมื่อมีการไหลของ ไอแอลกอฮอล์ผ่านมาบริเวณชั้นพอร์สซิลิคอน โมเลกุล ไอแอลกอฮอล์ที่เข้ามาในบริเวณรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนจะจับตัวกับผนังของรูพรุน เมื่อ โมเลกุล ไอแอลกอฮอล์เข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนเป็นจำนวนเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้เกิดสถานะผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น [14, 15] ซึ่งจากหลักการนี้เอง ชั้นพอร์สซิลิคอนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตอยู่ที่การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน โดยคำนึงถึงผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน เพื่อให้ได้ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีความสม่ำเสมอและเหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยศึกษาการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนที่ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลที่อัตราส่วนต่างๆ กัน เพื่อให้ได้ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีความสม่ำเสมอ แล้วทำการศึกษาก่อสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนที่เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน เพื่อทำการศึกษาถึงโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อมาก็ทำการศึกษาถึงการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิกอน และศึกษาถึงผลของเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีผลต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ พร้อมทั้งศึกษาถึงความเข้มข้นไอแอลกอฮอล์ เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ ที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิกอน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีพอร์สซิลิกอน
2. ศึกษากระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน
3. ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีแอนโนไดซ์เซชัน
4. ศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิกอน
5. ศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิกอน
6. ศึกษาผลของเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนต่อลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์
7. ศึกษาผลของความเข้มข้นไอแอลกอฮอล์ เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ ต่อกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิกอน

เนื้อหาในรายงานเล่มนี้จะแบ่งเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาของพอร์สซิลิคอน และความสำคัญของงานวิจัยที่ได้ศึกษา หัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ที่ได้ทำการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน สมมติฐาน และแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนสุดท้ายคือ ขอบเขตของงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 พอร์สซิลิคอน เป็นการกล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับพอร์สซิลิคอน เทคนิคการสร้างพอร์สซิลิคอน โดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน ความพรุน และพฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

บทที่ 3 หลักการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นการกล่าวถึง นิยามเซนเซอร์ หลักการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ และหลักการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน

บทที่ 4 กระบวนการสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เป็นการกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน อุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน เทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความพรุน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว และเครื่องมือในการวัดผลของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง เป็นการกล่าวถึงผลการทดลองเกี่ยวกับการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการเอโนโคเซชัน และผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

พอร์สซิติคอน

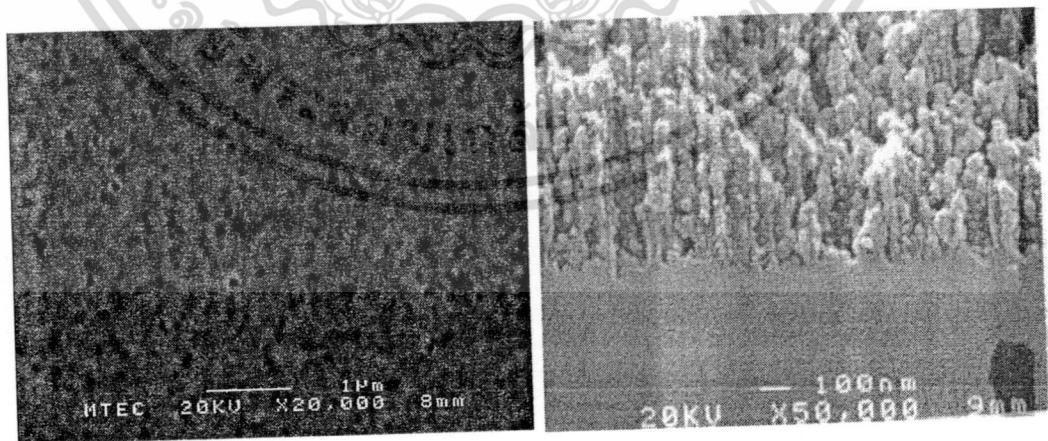
ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีพอร์สซิติคอน วิธีการสร้างพอร์สซิติคอน โดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดพอร์สซิติคอน ความพรุน และพฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิติคอน

2.1 ทฤษฎีพอร์สซิติคอน

พอร์สซิติคอน เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีทั้งโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และไม่เป็นระเบียบ ภายในของพอร์สซิติคอนอะตอมนั้นนอกจากจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบ เหมือนกับผลึกซิติคอนเดี่ยว แต่ยังมีจุดบกพร่องของผลึก ช่องว่าง ระยะห่างของช่องว่าง และพันธะแขนขาดกับอะตอมข้างเคียง โครงสร้างที่มีขนาดเล็กนี้สามารถพบได้ 2 รูปแบบ คือ จุด และแท่ง หรือเป็นแบบผสม ผลึกขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนี้มีลักษณะแข็งเปราะ และมีรูพรุน พอร์สซิติคอนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจ มีบทความจำนวนมากพยายามอธิบายถึงคุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของพอร์สซิติคอน [16-18] และได้นำพอร์สซิติคอนมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ทางด้านการแพทย์ และอุปกรณ์ตรวจจับไอสารอินทรีย์ เป็นต้น

2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซิติคอน

พอร์สซิติคอน คือ ผลึกซิติคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิติคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจนถึงระดับไมโครเมตร โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.1



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอร์สซิติคอน (ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนในรูปที่ 2.1 เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนยังพบต่อไปอีกว่าที่บริเวณผิวของไมโครพอร์สซิลิกอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิกอนไฮไดรด์ (Si:H) หรือ ซิลิกอนออกซิไฮไดรด์ (Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป [19-21]

2.1.2 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [18] คือ

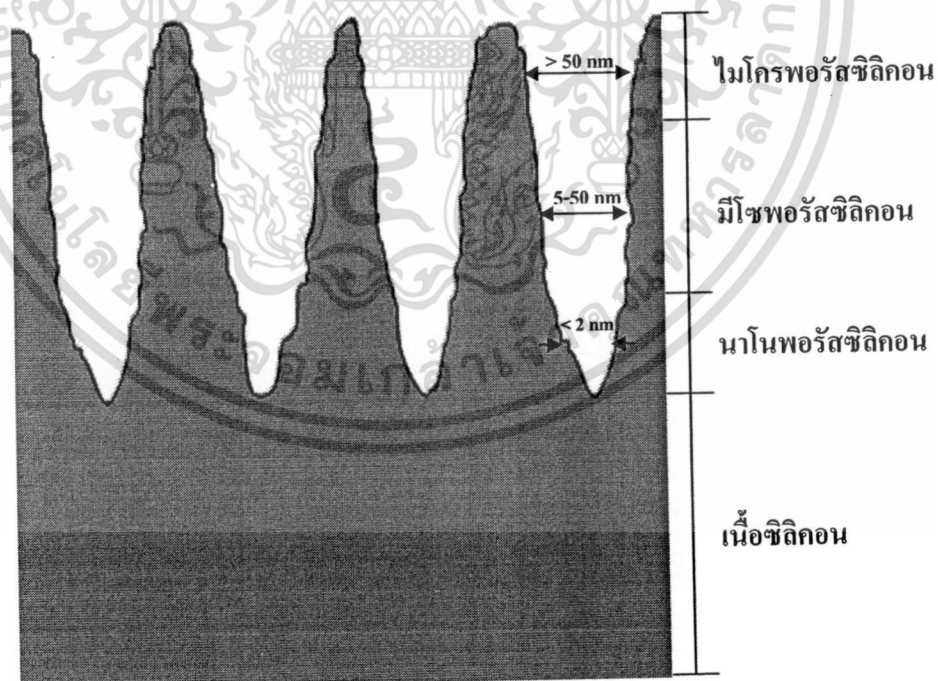
1. แบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

พอร์สซิลิกอนสามารถแบ่งได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ดังนี้

1.1 โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิกอน (microporous) เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไป

1.2 โครงสร้างของชั้นมีโซพอร์สซิลิกอน (mesoporous) เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่อยู่ระหว่าง 5 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร

1.3 โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน (nanoporous) เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่เล็กกว่า 5 นาโนเมตร ลงไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะติดกับเนื้อของซิลิกอน



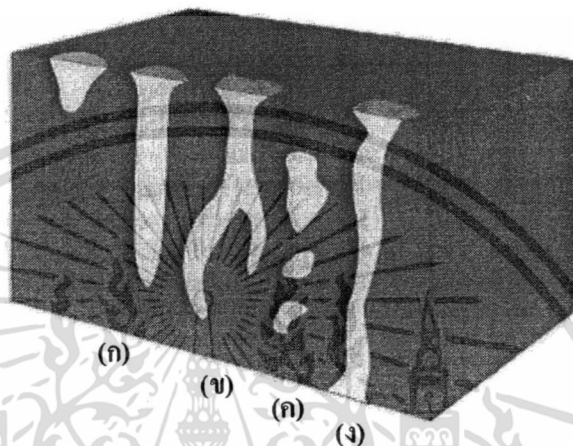
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะรูพรุนของพอร์สซิติคอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- 2.1 ลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูพรุน (blind)
- 2.2 ลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกของรูพรุน (banchd)
- 2.3 ลักษณะเป็นโพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน (totally isolated)
- 2.4 ลักษณะเป็นรูกลางทะลุออกไปยังอีกด้าน (through)



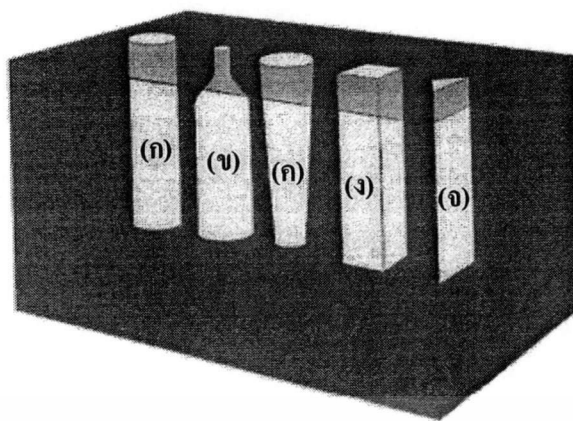
รูปที่ 2.3 ภาพจำลองรูพรุนของพอร์สซิติคอนลักษณะต่างๆ กัน

- (ก) ลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูพรุน
- (ข) ลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกของรูพรุน
- (ค) ลักษณะเป็นโพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน
- (ง) ลักษณะเป็นรูกลางทะลุออกไปยังอีกด้าน

3. แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูปร่างรูพรุนของพอร์สซิติคอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- 3.1 รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (cylindrical)
- 3.2 รูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำมึก (ing-bottle)
- 3.3 รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย (funnel)
- 3.4 รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ (cuboid)
- 3.5 รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด (triangular)

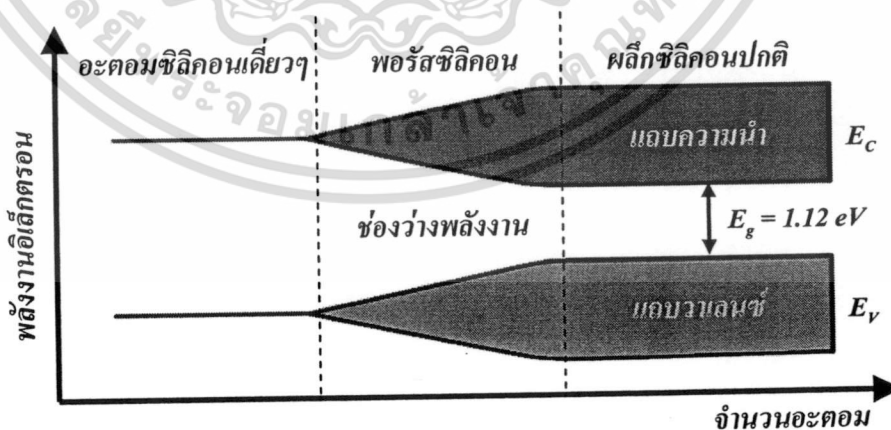


รูปที่ 2.4 ภาพจำลองรูพรุนของพอร์สซิลิคอนรูปร่างต่าง ๆ

- (ก) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (ข) รูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำหมึก
 (ค) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย (ง) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์
 (จ) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด

2.1.3 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิคอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอมทำให้เกิดการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ก็จะทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะนำไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิคอนเดิม (มีจำนวนอะตอมของซิลิคอนอยู่ภายในประมาณ 10^{22} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) แสดงดังรูปที่ 2.5 [22]



รูปที่ 2.5 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ผลของขนาดควอนตัม (quantum size effect) ซึ่งค่าพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์นี้จะมีค่าเท่ากับ

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

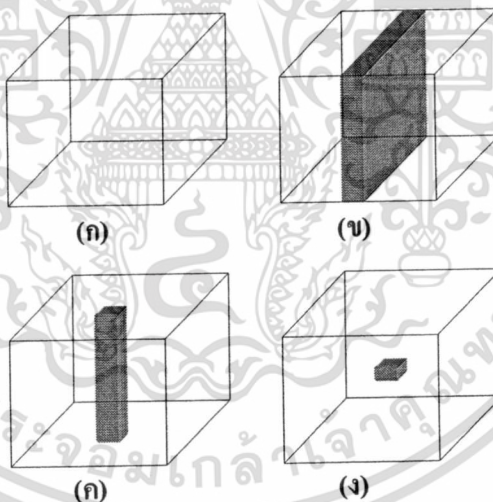
โดยที่ E_q คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม

ΔE_c คือ พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบ

ความนำเดิมก่อนเกิดพอร์สซิลิคอน

ΔE_v คือ พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบ

วาเลนซ์เดิมก่อนเกิดพอร์สซิลิคอน



รูป 2.6 แบบจำลองลักษณะ โครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ

(ก) เนื้อผลึกซิลิคอน (ข) ควอนตัมในเชิง 2 มิติ

(ค) ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (ง) ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ

จากรูปที่ 2.6 พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆ เหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

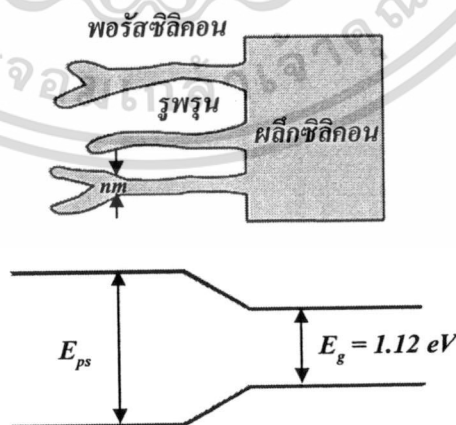
เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิคอนปกติ มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับ ด้วยลักษณะและขนาดของโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. ควมดัมในเชิง 2 มิติ (quantum well) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความบางมากๆ ในระดับชั้นของโมเลกุล เช่น 30-50 ชั้นโมเลกุล (< 100 nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข)

2. ควมดัมในเชิง 1 มิติ (quantum wire) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆ ที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร (< 10 nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะนี้จะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปในโครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของ โครงสร้างที่เป็นเส้นหรือเสานี้เท่านั้น ดังแสดงในรูป 2.6 (ค) ซึ่งลักษณะช่องว่างพลังงานของโครงสร้าง 1 มิติแบบนี้ จะมีขนาดที่กว้างกว่าช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในลักษณะแบบนี้จะมีขนาดที่เล็กกว่า และมีจำนวนอะตอมที่อยู่ภายในน้อยกว่าโครงสร้าง 2 มิติ

3. ควมดัมในแบบ ไม่มีมิติ (quantum dot) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก (< 1 nm) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายใน โครงสร้างแบบนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ภายในโครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ง) อะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างจุดเล็กๆเหล่านี้จะมีจำนวนที่น้อยกว่าในโครงสร้างสองแบบแรก ซึ่งจะมีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของโครงสร้างที่เป็นแบบจุดนี้ จะมีความกว้างที่มากกว่าในโครงสร้างสองแบบแรก



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

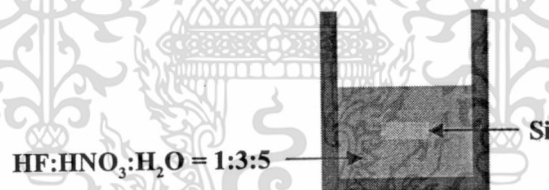
เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์ซซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัมในเชิง 1 มิติ โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิลิคอน

2.2 เทคนิคการสร้างพอร์ซซิลิคอน

กระบวนการสร้างพอร์ซซิลิคอนให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน [23-27] แต่จะขอพิจารณาถึงเทคนิคการสร้างพอร์ซซิลิคอนที่เหมาะสม สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการสร้างได้ และสามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้

2.2.1 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบย้อมสี (stain etching)

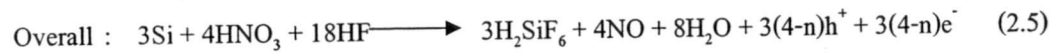
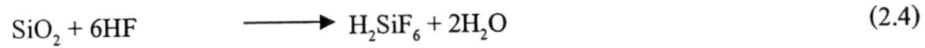
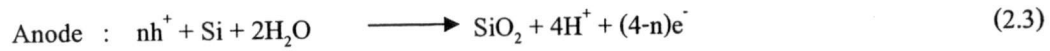
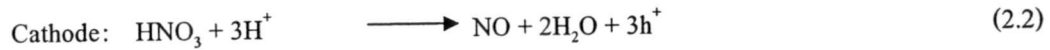
การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบย้อมสี [28] เป็นเทคนิคที่ทำการจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารประกอบของกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid : HF) ซึ่งจะประกอบด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก (nitric : HNO_3) และน้ำ ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้การกระตุ้นด้วยแสงสว่างในขณะที่ทำการกัดด้วยปฏิกิริยาเคมี เพื่อเป็นตัวช่วยการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบย้อมสี

จากรูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดแบบย้อมสีคือ การทำให้เกิดประจุโฮล เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก เพื่อทำให้เกิดประจุโฮล หลังจากนั้นประจุโฮลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เอง สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ซึ่งการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์ และการถูกกัดของซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นลักษณะ โครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ (non-uniform)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมสี่สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



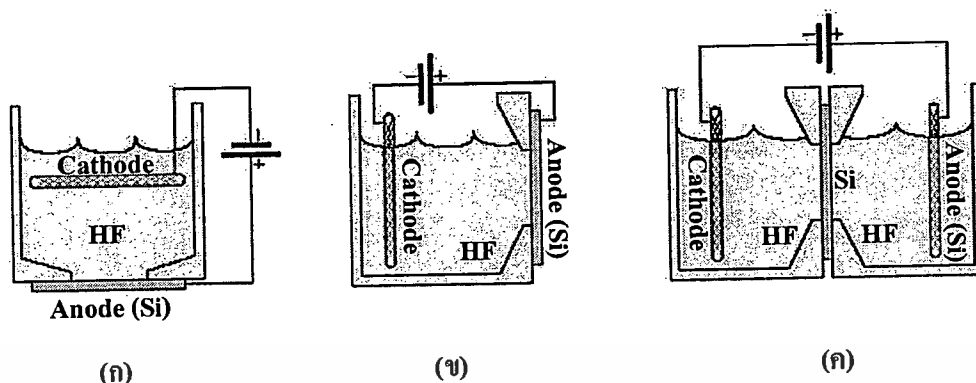
ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่า บริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยาจะมีสีสันทันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีสันทันจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ส่วนความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการกัดแบบข้อมสี่จะมีค่าประมาณ 100 nm และพื้นผิวของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เกิดจากกระบวนการกัดแบบข้อมสี่จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.9 [28]



รูปที่ 2.9 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี่

2.2.2 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (anodization)

