

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่ใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจากการกัดทาง

ไฟฟ้าเคมีเป็นวัสดุรับแสงและชั้นลดการสะท้อนของแสง

The New Solar Cells with Nanoporous Silicon Layer from
Electrochemical Etching as Material and Antireflection Layer

จัดทำโดย

นายนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

RCH

TK

2960

พ 253 ๗

เลขหมู่.....

114473

เลขทะเบียน.....

20 ส.ค. 2554

วัน,เดือน,ปี.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก

เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

b. 12291930
.....
.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการทำ
วิจัย จากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2553

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความ
ร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

15 กรกฎาคม 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน เป็นเนื้อซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก สามารถสร้างขึ้นบริเวณผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนทั่วไปได้โดยง่าย และประหยัดที่สุดด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมี ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนนี้มีคุณสมบัติพิเศษ สามารถดูดกลืนแสงและลดการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนโดยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมีบนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ด้วยวิธีการเลือกสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนเฉพาะที่ ซึ่งจะไม่ทำความเสียหายให้แก่รอยต่อของเซลล์ที่อยู่ด้านล่างแต่อย่างใด และได้ศึกษาผลของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีต่อพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนอยู่ที่ผิวด้านบนของเซลล์จะมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงต่ำประมาณ 20% มีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงกว่าเซลล์แบบธรรมดาทั่วไปซึ่งมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงประมาณ 24% จากผลดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์เพิ่มขึ้น 22% และมีค่ากำลังสูงสุด (P_m) เพิ่มขึ้นถึง 22% ด้วย จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้สูงในการนำชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจากการกัดทางไฟฟ้าเคมีไปใช้แทนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ และลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน

Abstract

Nanoporous Silicon or bulk silicon contains many small pores can be formed on any silicon surface using a very simple and inexpensive electrochemical etching technique in the solution of hydrofluoric acid. Because of the excellent light trapping and anti-reflection properties of nanoporous silicon layer, it is widely used as an anti-reflection layer of solar cell. In our study, we have focused on the selective formation of nanoporous silicon layer by electrochemical etching on the surface of silicon solar cell without disturbing the underlying junction characteristics. In this experiment the effects of nanoporous silicon layer on the important parameters of silicon solar cell are also studied. It shows that the short circuits current (I_{sc}) of cell with nanoporous silicon layer (20% reflectance) is higher than the cell with SiO_2 layer about 24%, then it increases 22% of cell efficiency and 22% of maximum power (P_m). In conclusion, it has high potential and possibility for replacing of SiO_2 layer by electrochemical etching nanoporous silicon layers to increase solar cell efficiency and reduce the cost of cell fabrication.

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 การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมลึ.....	12
2.1.2 การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	13
2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	15
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	16
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิติคอนกับ	
สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	21
2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	23
2.4.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน.....	23
2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิคอน	25
2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน.....	29
2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน.....	32
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด	
3.1 กระบวนการสร้าง.....	46
4.1.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	46
4.1.2 การสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน.....	47
3.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	50
3.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	50
3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	51
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยSEM.....	
4.2 การทดลองเพื่อศึกษาค่าความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เงื่อนไข anodization ต่างๆ.....	
4.2.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพด้านทานของผลึกซิลิคอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	
4.2.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	
4.2.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	
4.2.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	
4.3 การทดลองเพื่อศึกษาขนาดโครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน ที่เงื่อนไข anodization ต่างๆ.....	
4.4.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพด้านทานของผลึกซิลิกอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์ส ซิลิกอน.....	
4.4.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อ คุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน.....	
4.4.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์ แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน.....	
4.4.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติ โฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน.....	
4.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีต่อคุณสมบัติ โฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน.....	
4.6 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์ แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน.....	
4.7 การทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน	
4.7.1 การศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน ภายใต้แสงอุลตราไวโอเลต.....	
4.7.2 การศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอนที่อยู่ ในสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆ.....	
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์กับใช้เซ็นเซอร์สปีดคอน.....	2
2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไปอัสเซสไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	แสดงขั้นตอนในกระบวนการสร้าง SOI โดยใช้เทคนิคพอร์สซิลิกอน โดย (ก) เป็นรอยต่อพี-เอ็น ในแผ่นผลึกซิลิกอน (ข) ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนปกคลุมผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (ค) ทำการออกซิเดชันชั้นพอร์สซิลิกอนเพื่อทำให้เป็นชั้นฉนวน.....	4
รูปที่ 1.2	แสดงภาพตัดขวาง โครงสร้างของ SOI ที่ใช้เทคนิคพอร์สซิลิกอน.....	4
รูปที่ 2.1	แสดงแบบจำลองง่ายๆของอะตอมซิลิกอน.....	6
รูปที่ 2.2	แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิกอน.....	7
รูปที่ 2.3	แสดงโครงสร้างผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชร.....	7
รูปที่ 2.4	แสดงโครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure ที่อยู่ภายใน Unit Lattice ของ โครงสร้างเพชร.....	8
รูปที่ 2.5	แสดงส่วนต่างๆของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร โดย (ก) แสดง ส่วนครึ่งล่างของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร (ข) แสดงส่วน ครึ่งบนของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร.....	8
รูปที่ 2.6	แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีที่มี 7 อะตอมถูกนำเข้ามา ใกล้ชิดกัน.....	10
รูปที่ 2.7	แสดงการแตกแยกของระดับพลังงาน 3s และ 3p ของผลึกซิลิกอน ที่ ตำแหน่งระยะห่างระหว่างอะตอมต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.8	แสดงแผนภูมิแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนในมิติของ k-space.....	12
รูปที่ 2.9	แสดงลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์.....	13
รูปที่ 2.10	แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานของ ซิลิกอนบริสุทธิ์.....	13
รูปที่ 2.11	แสดง (ก) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (ข) โครงสร้างแถบพลังงาน ของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น.....	16
รูปที่ 2.12	แสดง (ก) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดพี (ข) โครงสร้างแถบพลังงาน ของผลึกซิลิกอนชนิดพี.....	16
รูปที่ 2.13	แสดงภาพจำลอง โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	17
รูปที่ 2.14	แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	18

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน.....	19
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน.	20
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ.....	22
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก	23
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ anodic bias.....	25
รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	27
รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่ d เป็นความหนาของผลึกซิลิกอน , W เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ส่วน d_1 เป็นความกว้างของบริเวณ diffusion layer ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก..	28
รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน.....	30
รูปที่ 2.23 แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนทั้งสองลักษณะ โดยที่ (ก) ลักษณะการกัดแบบ electropolishing (ข) ลักษณะการกัดแบบ porous etching.....	33
รูปที่ 2.24 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุม เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า.....	34
รูปที่ 2.25 แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูหรือหลุมที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอน.....	35
รูปที่ 2.26 แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพอร์น.....	36
รูปที่ 2.27 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพอร์น.....	36
รูปที่ 2.28 แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพอร์น.....	37
รูปที่ 2.29 แสดงกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนชนิดพี โดยที่ (ก) แสดงโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล	

	(ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะ โสไลจากผลึก ซิลิกอนผ่านเข้าไปใน โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน	
	(ค) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะ โสไลจากผลึก ซิลิกอนผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่กั้นหลุม ของรูพรุน.....	38
รูปที่ 2.30	แสดงแผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่สร้างจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น โดยที่ (ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดมากกว่า 2W (ข) โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W.....	40
รูปที่ 2.31	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน (q) กับ ขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน.....	41
รูปที่ 2.32	แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ ความพรุนต่างๆ.....	42
รูปที่ 3.1	แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงาน (ก) localized state และ (ข) surface state ภายในช่องว่างพลังงาน.....	43
รูปที่ 3.2	แสดงกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำ (ก) Band-to-Level emission (ข) Donor-Acceptor emission (ค) Band-to-Band emission.....	46
รูปที่ 3.3	แสดงแผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่างๆ.....	48
รูปที่ 3.4	แสดงแผนภาพ โครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gab.....	49
รูปที่ 3.5	แสดงแผนภาพ โครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gab.....	50
รูปที่ 3.6	แสดงแบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้งสามระดับภายในพอร์ส ซิลิกอน.....	52
รูปที่ 4.1	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่น ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	72
รูปที่ 4.2	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่น ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	73
รูปที่ 4.3	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่น ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	73
รูปที่ 4.4	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	74
รูปที่ 4.5	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	74
รูปที่ 4.6	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	75
รูปที่ 4.7	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพีที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	76
รูปที่ 4.8	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพีที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	76
รูปที่ 4.9	แสดงภาพตัดขวางจำลองของแผ่นผลึกซิติคอนลักษณะต่างๆที่ถูกทำการวัดน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน โดยที่ (ก) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนเริ่มต้น (m_1) (ข) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิติคอน (m_2) (ค) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนหลังจากทำการลอกชั้นพอร์สซิติคอนทิ้งแล้ว (m_3).....	77
รูปที่ 4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี.....	79
รูปที่ 4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็น.....	79
รูปที่ 4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization.....	81
รูปที่ 4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ใช้ในการ anodization.....	82
รูปที่ 4.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization.....	83
รูปที่ 4.15	แสดงสเปกตรัมรามานของผลึกซิติคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรต่างๆ.....	84
รูปที่ 4.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูง และค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน กับขนาดของผลึกซิติคอนในระดับนาโนเมตร.....	85
รูปที่ 4.17	แสดงสเปกตรัมรามานของพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ	87
รูปที่ 4.18	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนชนิดพีที่มีค่า	

เอาไว้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	สภาพด้านทานค่าต่างๆ.....	89
รูปที่ 4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับค่าสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี.....	89
รูปที่ 4.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับค่าสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น.....	90
รูปที่ 4.21	แสดงสเปกตรัมของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ความหนาแน่นกระแสค่าต่างๆ.....	91
รูปที่ 4.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization.....	92
รูปที่ 4.23	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกค่าต่างๆ.....	93
รูปที่ 4.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก.....	94
รูปที่ 4.25	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยใช้เวลาในการ anodization ค่าต่างๆ.....	95
รูปที่ 4.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการ anodization.....	96
รูปที่ 4.27	แสดงสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ.....	97
รูปที่ 4.28	แสดงสีของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ซึ่งได้จากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน.....	98
รูปที่ 4.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนกับความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์.....	99
รูปที่ 4.30	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนกับความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์.....	100
รูปที่ 4.31	แสดงภาพถ่ายของ Free standing porous silicon ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยที่ (ก) ก่อนทำการฉายแสงด้วยแสงอุลตราไวโอเลต (ข) ขณะทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต.....	101
รูปที่ 4.32	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่อุณหภูมิต่างๆ..	102
รูปที่ 4.33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิ..	102
รูปที่ 4.34	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตต่างๆ.....	103

รูปที่ 4.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโตนิกในสเซนเซอร์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต.....	104
รูปที่ 4.36	แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์ซเซลิคอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ.....	105
รูปที่ 4.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโตนิกในสเซนเซอร์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตให้แก่พอร์ซเซลิคอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ.....	107
รูปที่ 4.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโตนิกในสเซนเซอร์กับเวลาในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ.....	108



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 ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อศึกษาพอร์สซิลิคอนและนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆ มากมาย ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ไอโซเลชัน (electronic isolation) [3,4] โดยมีการนำเอาชั้นพอร์สซิลิคอนมาใช้งานสร้างเป็นฉนวนในงานวิจัยทางด้านซิลิคอนบนฉนวน (Silicon-On-Insulator : SOI) นอกจากนี้ยังใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน [5] และยังสามารถใช้เป็นตัวตรวจจับไอสารอินทรีย์ [6] ได้อีกด้วย

ในปัจจุบันประเทศไทยได้พลังงานไฟฟ้าจากการผลิตจากกระบวนการต่างๆ อันได้แก่ ไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน (จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง) 80%, ไฟฟ้าจากพลังน้ำ 10%, ส่วนจากพลังงานสำรองอื่นๆ ในประเทศ คือ ก๊าซธรรมชาติที่เราจะมีต่อไปอีกเพียง 20 ปี และถ่านหินอีก 60 ปี เท่านั้น จะเห็นได้ว่าเราต้องอาศัยการผลิตไฟฟ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นหลัก ซึ่งต้องอาศัยน้ำมันดิบจากต่างประเทศประมาณ 95% ของปริมาณการใช้ทั้งหมด และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในระยะกลางและระยะยาว แนวทางแก้ปัญหา คือ การพยายามหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน การพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศ เช่น ความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสร้างไฟฟ้ารวมทั้งความร้อน ในกลุ่มพลังงานเหล่านี้ พลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างมีจุดเด่นมากกว่าชนิดอื่น เพราะมีอยู่ทั่วไป มีไม่จำกัด สะอาด ติดต่อดึงดูดดี ดังนั้น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่หลายประเทศกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จทั้งในด้านเทคโนโลยี และเศรษฐกิจ เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษอีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ หรือ โซลาร์เซลล์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ และคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคตอันใกล้นี้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการคือ

1. พลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีอยู่ทุกที่ทั่วไป มีไม่จำกัด เป็นพลังงานที่สะอาด และติดตั้งสะดวก นอกจากจะช่วยแก้ไขปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษอีกด้วย อีกทั้งประเทศไทยยังเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง
2. เซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันทีหรือจะมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อกักเก็บหรือแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับก็ได้
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาแล้วและใช้งานในปัจจุบันนั้น มากกว่า 95% ทำจากซิลิคอนซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลกรองจากออกซิเจน นั่นคือมันเป็นวัตถุดิบที่มีมากมายเหลือใช้
4. ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบที่ใช้มากใช้อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ ทำให้ในแง่ของเทคโนโลยีและกระบวนการสร้างมีภาคอุตสาหกรรมรองรับ
5. มีกระบวนการสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

จากความสำคัญดังกล่าว ทำให้งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากวัสดุที่เป็นซิลิคอนส่วนมาก เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลง โดยมุ่งที่จะศึกษาวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นส่วนลดการสะท้อนแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการลดขนาดของ โครงสร้างผลึกซิลิคอนที่ใช้เป็นวัสดุในส่วนผิวหน้าของพื้นที่รับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ลงให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติทางแสง อาทิเช่น การดูดกลืนและการสะท้อนแสงที่จะเปลี่ยนแปลงไปจากผลึกซิลิคอนเดิม เรียกว่าวัสดุซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกซิลิคอนเดิมแต่มีขนาดของโครงสร้างที่เล็กลงอยู่ในระดับนาโนเมตรนี้ว่า **นาโนพอร์ซิลิคอน** โดยมันจะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กมากๆ มีประวัติเริ่มต้นมาจากการค้นพบวัสดุนี้โดยบังเอิญครั้งแรกในปี ค.ศ. 1956 ในระหว่างกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีของผลึกซิลิคอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดย Uhlir ซึ่งในขณะนั้นได้ทำงานอยู่ที่ Bell Laboratories ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้พยายามที่จะทำการพัฒนาเทคนิคในการกัดผิวหน้าวัสดุสารกึ่งตัวนำสองชนิด ได้แก่ เยอรมันเนียมและซิลิคอน ซึ่งในขณะนั้นมีความพยายามที่จะนำวัสดุสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่

เอกสาร จะต้องทำการพัฒนาเทคนิคในการกัดผิวหน้าของวัสดุทั้งสองให้เรียบ ซึ่งเทคนิคและวิธีการกัดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวหนังวัสดุด้วยไฟฟ้าของ Uhlir นี้ ผลที่ได้ส่วนมากจะออกมาเป็นที่น่าพอใจ แต่ในบางครั้ง หลังจากการขัดผิวหนังด้วยไฟฟ้าแล้ว พบว่าบนผิวหนังของวัสดุเหล่านี้จะปรากฏฟิล์มที่มีลักษณะสีดำ แดงหรือน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งฟิล์มเหล่านี้เป็นสิ่งที่พวกเขาไม่ต้องการให้เกิดขึ้นบนผิวหนังของวัสดุ ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยมีการปรับเงื่อนไขในการทดลอง โดยไม่ทราบว่าเป็นฟิล์มที่พวกเขาไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในขณะนั้น ในอนาคตอีก 50 ปีข้างหน้าจะกลายมาเป็นวัสดุที่มีบทบาทและมีความสำคัญต่องานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ โดยในระยะแรกๆได้มีการนำเอาพอร์สซิลิคอนไปประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีทางด้าน electronic isolation และงานทางด้าน micromachining เป็นต้น จนมาถึงในปี 1990 ได้มีการรายงานการค้นพบคุณสมบัติเปล่งแสง ณ.ที่อุณหภูมิห้องของพอร์สซิลิคอนเป็นครั้งแรกโดย Canham การค้นพบคุณสมบัติเปล่งแสงของพอร์สซิลิคอนในครั้งนี้เองได้ทำให้เกิดแนวทางและความเป็นไปได้ที่สามารถจะนำเอาวัสดุสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม 4 ที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ Indirect-band gap โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลึกซิลิคอน มีขนาดของช่องว่างพลังงานเพียง 1.14 eV ซึ่งไม่สามารถให้แสงหรือตอบสนองต่อแสงในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible Light) อย่างมีประสิทธิภาพ มาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถทำการพัฒนาสร้างอุปกรณ์เปล่งแสงและอุปกรณ์รับแสง ให้รวมอยู่กันกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ บนฐานรองซิลิคอนเดียวกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่กระบวนการในการสร้างชั้นของพอร์สซิลิคอนค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างวงจรรวม (IC) มาตรฐาน

ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้เองคณะผู้ทำวิจัยจึงได้เริ่มต้นงานวิจัยนี้ด้วยการนำเอา นาโนพอร์สซิลิคอน มาประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นส่วนที่ช่วยในการลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะศึกษา วิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดทางไฟฟ้าเคมีเป็นวัสดุที่ช่วยลดการสะท้อนแสง โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. พัฒนาต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมาเป็นวัสดุที่ช่วยลดการสะท้อนแสง
2. การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนด้วยการใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมาเป็นวัสดุที่ช่วยลดการสะท้อนแสง
3. การลดต้นทุนในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

โดยปกติวัตถุทุกชนิดย่อมมีการสะท้อนแสง ไม่มีวัตถุใดในทางปฏิบัติที่จะสามารถดูดกลืนแสงได้ 100% โดยไม่มีการสะท้อน ในกรณีนี้ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนก็เช่นเดียวกัน มีการสะท้อนแสงที่สูงโดยเฉลี่ยมากกว่า 60% ซึ่งส่วนมากจะใช้ซิลิคอนมาเป็นวัสดุหลักในการใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก ซึ่งพบว่าจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากการสะท้อนของผิวหน้า เป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เซลล์ที่ได้จึงมีประสิทธิภาพต่ำ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จึงได้มีงานวิจัยมากมายที่พยายามสร้างชั้นวัสดุที่สามารถช่วยลดการสะท้อนแสงทั้งนี้ก็เพื่อที่จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสะท้อนนั่นเอง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดโดยทั่วไปส่วนมากจะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นที่ช่วยลดการสะท้อนแสง โคนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างขึ้นได้หลายวิธี อาทิเช่น สร้างขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน กระบวนการออกซิเดชันแบบซีวีดี เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีที่กล่าวมาล้วนแล้วแต่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลาในการสร้างด้วยกันทั้งสิ้นทำให้กระบวนการสร้างมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการรายงานการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้นได้ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมีบนแผ่นผลึกซิลิคอน โดยชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนี้มีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงที่ต่ำและดูดกลืนแสงได้ดี จึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำวัสดุชนิดนี้มาใช้เป็นวัสดุที่ช่วยลดการสะท้อนแสงบนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นแทนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นอีกทางหนึ่ง อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดอีกด้วย

1.4 ทฤษฎีของงานวิจัย

โดยชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นก็คือเนื้อผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยจะมีขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอนที่เหลือและขนาดของรูพรุนอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งการลดขนาดของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิมได้นั้น ในงานวิจัยนี้จะสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้นโดยใช้วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) ที่เรียกว่ากระบวนการ **Anodization** โดยเนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกกัดจนขนาดของโครงสร้างลดลงอยู่ในระดับนาโนเมตรและเกิดเป็นชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้นนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมาใช้งานสร้างเป็นวัสดุที่ช่วยลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน โดยจะอาศัยคุณสมบัติทางแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนอันได้แก่การดูดกลืนและการสะท้อนแสงมาใช้งานนั่นเอง โดยกระบวนการสร้างและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงชนิดนี้เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างอย่างง่าย และเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นสามารถสร้างลงบนแผ่นซิลิคอนได้โดยตรง ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของ โครงการวิจัยนี้อยู่ที่การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี ทั้งนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน ตลอดจนศึกษาคุณสมบัติในการดูดกลืนและการสะท้อนแสงของชั้นนาโน พอร์สซิลิคอนที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1) ดำเนินการศึกษา ออกแบบและกำหนดขั้นตอนการวิจัย
 - 2) ขั้นตอนการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี
 - 3) วัดและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน
 - 4) วัดและทดสอบคุณสมบัติทางแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน
 - 5) ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน
 - 6) สร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่สมบูรณ์เพื่อใช้งานเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน
 - 7) วัดและทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
 - 8) สรุปผลการทดลองและเขียนรายงานสมบูรณ์
- ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดจะดำเนินการทดลองที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

เนื้อหาในรายงานเล่มนี้จะแบ่งเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

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

บทที่ 2 พอร์สซิติคอน เป็นการกล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับพอร์สซิติคอน เทคนิคการสร้าง พอร์สซิติคอน โดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดพอร์สซิติคอน ความพรุน และ พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิติคอน

บทที่ 3 กระบวนการสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เป็นการกล่าวถึง กระบวนการสร้าง เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เทคนิคที่ใช้ในการหาค่า ความพรุน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง เป็นการกล่าวถึงผลการทดลองเกี่ยวกับการสร้างชั้น พอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอโนไดเซชัน และผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะ เกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป



บทที่ 2

พอร์สซิติคอน

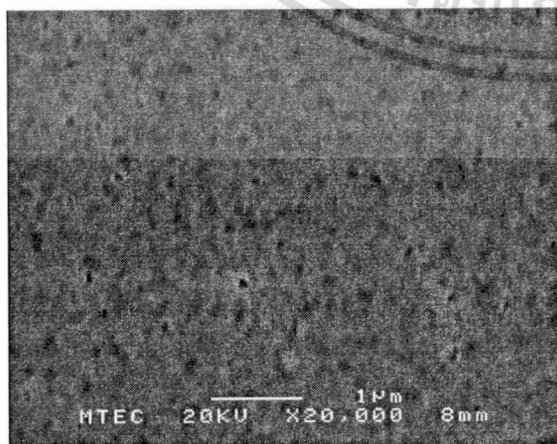
ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีพอร์สซิติคอน วิธีการสร้างพอร์สซิติคอนโดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดพอร์สซิติคอน ความพรุน และพฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิติคอน

