

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง
แบบพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

Development of Silicon Solar Cells by using Electrochemical Etched
Porous Silicon as an Anti-Reflection Layer



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง

แบบพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

Development of Silicon Solar Cells by using Electrochemical Etched

Porous Silicon as an Anti-Reflection Layer



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง
แบบพอร์สซิลิคอนที่ได้จากวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

Development of Silicon Solar Cells by using Electrochemical Etched
Porous Silicon as an Anti-Reflection Layer

จัดทำโดย

นางสาวณิชารีย์ รตนวรากร รหัส 45010257



ปริญญาานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบแล้วโดยอาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการเรื่องการประยุกต์ใช้งานชิ้นพอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์ต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้ คำสั่งใจ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้ ทำให้การทำโครงการชิ้นนี้มีความก้าวหน้าขึ้นมาก ขอกราบขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ดิชมในโครงการนี้ ขอขอบพระคุณ นายสรวิศ มุ่งการนา และ นายจิรวุฒิ ปราบเขตที่ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) NECTEC ที่ให้ความอนุเคราะห์ SEM ศูนย์ TMEC ที่อนุเคราะห์ SEM และสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ I-V Tester, SPI Simulator และเครื่องมือวัดการสะท้อนและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และนักศึกษาปริญญาโทและเพื่อนนักศึกษาปริญญาตรีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในหลายๆด้าน โดยเฉพาะเรื่องคำแนะนำในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ จึงขอถือโอกาสแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

(นางสาวณิชาธิ์ รตนวรากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอน ที่ได้จากวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

นางสาวณิชาธิ์ รตนวรากร

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

ชั้นพอร์สซิลิคอน (PS) เป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก สามารถสร้างชั้นบนผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนทั่วไปได้ ชั้นพอร์สซิลิคอนนี้มีคุณสมบัติพิเศษสามารถดูดกลืนแสงและลดการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน โดยชั้นพอร์สซิลิคอนที่นำมาศึกษาสามารถสร้างได้จากปฏิกิริยาการกัดแบบไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า Electrochemical Etching ของแผ่นผลึกซิลิคอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งในปัจจุบันการกัดพอร์สซิลิคอนนิยมใช้วิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี เนื่องจาก มีข้อดีหลายอย่าง เช่น มีความสม่ำเสมอที่ดี สามารถควบคุมความลึก ความพรุนของพอร์สซิลิคอน สามารถสร้าง Gradient index ARCs ได้ และสามารถสร้างได้ถึงระดับไมโครพอร์ส ซึ่งพอร์สซิลิคอนที่กล่าวถึงในการศึกษานี้จะสร้างโดยวิธีการกัดแบบไฟฟ้าเคมีโดยมีกรดไฮโดรฟลูออริกเป็นส่วนผสมพื้นฐานซึ่งจะสร้างโดยใช้ single tank vertical cell โดยในทดลองนี้จะศึกษาโดยจะเน้นที่พารามิเตอร์ของเวลาในการสร้าง ความเข้มข้นของกระแส และสารละลายที่ใช้กัด ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

จากผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี อย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส หรือการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี มีผลทำให้ขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรและการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากปรากฏการณ์ quantum size effect สุดท้ายเป็นการนำเอาพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะถูกนำมาสร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

Development of Silicon Solar Cells by using Anodized Porous Silicon as an Anti-Reflection Layer

Ms. Nicharee Ratanavarakorn

Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech (Advisor)

2ND Semester, Education Year 2005

Abstract

Porous silicon (PS) or bulk silicon contains many small pores can be formed on any silicon surface. Because of the excellent light trapping and anti-reflection properties of porous silicon layer, it is widely used as an anti-reflection layer of solar cell. The porous silicon layer is formed by electrochemical etching reaction of silicon wafers in hydrofluoric solution which is called anodization. In the present, anodization method is widely use because it has many advantage such as highly uniform films with excellent anti-reflection(AR), can control the dept and pore of porous, gradient index ARCs and can be form to micro porous. The porous silicon described in this our study was fabricated by the electrochemical anodization of silicon in a hydrofluoric acid(HF) based electrolyte in single tank vertical cell. In this study the effect of anodization time, anodization current density and ratio of hydrofluoric acid concentration and ethanol solution and investigated. Finally, silicon solar cells with anodized porous silicon as an anti-reflection layer are fabricated.

It is found that the varying one of anodization conditions such as decreasing the current density or increasing the anodization time. It can decreases nanostructure which attributed to the size effect. Finally,The porous silicon was applied to be optoelectronic divice such as a porous silicon solar cells.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
Abstract	IV
สารบัญ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)	2
2.1 บทนำ	2
2.2 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน	3
2.3 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน	3
2.4 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิคอน	5
2.4.1 แบ่งตามขนาดของแท่งพอร์ส	5
2.4.2 แบ่งตามลักษณะของรูพรุน	5
2.4.3 แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน	6
2.5 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน	6
2.6 พฏิกิริมทางแสง	8
2.6.1 พฏิกิริมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	8
2.6.2 พฏิกิริมทางแสงของผลึกซิลิคอน	12
2.6.3 พฏิกิริมทางแสงของพอร์สซิลิคอน	15
2.7 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน	16
บทที่ 3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน	17
3.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching	17
3.1.1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี	17
3.1.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ที่สร้างจากวิธี Stain etching	18
3.2 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Microwave plasma decomposition ของก๊าซไฮโดรเจน (SiH ₄)	20
3.3 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Laser breakdown ก๊าซไฮโดรเจน (SiH ₄)	21
3.4 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี High frequency discharge	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)	หน้า
3.5 การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี	22
3.5.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	23
3.5.2 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	24
3.5.3 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส ระหว่างผลึกซิติคอนกับสารละลายไฮโดรฟลูออริก	28
3.5.4 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	29
3.5.5 กลไกการเกิดพอร์สซิติคอน	31
3.5.6 กลไกในการหยุดกัด โครงสร้างของพอร์สซิติคอน	39
3.5.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอร์สที่สร้างด้วยวิธี Anodication	42
3.5.8 การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี	44
บทที่ 4 การทดลองการสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดไฟฟ้าเคมี	
4.1 การทดลองสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดไฟฟ้าเคมีกับแผ่นผลึกชนิดพี	47
4.1.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิติคอน	47
4.1.2 การศึกษาผลของความเข้มกระแสที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิติคอน	52
4.2 การทดลองสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดไฟฟ้าเคมี กับแผ่นผลึกชนิดเอ็นออนพี	55
4.2.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิติคอน	55
4.3 การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน	60
4.3.1 วัตถุประสงค์	60
4.3.2 การทดลอง	60
4.3.3 ผลการทดลอง	62
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	
5.1 การศึกษาทดลองเกี่ยวกับ โครงสร้างของพอร์สซิติคอน	67
5.2 การศึกษาทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติการสะท้อนแสงของพอร์สซิติคอน	68
5.3 การศึกษาทดลองเกี่ยวกับการนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก	ค่าคงที่ทางฟิสิกส์	
ภาคผนวก ข	น้ำยาไวแสง	
ภาคผนวก ค	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	
ภาคผนวก ง	น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม	
ภาคผนวก จ	การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน	
บรรณานุกรม		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาคตัดขวางของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน	2
รูปที่ 2.1 ภาคตัดขวางของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน	3
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน	4
รูปที่ 2.4 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิคอน ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ	4
รูปที่ 2.5 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิคอนลักษณะต่าง ๆ	5
รูปที่ 2.6 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิคอนรูปร่างต่าง ๆ	6
รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	7
รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงาน	8
รูปที่ 2.9 แสดงกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำ	10
รูปที่ 2.10 แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ	12
รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gap	13
รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gap	14
รูปที่ 2.13 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิคอน	15
รูปที่ 3.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และ ตัวอย่างของพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมลิ	17
รูปที่ 3.2 ภาพเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching	20
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH ₄)	21
รูปที่ 3.4 การ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทั้งสแตนกับแผ่นผลึกซิลิคอน	22
รูปที่ 3.5 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้า-เคมีที่ใช้ในกระบวนการ Anodisation	22
รูปที่ 3.6 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีในลักษณะต่างๆ	24
รูปที่ 3.7 ลักษณะกระแสและแรงดัน ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีระหว่างผลึกซิลิคอน	25
รูปที่ 3.8 ลักษณะกระแสและแรงดัน ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)	หน้า
รูปที่ 3.9 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอน	29
รูปที่ 3.10 แผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่าง ๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี	30
รูปที่ 3.11 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน	32
รูปที่ 3.12 แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ	34
รูปที่ 3.13 การเคลื่อนที่ของพาหะ โสไลต์ที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุม เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า	35
รูปที่ 3.14 บริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูหรือหลุม ที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน	36
รูปที่ 3.15 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพูน	37
รูปที่ 3.16 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพูน	38
รูปที่ 3.17 การกระจายตัวของกระแสรอบ ๆ ผนังของรูพูน	39
รูปที่ 3.18 กลไกในการหยุดกัด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนชนิดพี	40
รูปที่ 3.19 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นใน โครงสร้าง ของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น	42
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน ไบอัส ในปฏิกิริยาการกัดและ ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในพอร์สซิลิคอน	43
รูปที่ 3.21 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ anodization	44
รูปที่ 4.1 รูปที่ผ่านขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการ การกัดแบบไฟฟ้า-เคมี	48
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน กับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	49
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน กับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 80 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	49
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน กับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	50
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน กับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 50, 80 และ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)	หน้า
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิกอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ	51
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิกอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 80 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ	51
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิกอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ	52
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิกอนกับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดเวลาที่ 20 วินาที	53
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิกอนกับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดเวลาที่ 30 วินาที	53
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิกอนกับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดเวลาที่ 20 และ 30 วินาที	54
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิกอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี 20 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่างๆ	54
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิกอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี 30 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่างๆ	55
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิกอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	56
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิกอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)	หน้า
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิติคอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ	57
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิติคอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ	57
รูปที่ 4.18 ภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากความหนาแน่นกระแส 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	58
รูปที่ 4.19 ภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากความหนาแน่นกระแส 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	58
รูปที่ 4.20 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากความหนาแน่นกระแส 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	59
รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากความหนาแน่นกระแส 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	59
รูปที่ 4.22 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	62
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 0.79 ตารางเซนติเมตร	63
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 0.79 ตารางเซนติเมตร	64
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 3.14 ตารางเซนติเมตร	65
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 3.14 ตารางเซนติเมตร	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนามากขึ้น และมีบทบาทสำคัญในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดถูกสร้างขึ้นบนฐานรองซิลิกอน ทำให้ผลึกซิลิกอนเป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญ สำหรับนำไปใช้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาผลึกซิลิกอนเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น ในรายงานฉบับนี้กล่าวถึงการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือช่วยลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเรืองแสงได้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นต้น จากคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ทำให้พอร์สซิลิกอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย อย่างเช่น ในงานทางด้าน electronic isolation โดยมีการนำเอาพอร์สซิลิกอนมาใช้งานสร้างเป็นชั้นฉนวนในงานวิจัยทางด้าน silicon-on-insulator ทั้งนี้ก็เพื่อแยกอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในวงจรรวมออกจากกัน หรือแยกออกจากฐานรอง ทำให้พลังงานที่ใช้ในวงจรรวมมีค่าลดลงได้ นอกจากนี้ที่ยกตัวอย่างมาข้างต้นนี้แล้ว พอร์สซิลิกอนยังถูกนำไปประยุกต์ใช้งานสร้างอุปกรณ์ชนิดต่างๆอีก เช่น เซ็นเซอร์สูญญากาศ และ เซ็นเซอร์ก๊าซ อีกด้วย

สำหรับรายงานฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาเรื่องการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิกอนที่ได้จากวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยจะเน้นขบวนการสร้างพอร์สซิลิกอนที่เหมาะสมกับการใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควรจะเป็นขบวนการสร้างพอร์สซิลิกอนที่ให้ความสม่ำเสมอของผิวหน้าของพอร์สซิลิกอนที่ดี และสามารถเลือกพื้นที่ ที่จะให้เกิดหรือไม่ให้เกิดพอร์สซิลิกอนก็ได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของพอร์สซิลิกอน
2. เพื่อศึกษาเงื่อนไขต่างๆ ในการสร้างพอร์สซิลิกอน
3. เพื่อศึกษากระบวนการเกิดพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

บทที่ 2

พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)

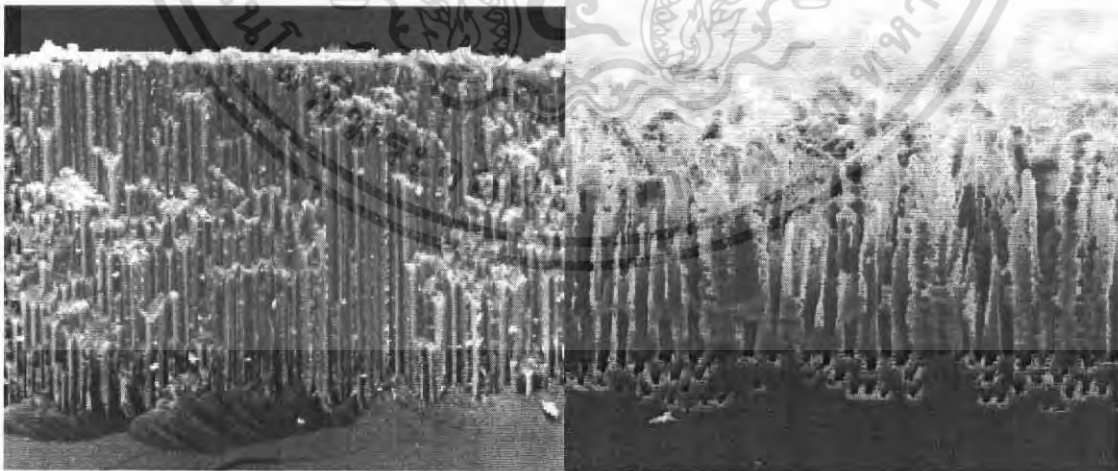
2.1 บทนำ

หลังจากปี 1824 ซิลิคอนได้ถูกแยกออกเป็นธาตุบริสุทธิ์โดยนักเคมีชาวสวีเดน Jöns Jacob Berzelius ในปี 1956 ได้พบว่าสามารถกัดเป็นพอร์สได้โดยวิธีการกัดแบบ Anodization โดย Uhlir ซึ่งทำให้เริ่มมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของพอร์สซิลิคอนกันมากขึ้น