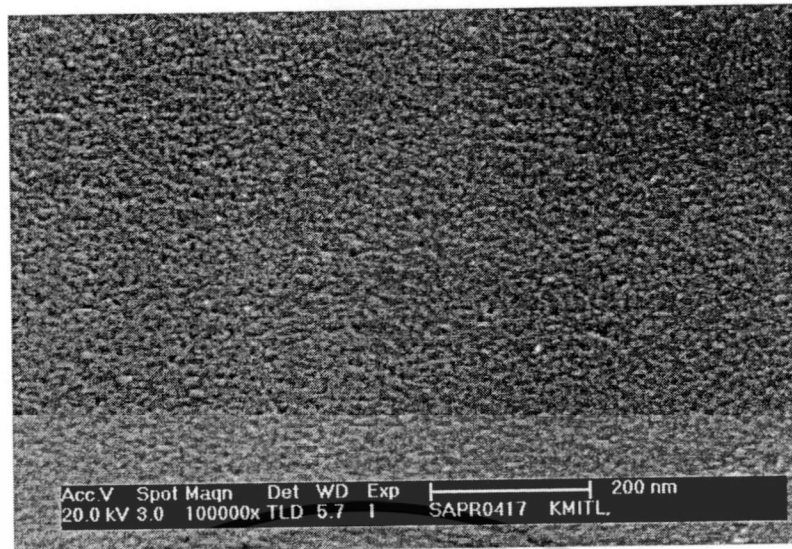
การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน [29,30] เป็นวิธีที่สามารถควบคุมปฏิกิริยาในการสร้างพอร์ซซิลิคอน ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ (uniform) ทั่วกันทั้งแผ่น โดยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันนี้จะใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน

- (ก) เซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้ง (ข) เซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวนอน
(ค) เซลล์แท็งก์คู่ในแนวนอน

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชันนี้จะประกอบด้วย แผ่นซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะจมอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จากรูปที่ 2.10 (ก) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้ง (single tank vertical cell) มีจุดเด่นอยู่ที่ขณะทำการสร้างพอร์สซิลิคอนสามารถฉายแสงเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการกัดได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.10 (ข) จะเห็นได้ว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวนอน (single tank lateral cell) นั้นทำการฉายแสงได้ยากกว่า ส่วนรูปที่ 2.10 (ค) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์คู่ในแนวนอน (double tank lateral cell) ซึ่งพัฒนามาจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวนอน เพื่อใช้ต่อร่วมกับปั๊ม (pump) ทำให้มีการไหลเวียนของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตลอดเวลาส่งผลทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สม่ำเสมอมากขึ้น แต่ก็ยังมีปัญหาในการฉายแสงเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการกัด โดยส่วนใหญ่การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีแอโนไดซ์เซชันจะมีเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ระหว่างการสร้างก็คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก การผสมเอทานอลเพื่อช่วยให้เกิดความสม่ำเสมอของชั้นพอร์สซิลิคอนมากขึ้น [30] เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแอโนไดซ์เซชัน ซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันนี้ สามารถควบคุมความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาของพอร์สซิลิคอน ได้ดีกว่าวิธีการกัดแบบย้อมสี โดยภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เกิดกระบวนการแอโนไดซ์เซชันจะมีลักษณะสม่ำเสมอกว่าวิธีการกัดแบบย้อมสี แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน

2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี [31] เป็นวิธีการที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก โดยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อะตอมของสารมีการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังตัวอย่างเช่น สาร M มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ n คือ มีอิเล็กตรอน n อนุภาคโคจรอยู่ในวงนอกสุดของอะตอม สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังนี้ คือ



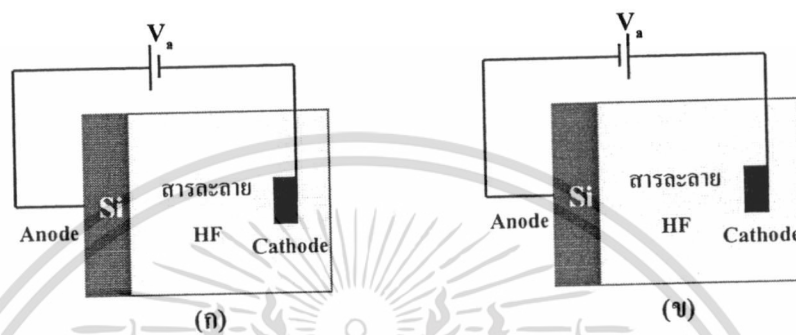
โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction)

2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเท และเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลายปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ



โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction)

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนดหรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชิ้นหนึ่งจะเป็นแคโทด



รูปที่ 2.12 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง
(ก) แบบแอโนดิก (ข) แบบแคโทดิก

พิจารณาเซลล์ไฟฟ้าในรูปที่ 2.12 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอน (Si) ซึ่งจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในที่นี้ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเช่นกัน จากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้แผ่นซิลิคอนสามารถถูกกัดได้

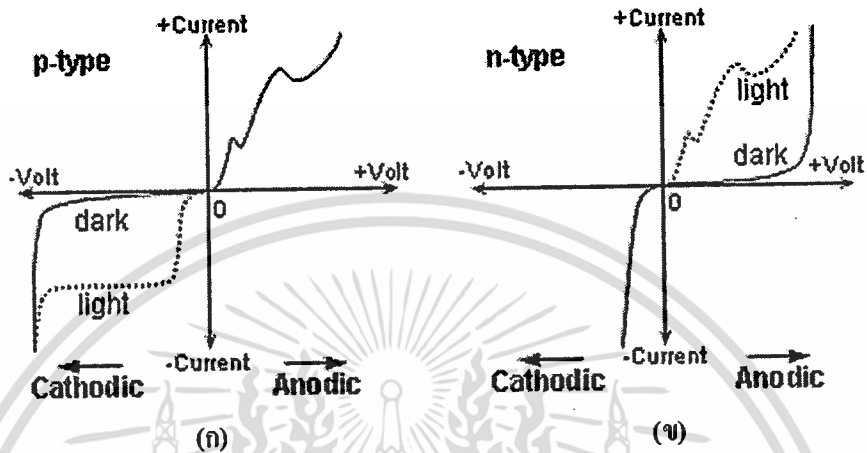
2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดแผ่นซิลิคอน

2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นพอร์ตซิลิคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบซ็อดทกีไดโอด (schottky diode) ที่เกิดขึ้น

จากการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ แผ่นซิลิคอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ภายใต้เงื่อนไขในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง แสดงดังรูปที่ 2.13 [31]



รูปที่ 2.13 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

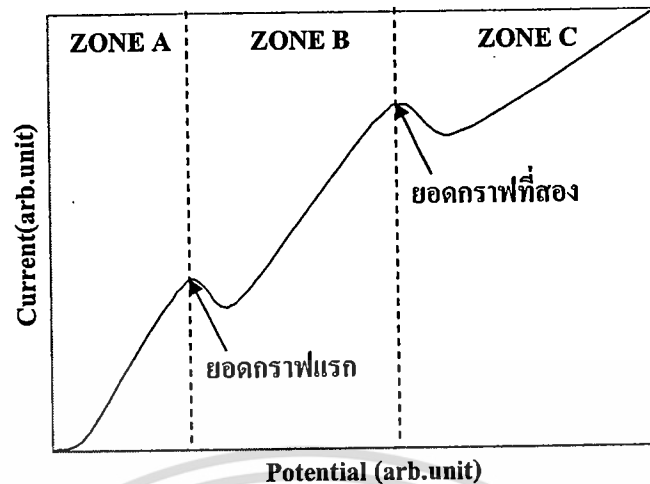
จากรูปที่ 2.13 แสดงถึงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพี และเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก และการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก ลักษณะของกระแส และแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในแผ่นซิลิคอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง เช่นเดียวกับกับไดโอดทั่วไป ส่วนในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับแผ่นซิลิคอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกสำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกับการไบอัสแบบย้อนกลับ ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน

ชนิดของแผ่น ซิลิคอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบแคโทดิก	แบบแอโนดิก
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะไม่ถูกกัด - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ 	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นซิลิคอนถูกกัด โดย - จะเกิด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ - จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะไม่ถูกกัด - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง 	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นซิลิคอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย - จะเกิด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ - จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขั้วตักเหมือนกัน โดยการเกิดพอร์สซิลิคอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิกเท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก จะไม่เกิดพอร์สซิลิคอนขึ้นไม่ว่าชนิดของแผ่นซิลิคอนจะเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นเนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกนั้น เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ดังนั้นในระหว่างการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกจึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิกของทั้งแผ่นซิลิคอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนของไอส์แบบแอโนดิก

จากรูปที่ 2.14 ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยยอดกราฟอยู่ 2 จุดด้วยกัน โดยยอดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A เป็นช่วงในการเริ่มสร้างพอร์ซิลิคอน (porous silicon formation regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอร์ซิลิคอนขึ้นมาที่ต่อเมื่อค่ากระแส ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก ส่วนในบริเวณ B เป็นช่วงการกัดที่ทำให้เกิดพอร์ซิลิคอน ส่วนช่วงที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของซิลิคอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอร์ซิลิคอนไปสู่ลักษณะช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า (electropolishing regions) ซึ่งอยู่ในบริเวณ C โดยโครงสร้างของชั้นพอร์ซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์ซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ยอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากยอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ อิมพีแดนซ์เชิงลบ (negative impedance) ขึ้น โดยจากรูปที่ 2.14

- ในส่วนของยอดกราฟแรก

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัมขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์ซิลิคอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นพอร์ซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

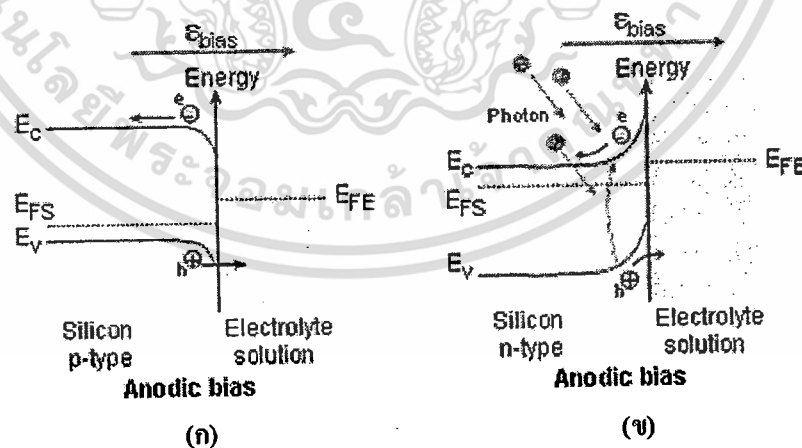
สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆ โครงสร้างของพอร์ซิลิคอน และเมื่อโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุม โครงสร้างของพอร์ซิลิคอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นพอร์ซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น

- ในส่วนยอดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณช่วงการกัดที่ทำให้เกิดพอร์ซิลิคอน กับช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ที่บริเวณผิวของพอร์ซิลิคอนในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะมีลักษณะเป็นแบบซีกก็โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส แสดงดังรูปที่ 2.15 [32]



รูปที่ 2.15 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

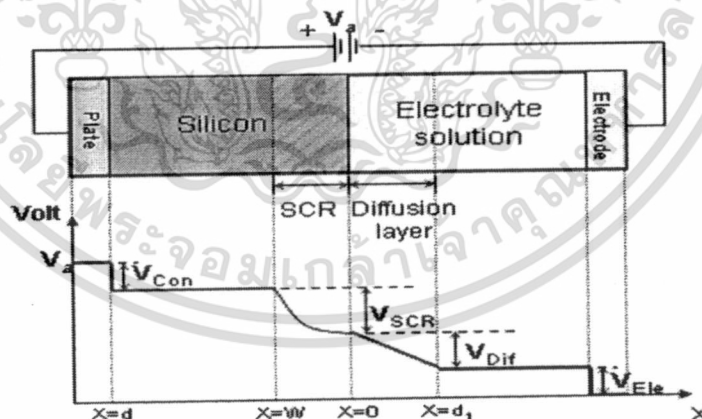
จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนโอดิก กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบตรง ทำให้เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก)

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบแอนโอดิก ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้กับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

2.3.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกักพอร์ซซิลิคอน จะประกอบด้วยแผ่นซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอนโอดิก ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 2.16 [33]



รูปที่ 2.16 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่

d เป็นความหนาของแผ่นซิลิคอน, w เป็นความกว้างของบริเวณปลดพาหะนำกระแส และ d_1 เป็นความกว้างของบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ

- ในเนื้อของแผ่นซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะนำกระแส

- ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรด กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ (diffusion layer)

ถ้าให้ V_a เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้าวรรวมของระบบ ได้ดังนี้ คือ

$$V_a = V_{diff} + V_{SCR} + V_{Con} + V_{Elec} \quad (2.8)$$

โดย V_{diff} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

V_{SCR} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ

V_{Con} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน

V_{Elec} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

ศักดาไฟฟ้า V_{Con} กับ V_{elec} ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของพอร์ซิลิคอนแบบเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงทำให้สมการที่ (2.8) สามารถเขียนได้เป็น

$$V_a = V_{diff} + V_{SCR} + Constant \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ (V_{diff}) กับศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ เป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

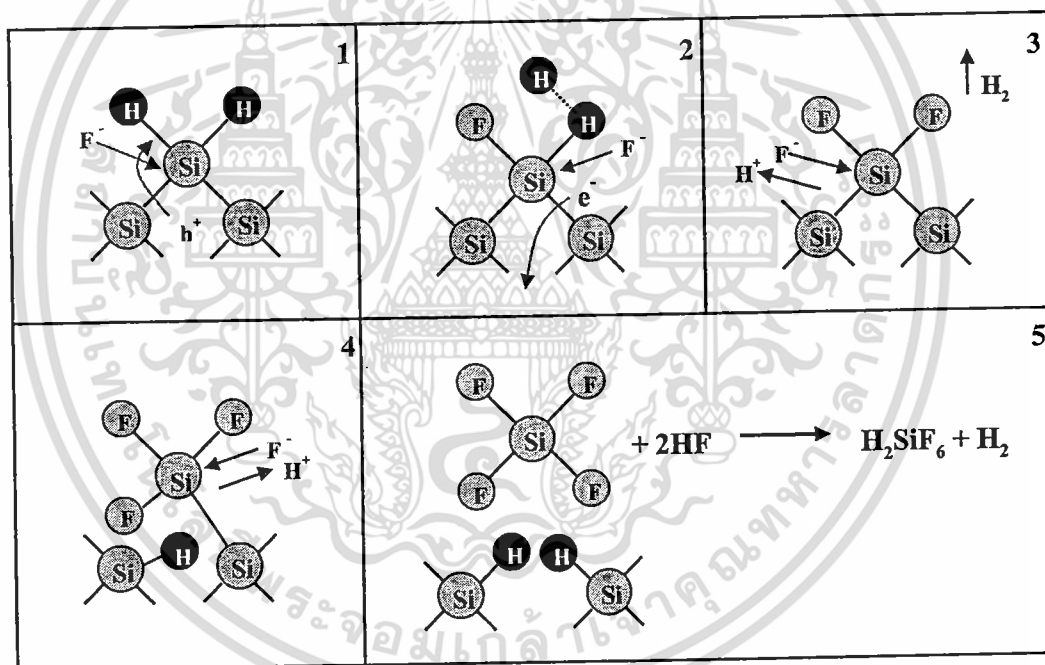
ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบตรง ทำให้ไม่เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นในแผ่นซิลิคอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ โดย V_{diff} นี้จะควบคุม อีออนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะตกคร่อมบริเวณนี้ โดยบริเวณปลอดพาหะนี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนําระแสภายในแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัด และโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้น

2.4 กลไกในการเกิดพอร์ซซิลิคอน [34]

2.4.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน

ในสภาวะปกติเมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำปฏิกิริยา แต่เมื่อไรก็ตามที่แผ่นซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบแอนโนดิกแล้ว ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นพอร์ซซิลิคอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน

เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกรไบอัสแบบแอนโนดิก ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแอนโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไรก็ตามที่มีการ

ไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก โดยมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้แก่ขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮล สามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้ โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทน ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการโพลาริซ (polarizing) ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลให้อิออนของฟลูออรีน (F⁻) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถที่จะเข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้น จะเกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอน โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนที่อยู่ถัดเข้ามา มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้ โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่า อะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนพร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิคอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ [34]



จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวมได้เป็น



จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้นนั้น เริ่มจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ (2.10) ที่มีแผ่นซิลิคอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้ จำเป็นต้องอาศัยโฮล (h⁺) ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF₂ ขึ้นที่บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน ต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF₂ กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ (2.11) ได้ผลลัพธ์เป็น SiF₄ หลุดออกมาจากผิวของแผ่นซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สังเกตได้ว่า จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่น

ซิลิคอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะ
ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายก็คือสารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการ
ที่ (2.12)

2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์ตซิลิคอน

แผ่นซิลิคอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะไม่ถูกกัด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการ
ป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบไบอัสขั้วบวกแก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ให้กระแสไหลผ่านรอย
สัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดทาง
ไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 แบบ คือ (1) การกัดแบบขัดผิวหน้า
ด้วยไฟฟ้า (electropolishing) และ (2) การกัดแบบทำให้เกิดพอร์ตซิลิคอน (porous etching)

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน
ระหว่างการแอโนไดซ์เซชัน โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก
ต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ

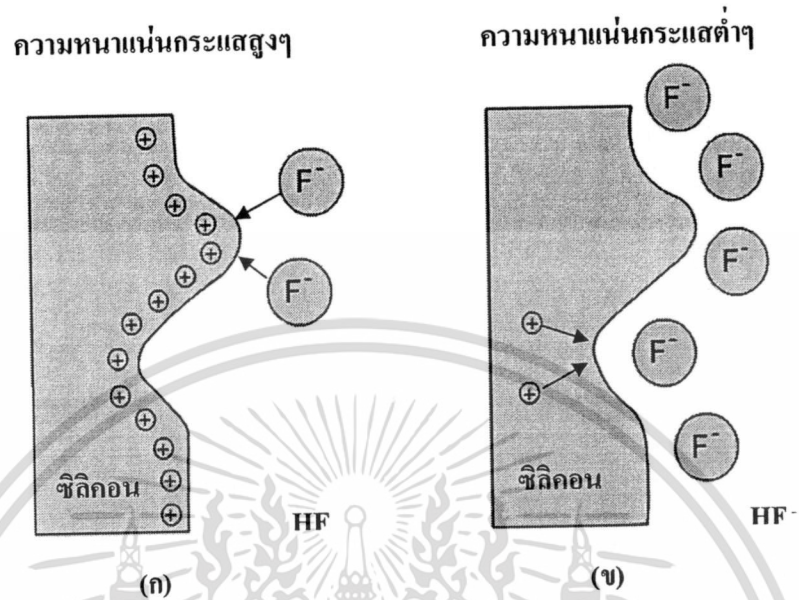
- การกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสให้แก่เซลล์ไฟฟ้า
เคมีในปริมาณสูงๆ ($J > J_{ps}$) ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนมีปริมาณของพาหะโฮล
สะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอออนของฟลูออรีนที่อยู่ใน
สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยอออนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายในสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้า
ผิวของแผ่นซิลิคอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุด
ของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงเอาอออนของฟลูออรีนเข้า
มาทำปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นส่วนมาก มีผล
ทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้นเราจึงเรียกการกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้า
ด้วยไฟฟ้า

- การกัดแบบทำให้เกิดพอร์ตซิลิคอน

ส่วนลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดพอร์ตซิลิคอน จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความ
หนาแน่นกระแสในปริมาณต่ำ ($J < J_{ps}$) ซึ่งจะทำให้ปริมาณอออนของฟลูออรีนในสารละลายกรด
ไฮโดรฟลูออริก มีจำนวนมากกว่าจำนวนของโฮลที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน ทำให้การ
กัดในลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวนโฮล ดังนั้นถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือ
รอยซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิวหรือจุดบกพร่องต่างๆ ในผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.18
(ข) เมื่อทำการไบอัสแบบแอโนดิกให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมหรือ
จุดบกพร่องเหล่านี้ มีปริมาณความเข้มสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่บริเวณอื่นๆ ซึ่งจะเอาพาหะโฮลเข้ามา