2.1 ทฤษฎีพอร์สซิติคอน

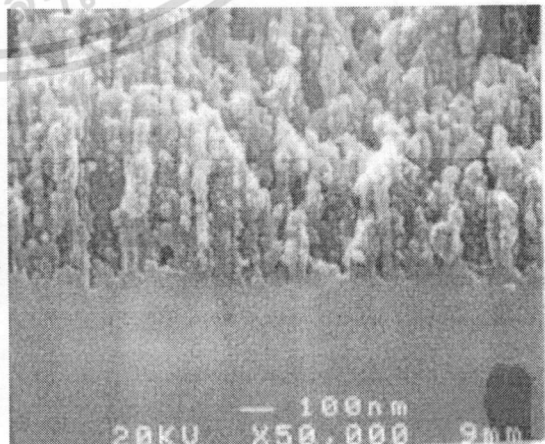
พอร์สซิติคอน เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีทั้งโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และไม่เป็นระเบียบ ภายในของพอร์สซิติคอนอะตอมนั้นนอกจากจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบ เหมือนกับผลึกซิติคอนเดี่ยว แต่ยังมีจุดบกพร่องของผลึก ช่องว่าง ระยะห่างของช่องว่าง และพันธะแขวนขาดกับอะตอมข้างเคียง โครงสร้างที่มีขนาดเล็กนี้สามารถพบได้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

2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซิติคอน

พอร์สซิติคอน คือ ผลึกซิติคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิติคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจนถึงระดับไมโครเมตร โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาด โครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.1



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอร์สซิติคอน (ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง ระวังเรื่องการนำคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.1.2 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [18] คือ

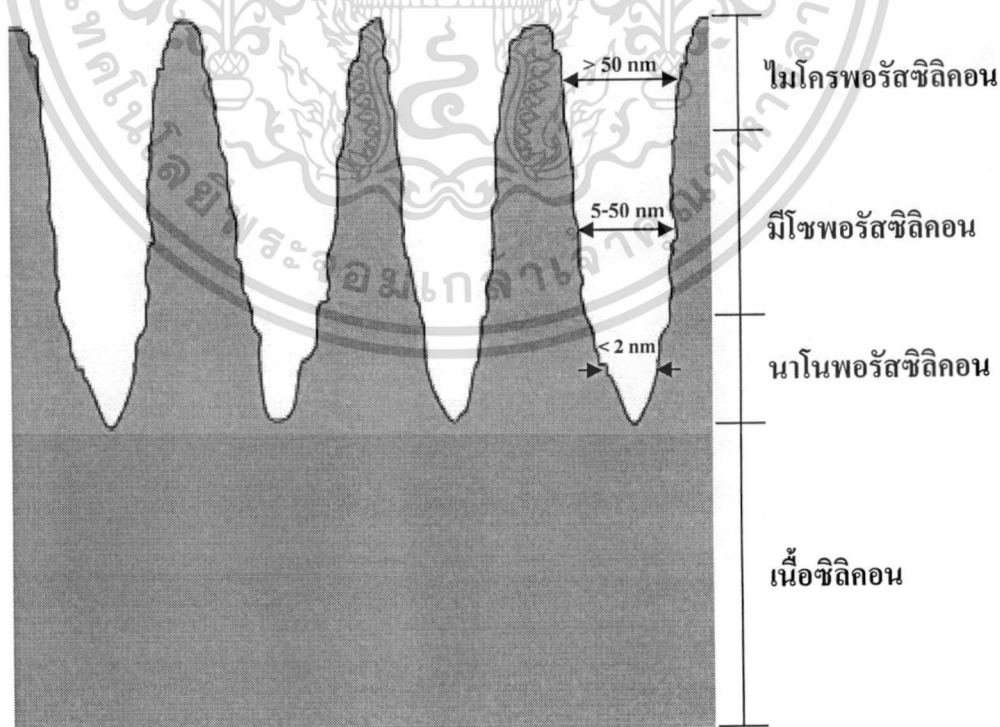
1. แบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

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



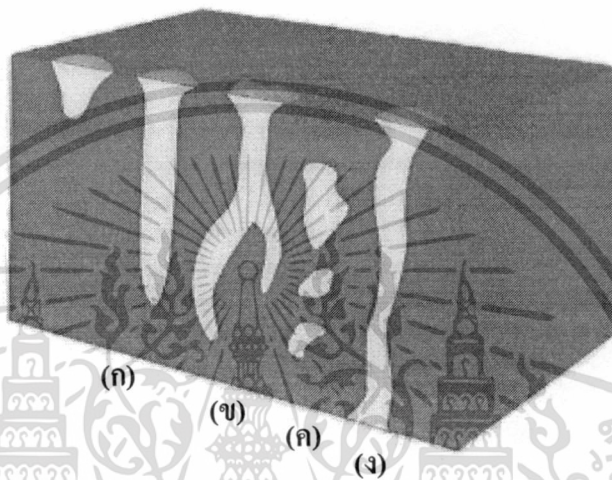
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะรูพรุนของพอร์สซิติคอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

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



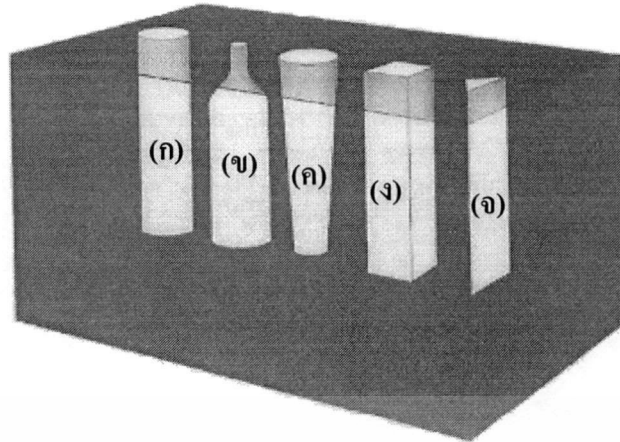
รูปที่ 2.3 ภาพจำลองรูพรุนของพอร์สซิติคอนลักษณะต่างๆ กัน

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

3. แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูปร่างรูพรุนของพอร์สซิติคอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลักๆ ดังนี้

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

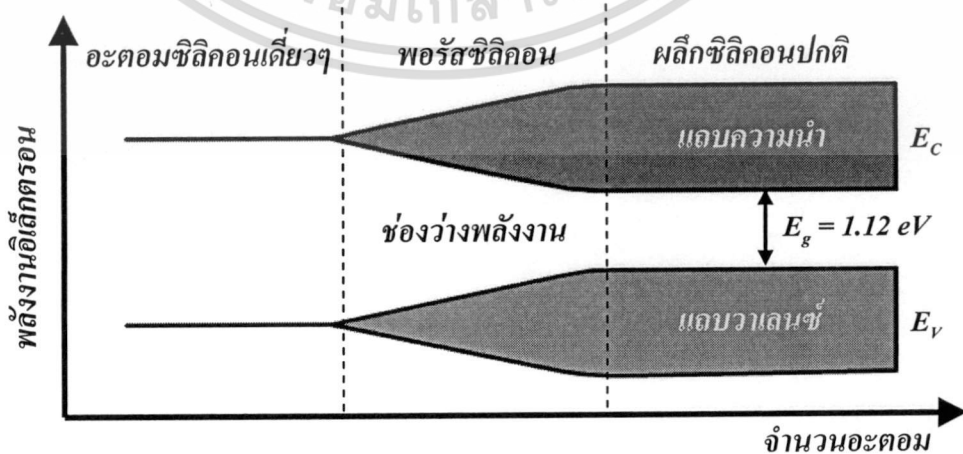


รูปที่ 2.4 ภาพจำลองรูพรุนของพอร์สซิลิคอนรูปร่างต่าง ๆ

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

2.1.3 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

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



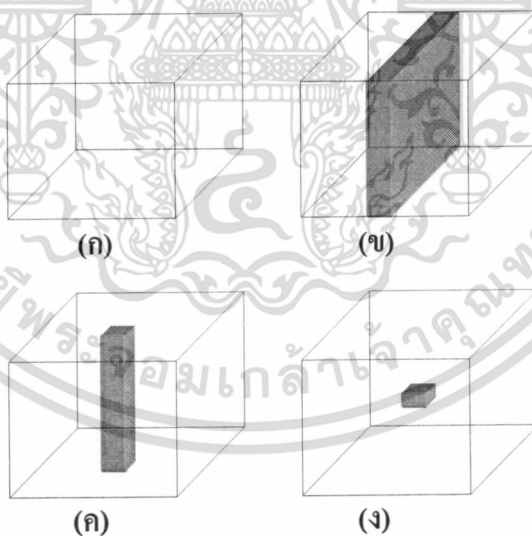
รูปที่ 2.5 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$E_q = \Delta E_c + \Delta E_v \tag{2.1}$$

โดยที่ E_q คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม
 ΔE_c คือ พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำเดิมก่อนเกิดพอร์สซิลิคอน
 ΔE_v คือ พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบวาเลนซ์เดิมก่อนเกิดพอร์สซิลิคอน



รูป 2.6 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ

- (ก) เนื้อผลึกซิลิคอน (ข) ควอนตัมในเชิง 2 มิติ
- (ค) ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (ง) ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ

จากรูปที่ 2.6 พาหะนำกระแสที่อยู่ภายใน โครงสร้างเล็กๆ เหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังเอาไว้ให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติได้ คำกล่าวที่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

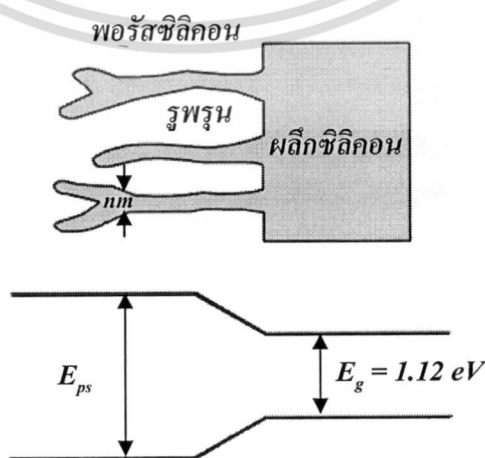
เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิคอนปกติ มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างกันไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับ ด้วยลักษณะและขนาดของโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

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

2. ควมอดัมในเชิง 1 มิติ (quantum wire) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆ ที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร (< 10 nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะนี้จะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปในโครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของ โครงสร้างที่เป็นเส้นหรือเสานี้เท่านั้น ดังแสดงในรูป 2.6 (ค) ซึ่งลักษณะช่องว่างพลังงานของ โครงสร้าง 1 มิติแบบนี้ จะมีขนาดที่กว้างกว่าช่องว่างพลังงานของ โครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจาก โครงสร้างในลักษณะแบบนี้จะมีขนาดเล็กกว่า และมีจำนวนอะตอมที่อยู๋ภายในน้อยกว่าโครงสร้าง 2 มิติ

3. ควมอดัมในแบบไม่มีมิติ (quantum dot) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก (< 1 nm) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะแบบนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ภายใน โครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ง) อะตอมที่อยู๋ภายใน โครงสร้างจุดเล็กๆเหล่านี้จะมีจำนวนที่น้อยกว่าใน โครงสร้างสองแบบแรก ซึ่งจะมีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของ โครงสร้างที่เป็นแบบจุดนี้จะมีขนาดกว้างที่มากกว่าใน โครงสร้างสองแบบแรก



เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 2.7** ลักษณะแถบพลังงานของพอร์ซซิลิคอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์ซซีลิกอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์ซซีลิกอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัมในเชิง 1 มิติ โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับนาโนเมตรของพอร์ซซีลิกอน

2.2 เทคนิคการสร้างพอร์ซซีลิกอน

กระบวนการสร้างพอร์ซซีลิกอนให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน [23-27] แต่จะขอพิจารณาถึงเทคนิคการสร้างพอร์ซซีลิกอนที่เหมาะสม สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการสร้างได้ และสามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้

2.2.1 การสร้างพอร์ซซีลิกอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมติ (stain etching)

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

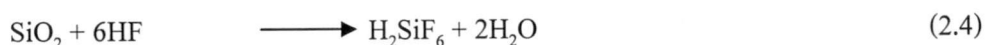
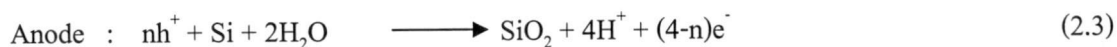
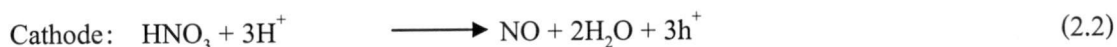


รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบข้อมติ

จากรูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดแบบข้อมติคือ การทำให้เกิดประจุโฮล เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิกอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก เพื่อทำให้เกิดประจุโฮล หลังจากนั้นประจุโฮลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ซิลิกอนไดออกไซด์ ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เอง สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิกอนไดออกไซด์บางส่วนออก ซึ่งการเกิดซิลิกอนไดออกไซด์ และการถูกกัดของซิลิกอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยา ดังนั้นลักษณะโครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ (non-uniform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมีสสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่า บริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยาจะมีสีส้มเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีส้มจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ส่วนความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการกัดแบบข้อมีจะมีค่าประมาณ 100 nm และพื้นผิวของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เกิดจากกระบวนการกัดแบบข้อมีจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.9 [28]

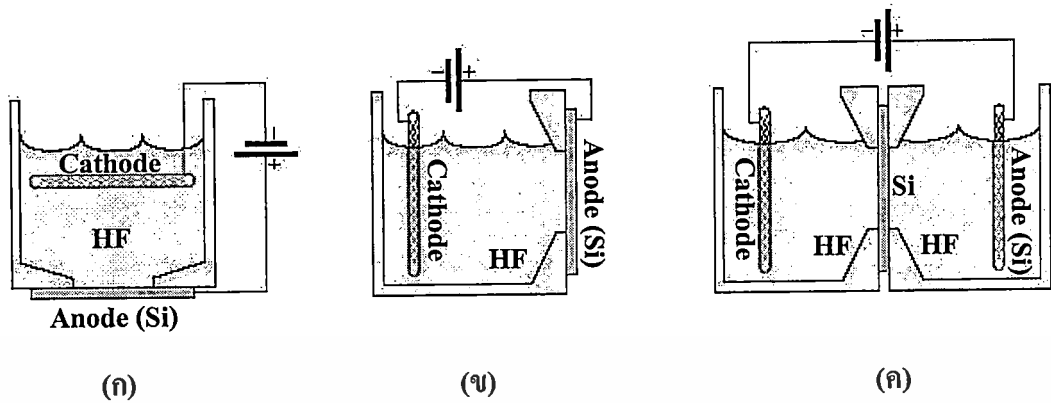


รูปที่ 2.9 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมี

2.2.2 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (anodization)

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

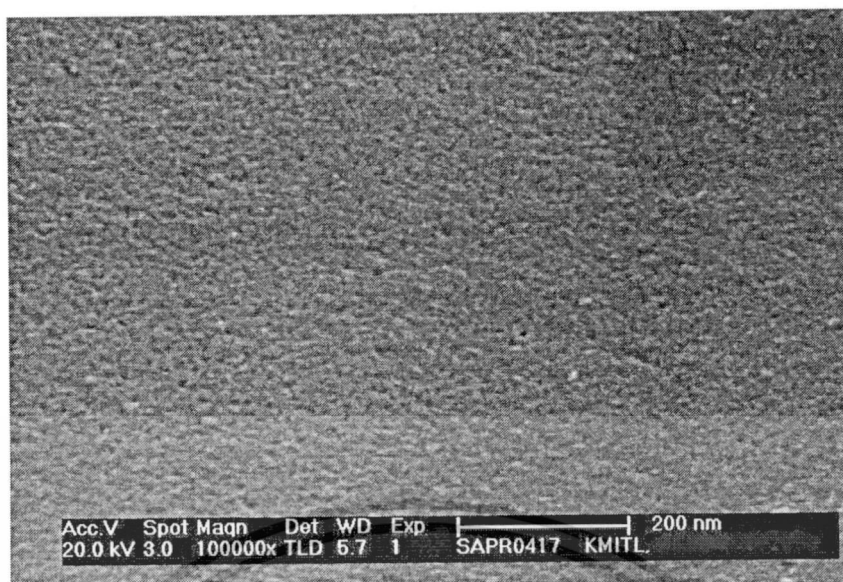
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการเอโนไคซ์เซชัน

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

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการเอโนไคซ์เซชันนี้จะประกอบด้วย 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 โดยส่วนใหญ่การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีเอโนไคซ์เซชันจะมีเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ระหว่างการสร้างก็คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก การผสมเอทานอลเพื่อช่วยให้เกิดความสม่ำเสมอของชั้นพอร์สซิลิคอนมากขึ้น [30] เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเอโนไคซ์เซชัน ซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการเอโนไคซ์เซชันนี้ สามารถควบคุมความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาของพอร์สซิลิคอน ได้ดีกว่าวิธีการกัดแบบข้อมือ โดยภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เกิดกระบวนการเอโนไคซ์เซชันจะมีลักษณะสม่ำเสมอกว่าวิธีการกัดแบบข้อมือ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้จากระบวนการเอโนไลซ์เซชัน

2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี [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)

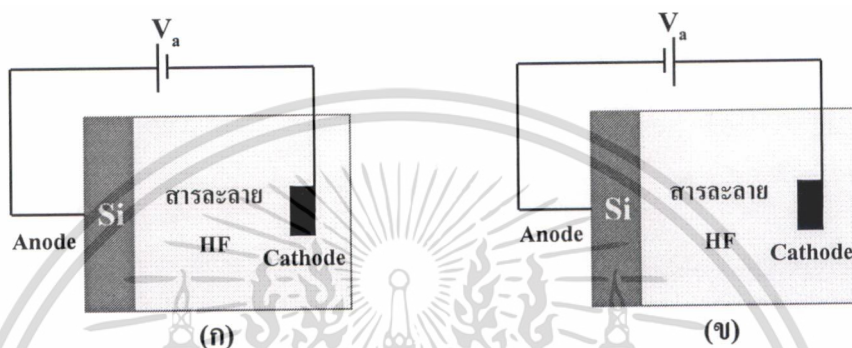
2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเท และเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลายปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

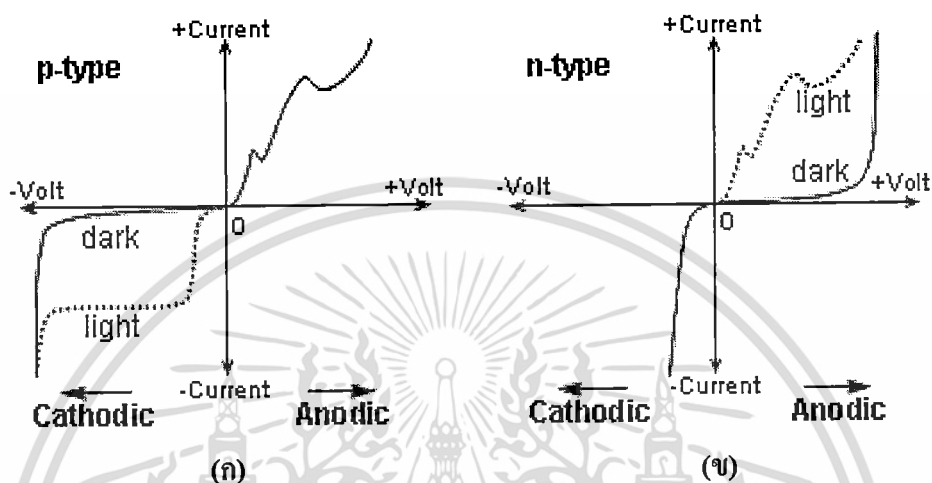
2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดแผ่นซิลิคอน

2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับเอกสารสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบช็อตคกี้ไดโอด (schottky diode) ที่เกิดขึ้นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



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

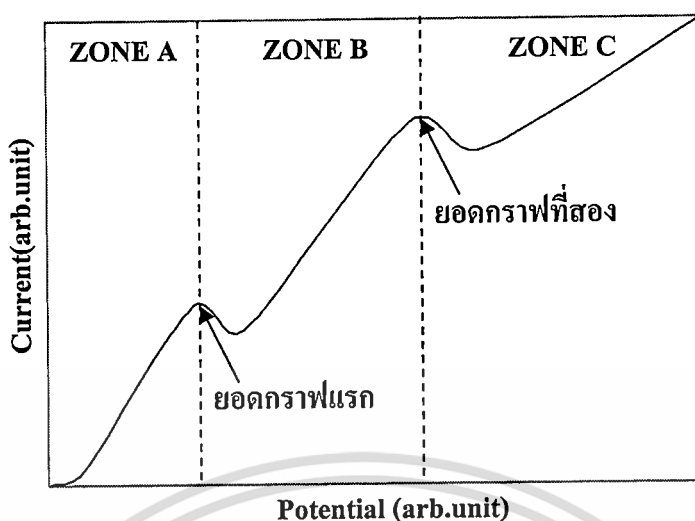
จากรูปที่ 2.13 แสดงถึงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนโนดิก และการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนโนดิก ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในแผ่นซิลิคอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง เช่นเดียวกันกับไดโอดทั่วไป ส่วนในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับแผ่นซิลิคอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนโนดิกสำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน

ชนิดของแผ่น ซีลิกอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบแคโทดิก	แบบแอโนดิก
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นซีลิกอนจะไม่ถูกกัด - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ 	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นซีลิกอนถูกกัด โดย - จะเกิดโครงสร้างของพอร์สซีลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ - จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซีลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นซีลิกอนจะไม่ถูกกัด - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง 	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นซีลิกอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย - จะเกิดโครงสร้างของพอร์สซีลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ - จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซีลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสข้อต่อเหมือนกัน โดยการเกิดพอร์สซีลิกอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิกเท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก จะไม่เกิดพอร์สซีลิกอนขึ้นไม่ว่าชนิดของแผ่นซีลิกอนจะเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของแผ่นซีลิกอนชนิดเอ็นเนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกนั้น เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ดังนั้นในระหว่างการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกจึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นซีลิกอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในแผ่นซีลิกอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดพอร์สซีลิกอน

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิกของทั้งแผ่นซีลิกอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนของไอส์แบบแอนดิก