และได้มีการค้นพบคุณสมบัติที่สำคัญ ในปี 1990 โดย Leigh Canham ว่า พอร์สซิลิคอนสามารถเรืองแสงได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจจากทั่วโลก มีบทความจำนวนมากพยายามอธิบายถึงคุณสมบัติทางด้านเคมี และ ฟิสิกส์ ของพอร์สซิลิคอน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในงานอิเล็กทรอนิกส์, ทางการแพทย์, เครื่องตรวจจับต่าง ๆ, ฯลฯ

พอร์สซิลิคอนนั้นเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีทั้งบริเวณที่เป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ เชื่อว่าภายในของพอร์สซิลิคอนอะตอมนั้น นอกจากจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบเหมือนกับผลึกเดี่ยวซิลิคอน แต่ก็ยังพบว่ามีจุดบกพร่องของผลึก, ช่องว่าง, ระยะเวลาช่องว่าง และพันธะ Dangling bond กับอะตอมข้างเคียง ซึ่งโครงสร้างที่เล็กนี้ สามารถพบได้ 2 รูปแบบ คือ จุด และ แท่ง หรือแบบผสม

ผลึกขนาดเล็กระดับนาโนนี้ มีลักษณะแข็งเปราะ และ มีรูพรุน จึงทำให้ถูกเรียกว่า “พอร์สซิลิคอน (Porous silicon)”

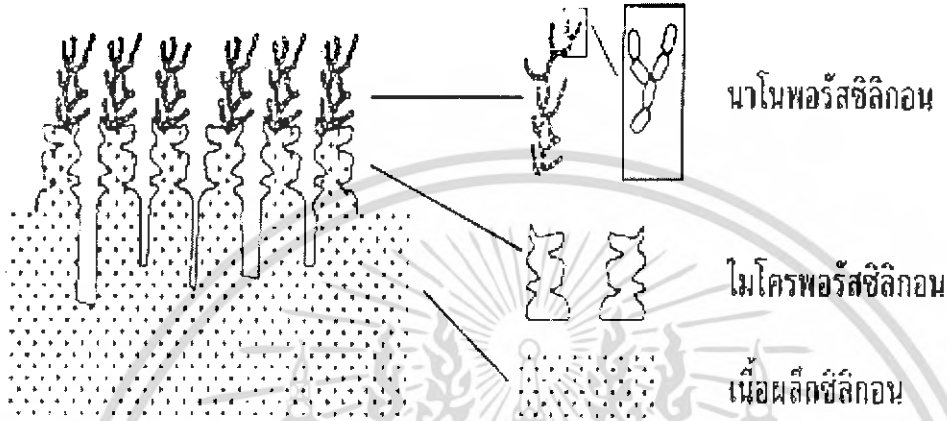


รูปที่ 2.1 ภาคตัดขวางของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน

พอร์ซซิลิคอน คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้อาจจะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิคอนเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจนถึงระดับไมโครเมตร โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์ซซิลิคอน

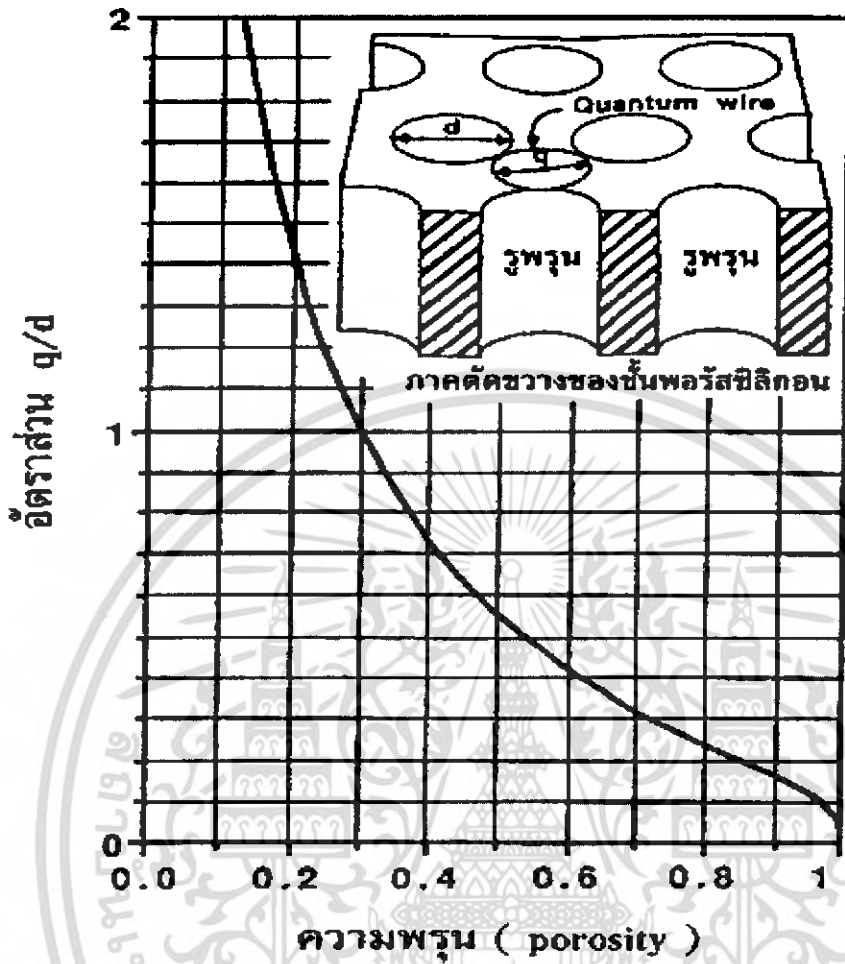
โครงสร้างของชั้นพอร์ซซิลิคอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์ซซิลิคอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซิลิคอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิคอนไฮไดรด์ (Si:H) หรือ ซิลิคอนออกซิไฮไดรด์ (Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป

2.3 ความพรุนของพอร์ซซิลิคอน

วัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวล หรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าพอร์ซซิลิคอนนั้นก็คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอนที่เหลือ และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์ซซิลิคอนแสดงในรูปที่ 2.3

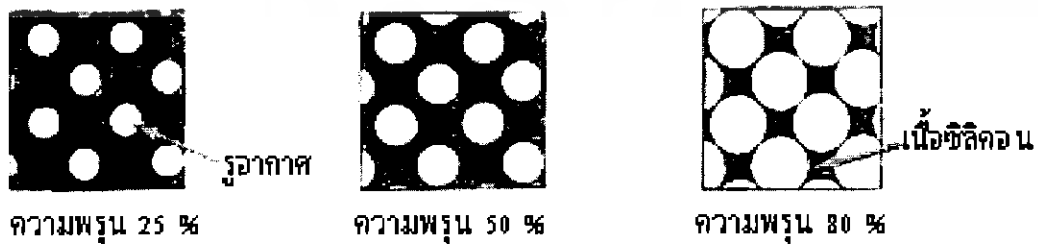
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิกอน (q)

กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้พอร์สซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิมดังแสดงใน รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่ปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การแบ่งประเภทของพอร์สซิติคอน

2.4.1 แบ่งตามขนาดของแท่งพอร์ส

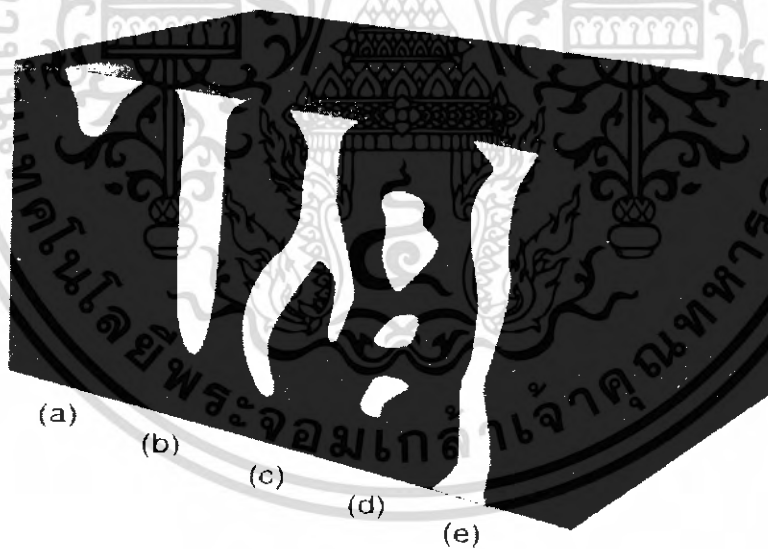
พอร์สซิติคอนสามารถถูกแบ่งได้ตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งของพอร์สได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ไมโครพอร์ส (Micropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์สน้อยกว่า 10 นาโนเมตร
2. เมโซพอร์ส (Mesopore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์สระหว่าง 10 ถึง 50 นาโนเมตร
3. แมคโครพอร์ส (Macropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์ส 50 นาโนเมตร

2.4.2 แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะของรูพรุนของพอร์สมีหลายลักษณะ แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. Saccate หรือ Blind มีลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูพรุน
2. Interconnected หรือ Banched มีลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกหรือเชื่อมต่อของรู
3. Closed หรือ Totally Isolated มีลักษณะเป็นโพรงอากาศปิดทุกด้าน
4. Through มีลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกทั้งสองด้าน



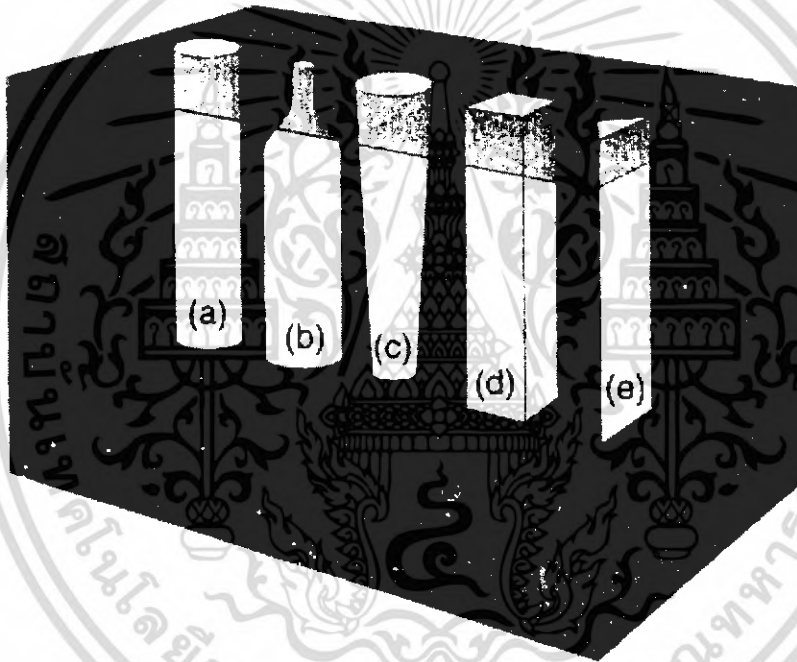
รูปที่ 2.5 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิติคอนลักษณะต่าง ๆ ซึ่งลักษณะของแท่งพอร์สที่แตกต่างกันสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูพรุนของพอร์ซซิติกอนนอกจากขนาดและลักษณะที่แตกต่างกันแล้วยังมีรูปร่างได้หลายแบบ โดยรูปร่างของรูพรุนที่พบส่วนใหญ่มีอยู่ 5 แบบ ได้แก่

1. Cylindrical คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก
2. Ing-bottle คือรูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำ
3. Funnel คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย
4. Cuboid หรือ Slit คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์
5. Triangular หรือ Pyramidal คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด

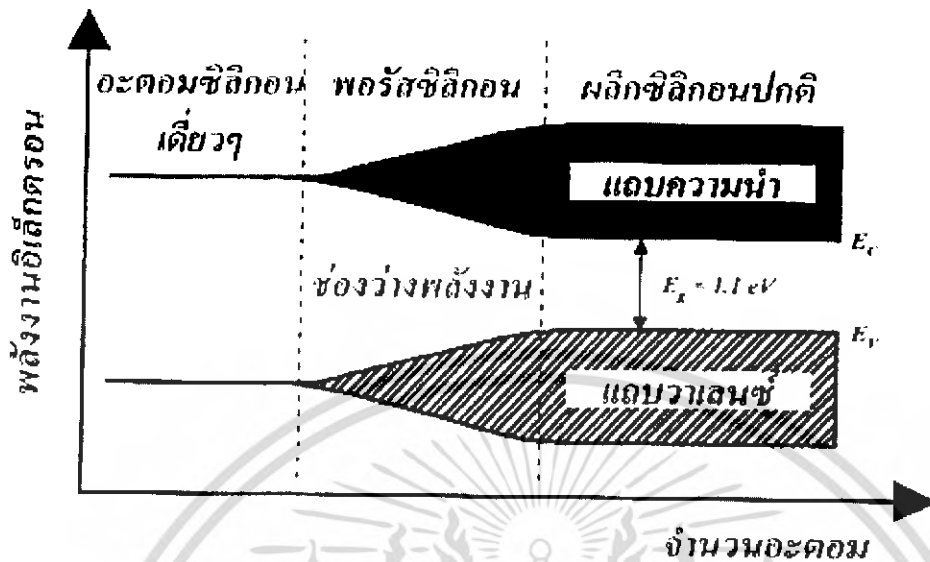


รูปที่ 2.6 แสดงถึงรูพรุนของพอร์ซซิติกอนรูปร่างต่าง ๆ

2.5 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์ซซิติกอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้การแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 2.7 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้น สามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาด โครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะ โครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างไปจากเนื้อซิลิกอนเดิม ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบ หรือบังคับด้วยลักษณะ และขนาดของโครงสร้างผลึก ทำให้ปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ quantum confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (Quantum well)
2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (Quantum wire)
3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (Quantum dot)

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์สซิลิกอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์ส

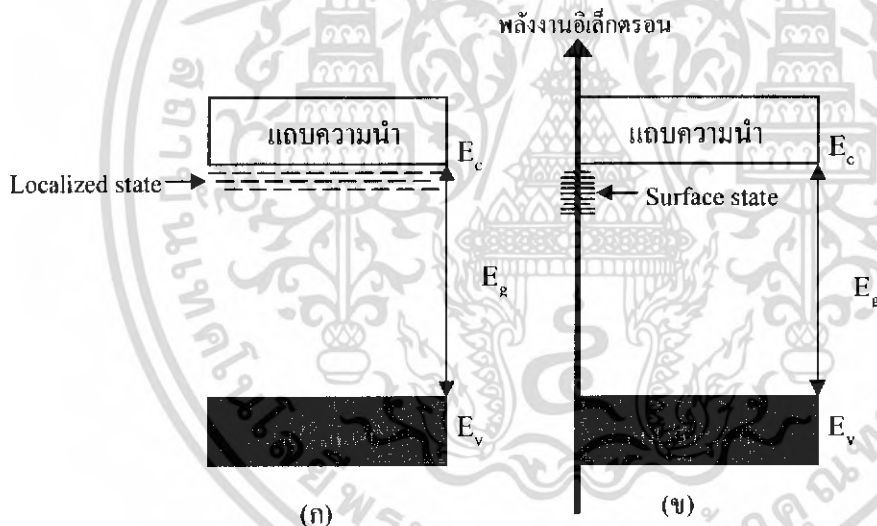
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับ โครงสร้าง นาโนเมตรของพอร์ตซิลิคอน

2.6 พดติกรรมทางแสง

2.6.1 พดติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

ในสารกึ่งตัวนำใดๆจะมีขนาดช่องว่างพลังงานอยู่ค่าๆหนึ่ง โดยภายในช่องว่างพลังงาน เหล่านั้น อาจมีระดับพลังงานของสารเจือ (impurity level) หรือจุดบกพร่อง (defect level) ต่างๆซึ่ง ทั้งหมดจะทำให้เกิดระดับพลังงานที่เรียกว่า location state ขึ้นภายในช่องว่างพลังงานได้ ดังแสดงใน รูปที่ 2.8 (ก) นอกจากนี้ยังมีระดับพลังงานซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้าง โครงผลึกที่ผิวของวัสดุมีความ ไม่สมบูรณ์ เช่น อาจที่พวกพันธะแขวนขาด (dangling bond) หรือพวกสารเจือปนอื่นๆเกาะติดอยู่ที่ผิว ซึ่งจะก่อให้เกิดระดับพลังงานที่เรียกว่า surface state ขึ้นที่ผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) โดยระดับ พลังงานทั้งสองชนิดนี้ สามารถที่จะเป็นศูนย์กลางในการรวมตัว (recombination center) ของพาหะได้



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงาน

(ก) Localized state

(ข) Surface state

ภายในช่องว่างพลังงาน

วิธีการที่จะศึกษาถึงขนาดหรือลักษณะของช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state ให้ได้ผลดีที่สุด ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ ถ้าวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืน การสะท้อน หรือการเปล่งแสงจากสารกึ่งตัวนำ เราจะสามารถทราบค่าระดับพลังงานของ location state หรือ surface state และได้ข้อมูลเกี่ยวกับช่องว่างพลังงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้เพราะว่าการดูดกลืนแสงที่ดี หรือการเปล่งแสงที่ดี เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบชั้นพลังงานใด ๆ มีการดูดกลืนแสง แล้วคายแสงออก เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานซึ่งค่าความแตกต่างของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมานั่นเอง

2.6.1.1 การดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่แถบพลังงานหนึ่งในลักษณะที่มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนจากแสงที่ดูดกลืนเข้าไปนั่นเอง เมื่อสารกึ่งนำถูกฉายแสงอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะมีการตอบสนองกับโฟตอนของแสงนั้น โดยอิเล็กตรอนที่มีการตอบสนองจะมีอยู่ 4 ประเภทด้วยกันคือ

1. อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอม
2. วาเลนซ์อิเล็กตรอน
3. อิเล็กตรอนอิสระ
4. อิเล็กตรอนที่ถูกจับด้วยสารเจือ (impurity center) หรือที่ถูกจับด้วย lattice defect ต่างๆ

ความยาวคลื่นของแสงที่จะเกิดขึ้น การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในของอะตอมได้แก่ ช่วงของรังสีเอกซ์ แต่จะไม่จกกล่าวในที่นี้เพราะไม่ใช่คุณสมบัติที่เด่นชัดของสารกึ่งตัวนำ ส่วนการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดจะเกิดจากการกระทำระหว่างอะตอมและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้อะตอมภายในโครงสร้างเกิดการสั่นได้ โดยพลังงานที่ใช้ไปสำหรับการสั่นนี้จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน หรือที่เรียกว่า โฟนอน นั่นเอง

2.6.1.2 การเปล่งแสง

2.6.1.2.1 การรวมตัวแบบเปล่งแสง และการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง

ในหัวข้อที่ผ่านมาเราได้กล่าวถึง การดูดกลืนแสงระหว่างแถบพลังงาน ซึ่งทำให้พาหะได้รับพลังงานสูงขึ้นและสามารถขึ้นไปอยู่ในแถบความนำ (conduction band) พาหะที่ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูง เมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งก็จะกระโดดกลับตกลงมาสู่ระดับพลังงานเดิมที่สถานะพื้น (ground states) และเกิดการรวมตัวกับโฮลขึ้น การรวมตัวอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นจะก่อให้เกิดได้ 2 ชนิด คือ

1. เกิดการเปล่งแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานอิเล็กตรอนและโฮล เรียกการรวมตัวในลักษณะแบบนี้ว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

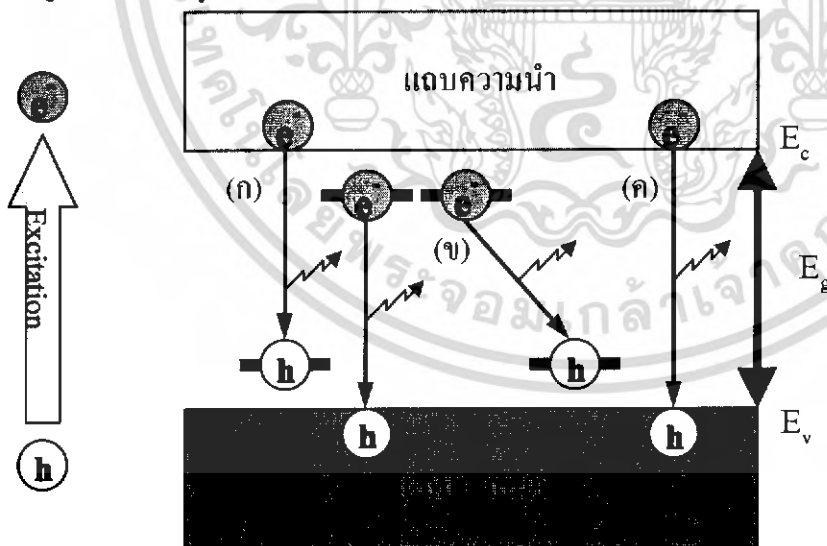
2. เกิดการปล่อยพลังงานความร้อน (โฟนอน) ให้กับโครงผลึกเรียกการรวมตัวในลักษณะแบบนี้ว่า การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (non-radiative recombination)

ซึ่งโดยทั่วไปปรากฏการณ์ทั้งสองชนิดนี้สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมๆกัน ถ้าให้ τ_R และ τ_N คือ เวลาอายุเฉลี่ย (life time) ของพาหะที่นับตั้งแต่ถูกกระตุ้นจนถึงรวมตัวแบบเปล่งแสง และไม่เปล่งแสงตามลำดับ ประสิทธิภาพของการรวมตัวแบบเปล่งแสง η จะมีค่าดังนี้คือ

$$\eta = \frac{(1/\tau_R)}{(1/\tau_R) + (1/\tau_N)} = \frac{1}{1 + (\tau_R/\tau_N)} \quad (2.1)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า ถ้า τ_N/τ_R มีค่ามาก η จะมีค่ามากด้วย กระบวนการการรวมตัวแบบเปล่งแสงจะมีลักษณะตรงข้ามกับการดูดกลืนแสงทุกประการ โดยในรูปที่ 2.9 จะแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนระดับพลังงานที่สำคัญๆในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็เป็นตัวแบ่งชนิดของการรวมตัวแบบเปล่งแสง

จากรูปแสดงการรวมตัวแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำในลักษณะต่างๆ โดยในรูปที่ 2.9 (ก) เป็นการรวมตัวแบบ Band-to-Level emission ส่วนรูปที่ 2.9 (ข) เป็นการรวมตัวแบบ Donor Acceptor emission การเปล่งแสงในลักษณะเหล่านี้จะปรากฏเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิสูงพาหะจะตกกระตุ้นด้วยความร้อนขึ้นไปอยู่ในแถบความนำ (conduction band) ทำให้การเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิสูงส่วนมากจะเกิดจากการรวมตัวแบบ Band-to-Band emission เป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ค)



รูป 2.9 แสดงกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำ

- (ก) Band-to-Level emission
- (ข) Donor-Acceptor emission
- (ค) Band-to-Band emission

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) นี้อาจมีชื่อเรียกสั้นๆว่า ลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) โดยการเปล่งแสงนั้นเป็นปรากฏการณ์ทางแสงของสารกึ่งตัวนำ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้อยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร จึงต้องเกิดการรวมตัวกับโฮล โดยในระหว่างการรวมตัวอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง

2.6.1.2.2 ลักษณะการเปล่งแสงชนิดต่างๆ

การเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆตามวิธีการกระตุ้นได้ดังนี้คือ ตารางที่ 3.1 แสดงการเปล่งแสงชนิดต่างๆแบ่งตามวิธีการกระตุ้น

ชนิดการเปล่งแสง	แหล่งกระตุ้น
(ก) Photoluminescence	แสง
(ข) Electroluminescence	ไฟฟ้า
(ค) Cathodoluminescence	อิเล็กตรอน
(ง) Thermoluminescence	ความร้อน
(จ) Triboluminescence	การเสียดสี
(ฉ) Chemicallyluminescence	เคมี

โดยในจำนวนการเปล่งแสงทั้งหมดที่แสดงในตารางข้างต้น ชนิดของการเปล่งแสงที่สามารถสังเกตพบในสารกึ่งตัวนำมากที่สุด ได้แก่ การเปล่งแสงชนิด Photoluminescence Electroluminescence และ Cathodoluminescence ซึ่งการสังเกตปรากฏการณ์ทางแสงเหล่านี้จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ระดับพลังงาน และการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานในสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี การเปล่งแสงชนิด Thermoluminescence และ Triboluminescence จะพบในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีช่องว่างพลังงานที่กว้างมากๆ วนการเปล่งแสงชนิด Chemicallyluminescence จะพบมากในวัสดุพวกอินทรีย์ โดยในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะการเปล่งแสงชนิด Photoluminescence เท่านั้น

2.6.1.3 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

การเปล่งแสงในลักษณะโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการกระตุ้นพาหะอิเล็กตรอนด้วยวิธีการส่องแสง (excitation by light) จนพาหะอิเล็กตรอนมีพลังงานมากเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบความนำได้ แต่เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนเหล่านี้มีความไม่เสถียรในสถานะใหม่นี้ ดังนั้นจึงต้องตกกลับลงมาอยู่ในสถานะเดิม โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