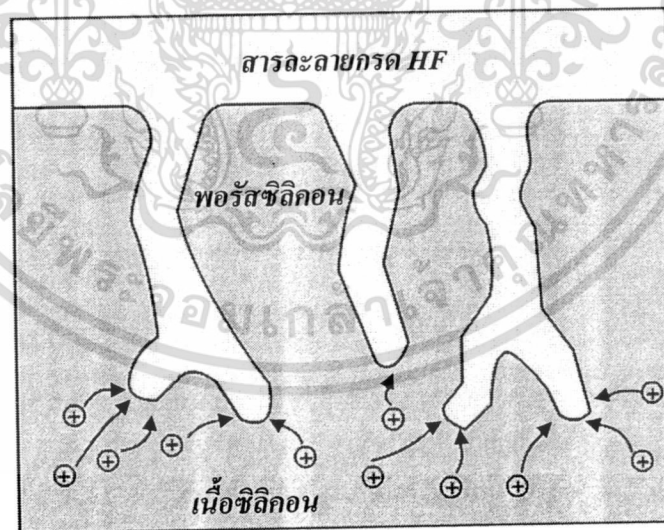
จุดนี้กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่บริเวณก้นหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไปเนื้อของผลึกซิลิกอน



รูปที่ 2.18 แบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนทั้งสองลักษณะ

(ก) ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า

(ข) ลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดพอร์ซิลิกอน



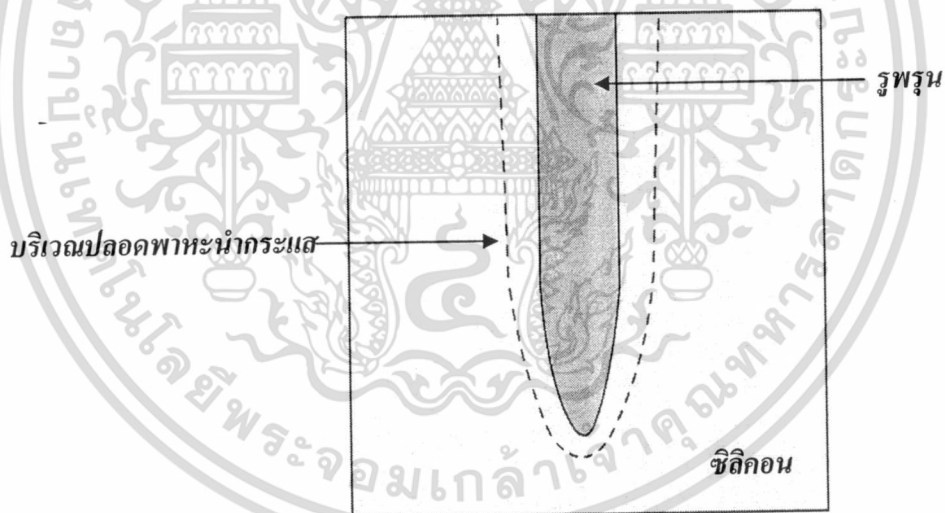
รูปที่ 2.19 การเคลื่อนที่พาหะ โสลที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนทั้งชนิดพี และชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าผลึกซิลิคอนทั้งสองชนิดมีกลไกการเกิดโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแบบแอนโอดิก

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นการไบอัสแบบตรง ซึ่งการไบอัสในลักษณะเช่นนี้จะไปลดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณปลดพาหะลง โดยจะเกิดขึ้นตามผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน อันเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนโอดิก จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณปลดพาหะ มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้นถ้าบริเวณของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีลักษณะเป็นหลุม ซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบๆ หลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณปลดพาหะขึ้นรอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 บริเวณปลดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน

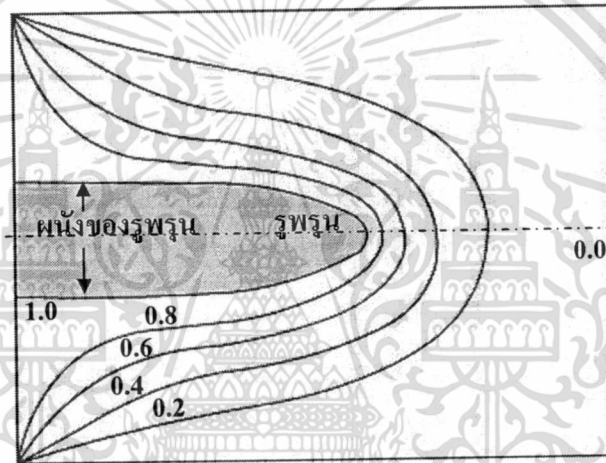
โดยความกว้างของบริเวณบริเวณปลดพาหะที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_{SCR}}{qN_D}} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	W	คือ ความกว้างบริเวณบริเวณปลอดพาหะ
	ϵ_s	คือ เปรอร์มิติวิตี (permittivity) ของผลึกซิลิคอน
	ϵ_0	คือ เปรอร์มิติวิตีของสุญญากาศ
	V_{SCR}	คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ
	q	คือ ประจุของอิเล็กตรอน
	N_D	คือ จำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้

จากสมการที่ (2.14) จะเห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ (V_{SCR}) และจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D) ในผลึกซิลิคอนชนิดอื่น



รูปที่ 2.21 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆพื้นที่ของรูพูน

บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบรูพูน จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 2.21 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบๆพื้นที่ของรูพูน (E_s) มีค่าเท่ากับ

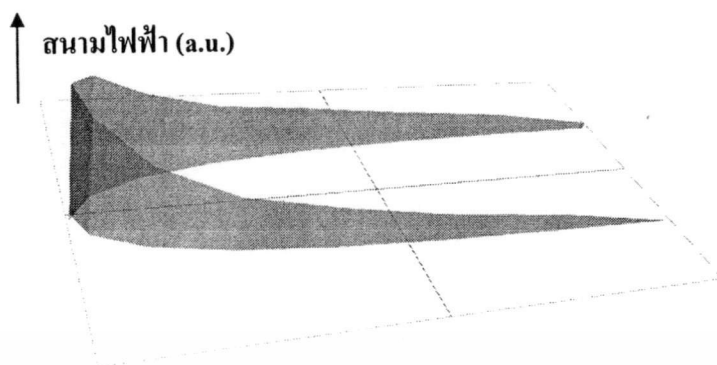
$$E_s = 2V_{SCR}/W \quad (2.15)$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบๆก้นหลุมของรูพูน (E'_s) จะมีค่า

$$E'_s = V_{SCR}/r \quad (2.16)$$

โดย r คือ รัศมีก้นหลุมของรูพูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน

จากรูปที่ 2.22 จะเห็นได้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูพรุนจะมีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือผนังบริเวณก้นหลุมของรูพรุนมีปริมาณของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าบริเวณผนังรอบๆ ของรูพรุนอยู่ถึงประมาณ 2-3 เท่า ส่วนผนังบริเวณปากรูจะมีค่าต่ำสุดจนเกือบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจากการที่ก้นหลุมของรูพรุนมีขนาดของสนามไฟฟ้าในปริมาณสูงนั้น มีผลทำให้สามารถดึงพาหะนำกระแส (โฮล) มาที่บริเวณนี้กันได้มาก ส่งผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมจะมีปริมาณกระแสที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน

2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

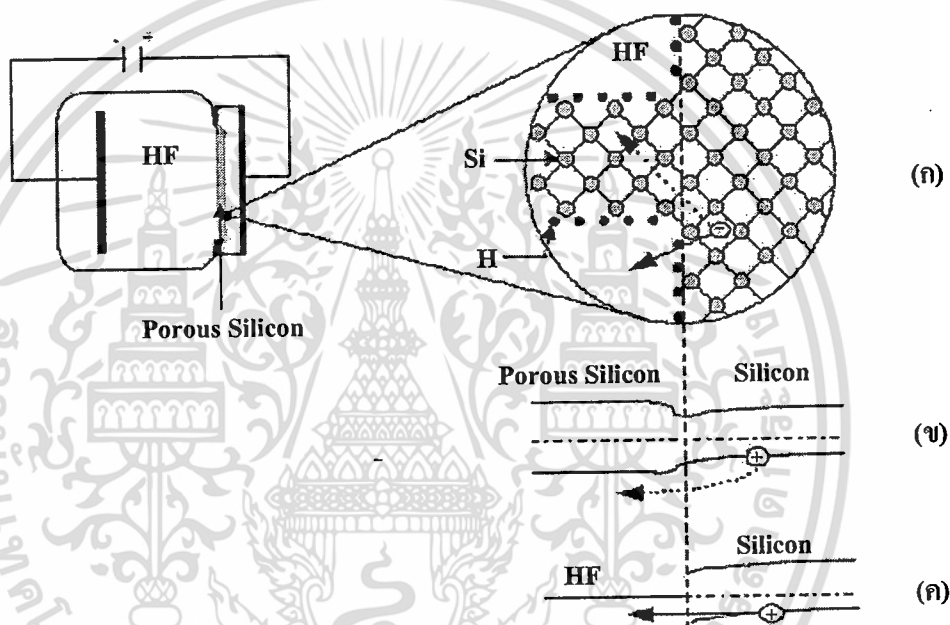
จากการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนขึ้นโดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิกอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญ ต่อกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนในแบบทำให้เกิดพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี เป็นกระบวนการกัดที่สามารถลดขนาดโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร แต่กระบวนการนี้ก็จะอาศัยกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนด้วย ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

- การหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากซิลิคอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไปอัสเซสล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนโนดิก ทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพีจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ผลของขนาดควอนตัมขึ้นในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.24



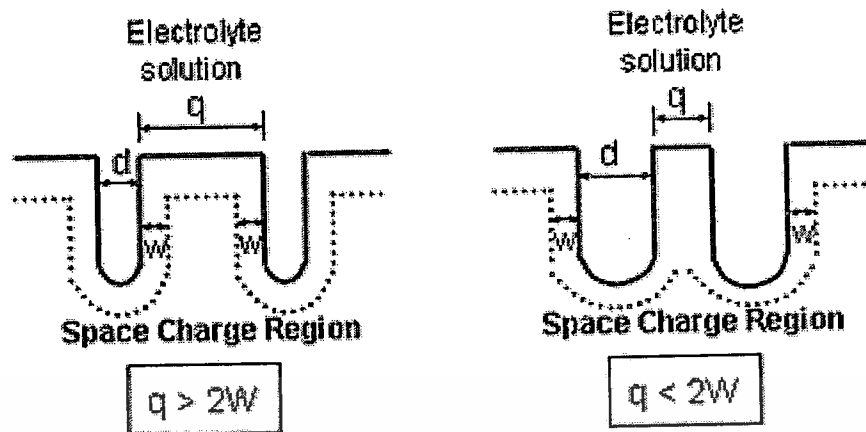
รูปที่ 2.24 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนชนิดพี โดยที่

- (ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล
- (ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน
- (ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะโฮล จากผลึกซิลิคอนผ่านไปยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน

จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดพีจะถูกกัดจนเป็นโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจนทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานในพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ระหว่างพอร์สซิลิคอนกับผลึกซิลิคอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็ค่าแพนงศักย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ ΔE_v สำหรับโฮล และเท่ากับ ΔE_c สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้นการที่พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัด โครงสร้างในส่วนต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่า ΔE_v ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ค่าแพนงศักย์ ΔE_v มีค่าพลังงานมากกว่าพลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอนได้ ผลที่ตามมาคือเกิดการหยุดกัด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ΔE_v นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอน โดย ΔE_v จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัดในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนพอร์สซิลิคอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่ถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีสามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ค) ดังนั้นจึงทำให้บริเวณก้นหลุมของพอร์สซิลิคอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่อง

- การหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอโนดิก สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ W ดังนั้นกลไกในการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นแล้วจะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.25



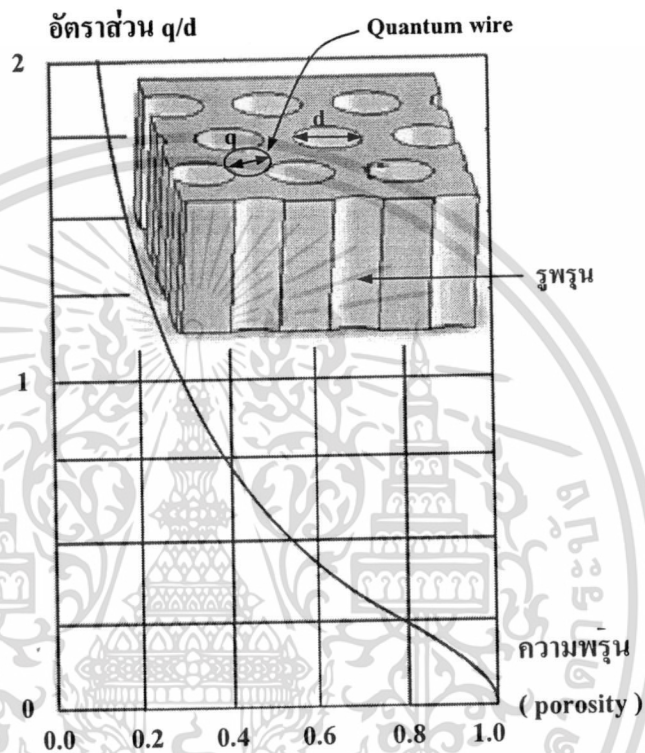
รูปที่ 2.25 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่
 (ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า $2W$
 (ข) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า $2W$

จากรูปที่ 2.25 (ก) จะเห็นได้ว่าพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อถูกทำการกัดจะทำให้ขนาดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน (q) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพรุนภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลอดพาหะนำกระแสปกคลุมอยู่รอบๆ รูพรุนแต่ละรู ในกรณีนี้ ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q > 2W$) ดังนั้นจึงยังสามารถทำการกัดเพื่อลดขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไรก็ตามที่ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนมีขนาดที่น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q < 2W$) ดังรูปที่ 2.25 (ข) จะมีผลทำให้เกิดการซ้อนทับกันของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส จนโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้

2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน

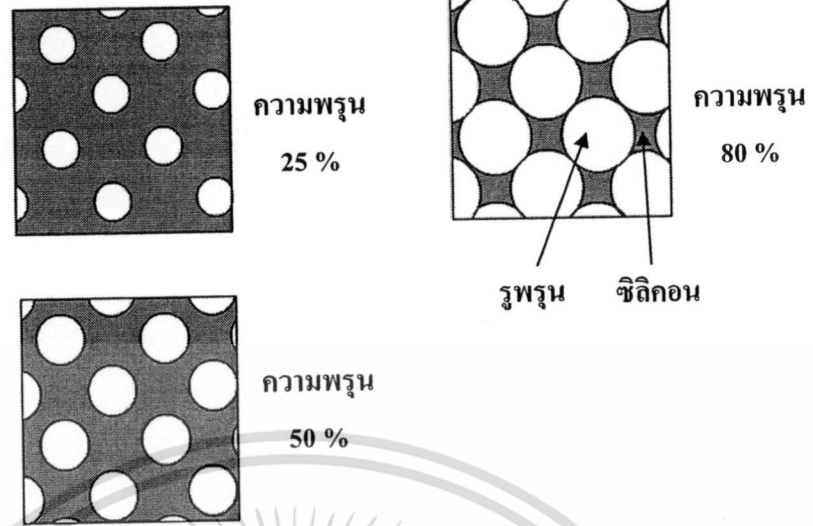
โดยทั่วไปแล้ววัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

พอร์ซซิติกอน คือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอนที่เหล็และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง ผลของขนาดควอนตัม ส่งผลในลักษณะของ ควอนตัมในเชิง 1 มิติ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์ซซิติกอน แสดงดังรูปที่ 2.26 [35]



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิกอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์ซซิติกอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อซิลิกอนและขนาดของรูพรุน มีผลต่อความพรุนของพอร์ซซิติกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กลง หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นพอร์ซซิติกอนนั้นมีความพรุนมากกว่าเดิม แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์ซซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิกอน

ในบทนี้จะกล่าวถึง นิยามเซนเซอร์ หลักการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ และการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิกอน

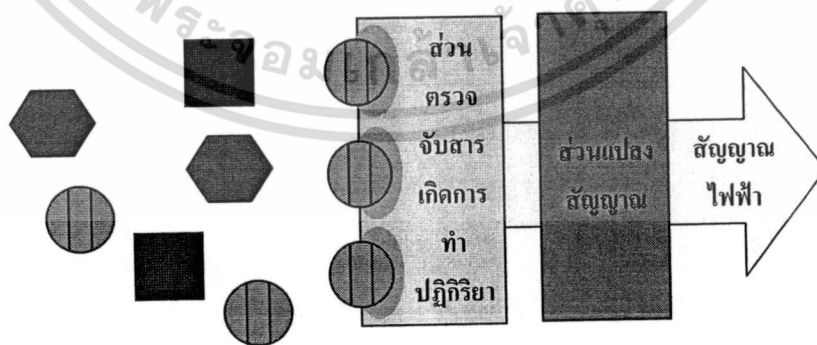
3.1 นิยามของเซนเซอร์ [37]

เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีความสามารถใช้แทนการตอบสนองทางประสาทสัมผัสของมนุษย์ เช่น การมองเห็น การสัมผัส การได้ยิน การดมกลิ่น และการลิ้มรส จึงได้มีการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัด และแสดงผลออกมาในรูปของสัญญาณหรือพลังงานในรูปหนึ่ง

เซนเซอร์ หมายถึง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพลังงานในรูปแบบต่างๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น โฟโตทรานซิสเตอร์, อุปกรณ์ตรวจวัดความดัน และอุปกรณ์ตรวจวัดไอสารเคมี เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งเซนเซอร์ได้เป็น 2 แบบ คือ เซนเซอร์ทางเคมีและเซนเซอร์ทางฟิสิกส์

3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี (chemical sensors)

เซนเซอร์ทางเคมี จัดเป็นอุปกรณ์ตรวจสอบสารประเภทหนึ่ง โดยส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมีประกอบด้วย ชั้นของการตรวจจับสารเชื่อมต่อกับส่วนแปลงสัญญาณ โดยชั้นของการตรวจจับสารจะทำหน้าที่ตรวจจับด้วยการทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของสารที่ผ่านเข้ามา จากนั้น ส่วนแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.1



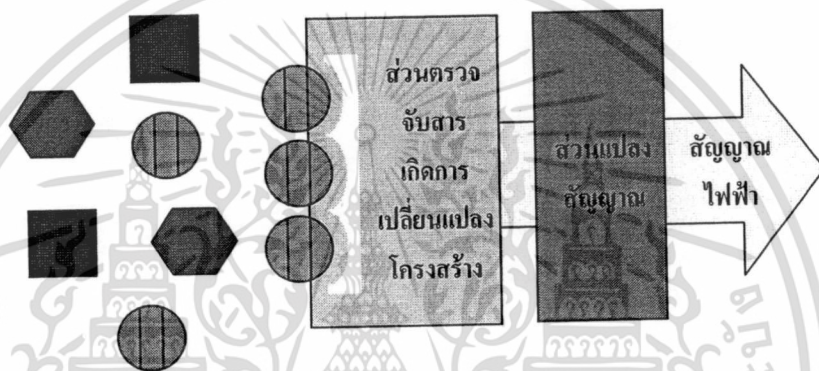
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถแบ่งอุปกรณ์เซนเซอร์ทางเคมีที่สำคัญได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทวัดความนำไฟฟ้า (conductimetric) และประเภทวัดศักย์ไฟฟ้า (potentiometric)

3.1.2 เซนเซอร์ทางฟิสิกส์ (physical sensors)

เซนเซอร์ทางฟิสิกส์ จัดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสารประเภทหนึ่ง โดยส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์ประกอบด้วย ชั้นของการตรวจจับสารเชื่อมต่อกับส่วนแปลงสัญญาณ โดยชั้นของการตรวจจับสารจะทำหน้าที่ตรวจจับด้วยวิธีการที่โมเลกุลของสารที่ผ่านเข้ามาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในของชั้นของการตรวจจับสาร จากนั้นส่วนแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์

โดยตัวอย่างอุปกรณ์เซนเซอร์ทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ เซนเซอร์วัดความดัน (pressure sensors) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (temperature sensors)

3.2 หลักการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ [38]

วิธีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์สามารถทำได้หลายวิธี โดยใช้หลักการดังนี้

1. หลักการวิธีวัดทางเคมี วิธีนี้จะตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยให้ไอแอลกอฮอล์รีดิวซ์โพแทสเซียมไดโครเมต (K_2CrO_7) มีสีแดงส้มในสถานะที่มีกรดกำมะถันอยู่ด้วย ให้กลายเป็นโครเมียมซัลเฟต ($Cr_2(SO_4)_3$) มีสีเขียว ซึ่งความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไปจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไอแอลกอฮอล์ที่ตรวจวัดได้ ถ้ามีปริมาณไอแอลกอฮอล์มากขึ้นก็จะทำให้สีเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มขึ้น