จากรูปที่ 2.14 ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยยอดกราฟอยู่ 2 จุดด้วยกัน โดยยอดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A เป็นช่วงในการเริ่มสร้างพอร์สซิลิคอน (porous silicon formation regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นมาที่ต่อเมื่อค่ากระแส ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก ส่วนในบริเวณ B เป็นช่วงการกัดที่ทำให้เกิดพอร์สซิลิคอน ส่วนช่วงที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของซิลิคอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนไปสู่ลักษณะช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า (electropolishing regions) ซึ่งอยู่ในบริเวณ C โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ยอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากยอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ อิมพีแดนซ์เชิงลบ (negative impedance) ขึ้น โดยจากรูปที่ 2.14

- ในส่วนของยอดกราฟแรก

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม ขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆ โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน และเมื่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุมโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น

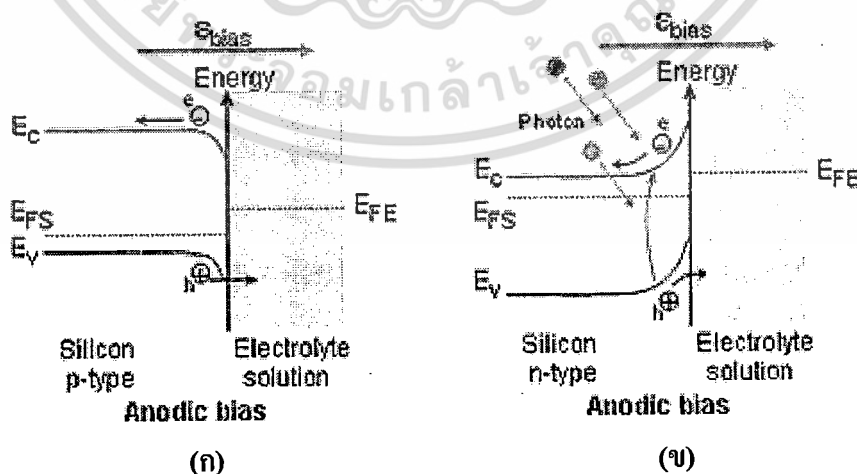
- ในส่วนยอดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณช่วงการกัดที่ทำให้เกิดพอร์สซิลิคอน กับช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ที่บริเวณผิวของพอร์สซิลิคอนในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะมีลักษณะเป็นแบบช็อคกี โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส แสดงดังรูปที่

2.15 [32]



รูปที่ 2.15 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

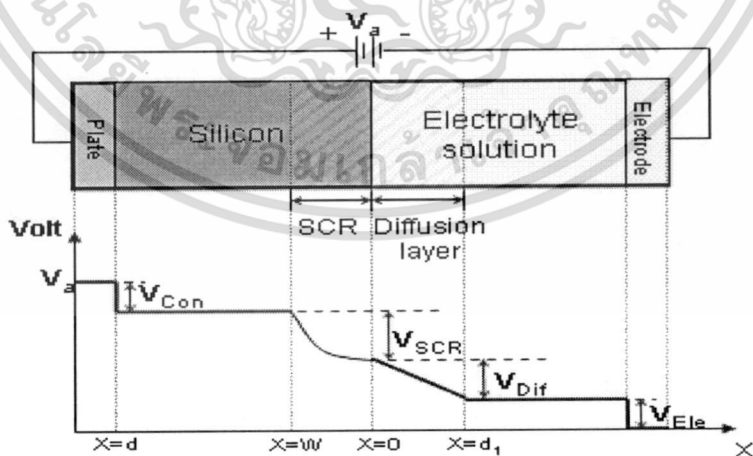
จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบตรง ทำให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก)

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบแอโนดิก ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้กับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

2.3.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดพอร์ซซิลิคอน จะประกอบด้วยแผ่นซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีกรไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 2.16 [33]



รูปที่ 2.16 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่ d เป็นความหนาของแผ่นซิลิคอน, w เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส และ d_1 เป็นความกว้างของบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ

- ในเนื้อของแผ่นซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะนำกระแส

- ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรด กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ (diffusion layer)

ถ้าให้ V_a เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้ารวมของระบบได้ดังนี้ 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 ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับ

สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

ศักดาไฟฟ้า V_{con} กับ V_{elec} ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของพอร์ตซิลิคอนแบบเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงทำให้สมการที่ (2.8) สามารถเขียนได้เป็น

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

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

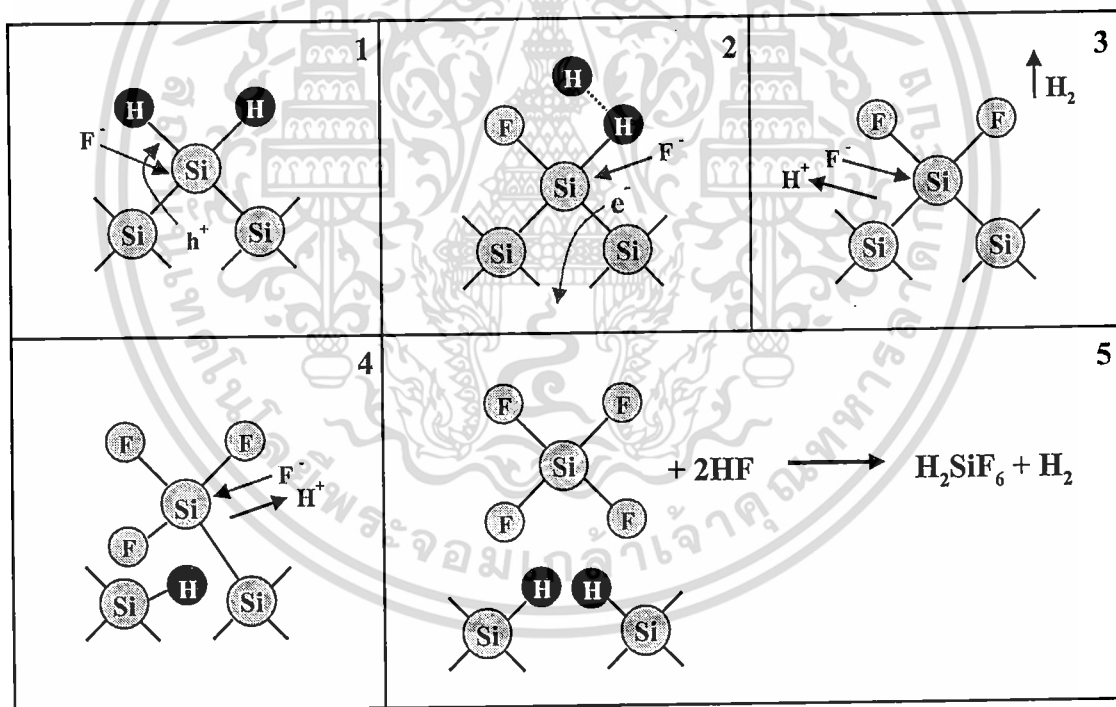
ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากเป็นการไปอัสแบบตรง ทำให้ไม่เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นในแผ่นซิลิคอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ โดย V_{diff} นี้จะควบคุม อีออนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะตกคร่อมบริเวณนี้ โดยบริเวณปลอดพาหะนี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัด และ โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้น

2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน [34]

2.4.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน

ในสภาวะปกติเมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำปฏิกิริยา แต่เมื่อไรก็ตามที่แผ่นซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบแอนโนดิกแล้ว ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน

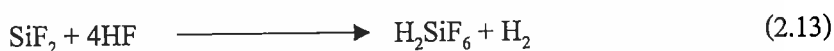
เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกรไบอัสแบบแอนโนดิก ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแอนโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้ไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการเอกรสารนี้เป็นเอกรสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกรสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก โดยมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้แก่ขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮล สามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้ โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทน ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการโพลาไรซ์ (polarizing) ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้อิออนของฟลูออรีน (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) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวม ได้เป็น



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 สังเกตได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่น

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

2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์ตซิลิคอน

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

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน
ระหว่างการแอโนไดซ์เซชัน โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่าง
มากต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ

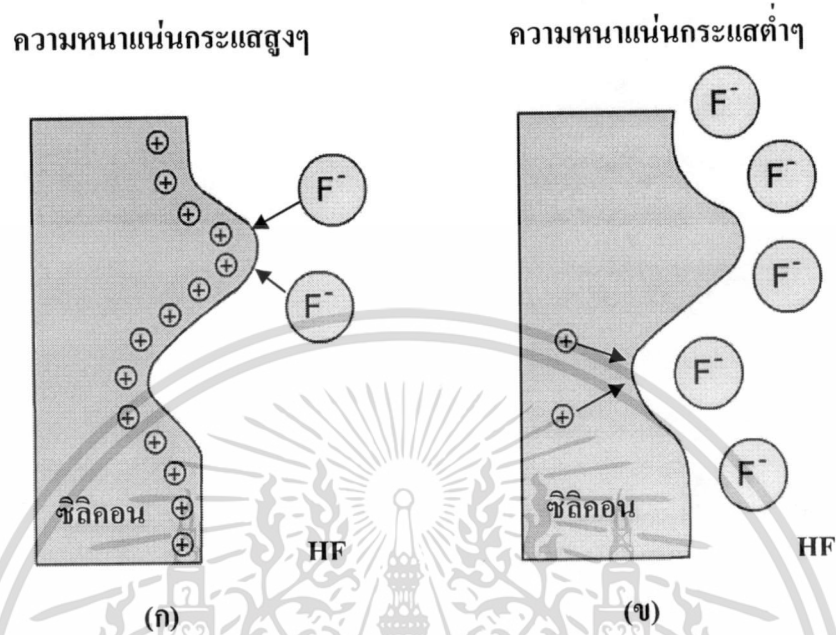
- การกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสให้แก่เซลล์ไฟฟ้า
เคมีในปริมาณสูงๆ ($J > J_{ps}$) ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนมีปริมาณของพาหะโฮล
สะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอ็อนของฟลูออรีนที่อยู่ใน
สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยอ็อนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายในสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้า
ผิวของแผ่นซิลิคอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุด
ของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงอ็อนของฟลูออรีนเข้า
มาทำปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นส่วนใหญ่ มีผล
ทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้นเราจึงเรียกการกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้า
ด้วยไฟฟ้า

- การกัดแบบทำให้เกิดพอร์ตซิลิคอน

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

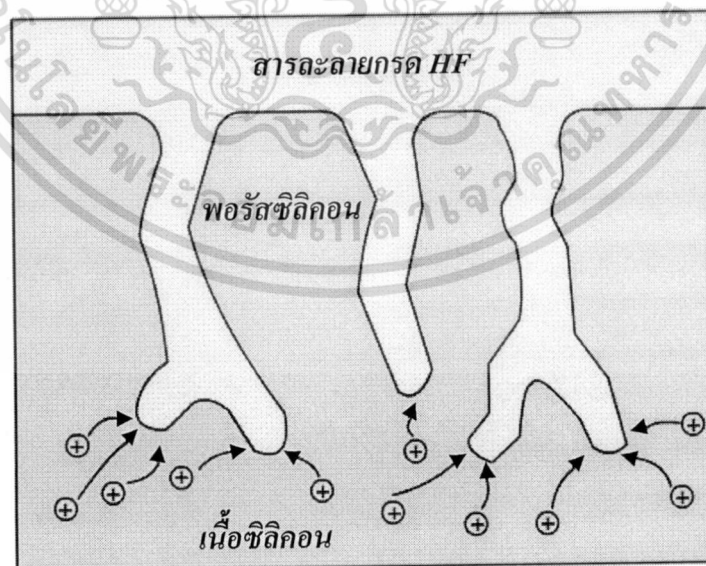
จุดนี้กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณ
 กันหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไปเนื้อของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 2.18 แบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ

(ก) ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า

(ข) ลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดพอร์ซิลิคอน



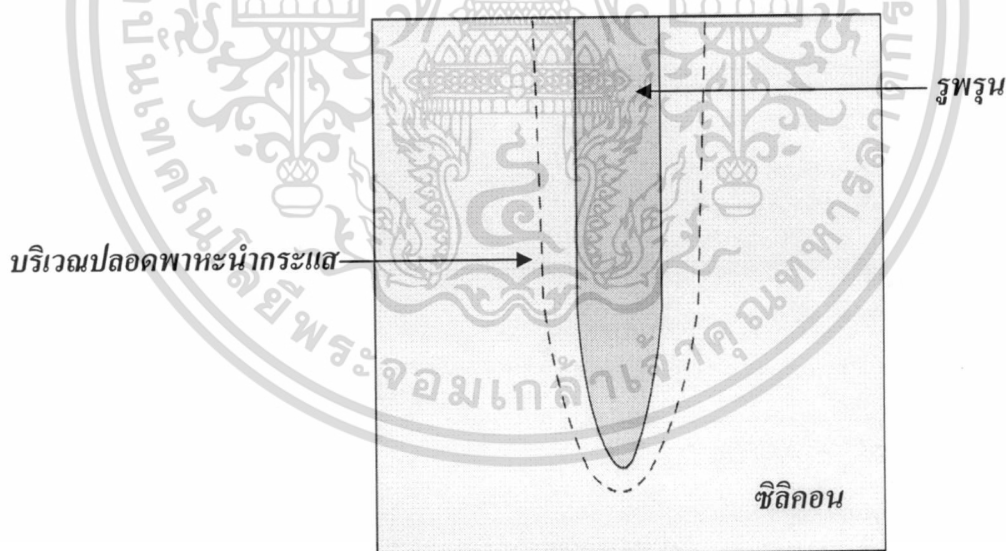
รูปที่ 2.19 การเคลื่อนที่พาหะ โสไลต์ที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณกันหลุมเนื่องจากอิทธิพลของ
 สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนทั้งชนิดพี และชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าผลึกซิลิคอนทั้งสองชนิดมีกลไกการเกิดโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแบบแอโนดิก

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นการไบอัสแบบตรง ซึ่งการไบอัสในลักษณะเช่นนี้จะไปลดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณปลดพาหะลง โดยจะเกิดขึ้นตามผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน อันเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอโนดิก จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณปลดพาหะ มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้นถ้าบริเวณของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีลักษณะเป็นหลุม ซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบๆ หลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณปลดพาหะขึ้นรอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 บริเวณปลดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน

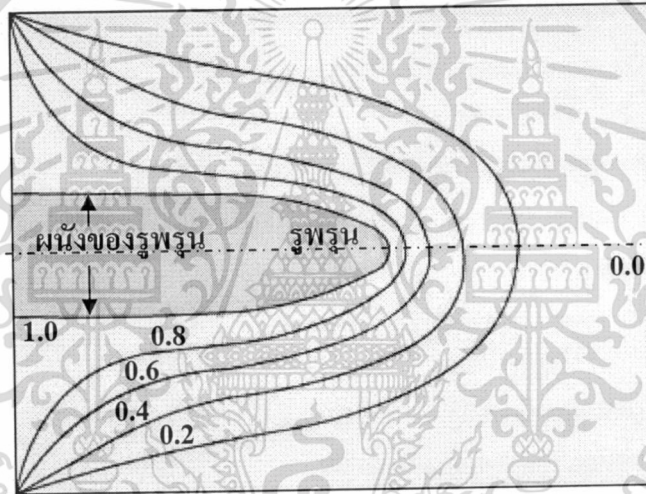
โดยความกว้างของบริเวณบริเวณปลดพาหะที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_{SCR}}{qN_D}} \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.21 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน

บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบรูพรุน จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 2.21 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน (E_s) มีค่าเท่ากับ

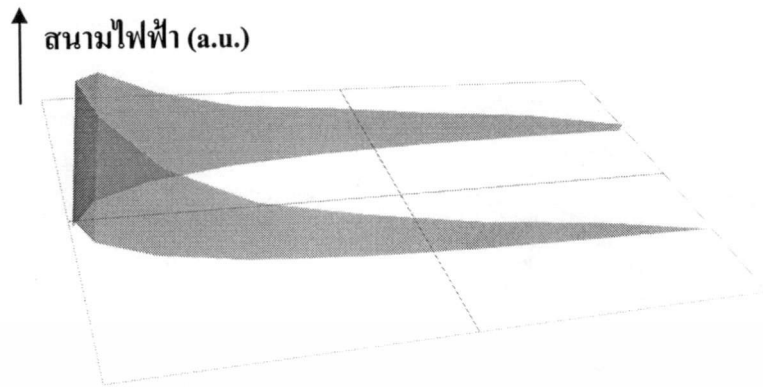
$$E_s = 2V_{SCR}/W \quad (2.15)$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบๆก้นหลุมของรูพรุน (E'_s) จะมีค่า

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

โดยที่ r คือ รัศมีก้นหลุมของรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน

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



รูปที่ 2.23 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน

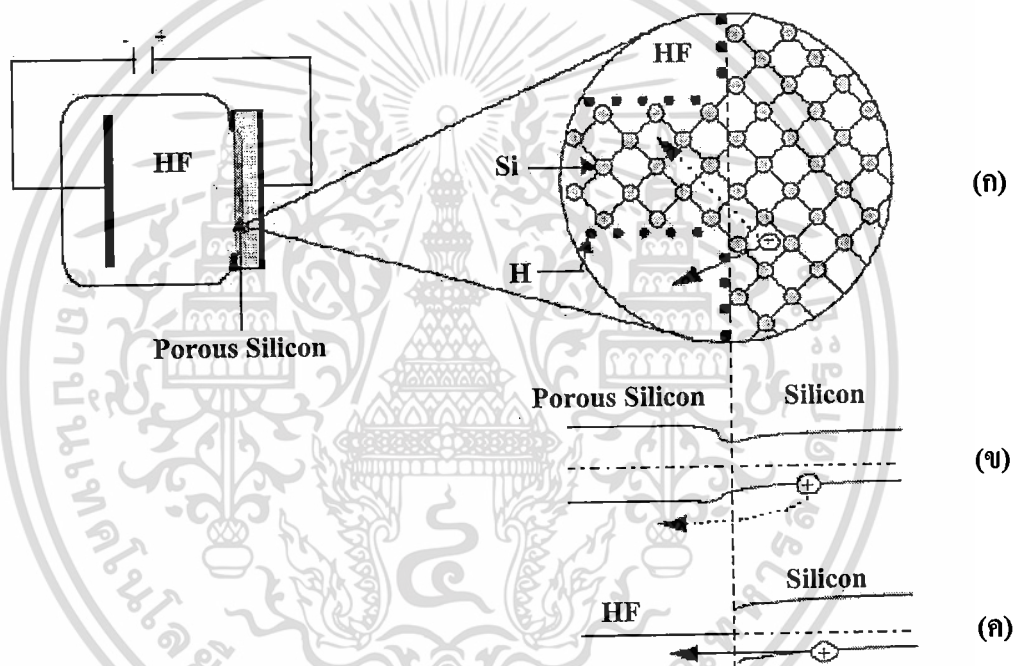
2.4.3 กลไกในการหยุดกักโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

จากการเกิด โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนขึ้น โดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิกอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญ ต่อกระบวนการกักเนื้อของผลึกซิลิกอนในแบบ ทำให้เกิดพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี เป็นกระบวนการกักที่สามารถลดขนาด โครงสร้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร แต่กระบวนการนี้ก็จะอาศัยกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนด้วย ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

- การหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากซิลิคอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนโนดิก ทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณปลดพาหะขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพีจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ผลของขนาดควอนตัมขึ้นในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.24



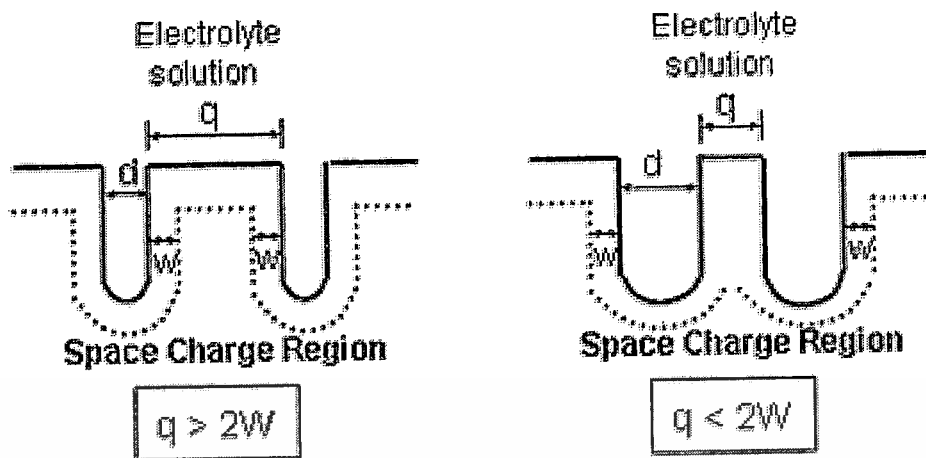
รูปที่ 2.24 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนชนิดพี โดยที่

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

จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดพีจะถูกกัดจนเป็น โครงสร้างของพอร์ส ซิลิคอนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจนทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลง ไปเรื่อยๆ จนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงาน ในพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิด ปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ระหว่างพอร์สซิลิคอนกับผลึกซิลิคอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นค่าแพนดักซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ΔE_v สำหรับโฮล และเท่ากับ ΔE_c สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้นการที่พาหะโฮลในผลึก ซิลิคอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ไฟฟ้าเคมีในการกัดโครงสร้างในส่วนต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่า มากกว่า ΔE_v ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ค่าแพนดักซ์ ΔE_v มีค่าพลังงานมากกว่า พลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วน ของนาโนพอร์สซิลิคอนได้ ผลที่ตามมาคือเกิดการหยุดกัด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ΔE_v นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอน โดย ΔE_v จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัด ในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนพอร์ส ซิลิคอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่ ถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพี สามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรด ไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้ สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ค) ดังนั้น จึงทำให้บริเวณก้นหลุมของพอร์สซิลิคอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่อง

- การหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการ ไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอโนดิก สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะ เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัส ของผลึกซิลิคอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ W ดังนั้นกลไกใน การหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นแล้วจะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณ ปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่

(ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า $2W$

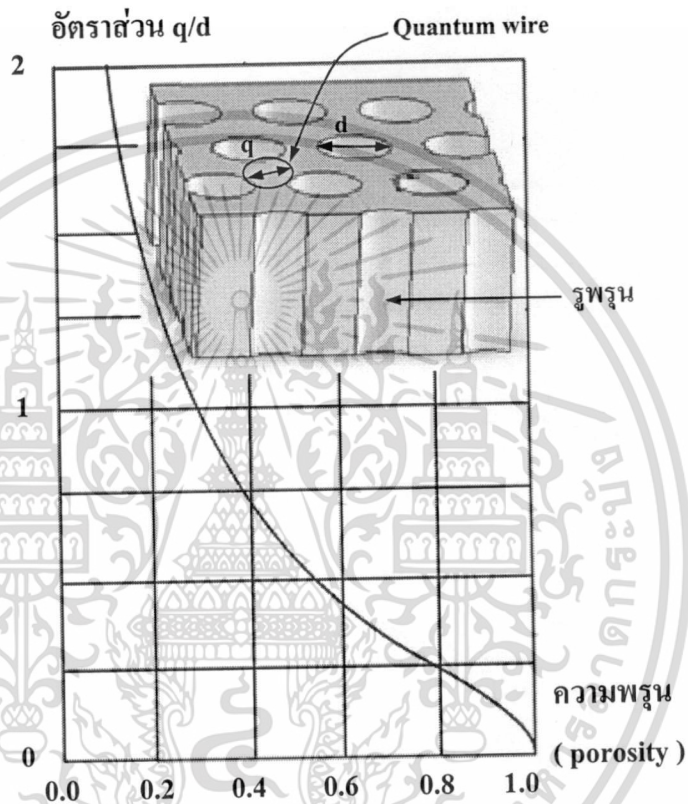
(ข) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า $2W$

จากรูปที่ 2.25 (ก) จะเห็นได้ว่าพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อถูกทำการกัดจะทำให้ขนาด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน (q) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพรุนภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลอดพาหะนำกระแสปกคลุมอยู่รอบๆ รูพรุนแต่ละรู ในกรณีนี้ ขนาดของ โครงสร้างพอร์สซิลิคอนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q > 2W$) ดังนั้นจึงยังสามารถทำการกัดเพื่อลดขนาดของ โครงสร้างพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไรก็ตามที่ขนาดของ โครงสร้างพอร์สซิลิคอนมีขนาดที่น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q < 2W$) ดังรูปที่ 2.25 (ข) จะมีผลทำให้เกิดการซ้อนทับกันของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส จน โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนถูกรอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้

2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน

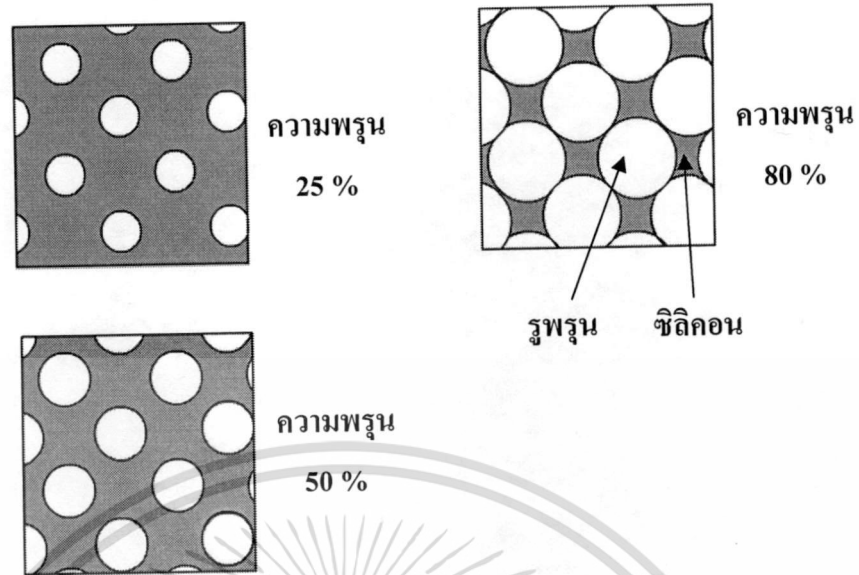
โดยทั่วไปแล้ววัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาด โครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

พอร์สซิลิคอน คือผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอนที่เหลือและขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง ผลของขนาดควอนตัม ส่งผลในลักษณะของ ควอนตัมในเชิง 1 มิติ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.26 [35]



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อซิลิคอนและขนาดของรูพรุน มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กถึง หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนนั้นมีความพรุนมากกว่าเดิม แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างพอร์สซีเมนต์ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

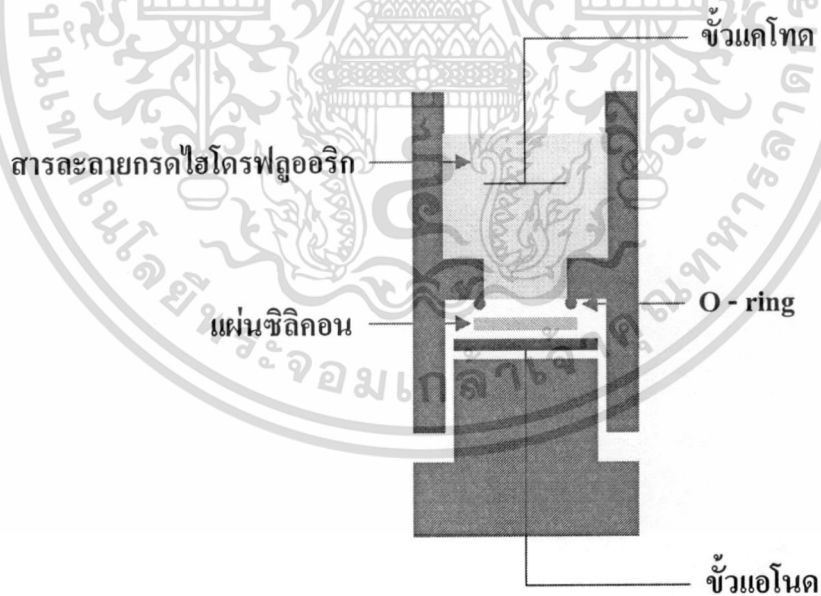
กระบวนการสร้าง และเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

ในบทนี้จะกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความพรุน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว

4.1 กระบวนการสร้าง

3.1.1 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน เป็นวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถควบคุมปฏิกิริยาในการกัดเพื่อทำให้เกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาตามความต้องการได้ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้ง เนื่องจากใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ และสามารถทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งนี้จะประกอบด้วย แผ่นซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดจะจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แผ่นซิลิคอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยจะใช้โอริง (O-ring) เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซลล์ ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี และทำการป้อนกระแสไฟฟ้าบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วลบจะจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้านี้เองก็จะทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดด้วยโดยเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการแอโนไดซ์เซชันที่ได้ให้ความสนใจคือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการแอโนไดซ์เซชันซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก

3.1.2 การสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์ซซิลิคอน

ชั้นพอร์ซซิลิคอนที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้การสร้างด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น และสามารถควบคุมความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนได้อีกด้วย ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

1. การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

ใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพี มีระนาบ (100) สภาพด้านทาน 1-2 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาของแผ่นซิลิคอนเท่ากับ 450 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 (ก)

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

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

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะหนักที่ผิวหน้า

- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน (trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน

- ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเคลื่อนชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้านหลังแผ่นซิลิคอน

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลื่อนโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำขั้วด้านหลังของอุปกรณ์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ (vacuum evaporator) ซึ่งสามารถทำการเคลื่อนโลหะอลูมิเนียมที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนได้ความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 (ข)

4. กระบวนการซินเตอร์ริง

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลื่อนอลูมิเนียมด้านหลังแผ่น ไปทำการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนให้ระหว่างกระบวนการเอโนโคซ์เซชัน มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการวางแผ่นซิลิคอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 L/min อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที

5. การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน

โดยการนำเอาแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ข้างต้น ไปวางตรงตำแหน่งบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ลงไปในเซลล์ไฟฟ้าเคมี นำขั้วอิเล็กโทรดจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วลบให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้น มีผลทำให้ที่บริเวณของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอนก็คือ เงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการเอโนโคซ์เซชัน อันได้แก่

- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเอโนโคซ์เซชัน
- เวลาที่ใช้ในการเอโนโคซ์เซชัน

หลังจากกระบวนการเอโนโคซ์เซชันเสร็จสมบูรณ์แล้ว จะได้ชั้นของพอร์สซิลิคอนเกิดขึ้นตรงบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 3.2 (ค)

6. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนหลังจากการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน

นำแผ่นซิลิคอนออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี ไปผ่านการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งสุดท้าย โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- แช่แผ่นซิลิคอนในแอลกอฮอล์เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดขี้ด่างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่ในชั้นพอร์สซิลิคอน

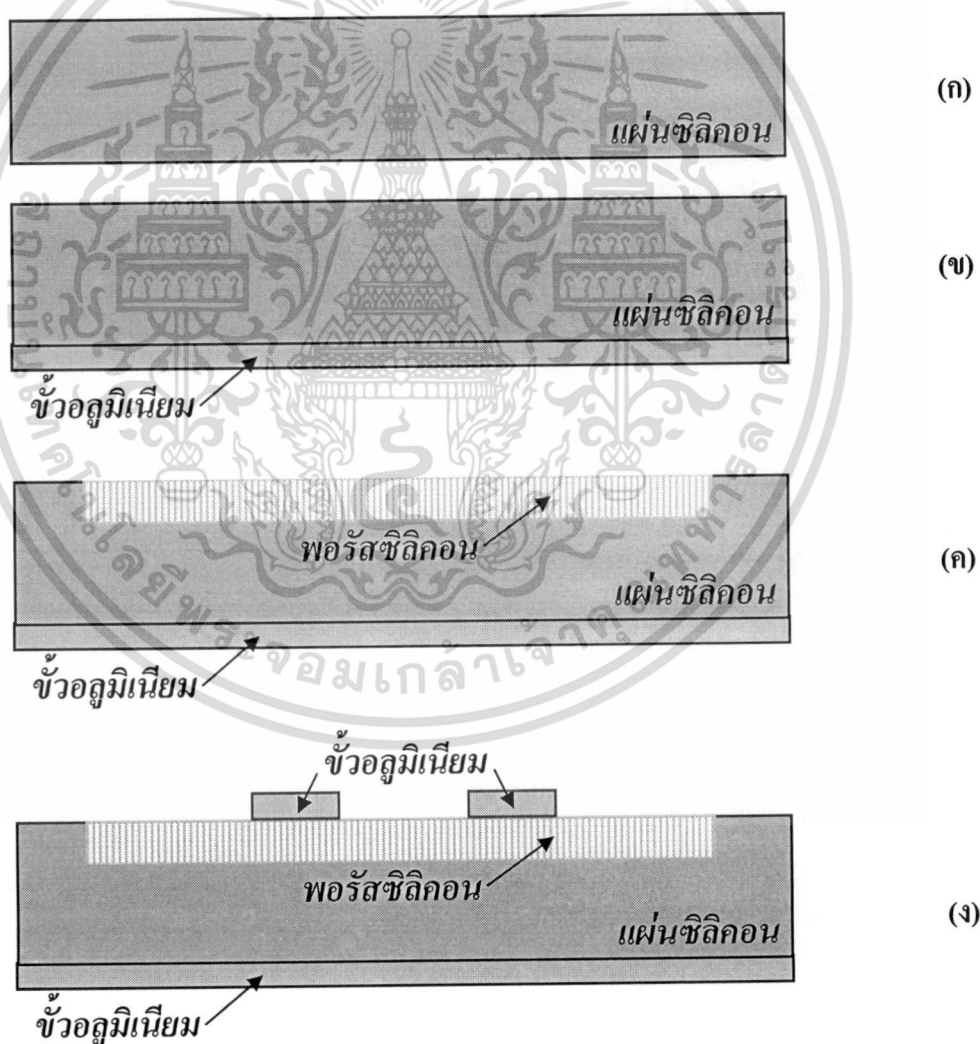
เอกสารที่คัดลอกมาเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การสร้างขั้วลুমินิยมด้านหน้าโดยการเคลือบชั้นลุมินิยมในสุญญากาศ

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะลุมินิยมที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนบริเวณที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน โดยใช้มีสสำหรับทำขั้วโลหะเพื่อทำขั้วของอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ $500\ \mu\text{m}$ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 3.2 (ง)

8. กระบวนการซินเตอร์ริง

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



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน

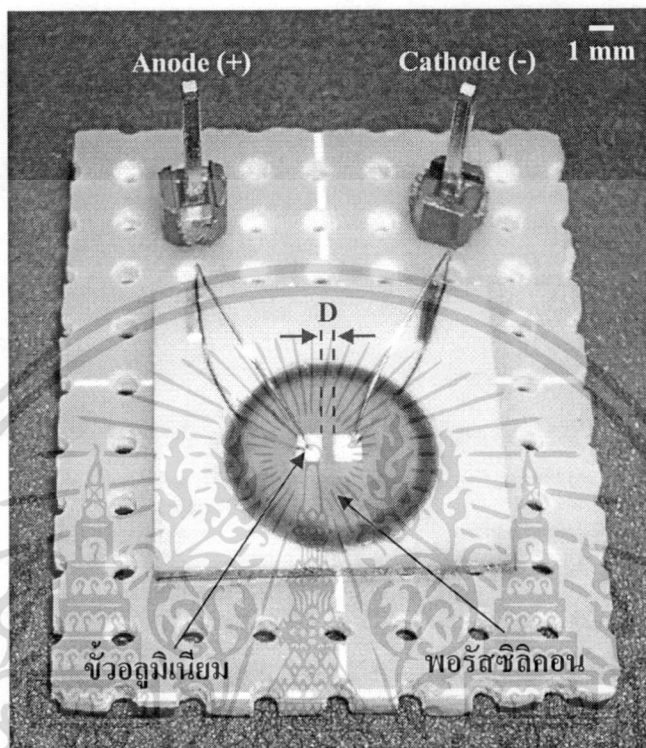
(ก) การเตรียมแผ่นซิลิคอน

(ข) การสร้างขั้วลุมินิยมด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ (ค) การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน (ง) การสร้างขั้วลุมินิยมด้านหน้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากกระบวนการข้างต้น มีขนาดของขั้วลวดมึนประมาณ $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (D) ประมาณ $500 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

3.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

3.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน

การวัดค่าความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน โดยค่าความพรุนของวัสดุใดๆ สามารถหาได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความพรุน} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_3)} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ m_1 คือ น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นก่อนการเกิดรูพรุน

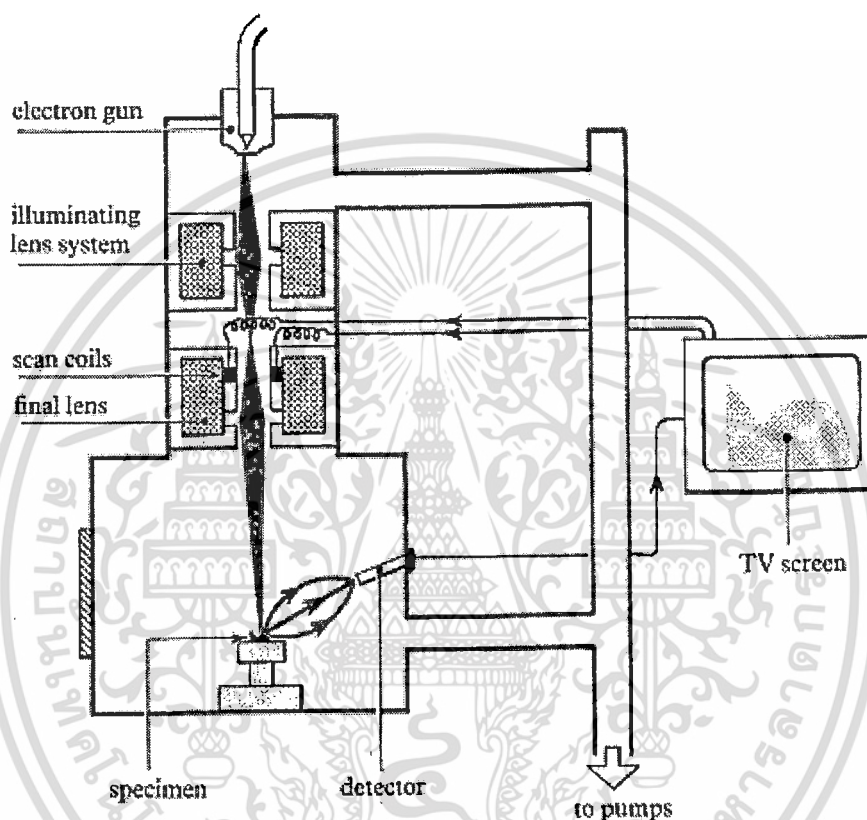
m_2 คือ น้ำหนักของวัสดุหลังการเกิดรูพรุน

m_3 คือ น้ำหนักของวัสดุที่เหลือหลังจากการลอกชั้นความพรุนออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิว และศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์ซเซลิคอน เครื่อง SEM นี้มีจุดเด่นอยู่ที่กำลังขยายสูงถึง 20 ถึง 500,000 เท่า จึงสามารถศึกษาพื้นผิวที่มีขนาดเล็กได้ดี โดยส่วนประกอบของเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 3.4 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

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

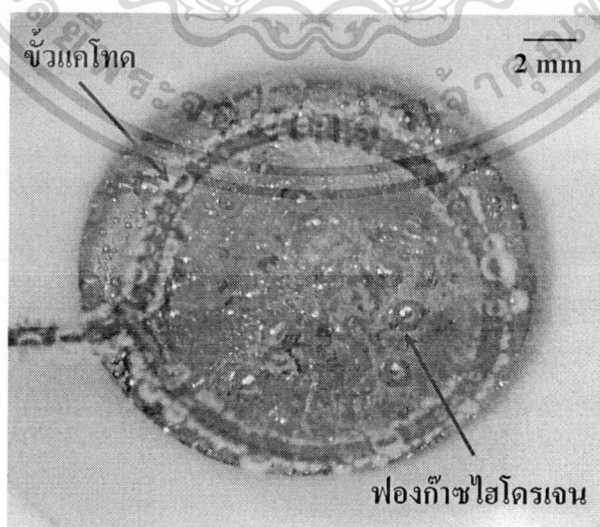
ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอน และผลการตรวจจับไอ แอลกอฮอล์ของชั้นพอร์สซิติคอน ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

4.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอน

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึง ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ เปรียบเทียบกับ ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอล เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ ในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน

4.1.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์

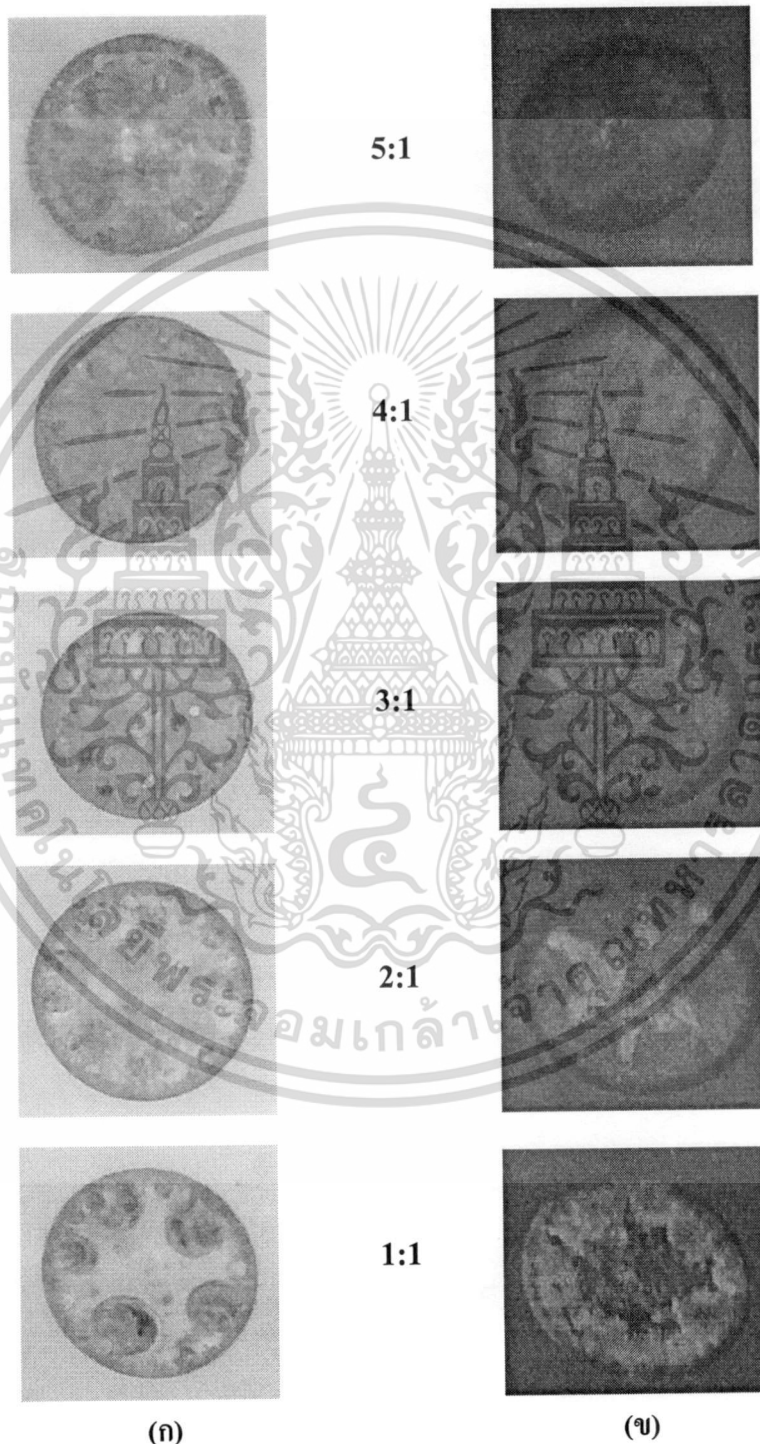
ทำการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้ เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47.8%) ต่อน้ำบริสุทธิ์ เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ จะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนรวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การสร้างชั้นพอร์สซิติคอน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 สังเกตได้ว่า ขณะทำการสร้างชั้นพอร์ซซาลิกอนจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนเป็นจำนวนมากที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซาลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ส่งผลทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของชั้นพอร์ซซาลิกอน แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ชั้นพอร์ซซาลิกอนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ต่างๆ กัน

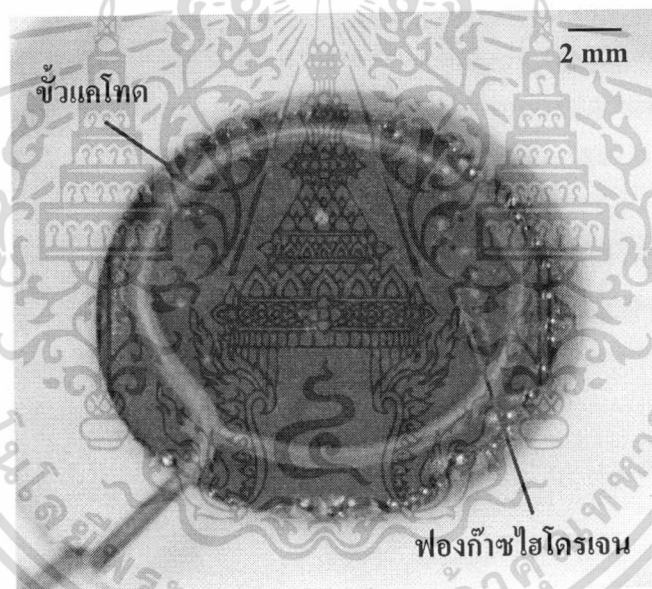
(ก) พื้นผิวของชั้นพอร์ซซาลิกอน (ข) การเรืองแสงของชั้นพอร์ซซาลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 (ก) สังเกตได้ว่าอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์เป็น 4:1 เกิดชั้นพอร์สซึลิกอนที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และสังเกตสมบัติการเรืองแสงของชั้นพอร์สซึลิกอนด้วยการฉายแสงจากหลอดแบลคไลท์ (black light) ที่มีความยาวคลื่น 365 nm ดังรูปที่ 4.2 (ข) สังเกตได้ว่าที่ อัตราส่วน 4:1 มีการเรืองแสงสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

