

รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้งานนาโนพอร์ซิลิคอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

Application of Nanoporous Silicon for Solar Cell



จัดทำโดย

นายนิรันทร อติวงศ์แสงทอง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้งานนาโนพอร์ซิลิคอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

Application of Nanoporous Silicon for Solar Cell

จัดทำโดย

นายณรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

RCH

QC

611-8

.S5

462437

พ. 2

เลขหมู่.....

116106

เลขทะเบียน.....

-2 พ.ศ. 2554

วัน,เดือน,ปี.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้
19/1/54

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัยเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2551

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

1 ธันวาคม 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

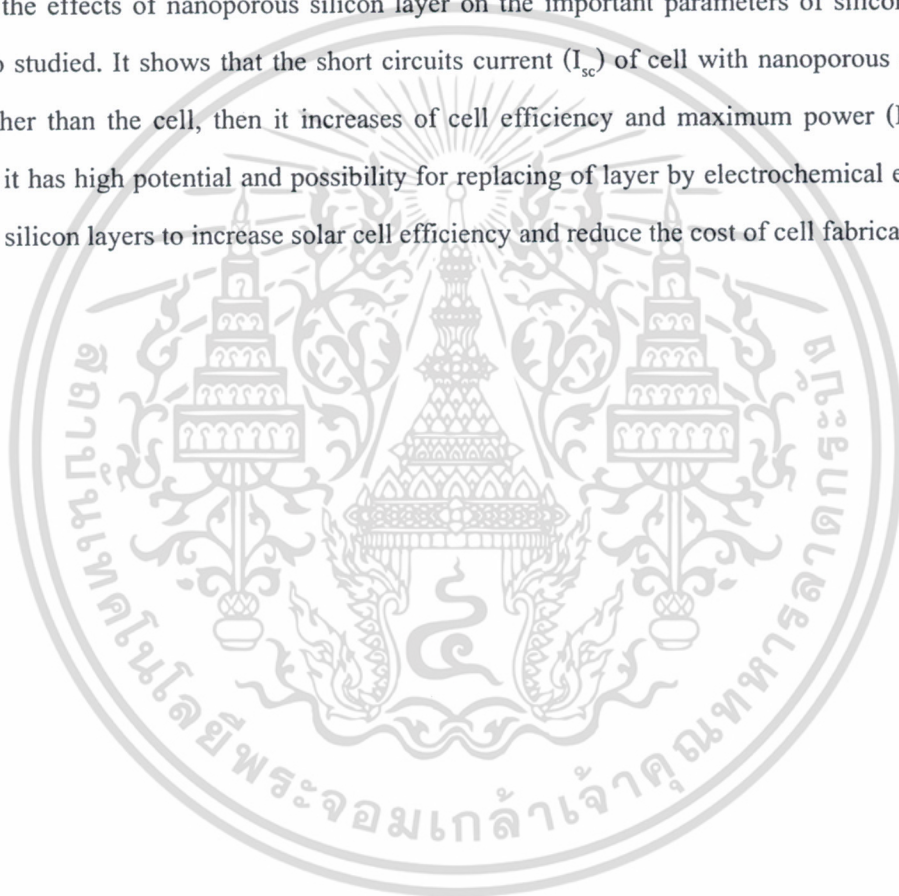
บทคัดย่อ

ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน เป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก สามารถสร้างขึ้นบริเวณผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนทั่วไปได้โดยง่าย และประหยัดที่สุดด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมี ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนี้มีคุณสมบัติพิเศษ สามารถดูดกลืนแสงได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นชั้นตัวดูดซับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมีบนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการเลือกสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่ และได้ศึกษาผลของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีต่อพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนอยู่ที่ผิวด้านบนของเซลล์จะมีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงกว่าเซลล์แบบธรรมดาทั่วไป จากผลดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์เพิ่มขึ้นและมีค่ากำลังสูงสุด (P_m) เพิ่มขึ้นอีกด้วย จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้สูง ในการนำชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจากการกัดทางไฟฟ้าเคมีไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ และลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 properties of nanoporous silicon layer, it is widely used 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. 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 is higher than the cell, then it increases of cell efficiency and maximum power (P_m). In conclusion, it has high potential and possibility for replacing of layer by electrochemical etching nanoporous silicon layers to increase solar cell efficiency and reduce the cost of cell fabrication.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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.....	35
3.1.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	35
3.1.2 การสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน.....	36
3.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	39
3.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	39
3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	39
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยSEM.....	
4.2 การทดลองเพื่อศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิคอนที่เงื่อนไข anodization ต่างๆ.....	
4.2.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพด้านทานของผลึกซิลิคอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิคอน.....	
4.2.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิคอน.....	
4.2.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิคอน.....	
4.2.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิคอน.....	
4.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิคอน.....	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน.....
- 4.5 การทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน
 - 4.5.1 การศึกษาเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอนภายใต้แสงอุลตราไวโอเลต.....
 - 4.5.2 การศึกษาเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอนที่อยู่ในสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆ.....

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	แสดงขั้นตอนในกระบวนการสร้าง SOI โดยใช้เทคนิคพอร์สซิลิกอนโดย (ก) เป็นรอยต่อพี-เอ็น ในแผ่นผลึกซิลิกอน (ข) ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนปกคลุมผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (ค) ทำการออกซิเดชันชั้นพอร์สซิลิกอนเพื่อทำให้เป็นชั้นฉนวน.....	4
รูปที่ 1.2	แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของ SOI ที่ใช้เทคนิคพอร์สซิลิกอน.....	4
รูปที่ 2.1	แสดงแบบจำลองง่ายๆของอะตอมซิลิกอน.....	6
รูปที่ 2.2	แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิกอน.....	7
รูปที่ 2.3	แสดงโครงผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชร.....	7
รูปที่ 2.4	แสดงโครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure ที่อยู่ใน 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	แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีที่ 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	แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	17
รูปที่ 2.14	แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.15	แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน.....	19
รูปที่ 2.16	แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน.	20
รูปที่ 2.17	แสดงลักษณะการไบอัสเซตไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ.....	22
รูปที่ 2.18	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซตไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก	23
รูปที่ 2.19	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซตไฟฟ้าเคมี ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ anodic bias.....	25
รูปที่ 2.20	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	27
รูปที่ 2.21	แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซตไฟฟ้าเคมี โดยที่ d เป็นความหนาของผลึกซิลิกอน , W เป็นความกว้างของบริเวณปลดพาหะนำกระแส (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	แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	36
รูปที่ 2.27	แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	36
รูปที่ 2.28	แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน.....	37
รูปที่ 2.29	แสดงกลไกในการหยุดกักโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนชนิดพี โดยที่ (ก) แสดงโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ -

	(ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะ โฮลจากผลึก ซิลิกอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน	
	(ค) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะ โฮลจากผลึก ซิลิกอนผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่กั้นหลุม ของรูพรุน.....	38
รูปที่ 2.30	แสดงแผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่สร้างจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น โดยที่ (ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดมากกว่า 2 μ m (ข) โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดน้อยกว่า 2 μ m.....	40
รูปที่ 2.31	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน (q) กับ ขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน.....	41
รูปที่ 2.32	แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ 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 ที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	72
รูปที่ 4.2	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่น ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	73
รูปที่ 4.3	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่น ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	73
รูปที่ 4.4	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดเอ็นที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	74
รูปที่ 4.5	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ชนิดเอ็นที่มีสภาพด้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	74
รูปที่ 4.6	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซัลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดเอ็นที่มีสภาพด้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	75
รูปที่ 4.7	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซัลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดพีที่มีสภาพด้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	76
รูปที่ 4.8	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซัลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดพีที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	76
รูปที่ 4.9	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซัลิกอนชนิดพีที่มีค่า สภาพด้านทานค่าต่างๆ.....	89
รูปที่ 4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโตลูมิเนส เซนซ์กับค่าสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี.....	89
รูปที่ 4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโตลูมิเนส เซนซ์กับค่าสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น.....	90
รูปที่ 4.12	แสดงสเปกตรัมของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซัลิกอนที่ถูกสร้าง ขึ้นโดยใช้ความหนาแน่นกระแสค่าต่างๆ.....	91
รูปที่ 4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโตลูมิเนส เซนซ์กับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization.....	92
รูปที่ 4.14	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซัลิกอนที่ถูกสร้างขึ้น โดยใช้เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกค่าต่างๆ.....	93
รูปที่ 4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโตลูมิเนส เซนซ์กับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก.....	94
รูปที่ 4.16	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซัลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมา โดยใช้เวลาในการ anodization ค่าต่างๆ.....	95
รูปที่ 4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโตลูมิเนส เซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการ anodization.....	96
รูปที่ 4.18	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซัลิกอนที่อุณหภูมิต่างๆ..	102
รูปที่ 4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิ..	102
รูปที่ 4.20	แสดงสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซัลิกอนที่เวลาในการ ฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตต่างๆ.....	103
รูปที่ 4.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ ในการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต.....	104
รูปที่ 4.22	แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์ซซัลิกอนที่ได้รับ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	การฉายด้วยแสงอุตราไวโอเลตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของ อากาศ.....	105
รูปที่ 4.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ ในการฉายแสงอุตราไวโอเลตให้แก่พอร์สซิลิกอน ในสภาพแวดล้อม ของก๊าซชนิดต่างๆ.....	107
รูปที่ 4.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์กับเวลาใน สภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ.....	108



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันมีความพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทนซึ่งเป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังเร่งศึกษา วิจัย และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะพลังงานเป็นสิ่งที่เป็นขั้นพื้นฐานทั้งทางตรงและทางอ้อมของการเกิดและดำรงอยู่ของชีวิตทั้งหลาย รูปแบบของพลังงานที่ใช้กันมากส่วนใหญ่อยู่ในรูปพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานหลักๆในปัจจุบัน คือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆเหล่านี้ นอกจากจะมีปริมาณจำกัดแล้ว ยังสร้างปัญหาภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการทำลายชั้นบรรยากาศของโลกอีกด้วย ส่วนพลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนกั้นน้ำนั้น ได้มีการพัฒนาไปถึงจุดอิ่มตัวแล้วสำหรับเกือบทุกประเทศ โดยปัจจุบัน โลกใช้พลังงานจาก

- ฟอสซิล 95% (น้ำมัน 42%, ถ่านหิน 28% และก๊าซธรรมชาติ 25%)
- พลังงานทดแทนประเภทพลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ ลม คลื่น ชีวมวล 3%
- พลังงานนิวเคลียร์ 2%

ในขณะที่พลังงานสำรองของโลกประเภทน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินยังคงเหลือให้ใช้ไปได้อีกเพียง 40, 62 และ 218 ปี ตามลำดับ

ในประเทศไทยพลังงานไฟฟ้าได้มาจากการผลิตจากกระบวนการต่างๆคือ ไฟฟ้าพลังงานความร้อน (จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง) 80% ไฟฟ้าพลังน้ำ 10% ส่วนพลังงานสำรองในประเทศคือ ก๊าซธรรมชาติเราจะมีต่อไปอีกเพียง 20 ปี ถ่านหิน 60 ปี จะเห็นได้ว่าเราต้องอาศัยการผลิตไฟฟ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นหลัก ซึ่งต้องอาศัยน้ำมันดิบจากต่างประเทศประมาณ 95% ของปริมาณการใช้ทั้งหมด และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในระยะกลาง และระยะยาว แนวทางแก้ปัญหา คือ การพยายามหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน การพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศตนเอง เช่น ความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสร้างไฟฟ้ารวมทั้งความร้อน ในกลุ่มพลังงานเหล่านี้ พลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างมีจุดเด่นมากกว่าชนิดอื่น เพราะมีอยู่ทั่วไป มีไม่จำกัด สะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่หลายประเทศกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จทั้งในด้านเทคโนโลยี และเศรษฐกิจ เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษอีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ หรือ โซลาร์เซลล์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ และคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคตอันใกล้นี้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการคือ

1. พลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีอยู่ทุกที่ทั่วไป มีไม่จำกัด เป็นพลังงานที่สะอาด และคิดต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้จะช่วยแก้ไขปัญหาค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษอีกด้วย อีกทั้งประเทศไทยยังเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง
2. เซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันทีหรือจะมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อกักเก็บหรือแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับก็ได้
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาแล้วและใช้งานในปัจจุบันนั้น มากกว่า 95% ทำจากซิลิคอนซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบน โลกกรองจากออกซิเจน นั่นคือมันเป็นวัสดุที่มีมากมายเหลือใช้
4. ซิลิคอนเป็นวัสดุที่ใช้มากใช้อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ ทำให้ในแง่ของเทคโนโลยีและกระบวนการสร้างมีภาคอุตสาหกรรมรองรับ
5. มีกระบวนการสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

จากความสำคัญดังกล่าว ทำให้งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากวัสดุที่เป็นซิลิคอนส่วนมาก ให้มีประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยมุ่งศึกษาวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นส่วนที่รับแสง และส่วนที่ลดการสะท้อนแสง บนเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการลดขนาดของโครงสร้างผลึกซิลิคอนที่ใช้เป็นวัสดุในเซลล์แสงอาทิตย์ลงให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงที่จะเปลี่ยนแปลงไปจากผลึกซิลิคอนเดิม เรียกว่าวัสดุซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกซิลิคอนเดิมแต่มีขนาดของโครงสร้างที่เล็กลงอยู่ในระดับนาโนเมตรนี้ว่า นาโนพอร์สซิลิคอน โดยมันจะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กมากๆ มีประวัติเริ่มต้นมาจากการค้นพบวัสดุนี้โดยบังเอิญครั้งแรกในปี ค.ศ. 1956 ในระหว่างกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีของผลึกซิลิคอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดย Uhlir ซึ่งในขณะนั้นได้ทำงานอยู่ที่ Bell Laboratories ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้พยายามที่จะทำการพัฒนาเทคนิคในการขัดผิวหน้าวัสดุสารกึ่งตัวนำสองชนิด ได้แก่ เยอรมันเนียมและซิลิคอน ซึ่งในขณะนั้นมีความพยายามที่จะนำวัสดุสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด มาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการพัฒนาเทคนิคในการขัดผิวหน้าของวัสดุทั้งสองให้เรียบ ซึ่งเทคนิคและวิธีการขัดผิวหน้าวัสดุด้วยไฟฟ้าของ Uhlir นี้ ผลที่ได้ส่วนมากจะออกมาเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น่าพอใจ แต่ในบางครั้งหลังจากการขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้าแล้ว พบว่าบนผิวหน้าของวัสดุเหล่านี้จะปรากฏฟิล์มที่มีลักษณะสีดำ แดงหรือน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งฟิล์มเหล่านี้เป็นสิ่งที่พวกเขาไม่ต้องการให้เกิดขึ้นบนผิวหน้าของวัสดุ ดังนั้นจึงได้มีการพยายามที่จะแก้ไขปัญหานี้ โดยมีการปรับเปลี่ยนใจในการทดลอง โดยไม่ทราบว่าเป็นฟิล์มที่พวกเขาไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในขณะนั้น ในอนาคตอีก 50 ปีข้างหน้า จะกลายมาเป็นวัสดุที่มีบทบาทและมีความสำคัญต่องานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ 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 บนฐานรองรับซิลิคอนเดียวกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่กระบวนการในการสร้างชั้นของพอร์สซิลิคอนค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างวงจรรวม (IC) มาตรฐาน

ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้เองคณะผู้ทำวิจัยจึงได้เริ่มต้นงานวิจัยนี้ด้วยการนำเอา **นาโนพอร์สซิลิคอน** นี้มาประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นส่วนที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะให้การตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ (Visible Light) อย่างมีประสิทธิภาพและกว้างมากขึ้นกว่าผลึกซิลิคอนเดิม อีกทั้งมันยังเป็นวัสดุที่ช่วยในการลดการสะท้อนของแสงไปในตัวอีกด้วย ซึ่งเป็นประโยชน์ที่จะได้รับจากผลของงานวิจัยนี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะศึกษา วิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้คือ

1. พัฒนาดันแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมาเป็นวัสดุรับแสง
2. พัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนาโนพอร์สซิลิคอนเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง เช่น อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ ในโครงการวิจัยนี้
3. ศึกษาเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่ออุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น ทั้งนี้ก็เพื่อให้ได้

ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

โดยปกติอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์จะสร้างขึ้นจากวัสดุซิลิคอนเป็นส่วนมาก ซึ่งตามคุณสมบัติทางด้านแสงของซิลิคอนจะมีการตอบสนองต่อแสงได้ดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของแสงอินฟราเรด ทั้งนี้เนื่องจากผลึกซิลิคอนเป็นวัสดุที่มีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.1 eV นั่นเอง ซึ่งจะแตกต่างจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนซึ่งเป็นวัสดุซิลิคอนนั่นเองแต่มีการลดขนาดของโครงสร้างลงให้อยู่ในระดับนาโนเมตร จากการศึกษาอย่างต่อเนื่องของคณะผู้ทำการวิจัยพบว่านาโนพอร์สซิลิคอนจะมีขนาดของช่องว่างพลังงานที่สูงเพิ่มขึ้นจากผลึกซิลิคอนเดิม ซึ่งสามารถศึกษาได้จากผลการศึกษาคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเรียกปรากฏการณ์ที่มีผลทำให้คุณสมบัติทางควอนตัมของนาโนพอร์สซิลิคอนเปลี่ยนแปลงและแตกต่างไปจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิมนี้ว่า ปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect และเนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นจึงถูกจัดให้อยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum Wire นั่นเอง

โดยชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นก็คือเนื้อผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยจะมีขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอนที่เหลือนและขนาดของรูพรุนอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งการลดขนาดของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิมได้นั้น ในงานวิจัยนี้จะสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้นโดยใช้วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) ที่เรียกว่ากระบวนการ Anodization โดยเนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกกัดจนขนาดของโครงสร้างลดลงอยู่ในระดับนาโนเมตรและเกิดเป็นชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้น

1.4 ทฤษฎีของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมาใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะอาศัยหลักการการตอบสนองทางแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุรับแสงนั่นเอง โดยโครงสร้างของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิคอนเป็นโครงสร้างอย่างง่าย และเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นสามารถสร้างลงบนแผ่นซิลิคอนได้โดยตรง ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน

โดยอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิคอนนี้จะให้ผลการตอบสนองต่อแสงดีในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light) เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์เดิม อีกทั้งชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ยังมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดีและมีการสะท้อนแสงที่ต่ำอีกด้วย

1.5 ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยการใช้ความรู้ทางด้านนาโนเทคโนโลยีเข้ามาประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดโครงการจะต้องได้ต้นแบบของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน พร้อมทั้งข้อมูลพื้นฐานต่างๆ เช่น ผลการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิคอนเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากผลึก ซิลิคอนเดิม และผลการลดการสะท้อนของแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีต่ออุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1) ดำเนินการศึกษา ออกแบบและกำหนดขั้นตอนการวิจัย
- 2) ขั้นตอนการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี
- 3) วัดและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน
- 4) ขั้นตอนการเคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียม
- 5) วัดและทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์
- 6) สร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่สมบูรณ์เพื่อใช้งานเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์
- 7) วัดและทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิคอน
- 8) สรุปผลการทดลองและเขียนรายงานสมบูรณ์

เนื้อหาในรายงานเล่มนี้จะแบ่งเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 พอร์สซิติคอนด้วยวิธีการเอโนไคเซชัน และผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิติคอน

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะ เกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

พอร์สซาลิกอน

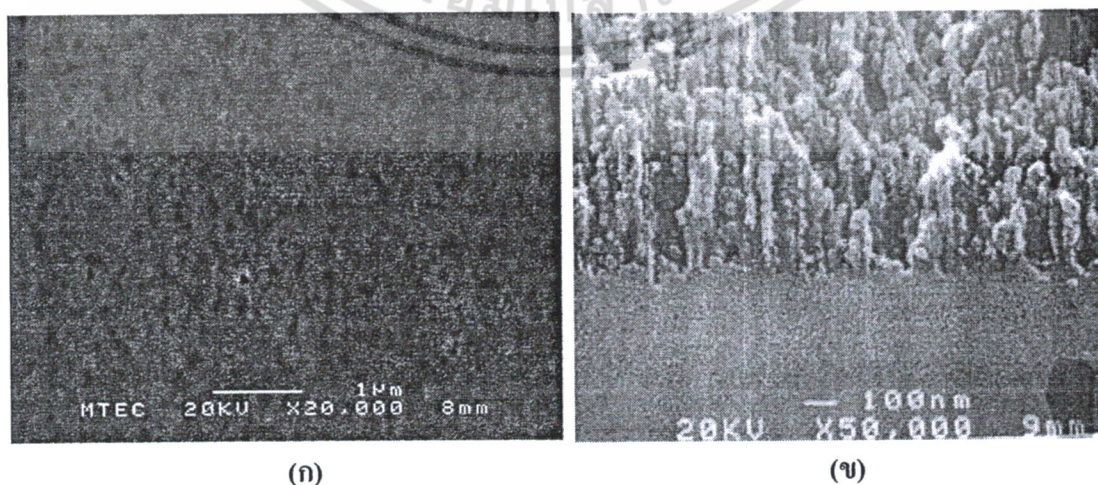
ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีพอร์สซาลิกอน วิธีการสร้างพอร์สซาลิกอน โดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดพอร์สซาลิกอน ความพรุน และพฤติกรรมทางแสงของพอร์สซาลิกอน