2. หลักการวิธีวัดทางการดูดกลืนรังสี วิธีนี้จะตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของไอแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งทำให้ปริมาณรังสีอินฟราเรดที่ผ่านไปมีความเข้มของรังสีลดลง ถ้ามีปริมาณไอแอลกอฮอล์มากการดูดกลืนรังสีจะมากขึ้นเป็นสัดส่วนตามกัน เมื่อวัดความเข้มรังสีที่เปลี่ยนไป ก็จะทำให้ทราบว่ามีปริมาณแอลกอฮอล์อยู่เท่าใด

3. หลักการวิธีวัดทางเคมีไฟฟ้า วิธีนี้จะตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยการให้ไอแอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ากับเครื่องตรวจวัด ซึ่งประกอบด้วย แผ่นพลาสติกบางๆ 2 แผ่นขนานกัน และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดอยู่ระหว่างกลาง ไอแอลกอฮอล์จะถูกดูดซับอยู่บนแผ่นพลาสติก และถูกออกซิไดซ์เป็นกรดอะซิติก (acetic acid) จึงให้อิเล็กตรอนออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านแผ่นพลาสติกผ่านไปยังเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไอแอลกอฮอล์

จากหลักการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ทั้ง 3 วิธีข้างต้น เป็นวิธีการที่ยุ่งยาก และใช้ค่าใช้จ่ายที่สูง งานวิจัยนี้จึงได้มีความสนใจที่จะใช้ชั้นพอร์สซิลิกอนซึ่งมีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากทำการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ซึ่งชั้นพอร์สซิลิกอนนั้นจะทำการสร้างในเนื้อซิลิกอนจึงสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก ทำให้ผลิตได้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ราคาต่ออุปกรณ์ถูก และกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนนั้นทำได้ง่าย สามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการของ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้

3.3 หลักการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิกอน

อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิกอนในงานวิจัยนี้เป็น โครงสร้างแบบง่าย ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ

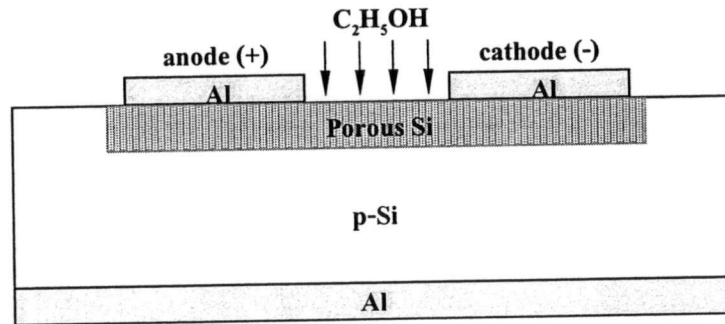
- ส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด กับ ขั้วแอโนด อยู่บนชั้นพอร์สซิลิกอนจะทำหน้าที่ในการตรวจวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อโมเลกุลไอแอลกอฮอล์ถูกดูดซับเข้ามาในรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน

- ส่วนที่เป็นชั้นพอร์สซิลิกอน

ชั้นพอร์สซิลิกอน มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลไอแอลกอฮอล์ได้ดีและมีเนื้อที่ในการดูดซับมากกว่าพื้นผิวราบเรียบที่ไม่มีรูพรุน จะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับไอแอลกอฮอล์

โดยอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิกอน โครงสร้างแบบง่ายนี้ แสดงดังรูปที่ 3.3

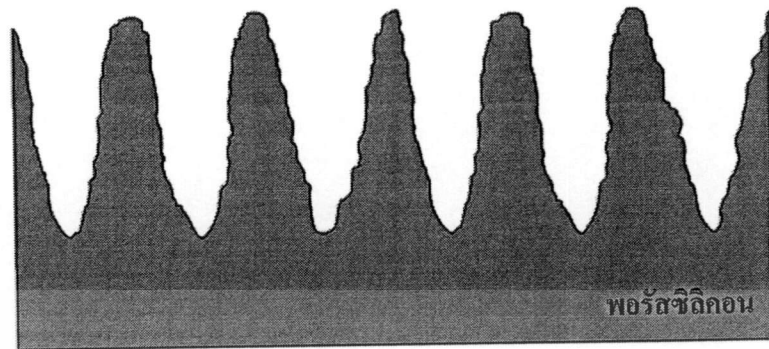


รูปที่ 3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน

โดยหลักการหลักๆ ในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอนนี้มีอยู่ 2 หลักการ คือ หลักการแรก เป็นหลักการดูดซับและควบแน่นในรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน และหลักการที่สอง เป็นหลักการเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิคอน ซึ่งทั้ง 2 หลักการนี้จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน สามารถอธิบายแยกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 หลักการดูดซับและควบแน่นในรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน [39-44]

ชั้นพอร์สซิลิคอน จะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดซับ (adsorption) โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ เนื่องจากพื้นผิวที่มีรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถดูดซับ โมเลกุลก๊าซ ได้ดีกว่าและมีเนื้อที่ในการดูดซับมากกว่าพื้นผิวราบเรียบที่ไม่มีรูพรุน โดยการตรวจจับไอแอลกอฮอล์จะเริ่มจากชั้นพอร์สซิลิคอนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาเกาะ เมื่อมีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามาในระบบผ่านบริเวณพื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิคอน โมเลกุลไอแอลกอฮอล์นี้จะถูกดูดซับและจับตัวกับผนังรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals attractive force) เมื่อมีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามาเพิ่มมากขึ้น โมเลกุลไอแอลกอฮอล์จะรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้น โมโนเลเยอร์ (mono layer) ต่อมาเมื่อมีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามาเพิ่มมากขึ้นอีก โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ก็จะรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นชั้นมัลติเลเยอร์ (multi layer) และเมื่อโมเลกุลไอแอลกอฮอล์มารวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นอีกเรื่อยๆ ส่งผลให้ความดันไอภายในรูพรุนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน (capillary condensation) ส่งผลทำให้เกิดการอึดตัวในการดูดซับโมเลกุลไอแอลกอฮอล์ภายในรูพรุน และเมื่อไม่มีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามาในระบบจะส่งผลทำให้โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ระเหยออกจากรูพรุนซึ่งที่อุณหภูมิห้องโมเลกุลไอแอลกอฮอล์สามารถระเหยได้เองแต่จะใช้เวลานาน จึงควรใช้ความร้อนหรือลมเป่าไล่ซึ่งจะทำให้โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ระเหยไปจนหมดได้ไวขึ้น โดยกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นนี้ แสดงดังรูปที่ 3.4



(ก)

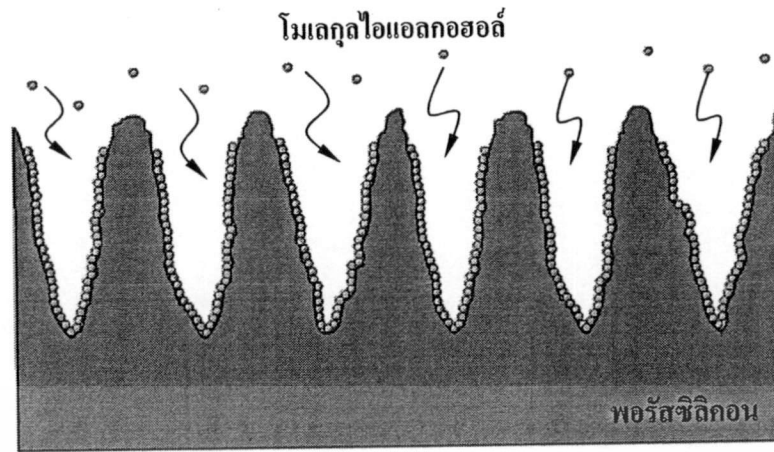


(ข)

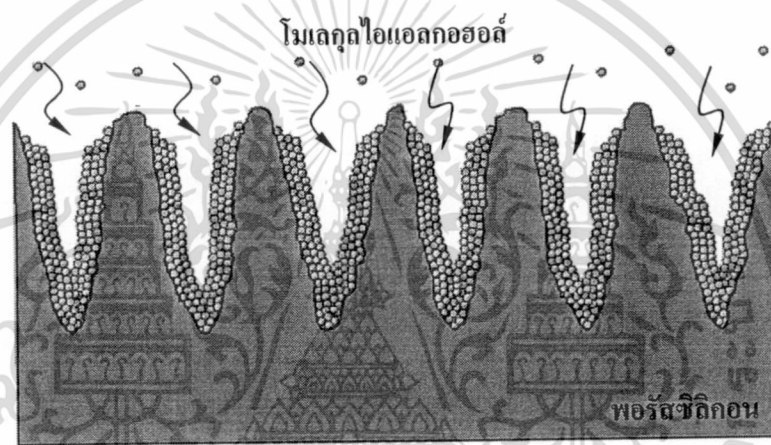
รูปที่ 3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพรตชลิคอง

- (ก) ชั้นพรตชลิคองที่ยังไม่มีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาเกาะ
- (ข) โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูปพรุน
- (ค) โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้นโมโนเลเยอร์
- (ง) โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นมัลติเลเยอร์
- (จ) โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นภายในรูปพรุน
- (ฉ) โมเลกุลไอแอลกอฮอล์เกิดการระเหยออกไปจากชั้นพรตชลิคอง
- (ช) ชั้นพรตชลิคองที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ระเหยออกไปหมดแล้ว

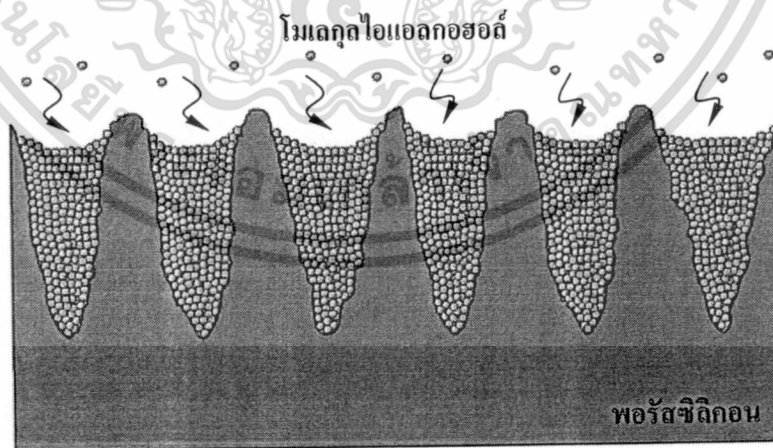
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



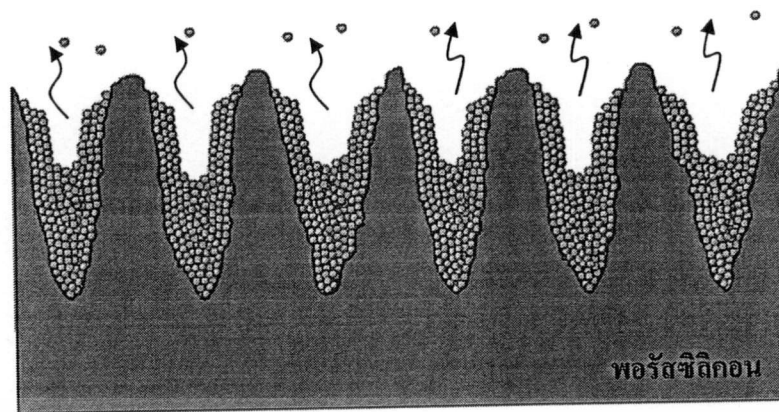
(ข)



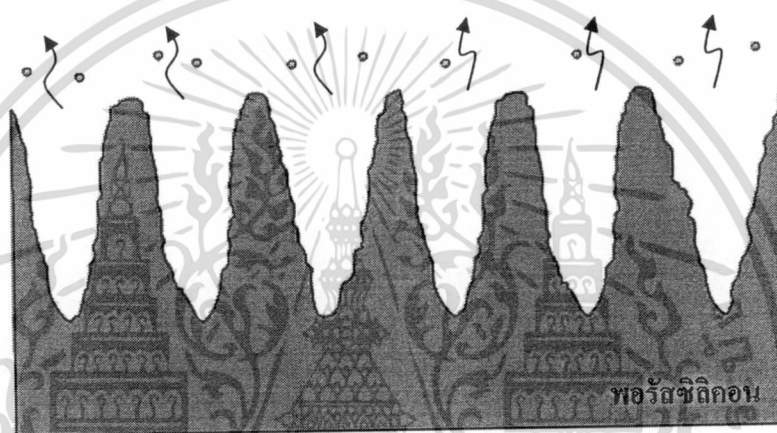
(จ)

รูปที่ 3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซีลิกอน (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิติคอน (ต่อ)

จากรูปที่ 3.4 เป็นแบบจำลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิติคอน ซึ่งในแต่ละชั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

- (ก) เริ่มจากชั้นพอร์สซิติคอนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาเกาะ
- (ข) เมื่อมีการไหลของโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามาในระบบ โมเลกุลไอแอลกอฮอล์จะเข้ามาในบริเวณรูพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน แล้วจับตัวกับผนังของรูพรุน
- (ค) เมื่อโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามารวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นจะเรียงตัวกันเป็นชั้นที่เรียกว่าชั้นโมโนเลเยอร์
- (ง) เมื่อโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามารวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นอีกหลายๆ ชั้น เป็นชั้นที่เรียกว่าชั้นมัลติเลเยอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

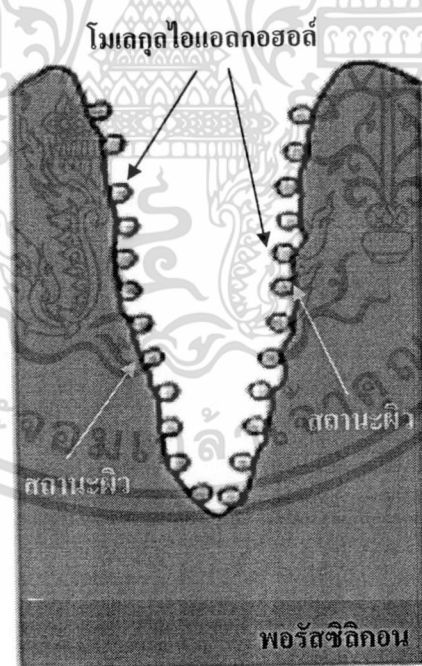
(จ) เมื่อโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามารวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นอีกเรื่อยๆ จะส่งผลทำให้ความดันไอภายในรูพรุนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน ทำให้เกิดการอึดตัวในการดูดซับโมเลกุลไอแอลกอฮอล์ภายในรูพรุน

(ค) เมื่อไม่มีการไหลของโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามาในระบบ จะส่งผลทำให้โมเลกุลไอแอลกอฮอล์จะระเหยออกจากรูพรุน

(ข) เมื่อโมเลกุลไอแอลกอฮอล์ระเหยออกจากรูพรุนไปจนหมดก็จะเหลือแต่ชั้นพอร์สซิลิกอน

3.3.2 หลักการเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิกอน [45-48]

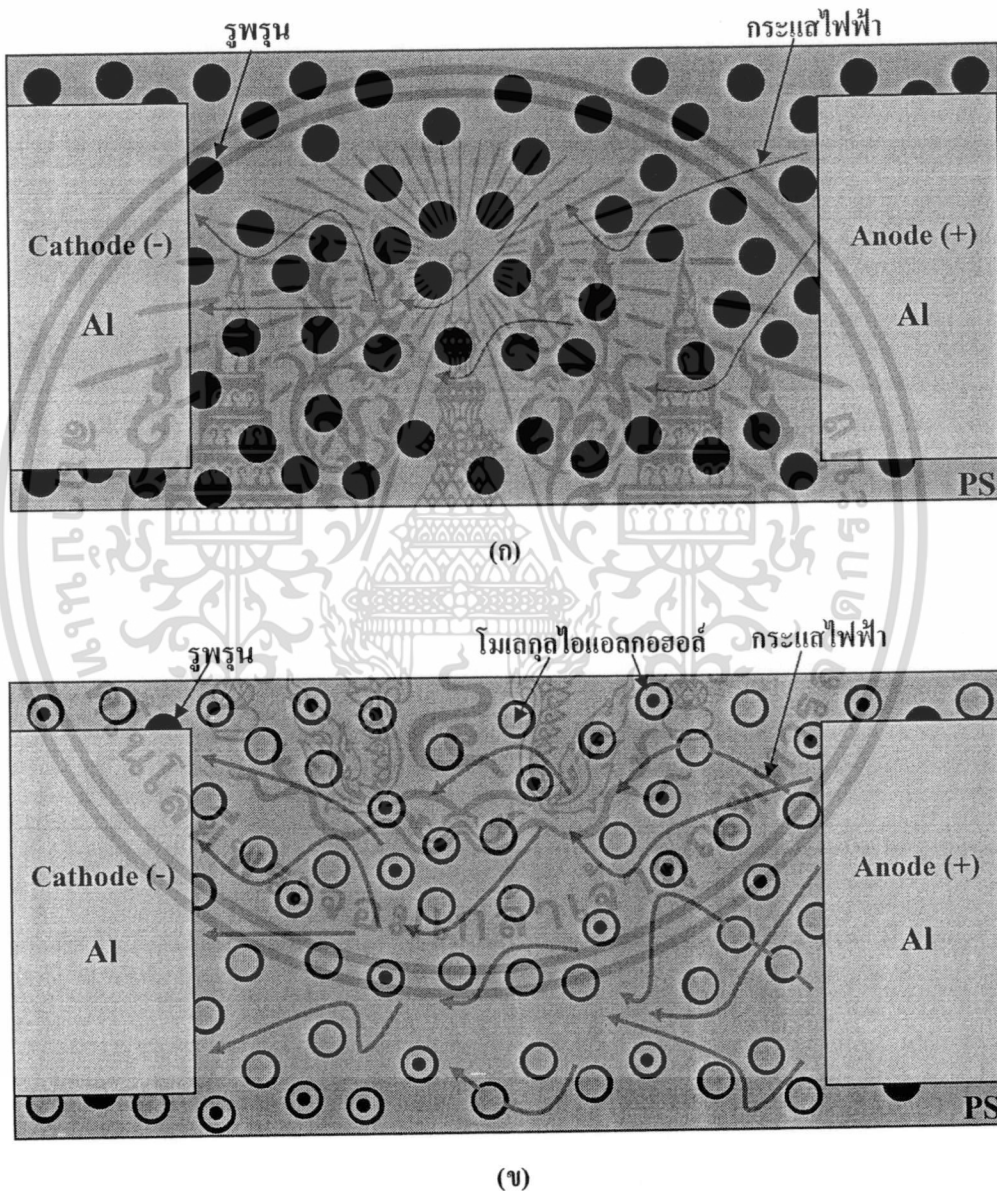
บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิกอนมีพันธะแขวนขาดและสารเจือปนอื่นๆ อยู่บริเวณผิวซึ่งจะทำให้มีระดับพลังงานที่เรียกว่าสถานะผิว (surface states) เกิดขึ้น เมื่อโมเลกุลไอแอลกอฮอล์ถูกดูดซับและจับตัวกับผนังรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน จะส่งผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำพาหะที่บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิกอนเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดสถานะผิวเพิ่มมากขึ้น บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิกอนจึงสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิกอนแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 เมื่อ โมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนทำให้เกิดสถานะผิวเพิ่มมากขึ้น ชั้นพอร์สซิติคอนสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น และเมื่อมี โมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน ส่งผลทำให้ชั้นพอร์สซิติคอนสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นจนไปคงที่อยู่ค่าหนึ่ง เนื่องจากเกิดการอึดตัวในการตรวจจับโมเลกุลไอแอลกอฮอล์ โดยการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิติคอนที่เพิ่มขึ้นนี้จะเกิดจาก 2 สาเหตุ คือ สถานะผิวที่เพิ่มมากขึ้นของชั้นพอร์สซิติคอน และการนำไฟฟ้าของแอลกอฮอล์ที่ควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน แสดงดังรูปที่ 3.6