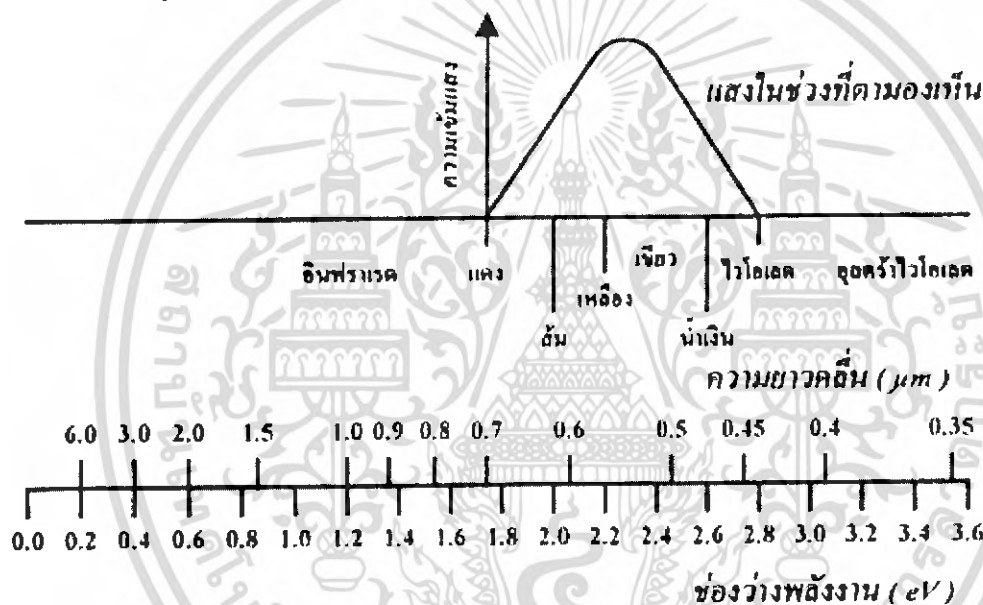
จะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง ซึ่งค่าพลังงานที่ปล่อยออกมานี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องกระโดดกลับลงมากับตัวโฮล โดยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (E) กับความยาวคลื่นของแสง (λ) เป็นดังนี้คือ

$$E = hc / \lambda$$

โดยที่ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์ = 4.14×10^{-15} eV.s ส่วน c เป็นความเร็วของแสง = 3×10^8 m/s

$$\lambda(\text{nm}) = 1240 / E(\text{eV})$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า การที่แสงเปล่งออกมาจะมีค่าความยาวคลื่นหรือสีต่างๆ ได้นั้นขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่คายออกมานั้นเอง โดยสีของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ

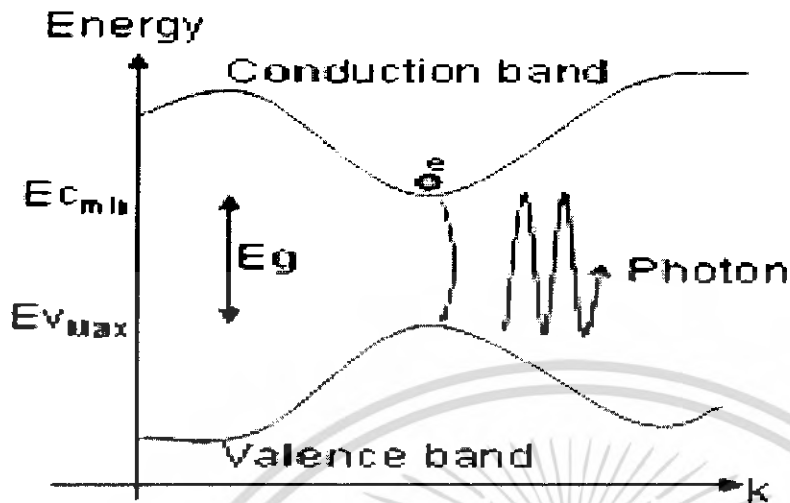
ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้เอง จึงทำให้ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกที่เกิดขึ้น มีประโยชน์เป็นอย่างมากในการวิเคราะห์วัสดุ โดยสเปกตรัมของแสงที่ได้สามารถบอกถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของแถบพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของช่องว่างพลังงานของวัสดุได้

2.6.2 พหุกรรมทางแสงของผลึกซิลิคอน

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่แถบพลังงานหนึ่ง ในลักษณะที่มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการดูดกลืนแสงและค่าความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้น จะต้องเท่ากับพลังงานโฟตอนของแสงที่เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งกฎข้อนี้จะถูกเรียกว่า กฎการอนุรักษ์พลังงาน นอกจากนี้แล้วยังมีกฎที่อนุรักษ์โมเมนตัมอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในวัสดุที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ direct band gap ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gap

ในการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ ค่า wave number (k) ก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะจะไม่มีเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ทั้งนี้เนื่องจาก ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการ ดูดกลืนแสง ค่าโมเมนตัม ($\hbar k$) ของอิเล็กตรอนทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่เสมอ เป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนี้ คือ

$$k_1 - k_2 = 0 \quad : \text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม}$$

$$E_f - E_i = h\nu \quad : \text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน}$$

โดยที่ k_1 เป็น wave number ของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ

k_2 เป็น wave number ของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ

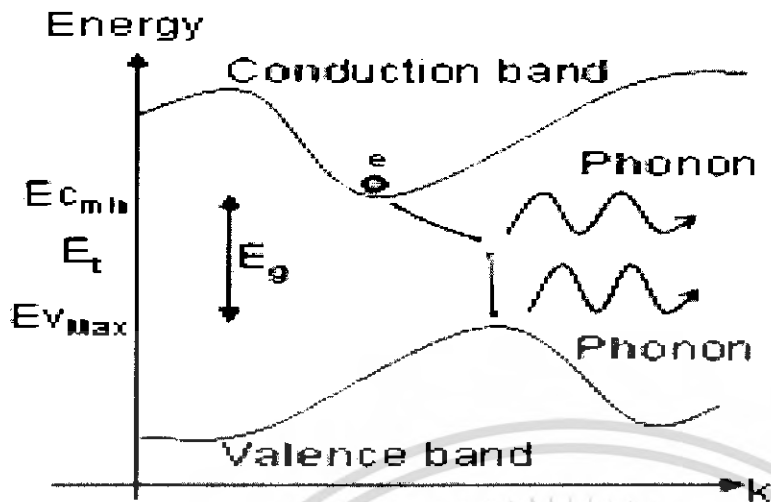
E_i เป็นพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ

E_f เป็นพลังงานของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ

เมื่ออิเล็กตรอนที่ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (E_f) กลับลงมาสู่ในสถานะเดิม (E_i) ก็จะมีการคายพลังงานออกมามีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสองสถานะ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานแต่อย่างใด ทำให้วัสดุที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะเช่นนี้ จึงมีคุณสมบัติทางแสงที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสงกันมาก ดังตัวอย่าง GaAs เป็นต้น

แต่สำหรับผลึกซิลิคอนแล้วกลับมีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ indirect band gap ดังแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gap

จากรูปจะเห็นได้ว่าระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ ไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ทำให้ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำได้นั้น จะต้องอาศัยการรับหรือคายพลังงานโฟนอน (E_p) ให้กับอะตอมในโครงผลึก ซึ่งการรับหรือคายพลังงานของโฟนอนนี้จะช่วยให้เห็นเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ

$$k_2 = k_1 \pm k_p \quad : \text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม}$$

$$E_f - E_i = h\nu \pm E_p \quad : \text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน}$$

โดยที่ E_p เป็น พลังงานของโฟนอน

k_p เป็น wave number ของโฟนอน

เครื่องหมายบวก (+) เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงาน (E_p) หรือ โมเมนตัม ($\hbar k$) จากโฟนอน ส่วนเครื่องหมายลบ (-) เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนคายพลังงานหรือ โมเมนตัมให้แก่โฟนอน

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าผลึกซิลิคอนหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะนี้ เมื่ออิเล็กตรอนมีการดูดหรือคายพลังงาน จะมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปเพื่อทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงผลึก (โฟนอน) ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้ผลึกซิลิคอนจึงมีคุณสมบัติทางแสงที่ไม่เหมาะสมสำหรับที่จะนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง

2.6.3 พหุกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

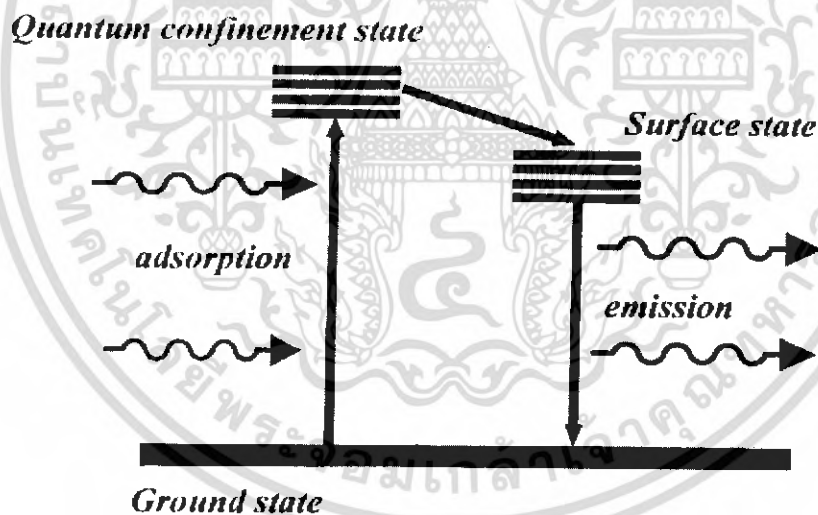
กลไกในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอน

จากลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของพอร์สซิลิคอน ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6.4 ได้ทำให้หลายๆกลุ่มวิจัยทั่วโลกเชื่อกันว่าคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการร่วมกันคือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect ขึ้นภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอน มีผลทำให้ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิคอนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั่นเอง

จากสาเหตุทั้งสองประการนี้เอง ทำให้เราสามารถทำการอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescence state model) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิคอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดยสถานะแรกนั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ quantum confinement effect หรือ quantum size effect ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิคอนได้รับพลังงานกระตุ้นแสง จนที่พลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลการศึกษาที่ข้ามช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานภายในนาโนพอร์ซซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เองอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

2.7 คุณสมบัติของพอร์ซซิลิคอนที่เหมาะสมในการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์

พอร์ซซิลิคอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลากหลายอย่าง ตัวอย่างเช่น

คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์ซซิลิคอน

พอร์ซซิลิคอนมีลักษณะที่แข็ง เปราะ มีรูปทรงมากมาย มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพอร์ซซิลิคอน

พอร์ซซิลิคอนมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าซิลิคอนทำให้มีความต้านทานมากกว่าซิลิคอน สามารถสร้างเป็นสาร Dielectric พอร์ซซิลิคอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิคอน พอร์ซซิลิคอนสามารถเปล่งแสงได้จากการให้พลังงานไฟฟ้า (Electroluminescence) หรือแสง (Photoluminescence)

จุดที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับพอร์ซซิลิคอนก็คือคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้สามารถควบคุมได้จากลักษณะโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างนั่นเอง และเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของพอร์ซซิลิคอนนี้เองทำให้พอร์ซซิลิคอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย ดังที่จะกล่าวในบทต่อไป

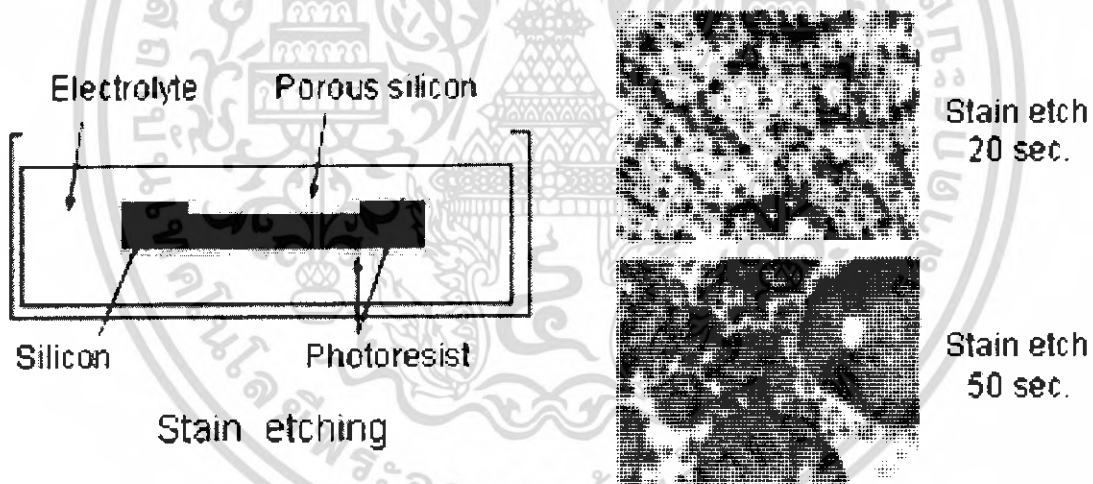
บทที่ 3

กระบวนการสร้างพอร์ซซิลิคอน

ในกระบวนการสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกซิลิคอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites) นั้นมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน โดยในหัวข้อนี้จะได้พิจารณาถึงเทคนิคและวิธีการสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรแบบต่าง ๆ

3.1 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching

การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching หรือ การกัดแบบข้อมสี เริ่มมีการนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เทคนิคที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารประกอบของไฮโดรฟลูออริก ซึ่งมักจะประกอบด้วย สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF), กรดไนตริก(Nitric) และน้ำ เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้การกระตุ้นด้วยแสงสว่างในขณะที่ทำการกัดด้วยปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยการทำปฏิกิริยาด้วย



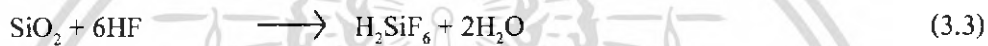
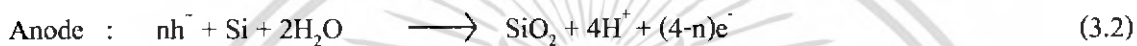
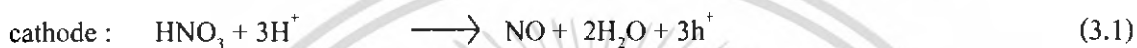
รูปที่ 3.1 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และ ตัวอย่างของพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี

3.1.1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี

จุดสำคัญของการกัดแบบข้อมสี(Stain etching) ก็คือ การทำให้เกิดประจุโฮลเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF)ทำปฏิกิริยากับ กรดไนตริก(Nitric : HNO_3)เพื่อให้เกิดประจุโฮล ดังสมการที่ 3.1 หลังจากนั้นประจุโฮลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation reaction)ได้

ซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 3.2 ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เองสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ดังสมการที่ 3.3 ซึ่งการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์และการถูกกัดออกของซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยาเหมือนอย่างกรณีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี(Electrochemical Etching) ดังนั้นลักษณะโครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ(Non-uniform)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมล



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีสันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์ซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีสันจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับก็จะให้ความหนาของชั้นพอร์ซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมครอน ถึงประมาณ 1.5 ไมครอน เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าในกระบวนการกัดแบบข้อมล มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกพร้อมกับกรดไนตริกสักครู่ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยาการกัดในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพาะฟักตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้ในกระบวนการกัดนั่นเอง เรียกว่า “การบ่มสารละลาย (Incubation)”

3.1.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนที่สร้างจากวิธี Stain etching

1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ โดยที่อัตราการเกิดชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ HF:HNO₃:H₂O ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น

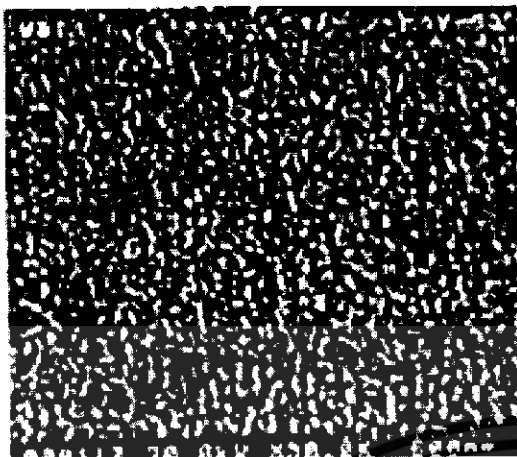
2. ชนิดของสารเจือและค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ส มีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดของชั้นพอร์ซิลิคอนซึ่งทำให้มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำ “Incubation” โดยตรง โดยที่ผลึกซิลิคอนชนิดพี จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 30 วินาที สำหรับแผ่น

เอซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.004 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้เวลาในการกัดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

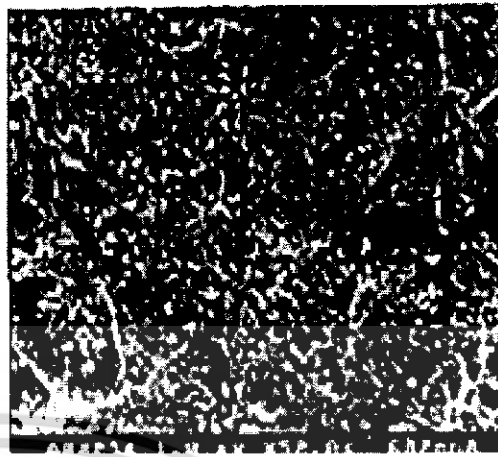
การบ่มสารละลาย 9 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 50 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าเป็นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายน้อยลง อย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 10 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.15 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้เวลาในการบ่มสารละลาย 8 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นต้น

3. สภาพของผลึกซิลิคอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน มีการทดลองกับแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline), แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป (poly crystalline), แผ่นซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous) และชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($Si_{1-x}Ge_x$) ที่สร้างจากกระบวนการEpitaxi เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกักข้อมสียภายใต้ปัจจัยภายนอกเดียวกัน พบว่า จากการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต(UV) พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยวแผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติPhotoluminescence(PL) แต่พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบAmorphousกลับไม่แสดงคุณสมบัติPhotoluminescence(PL) ส่วนกรณีชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($Si_{1-x}Ge_x$) ที่สร้างจากกระบวนการEpitaxi พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของเจอร์เมเนียม(Ge_x)จะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิดPhotoluminescence(PL)ลดลงในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้กัดและการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของกระบวนการทำปฏิกิริยาด่วนมีผลกระทบต่อ โครงสร้างและลักษณะของพอร์สซิลิคอนที่จะเกิดขึ้น เช่น การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลาย เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่หยาบกว่าการสร้างชั้นพอร์สโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย ดังรูปที่ 3.2



(a) Stain etch in the absence of sonication



(b) Stain etch in the presence of sonication

รูปที่ 3.2 ภาพเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching

รูป (a) พอร์สซิลิคอนที่ได้จากการไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

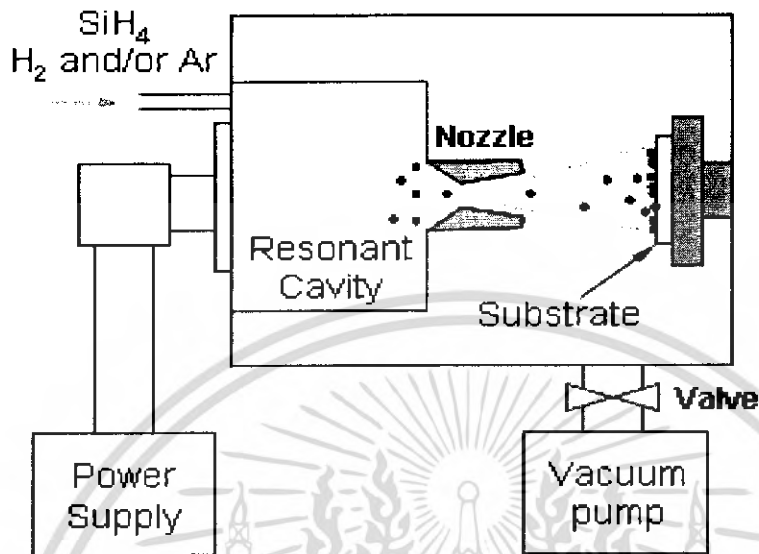
รูป (b) พอร์สซิลิคอนที่ได้จากการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

3.2 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4)

ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites Si) ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ณ ที่อุณหภูมิห้องนั้น สามารถทำการสร้างขึ้นมาได้ด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4) โดยวิธีการสร้างแบบนี้ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรก โดย Takagi et al. มีหลักการดังต่อไปนี้ คือ ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจะถูกสร้างขึ้นมาด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4) กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) หรือก๊าซผสมของอาร์กอน (Ar) ในช่อง resonant cavity โดยมีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลัง 150 W ที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อทำให้เกิด plasma ขึ้นภายใน ซึ่งลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.3

ขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 จนไปถึง 2 นาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของก๊าซ กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ ต่อจากนั้นผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรนี้จะถูกปล่อยผ่านท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตรไปยังภาชนะระบบปิด (chamber) ที่ภายในมีความดันอยู่ในระดับ 10^{-6} Torr โดยผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นนี้จะถูกปล่อยให้ไปตกเคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็น คิวอทซ์ ณ ที่อุณหภูมิห้อง

SiH₄ Microwave plasma Decomposition



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH₄)

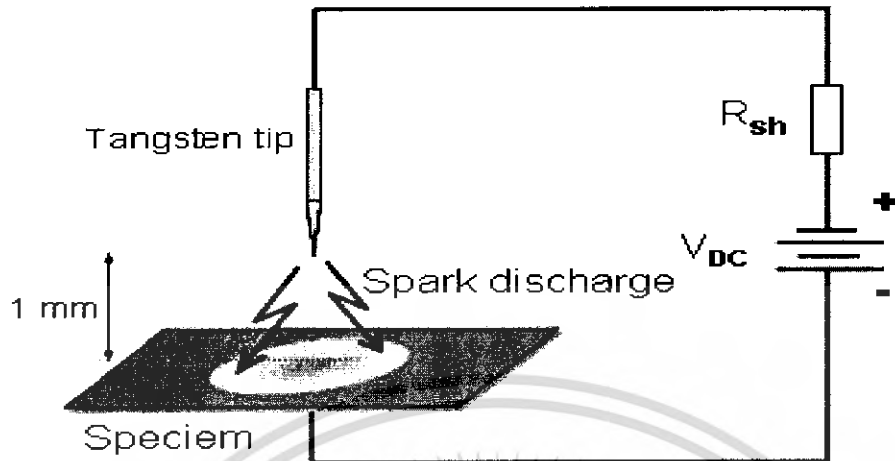
3.3 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Laser breakdown ก๊าซไซเรน (SiH₄)

ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรยังสามารถสร้างขึ้นได้จากวิธีการ laser breakdown ของก๊าซไซเรน (SiH₄) โดยมีรายละเอียดวิธีการสร้างดังต่อไปนี้ คือ เริ่มต้นจากการที่ ก๊าซไซเรนบริสุทธิ์ (Pure SiH₄) ที่มีความดันเท่ากับ 10, 15 หรือ 20 Torr จะถูกปล่อยเข้าไปยังใน ภาชนะระบบปิด (chamber) ซึ่งภายในมีความดัน (background pressure) ที่ต่ำกว่า 10⁻⁶ Torr ความดันก๊าซไซเรนต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้น ในส่วนของเลเซอร์ที่ใช้ นั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากระบบ Nd³⁺: YAG laser system โดยแสงเลเซอร์ที่ได้ออกมาจะถูกโฟกัส ให้ผ่านเข้าไปยังภาชนะระบบปิด เพื่อทำให้เกิดการ Spark ขึ้นภายในผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ใน ระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นจะถูก deposit ลงบนฐานรองที่เป็นควอตซ์หรือแผ่นเซอร์มันเนียม

3.4 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี High frequency discharge

เทคนิคในการสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ spark discharge ที่ความถี่สูงได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดยนาย Hummel และทีมงาน โดยการ spark discharge ที่ เกิดขึ้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์สูง ขนาด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งในการ spark แต่ละ ครั้งใช้เวลาประมาณ 20 ns และเกิดขึ้นทุก ๆ 60 μs ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

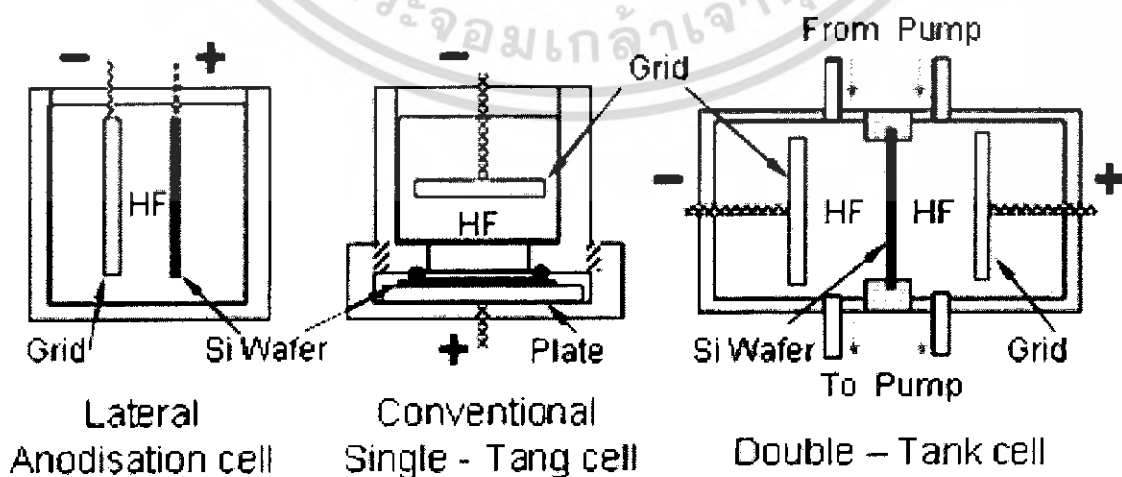


รูปที่ 3.4 การ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทังสเตนกับแผ่นผลึกซิลิคอน

จากรูปจะเห็นได้ว่าการ spark discharge จะเกิดขึ้นระหว่างปลายสุดของลวดทังสเตน ซึ่งอยู่ที่หัวอานอด กับแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งอยู่ที่ขั้วแคโทด โดยการ Spark นั้นจะทำให้บริเวณซึ่งเกิดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรมีลักษณะเป็นบริเวณวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 5 มิลลิเมตร บนแผ่นผลึกซิลิคอน

3.5 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

พอร์สซิลิคอนนั้นเป็นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี ที่เรียกว่า Electrochemical Etching ซึ่งจะต้องใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้า-เคมี ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้า-เคมีที่ใช้ในกระบวนการ Electrochemical Etching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอตเห็นใบเซบระเซชันท่านการค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้า-เคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อของผลิตภัณฑ์คอนกรีต จะประกอบด้วย แผ่นผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะใช้ทองเป็นขั้ว โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง

3.5.1 เซลล์ไฟฟ้า-เคมี

การกัดกร่อนของสสารใด ๆ สามารถนิยามได้ว่าเป็นความเสื่อมโทรมของสสาร เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นการเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี และมักจะเริ่มจากผิวหน้าของสสารนั้นเสมอ โดยขบวนการทางไฟฟ้า-เคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

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



โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) ได้

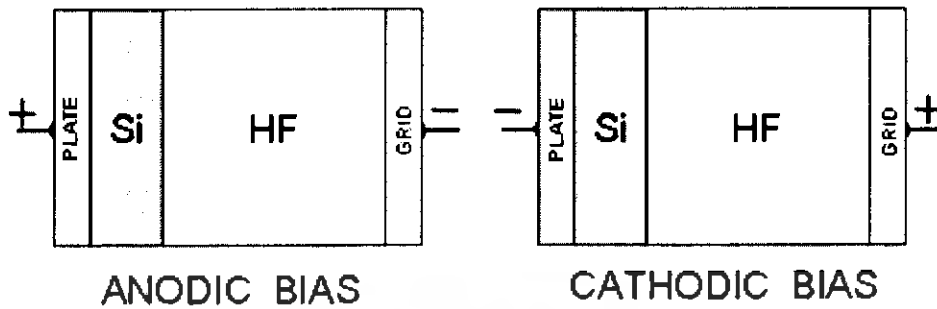
2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเทและเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลายปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ



โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้น ปฏิกิริยารีดักชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction) ได้

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนดหรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชนิดหนึ่งจะเป็นแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีในลักษณะต่างๆ

พิจารณาเซลล์ไฟฟ้าในรูปที่ 3.6 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอน (Si) ซึ่งจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้าของทอง (Au) ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดเช่นกันจากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมี มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีแบบแอโนดิก (Anodic bias)

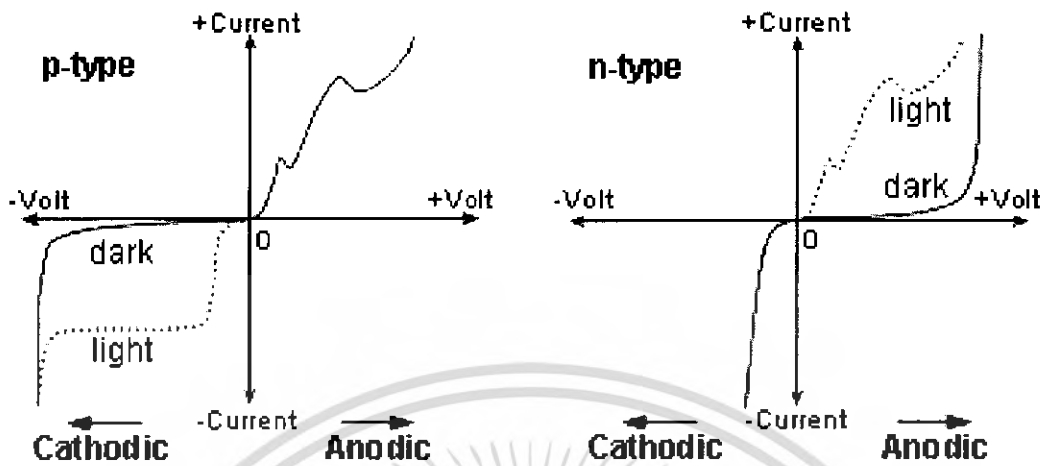
เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิคอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้ผลึกซิลิคอนสามารถถูกกัดได้

2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีแบบแคโทดิก (Cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดผลึกซิลิคอนขึ้น

3.5.2 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นพอร์ตซิลิคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบชอตต์กีไดโอด (Schottky diode) ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัส (interface) กันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ ผลึกซิลิคอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี ระหว่างผลึกซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ภายใต้เงื่อนไขในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง ว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แตกต่างกันอย่างไร



รูปที่ 3.7 ลักษณะกระแสและแรงดัน ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีระหว่างผลึกซิลิคอน
(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากรูปที่ 3.7 จะแสดงลักษณะกระแสแรงดัน ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีระหว่างผลึกซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias และแบบ Cathodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีแบบ Cathodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในผลึกซิลิคอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง (Photocurrents) เช่นเดียวกันกับไดโอดทั่วไป ส่วนในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลึกซิลิคอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Cathodic bias ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ข)

จากลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้าทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ถูกทำให้การสรุปลักษณะที่สำคัญ ๆ เอาไว้ในตารางที่ 3.1

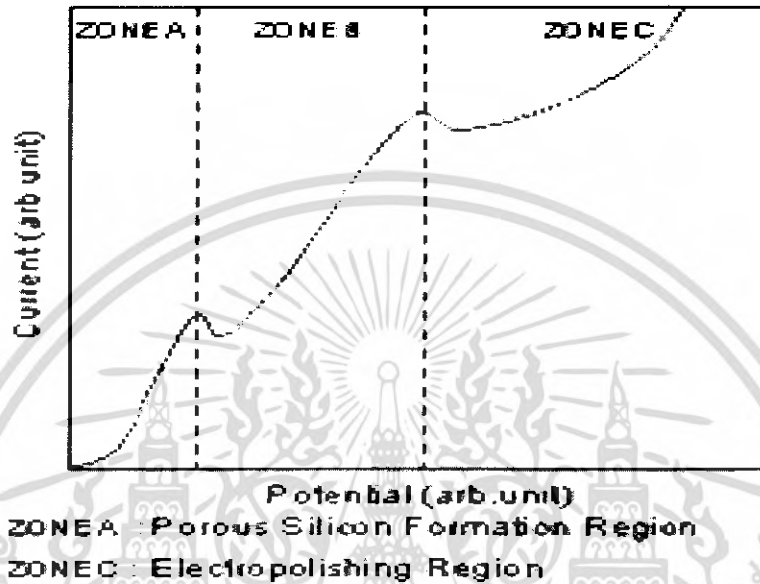
ตารางที่ 3.1 สรุปลักษณะสำคัญๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัส
เซลล์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ชนิดของผลึก ชนิดกอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมี	
	แบบ Cathodic bias	แบบ Anodic bias
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกชนิดกอนจะไม่ถูกกัด ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky 	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกชนิดกอนถูกกัด โดย จะเกิดโครงสร้างของพอร์สชนิดกอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ จะเกิดการกัดผิวหน้าของผลึกชนิดกอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Forward-biased Schottky
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกชนิดกอนจะไม่ถูกกัด ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky 	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกชนิดกอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย จะเกิดโครงสร้างของพอร์สชนิดกอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ จะเกิดการกัดผิวหน้าของผลึกชนิดกอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky

จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีทั้งสองลักษณะมีพฤติกรรมเป็น rectifying เหมือนกัน โดยในการเกิดของพอร์สชนิดกอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีแบบ anodic bias เท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Cathodic bias จะไม่เกิดพอร์สชนิดกอนขึ้นไม่ว่าชนิดของผลึกชนิดกอนจะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของผลึกชนิดกอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias นั้นเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ดังนั้น ในระหว่างการ anodic bias จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นผลึกชนิดกอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในผลึกชนิดกอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดพอร์สชนิดกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias ของทั้งผลึกซิลิคอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้า-เคมี
ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias

จากรูปข้างต้นลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยขดกราฟอยู่ 2 จุดด้วยกัน โดยขดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A (Porous Silicon Forming Regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นมากี่ต่อเมื่อค่ากระแส (I) ภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก (I_{ps}) ส่วนในบริเวณ B (Transition Regions) ที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของซิลิคอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนไปสู่ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้า ซึ่งอยู่ในบริเวณ C (Electropolishing Regions) โดย โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Electropolishing) ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ขดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากขดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้า-เคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ Negative Impedance ขึ้นโดย

ในส่วนของขดกราฟแรก

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ Quantum Size Effect ขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆ โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน และเมื่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุมโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น

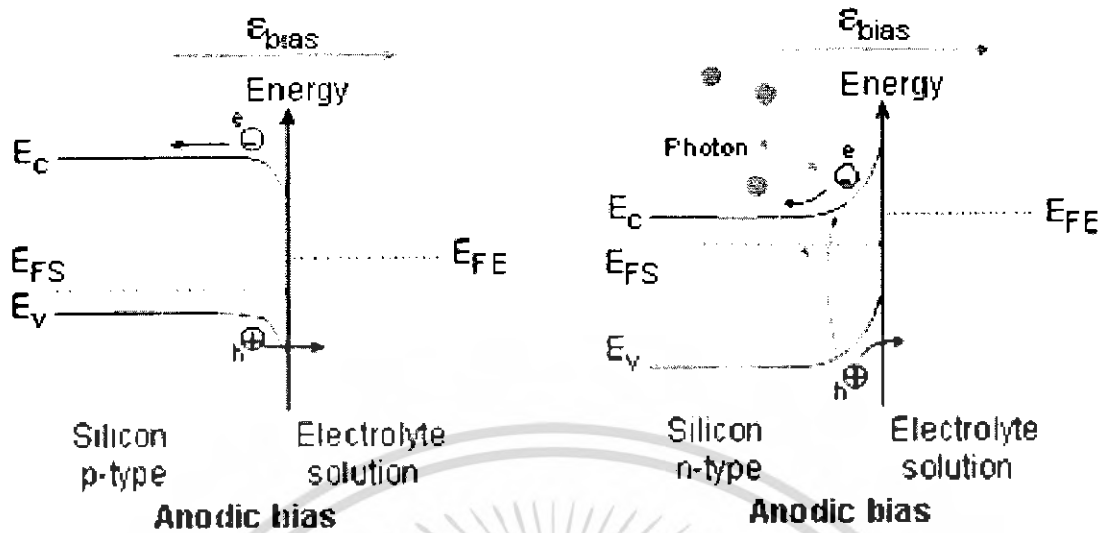
ในส่วนขดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณ Transition region กับ Electropolishing region การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ขึ้นที่บริเวณผิวของพอร์สซิลิคอนในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

3.5.3 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายไฮโดร

ฟลูออริก

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น เป็นที่ทราบกันแล้วว่าที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี จะมีลักษณะเป็นแบบ Schottky interface โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอน
(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่าการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

ในสารซิลิคอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากการไบอัสแบบไปหน้า ทำให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก)

ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบ Anodic bias ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการ Electrochemical Etching จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้แก่ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข)

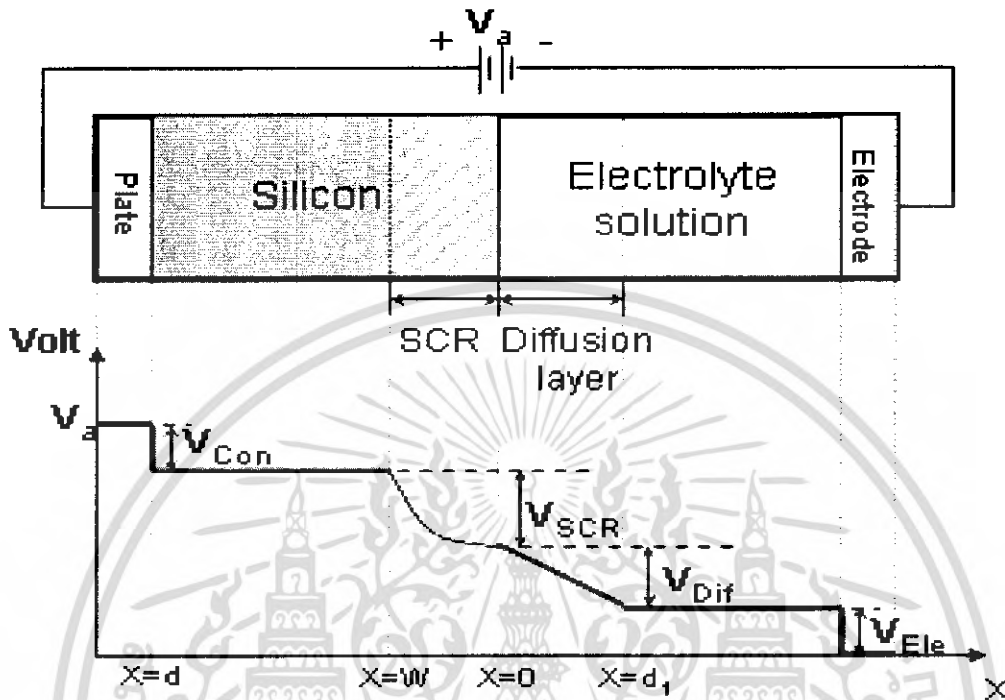
3.5.4 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เซลล์ไฟฟ้าที่มีใช้ในกระบวนการกัดแบบ porous etching จะประกอบด้วยผลึกซิลิคอน ซึ่งถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีกรไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่าง ๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักดาไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี ดังแสดงในรูปที่

3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี โดยที่ d เป็นความหนาของผลึกซิลิคอน, w เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (Space Charge Region: SCR) ส่วน d_1 เป็นความกว้างของบริเวณ diffusion layer ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากภาพจะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณต่าง ๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี ดังนี้คือ
ในเนื้อของผลึกซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณข้อสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับผลึกซิลิคอน (V_{Con})
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (V_{SCR})

ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณข้อสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (V_{Eloc})
4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Diffusion layer (V_{Dif})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้ V_a เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้า-เคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้ารวมของระบบได้ดังนี้ คือ

$$V_a = V_d + V_{SCR} + V_{Con} + V_{Elec} \quad (3.7)$$

ศักดาไฟฟ้า V_{con} กับ V_{elec} ในเซลล์ไฟฟ้า-เคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของพอร์สซิลิคอนแบบเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้น จึงทำให้สมการที่ (2.5) สามารถเขียนได้เป็น

$$V_a = V_d + V_{SCR} + \text{Constant} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (4.4) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Diffusion layer (V_{Dif}) กับศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Space Charge Region (V_{SCR}) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