2.1 ทฤษฎีพอร์สซาลิกอน

พอร์สซาลิกอน เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีทั้งโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และไม่เป็นระเบียบ ภายในของพอร์สซาลิกอนอะตอมนั้นนอกจากจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบ เหมือนกับผลึกซาลิกอนเดี่ยว แต่ยังพบว่ามีจุดบกพร่องของผลึก ช่องว่าง ระยะห่างของช่องว่าง และพันธะแขนขาดกับอะตอมข้างเคียง โครงสร้างที่มีขนาดเล็กนี้สามารถพบได้ 2 รูปแบบ คือ จุด และแท่ง หรือเป็นแบบผสม ผลึกขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนี้มีลักษณะแข็งเปราะ และมีรูพรุน พอร์สซาลิกอนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจ มีบทความจำนวนมากพยายามอธิบายถึงคุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของพอร์สซาลิกอน [16-18] และได้นำพอร์สซาลิกอนมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ทางด้านการแพทย์ และอุปกรณ์ตรวจจับไอสารอินทรีย์ เป็นต้น

2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซาลิกอน

พอร์สซาลิกอน คือ ผลึกซาลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซาลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจนถึงระดับไมโครเมตร โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอร์สซาลิกอน (ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์แก่ท่านนี้ เมื่อนุญแต่เห็นไปเซปประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนในรูปที่ 2.1 เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) นอกจากนี้จากการศึกษาโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนยังพบต่อไปอีกว่าที่บริเวณผิวของไมโครพอร์สซิลิคอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิคอนไฮไดรด์ (Si:H) หรือ ซิลิคอนออกซิไฮไดรด์ (Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป [19-21]

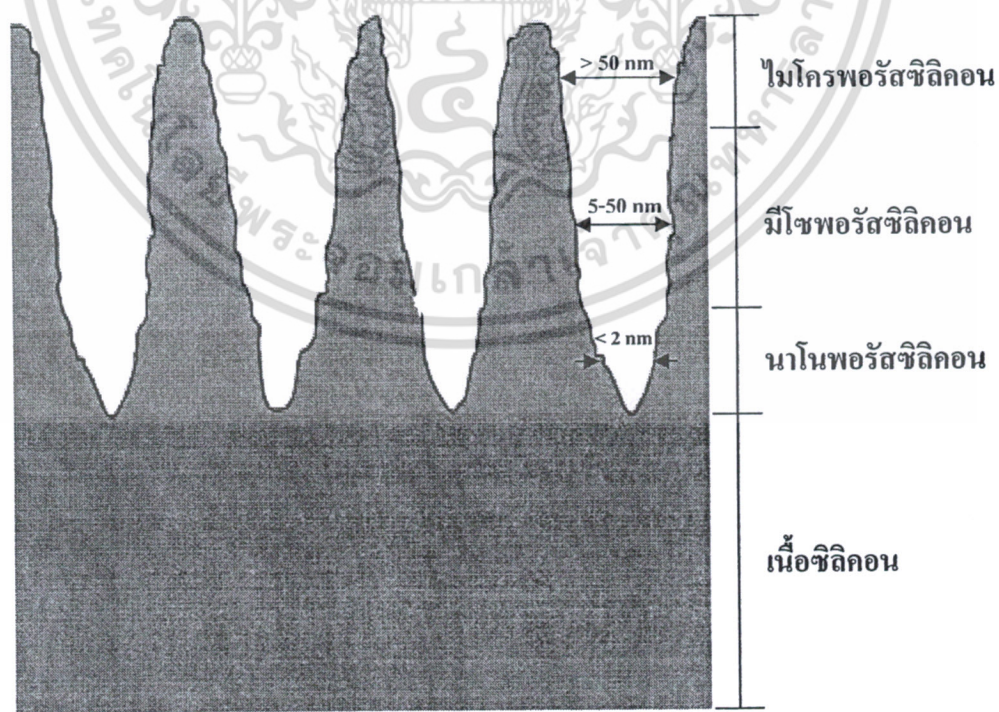
2.1.2 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [18] คือ

1. แบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

พอร์สซิลิคอนสามารถแบ่งได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ดังนี้

- 1.1 โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิคอน (microporous) เป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไป
- 1.2 โครงสร้างของชั้นมีโซพอร์สซิลิคอน (mesoporous) เป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่อยู่ระหว่าง 5 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร
- 1.3 โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (nanoporous) เป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่เล็กกว่า 5 นาโนเมตร ลงไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะติดกับเนื้อของซิลิคอน



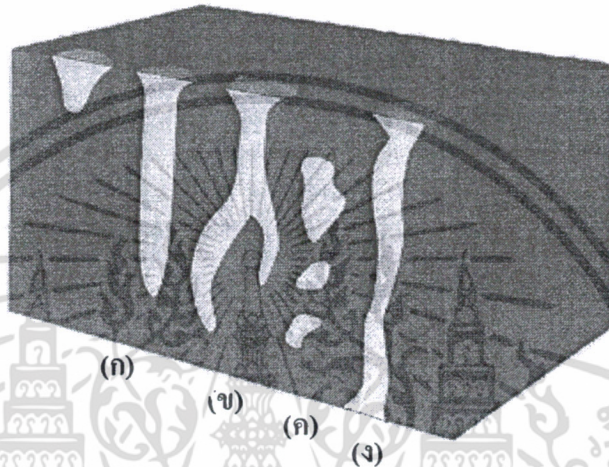
รูปที่ 2.2 ภาพจำลอง โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะรูพรุนของพอร์สซีลิกอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

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



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองรูพรุนของพอร์สซีลิกอนลักษณะต่างๆ กัน

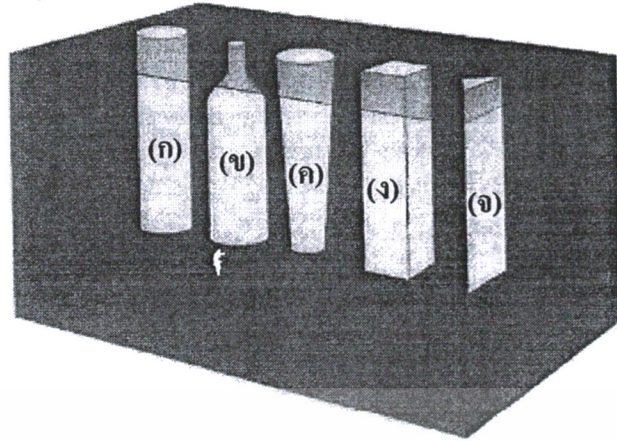
- (ก) ลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูพรุน
- (ข) ลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกของรูพรุน
- (ค) ลักษณะเป็น โพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน
- (ง) ลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกไปยังอีกด้าน

3. แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูปร่างรูพรุนของพอร์สซีลิกอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลักๆ ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

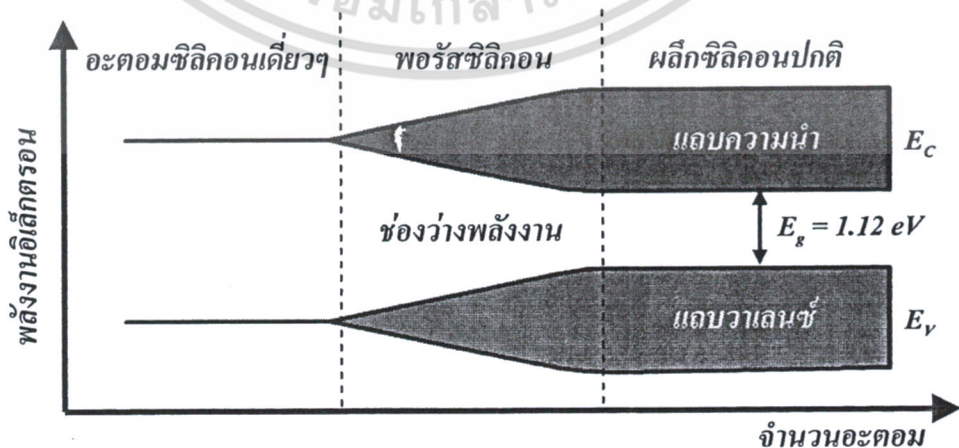


รูปที่ 2.4 ภาพจำลองรูพรุนของพอร์สซิลิคอนรูปร่างต่าง ๆ

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

2.1.3 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

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



รูปที่ 2.5 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

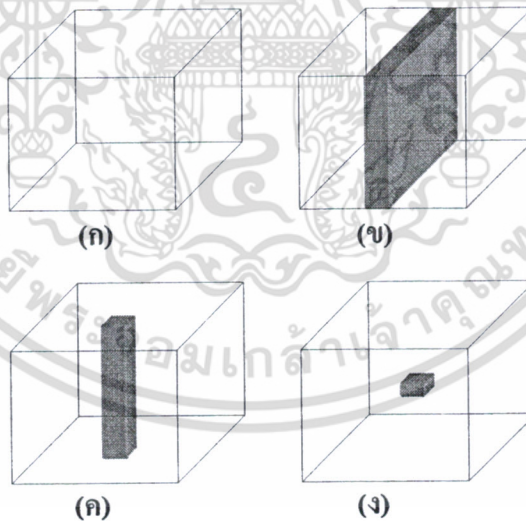
จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึ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

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

โดยที่ E_q คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม

ΔE_c คือ พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำเดิมก่อนเกิดพอร์สซิลิคอน

ΔE_v คือ พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบวาเลนซ์เดิมก่อนเกิดพอร์สซิลิคอน



รูป 2.6 แบบจำลองลักษณะ โครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ

(ก) เนื้อผลึกซิลิคอน (ข) ควอนตัมในเชิง 2 มิติ

(ค) ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (ง) ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ

จากรูปที่ 2.6 พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆ เหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติได้ เอกสารนี้เขียนขึ้นเพื่อส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศในประเทศไทย โดยผู้เขียนได้พิจารณาและประเมินราคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

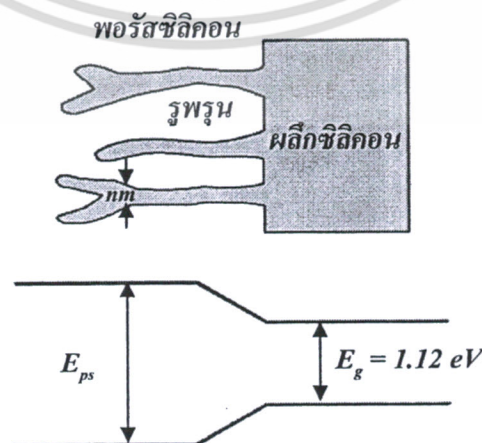
เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิคอนปกติ มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับ ด้วยลักษณะและขนาดของโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

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

2. ควอมตัมในเชิง 1 มิติ (quantum wire) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆ ที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร (< 10 nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างลักษณะนี้จะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของโครงสร้างที่เป็นเส้นหรือเสานี้เท่านั้น ดังแสดงในรูป 2.6 (ค) ซึ่งลักษณะช่องว่างพลังงานของโครงสร้าง 1 มิติแบบนี้ จะมีขนาดที่กว้างกว่าช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในลักษณะแบบนี้จะมีขนาดที่เล็กกว่า และมีจำนวนอะตอมที่อยู่ภายในน้อยกว่าโครงสร้าง 2 มิติ

3. ควอมตัมในแบบไม่มีมิติ (quantum dot) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก (< 1 nm) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะแบบนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ภายในโครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ง) อะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างจุดเล็กๆเหล่านี้จะมีจำนวนที่น้อยกว่าใน โครงสร้างสองแบบแรก ซึ่งจะมีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของโครงสร้างที่เป็นแบบจุดนี้จะมีขนาดกว้างที่มากกว่าใน โครงสร้างสองแบบแรก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

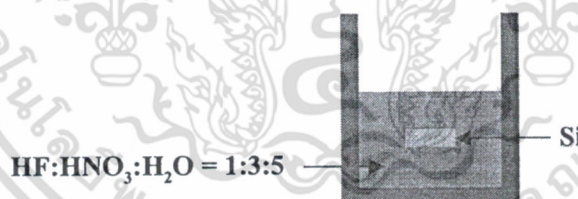
เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์ซซิติคอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์ซซิติคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัมในเชิง 1 มิติ โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิติคอน

2.2 เทคนิคการสร้างพอร์ซซิติคอน

กระบวนการสร้างพอร์ซซิติคอนให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน [23-27] แต่จะขอพิจารณาถึงเทคนิคการสร้างพอร์ซซิติคอนที่เหมาะสม สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการสร้างได้ และสามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้

2.2.1 การสร้างพอร์ซซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมสี (stain etching)

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

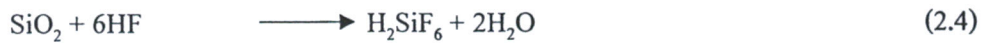
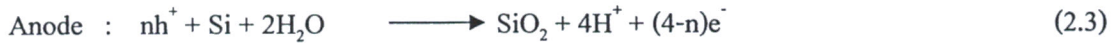
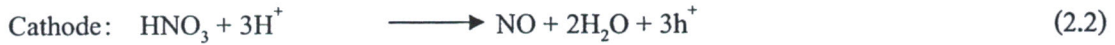


รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบข้อมสี

จากรูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดแบบข้อมสีคือ การทำให้เกิดประจุโฮล เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิติคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก เพื่อทำให้เกิดประจุโฮล หลังจากนั้นประจุโฮลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิติคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ซิติคอนไดออกไซด์ ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เอง สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิติคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ซึ่งการเกิดซิติคอนไดออกไซด์ และการถูกกัดของซิติคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยา ดังนั้นลักษณะโครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่เป็นรูปแบบ (non-uniform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมสี่สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่า บริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยาจะมีสีสันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวินสีของชั้นซิติคอน ไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์ซซิติคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีสันจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ส่วนความหนาของชั้นพอร์ซซิติคอนที่ได้จากกระบวนการกัดแบบข้อมสี่จะมีค่าประมาณ 100 nm และพื้นผิวของชั้นพอร์ซซิติคอนที่เกิดจากกระบวนการกัดแบบข้อมสี่จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.9 [28]

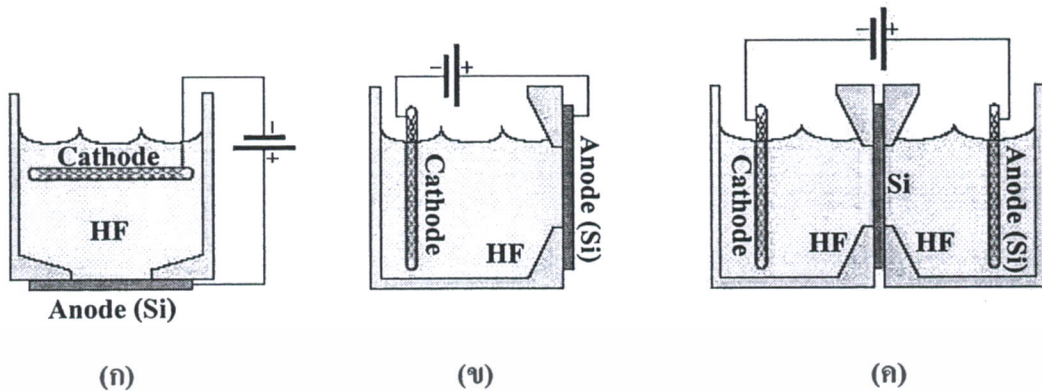


รูปที่ 2.9 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์ซซิติคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี่

2.2.2 การสร้างพอร์ซซิติคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (anodization)

การสร้างพอร์ซซิติคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน [29,30] เป็นวิธีที่สามารถควบคุมปฏิกิริยาในการสร้างพอร์ซซิติคอน ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดชั้นพอร์ซซิติคอนที่มีความสม่ำเสมอ (uniform) ทั่วกันทั้งแผ่น โดยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันนี้จะใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 2.10

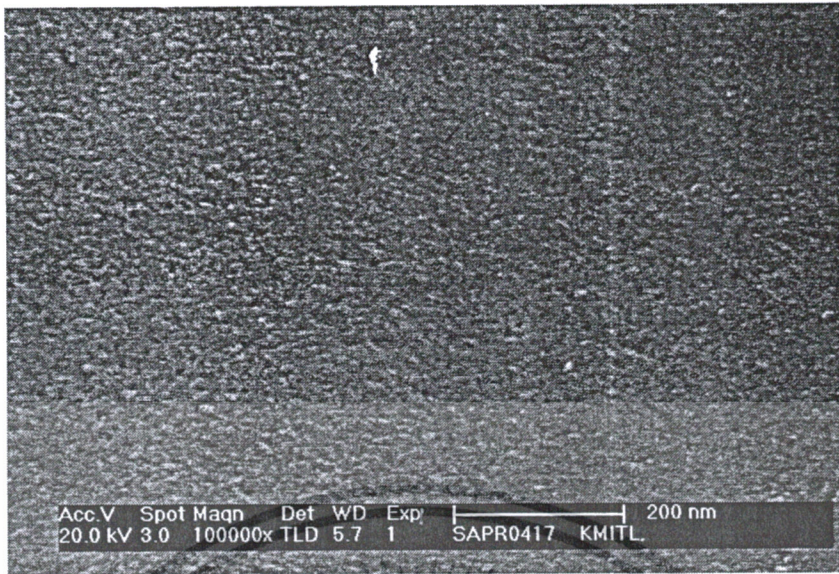
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน

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

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



รูปที่ 2.11 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการเอโนไลซ์เซชัน

2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

การสร้างพอร์สคาร์บอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี [31] เป็นวิธีการที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

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



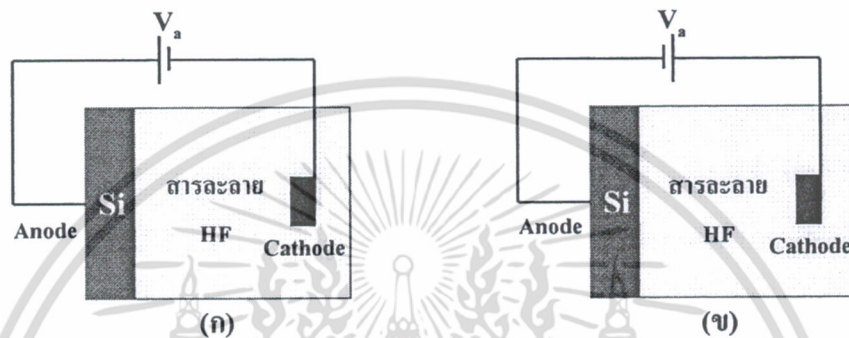
โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction)

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



โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction)

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนดหรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชิ้นหนึ่งจะเป็นแคโทด



รูปที่ 2.12 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง

(ก) แบบแอโนดิก (ข) แบบแคโทดิก

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

1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้แผ่นซิลิคอนสามารถถูกกัดได้

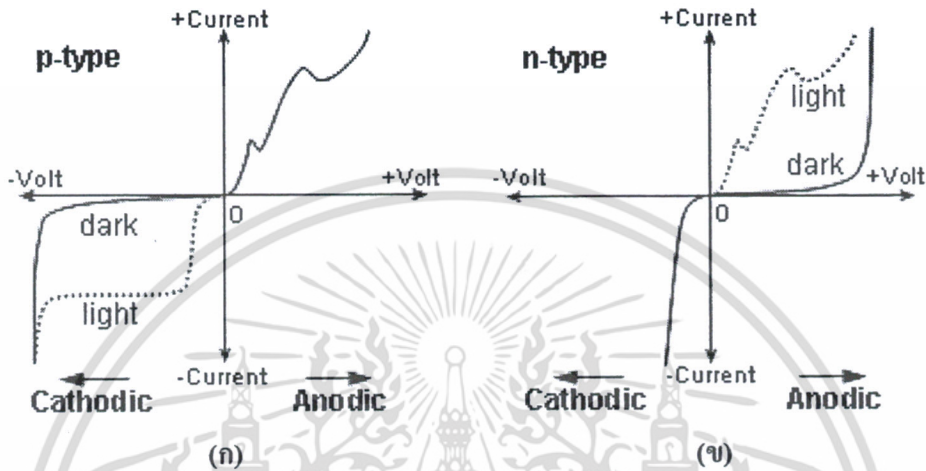
2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดแผ่นซิลิคอน

2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบซ็อดกกีไดโอด (schottky diode) ที่เกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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