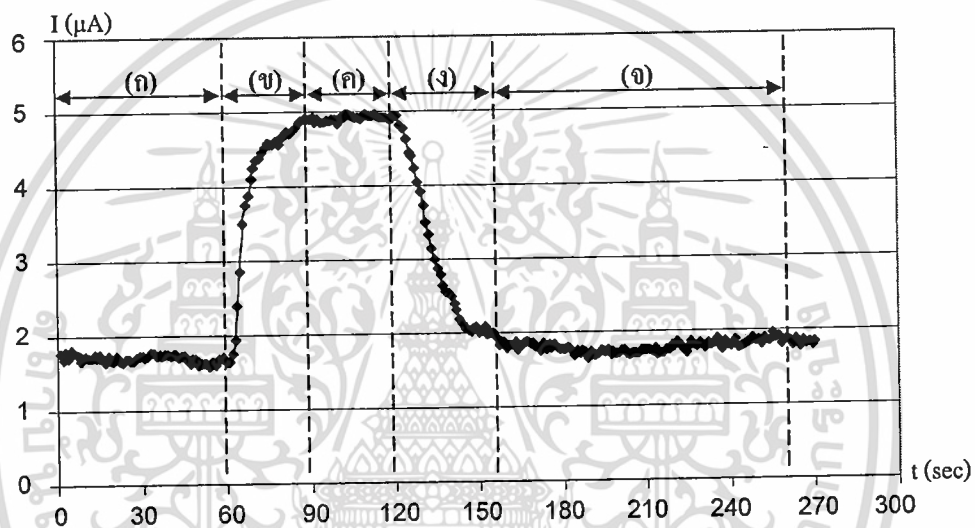


รูปที่ 3.6 แบบจำลองการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิติคอน

(ก) ก่อนตรวจจับไอแอลกอฮอล์ (ข) ขณะตรวจจับไอแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 (ก) เป็นการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ก่อนที่จะมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ สังเกตได้ว่าจะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าน้อยมากเนื่องจากชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าความต้านทานที่สูง และจากรูปที่ 3.6 (ข) เมื่อมีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามา รวมตัวกันภายในรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนมากขึ้น ทำให้มีการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิคอนเพิ่มมากขึ้น สังเกตได้ว่าจะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเกิดจาก 2 สาเหตุหลักๆ คือ เกิดจากสถานะผิวของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มมากขึ้น และเกิดจากการนำไฟฟ้าของแอลกอฮอล์ที่ควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน โดยตัวอย่างผลทดลองลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน

- (ก) ช่วงที่ไม่มีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์
- (ข) ช่วงที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน
- (ค) ช่วงที่เกิดการอ้อมตัวในการตรวจจับโมเลกุลไอแอลกอฮอล์
- (ง) ช่วงที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์เกิดการระเหยออกไปจากชั้นพอร์สซิลิคอน
- (จ) ช่วงที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ระเหยออกไปหมดแล้ว

จากรูปที่ 3.7 เป็นช่วงต่างๆ ของลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

- (ก) ช่วงที่ชั้นพอร์สซิลิคอนยังไม่มี การดูดซับโมเลกุลไอแอลกอฮอล์

(ข) ช่วงที่มีโมเลกุลไอแอลกอฮอล์เข้ามาในระบบ แล้วเข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำพาหะที่ผิวของชั้นพอร์สซิลิกอนเพิ่มมากขึ้น เกิดสถานะผิวเพิ่มมากขึ้น ทำให้บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิกอนสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น และช่วงที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์มารวมตัวกันภายในรูพรุนเป็นจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน ทำให้มีการนำไฟฟ้าของแอลกอฮอล์ที่ควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุนเกิดขึ้น

(ค) ช่วงที่เกิดการอิมมิดในการตรวจจับ โมเลกุลไอแอลกอฮอล์ ทำให้การนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง

(ง) ช่วงที่หยุดการไหลของไอแอลกอฮอล์ ทำให้โมเลกุลไอแอลกอฮอล์เกิดการระเหยออกจากรูพรุนไปเรื่อยๆ ส่งผลทำให้การนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าลดลง

(จ) ช่วงที่โมเลกุลไอแอลกอฮอล์เกิดการระเหยออกจากรูพรุนจนหมด ส่งผลทำให้บริเวณผิวของชั้นพอร์สซิลิกอนกลับมานำไฟฟ้าอยู่ที่ระดับเดิมในตอนแรก

โดยเหตุการณ์การดูดซับและควบแน่นในรูพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน และเหตุการณ์การเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิกอน จะเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ส่งผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิกอนสามารถทำการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ได้

บทที่ 4

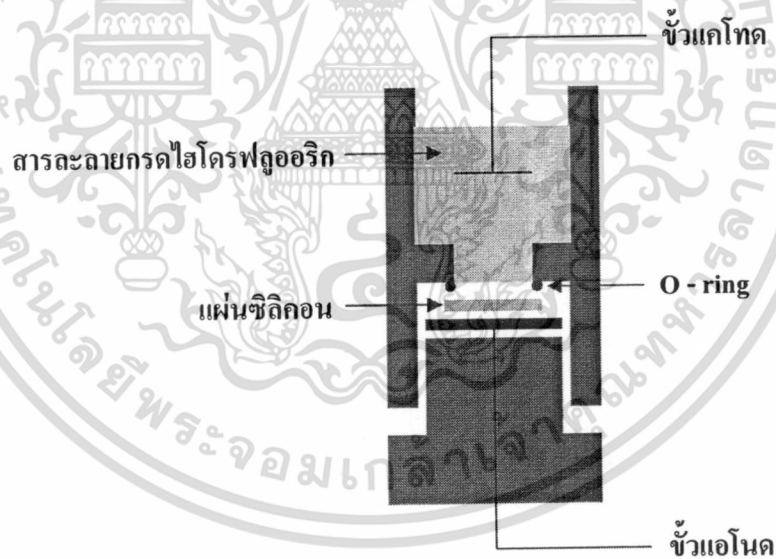
กระบวนการสร้าง และเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

ในบทนี้จะกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยใช้ชั้นพอร์ซซิลิคอน เทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความพรุน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว และเครื่องมือในการวัดผลของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์

4.1 กระบวนการสร้าง

4.1.1 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน เป็นวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถควบคุมปฏิกิริยาในการกัดเพื่อทำให้เกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาตามความต้องการได้ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้ง เนื่องจากใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ และสามารถทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งนี้จะประกอบด้วย แผ่นซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดจะจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แผ่นซิลิคอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยจะใช้โอริง (O-ring) เป็น

ส่วนป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซลล์ ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี และทำการป้อนกระแสไฟฟ้าบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วลบจะจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้านี้เองก็จะทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดด้วยโดยเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันที่ได้ให้ความสนใจคือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก

4.1.2 การสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน

ชั้นพอร์สซิลิคอนที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้การสร้างด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น และสามารถควบคุมความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนได้อีกด้วย

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน

1. การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

ใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพี มีระนาบ (100) สภาพด้านทาน 1-2 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาของแผ่นซิลิคอนเท่ากับ 450 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.2 (ก)

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

- ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยน้ำบริสุทธิ์ (De-Ionized (DI) water) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิวหน้า

- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน

- ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้านหลังแผ่นซิลิคอน

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำขั้วด้านหลังของอุปกรณ์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ (vacuum evaporator) ซึ่งสามารถทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนได้ความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.2 (ข)

4. กระบวนการซินเตอร์ริง

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้านหลังแผ่น ไปทำการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนให้ระหว่างกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการวางแผ่นซิลิคอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 L/min อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที

5. การสร้างชั้นพอร์ตซิลิคอน

โดยการนำเอาแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ข้างต้น ไปวางตรงตำแหน่งบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นก็ทำการเพสละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ลงไปในเซลล์ไฟฟ้าเคมี นำขั้วอิเล็กโตรดจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วลบให้กับขั้วอิเล็กโตรดที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้น มีผลทำให้ที่บริเวณของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความพรุนของพอร์ตซิลิคอนก็คือ เงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน อันได้แก่

- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแอนโนไดซ์เซชัน
- เวลาที่ใช้ในการแอนโนไดซ์เซชัน

หลังจากกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันเสร็จสมบูรณ์แล้ว จะได้ชั้นของพอร์ตซิลิคอนเกิดขึ้นตรงบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 4.2 (ค)

6. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนหลังจากการสร้างชั้นพอร์ตซิลิคอน

นำแผ่นซิลิคอนออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี ไปผ่านการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งสุดท้าย โดยมีขั้นตอนดังนี้

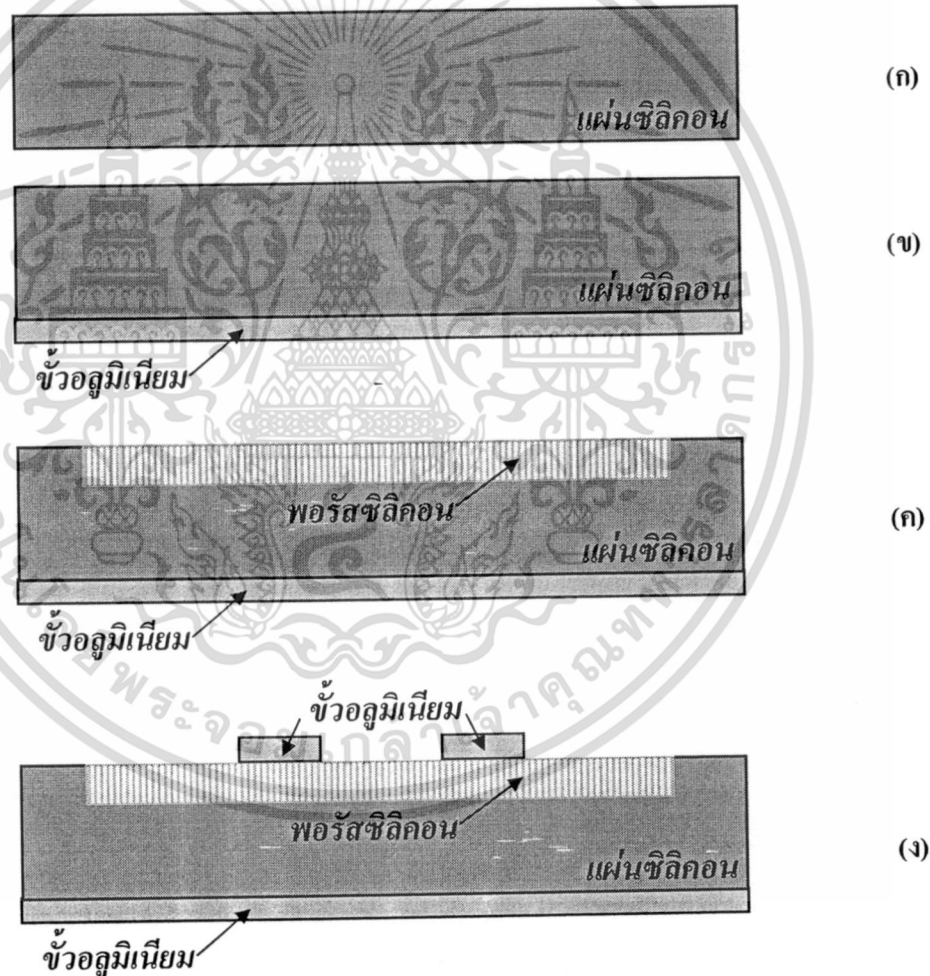
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- แช่แผ่นซิลิคอนในแอลกอฮอล์เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดขี้ผึ้งสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่ในชั้นพอร์ตซิลิคอน

7. การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหน้าโดยการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนบริเวณที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน โดยใช้มาสค์สำหรับทำขั้วโลหะเพื่อทำขั้วของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอสอล์ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ 500 μm ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 4.2 (ง)

8. กระบวนการซินเตอร์ริง

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำขั้วอลูมิเนียมด้านหน้าไปทำการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อพอร์สซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยการวางแผ่นซิลิคอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 L/min อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที

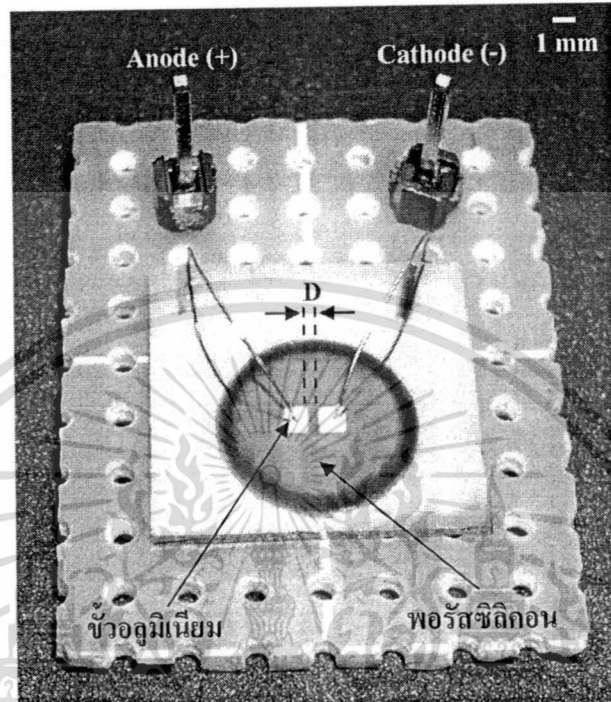


รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอสอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน

- (ก) การเตรียมแผ่นซิลิคอน (ข) การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหลัง
(ค) การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน (ง) การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างจากกระบวนการข้างต้น มีขนาดของขั้วลุมิเนียมประมาณ $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (D) ประมาณ $500 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิติคอน

4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน

การวัดหาค่าความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน โดยค่าความพรุนของวัสดุใดๆ สามารถหาได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความพรุน} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_3)} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ m_1 คือ น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นก่อนการเกิดรูพรุน

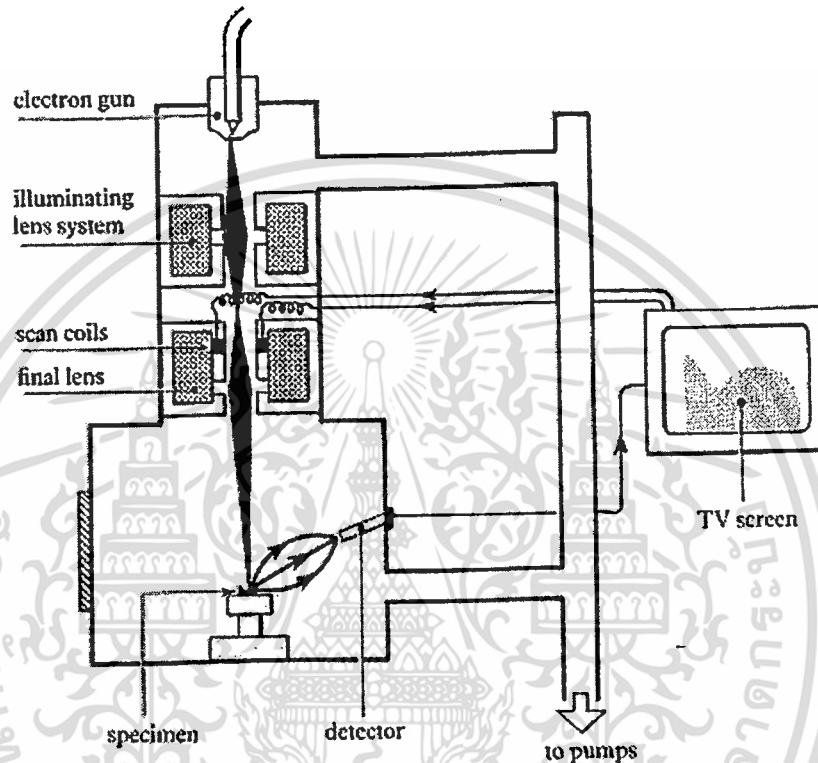
m_2 คือ น้ำหนักของวัสดุหลังการเกิดรูพรุน

m_3 คือ น้ำหนักของวัสดุที่เหลือหลังจากการลอกชั้นความพรุนออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิว และศึกษาโครงสร้างของชั้นพอลิเมอร์ เครื่อง SEM นี้มีจุดเด่นอยู่ที่กำลังขยายสูงถึง 20 ถึง 500,000 เท่า จึงสามารถศึกษาพื้นผิวที่มีขนาดเล็กได้ดี โดยส่วนประกอบของเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.4

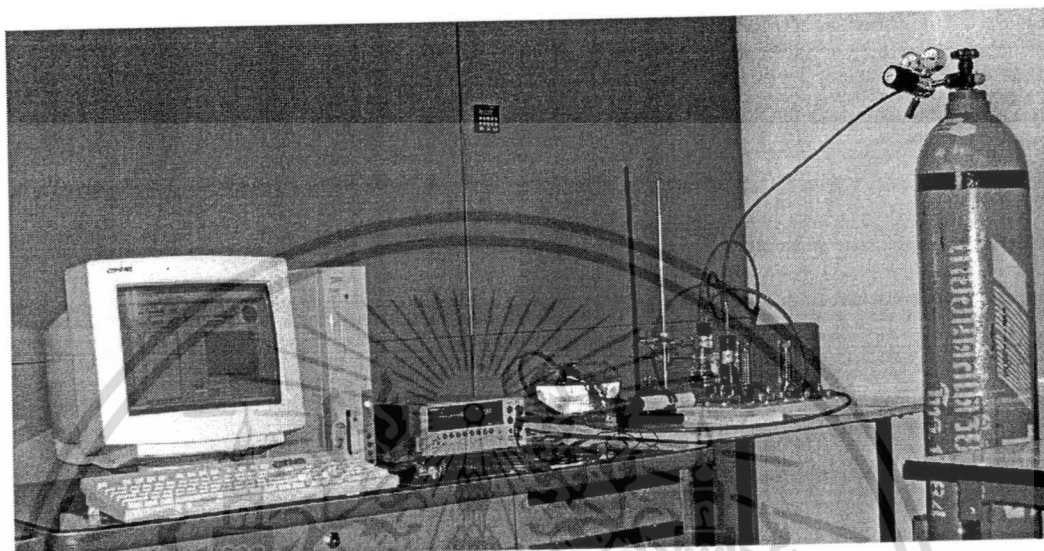


รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 4.4 การทำงานของเครื่อง SEM จะเริ่มจาก แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ให้อิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 kV โดยอิลูมินาเลนส์ (illuminating lens system) ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิวของวัสดุ คลายกับการกวาดรูปบนจอโทรทัศน์ และเลนส์ตัวสุดท้ายทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากสแกนคอยล์ให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ก่อนถึงตัววัสดุ เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัสดุจะให้สัญญาณออกมา ซึ่งสัญญาณต่างๆ จะถูกตรวจจับและถูกนำไปแสดงผลที่จอภาพ

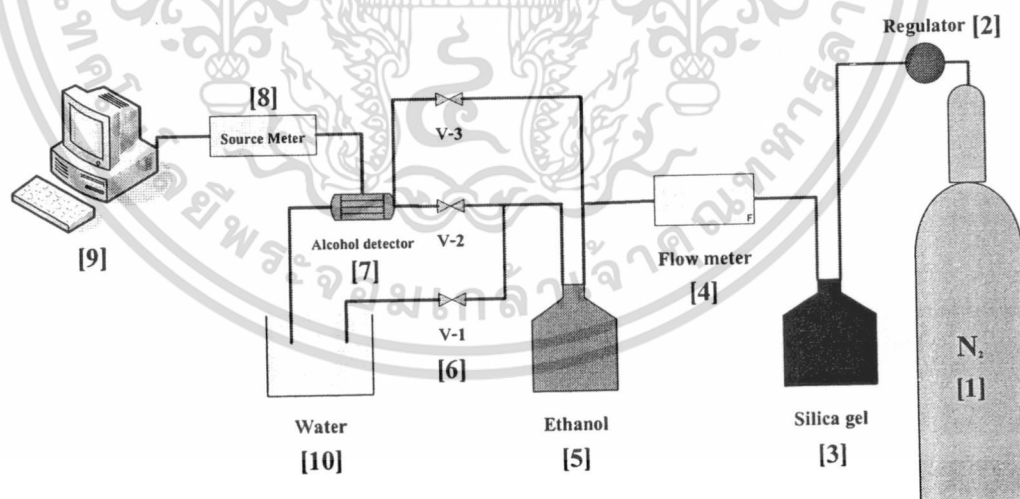
4.2.3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

การศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอแอลกอฮอล์จะใช้ชุดเครื่องมือในการวัด แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์

โดยแยกชุดเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 ชุดเครื่องมือในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ถังก๊าซไนโตรเจน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาไอแอลกอฮอล์ เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์และชั้นพอร์สซิลิคอน
2. รีเกกูเลเตอร์ (regulator) ทำหน้าที่ควบคุมความดันในระบบ
3. ซิลิกาเจล (silica gel) ทำหน้าที่ดูดความชื้นของก๊าซไนโตรเจน
4. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (flow meter) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหล
5. แอลกอฮอล์
6. ระบบวาล์ว โดยวาล์วต่างๆ จะมีหน้าที่ดังนี้

- วาล์ว 1 (V-1) ใช้ในการปล่อยให้ก๊าซไนโตรเจนและไอแอลกอฮอล์ไหลลงสู่อ่างน้ำ ขณะเริ่มต้นระบบ เพื่อปรับความดันและอัตราการไหลในระบบให้คงที่ก่อนเริ่มทำการวัด

- วาล์ว 2 (V-2) ใช้ในการควบคุมก๊าซไนโตรเจนและไอแอลกอฮอล์ให้ไหลเข้าสู่ อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แล้วไหลลงสู่อ่างน้ำ

- วาล์ว 3 (V-3) ใช้ในการควบคุมก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่ อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แล้วไหลลงสู่อ่างน้ำ

7. อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ซึ่งอยู่ในหลอดแก้วทึบแสง
8. เครื่องมือวัดแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ใช้ในการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอแอลกอฮอล์
9. คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ติดต่อกับเครื่องมือวัดแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ด้วยโปรแกรม LabVIEW ในการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

10. อ่างน้ำ ทำหน้าที่รักษาความดันในระบบให้คงที่

โดยชุดเครื่องมือในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์นี้ จะเริ่มต้นด้วยการเปิดถังก๊าซไนโตรเจนและตัวรีเกกูเลเตอร์เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบ ทำการปรับเครื่องมือวัดอัตราการไหลให้ได้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนตามต้องการ เปิดวาล์ว 1 ปิดวาล์ว 2 และ 3 รอจนความดันและอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนในระบบคงที่ เมื่อเริ่มทำการวัดจะเปิดวาล์ว 3 และปิดวาล์ว 1 ให้ก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ก่อน เมื่อต้องการวัดการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ก็จะเปิดวาล์ว 2 พร้อมกับปิดวาล์ว 3 ให้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาไอแอลกอฮอล์เข้าไปในระบบที่มีอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์อยู่ และเมื่อต้องการจะหยุดวัดก็ทำการเปิดวาล์ว 3 พร้อมกับปิดวาล์ว 2 ให้ก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์เพื่อทำการไล่ไอแอลกอฮอล์ที่ยังคงค้างอยู่ออกจากระบบ ซึ่งทุกครั้งที่ทำการวัดควรระวังเรื่องความดันและอัตราการไหลในระบบให้คงที่อยู่เสมอ

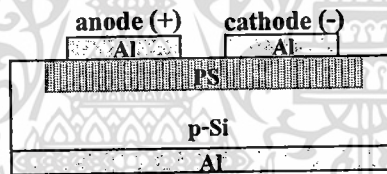
บทที่ 5

การทดลอง และผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน และผลการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

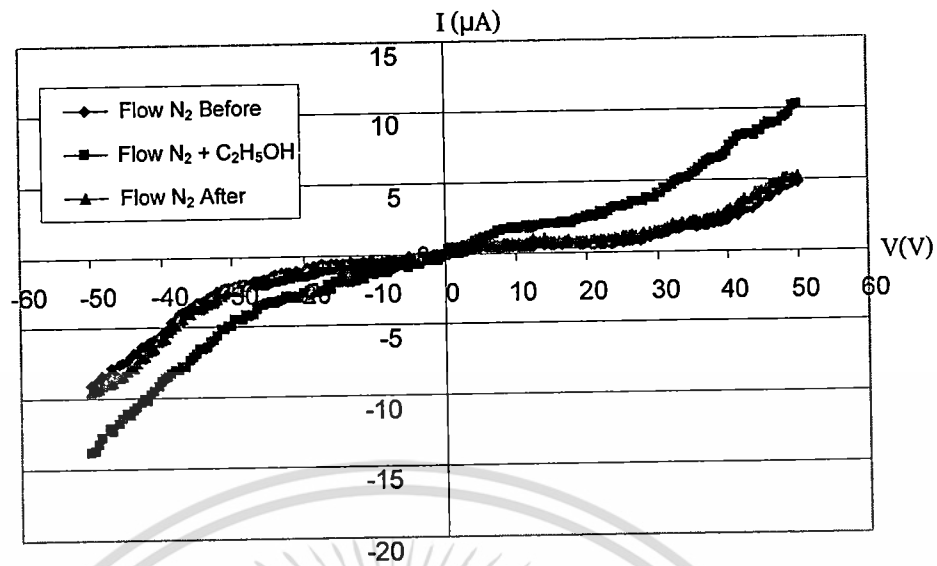
5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์

การทดลองนี้ศึกษาถึง การตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ (ด้วยชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.2.3) ของอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอน โดยสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 แล้วทำการต่อขั้วเพื่อใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 5.1

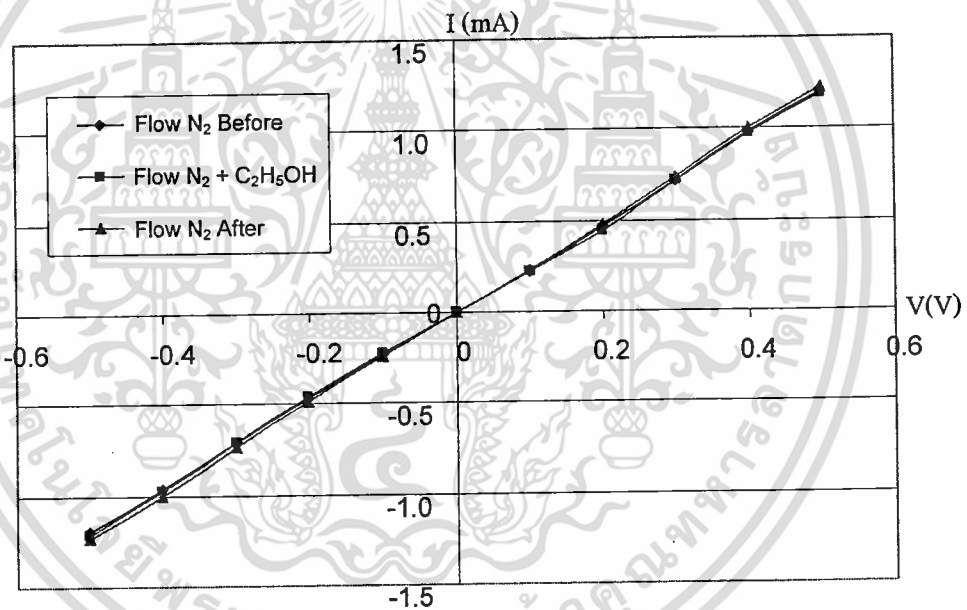


รูปที่ 5.1 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์

ทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในการเปิดก๊าซใน โตรเจนเวลา 30 วินาที แล้วเปิดก๊าซใน โตรเจนผสมกับ ไอเอทานอล 30 วินาที และเปิดก๊าซใน โตรเจน 30 วินาที ของอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แสดงดังรูปที่ 5.2 เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน



รูปที่ 5.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอน

จากรูปที่ 5.2 พบว่าลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปิดให้มีการไหลของไอแอลกอฮอล์ แต่จากรูปที่ 5.3 พบว่าลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเมื่อเปิดให้มีการไหลของไอแอลกอฮอล์ จากผลการทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าของชั้นพอร์ส

ชิลิคอนต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยพิจารณาช่วงในการตรวจจับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งสามารถอธิบายช่วงในการตรวจจับต่างๆ ได้ดังนี้

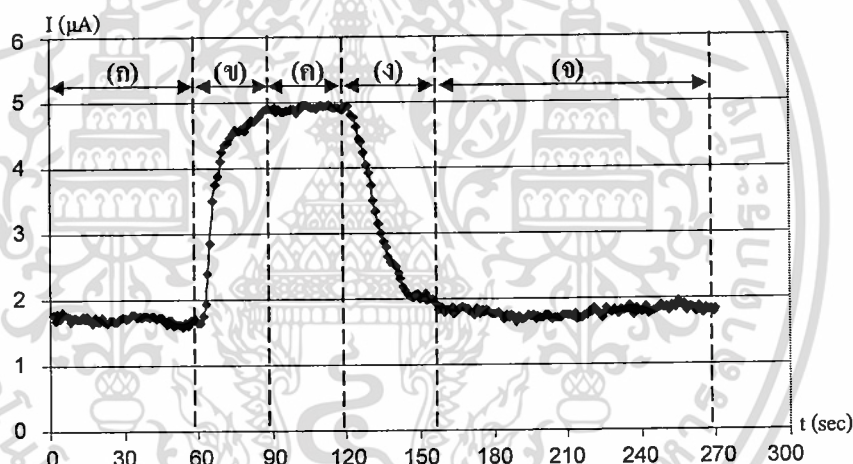
- กระแสไฟฟ้าช่วงก่อนเปิดไอแอลกอฮอล์ เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซในโตรเจนเข้ามาในระบบ

- กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอแอลกอฮอล์ เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซในโตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ แล้วเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

- กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอ้อมตัว เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซในโตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ แล้วเกิดการคงที่ของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

- กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอแอลกอฮอล์ เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่ทำการปิดก๊าซในโตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์พร้อมกับเปิดก๊าซในโตรเจนเพื่อไล่ไอแอลกอฮอล์ออกจากระบบ แล้วเกิดการตกลงของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

- กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซในโตรเจน แล้วเกิดการตกลงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมเหมือนในตอนแรก



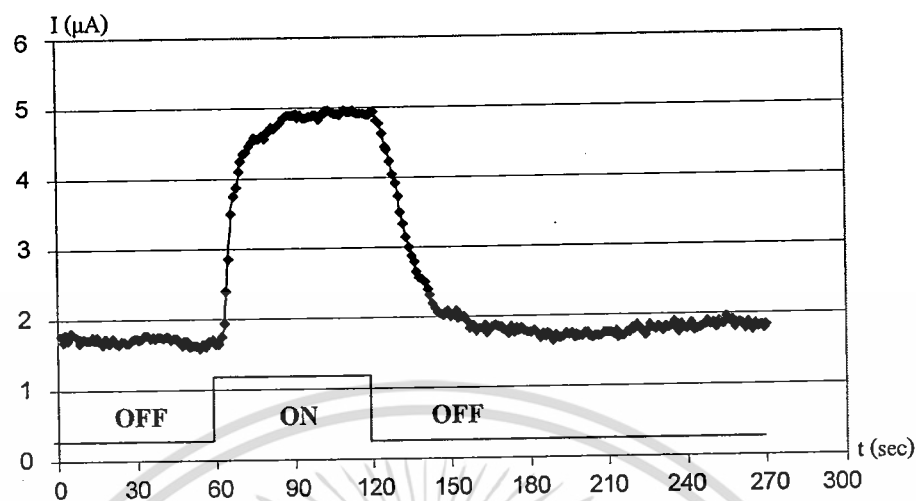
รูปที่ 5.4 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของเซ็นเซอร์ชิลิคอน

(ก) กระแสไฟฟ้าช่วงก่อนเปิดไอแอลกอฮอล์ (ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอแอลกอฮอล์

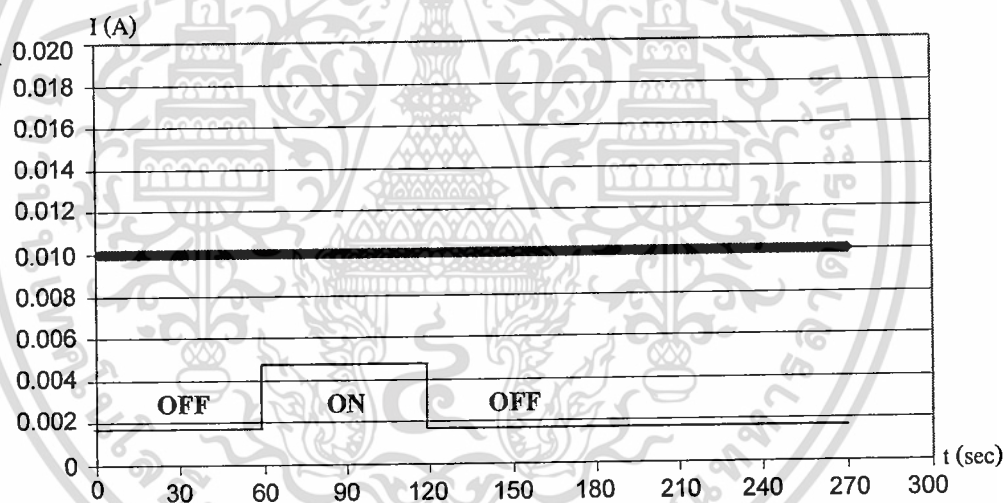
(ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอ้อมตัว (ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอแอลกอฮอล์

(จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม

ทำการทดลองวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดก๊าซในโตรเจน 60 วินาที แล้วเปิดก๊าซในโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 60 วินาที และเปิดก๊าซในโตรเจน 150 วินาที ของอุปกรณ์ที่มีเซ็นเซอร์ชิลิคอน ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีเซ็นเซอร์ชิลิคอน แสดงดังรูปที่ 5.5-5.6



รูปที่ 5.5 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอลล์ของอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน



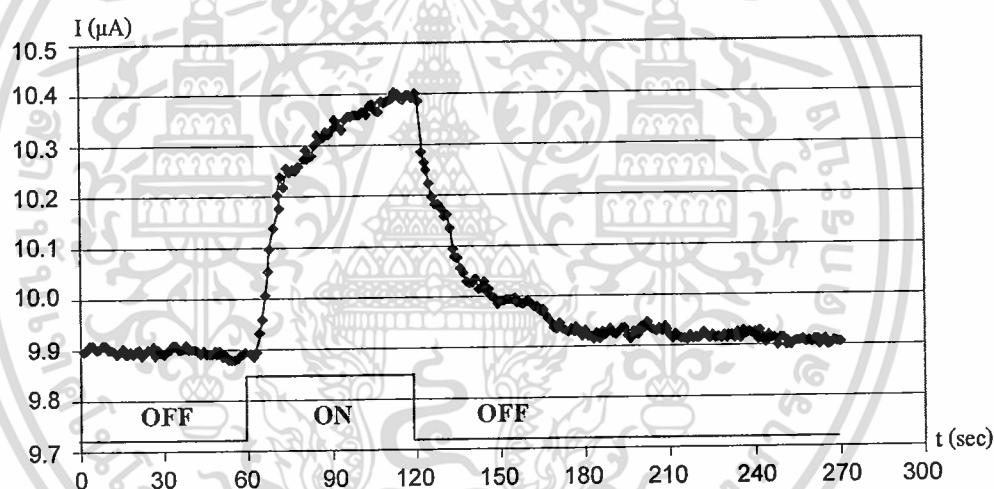
รูปที่ 5.6 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอลล์ของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอน

จากรูปที่ 5.5 พบว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนมีการตอบสนองต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอลล์ แต่จากรูปที่ 5.6 พบว่าอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอนไม่มีการสนองต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอลล์ ซึ่งแสดงว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถนำไปใช้ในการตรวจจับไอแอลกอฮอลล์ได้ จึงได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอลล์ ดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์

การทดลองนี้ศึกษาถึง ผลของเวลาในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 ใช้เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ แล้วทำการต่อขั้วเพื่อทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดก๊าซไนโตรเจน 60 วินาที แล้วเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 60 วินาที และเปิดก๊าซไนโตรเจน 150 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ ดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 เวลา 5 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 53% ความหนาแน่นประมาณ $2.12 \mu\text{m}$) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.7

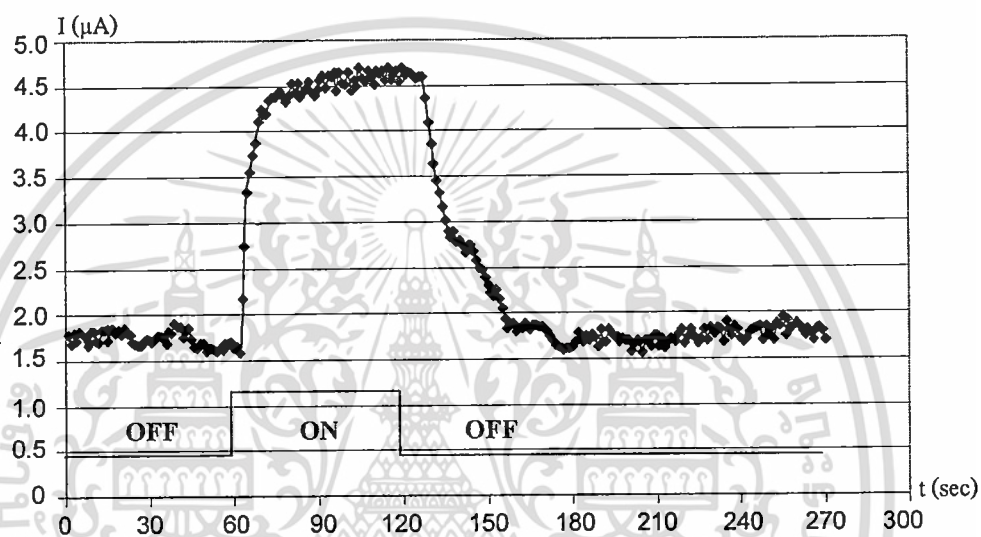


รูปที่ 5.7 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 5 นาที

จากรูปที่ 5.7 พบว่าที่เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 5 นาที กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ $9.9 \mu\text{A}$ เมื่อทำการวัดไอแอลกอฮอล์ขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนขึ้นไปอยู่ที่ประมาณ $10.4 \mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 120 วินาที และทำการปิดไอแอลกอฮอล์พร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ $9.9 \mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 210 วินาที ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ $0.5 \mu\text{A}$ เมื่อมี

การตรวจจับไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมตัวนานกว่า 60 วินาที และเมื่อมีการปิดไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม ประมาณ 90 วินาที

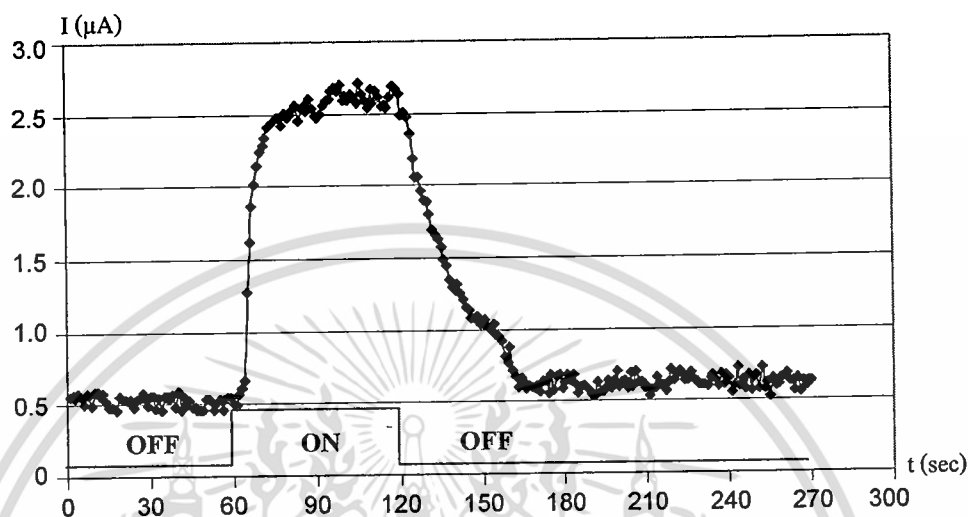
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างขึ้นพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm² เวลา 10 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 69% ความหนาประมาณ 4.19 μm) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการเอโนโดซ์เซชัน 10 นาที

จากรูปที่ 5.8 พบว่าที่เวลาในการเอโนโดซ์เซชัน 10 นาที กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ 1.7 μA เมื่อทำการวัดไอแอลกอฮอล์ขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิมตัวอยู่ที่ประมาณ 4.7 μA ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอแอลกอฮอล์พร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ 1.7 μA ที่เวลาประมาณ 160 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 3 μA เมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