4.1.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอล

ทำการสร้างชั้นพอร์สซึลิกอนด้วยวิธีการแอนโอดเซชัน โดยใช้ เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47.8%) ต่อเอทานอล (100%) เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ ได้ช่วยลดการเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.3



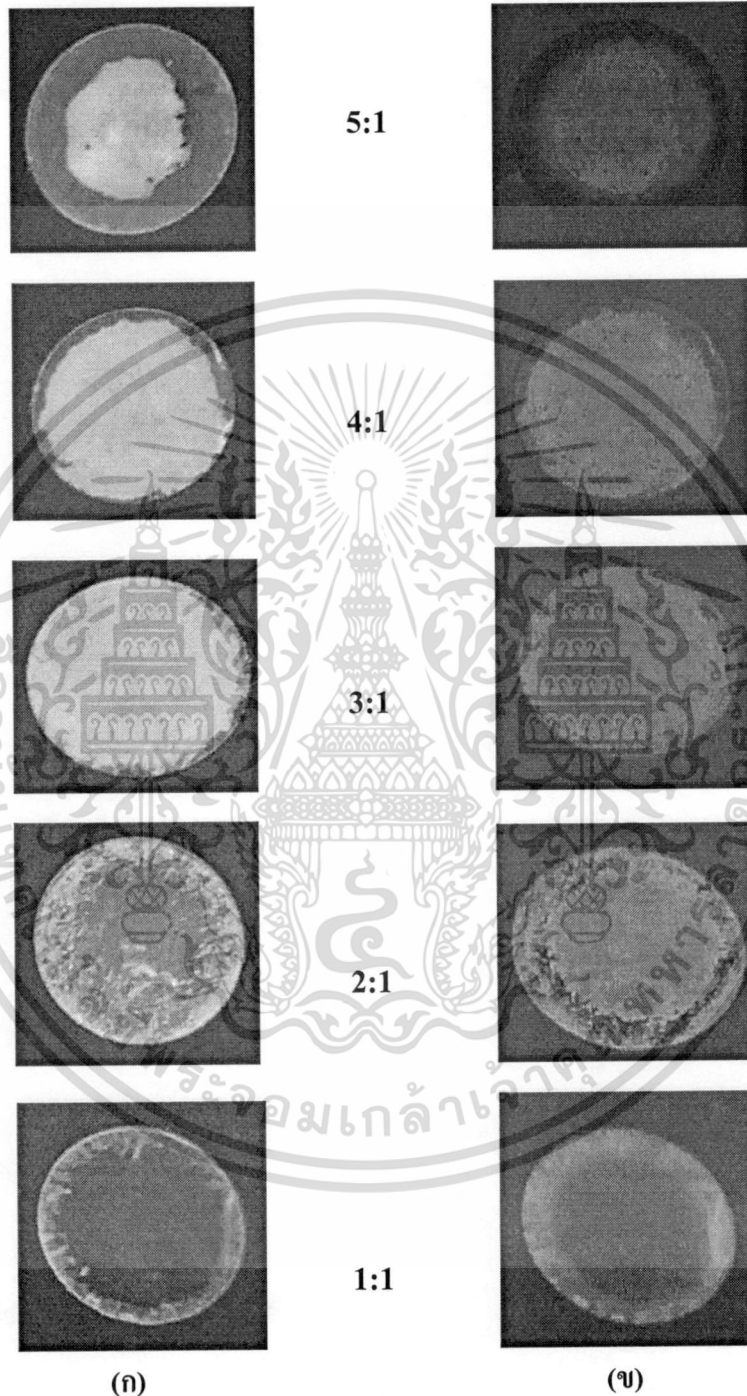
รูปที่ 4.3 การสร้างชั้นพอร์สซึลิกอน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.3 สังเกตได้ว่าขณะทำการสร้างชั้นพอร์สซึลิกอนจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนเป็นจำนวนมาก ส่งผลทำให้ชั้นพอร์สซึลิกอนที่ได้มีความสม่ำเสมอมากกว่าชั้นพอร์สซึลิกอนที่ได้จากอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากเอทานอลไปช่วยลดแรงตึงผิวของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำให้ลดจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซึลิกอนซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเข้าถึงผิวหน้าของแผ่นซีดีคอนได้ดี จึงได้ชั้นพอร์สซีดีคอนที่มีความสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่

4.4



รูปที่ 4.4 ชั้นพอร์สซีดีคอนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลต่างๆ กัน

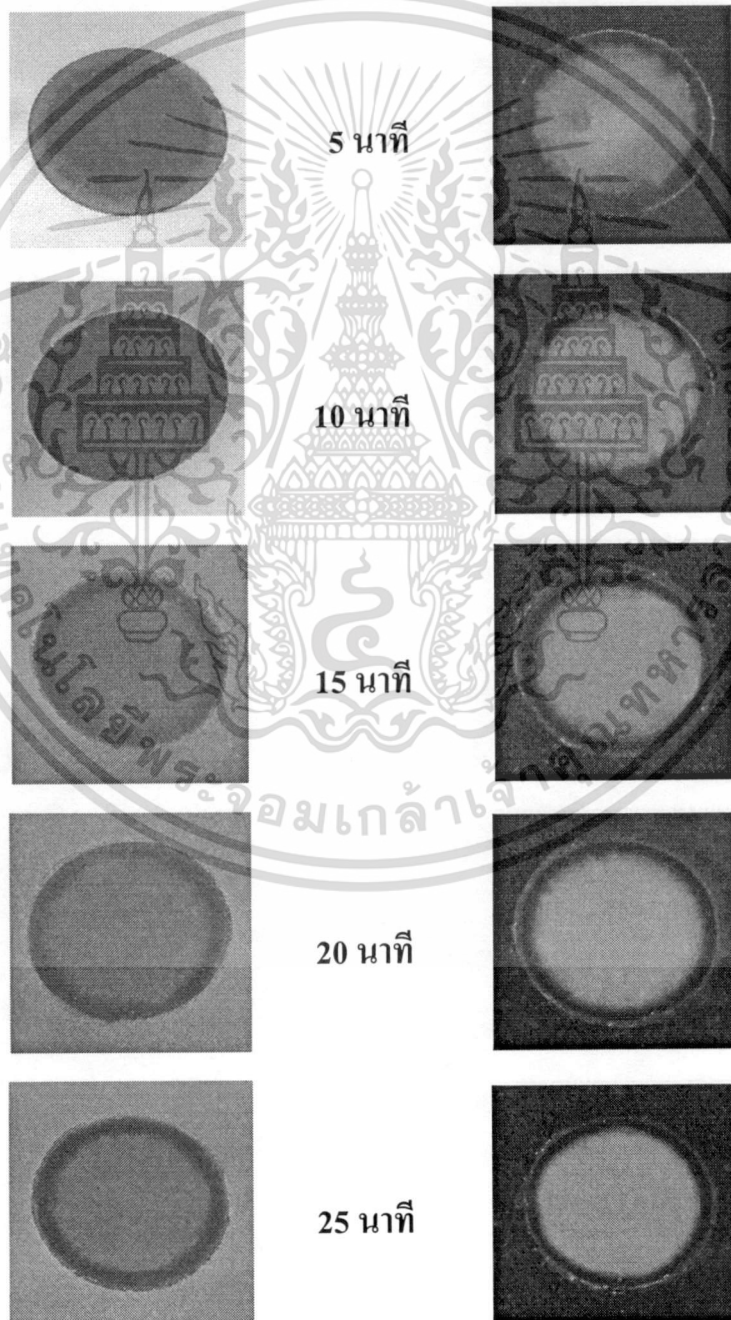
(ก) พื้นผิวของชั้นพอร์สซีดีคอน (ข) การเรืองแสงของชั้นพอร์สซีดีคอน

จากรูปที่ 4.4 (ก) สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วน 4:1 มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ พร้อมทั้งมีโครงสร้างที่ไม่ประปรายแตกหักง่าย ซึ่งที่อัตราส่วน 3:1, 2:1, 1:1 มีโครงสร้างที่ประปรายไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกหักง่าย และสังเกตสมบัติการเรืองแสงของชั้นพอร์ซเซลิคอนด้วยการฉายแสงจากหลอดแบลคไลท์ ดังรูปที่ 4.4 (ข) สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วน 4:1 มีการเรืองแสงสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสร้างชั้นพอร์ซเซลิคอน

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึง ผลของเวลาในการสร้างชั้นพอร์ซเซลิคอนด้วยวิธีการเอโนโคไซด์เซชัน โดยทำการสร้างชั้นพอร์ซเซลิคอนด้วยวิธีการเอโนโคไซด์เซชัน ใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ ได้ชั้นพอร์ซเซลิคอน แสดงดังรูปที่ 4.5



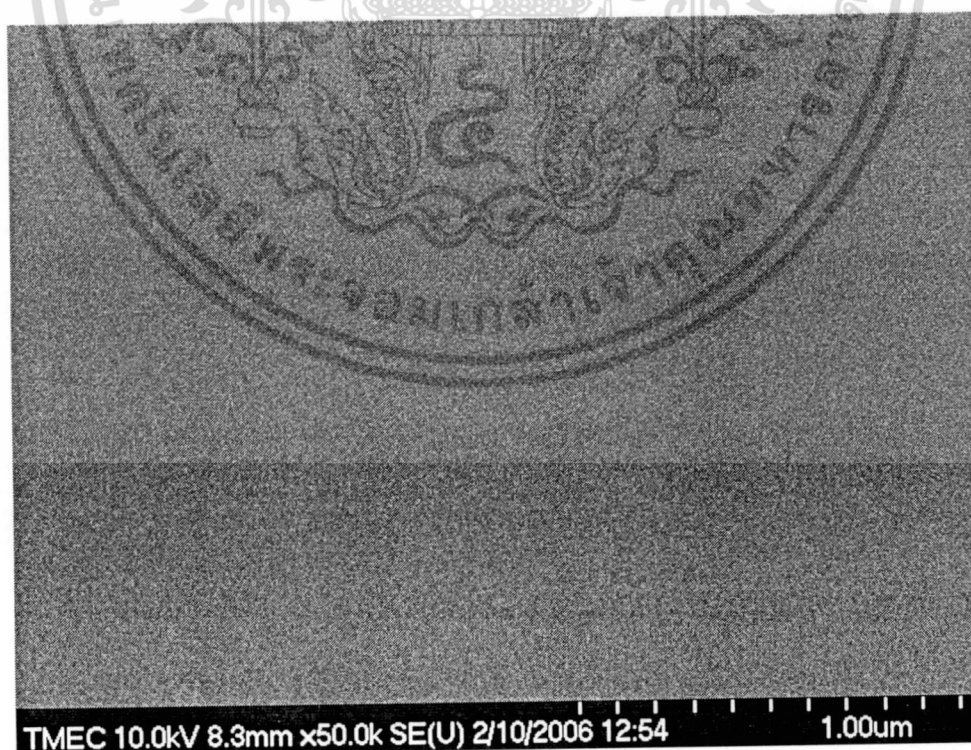
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาต(ข)ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 ชั้นพอร์สซิติคอนที่เวลาในการสร้างต่างๆ กัน (ก) พื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอน (ข) การเรืองแสงของชั้นพอร์สซิติคอน

จากรูปที่ 4.5 (ก) สังเกตได้ว่าเมื่อใช้เวลานานขึ้นสีของชั้นพอร์สซิติคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน และเมื่อสังเกตสมบัติการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิติคอน ด้วยการฉายแสงจากหลอดแบลคไลท์ แสดงดังรูปที่ 4.5 (ข) สังเกตได้ว่าสีในการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิติคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีส้มเข้มไปเป็นสีส้มอ่อน เนื่องจากใช้เวลาในการกักเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอนจึงถูกกักนานขึ้นส่งผลทำให้ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนมีเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้สีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน และการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิติคอนจึงมีการเปลี่ยนแปลงจากสีส้มเข้มไปเป็นสีส้มอ่อน

4.2.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอนด้วยเครื่อง SEM

ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างโดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ ซึ่งได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.6-4.13

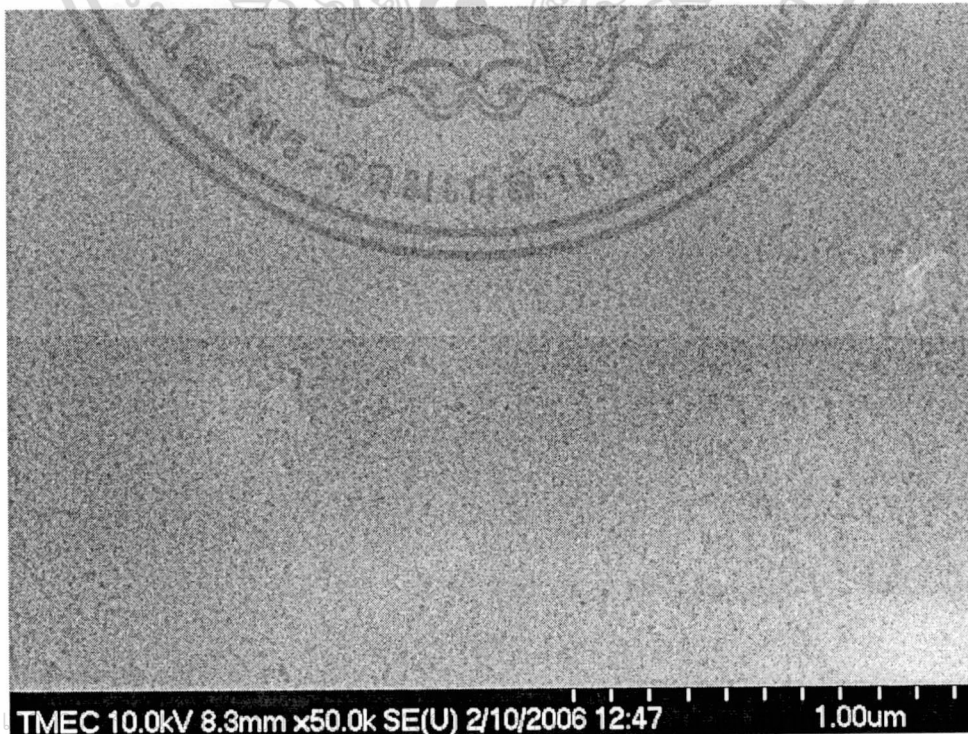


รูปที่ 4.6 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



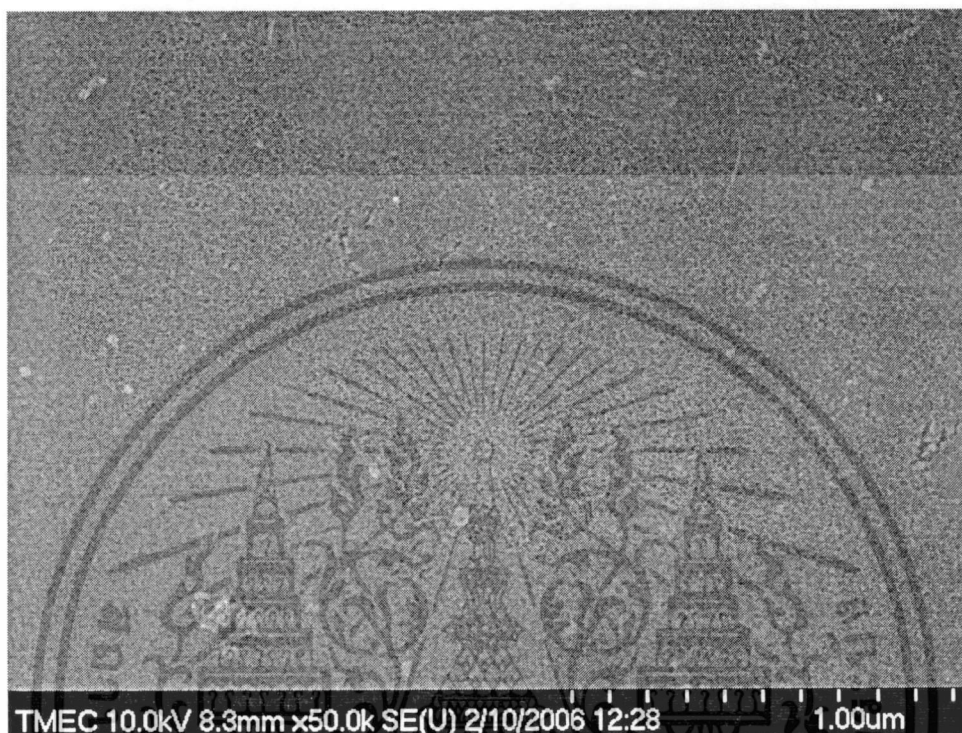
รูปที่ 4.7 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที



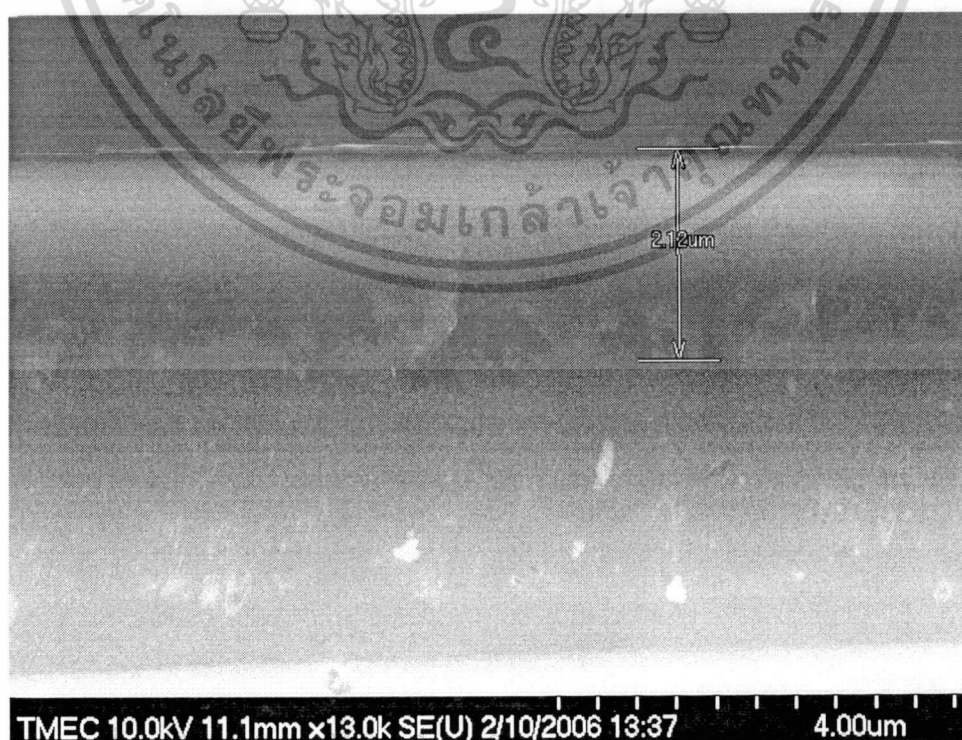
เอกสารนี้เป็นเอกสารค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์ซเซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที

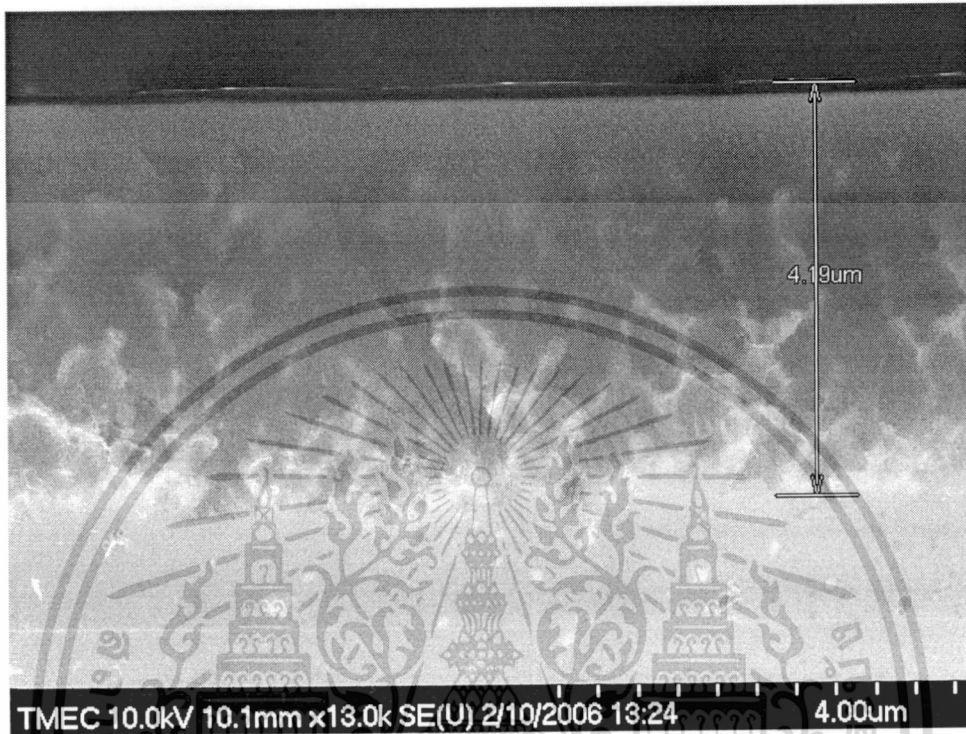


รูปที่ 4.9 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์ซเซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที

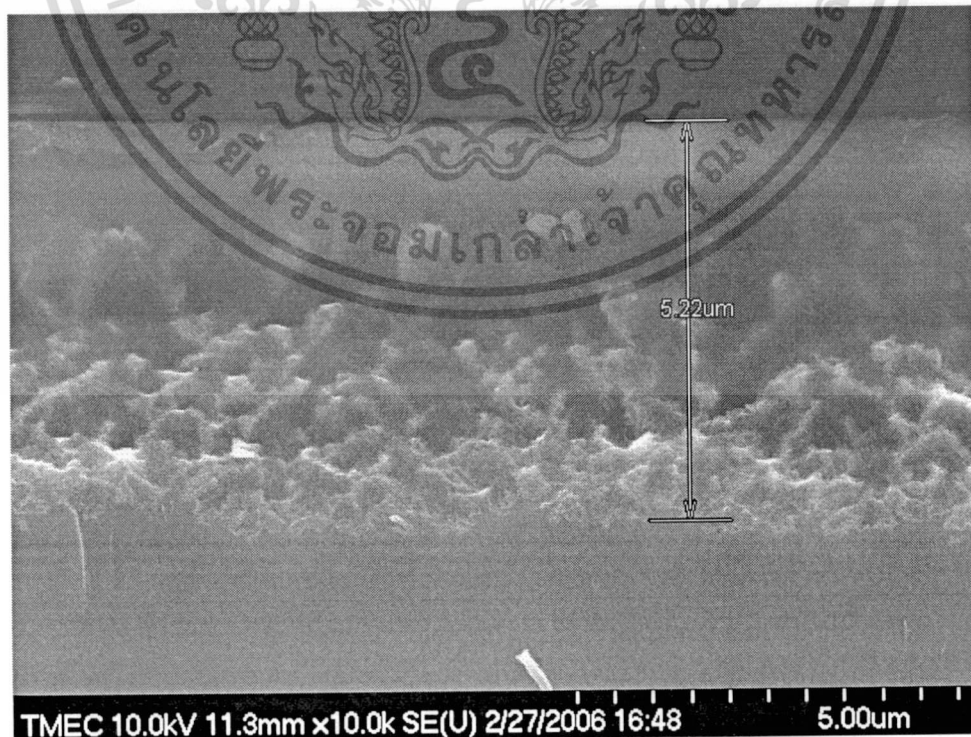


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นาเบเซบระเยชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซเซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที

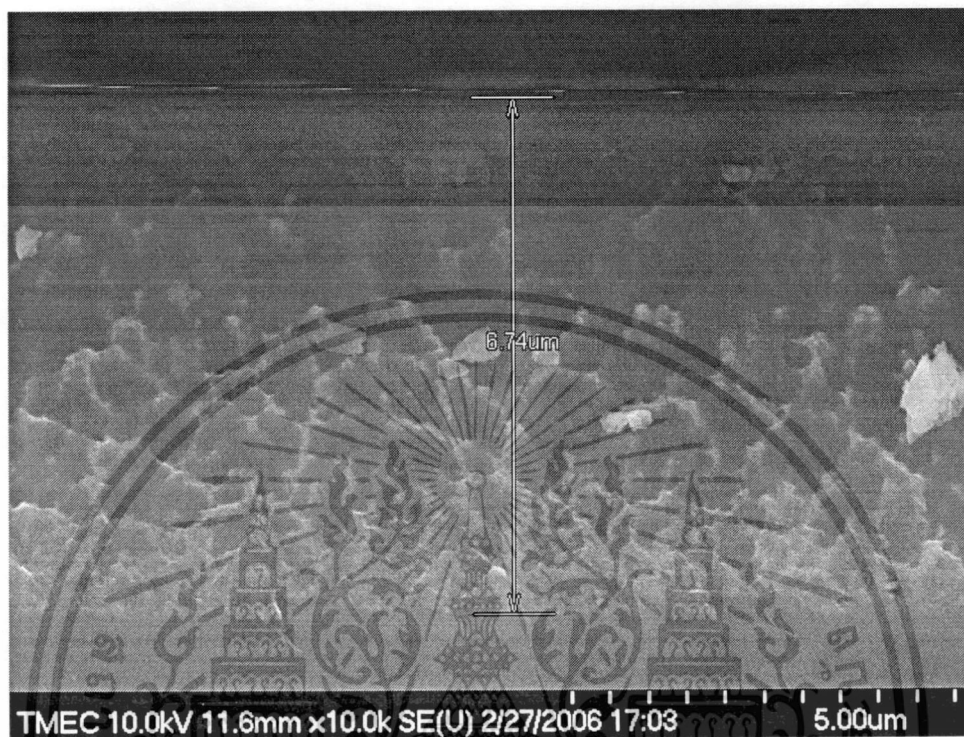


รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซเซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิติคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที



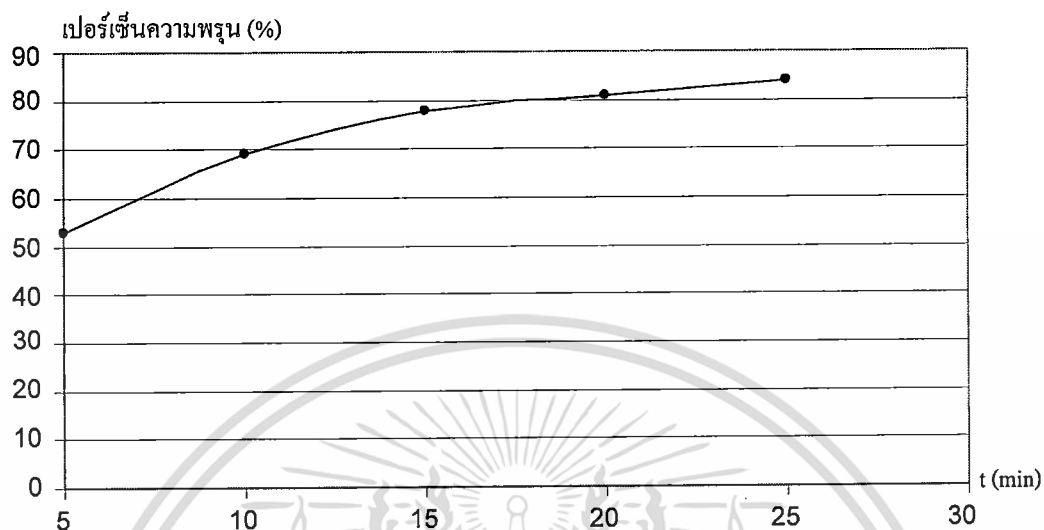
รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิติคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที

จากรูปที่ 4.6-4.9 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นพอร์ซซิติคอนด้วยวิธีการแอนโอดิซ์เซชันจะมีผลทำให้พื้นผิวของชั้นพอร์ซซิติคอนถูกกัดและทำให้รูพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากรูปที่ 4.10-4.13 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นพอร์ซซิติคอนด้วยวิธีการแอนโอดิซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นพอร์ซซิติคอนมีความหนาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการแอนโอดิซ์เซชันมากขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการกัดชั้นพอร์ซซิติคอนนานขึ้น ส่งผลทำให้รูพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และความหนาของชั้นพอร์ซซิติคอนเพิ่มมากขึ้น

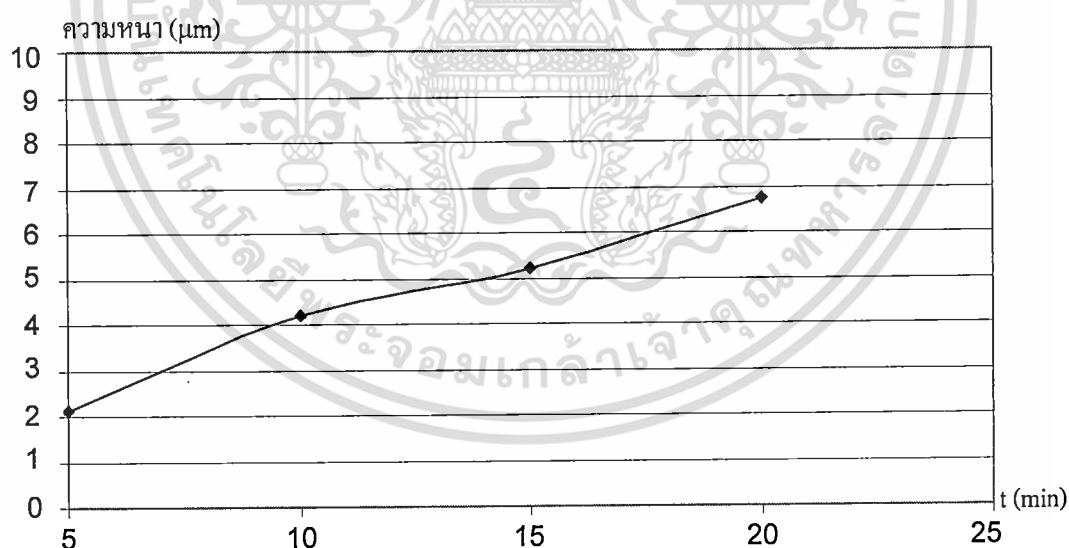
4.2.1 การศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นพอร์ซซิติคอน

ทำการศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นพอร์ซซิติคอนที่สร้างโดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ โดยอ้างอิงความพรุน [49] และความหนา จากรูปที่ 5.6 ถึง 5.13 และคำนวณหาค่าความพรุนจากสมการเปอร์เซ็นต์ความพรุนโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน แสดงดังรูปที่ 4.14-4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาในการ
แอนโดไซเซชัน



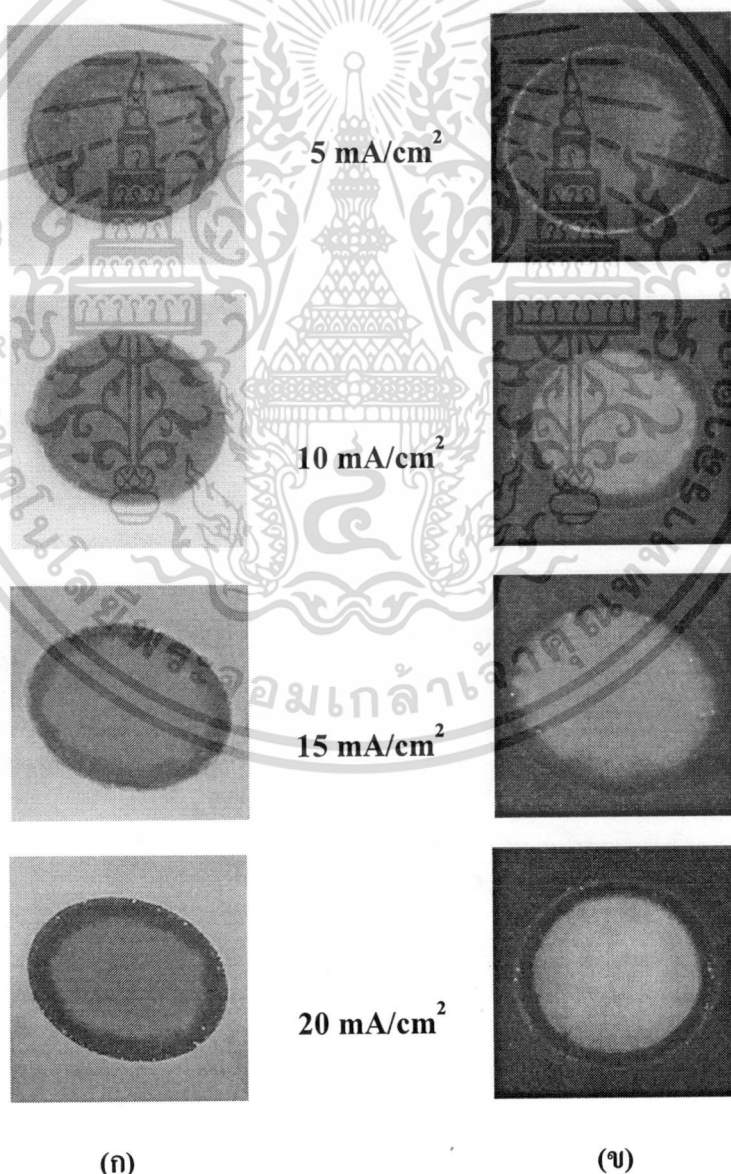
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาในการแอนโดไซเซชัน

จากรูปที่ 4.14-4.15 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอนโดไซเซชันจะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิติคอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิติคอนมี

ความหนาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าเวลาในการแอโนไดซ์เซชันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งเปอร์เซ็นต์ความพรุนและความลึกของชั้นพอร์สซิลิกอนด้วย

4.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

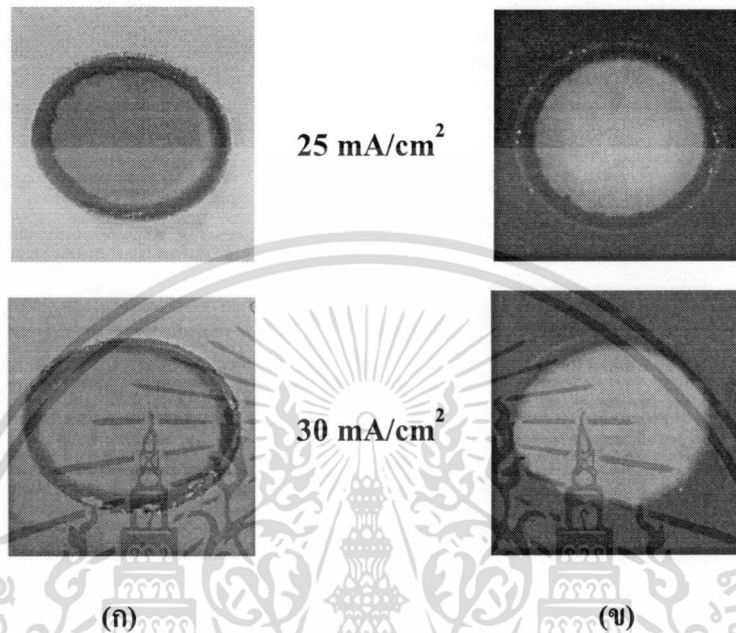
การทดลองนี้ทำการศึกษาถึง ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2 , 10 mA/cm^2 , 15 mA/cm^2 , 20 mA/cm^2 , 25 mA/cm^2 และ 30 mA/cm^2 ได้ชั้นพอร์สซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ชั้นพอร์สซิลิกอนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) พื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิคอน (ข) การเรืองแสงของชั้นพอร์สซิลิคอน



รูปที่ 4.16 (ต่อ) ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน

(ก) พื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิคอน (ข) การเรืองแสงของชั้นพอร์สซิลิคอน

จากรูปที่ 4.16 (ก) สังเกตได้ว่าเมื่อใช้เวลามากขึ้นสีของชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน และเมื่อสังเกตสมบัติการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิลิคอน ด้วยการฉายแสงจากหลอดแบลคไลต์ แสดงดังรูปที่ 4.16 (ข) สังเกตได้ว่าสีในการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีส้มเข้มไปเป็นสีส้มอ่อน เนื่องจากการใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการกัดเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนจึงถูกกัดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนมีเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน และการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนจึงมีการเปลี่ยนแปลงจากสีส้มเข้มไปเป็นสีส้มอ่อน

4.3.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเครื่อง SEM

ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mA/cm^2 , 10 mA/cm^2 , 15 mA/cm^2 และ 20 mA/cm^2 ตามลำดับ ซึ่งได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.17-4.23



รูปที่ 4.17 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สคาร์บอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

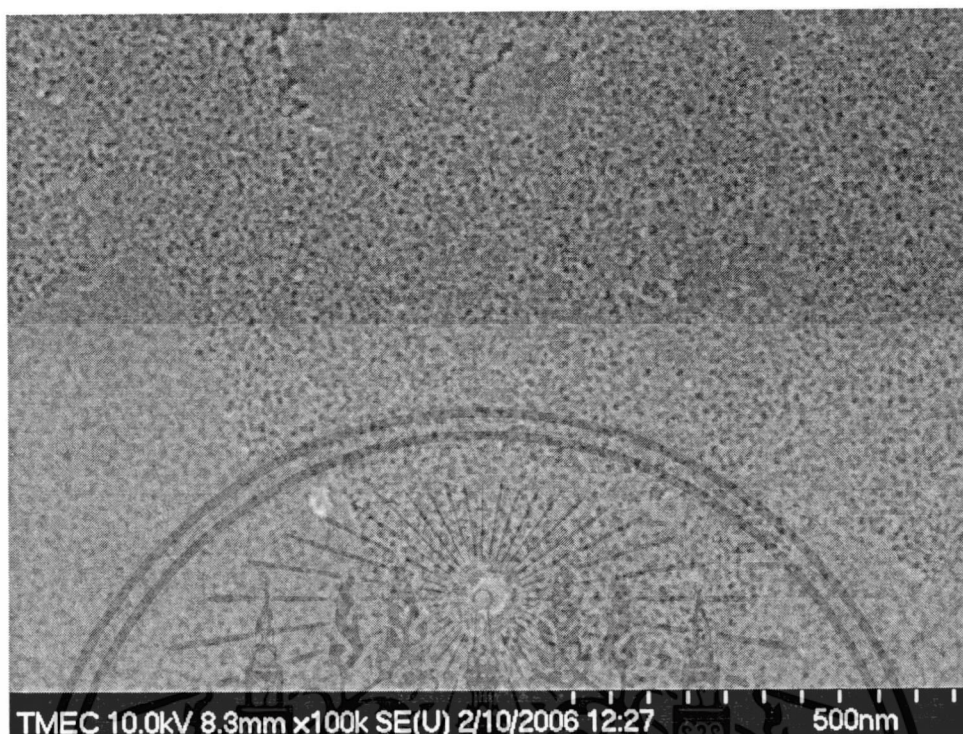


รูปที่ 4.18 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2

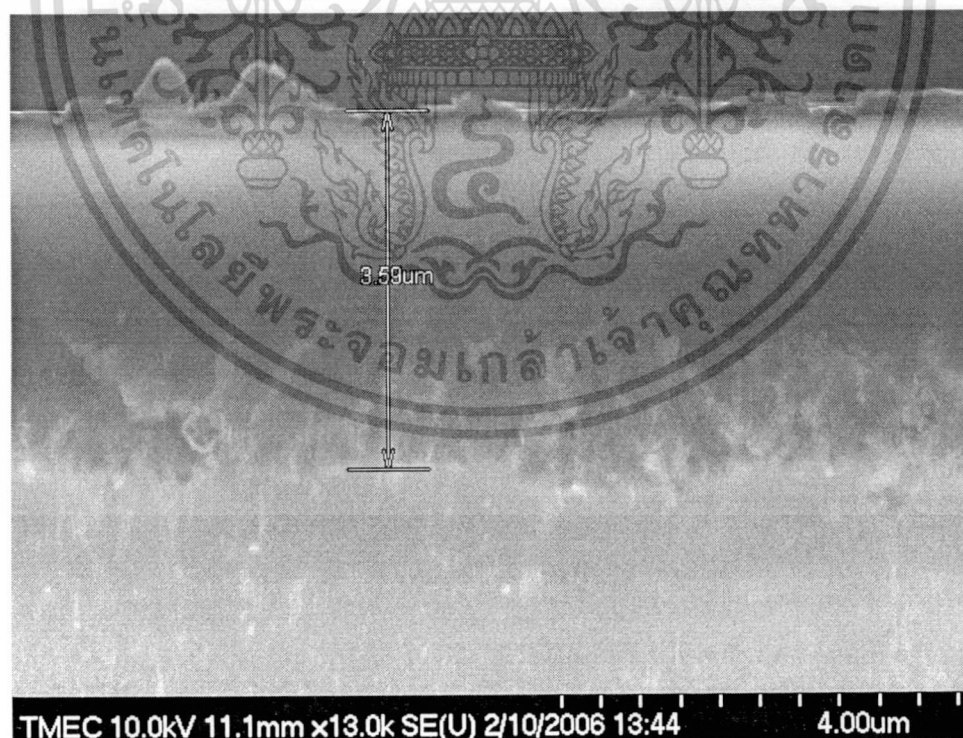


รูปที่ 4.19 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

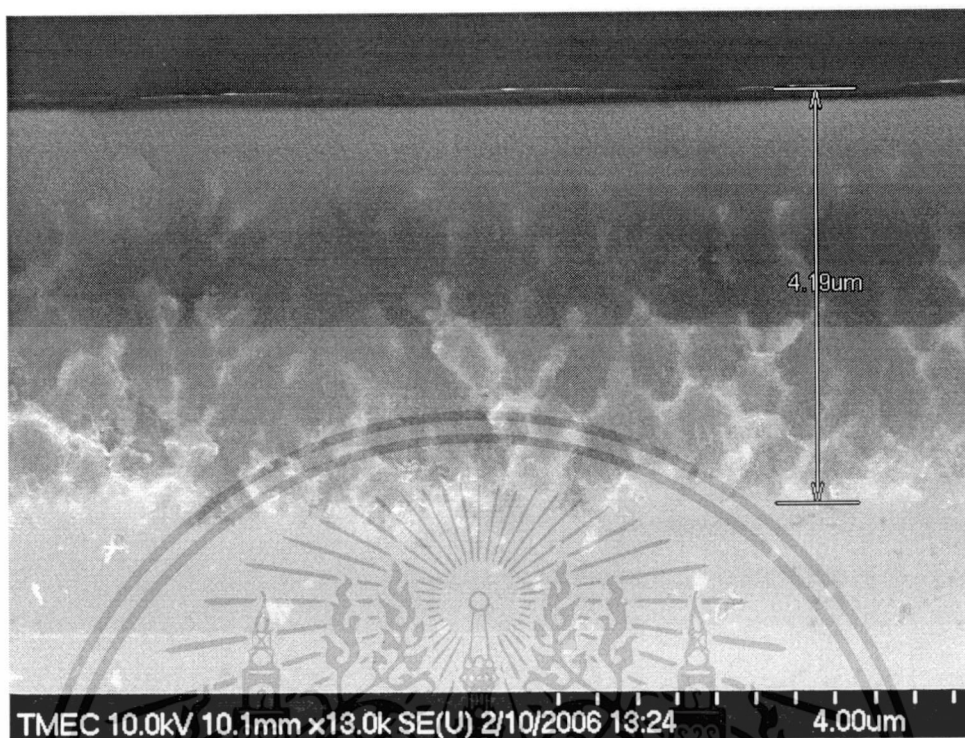


รูปที่ 4.20 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm^2

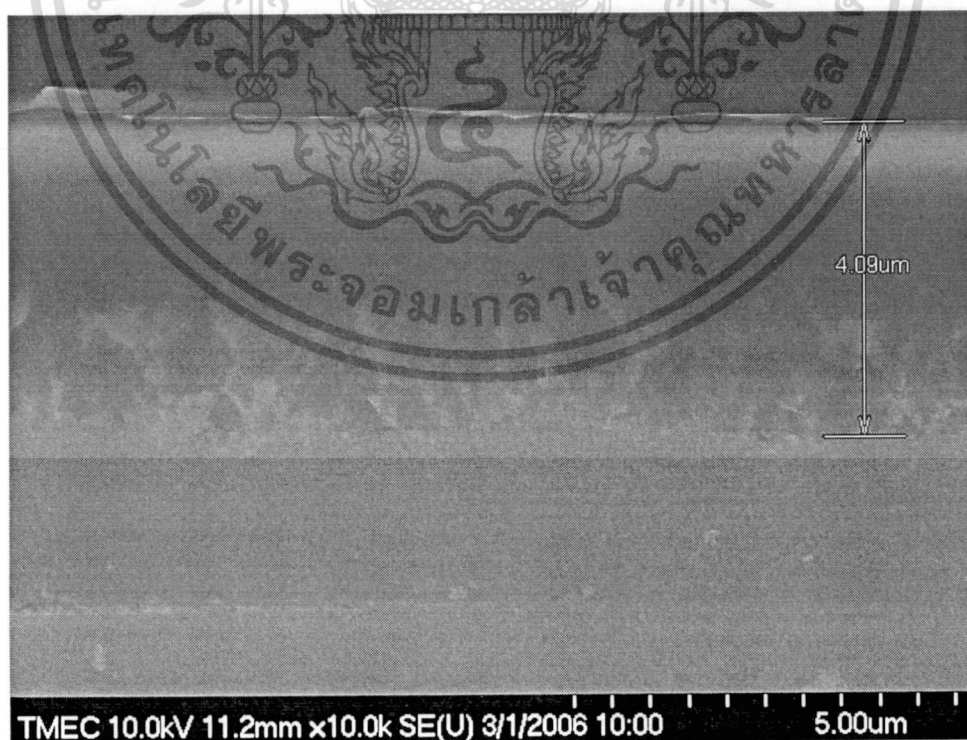


รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm²

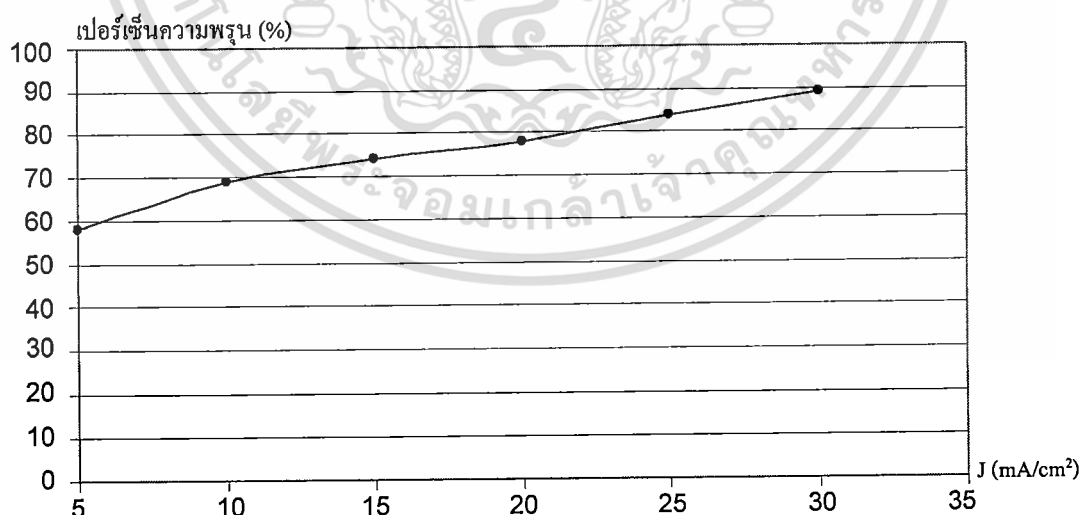


รูปที่ 4.23 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm²
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