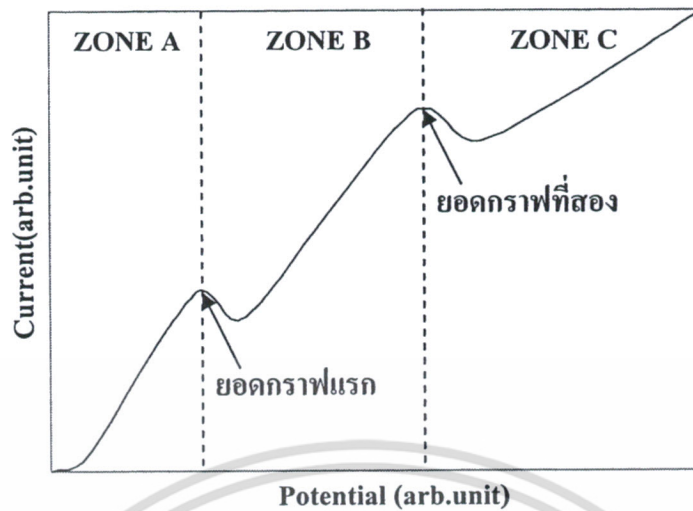
จากรูปที่ 2.13 แสดงถึงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพี และเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก และการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก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

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการ ไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน

ชนิดของแผ่น ชนิดคอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบแคโทดิก	แบบแอโนดิก
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นชนิดคอนจะไม่ถูกกัด - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ 	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นชนิดคอนถูกกัด โดย - จะเกิด โครงสร้างของพอร์สชนิดคอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ - จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นชนิดคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นชนิดคอนจะไม่ถูกกัด - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง 	<ul style="list-style-type: none"> - เนื้อของแผ่นชนิดคอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย - จะเกิด โครงสร้างของพอร์สชนิดคอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ - จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นชนิดคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขั้วตักเหมือนกัน โดยการเกิดพอร์สชนิดคอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิกเท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก จะไม่เกิดพอร์สชนิดคอนขึ้นไม่ว่าชนิดของแผ่นชนิดคอนจะเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของแผ่นชนิดคอนชนิดเอ็นเนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกนั้น เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ดังนั้นในระหว่างการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกจึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นชนิดคอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในแผ่นชนิดคอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดพอร์สชนิดคอน

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิกของทั้งแผ่นชนิดคอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนของไอส์แบบแอนโนดิก

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

- ในส่วนของยอดกราฟแรก

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม ขึ้นภายใน โครงสร้างของพอร์ซิลิคอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้น กว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่า ความต้านทานภายในของชั้นพอร์ซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้น รอบๆ โครงสร้างของพอร์ซิลิคอน และเมื่อโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุม โครงสร้างของพอร์ซิลิคอนได้ทั้งหมด มีผล ทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้น พอร์ซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น

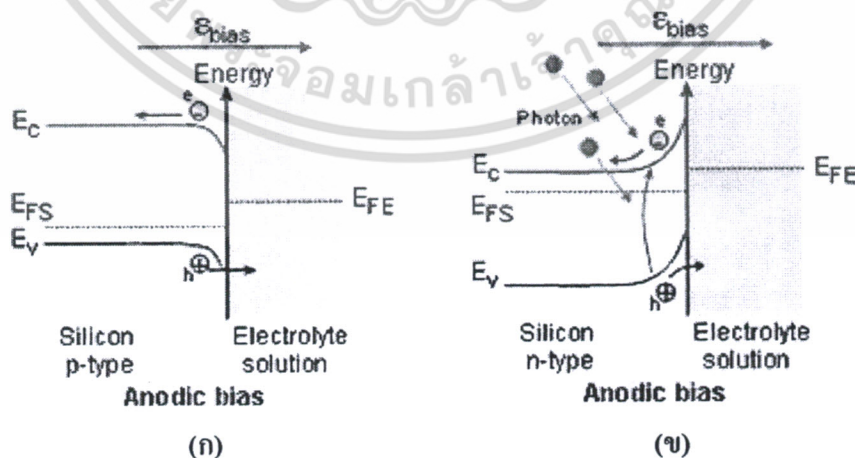
- ในส่วนยอดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณช่วงการกักที่ทำให้เกิดพอร์ซิลิคอน กับช่วงการกักแบบขัดผิวหน้า การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ที่บริเวณผิวของพอร์ซิลิคอนในระหว่าง กระบวนการกักนั่นเอง

2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรด ไฮโดรฟลูออริก

บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะมีลักษณะเป็นแบบซีดกีโดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส แสดงดังรูปที่

2.15 [32]



รูปที่ 2.15 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

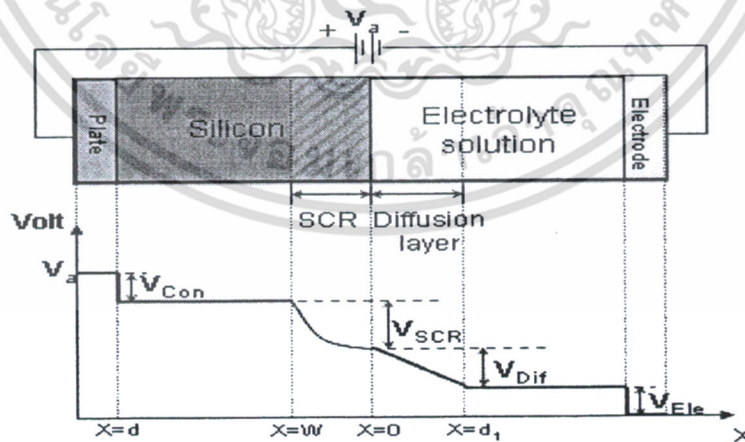
จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

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

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบแอนโอดิก ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอน จึงจำเป็นต้องทำการฉายแสงให้กับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

2.3.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดพอร์ซิลิคอน จะประกอบด้วยแผ่นซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีกรไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอนโอดิก ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 2.16 [33]



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

จากรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ
- ในเนื้อของแผ่นซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะนำกระแส

- ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรด กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ (diffusion layer)

ถ้าให้ V_a เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้รวมของระบบได้ดังนี้ คือ

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

โดย V_{diff} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

V_{SCR} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะ

V_{Con} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน

V_{Elec} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

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

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

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

ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากการไบอัสแบบตรง ทำให้ไม่เกิดบริเวณหลอดพาหะขึ้นในแผ่นซิลิคอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ โดย V_{diff} นี้จะควบคุม อิออนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

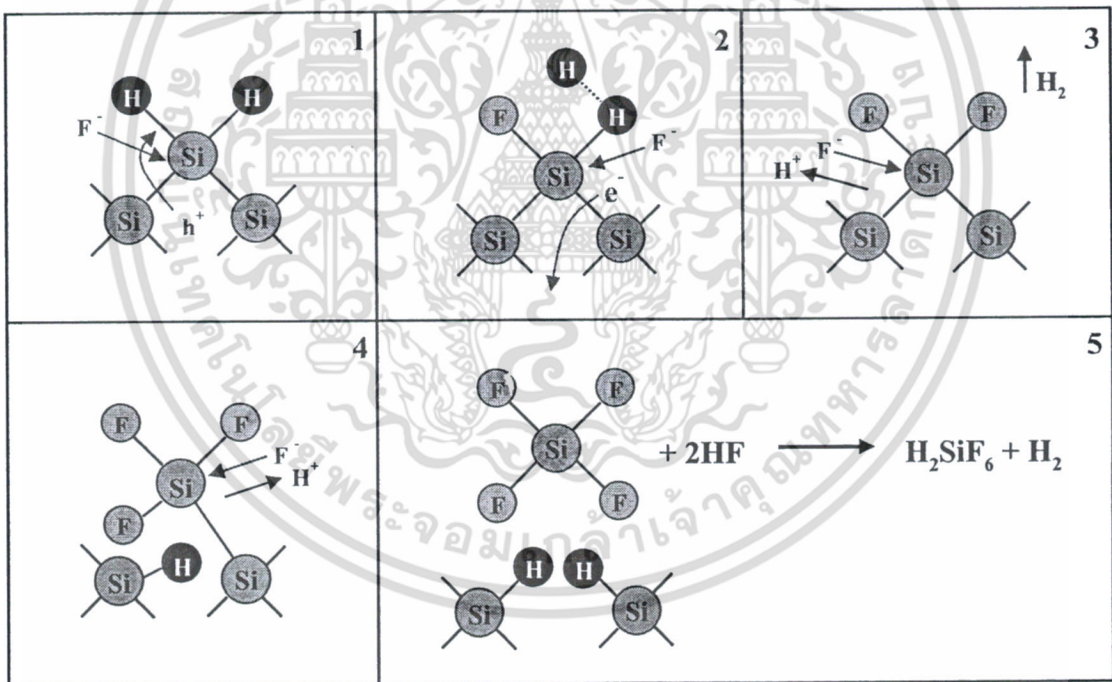
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะตกคร่อมบริเวณนี้ โดยบริเวณปลอดพาหะนี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัด และโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้น

2.4 กลไกในการเกิดพอร์ซซิลิคอน [34]

2.4.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน

ในสภาวะปกติเมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำปฏิกิริยา แต่เมื่อไรก็ตามที่แผ่นซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบแอนโนดิกแล้ว ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นพอร์ซซิลิคอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน

เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกรไบอัสแบบแอนโนดิก ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแอนโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไรก็ตามที่มีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก โดยมีกรุปป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้แก่ขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮล สามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้ โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทน ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการโพลารไรซ์ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิคอน

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

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน
ระหว่างการแอโนไดซ์เซชัน โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่าง
มากต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ

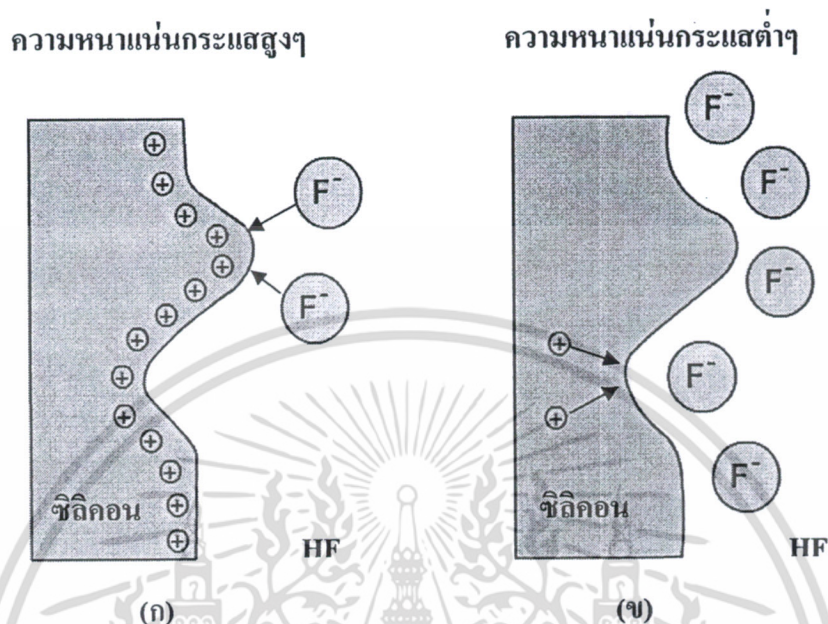
- การกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า

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

- การกัดแบบทำให้เกิดพอร์สซิลิคอน

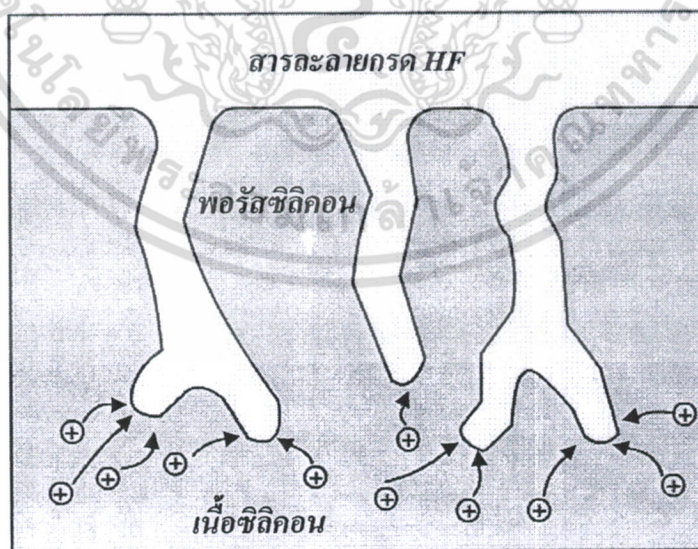
ส่วนลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดพอร์สซิลิคอน จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความ
หนาแน่นกระแสในปริมาณต่ำ ($J < J_{ps}$) ซึ่งจะทำให้ปริมาณฟลูออรีนในสารละลายกรด
ไฮโดรฟลูออริก มีจำนวนมากกว่าจำนวนของโฮลที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน ทำให้การ
กัดในลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวนโฮล ดังนั้นถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือ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

จุดนี้กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณ
ก้นหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไปเนื้อของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 2.18 แบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ

- (ก) ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า
- (ข) ลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดรูพรุนซิลิคอน



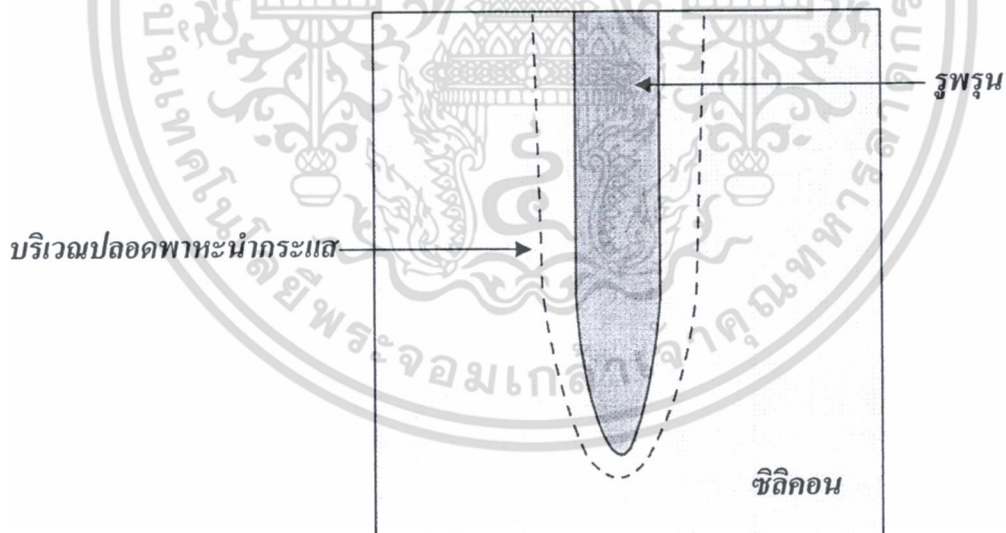
รูปที่ 2.19 การเคลื่อนที่พาหะ โสไลต์ที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนทั้งชนิดพี และชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าผลึกซิลิคอนทั้งสองชนิดมีกลไกการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแบบแอนโอดิก

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นการไบอัสแบบตรง ซึ่งการไบอัสในลักษณะเช่นนี้จะไปลดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณปลอดพาหะลง โดยจะเกิดขึ้นตามผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน อันเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนโอดิก จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณปลอดพาหะ มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้นถ้าบริเวณของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีลักษณะเป็นหลุม ซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบๆ หลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นรอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน

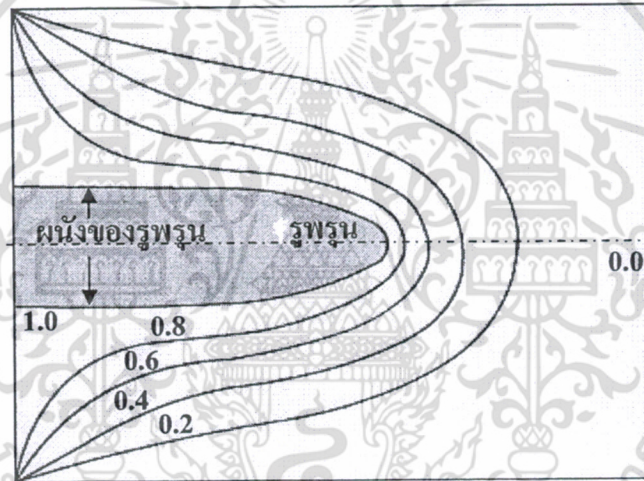
โดยความกว้างของบริเวณบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 V_{SCR}}{qN_D}} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ W คือ ความกว้างบริเวณบริเวณปลอดพาหะ
- ϵ_s คือ เปรอ์มิติวิตี (permittivity) ของผลึกซิลิคอน
- ϵ_0 คือ เปรอ์มิติวิตีของสุญญากาศ
- V_{SCR} คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ
- q คือ ประจุของอิเล็กตรอน
- N_D คือ จำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้

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



รูปที่ 2.21 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพูน

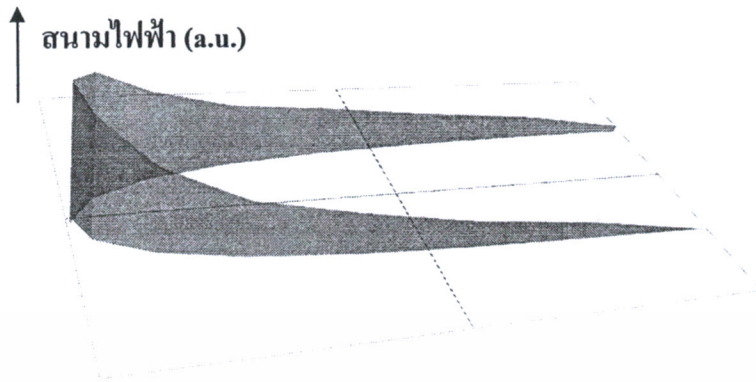
บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบรูพูน จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 2.21 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบๆ ผนังของรูพูน (E_s) มีค่าเท่ากับ

$$E_s = 2V_{SCR}/W \tag{2.15}$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบๆก้นหลุมของรูพูน (E'_s) จะมีค่า

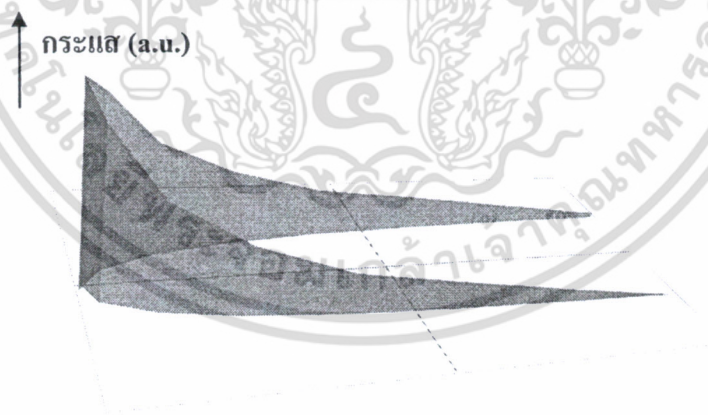
$$E'_s = V_{SCR}/r \tag{2.16}$$

โดย r คือ รัศมีก้นหลุมของรูพูน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน

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



รูปที่ 2.23 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน

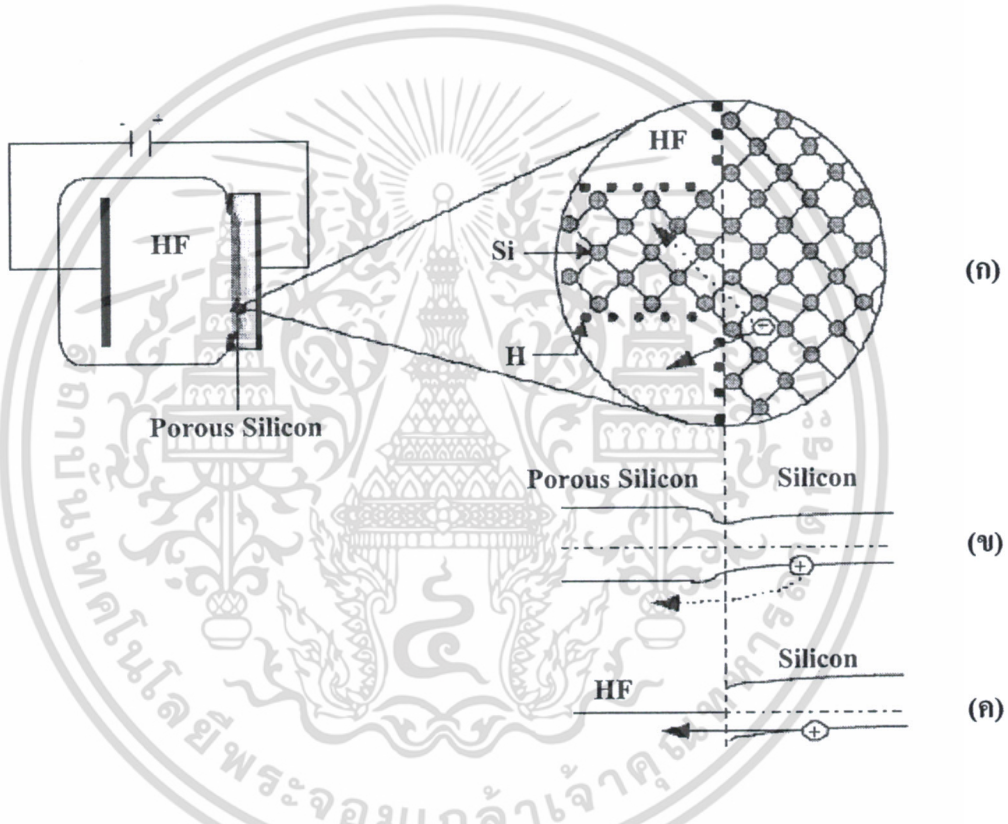
2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์ซซีลิกอน