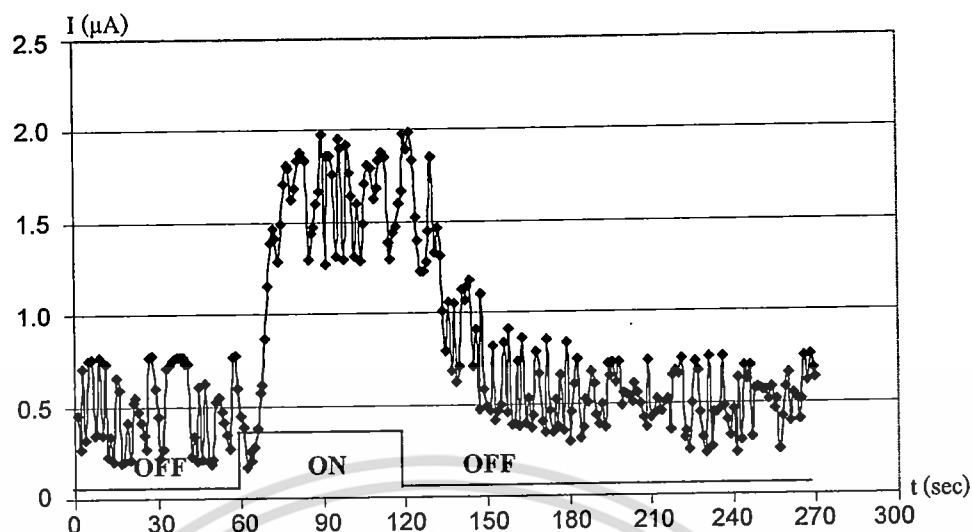
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างขึ้นพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 เวลา 15 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 78% ความหนาประมาณ $5.22 \text{ }\mu\text{m}$) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 15 นาที

จากรูปที่ 5.9 พบว่าที่เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 15 นาที กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซใน โตรเจนอยู่ที่ประมาณ $0.5 \text{ }\mu\text{A}$ เมื่อทำการวัดไอแอลกอฮอล์ขณะเปิดก๊าซใน โตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ $2.6 \text{ }\mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอแอลกอฮอล์พร้อมกับเปิดก๊าซใน โตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ $0.5 \text{ }\mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 160 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ $2.1 \text{ }\mu\text{A}$ เมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

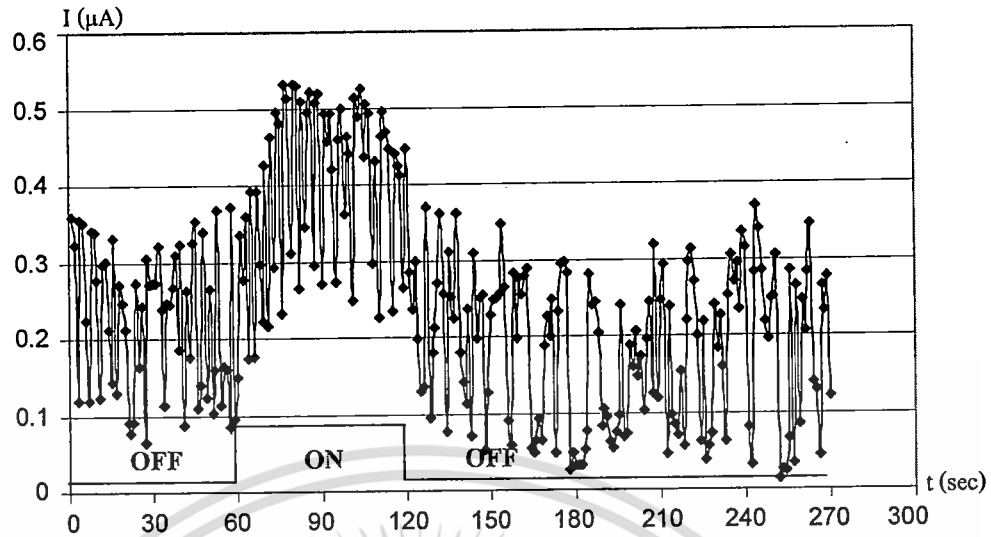
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างขึ้นพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 เวลา 20 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 81% ความหนาประมาณ $6.74 \text{ }\mu\text{m}$) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที

จากรูปที่ 5.10 พบว่าที่เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมากและมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าประมาณ 81 % ความหนาประมาณ $6.74 \mu\text{m}$ ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของชั้นพอร์สซิลิกอนที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที มีค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

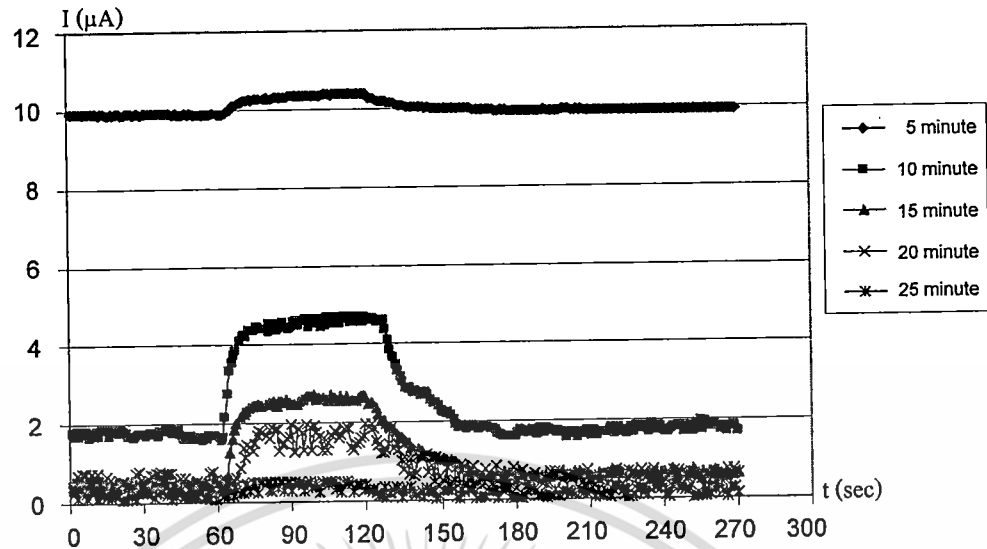
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างขึ้นพอร์สซิลิกอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 เวลา 25 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 84%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด ไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 25 นาที -

จากรูปที่ 5.11 พบว่าที่เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 25 นาที กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมากและมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าประมาณ 84 % ส่งผลทำให้ความต้านทานของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 25 นาที มีค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

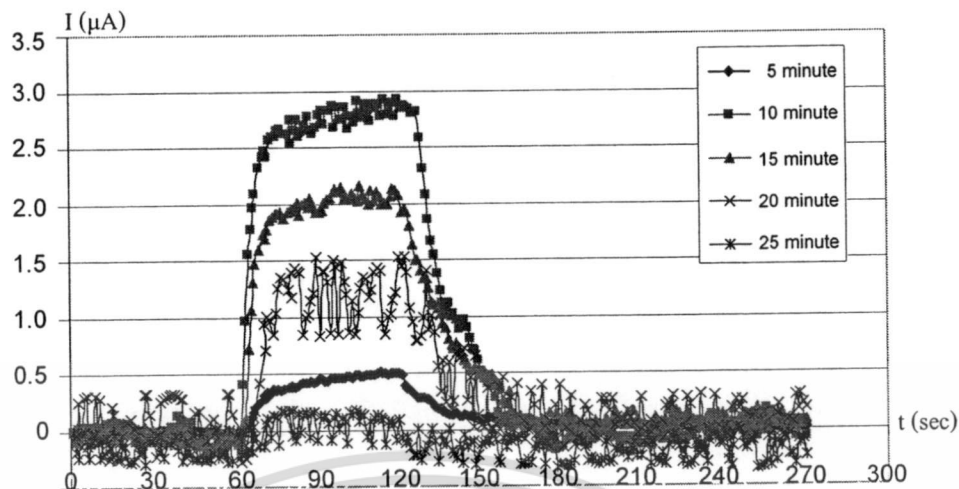
จากรูปที่ 5.7 – 5.11 จึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด ไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้พอร์สซิลิคอนที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ ในกราฟเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.12 พบว่า อุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 5 นาที จะมีกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่าสูงที่สุด ตามด้วยที่เวลา 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันมากขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ค่าความต้านทานของชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าลดลงตามลำดับ

ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้พอร์สซิลิคอนที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ ที่ระดับกระแสไฟฟ้าตอนเริ่มต้นเป็น $0 \mu\text{A}$ เพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน

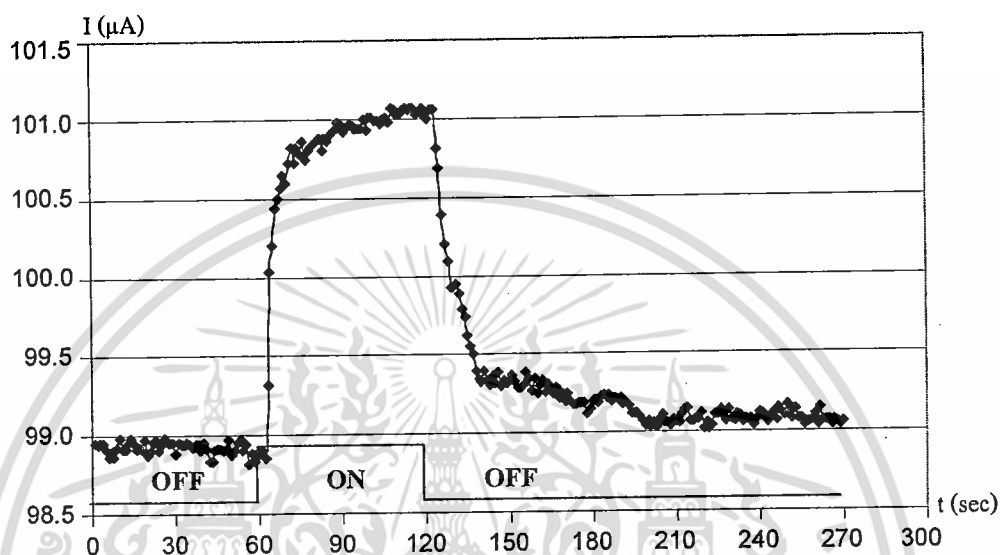
จากรูปที่ 5.13 พบว่า อุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที มีค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ประมาณ 3 μA ซึ่งมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 15 นาที, 20 นาที, 5 นาที และ 25 นาทีตามลำดับ โดยจากข้อมูลข้างต้น อุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที เมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นประมาณ 3 μA ใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งใช้น้อยกว่าอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 69% ความหนาประมาณ 4.19 μm) เป็นเวลาที่เหมาะสมในการแอโนไดซ์เซชัน

5.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิติกอนอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์

การทดลองนี้ศึกษาถึง ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิติกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2 , 10 mA/cm^2 , 15 mA/cm^2 , 20 mA/cm^2 , 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 ตามลำดับ แล้วทำการต่อขั้วเพื่อทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดก๊าซไนโตรเจน 60 วินาที แล้วเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 60 วินาที และเปิดก๊าซไนโตรเจน 150 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

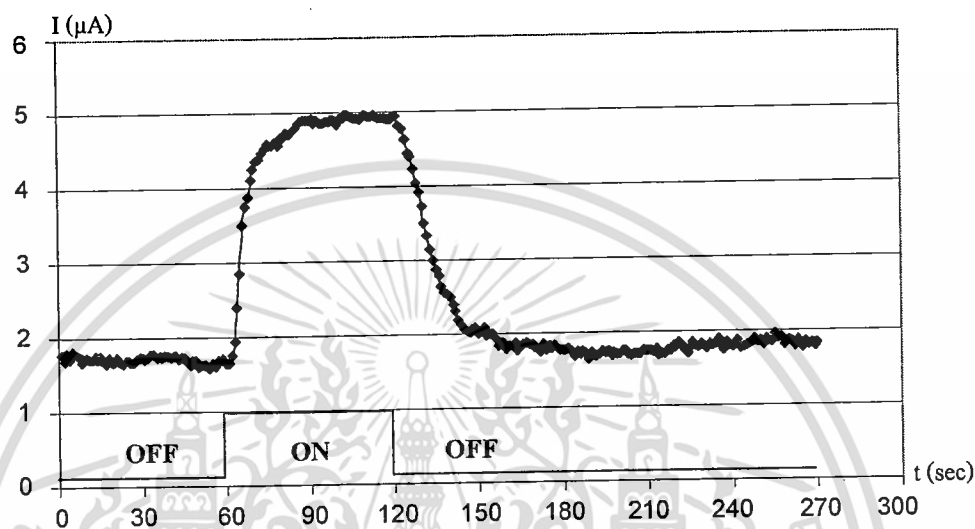
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างขึ้นพอรีซลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2 (ความพรุนประมาณ 58% ความหนาประมาณ $3.59 \text{ }\mu\text{m}$) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm^2

จากรูปที่ 5.14 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm^2 กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซใน โตรเจนอยู่ที่ประมาณ $98.8 \text{ }\mu\text{A}$ เมื่อทำการวัดไอแอลกอฮอล์ขณะเปิดก๊าซใน โตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนขึ้นไปอยู่ที่ประมาณ $101.1 \text{ }\mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 120 วินาที และทำการปิดไอแอลกอฮอล์พร้อมกับเปิดก๊าซใน โตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ $98.8 \text{ }\mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 200 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าค่าประมาณ $2.3 \text{ }\mu\text{A}$ เมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมิตัวนานกว่า 60 วินาที และเมื่อมีการปิดไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 80 วินาที

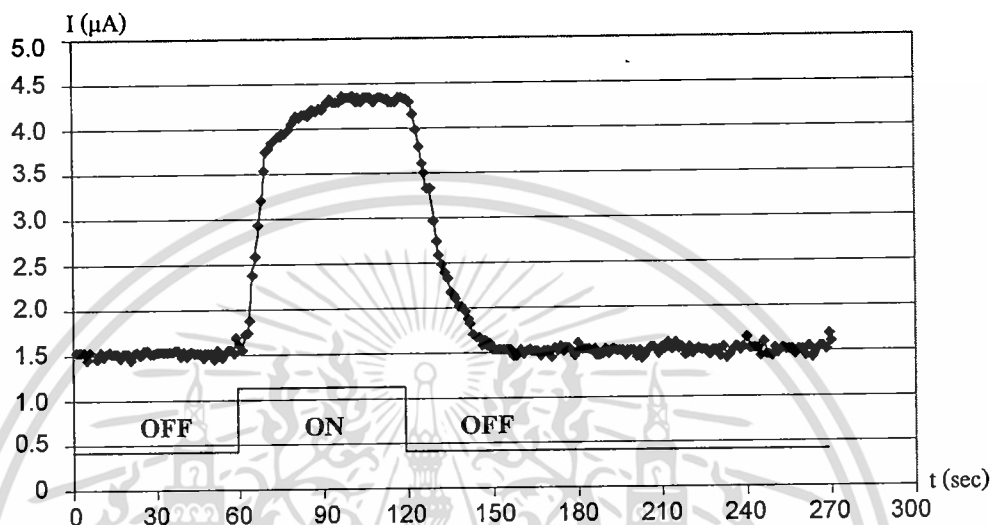
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างชั้นพอร์ซลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 (ความพรุนประมาณ 69% ความหนาประมาณ $4.19 \text{ }\mu\text{m}$) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm^2

จากรูปที่ 5.15 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm^2 กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ $1.8 \text{ }\mu\text{A}$ เมื่อทำการวัดไอแอลกอฮอล์ขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ $4.9 \text{ }\mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอแอลกอฮอล์พร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ $1.8 \text{ }\mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 160 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ $3.1 \text{ }\mu\text{A}$ เมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

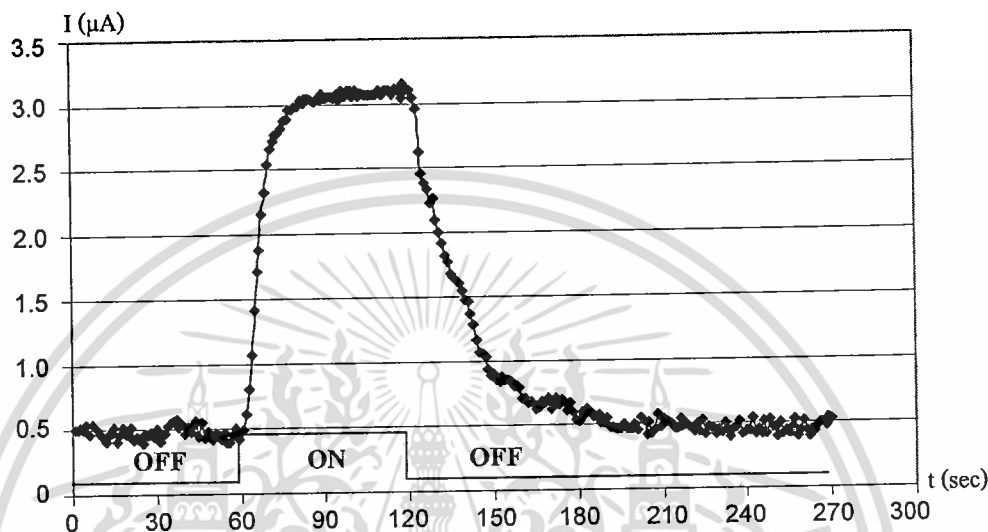
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm^2 (ความพรุนประมาณ 74%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 15 mA/cm^2

จากรูปที่ 5.16 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 15 mA/cm^2 กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ $1.5 \mu\text{A}$ เมื่อทำการวัดไอแอลกอฮอล์ขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ $4.3 \mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอแอลกอฮอล์พร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ $1.5 \mu\text{A}$ ที่เวลาประมาณ 160 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ $2.8 \mu\text{A}$ เมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

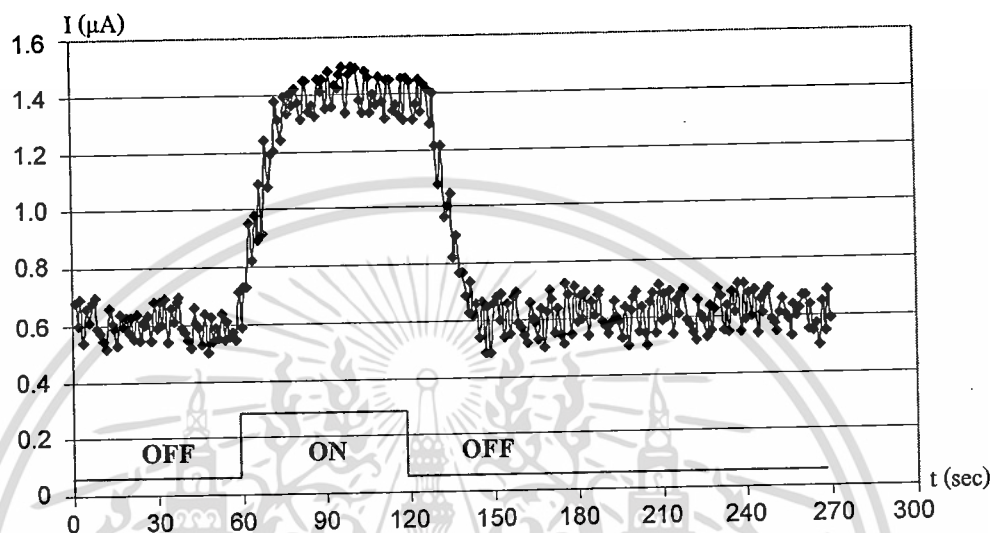
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างขึ้นพอร์สซิลิกอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm² (ความพรุนประมาณ 78% ความหนาประมาณ 4.09 μm) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 20 mA/cm²

จากรูปที่ 5.17 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 20 mA/cm² กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ 0.5 μA เมื่อทำการวัดไอแอลกอฮอล์ขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอแอลกอฮอล์ที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ 3.1 μA ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอแอลกอฮอล์พร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ 0.5 μA ที่เวลาประมาณ 180 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 2.6 μA เมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอแอลกอฮอล์กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 60 วินาที