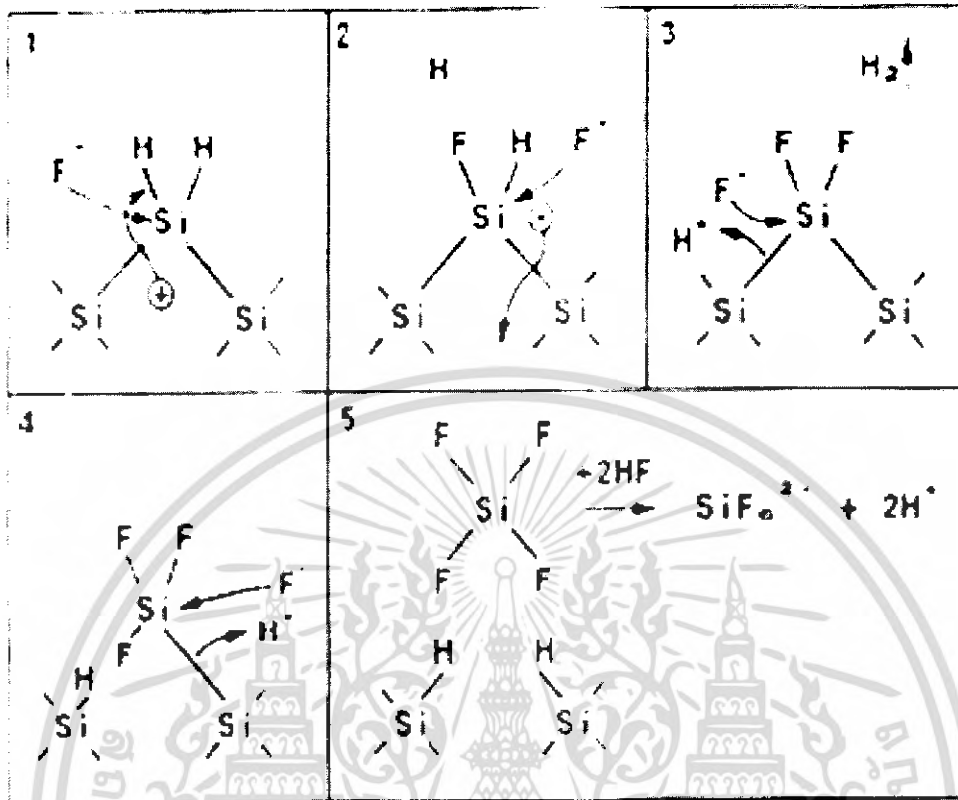
ในผลึกซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ทำให้ไม่เกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้นในผลึกซิลิคอน ดังนั้น ศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ภายในเซลล์ไฟฟ้า-เคมี ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Diffusion layer (V_{Dif}) นั่นเอง โดย V_{Dif} นี้จะควบคุมอ็อนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกบริเวณ diffusion layer

ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณ Space charge region (SCR) ขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้า (V_{SCR}) ตกคร่อมบริเวณนี้ โดย Space Charge Region นี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในผลึกซิลิคอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัดและโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้น

3.5.5 กลไกการเกิดพอร์สซิลิคอน

ก. ปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิคอน

ในสภาวะปกติ เมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ผลึกซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้า-เคมีที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมี และขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.11

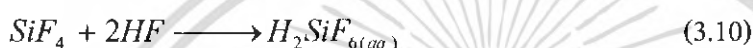
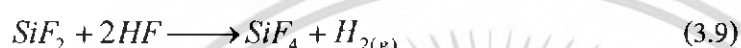
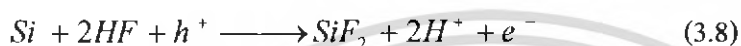


รูปที่ 3.11 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน

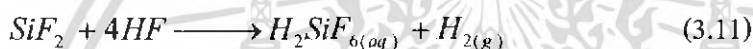
เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกระแสไบอัสแบบ anodic bias ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วแอโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีแบบ anodic bias โดยมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้แก่ขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้ โดรนอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทนดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้อิออนของฟลูออรีน (F⁻) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะเข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาลเลนซ์อิเล็กตรอน (polarization induced) โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในชั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนที่อยู่ถัดเข้ามา มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในชั้นตอนที่ 3 และ 4 จากชั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิคอน พร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิคอน อะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในชั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



จากสมการที่ 5.6 และสมการที่ 5.7 สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวมใหม่ได้เป็น



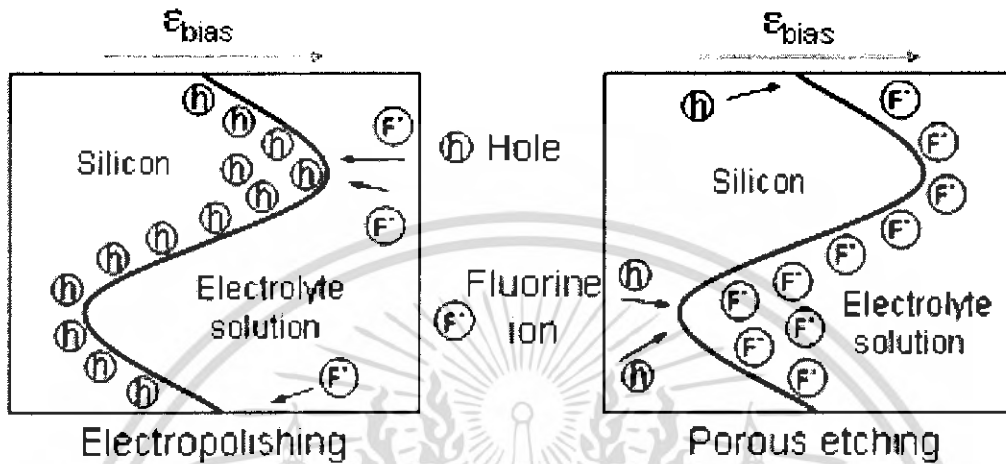
จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3.8 ที่มีผลึกซิลิคอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยโฮตในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF_2 ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน ต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_2 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ 3.9 ได้ผลลัพธ์เป็น SiF_4 หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นนี้เอง สังเกตได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้าย คือ สารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ 3.10

ข. การเกิดรูพรุนของพอร์ซซิลิคอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ผลึกซิลิคอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จะไม่ถูกสารละลายกัดแต่อย่างใด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบ anodic bias แก่เซลล์ไฟฟ้า-เคมี ให้กระแสไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีจะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

- แบบ Electroplishing
- แบบ Porous etching

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการ Electrochemical Etching โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะมีตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ



รูปที่ 3.12 แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ โดยที่

(ก) ลักษณะการกัดแบบ Electropolishing

(ข) ลักษณะการกัดแบบ Porous etching

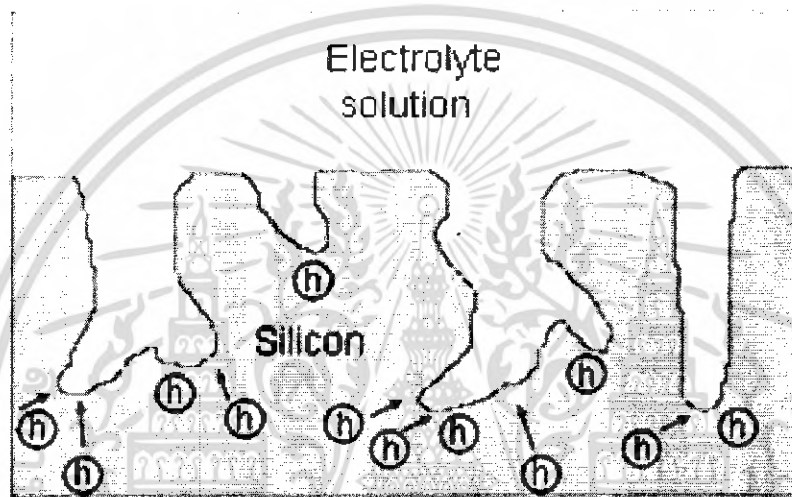
การกัดแบบ Electropolishing

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟให้แก่เซลล์ไฟฟ้า-เคมีในปริมาณสูง ๆ ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนมีปริมาณของพาหะโฮลสะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอ็อนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด โดยอ็อนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า ดังนั้น ถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุดของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงเอาอ็อนของฟลูออรีนเข้ามาทำปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นจำนวนมาก มีผลทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้น จึงเรียกการกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า (Electropolishing) นั่นเอง

การกัดแบบ Porous etching

ส่วนลักษณะการกัดแบบ Porous etching จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสในปริมาณต่ำ ๆ ซึ่งจะทำให้ปริมาณอ็อนของฟลูออรีนในสารละลายกรดมีจำนวนที่มากกว่า

จำนวนโฮล ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน ทำให้การกักในลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวนโฮล ดังนั้น ถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือรอยซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิวหรือจุดบกพร่องต่าง ๆ ในผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ข) เมื่อทำการไบอัสแบบ Anodic bias ให้แก่เซลล์ไฟฟ้า-เคมีจะมีผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมหรือจุดบกพร่องเหล่านี้มีปริมาณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่บริเวณอื่น ๆ ซึ่งจะดึงเอาพาหะโฮลเข้ามายังจุด ๆ นี้กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณก้นหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไป ในเนื้อของผลึกซิลิคอน



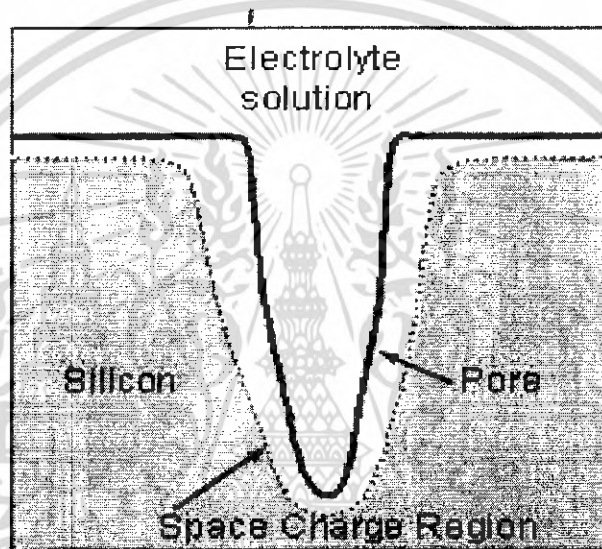
รูปที่ 3.13 การเคลื่อนที่ของพาหะโฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุม เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกในการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้ว พบว่า ผลึกซิลิคอนทั้งสองชนิดจะมีกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีในลักษณะ Anodic bias

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ซึ่งการไบอัสในลักษณะเช่นนี้จะไปลดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณที่ เรียกว่า Space Charge Region (SCR) ลง โดยบริเวณ Space Charge Region นี้เป็นบริเวณที่ปลอดภัยจากพาหะนำกระแส (โฮล) เกิดขึ้นตามผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน อันเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึก

ซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีในลักษณะ Anodic bias จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (revers bias) ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณ Space Charge Region มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้น ถ้าบริเวณผิวของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีลักษณะเป็นหลุมซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบ ๆ หลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้นรอบ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 บริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูหรือหลุมที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน

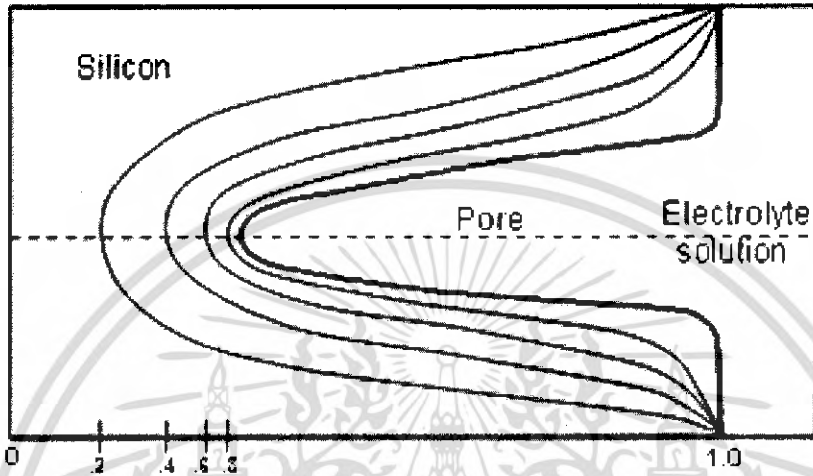
โดยความกว้างของบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$W = \left(\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_{SCR}}{qN_D} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

โดยที่	W	=	ความกว้างของบริเวณ Space Charge Region
	ϵ_s	=	Permittivity ของผลึกซิลิคอน
	ϵ_0	=	Permittivity ของสุญญากาศ
	V_{SCR}	=	ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ SCR
	q	=	ประจุของอิเล็กตรอน
	N_D	=	จำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณ Space Charge Region จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ Space Charge Region (V_{SCR}) และจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D) ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น



รูปที่ 3.15 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน

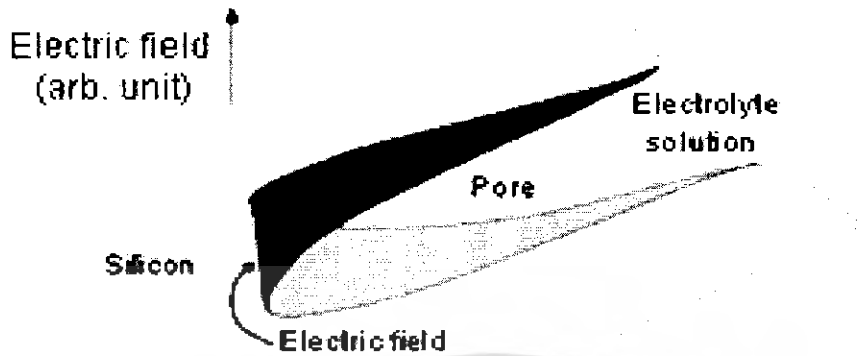
ซึ่งบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ รูพรุน จะมีการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 3.15 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน (E_s) มีค่าเท่ากับ

$$E_s = 2V_{SCR} / W \quad (3.13)$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบ ๆ ก้นหลุมของรูพรุน (E'_s) จะมีค่า