จากการเกิดโครงสร้างของพอร์ซซีลิกอนขึ้นโดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิกอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญ ต่อกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนในแบบทำให้เกิดพอร์ซซีลิกอนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี เป็นกระบวนการกัดที่สามารถลดขนาดโครงสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร แต่กระบวนการนี้ก็จะอาศัยกลไกในการหยุดกัศโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนด้วย ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัศที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

- การหยุดกัศของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากซิลิคอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนอดิก ทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ทำให้สามารถทำการกัศเนื้อของผลึกซิลิคอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกการหยุดกัศสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพีจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ผลของขนาดควอนตัมขึ้นในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.24



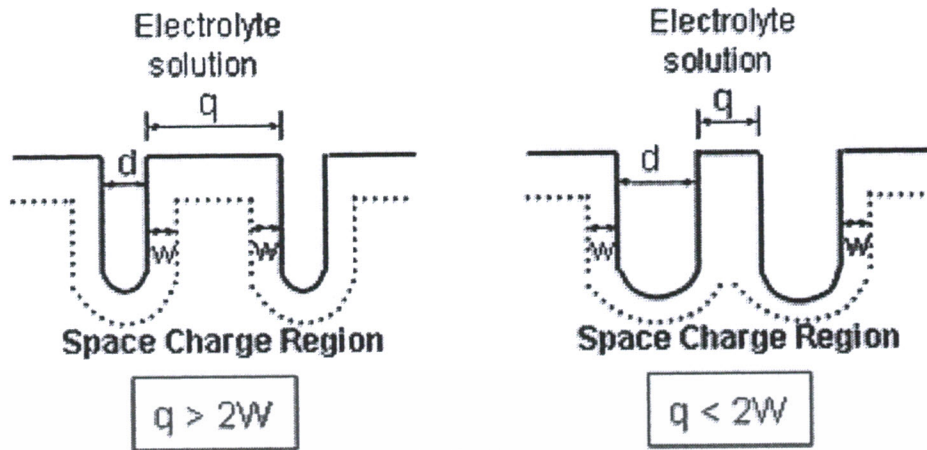
รูปที่ 2.24 กลไกในการหยุดกัศ โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนชนิดพี โดยที่

- (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 โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นกำแพงศักย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ΔE_v สำหรับโฮล และเท่ากับ ΔE_c สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้นการที่พาหะโฮลในผลึก ซิลิคอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ไฟฟ้าเคมีในการกัด โครงสร้างในส่วนต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่า มากกว่า ΔE_v ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่กำแพงศักย์ ΔE_v มีค่าพลังงานมากกว่า พลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิคอน ไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วน ของนาโนพอร์สซิลิคอนได้ ผลที่ตามมาคือเกิดการหยุดกัด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ΔE_v นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอน โดย ΔE_v จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัด ในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนพอร์ส ซิลิคอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่ ถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพี สามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้ สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ค) ดังนั้น จึงทำให้บริเวณก้นหลุมของพอร์สซิลิคอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่อง

- การหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการ ไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนโอดิก สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะ เป็นการ ไบอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัส ของผลึกซิลิคอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ W ดังนั้นกลไกใน การหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นแล้วจะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณ ปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายใน โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้าง

จากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่

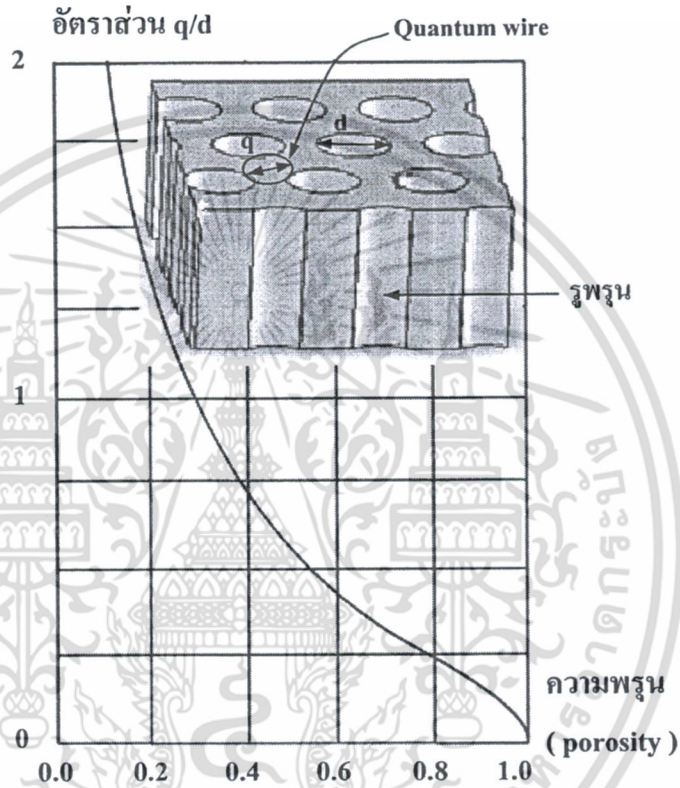
- (ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า $2W$
- (ข) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า $2W$

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 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้

2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน

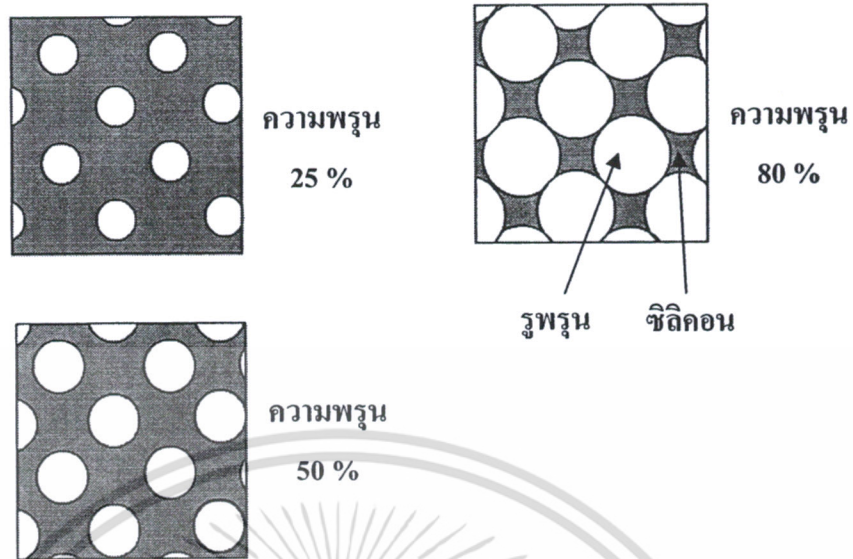
โดยทั่วไปแล้ววัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาด โครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

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 โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลง หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนนั้นมีความพรุนมากกว่าเดิม แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างพอร์ตซีลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

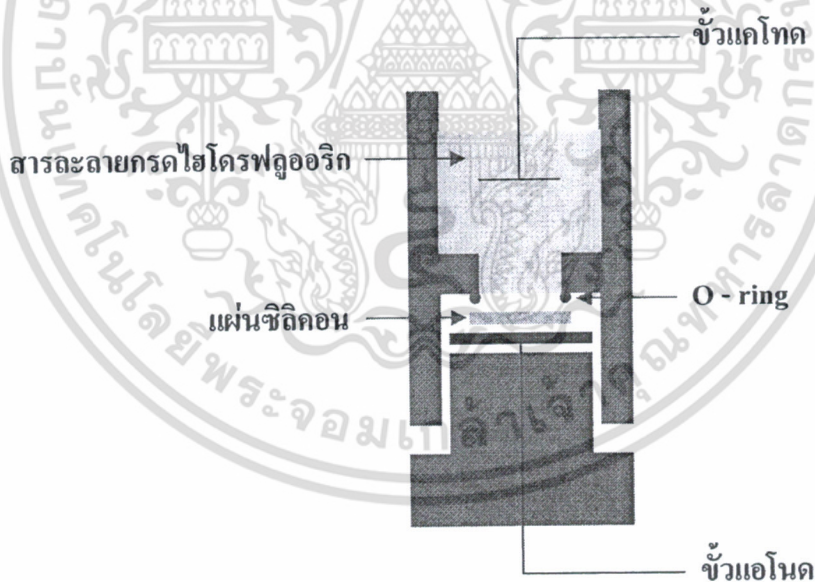
กระบวนการสร้าง และเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

ในบทนี้จะกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิคอน เทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความพรุน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว

3.1 กระบวนการสร้าง

3.1.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน เป็นวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถควบคุมปฏิกิริยาในการกัดเพื่อทำให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาตามความต้องการ ได้ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้ง เนื่องจากใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ และสามารถทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งนี้ จะประกอบด้วย แผ่นซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดจะจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แผ่นซิลิคอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยจะใช้โอริง (O-ring) เป็นส่วนป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซลล์ ต่อจากนั้นก็ทำการเทเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสูงเสลดไฟฟ้าเคมี และทำการป้อนกระแสไฟฟ้าบวกคงที่ให้กับ ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นขั้วลบจะจมอยู่ในสารละลายกรด ไฮโดรฟลูออริก ขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้านี้เองก็จะทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดด้วย โดยเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการแอโนไดซ์เซชันที่ได้ให้ความสนใจคือ ความเข้มข้น ของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน ซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก

3.1.2 การสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์ซิลิคอน

ชั้นพอร์ซิลิคอนที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้การ สร้างด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่ ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น และสามารถควบคุมความหนาของ ชั้นพอร์ซิลิคอนได้อีกด้วย

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์ซิลิคอน

1. การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

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

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

- ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยน้ำบริสุทธิ์ (De-Ionized (DI) water) ในเครื่องล้างความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- ดั้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิวหน้า

- ดั้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- ดั้มในไตรโคโลโรเอททีลีน (trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน

- ล้างด้วยอะซีโตน (acetone) ในเครื่องล้างความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเคลือบชั้นออกซิเจนในสุญญากาศด้านหลังแผ่นซิลิคอน

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะ

ทำการเคลือบโลหะออกซิเจนที่บริเวณด้านหลังของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำขั้วด้านหลังของอุปกรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ (vacuum evaporator) ซึ่งสามารถทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนได้ความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 (ข)

4. กระบวนการซินเตอร์ริง

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้านหลังแผ่น ไปทำการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนให้ระหว่างกระบวนการเอโนโคซ์เซชัน มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่น ได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการวางแผ่นซิลิคอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 L/min อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที

5. การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

โดยการนำเอาแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ข้างต้น ไปวางตรงตำแหน่งบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ลงไปในเซลล์ไฟฟ้าเคมี นำขั้วอิเล็กโทรดจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน 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 เพื่อกำจัดเศษล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่ในชั้นพอร์สซิลิคอน

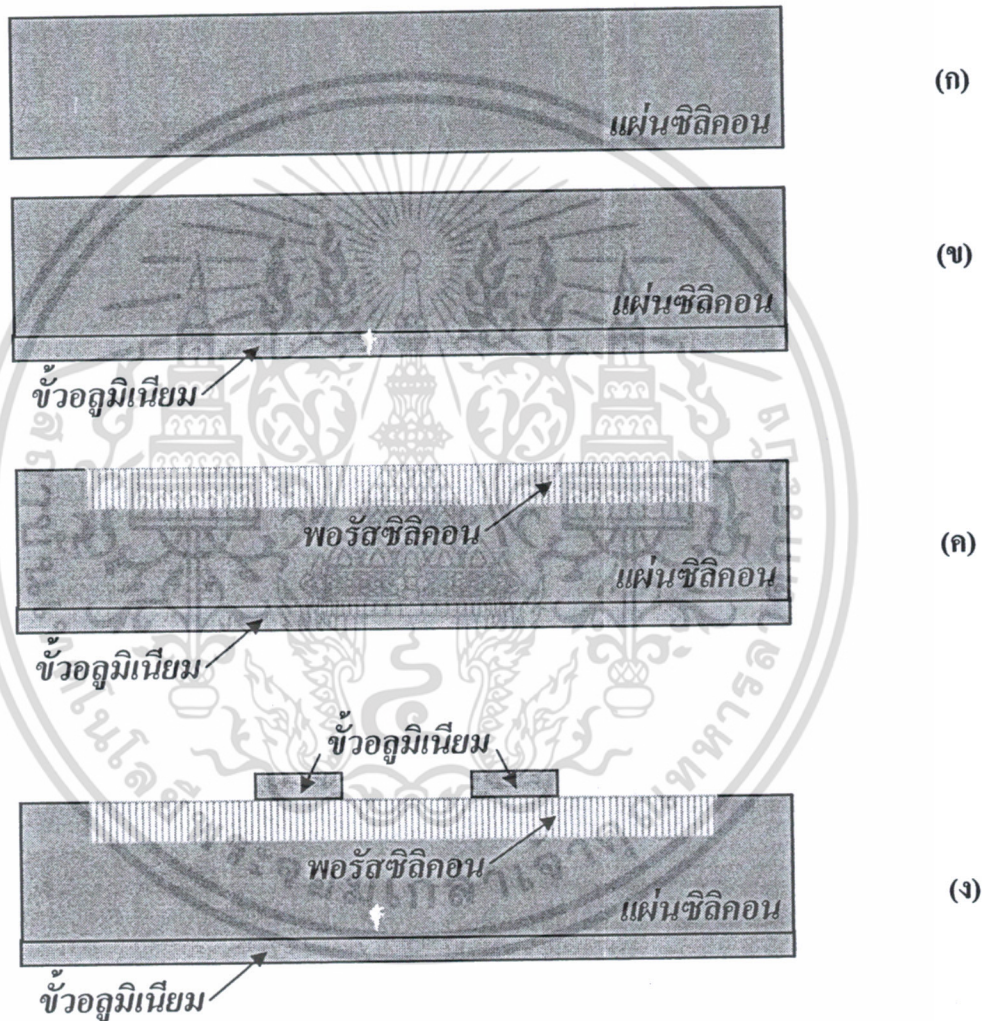
7. การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหน้าโดยการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนบริเวณที่มีชั้นพอร์สเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอน โดยใช้มาสค์สำหรับทำขั้วโลหะเพื่อทำขั้วของอุปกรณ์ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ $500\ \mu\text{m}$ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 3.2 (ง)

8. กระบวนการซินเตอร์ริง

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

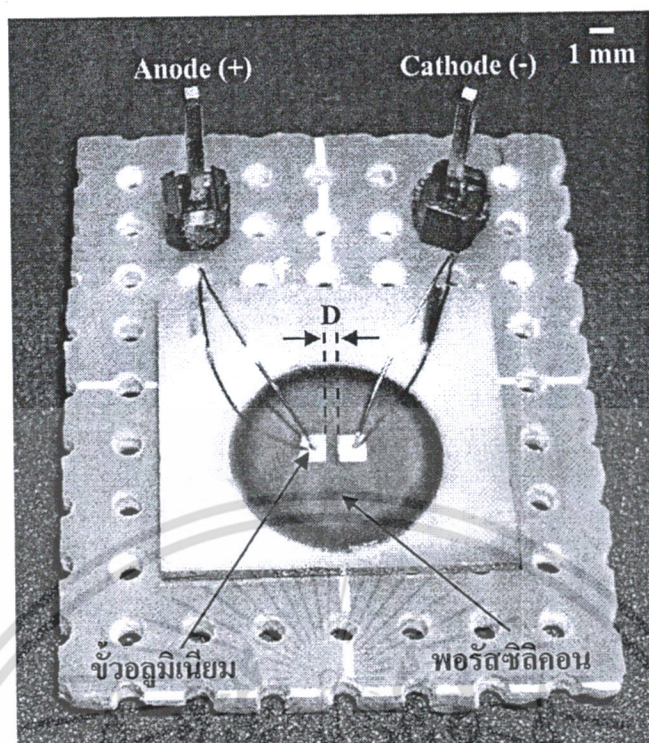


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์ซซิลิคอน

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิคอน

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

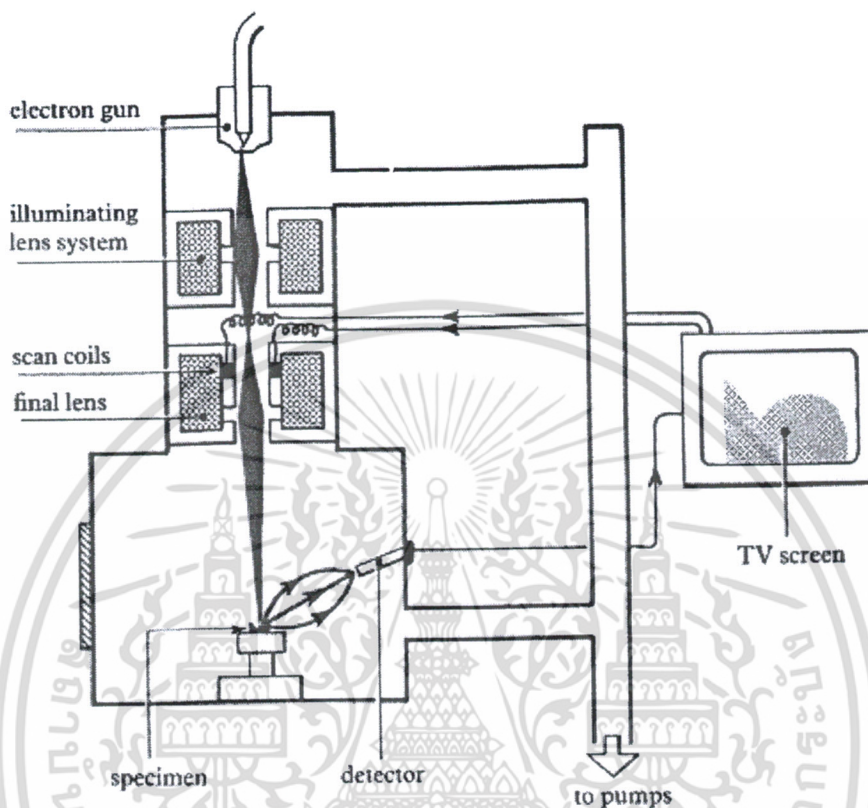
m_3 คือ น้ำหนักของวัสดุที่เหลือหลังจากการลอกชั้นความพรุนออก

3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิว และศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน เครื่อง SEM นี้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นอยู่ที่กำลังขยายสูงถึง 20 ถึง 500,000 เท่า จึงสามารถศึกษาพื้นผิวที่มีขนาดเล็กได้ดี โดย ส่วนประกอบของเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 3.4 การทำงานของเครื่อง SEM จะเริ่มจาก แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ให้อิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง เลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 kV โดยอิลูมินสเลนส์ (illuminating lens system) ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิวของวัสดุ คลายกับการกวาดรูปบนจอโทรทัศน์ และเลนส์ตัวสุดท้ายทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากสแกนคอยล์ให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ก่อนถึงตัววัสดุ เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัสดุจะให้สัญญาณออกมา ซึ่งสัญญาณต่างๆ จะถูกตรวจจับและถูกนำไปแสดงผลที่จอภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน และผลการตอบสนองทางแสงของชั้นพอร์สซิลิกอน ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

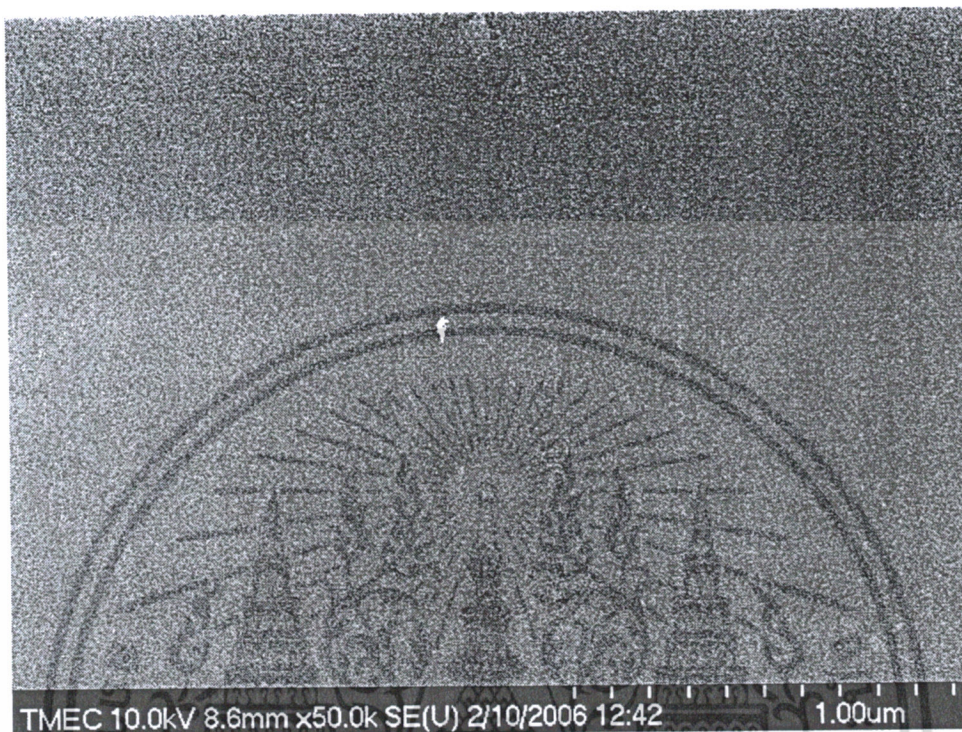
4.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยเครื่อง SEM

ทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างโดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ ซึ่งได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.1-4.8

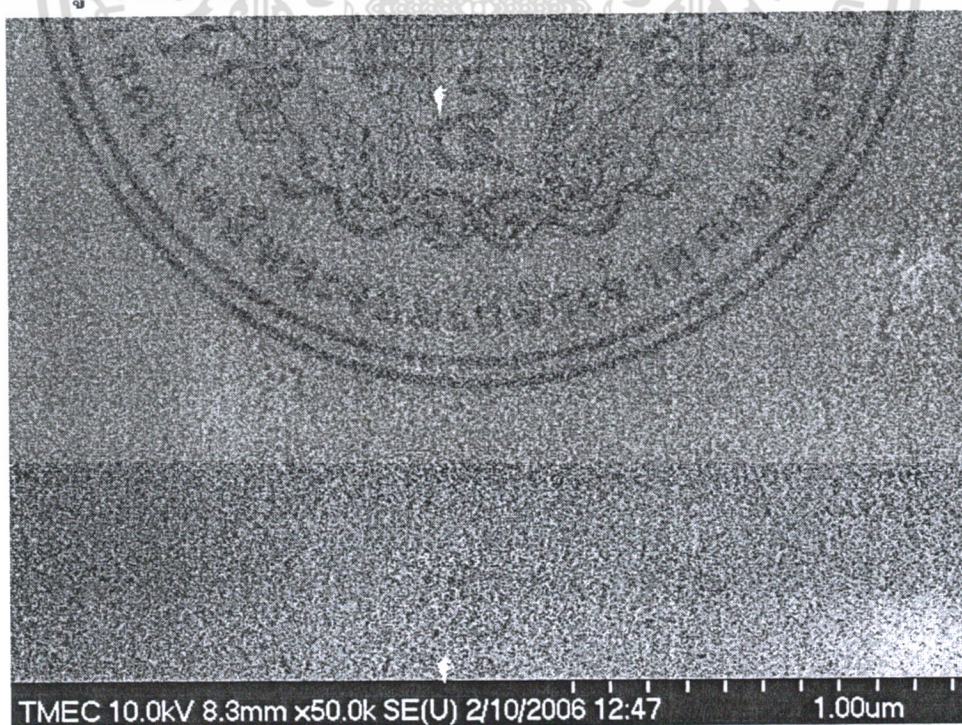


รูปที่ 4.1 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

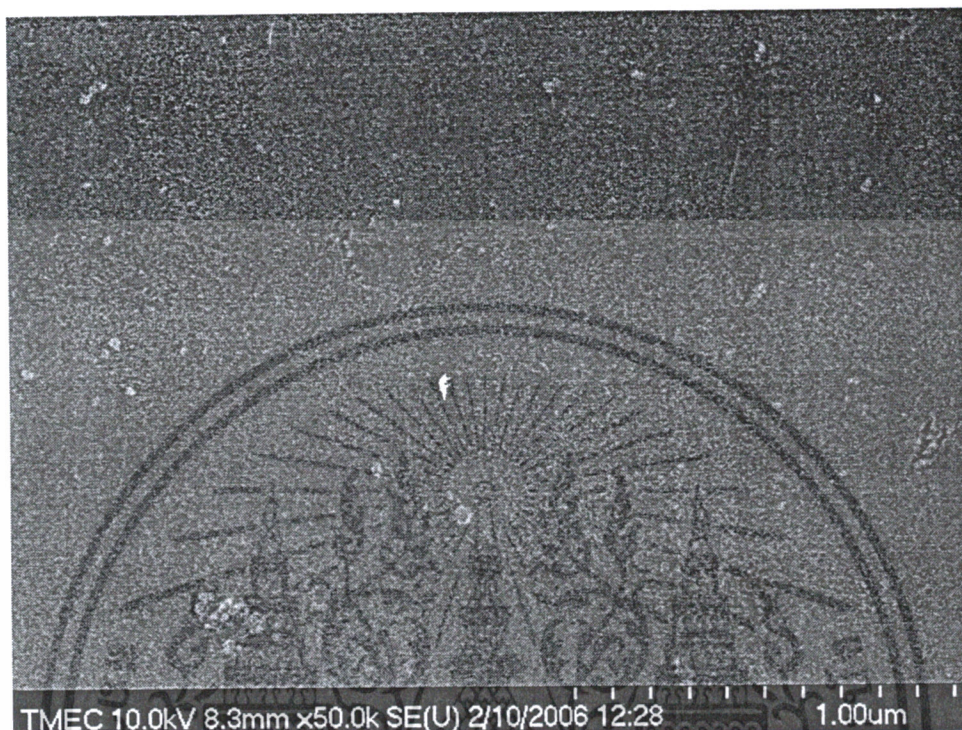


รูปที่ 4.2 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที

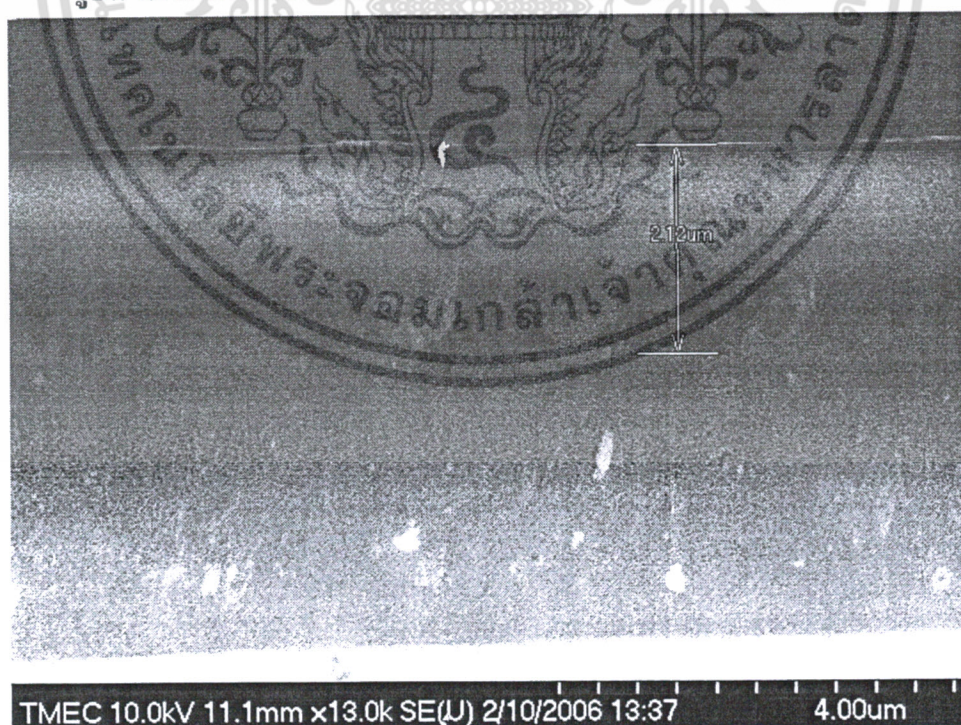


รูปที่ 4.3 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

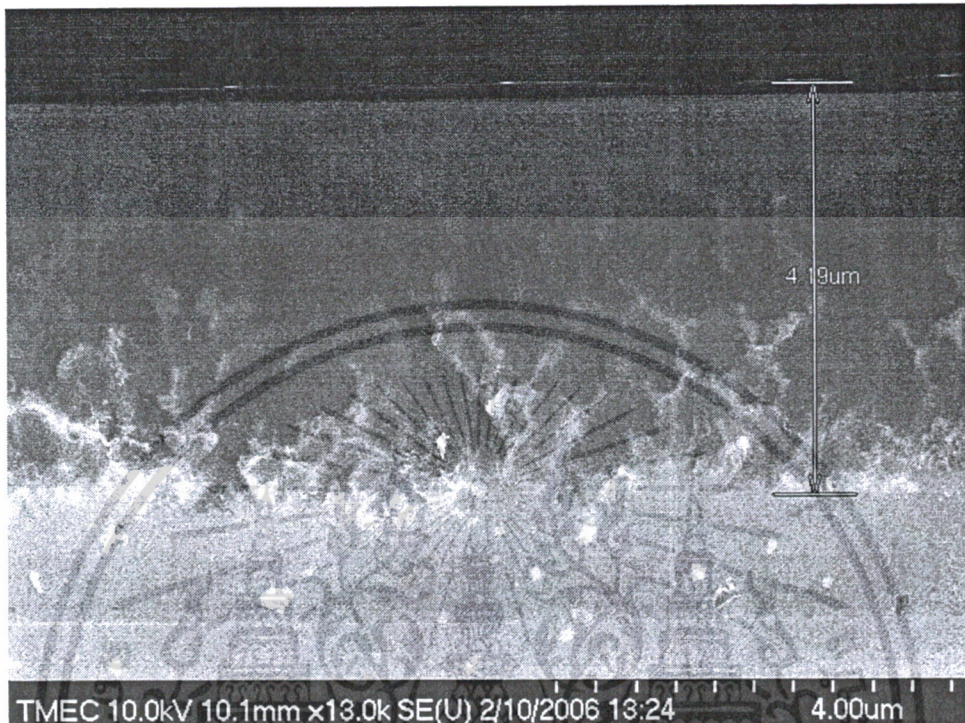


รูปที่ 4.4 ภาพพื้นผิวของชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที

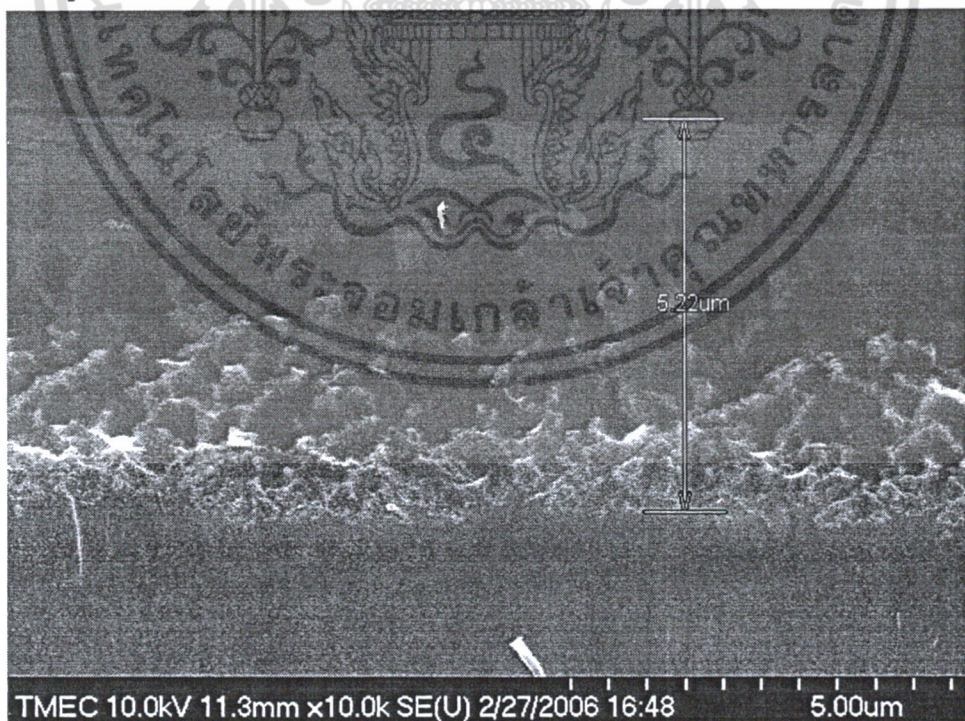


รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

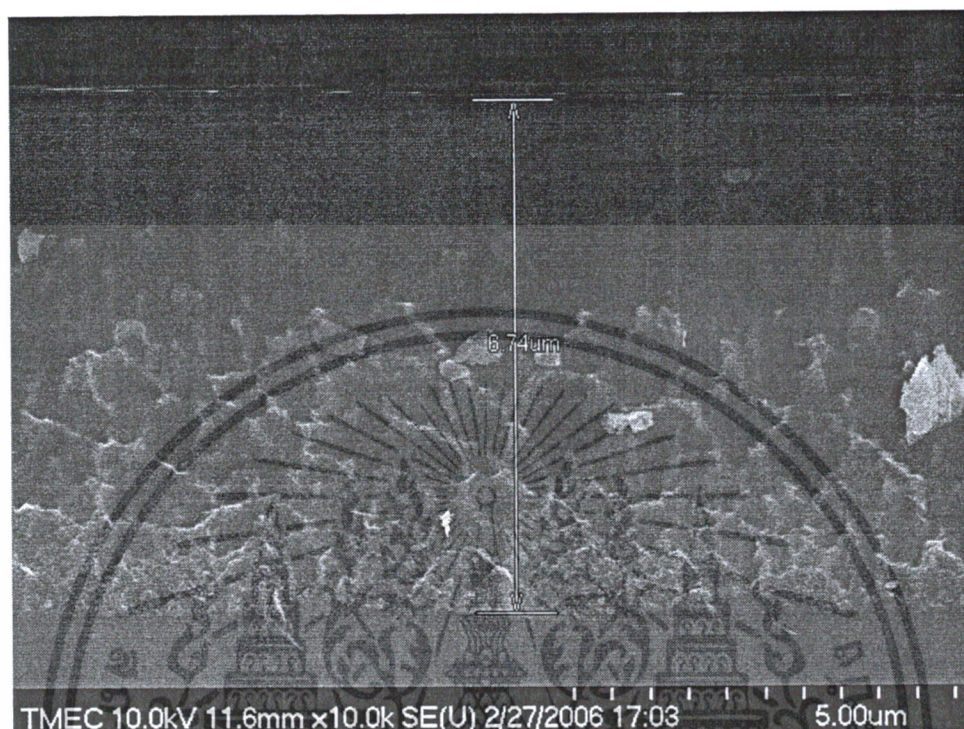


รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

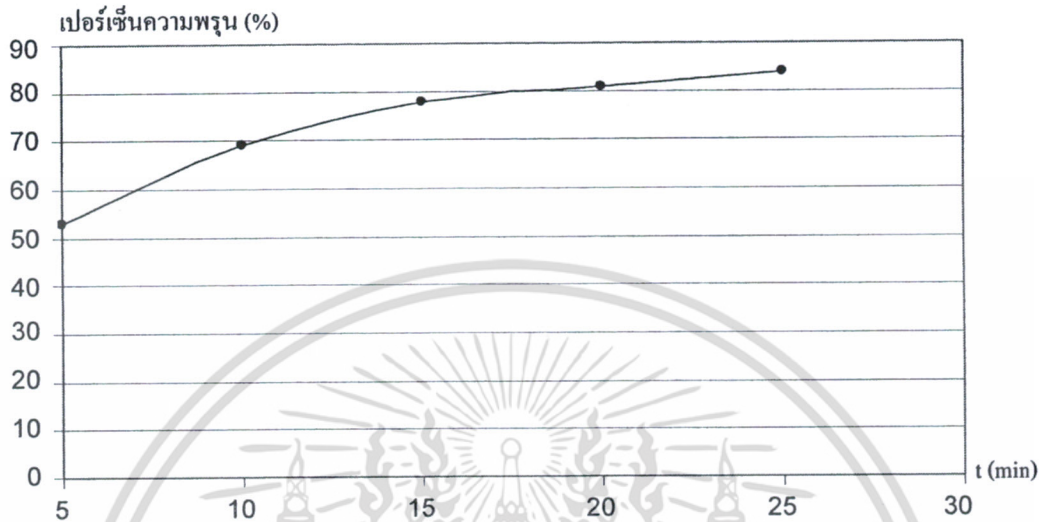


รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที

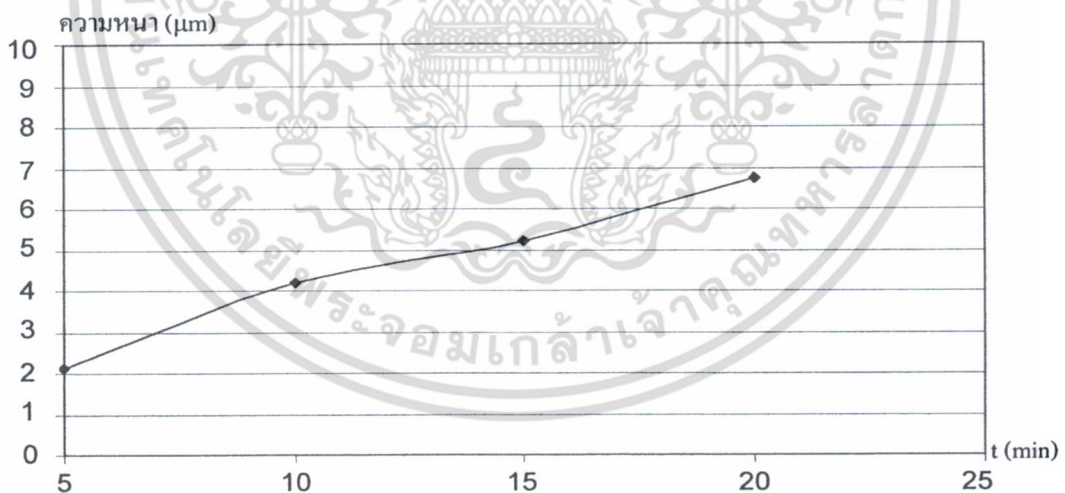
จากรูปที่ 4.1-4.4 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้พื้นผิวของชั้นพอร์สซิติคอนถูกกัดและทำให้รูพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากรูปที่ 4.5-4.8 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิติคอนมีความหนาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันมากขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการกัดชั้นพอร์สซิติคอนนานขึ้น ส่งผลทำให้รูพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และความหนาของชั้นพอร์สซิติคอนเพิ่มมากขึ้น

ทำการศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างโดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm^2 ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ โดยอ้างอิงความพรุน [49] และความหนา และคำนวณหาค่าความพรุนจากสมการเปอร์เซ็นต์ความพรุนโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน แสดงดังรูปที่ 4.9-4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาในการ
แอนโดไซเซชัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาในการแอนโดไซเซชัน

จากรูปที่ 4.9-4.10 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการแอนโดไซเซชันจะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิติคอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิติคอนมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าเวลาในการแอนโดไซเซชันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งเปอร์เซ็นต์ความพรุนและความลึกของชั้นพอร์สซิติคอนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองเพื่อศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอน

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงผลของโครงสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ทั้งในส่วนของความยาวคลื่น และความเข้มแสง โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน ที่นำมาศึกษานี้จะถูกทำการสร้างขึ้นมาให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถพิจารณาอย่างคร่าวๆ ได้ โดยการสังเกตจากสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.11 แสดงสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อชั้นพอร์สซิลิกอนถูกสร้างให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น สีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนไปด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มต้นจากสีน้ำตาลอมดำ ไปสู่น้ำตาลอมแดง และสีเหลือง ในที่สุด เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่ามากขึ้นตั้งแต่ 60 % ไปจนถึง 85 % และเมื่อนำชั้นพอร์สซิลิกอนที่แสดงในรูปที่ 4.11 เหล่านี้ ไปทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 365 แองสตรอมนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนเมตร ก็จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ โดยชั้นพอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างกันจะให้สีของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ แตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 4.12

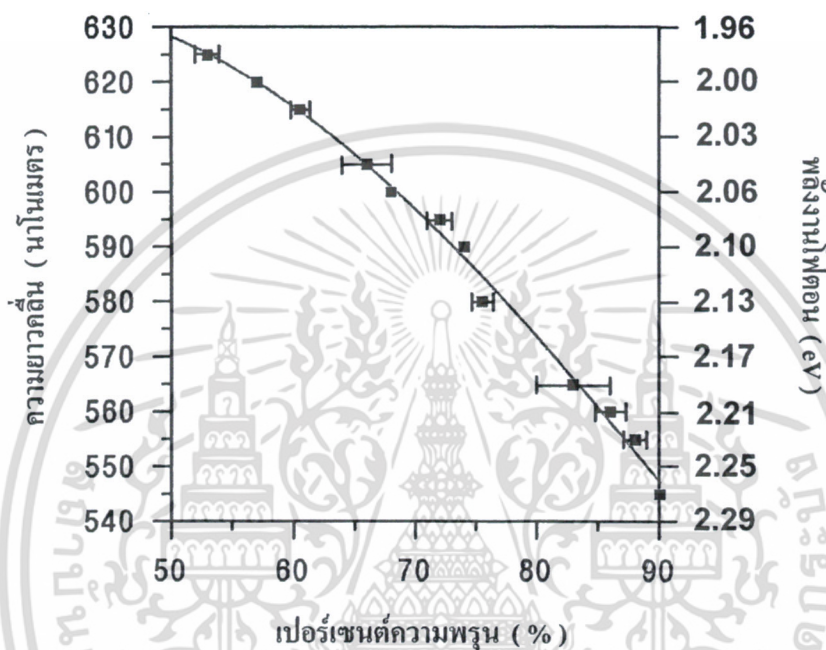


รูปที่ 4.12 แสดงสีของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ซึ่งได้จากชั้นพอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน