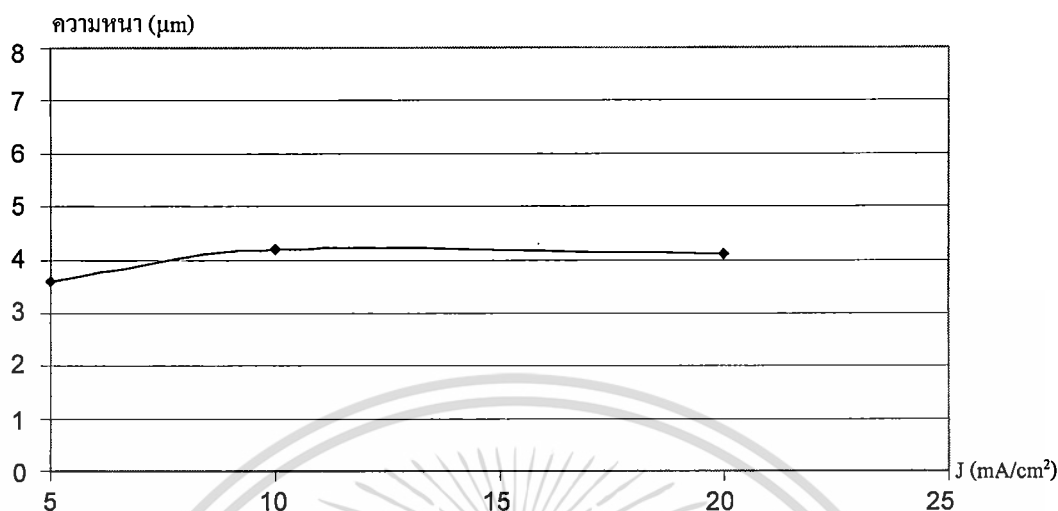
จากรูปที่ 4.17-4.20 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการเอโนไคเซชันจะมีผลทำให้พื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิคอนถูกกัดและทำให้รูพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากรูปที่ 4.21-4.23 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการเอโนไคเซชันจะมีผลทำให้ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนไคเซชันมากขึ้น ทำให้พาหะโฮลในซิลิคอนขณะทำการกัดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้รูพรุนของพอร์สซิลิคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเอโนไคเซชันใช้เวลาเท่ากัน

4.3.2 การศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นพอร์สซิลิคอน

ทำการศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2 , 10 mA/cm^2 , 15 mA/cm^2 และ 20 mA/cm^2 ตามลำดับ โดยอ้างอิงความพรุน [49] และความหนา จากรูปที่ 4.17 ถึง 4.23 และคำนวณหาค่าความพรุนจากสมการเปอร์เซ็นต์ความพรุนโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน แสดงดังรูปที่ 4.24-4.25



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนไคเซชัน



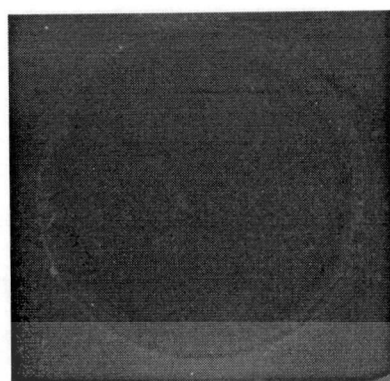
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนโดซ์เซชัน

จากรูปที่ 4.24-4.25 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการเอโนโดซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนโดซ์เซชันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นพอร์สซิลิคอนแต่ไม่มีผลกับความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอน

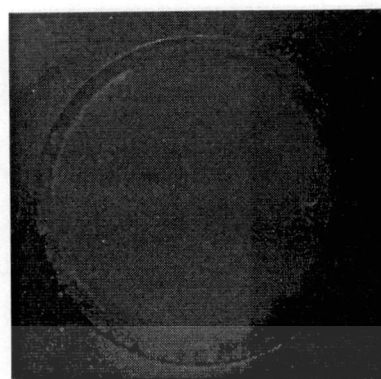
4.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟ

โด้ลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิคอน

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงผลของโครงสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโด้ลูมิเนสเซนซ์ ทั้งในส่วนของความยาวคลื่น และความเข้มแสง โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน ที่นำมาศึกษานี้จะถูกทำการสร้างขึ้นมาให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถพิจารณาอย่างคร่าวๆได้ โดยการสังเกตจากสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.26



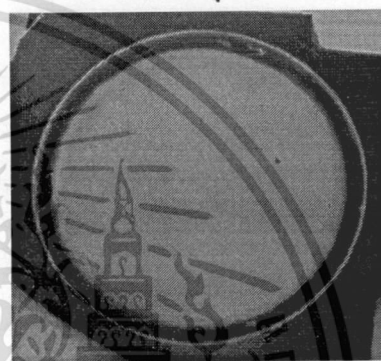
เปอร์เซ็นต์ความพรุน 60 %



เปอร์เซ็นต์ความพรุน 68 %



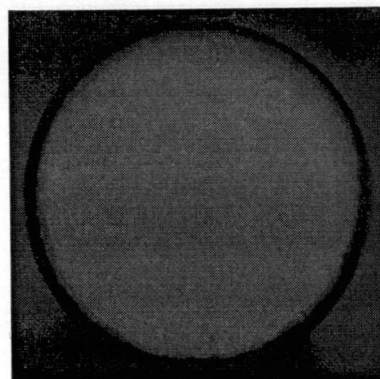
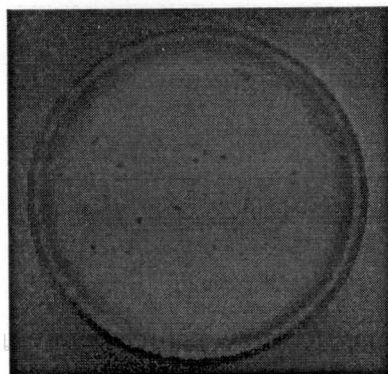
เปอร์เซ็นต์ความพรุน 76 %



เปอร์เซ็นต์ความพรุน 85 %

รูปที่ 4.26 แสดงสี่ที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์ซซิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อชั้นพอร์ซซิกอนถูกสร้างให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น สี่ที่บริเวณผิวหน้าด้านบนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนไปด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มต้นจากสีน้ำตาลอมดำ ไปสู่น้ำตาลอมแดง และสีเหลือง ในที่สุด เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิกอนมีค่ามากขึ้นตั้งแต่ 60 % ไปจนถึง 85 % และเมื่อนำชั้นพอร์ซซิกอนที่แสดงในรูปที่ 4.26 เหล่านี้ ไปทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ โดยชั้นพอร์ซซิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างกันจะให้สีของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ แตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 4.27



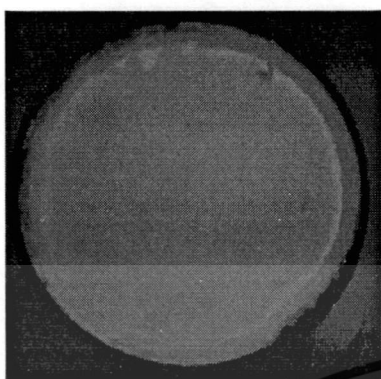
เอกสารนี้เป็น

เพื่อการศึกษเท่านั้น

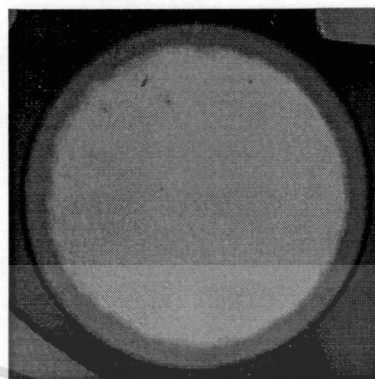
การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร (60 %)



ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (68 %)



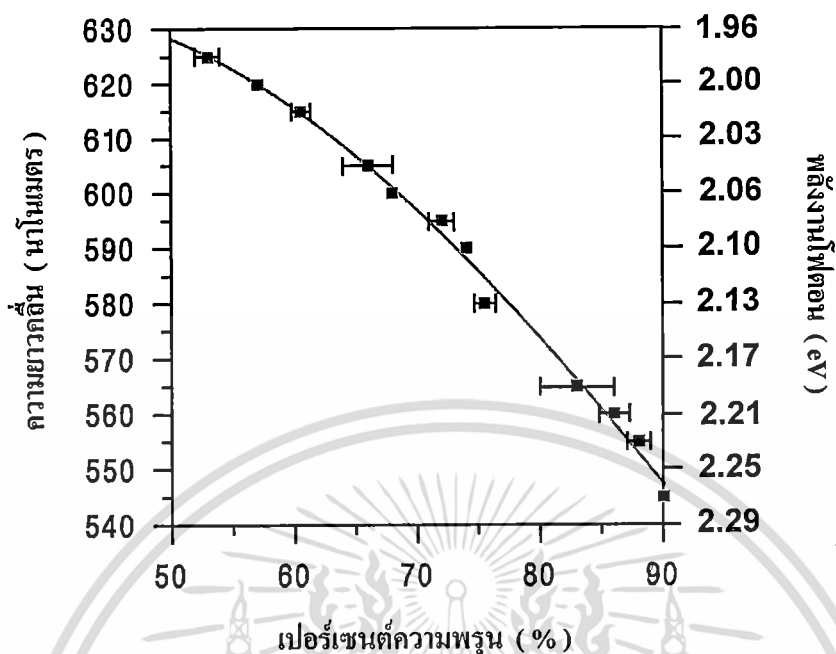
ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร (76 %)

ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (85 %)

รูปที่ 4.27 แสดงสีของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ซึ่งได้จากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน

จากรูปข้างต้น สีของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่านี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน โดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มจากสีแดงเข้มที่ความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 60% ไปสู่ สีแดงอมส้มที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 68% สีส้มเหลืองที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 76 % และสีเหลืองที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 85% จะเห็นได้ว่าสีเหล่านี้มีค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์เปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงมากขึ้นนั่นเอง ในการทดลองนี้ได้ทำการรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนกับคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ในส่วนของความยาวคลื่นแสง จากผลการทดลองทั้งสองข้างต้นมาแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

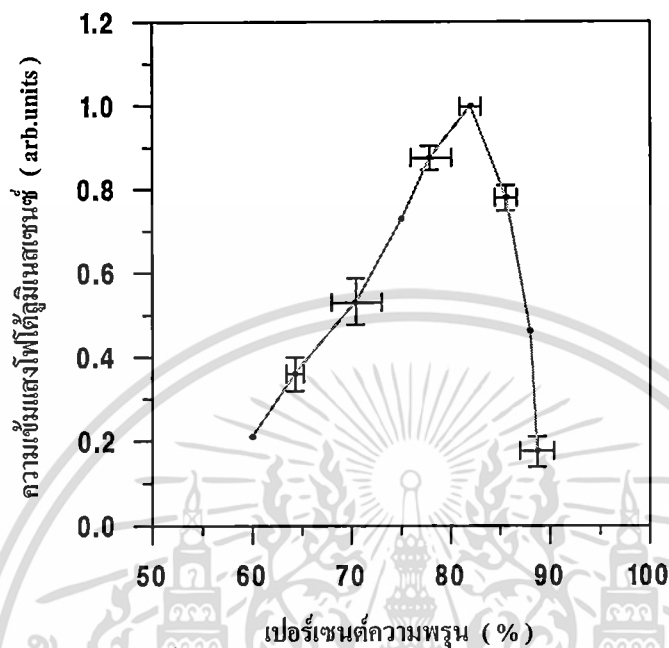


รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอนกับความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อเราทำการลดขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิติคอนลง โดยการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนให้แก่ชั้นพอร์ซซิติคอน ด้วยการใช้เงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ อาทิเช่น การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส , การลดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก หรือการเพิ่มเวลาในการ anodization เป็นต้น นั้น จะมีผลทำให้ความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลง หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือ โครงสร้างพอร์ซซิติคอนมีขนาดของช่องว่างพลังงานเพิ่มสูงมากขึ้นจากเดิม โดยสามารถดูได้จากค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่าชั้นพอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำกว่า 50 % ลงไปนั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์แต่อย่างใด ส่วนชั้นพอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 54 % จนถึง 90 % จะแสดงคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ โดยจะมีความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ลดลงจาก 625 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV นั่นเอง ซึ่งทั้งหมดที่ได้แสดงมานี้สามารถยืนยันถึงการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ Quantum wire effect ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

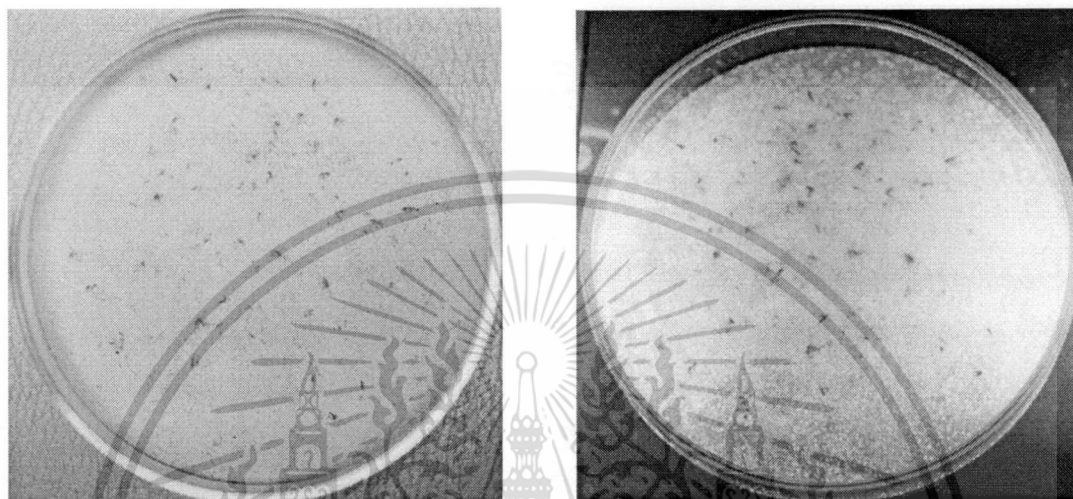
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน กับคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ในส่วนของความเข้มแสง จะถูกนำมาแสดงเอาไว้ในรูปแบบที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นพอร์สซิติคอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ได้ออกมาจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงจะมีพื้นที่ผิวของโครงสร้างพอร์สซิติคอนมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเท่ากับเป็นการไปเพิ่มพื้นที่ในการเปล่งแสง ดังนั้นเมื่อเกิดปรากฏการณ์โฟโวลูมิเนสเซนซ์จึงทำให้ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงกว่า มีปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์สูงขึ้นไปตามด้วย ซึ่งจากผลการทดลองที่แสดงในรูปแบบที่ 4.29 พบว่าปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเข้มแสงจะมีปริมาณสูงที่สุด เมื่อชั้นพอร์สซิติคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 81% - 83% ต่อจากนั้นปริมาณความเข้มแสงก็จะมีค่าลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนมีค่าสูงเกินกว่านี้ขึ้นไป สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงมากานั้น โครงสร้างจะมีความอ่อนแอ และมีความเปราะบางสูงมากตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างที่มีขนาดเล็กหลายๆบางส่วนสามารถหลุดออกมาในระหว่างกระบวนการสร้าง หรือกระบวนการทำความสะอาดผิวหน้าได้ ชั้นส่วนของพอร์สซิติคอนที่หลุดออกมานี้ เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีขนาดเล็กมากๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ก) โดยผงละเอียดเหล่านี้สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ เมื่อถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ข) เรียกชิ้นส่วนของพอร์ซซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดเหล่านี้ว่า “ Free standing porous silicon ”



(ก)

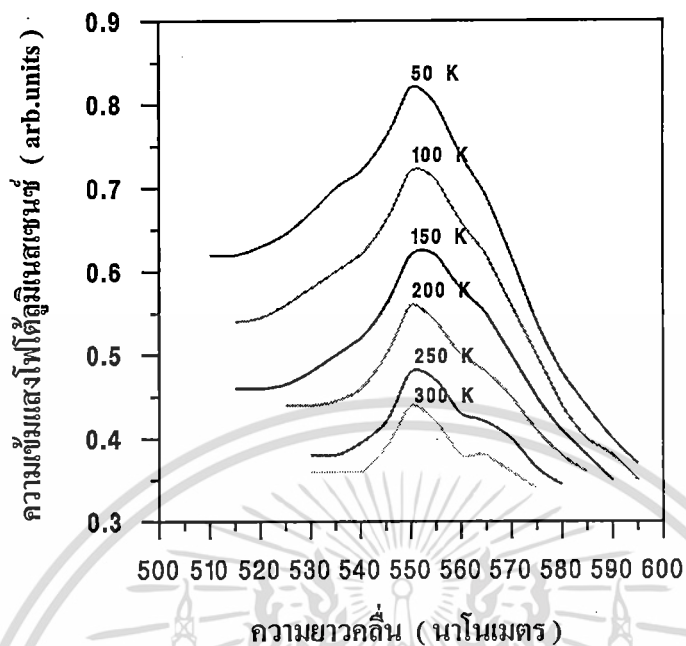
(ข)

รูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่ายของ Free standing porous silicon ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยที่ (ก) ก่อนทำการฉายแสงด้วยแสงอุลตราไวโอเลต
(ข) ขณะทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต

4.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์ซซิลิกอน

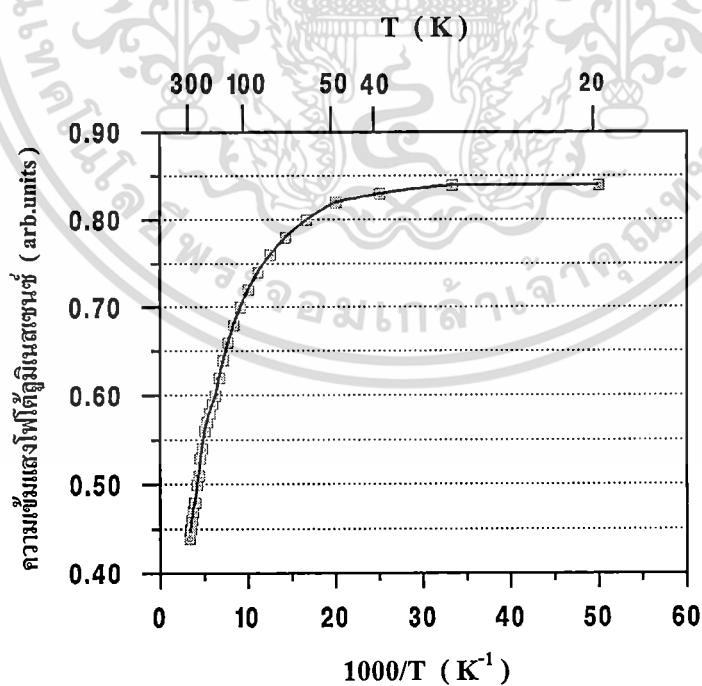
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิลิกอนนี้ ชิ้นของพอร์ซซิลิกอนที่นำมาศึกษาจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี หนา 100 มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร ให้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที พอร์ซซิลิกอนที่ได้ทำการสร้างขึ้นตามเงื่อนไขเหล่านี้จะถูกนำไปบรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิดของเครื่อง Cryostat ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศที่ความดัน $6 \times 10^{-7} \text{ mbar}$ ต่อจากนั้นก็ทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่าที่ต่ำลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน จนถึง 20 เคลวิน โดยในระหว่างการลดอุณหภูมินั้นก็จะทำการวัดสเปกตรัมของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงสเปกตรัมแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซิลิกอนที่อุณหภูมิต่างๆ

ส่วนความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อความเข้มแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์นั้น จะถูกแสดงเอาไว้
ในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิ

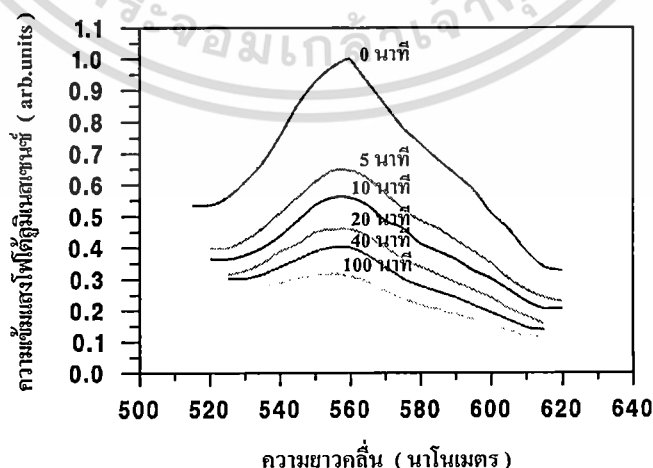
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องลงไปนั้น จะมีผลทำให้ความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซีลิกอนที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน จนไปถึงที่อุณหภูมิประมาณ 100 เคลวิน ต่อจากนั้นความเข้มแสงก็จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีค่าคงที่ในที่สุด เมื่ออุณหภูมิมียุคต่ำกว่า 50 เคลวิน ลงไป ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำมากขึ้นนั้น จะลดผลของพลังงานกระตุ้นเนื่องจากความร้อนที่มีต่อพาหะลง ทำให้อัตราการรวมตัวแบบเปล่งแสงที่อุณหภูมิต่ำนั้นจึงมีปริมาณที่สูงขึ้นนั่นเอง

4.6 การทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์ซซีลิกอน

4.6.1 การศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์ซซีลิกอนภายใต้แสงอุลตราไวโอเล็ต

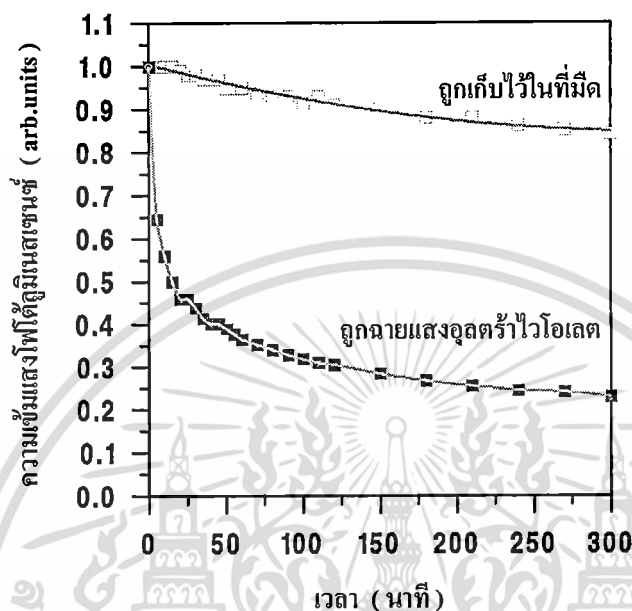
ในการทดลองนี้ได้ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระบาย 100 มีสภาพต้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นวัสดุเริ่มต้น เพื่อสร้างชั้นพอร์ซซีลิกอนโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ดังต่อไปนี้คือ ใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที หลังจากนั้น จึงนำไปทำการศึกษาถึงผลของการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตที่มีต่อเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซีลิกอนที่อยู่ในอากาศ โดยกราฟในรูปที่ 4.33 จะแสดงสเปกตรัมแสงที่ได้จากโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซีลิกอนที่อยู่ในอากาศ ณ เวลาในการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตต่างๆ



รูปที่ 4.33 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซีลิกอนที่เวลาในการฉายแสงอุลตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารไวโอเล็ตต่างๆกับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตนั้น ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.34

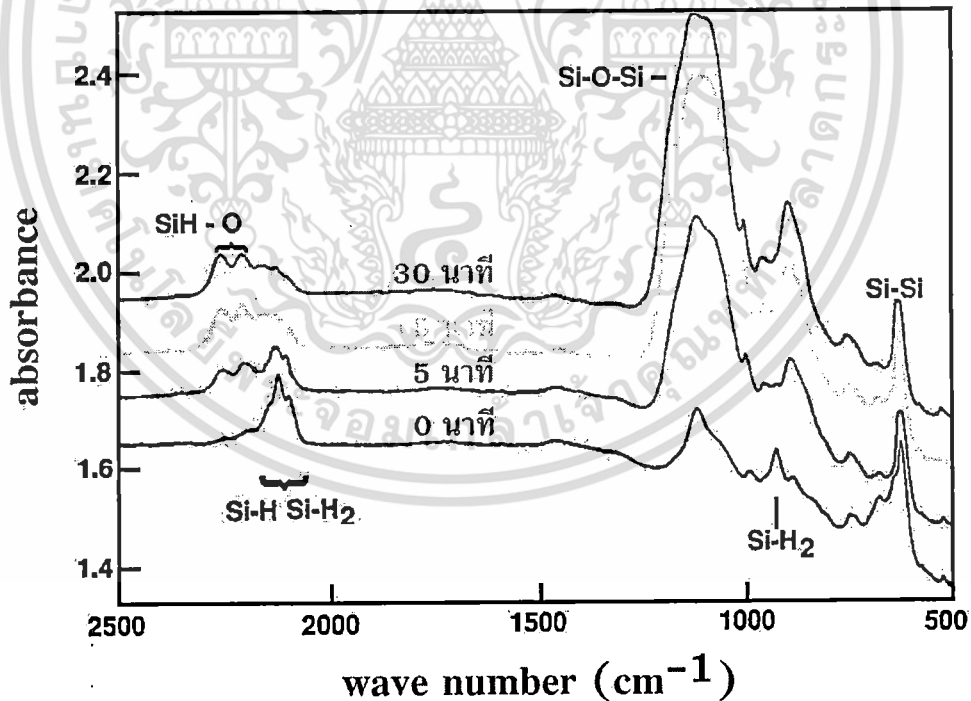


รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลต

จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์ เมื่อเวลาในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตผ่านไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกราฟรูปที่ 4.34 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของการลดลงของความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร ระหว่างพอร์สซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตอยู่ตลอดเวลา กับพอร์สซิลิกอนที่ถูกเก็บไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าในอากาศนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 ชั่วโมง พอร์สซิลิกอน ที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตอยู่ตลอดเวลาจะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจะมีปริมาณความเข้มแสงเหลืออยู่เพียงประมาณ 25% จากปริมาณความเข้มแสงเริ่มต้น ส่วนพอร์สซิลิกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา จะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงเหลืออยู่ประมาณ 85% เท่านั้น จะเห็นได้ว่าพอร์สซิลิกอนที่ไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลาในอากาศ จะมีการ

ลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ในปริมาณที่น้อยกว่าพอร์ซซิลิกอนที่ถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลาอยู่มาก

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่า การฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์ซซิลิกอนเป็นเวลานานๆจะมีผลต่อความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิลิกอน โดยที่ลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์นี้ น่าจะมีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอน ซึ่งการจับพันธะกันของไฮโดรเจนและซิลิกอนนั้นมีได้หลายรูปแบบด้วยกัน [26] เช่น SiH , SiH_2 , $(\text{SiH}_2)_n$ และเพื่อเป็นการสนับสนุนข้อสันนิษฐานนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอน ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องวัดฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของ Perkin Elmer ซึ่งผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่ถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตเป็นเวลาที่ต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตเป็นเวลาที่ต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ

โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพอร์ซซิลิกอนที่ตำแหน่งเลขคลื่น (wave number) ต่างๆจากกราฟในรูปที่ 4.35 ข้างต้นนี้ จะบอกถึงชนิดและลักษณะของพันธะที่อยู่ ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอนได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3

แสดงชนิดและลักษณะของพันธะที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆของพอร์ซซิลิกอน [25]

เลขคลื่น (cm^{-1})	โหมด
617	Si - Si stretching
907	Si - H ₂ bending
1105	Si - O - Si asymmetric stretching
2089	Si - H stretching
2135	Si - H ₂ stretching
2202 - 2253	Si - H - O stretching

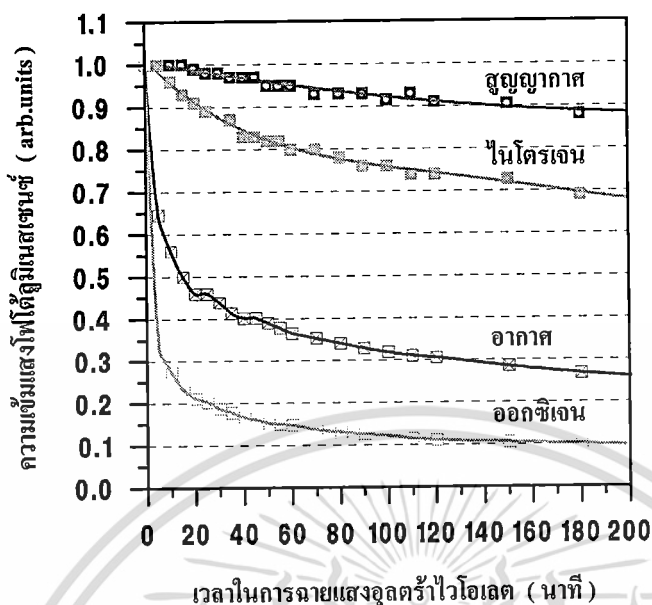
พิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.35 และตารางที่ 4.3 จะสามารถสังเกตเห็นการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 907 cm^{-1} และ $2089 - 2135 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งการดูดกลืนทั้งสองตำแหน่งในที่นี่จะเกิดจากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของอะตอมชุด Si-H ที่มีการสั่นแบบการงอตัว (Bending) และแบบการยืดตัว (Stretching) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตให้แก่พอร์ซซิลิกอนเป็นเวลานานๆ จะมีผลทำให้จำนวนพันธะระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอนมีปริมาณที่ลดลง โดยจะสังเกตได้จากการลดลงของสเปกตรัมการดูดกลืนของอะตอมชุด Si-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 907 cm^{-1} และ $2089 - 2135 \text{ cm}^{-1}$ นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ทำการฉายให้แก่พอร์ซซิลิกอนเป็นเวลานานๆได้ไปทำลายพันธะระหว่างซิลิกอน กับไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) ที่จับตัวกันอยู่ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอน เกิดพันธะแขวนขาด (dangling bonds) ของซิลิกอนขึ้น พันธะแขวนขาดของซิลิกอนเหล่านี้เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมของอากาศปกติจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O-Si) ขึ้นมาแทนพันธะระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่ง 1105 cm^{-1} และการปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ $2202 - 2253\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นของพันธะ Si-H-O เมื่อทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ตให้แก่พอร์สซิลิกอนเป็นเวลานานๆ พันธะแขนขาและพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ จะเป็นจุดที่ทำให้การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน มีลักษณะเป็นการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนลดลง จากผลการทดลองนี้เองได้สนับสนุนสาเหตุ และที่มาของการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนได้ว่า เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiation recombination) ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน นั้นเอง

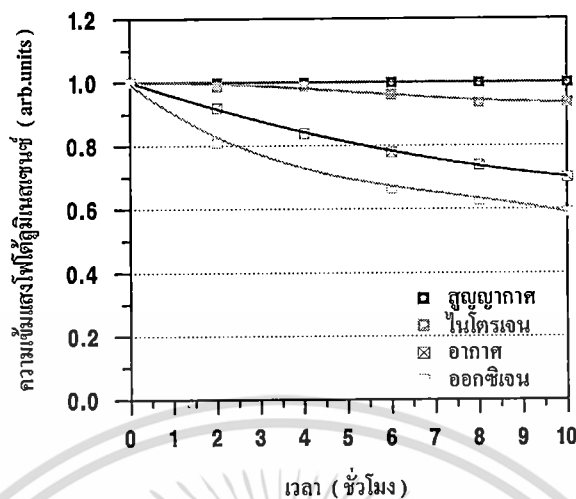
4.6.2 การศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอนที่อยู่ในสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆ

ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของก๊าซชนิดต่างๆที่มีต่อเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน ณ. ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ตอยู่ตลอดเวลา และที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ตตลอดเวลา โดยพอร์สซิลิกอนที่นำมาศึกษาจะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิดซึ่งภายในจะบรรจุเต็มไปด้วยบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน อากาศ และสูญญากาศ เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยกราฟในรูปที่ 4.36 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตให้แก่พอร์สซิลิกอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์สซิลิกอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ถึง การเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของพอร์สซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน ปริมาณความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วมาก โดยจะมีปริมาณความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์เหลืออยู่เพียงประมาณ 10% จากปริมาณความเข้มแสงเริ่มต้น เมื่อเวลาฉายแสงอุลตราไวโอเลตผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งจะแตกต่างกันกับในกรณีของพอร์สซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมอื่นๆ อันได้แก่ อากาศ ไนโตรเจน และในสุญญากาศ ที่ความดัน 1×10^{-6} mbar โดยจะพบว่าความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าที่อยู่ในก๊าซออกซิเจน กล่าวคือจะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงเหลืออยู่ประมาณ 30% , 70% และ 90% ตามลำดับ ในส่วนกรณีของพอร์สซิลิกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา และอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการแสดงความสัมพันธ์เอาไว้ในรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมงเท่ากัน พบว่าปริมาณความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์จะลดลงเหลืออยู่ประมาณ 80% และ 90% สำหรับพอร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน และในอากาศ ตามลำดับ ส่วนพอร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซไนโตรเจนนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์ในปริมาณที่น้อยมากๆ และพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงไฟได้ลูมิเนสเซนซ์เลย เมื่อพอร์สซิติคอนอยู่ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศ

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้เป็นการวิจัยพื้นฐานที่เกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติในการรับแสงของพอร์สซิลิกอน เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพอร์สซิลิกอนนั้นเป็นชั้นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า **anodization** ของแผ่นผลึกซิลิกอน ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยเนื้อหาการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

1. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 4.1 4.2 และ 4.3

2. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 4.4, 4.6 และ 4.7

นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาพบว่าเนื้อหาทั้งสองส่วนข้างต้น ยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันอยู่ ซึ่งได้ถูกเสนอเอาไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 4.5 โดยรายละเอียดทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้คือ

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขในการ **anodization** ซึ่งก็คือเงื่อนไขในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนนั่นเอง อันได้แก่ ชนิดและค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอน ความหนาแน่นกระแส เฟอร์เรนต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และเวลาที่ใช้ในการ **anodization** จะมีผลต่อลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน โดย

1. เกี่ยวกับโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ **anodization** ต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

■ การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี (0.1 - 30 โอห์ม-เซนติเมตร)

■ การลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (30 - 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร)

■ การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส (10 - 90 mA/cm²)

- การลดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47 % - 10 %)
- การเพิ่มเวลาในการ anodization (5 - 30 นาที)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีผลทำให้ชั้นพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้นกว่าเดิมได้ ซึ่งการที่ชั้นพอร์ซซิติคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้นนั้น สามารถสรุปได้ว่าเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างของพอร์ซซิติคอนมีขนาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีตามเงื่อนไขในการ anodization แบบต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั่นเอง โดยเราสามารถสังเกตการลดลงของขนาดโครงสร้างพอร์ซซิติคอนอย่างหายๆได้จากภาพถ่ายของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 - 15,000 เท่า สำหรับพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็น และที่กำลังขยาย 50,000 เท่า สำหรับพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี นอกจากนี้แล้วยังได้มีการนำเอาเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (FT-Raman) มาใช้วิเคราะห์หาขนาดของโครงสร้างพอร์ซซิติคอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ โดยจะเปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของผลึกซิติคอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยตรงให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรค่าต่างๆ ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานในงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า พอร์ซซิติคอนที่ถูกสร้างให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น จะมีขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรลดลงได้ โดย

พอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 13 nm

พอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 75 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 8 nm

พอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 79 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 5 nm

พอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 85 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 3 nm

2. เกี่ยวกับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิติคอน

จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

- การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี (0.1 - 30 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็น (30 - 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส (10 - 90 mA/cm²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ การลดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47 % - 10 %)

■ การเพิ่มเวลาในการ anodization (5 - 30 นาที)

จะมีผลทำให้แสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ได้ออกมาจากพอร์สซิลิกอนมีค่าความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงลดลง หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือมีค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้ จากการเคลื่อนของยอดสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ไปทางด้านความยาวคลื่นสั้น นั่นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนนั้นๆ จะต้องมีความกว้างของช่องว่างพลังงานเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม

นอกจากนี้แล้วผลการทดลองทั้ง 4 หัวข้อ (4.1 4.2 4.3 และ 4.4) ยังได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่างขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอน กับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ โดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.5 ดังนี้คือ การกำหนดเงื่อนไขในการ anodization แบบต่างๆข้างต้น ส่งผลทำให้โครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอนมีขนาดลดลงได้ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน นอกจากนี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ โดยทำให้ความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลงนั้น แสดงว่าการลดขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอนลง มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของพอร์สซิลิกอนมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง และจากการทดลองพบว่าชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำกว่า 50 % ลงไปนั้น ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ ส่วนชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 54 % ไปจนถึง 90 % สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ โดยจะมีค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลงจาก 625 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV ได้ ซึ่งทั้งหมดที่สรุปมานี้สามารถยืนยันได้ถึงการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect ได้เป็นอย่างดี

ส่วนการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่าเมื่อทำการลดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายในระบบปิดลง จะมีผลทำให้ปริมาณความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม และจะมีค่าคงที่ในที่สุดเมื่ออุณหภูมิมียุคต่ำกว่า 50 K ลงไป

สุดท้ายเป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตให้แก่พอร์สซิลิกอนเป็นเวลานานๆ มีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้ ซึ่งจากผลการศึกษายังพบต่อไปอีกว่าในการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์นี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วมาก เมื่อพอร์ซซีกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลาอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน ส่วนพอร์ซซีกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของสูญญากาศพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงน้อยที่สุด และไม่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงเลย เมื่อพอร์ซซีกอนถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา ในสภาพแวดล้อมของสูญญากาศ ดังสรุปผลการทดลองเอาไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

แสดงข้อมูลปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซีกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา กับพอร์ซซีกอนที่ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต ในสภาพแวดล้อมของก๊าซต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง

สภาพแวดล้อม	ปริมาณความเข้มแสงของพอร์ซซีกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา	ปริมาณความเข้มแสงของพอร์ซซีกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต
ออกซิเจน	10 %	80 %
อากาศ	30 %	90 %
ไนโตรเจน	70 %	99 %
สูญญากาศ	90 %	100 %

โดยการลดลงของปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์นี้ มีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของนาโนพอร์ซซีกอน ทำให้ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซีกอนเกิดพันธะแขวนขาดของซีกอนอะตอม (dangling bonds) และพันธะระหว่างซีกอนกับ ออกซิเจน (Si-O-Si) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถทำการวิเคราะห์ตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะต่างๆ ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซีกอนได้จากเครื่องวัดฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorbance) พันธะแขวนขาดและพันธะระหว่างซีกอนกับออกซิเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ จะเป็นจุดที่ทำให้การรวมตัว

ใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของนาโนพอร์ซซีกอนมีลักษณะเป็นการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสงระโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(nonradiative recombination) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟลัดูมิเนสเซนซ์ลดลง ผลการทดลองนี้ได้สนับสนุนถึงสาเหตุและที่มาของการเปล่งแสงแบบโฟลัดูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนได้ว่า น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three-level luminescent state model) ที่ถูกเสนอขึ้นมา

จากผลการทดลองทางด้านโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของพอร์สซิลิกอนที่ได้สรุปมาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้้นำผลการศึกษานี้มาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน เพื่อนำเอาพอร์สซิลิกอนมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ด้วยการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการนำเอาพอร์สซิลิกอนมาใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง จากผลการศึกษาพบว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตนิกที่ผลิตขึ้นสามารถตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดี และมีความกว้างในการตอบสนองครอบคลุมความยาวคลื่นแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ (visible light) มากขึ้น เมื่ออุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตนิกที่ผลิตขึ้นนั้นได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น โดยจะเกิดสเปกตรัมของการตอบสนองทางแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ในช่วงประมาณ 500 ถึง 625 นาโนเมตรขึ้น ทั้งนี้เป็นผลจากปรากฏการณ์ quantum size effect และจากผลการทดลองนี้เอง ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถจะนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวไปพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจจับสีของแสง (color sensor) หรือผลิตเป็นตัวตรวจวัด (detector) สัญญาณแสงภายในชิปวงจรรวมที่มีการสื่อสารด้วยแสงต่อไปภายอนาคตได้

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนด้วยเทคนิคการวัดปริมาตร และการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตนิกของชั้นพอร์สซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากการใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน พบว่าวิธีการทั้งสองในการวัดแต่ละครั้งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน และค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกไปบ้าง ดังนี้คือ

ตารางที่ 5.2

แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตนิกของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้น โดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน

	พอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นโดยใช้			พอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นโดยใช้		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	<ul style="list-style-type: none"> ■ แผ่นฟิล์มซิลิกอนชนิดพี 10 Ω-cm ■ ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm² ■ สารละลายกรด HF 47 % ■ เวลาในการ anodization 10 นาที 			<ul style="list-style-type: none"> ■ แผ่นฟิล์มซิลิกอนชนิดพี 10 Ω-cm ■ ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm² ■ สารละลายกรด HF 20 % ■ เวลาในการ anodization 10 นาที 		
เปอร์เซ็นต์	68 %	64 %	65 %	85 %	87 %	86 %

ความ พรุน (%)						
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	600	605	605	560	555	560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ถึงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซ็นต์ความพรุน และค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิติคอน ที่สร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน โดย

- สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 2-3 % และสำหรับชั้นพอร์สซิติคอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่สูงเกินกว่า 81-83 % ขึ้นไป ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่คำนวณมีแนวโน้มว่าจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงได้ ทั้งนี้เนื่องจากผลของโครงสร้างที่ประบางของชั้นพอร์สซิติคอน โดยสามารถสังเกตได้จากการลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ เมื่อพอร์สซิติคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงกว่า 81-83 % ขึ้นไป

- ส่วนค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอน พบว่า จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ ± 5 นาโนเมตร หรือประมาณ ± 0.018 eV สำหรับค่าพลังงานฟิสิกส์ของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมา ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองได้ทำการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ตลอดสเปกตรัมครั้งละ 5 นาโนเมตร นั่นเอง