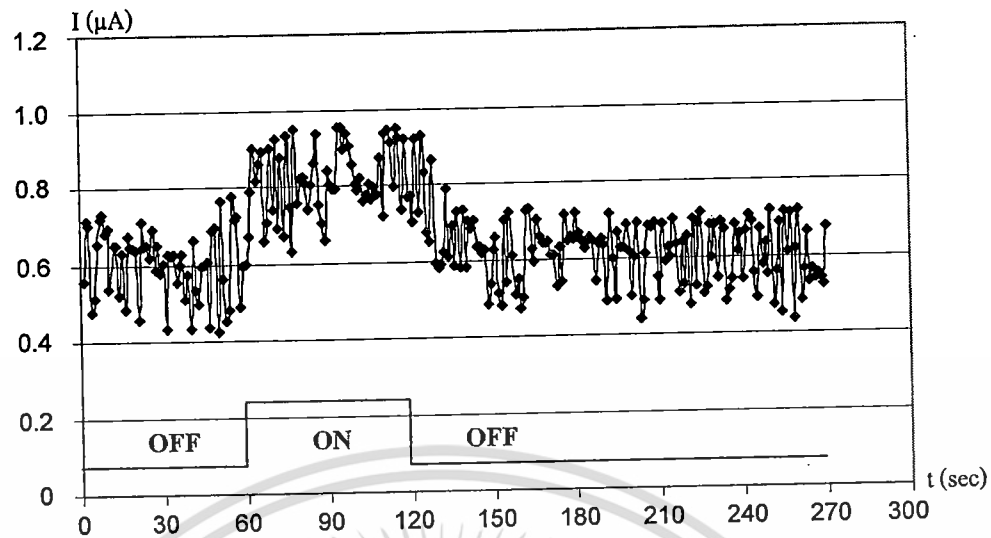
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างขึ้นพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 mA/cm^2 (ความพรุนประมาณ 84%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 25 mA/cm^2

จากรูปที่ 5.18 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 25 mA/cm^2 กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมากและมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าประมาณ 84 % ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 25 mA/cm^2 มีค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

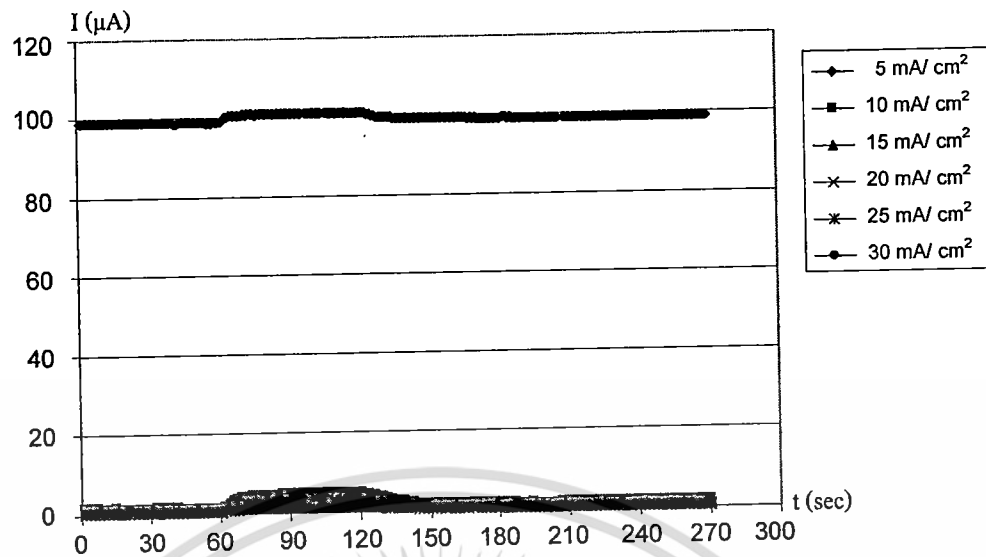
- อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่สร้างขึ้นพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 30 mA/cm^2 (ความพรุนประมาณ 89%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 30 mA/cm^2

จากรูปที่ 5.19 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 30 mA/cm^2 กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมากและมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าประมาณ 89 % ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 25 mA/cm^2 มีค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

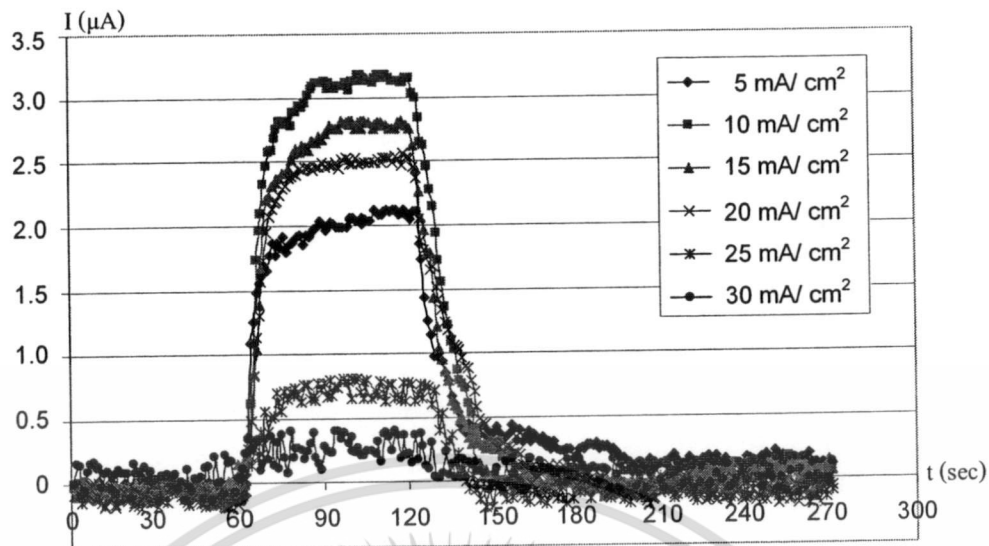
จากรูปที่ 5.14 – 5.19 จึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้พอร์สซิลิคอนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm^2 , 10 mA/cm^2 , 15 mA/cm^2 , 20 mA/cm^2 , 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 ตามลำดับ ในกราฟเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอสอลล์ ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.20 พบว่า อุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm^2 มีกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่าสูงที่สุด ตามด้วยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 , 15 mA/cm^2 , 20 mA/cm^2 , 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อใช้เวลานานในการแอโนไดซ์เซชันเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ให้ค่าความต้านทานของชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าลดลงตามลำดับ

ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอสอลล์โดยใช้พอร์สซิลิคอนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2 , 10 mA/cm^2 , 15 mA/cm^2 , 20 mA/cm^2 , 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 ตามลำดับ ที่ระดับกระแสไฟฟ้าตอนเริ่มต้นเป็น $0 \text{ } \mu\text{A}$ เพื่อทำการเปรียบเทียบดูปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน

จากรูปที่ 5.21 พบว่า อุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm^2 มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ประมาณ $3.1 \mu\text{A}$ ซึ่งมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 15 mA/cm^2 , 20 mA/cm^2 , 5 mA/cm^2 , 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 ตามลำดับ โดยจากข้อมูลข้างต้นอุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm^2 เมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นประมาณ $3.1 \mu\text{A}$ ใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm^2 (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 69% ความหนาแน่นประมาณ $4.19 \mu\text{m}$) เป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการแอโนไดซ์เซชัน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอน การสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันเพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยมีโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์แบบประกอบด้วย ฐานรองซิติคอน ชนิดพีที่สร้างชั้นพอร์สซิติคอนอยู่บนผิวหน้า และมีขั้วโลหะที่เป็นอลูมิเนียมอยู่บนชั้นพอร์สซิติคอน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่าย เหมาะที่จะนำไปใช้สร้างเป็นวงจรรวมต่อไปในอนาคต

ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 3 แบบ โดยส่วนแรก คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ผสมกับน้ำบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับเอทานอลที่อัตราส่วน 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตร ส่วนที่สอง คือ ระยะเวลาในการสร้าง 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ส่วนที่สาม คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm², 10 mA/cm², 15 mA/cm², 20 mA/cm², 25 mA/cm² และ 30 mA/cm² จากนั้นนำชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้มาทดสอบความสม่ำเสมอ หาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน และความลึกของชั้นพอร์สซิติคอน

จากการทดสอบความสม่ำเสมอ พบว่าชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับน้ำบริสุทธิ์มีความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับเอทานอล พบว่าชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากเอทานอลไปช่วยลดแรงดึงผิวของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำให้ลดจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่ บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิติคอนซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถเข้าถึงผิวหน้าของแผ่นซิติคอนได้ดี จึงได้ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีความสม่ำเสมอ โดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลที่เหมาะสมเป็น 4:1 โดยปริมาตร ทำให้ได้ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีความสม่ำเสมอและไม่ประปรายแตกหักง่าย

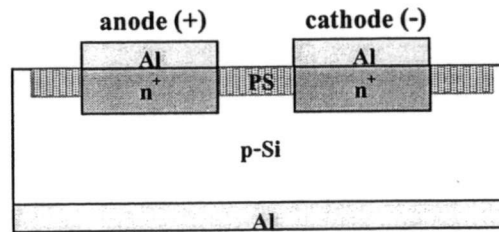
เมื่อทำการทดลองถึงผลของเวลาในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันจะส่งผลทำให้ชั้นพอร์สซิติคอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น และมีความลึกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น และทำการทดลองถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชันจะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่ความลึกของชั้นพอร์สซิติคอนยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชันมากขึ้น ทำให้พหุโพลบริเวณผิว

ชิลิคอนขณะทำการกัดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการแอนโดซ์เซชันนั้นใช้เวลาเท่าเดิม แต่จากการทดลองข้างต้นยังไม่สามารถสรุปได้ว่า เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเท่าใด ถึงจะเหมาะสมที่จะนำมาตรวจจับไอแอลกอฮอล์ จึงได้ทำการทดลองหาว่า เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการแอนโดซ์เซชันในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือ ระยะเวลาในการแอนโดซ์เซชันเป็น 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ส่วนที่สอง คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชันเป็น 5 mA/cm^2 , 10 mA/cm^2 , 15 mA/cm^2 , 20 mA/cm^2 , 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 จากนั้นนำอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์มาทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิลิคอน

จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอน พบว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนมีการตอบสนองต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แต่อุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอนไม่มีการตอบสนองต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แล้วทำการทดลองถึงผลของเวลาในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอนโดซ์เซชันต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 10 นาที มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นประมาณ $3 \mu\text{A}$ ใช้เวลาในการอิมมูตในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการตกกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งเป็นเวลาในการแอนโดซ์เซชันที่เหมาะสมที่สุด และทำการทดลองถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอนโดซ์เซชันต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชัน 10 mA/cm^2 มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นประมาณ $3.1 \mu\text{A}$ ใช้เวลาในการอิมมูตประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชันที่เหมาะสมที่สุด

อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนในงานวิจัยนี้เป็น โครงสร้างแบบง่ายๆ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของชั้นพอร์สซิลิคอนเมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แต่อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนนี้มีข้อเสียอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าอยู่บนชั้นพอร์สซิลิคอนส่งผลทำให้รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าความต้านทานที่สูง ซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นอย่างมาก จึงควรสร้างให้ขั้วไฟฟ้าอยู่บนเนื้อซิลิคอนเพื่อช่วยลดค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสลง โดยใช้โครงสร้างที่มีชั้น n^+ เพิ่มเข้ามาจากโครงสร้างเดิม แสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ปรับปรุงแล้ว

จากรูปที่ 6.1 เป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ทำการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อลดค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสลง โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสระหว่าง n^+ กับชั้นพอร์สซิลิคอน เมื่อชั้นพอร์สซิลิคอนมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจจับไอสารเคมีได้หลายชนิด และนำไปใช้ร่วมกับวงจรรวมต่างๆ ในการตรวจจับความชื้น ได้อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Uhler, "Electrochemical Etching of Silicon in HF Acid," Tech. J., Vol. 35, pp. 333, 1956.
- [2] L. Canham, "A glowing future for silicon," New Scientist, 1995.
- [3] K. Imai, "A new dielectric isolation method using porous silicon," Solid State Electronic, Vol. 24, pp. 155-164, 1980.
- [4] K. Imai and H. Unno, "FIPOS (Full Isolation by Porous silicon Oxidized Silicon) technology and It's application to LSI's," IEEE Transaction on electron devices, Vol. ED-31, No. 3, 1984.
- [5] สมเกียรติ สุขเดช, สรวีส มุ่งการนา, มนัสชัย ไชยนอก, มโน มีร์กษ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการกัดข้อมสี่เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, เล่ม 2, หน้า 237-240, 2547.
- [6] I. Schechter, M. Ben-Chorin and Kux, "Gas sensing properties of porous silicon," Anal. Chem. 67, pp. 3727-3732, 1995.
- [7] M. Gratzel, "TiO₂ Photocatalytic purification and treatment of water and air," Proc. First Intern. Conf., pp. 23, 1992.
- [8] Z.M. Rittersma, "Recent achievement in miniaturized humidity sensor," Sensors and Actuators , Vol. 96, pp. 196-210, 2002.
- [9] E. Comini, G. Fraglia, G. Sberveglieri, M.Z. Atashbar, W. Wlodarski., "Alcohol and Organic Vapours Sensor Based on Nano-sized TiO₂ Thin Film," IEEE, pp. 302-304, 1999.
- [10] A. Foucaran, F. Pascal-Delannoy, A . Sackda, P. Combette, A. Boyer, "Porous silicon layers used for gas sensor applications," Thin Solid Films Vol. 297, pp. 317-320, 1997.
- [11] K. Watanabe, T. Okada, I. Choe, Y. Sato, "Organic vapor sensitivity in a porous silicon device," Sensor and Actuators B 33, pp. 194-197, 1996.
- [12] W.M. Kwok, Y.C. Bow, W.Y. Chan, M.C. Poon, P.G. Han, H. Wong, "Study of porous silicon gas sensor," IEEE, pp. 80-83, 1999.
- [13] Seong-Jeen Kin, Sang-Hoon Lee, "Organic vapor sensing by current response of porous silicon layer," IOP Publishing Ltd., pp. 3505-3509, 2001.

- [14] M.B. Chohrin and A. Kurex, "Adsorbance effects on photoluminescence and electrical conductivity of porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, v-64, pp. 481-483, 1994.
- [15] A. Richter, "Design consideration and performance of adsorptive humidity sensor with capacitive readout," *The 7th Int. Conf. Solid-State Sensor and Actuators. Transducers'93*, Yokohama Japan, 1993.
- [16] Canham L. T., "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 57, 1046-8, 1990.
- [17] W. Lang, P. Steiner and H. Sandmaier, "Porous silicon : a novel material for microsystem," *Sensor and actuators, A 21-23*, 835-9, 1995.
- [18] Leigh canham, "Properties of porous silicon," *IEE Inspec*, pp.1-43, 1997.
- [19] C. Tsai, K.H. Li, J. Sarathy, J.C. Campbell, B.K. Hance and J.M. White, "Thermal treatment studies of the photoluminescence intensity of porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 59, pp. 2814-2816, 1992.
- [20] C. Tsai, K.H. Li, D.S. Kinosky, R.Z. Qian, T.C. Hus, J.T. Irby, S.K. Banerjee, A.F. Tasch and J.C. Campbell, "Correlation between silicon hydride specie and the photoluminescence intensity of porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60, pp. 1700 - 1702, 1992.
- [21] Y. Kanemitsu, T. Matsumoto, T. Futagi and H. Mimura, "Hydrogen termination and optical properties of porous silicon : photochemical etching effect," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 32, Part 1, No. 1B, pp. 411-414, 1993.
- [22] H.F. Wolf, "Semiconductors willey-interscience a division of Jonhn & Sons," pp. 50, 1971.
- [23] H. Takagi, M. Mitome, R. Yano and T. Nakagiri, "Microwave plasma depositon," *Solid State Phys*, Vol. 27, pp. 875, 1992.
- [24] Y. Kanemitsu, T. Ogawa, K. Shiraishi and K. Takeda, "Nanocrystalline: Laser breakdown," *Phy. Rev.*, B48 , pp. 4883, 1993.
- [25] T. Kawaguchi and S. Miyazima, *Japan J.*, "Laser breakdown in pure SiH₄," *Appl. Phys. Vol. 32*, pp. L215, 1993.
- [26] R.E. Hummel, A. Morrone, M. Ludwing and S.S. Chang, "High-frequency spark discharge" *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 63, pp. 2771, 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] H.M. Ludwig, E. E. Hummel and M. Stora, "Thin Solid Films," Vol. 255, pp. 103, 1995.
- [28] สรวิศ มุ่งการนา, สมเกียรติ สุขเดช และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดอ้อมลิ," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, เล่ม 2, หน้า 1109-1112, 2548.
- [29] Z. Gaburro, N. Dalosso and L. Pavesi, "Porous silicon," Dipartimento di Fisica, Università di Trento, Via Sommarive 14, I-38050.
- [30] วรวิทย์ พัฒนอาจกุล, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, "ผลกระทบของการผสมเอทานอลในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีแอโนไดเซชัน," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, เล่ม 2, หน้า 1101-1104, 2548.
- [31] Y. Kanemitsu, "Light emission from porous silicon and related materials," Physics reports, Vol. 263, No. 1, pp.8, 1995.
- [32] T.E. Jenkin, "Semiconductor science growth and characterization techniques," pp. 177.
- [33] Y. Kang and J. Jorne, "Porous silicon formation : Morphological Stability Analysis," Appl. Phys. Lett., Vol. 62, No. 8, pp. 2224 – 2226, 1993.
- [34] W. Lang, P. Steiner, H. Sandmaier, "Porous silicon:anovel for Microsystems," Sensor and Acturators A51, pp. 31-36, 1995.
- [35] V. Lehmann and U. Gosele, "Porous silicon formation : A Quantum wire effect," Appl. Phys. Lett., Vol. 58, No. 8, pp. 856 – 858, 1991.
- [36] J. Singh, "Semiconductor optoelectronics physic and technology", Mcgraw-hill international edition, pp. 339, 1992.
- [37] สมพงษ์ เจริญกิจ; "การพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์, " วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [38] สุรศักดิ์ ไททวยวงศ์สกุล, "โครงการรณรงค์เมาไม่ขับ," มุลนิธิเมาไม่ขับ, <http://www.ddd.or.th>, <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/september/radio9-1.html>.
- [39] S. Lowell and Joan E. Shields, "Powder surface area and porosity," Third edition, pp. 1-9, 1991.

- [40] Roland N. Horne, Henry J. Ramey, Jr., Shubo Shang, Antonio Correa, John Horn brook, "Improving models of vapor-dominated geothermal fields:The effects of adsorption," New Zeland Geothermal Workshop, pp. 1-6, 1994.
- [41] Greg Thiele, "Characterrization of ceramic materials : Por-size distribution," American Ceramic Society Bulletin, Vol. 84, No.8, 2005
- [42] Erica J. Wanless and Hugo K. Christenson, "Interaction between surfaces in ethanol : Adsorption, capillary condensation, and solvation forces," Chem. Phys. pp. 2460-4267,1994.
- [43] Markus Tuller, Dani Or, and Lynn M. Dudley, "Adsorption and capillary condensation in porous media : Liquid retention and interfacial configurations in angular pores," Water Resorrces Research, Vol. 35, No. 7, pp.1949-1964, 1999.
- [44] S.Z. Qiao, S.K. Bhatia, X.S. Zhao "Prediction of multilayer adsorption and capillary condensation phenomena in cylindrical mesopores," Elsevier Inc., pp. 287-298, 2003.
- [45] D. Stievenard and D. Deresm, "Electrical properties of an aluminum-porous silicon junction governed by dangling bonds," IEMN, UMR 9929, 1570-1572, 1995.
- [46] C. J. Oton, L. Pancheri, Z. Gaburro¹, L. Pavesi¹, C. Baratto, G. Fagliaand, G. Sberveglieri, "Multiparametric porous silicon gas sensors with improved quality and sensitivity"
- [47] Zeno Gaburro, Claudio J. Oton, and Lorenzo Pavesi, "Opposite effects of NO₂ on electrical injection in porous silicon gas sensors," Appl. Phys. Lett., Vol. 84, No. 22, 2004.
- [48] Yu. A. Vashpanov, "Adsorption sensiyivity of microporous silicon to organic and biomelecules with high dipole moment," Plenary reports, vol. 1, p. 40-41, 2002.
- [49] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, "การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิคอน, " วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.