จากรูปข้างต้น สีของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอน โดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มจากสีแดงเข้มที่ความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 60% ไปสู่ สีแดงอมส้มที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 68% สีส้มอมเหลืองที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 76 % และสีเหลืองที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 85% จะเห็นได้ว่าสีเหล่านี้มีค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์เปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อชั้นพอร์ซซิติคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงมากขึ้นนั่นเอง ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองนี้ได้ทำการรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติกลีออนกับคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ในส่วนของความยาวคลื่นแสง จากผลการทดลองทั้งสองข้างต้นมาแสดงเอาไว้ในรูปแบบที่ 4.13



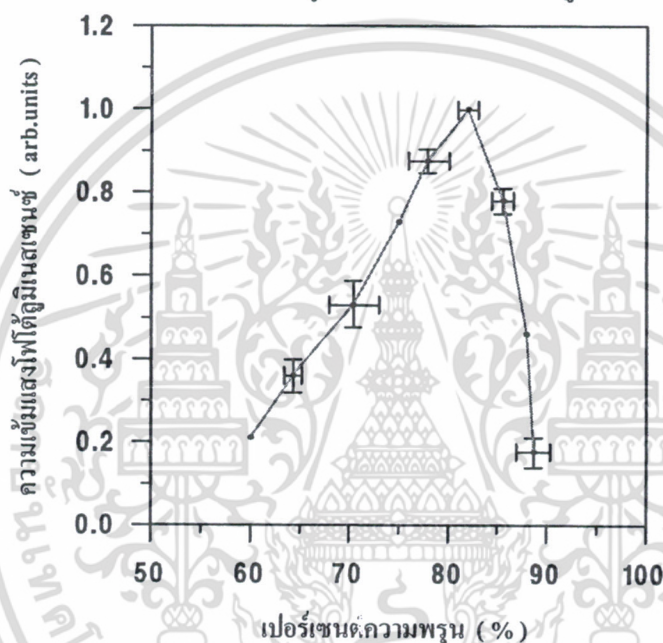
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติกลีออนกับความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อเราทำการลดขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์สซิติกลีออนลง โดยการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนให้แก่ชั้นพอร์สซิติกลีออน ด้วยการใช้น้ำในการ anodization ต่างๆ อาทิเช่น การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส , การลดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก หรือการเพิ่มเวลาในการ anodization เป็นต้นนั้น จะมีผลทำให้ความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลง หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือ โครงสร้างพอร์สซิติกลีออนมีขนาดของช่องว่างพลังงานเพิ่มสูงมากขึ้นจากเดิม โดยสามารถดูได้จากค่าพลังงานโฟตอนของขอดสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่าชั้นพอร์สซิติกลีออนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำกว่า 50 % ลงไปนั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์แต่อย่างใด ส่วนชั้นพอร์สซิติกลีออนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 54 % จนไปถึง 90 % จะแสดงคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ โดยจะมีความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ลดลงจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

625 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV นั่นเอง ซึ่งทั้งหมดที่ได้แสดงมานี้สามารถยืนยันถึงการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ Quantum wire effect ได้เป็นอย่างดี

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน กับคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ในส่วนของความเข้มแสง จะถูกนำมาแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนกับความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นพอร์สซิลิกอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ได้ออกมาจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงจะมีพื้นที่ผิวของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเท่ากับเป็นการไปเพิ่มพื้นที่ในการเปล่งแสง ดังนั้นเมื่อเกิดปรากฏการณ์โฟโวลูมิเนสเซนซ์จึงทำให้ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงกว่า มีปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์สูงขึ้นตามด้วย ซึ่งจากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเข้มแสงจะมีปริมาณสูงที่สุด เมื่อชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 81% - 83% ต่อจากนั้นปริมาณความเข้มแสงก็จะมีค่าลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้อ่านจบแล้วจะต้องคืนค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงเกินกว่านี้ขึ้นไป สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากชั้นพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงมาก ๆ นั้น โครงสร้างจะมีความอ่อนแอ และมีความเปราะบางสูงมากตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างที่มีขนาดเล็กหลายๆบางส่วนสามารถหลุดออกมาในระหว่างกระบวนการสร้าง หรือกระบวนการทำความสะอาดผิวหน้าได้ ชั้นส่วนของพอร์ซซิลิกอนที่หลุดออกมานี้ เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีขนาดเล็กมากๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) โดยผงละเอียดเหล่านี้สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ เมื่อถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) เรียกชั้นส่วนของพอร์ซซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดเหล่านี้ว่า “ Free standing porous silicon ”



(ก)

(ข)

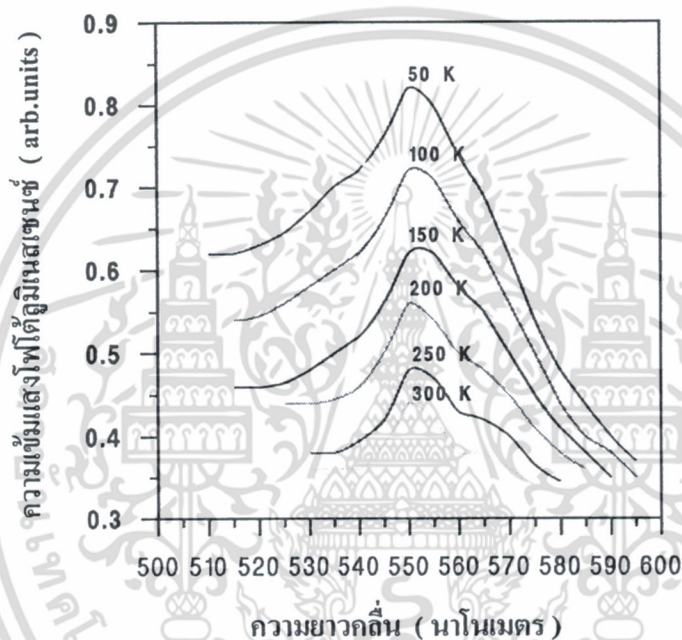
รูปที่ 4.15 แสดงภาพถ่ายของ Free standing porous silicon ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยที่ (ก) ก่อนทำการฉายแสงด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต (ข) ขณะทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต

4.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์ซซิลิกอน

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิลิกอนนี้ ชั้นของพอร์ซซิลิกอนที่นำมาศึกษาจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี หนา 100 มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร ใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization

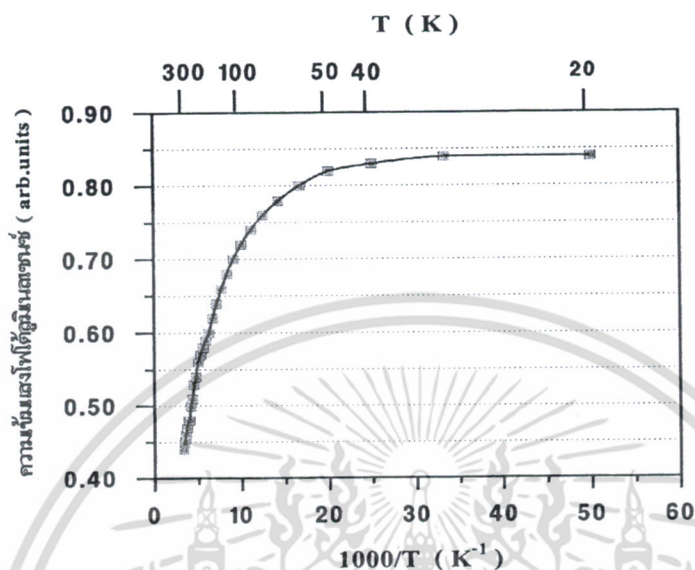
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 10 นาฬิกา พอร์สซิลิกอนที่ได้ทำการสร้างขึ้นตามเงื่อนไขเหล่านี้จะถูกนำไปบรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิดของเครื่อง Cryostat ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศที่ความดัน 6×10^{-7} mbar ต่อจากนั้นก็ทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่าที่ต่ำลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน จนถึง 20 เคลวิน โดยในระหว่างการลดอุณหภูมิลงนั้นก็ทำการวัดสเปกตรัมของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่อุณหภูมิต่างๆ

ส่วนความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์นั้น จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟลลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิ

จากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีความต่ำกว่าอุณหภูมิห้องลงไปนั้น จะมีผลทำให้ความเข้มแสงโฟลลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิกลอนที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน จนไปถึงที่อุณหภูมิจะประมาณ 100 เคลวิน ต่อจากนั้นความเข้มแสงก็จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีค่าคงที่ในที่สุด เมื่ออุณหภูมิมียุคต่ำกว่า 50 เคลวิน ลงไป ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำมากนั้น จะลดผลของพลังงานกระตุ้นเนื่องจากความร้อนที่มีต่อพาหะลง ทำให้อัตราการรวมตัวแบบเปล่งแสงที่อุณหภูมิต่ำนั้นจึงมีปริมาณที่สูงขึ้นนั่นเอง

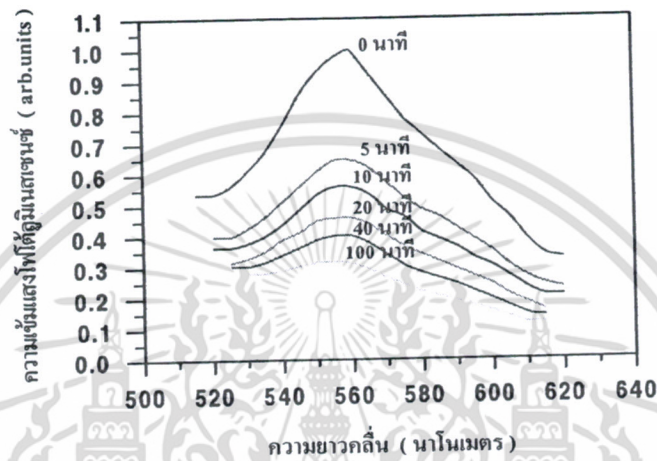
4.6 การทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพโฟลลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์ซซิกลอน

4.6.1 การศึกษาเสถียรภาพโฟลลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์ซซิกลอนภายใต้แสงอุตราไวโอเลต

ในการทดลองนี้ได้ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระบาย 100 มีสภาพด้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นวัสดุเริ่มต้น เพื่อสร้างชั้นพอร์ซซิกลอนโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ดังต่อไปนี้คือ ใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm² ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที หลังจากนั้น จึงนำไปทำการศึกษาดังผลของการฉายแสงอุตราไวโอเลตที่มีต่อเสถียรภาพโฟลลูมิเนสเซนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่อยู่ในอากาศ โดยกราฟในรูปที่ 4.18 จะแสดงสเปกตรัมแสงที่ได้จากโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่อยู่ในอากาศ ณ.เวลาในการฉายแสงอุตราไวโอเลตต่างๆ



รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการฉายแสงอุตราไวโอเลตต่างๆ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุตราไวโอเลตนั้น ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.19

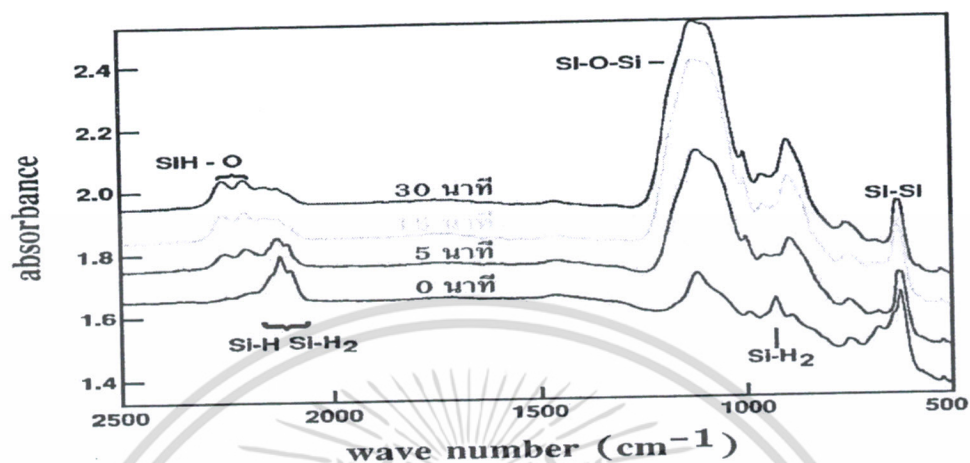


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ เมื่อเวลาในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตผ่านไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกราฟรูปที่ 4.19 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของการลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร ระหว่างพอร์ซซีกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตอยู่ตลอดเวลา กับพอร์ซซีกอนที่ถูกเก็บไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดในอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าในอากาศนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 ชั่วโมง พอร์ซซีกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตอยู่ตลอดเวลาจะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจะมีปริมาณความเข้มแสงเหลืออยู่เพียงประมาณ 25% จากปริมาณความเข้มแสงเริ่มต้น ส่วนพอร์ซซีกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา จะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงเหลืออยู่ประมาณ 85% เท่านั้น จะเห็นได้ว่าพอร์ซซีกอนที่ไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลาในอากาศ จะมีการลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ในปริมาณที่น้อยกว่าพอร์ซซีกอนที่ถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลาอยู่มาก

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่า การฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์ซซีกอนเป็นเวลานานๆจะมีผลต่อความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซีกอน โดยการลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์นี้ น่าจะมีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของนาโนพอร์ซซีกอน ซึ่งการจับพันธะกันของไฮโดรเจนและซีกอนนั้นมีได้หลายรูปแบบด้วยกัน [26] เช่น SiH , SiH_2 , $(\text{SiH}_2)_n$ และเพื่อเป็นการสนับสนุนข้อสันนิษฐานนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซีกอน ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องวัดฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของ Perkin Elmer ซึ่งผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์ซซีกอนที่ถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์สซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ

โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพอร์สซิลิกอนที่ตำแหน่งเลขคลื่น (wave number) ต่างๆจากกราฟในรูปที่ 4.35 ข้างต้นนี้ จะบอกถึงชนิดและลักษณะของพันธะที่อยู่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

แสดงชนิดและลักษณะของพันธะที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆของพอร์สซิลิกอน [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

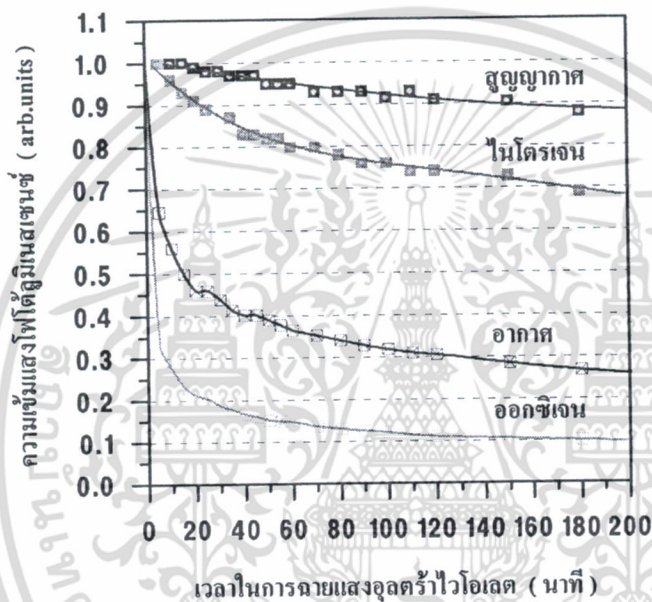
พิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.1 จะสามารถสังเกตพบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 907 cm^{-1} และ $2089 - 2135\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งการดูดกลืนทั้งสองตำแหน่งในที่นี้จะเกิดจากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของอะตอมซิลิคอน Si-H ที่มีการสั่นแบบ การงอตัว (Bending) และแบบการยืดตัว (Stretching) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์สซิลิกอนเป็นเวลานานๆ จะมีผลทำให้จำนวนพันธะระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนมีปริมาณที่ลดลง โดยจะสังเกตได้จากการลดลงของสเปกตรัมการดูดกลืนของอะตอมซิลิคอน Si-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 907 cm^{-1} และ $2089 - 2135\text{ cm}^{-1}$ นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากแสงอุลตราไวโอเลตที่ทำให้การฉายให้แก่พอร์สซิลิกอนเป็นเวลานานๆ ได้ไปทำลายพันธะระหว่างซิลิกอน กับ ไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) ที่จับตัวกันอยู่ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน เกิดพันธะแขวนขาด (dangling bonds) ของซิลิกอนขึ้น พันธะแขวนขาดของซิลิกอนเหล่านี้เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมของอากาศปกติจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนเกิดพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O-Si) ขึ้นมาแทนพันธะระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่ง 1105 cm^{-1} และการปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดชิ้นใหม่ ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ $2202 - 2253\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นของพันธะ Si-H-O เมื่อทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์สซิลิกอนเป็นเวลานานๆ พันธะแขวนขาดและพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ จะเป็นจุดที่ทำให้การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน มีลักษณะเป็น การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนลดลง จากผลการทดลองนี้เองได้สนับสนุนสาเหตุ และที่มาของการเปล่งแสงแบบ โฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนได้ว่า เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiation recombination) ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั่นเอง

4.6.2 การศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอร์สซิลิกอนที่อยู่ในสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆ

ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของก๊าซชนิดต่างๆ ที่มีต่อเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน ณ. ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตอยู่ตลอดเวลา และที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา โดยพอร์สซิลิกอนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ผ่านการคัดค้านจากเจ้าของลิขสิทธิ์แล้ว ผู้ใช้สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่ได้โดยไม่ต้องแจ้งให้เจ้าของลิขสิทธิ์ทราบ แต่อย่างไรก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้านจากเจ้าของลิขสิทธิ์แล้ว ผู้ใช้สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่ได้โดยไม่ต้องแจ้งให้เจ้าของลิขสิทธิ์ทราบ แต่อย่างไรก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้านจากเจ้าของลิขสิทธิ์แล้ว ผู้ใช้สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่ได้โดยไม่ต้องแจ้งให้เจ้าของลิขสิทธิ์ทราบ

นำมาศึกษานี้จะถูกรรจอยู่ใภษาณะระบบปิดซึ่งภายในจะบรรจุเต็มไปด้วบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน อากาศ และสุญญากาศ เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยกราฟใภษาณะที่ 4.21 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟโด้ลูมินเนสเซนซ์ กับการเวลาที่ใช้ใภษาณะฉายแสงอุลตราไวโอเลตใภษาณะโพร์สซิติคอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

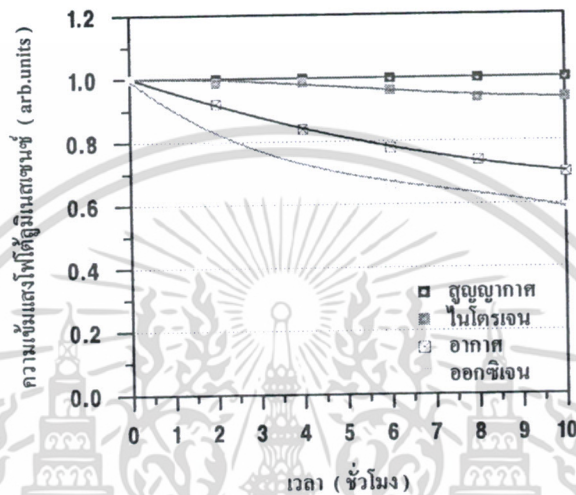


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟโด้ลูมินเนสเซนซ์ กับการเวลาที่ใช้ใภษาณะฉายแสงอุลตราไวโอเลตใภษาณะโพร์สซิติคอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ถึงการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของความเข้มแสงไฟโด้ลูมินเนสเซนซ์ของโพร์สซิติคอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของโพร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน ปริมาณความเข้มแสงไฟโด้ลูมินเนสเซนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจะมีปริมาณความเข้มแสงไฟโด้ลูมินเนสเซนซ์เหลืออยู่เพียงประมาณ 10% จากปริมาณความเข้มแสงเริ่มต้น เมื่อเวลาฉายแสงอุลตราไวโอเลตผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งจะแตกต่างกับในกรณีของโพร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมอื่นๆ อันได้แก่ อากาศ ไนโตรเจน และในสุญญากาศ ที่ความดัน 1×10^{-6} mbar โดยจะพบว่าความเข้มแสงไฟโด้ลูมินเนสเซนซ์ของโพร์สซิติคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าที่อยู่ในก๊าซออกซิเจน กล่าวคือจะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงเหลืออยู่ประมาณ 30% , 70% และ 90% ตามลำดับ ในส่วนกรณีของโพร์สซิติคอนที่ถูกเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาไว้ในที่มีคไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา และอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการแสดงความสัมพันธ์เอาไว้ในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟลลูมิเนสเซนซ์กับเวลาในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมงเท่ากัน พบว่าปริมาณความเข้มแสงโฟลลูมิเนสเซนซ์จะลดลงเหลืออยู่ประมาณ 80% และ 90% สำหรับพอร์ซเซลิคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน และในอากาศ ตามลำดับ ส่วนพอร์ซเซลิคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซไนโตรเจนนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟลลูมิเนสเซนซ์ในปริมาณที่น้อยมากๆ และพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟลลูมิเนสเซนซ์เลย เมื่อพอร์ซเซลิคอนอยู่ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศ

จากผลการศึกษาทางด้านโครงสร้าง และคุณสมบัติทางแสงของพอร์ซเซลิคอน แสดงให้เห็นว่าชั้นพอร์ซเซลิคอนที่สร้างขึ้นสามารถเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ออกมา โดยมีความยาวคลื่นที่ขุดสเปกตรัมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 545 นาโนเมตร ถึง 625 นาโนเมตร หรือที่พลังงานโฟตอนตั้งแต่ 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการ anodization ซึ่งเป็นกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่สามารถลดขนาดโครงสร้างของพอร์ซเซลิคอน ลงสู่ในระดับนาโนเมตรได้นอกจากนี้แล้วยังเป็นกระบวนการที่สามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างของวงจรรวม (IC)

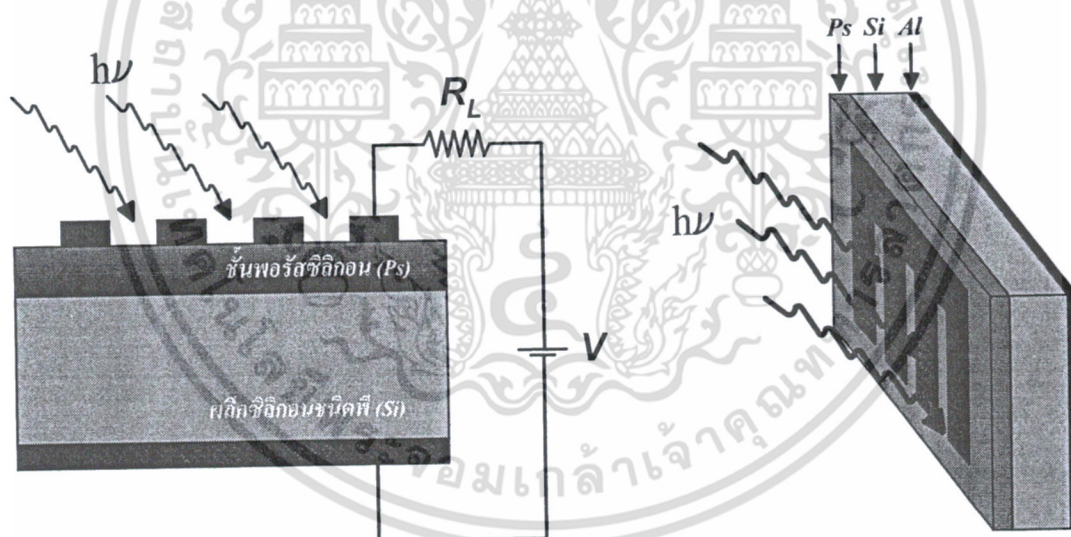
มาตรฐาน จากเหตุผลนี้เองจึงทำให้เกิดแนวทางและความเป็นไปได้ที่สามารถจะนำเอาพอร์ซเซลิคอนเป็นเยกสารที่ส่งวนเวลาหรือการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาคัดหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกอนมาใช้เป็นวัสดุทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ทั้งนี้ก็นำไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงต่างๆ ที่สามารถรวมอยู่กับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ บนฐานรองซิลิกอนเดียวกันได้

โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางในการนำเอาพอร์สซิลิกอนมาประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอน ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ จากการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาพอร์สซิลิกอนมาใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงในย่านที่สามารถมองเห็นได้ (visible light) ทั้งนี้เป็นผลจากการที่ชั้นพอร์สซิลิกอน ที่สร้างขึ้นมีขนาดของช่องว่างพลังงานที่กว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ จนมีค่าพลังงานเข้าสู่ย่านความยาวคลื่นแสงที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งเป็นผลจากการทดลองได้ถูกนำเสนอมาแล้วนั่นเอง ส่งผลทำให้อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนโดยทั่วไป ซึ่งมีช่องว่างพลังงานเพียง 1.14 eV และมีการตอบสนองต่อแสงดีในย่านอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

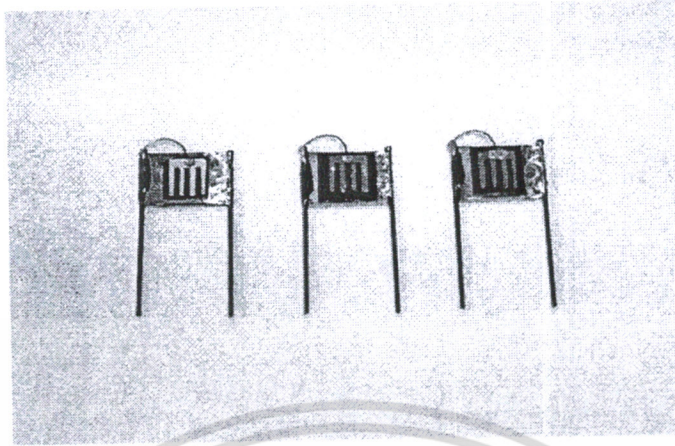
ในส่วนของการสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนนั้น ชั้นพอร์สซิลิกอนเริ่มต้นจะถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแสในระหว่างการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 47 % เป็นเวลานานเท่ากับ 10 นาที ซึ่งภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ anodization ชั้นพอร์สซิลิกอนที่ได้จะถูกนำไปจุ่มลงในน้ำปราศจากประจุไฟฟ้า (DI water) เพื่อชำระล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่บริเวณผิวหน้า และนำไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เมื่อกระบวนการสร้างมาถึงขั้นตอนนี้แล้วชั้นพอร์สซิลิกอน จะต้องไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางความร้อนใดๆอีก โดยชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปจัดเก็บเอาไว้ในภาชนะสุญญากาศของเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนทันที ทั้งนี้ก็เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมบนชั้นพอร์สซิลิกอน ซึ่งอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจะมีขนาดเท่ากับ $7 \times 7 \text{ mm}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอน

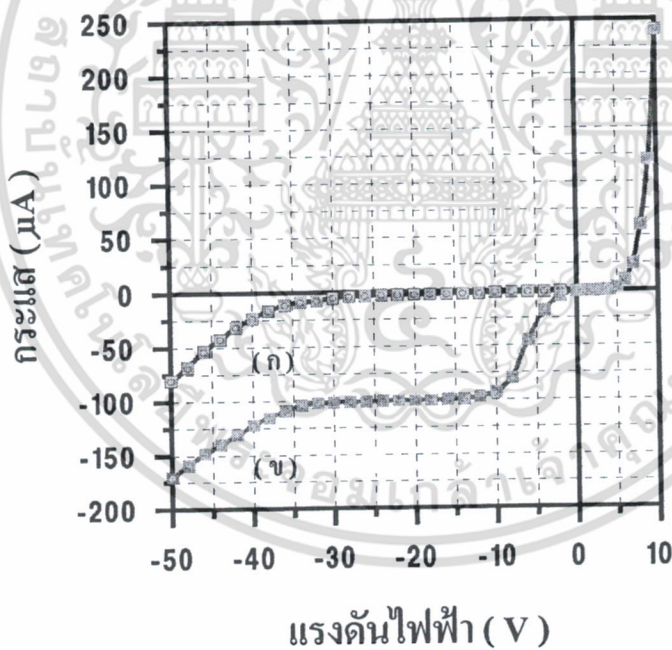
ส่วนภาพถ่ายของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอน จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นได้

ต่อจากนั้นจึงนำเอาอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างไปทำการวัดคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.40

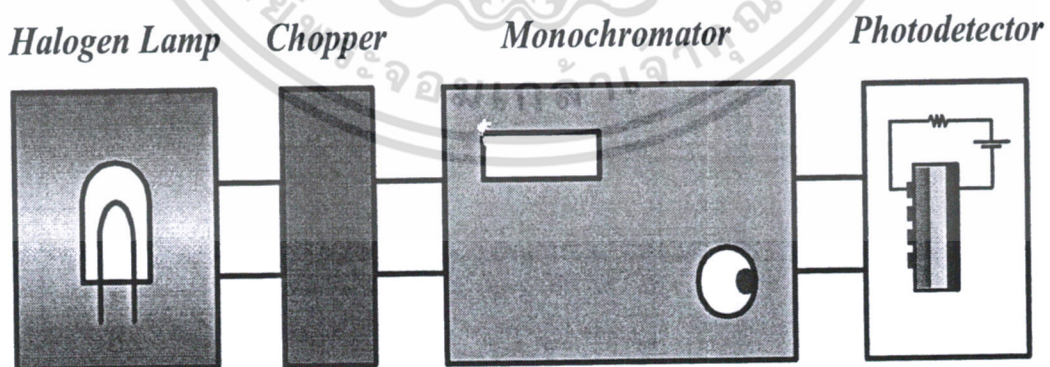


รูปที่ 4.25 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอน โดย (ก) อุปกรณ์ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายแสง (ข) อุปกรณ์ได้รับการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนมีพฤติกรรมแบบ rectifying ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดกำแพงศักย์แบบ Schottky ขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมกับชั้นพอร์สซิลิกอนนั่นเอง โดยการไบอัสแบบไปหน้า อุปกรณ์จะเริ่มมีกระแสไหลที่แรงดันไฟฟ้าประมาณ 5 โวลต์ ส่วนการไบอัสแบบย้อนกลับ พบว่า อุปกรณ์จะมีกระแสรั่วย้อนกลับมีค่าประมาณ $2 \mu\text{A}$ (I_p) และเมื่อทำการฉายแสงไฟจากหลอดฮาโลเจนให้กับอุปกรณ์จะมีผลทำให้กระแสรั่วย้อนกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยจะมีค่าอยู่ประมาณ $100 \mu\text{A}$ (I_p) ซึ่งผลต่างของกระแสทั้งสองนี้ ($I_p = I_b - I_d$) ก็คือกระแสโฟโต้ที่เกิดขึ้นจากการฉายแสงให้กับอุปกรณ์นั่นเอง โดยกระแสโฟโต้ (I_p) ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตามปริมาณความเข้มแสงและค่าความยาวคลื่นของแสงที่ทำการฉายให้แก่อุปกรณ์

โดยในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ (ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในระหว่างกระบวนการ anodization เป็นค่าต่างๆคือ 10, 20 และ 40 mA/cm^2 จนได้ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 65%, 70% และ 80% ตามลำดับ) อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นเหล่านี้จะถูกทำการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยการอาศัยต้นกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนส่องผ่านเครื่อง monochromator เพื่อกำหนดค่าความยาวคลื่นและความเข้มแสง ที่จะออกไปยังอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนซึ่งการจัดลำดับอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่กล่าวมานี้ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.26

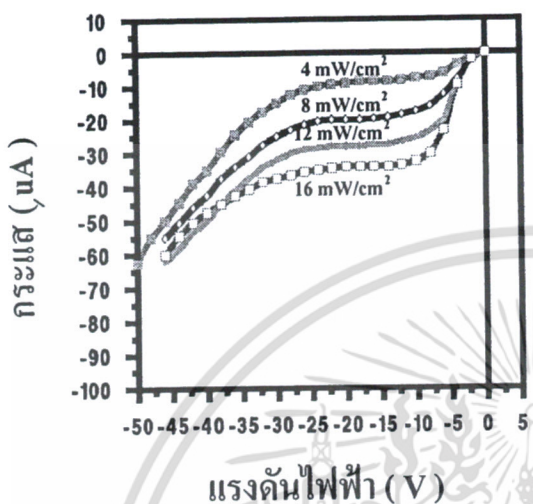


รูปที่ 4.26 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์เครื่องมือวัดการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอน

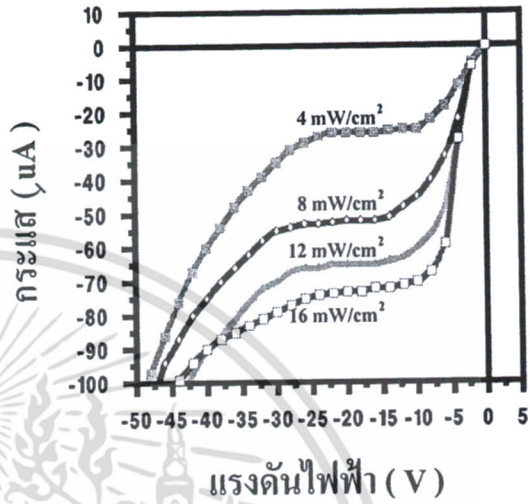
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโน

พอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเท่ากับ 65%, 70% และ 80% นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการผลิต ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการผลิตจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการผลิต อย่างไรก็ตามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

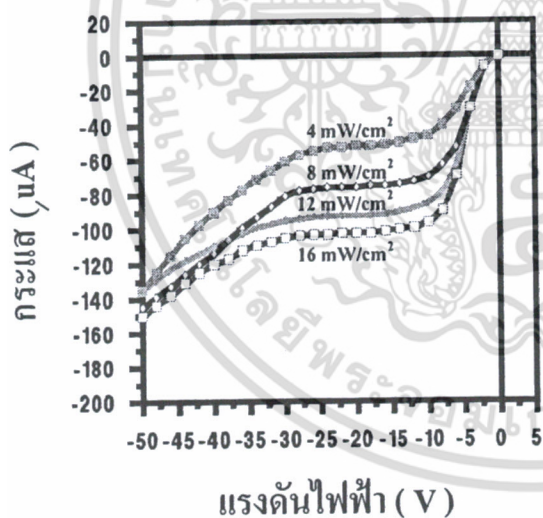
80% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปแบบที่ 4.27 , 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ



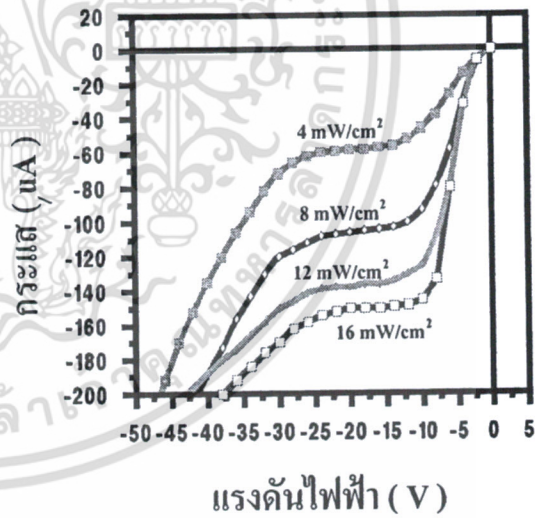
(ก) ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



(ข) ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร



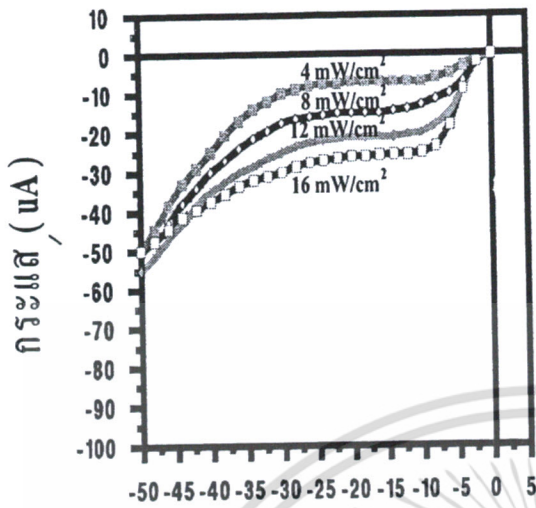
(ค) ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร



(ง) ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

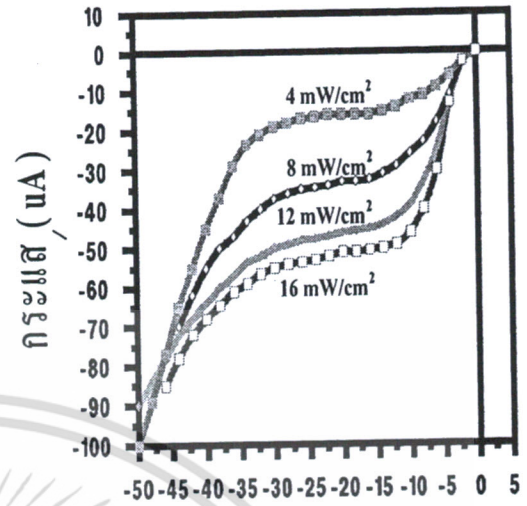
รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



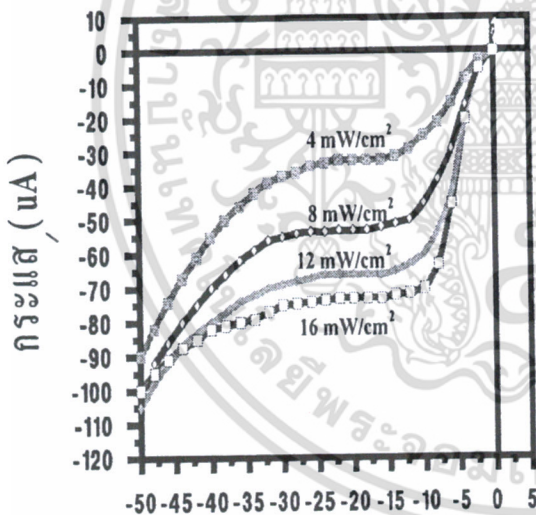
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ก) ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



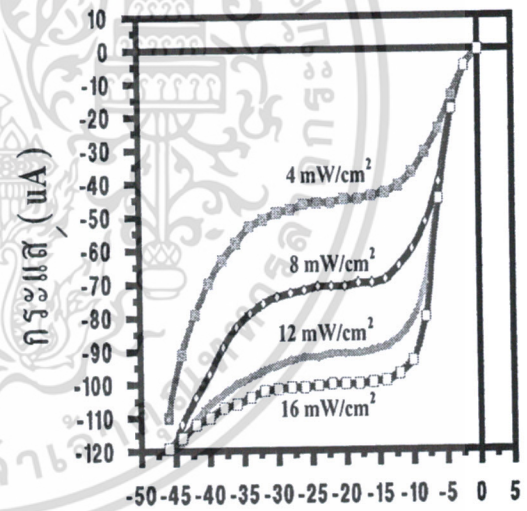
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ข) ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร



แรงดันไฟฟ้า (V)

(ค) ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

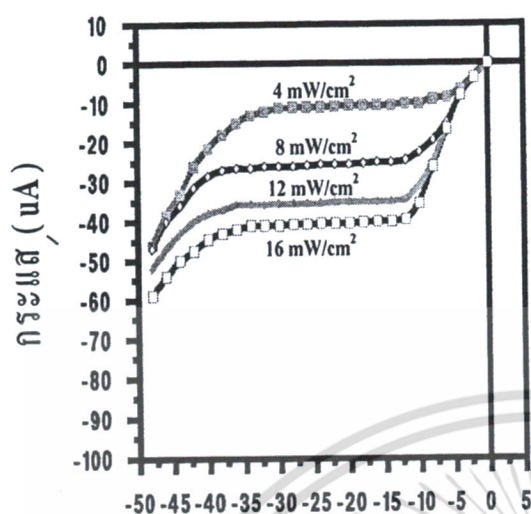


แรงดันไฟฟ้า (V)

(ง) ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

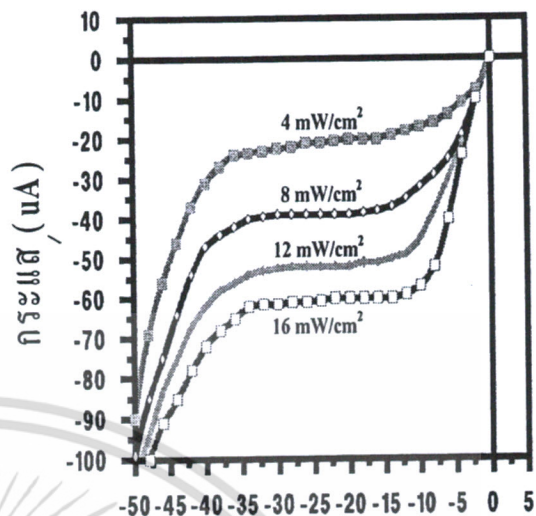
รูปที่ 4.28 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิติคอน ที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 70% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



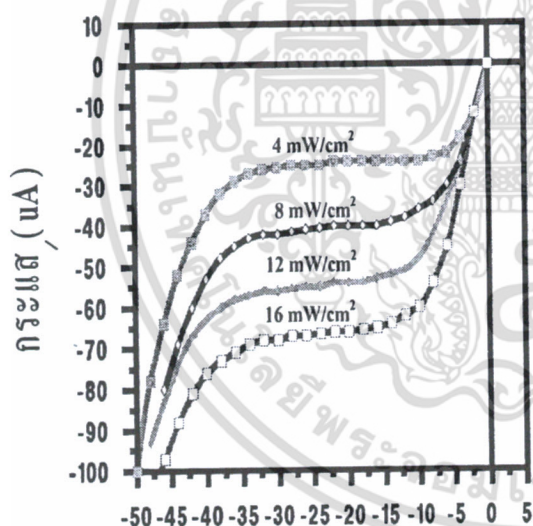
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ก) ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



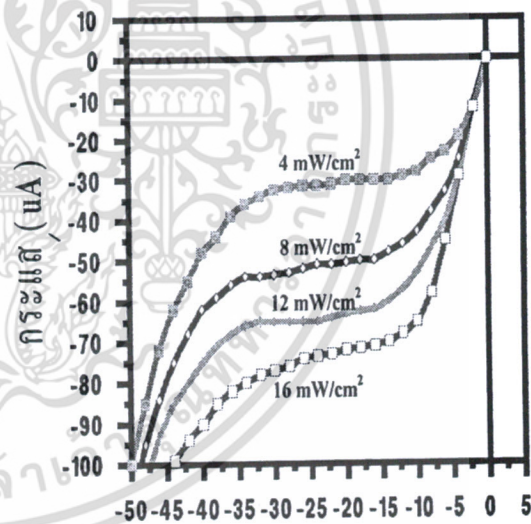
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ข) ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร



แรงดันไฟฟ้า (V)

(ค) ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร



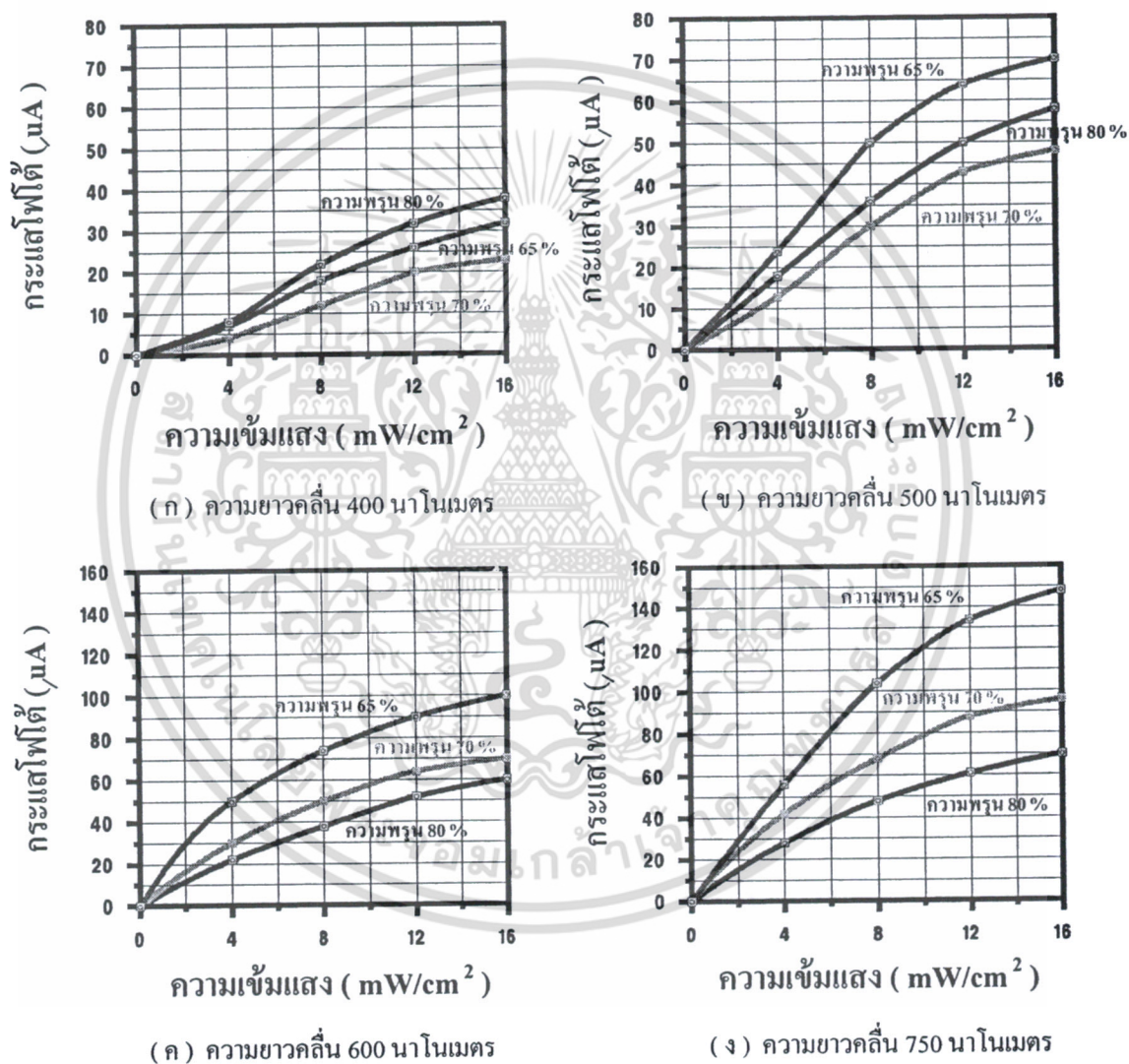
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ง) ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

รูปที่ 4.29 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 80% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

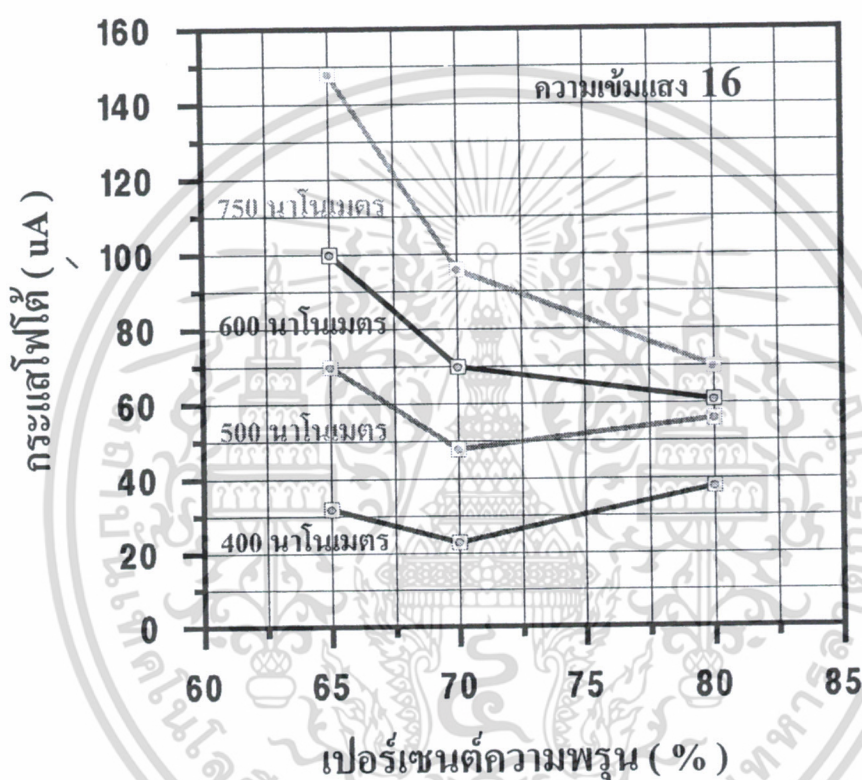
จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.27 , 4.28 และ 4.29 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความเข้มแสง และค่าความยาวคลื่นของแสงที่ฉายให้แก่อุปกรณ์ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต้กับความเข้มแสง ของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% , 70% และ 80% ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มแสงในขณะที่ทำการไบอัสแบบย้อนกลับที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -15 โวลต์ ของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% , 70% และ 80% ตามลำดับ ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนทุกตัวมีปริมาณกระแสเพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณความเข้มแสงที่ฉายให้แก่อุปกรณ์ในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่ากระแสที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไปตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน และตามค่าความยาวคลื่นแสงที่ได้ทำการฉายให้แก่อุปกรณ์ โดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

จากกราฟข้างต้นจะพบว่าอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างกัน จะให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไปด้วย โดยจะมีปริมาณกระแสเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ดังนี้คือ

$$\text{ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร : } I_{p65\%} > I_{p70\%} > I_{p80\%}$$

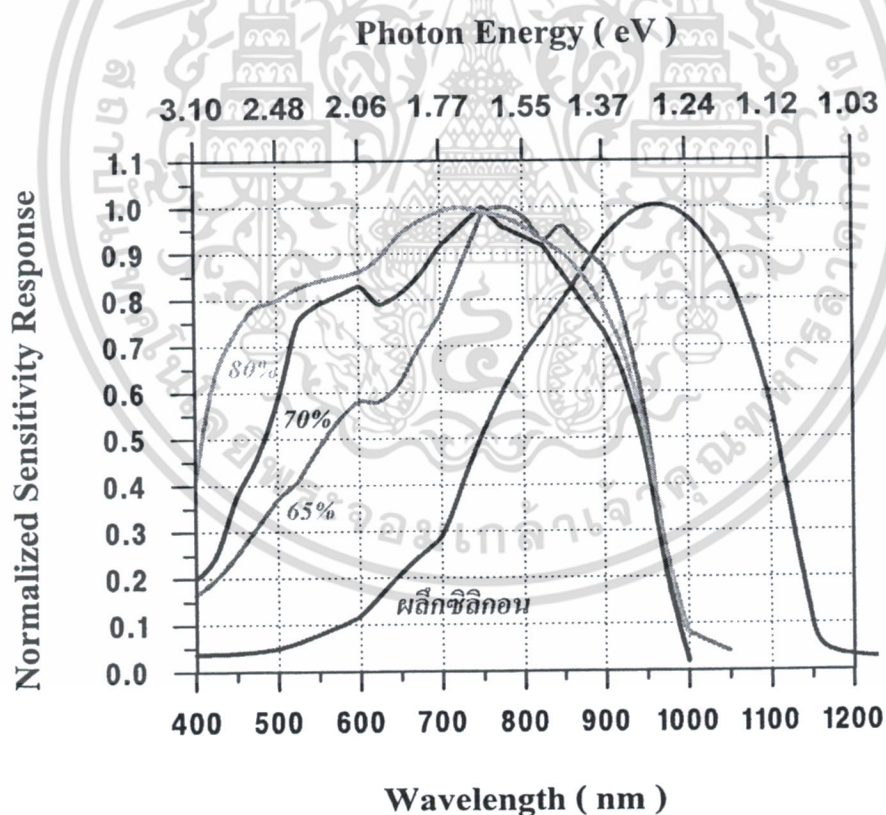
$$\text{ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร : } I_{p65\%} > I_{p70\%} > I_{p80\%}$$

$$\text{ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร : } I_{p65\%} > I_{p80\%} > I_{p70\%}$$

$$\text{ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร : } I_{p80\%} > I_{p65\%} > I_{p70\%}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าที่ความยาวคลื่นแสง 500 , 600 และ 750 นาโนเมตร อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% จะให้กระแสโฟโตในปริมาณที่สูงกว่าอุปกรณ์อื่นๆ ยกเว้นที่ความยาวคลื่นแสง 400 นาโนเมตร อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 80% จะกลับให้กระแสโฟโตในปริมาณที่สูงกว่าอุปกรณ์อื่น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่แตกต่างกันของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นนั่นเอง โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงๆจะตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี ทั้งนี้เป็นผลจากการที่ชั้นพอร์สซิลิกอนดังกล่าวมีความกว้างของช่องว่างพลังงานเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงได้ทำการตรวจวัดการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆในช่วงตั้งแต่ 400-1200 นาโนเมตร ที่ความเข้มแสงขาเข้ามีค่าเท่ากัน ของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอน ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ (65% , 70% และ 80% ตามลำดับ) ดังแสดงผลเอาไว้ในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า ผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่ผ่านการ normalized ด้วยความเข้มแสงที่ให้ออกมาจากต้นกำเนิดแสงแล้ว จะมีการตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดี นอกจากนี้ยังมีย่านในการตอบสนองที่กว้างมากขึ้น โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2

แสดงข้อมูลการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

อุปกรณ์โฟโตนิกที่สร้างขึ้นจากวัสดุชนิดต่างๆ	ช่วงความยาวคลื่นในการตอบสนองทางแสงที่ตำแหน่ง FWHM (นาโนเมตร)
ผลึกซิลิกอน	750 - 1100
ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65 %	550 - 950
ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 70 %	480 - 950
ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 80 %	410 - 950

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.32 และข้อมูลในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าย่านในการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนจะขยายไปยังด้านความยาวคลื่นสั้น และมีความกว้างครอบคลุมความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ (visible light) เมื่ออุปกรณ์อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิลิกอนได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอน ที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น โดยจะเกิดสเปกตรัมของการตอบสนองทางแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ในช่วงประมาณ 500 ถึง 625 นาโนเมตรขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เป็นผลจากการที่โครงสร้างแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนมีค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานมากขึ้น เมื่อนำโครงสร้างในระดับนาโนเมตรมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ quantum size effect ที่ได้ทำการเสนอมาแล้ว

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

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

1. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน
 2. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสงของพอร์สซิลิกอน
- นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาพบว่าเนื้อหาทั้งสองส่วนข้างต้น ยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันอยู่ โดยรายละเอียดทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้คือ

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขในการ anodization ซึ่งก็คือเงื่อนไขในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนนั่นเอง อันได้แก่ ชนิดและค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอน ความหนาแน่นกระแส เปรอร์เซนต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และเวลาที่ใช้ในการ anodization จะมีผลต่อลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมินิสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน โดย

1. เกี่ยวกับ โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

- การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี (0.1 - 30 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (30 - 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส (10 - 90 mA/cm²)
- การลดเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47 % - 10 %)
- การเพิ่มเวลาในการ anodization (5 - 30 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีผลทำให้ชั้นพอร์ซซิกอนที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงเกินกว่าเดิมได้ ซึ่งการที่ชั้นพอร์ซซิกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงเกินนั้น สามารถสรุปได้ว่าเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างของพอร์ซซิกอนมีขนาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีตามเงื่อนไขในการ anodization แบบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั่นเอง โดยเราสามารถสังเกตการลดลงของขนาดโครงสร้างพอร์ซซิกอนอย่างหาบๆ ได้จากภาพถ่ายของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 - 15,000 เท่า สำหรับพอร์ซซิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิกอนชนิดเอ็น และที่กำลังขยาย 50,000 เท่า สำหรับพอร์ซซิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิกอนชนิดพี นอกจากนี้แล้วยังได้มีการนำเอาเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (FT-Raman) มาใช้วิเคราะห์หาขนาดของโครงสร้างพอร์ซซิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ โดยจะเปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของผลึกซิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยตรงให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรค่าต่างๆ ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานในงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า พอร์ซซิกอนที่ถูกสร้างให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงเกิน จะมีขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรลดลงได้ โดยพอร์ซซิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 13 nm พอร์ซซิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 75 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 8 nm พอร์ซซิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 79 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 5 nm พอร์ซซิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 85 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 3 nm

2. เกี่ยวกับคุณสมบัติในทางแสงของพอร์ซซิกอน

จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ อย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

- การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิกอนชนิดพี (0.1 - 30 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิกอนชนิดเอ็น (30 - 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส (10 - 90 mA/cm²)
- การลดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47 % - 10 %)
- การเพิ่มเวลาในการ anodization (5 - 30 นาที)

จะมีผลทำให้แสงไฟโด้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมาจากพอร์ซซิกอนมีค่าความยาวคลื่น

เปลี่ยนแปลงลดลง หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือมีค่าพลังงานโฟตอนของแสงไฟโด้ลูมิเนสเซนซ์เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้ จากการเคลื่อนของยอดสเปกตรัมแสงไฟโด้ลูมิเนสเซนซ์ไปทางด้านความยาวคลื่นสั้น นั้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแถบพลังงานของพอร์ซซิกอนนั้นๆ จะต้องมีความกว้างของช่องว่างพลังงานเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้ว ยังได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่างขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิลิกอน กับคุณสมบัติทางแสง โดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ การกำหนดเงื่อนไขในการ anodization แบบต่างๆข้างต้น ส่งผลทำให้โครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิลิกอนมีขนาดลดลงได้ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิลิกอน นอกจากนี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ โดยทำให้ความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลงนั้นแสดงว่าการลดขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิลิกอนลง มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของพอร์ซซิลิกอนมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง และจากการทดลองพบว่าชั้นพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำกว่า 50 % ลงไปนั้น ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ ส่วนชั้นพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 54 % ไปจนถึง 90 % โดยจะมีค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลงจาก 625 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV ได้ ซึ่งทั้งหมดที่สรุปมานี้สามารถยืนยันได้ถึงการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect ได้เป็นอย่างดี

ส่วนการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางแสง พบว่าเมื่อทำการลดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายในระบบปิดลง จะมีผลทำให้ปริมาณความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม และจะมีค่าคงที่ในที่สุดเมื่ออุณหภูมิมียุ่ต่ำกว่า 50 K ลงไป

สุดท้ายเป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพของพอร์ซซิลิกอน จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์ซซิลิกอนเป็นเวลานานๆ มีผลทำให้ความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้ ซึ่งจากผลการศึกษาข้างพบต่อไปอีกว่าในการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์นี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วมาก เมื่อพอร์ซซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลาอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน ส่วนพอร์ซซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของสูญญากาศพบว่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงน้อยที่สุด และไม่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงเลย เมื่อพอร์ซซิลิกอนถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา ในสภาพแวดล้อมของสูญญากาศ ดังสรุปผลการทดลองเอาไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

แสดงข้อมูลปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา กับพอร์สซิติคอนที่ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต ในสภาพแวดล้อมของก๊าซต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง

สภาพแวดล้อม	ปริมาณความเข้มแสงของพอร์สซิติคอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา	ปริมาณความเข้มแสงของพอร์สซิติคอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต
ออกซิเจน	10 %	80 %
อากาศ	30 %	90 %
ไนโตรเจน	70 %	99 %
สุญญากาศ	90 %	100 %

โดยการลดลงของปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์นี้ มีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สซิติคอน ทำให้ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิติคอนเกิดพันธะแขวนขาดของซิติคอนอะตอม (dangling bonds) และพันธะระหว่างซิติคอนกับออกซิเจน (Si-O-Si) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถทำการวิเคราะห์ตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะต่างๆ ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิติคอนได้จากเครื่องวัดฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorbance) พันธะแขวนขาดและพันธะระหว่างซิติคอนกับออกซิเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ จะเป็นจุดที่ทำให้การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของนาโนพอร์สซิติคอนมีลักษณะเป็นการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ลดลง ผลการทดลองนี้ได้สนับสนุนถึงสาเหตุและที่มาของการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนได้ว่า น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิติคอนนั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three-level luminescent state model) ที่ถูกเสนอขึ้นมา จากผลการทดลองทางด้านโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของพอร์สซิติคอนที่ได้สรุปมาข้างต้นงานวิจัยนี้ได้นำผลการศึกษาดังกล่าวนี้มาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน เพื่อนำเอาพอร์สซิติคอนมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ด้วยการสร้างเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิติคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการนำเอาพอร์สซิงก์อนมาใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิงก์อนจากผลการศึกษาพบว่าอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิงก์อนที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดี และมีความกว้างในการตอบสนองครอบคลุมความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ (visible light) มากขึ้น เมื่ออุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์นาโนพอร์สซิงก์อนนั้นๆ ได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิงก์อนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น โดยจะเกิดสเปกตรัมของการตอบสนองทางแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ในช่วงประมาณ 500 ถึง 625 นาโนเมตรขึ้น ทั้งนี้เป็นผลจากปรากฏการณ์ quantum size effect และจากการทดลองนี้เองทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวไปพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (color sensor) หรือผลิตเป็นตัวตรวจวัด (detector) สัญญาณแสงภายในชิพวงจรรวมที่มีการสื่อสารด้วยแสงต่อไปภายอนาคตได้

5.2 วิจัยผลการทดลอง

จากผลการทดลองในการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนด้วยเทคนิคกราวิเมตริก และการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตนิกมินิมัสมัของชั้นพอร์สซิงก์อน ที่สร้างขึ้นจากการใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน พบว่าวิธีการทั้งสองในการวัดแต่ละครั้งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกไปบ้าง ดังนี้คือ

ตารางที่ 5.2

แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตนิกมินิมัสมัของชั้นพอร์สซิงก์อนที่สร้างขึ้น โดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน

	พอร์สซิงก์อนที่สร้างขึ้น โดยใช้			พอร์สซิงก์อนที่สร้างขึ้น โดยใช้		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	<ul style="list-style-type: none"> ■ แผ่นผลึกซิงก์อนชนิดพี 10 Ω-cm ■ ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm² ■ สารละลายกรด HF 47 % ■ เวลาในการ anodization 10 นาที 			<ul style="list-style-type: none"> ■ แผ่นผลึกซิงก์อนชนิดพี 10 Ω-cm ■ ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm² ■ สารละลายกรด HF 20 % ■ เวลาในการ anodization 10 นาที 		
เปอร์เซ็นต์ความพรุน (%)	68 %	64 %	65 %	85 %	87 %	86 %
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	600	605	605	560	555	560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ถึงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซ็นต์ความพรุน และค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน ที่สร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน โดย

- สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 2-3 % และสำหรับชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่สูงเกินกว่า 81-83 % ขึ้นไป ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่คำนวณมีแนวโน้มว่าจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงได้ ทั้งนี้เนื่องจากผลของโครงสร้างที่เปราะบางของชั้นพอร์สซิลิกอน โดยสามารถสังเกตได้จากการลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ เมื่อพอร์สซิลิกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงกว่า 81-83 % ขึ้นไป

- ส่วนค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน พบว่า จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ ± 5 นาโนเมตร หรือประมาณ ± 0.018 eV สำหรับค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมา ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองได้ทำการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ตลอดสเปกตรัมครั้งละ 5 นาโนเมตร นั่นเอง