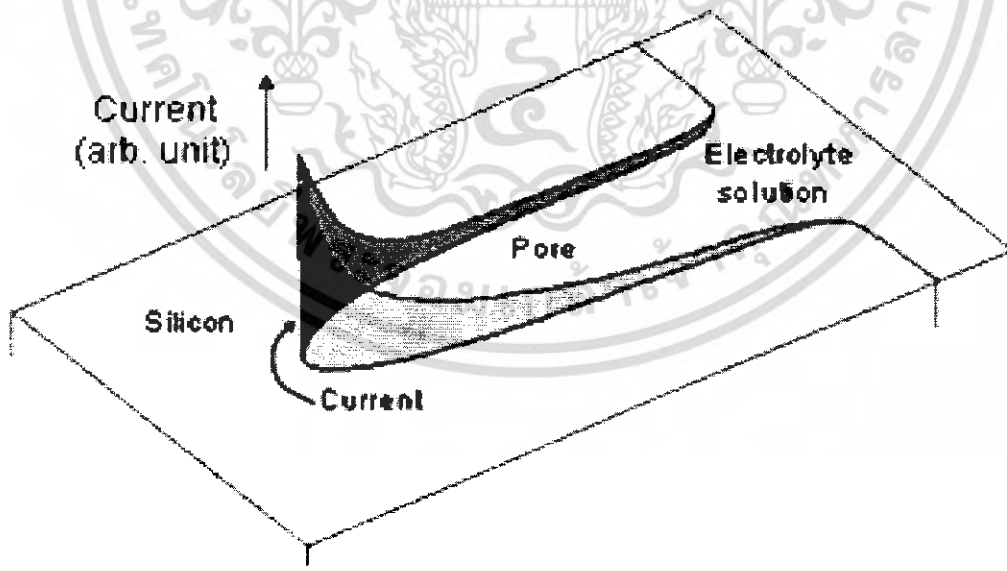
$$E'_s = V_{SCR} / r \quad (3.14)$$

โดยที่ r = รัศมีของก้นหลุมของรูพรุน



รูปที่ 3.16 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน

จากรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูพรุนจะมีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ผนังบริเวณก้นหลุมของรูพรุนจะมีปริมาณของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าบริเวณผนังรอบ ๆ ของรูพรุนอยู่ถึงประมาณ 2-3 เท่า ส่วนผนังบริเวณปากหลุมจะมีค่าต่ำสุดจนเกือบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งจากการที่ก้นหลุมของรูพรุนมีขนาดของสนามไฟฟ้าในปริมาณสูงนั้น มีผลทำให้สามารถดึงพาหะนำกระแส (โฮล) มาที่บริเวณนี้กันได้มาก ส่งผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมจะมีปริมาณกระแสที่สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การกระจายตัวของกระแสรอบ ๆ ผนังของรูพรุน

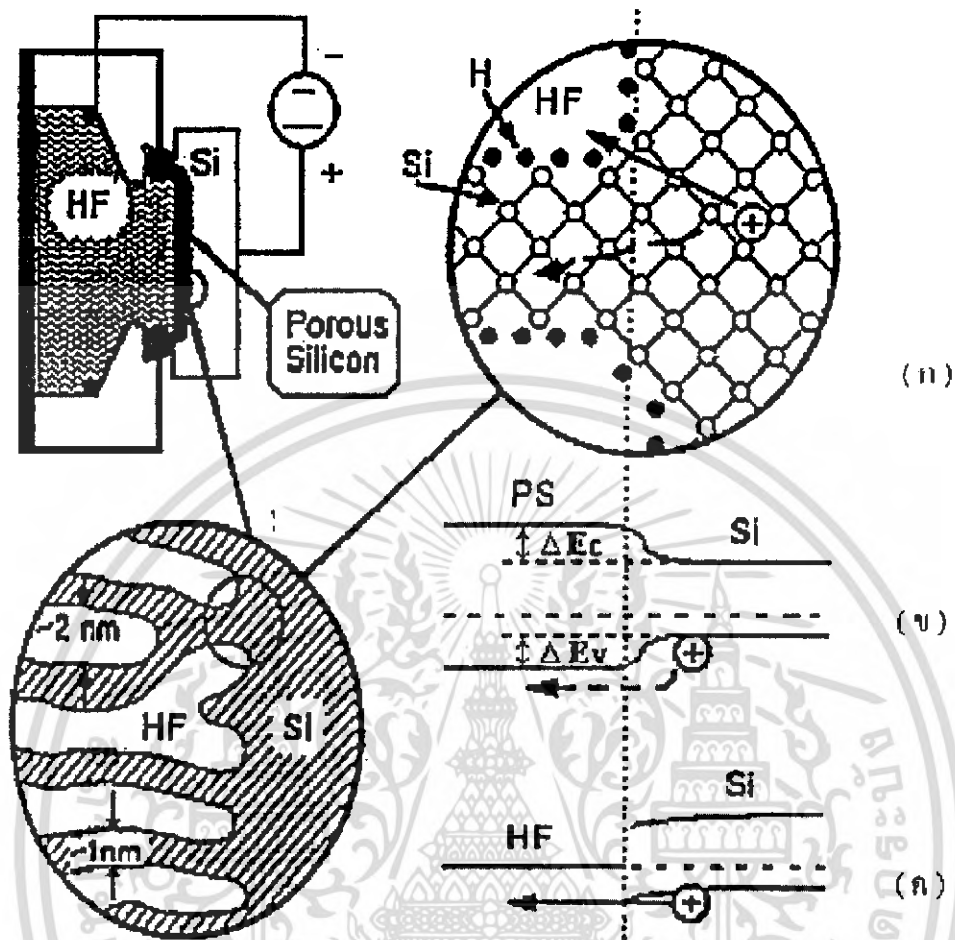
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.6 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้เราทราบถึงกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิคอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญต่อกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนในแบบ porous etching หรือ anodic etching ด้วยวิธีการทางไฟฟ้า-เคมี ซึ่งเป็นกระบวนการกัดที่สามารถลดขนาดของโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงไปเรื่อย ๆ จนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตรได้ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Self aligned process ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดตั้งแต่ในระดับไมโครเมตรจนถึงโครงสร้างในระดับ 2-3 นาโนเมตรได้ โดยไม่จำเป็นต้องอาศัย masking layer หรือวิธีการ nanolithography แต่อย่างไร แต่กระบวนการนี้จะอาศัยกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน โดยในหัวข้อนี้พิจารณาถึงกลไกในการหยุดกัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษา พบว่า พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีในลักษณะ Anodic bias จะทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกในการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพีจะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect ขึ้นในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 3.18



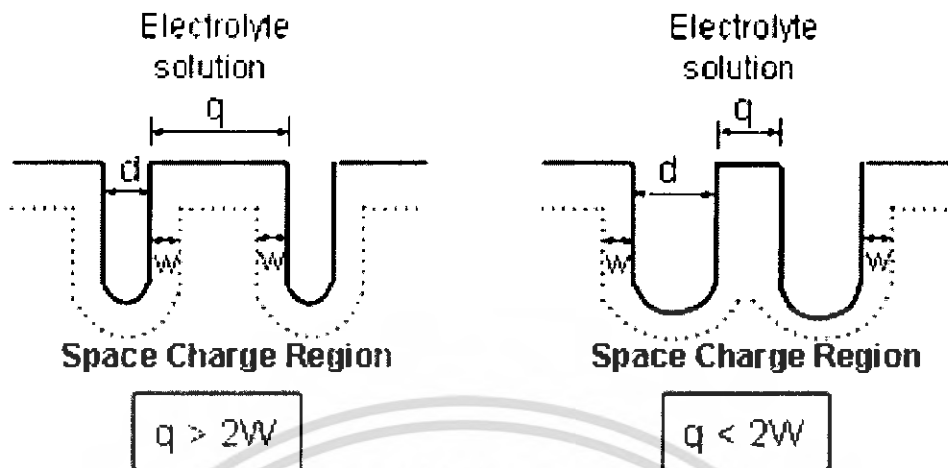
รูปที่ 3.18 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอร์ซซิลิคอนชนิดพี โดยที่
 (ก) โครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล
 (ข) ลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอน
 ก่อนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน
 (ค) ลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอน
 ผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน

จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดพีจะถูกกัดจนเกิดเป็น โครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในพอร์ซซิลิคอน (E_{ps}) มีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect นั่นเอง ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนที่ระหว่างพอร์ซซิลิคอนกับผลึกซิลิคอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกำแพงศักย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ ΔE_v สำหรับโฮล และเท่ากับ ΔE_c สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้น การที่พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมีในการกัดโครงสร้างในส่วนนี้ต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่า ΔE_v ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (ข) แต่ถ้าเมื่อไหร่ก็ตามที่กำแพงศักย์ ΔE_v มีค่ามากกว่าพลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอนได้ ผลที่ตามมา ก็คือ เกิดการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ΔE_v นั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอน โดย ΔE_v จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัดในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนพอร์สซิลิคอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่จะถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีสามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ค) ดังนั้น จึงทำให้ที่บริเวณก้นหลุมของพอร์สซิลิคอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่องได้

พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้า-เคมีในลักษณะ Anodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ w ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ดังนั้น กลไกในการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นแล้ว จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ
 พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่
 (ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า $2W$
 (ข) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า $2W$

จากรูปที่ 3.19 (ก) จะเห็นได้ว่าพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นมาจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกทำการกัดจะทำให้ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอน (q) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ปกคลุมอยู่รอบ ๆ รูพรุนแต่ละรู ในกรณีนี้ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q > 2W$) ดังนั้น จึงยังสามารถทำการกัดเพื่อลดขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไหร่ก็ตามที่ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนมีขนาดที่น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q < 2W$) ดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ข) ถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ขึ้น

3.5.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอร์สที่สร้างด้วยวิธี Electrochemical Etching

กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีนั้นมีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ซึ่งพอร์สซิลิคอนที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันย่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้วย อาทิ พอร์สซิลิคอนที่มีค่าความพรุนมาก ๆ จะมีขนาดโครงสร้างแท่งซิลิคอนที่เล็กลงเป็นผลให้ช่องว่างพลังงานที่บริเวณชั้นพอร์สซิลิคอนกว้างมากขึ้น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

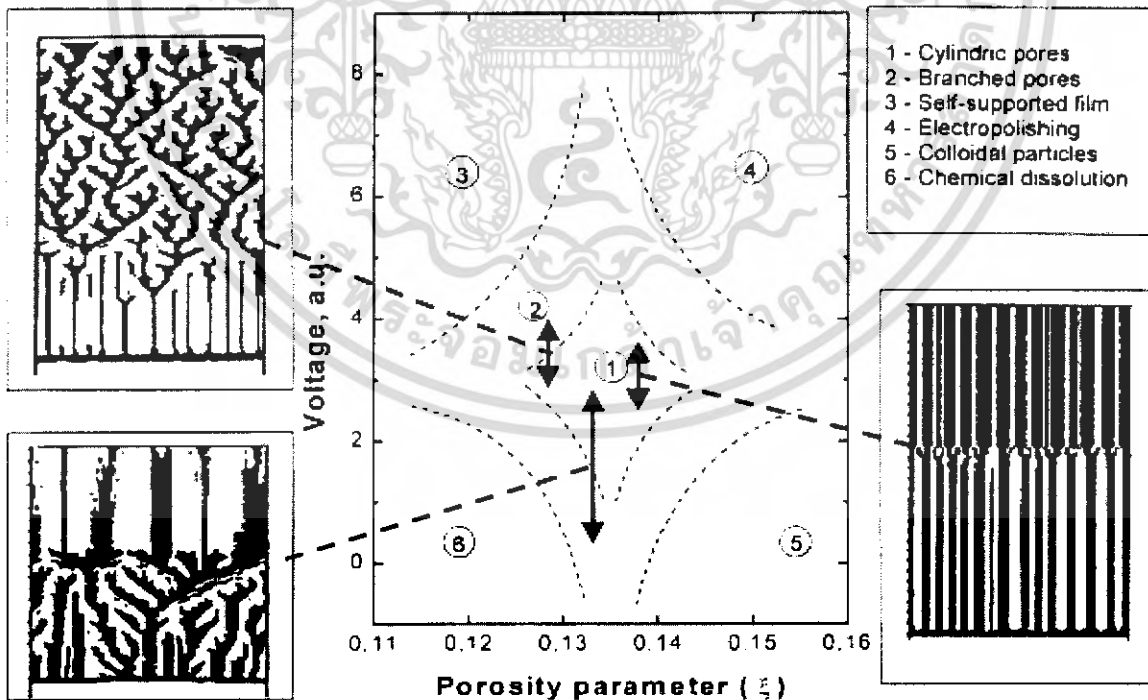
ปัจจัยหลักๆที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี มีดังนี้

1. สภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอน
2. ชนิดของสารเจือในเนื้อผลึกซิลิคอน
3. ความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา
4. ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
5. เวลาที่ใช้ในกระบวนการ

จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนจะมีค่าความพรุนสูงขึ้นไปและมีความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนมากขึ้นถ้า

1. เพิ่มสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนในผลึกซิลิคอนชนิด พี
2. ลดสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนในผลึกซิลิคอนชนิด เอ็น
3. เพิ่มความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา
4. ลดความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
5. เพิ่มเวลาที่ใช้ในกระบวนการ

โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนจะมีค่าความพรุนน้อยลงและมีความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนน้อยลงถ้าหากปรับปัจจัยดังกล่าวไปในทางตรงกันข้ามกับการเพิ่มค่าความพรุน



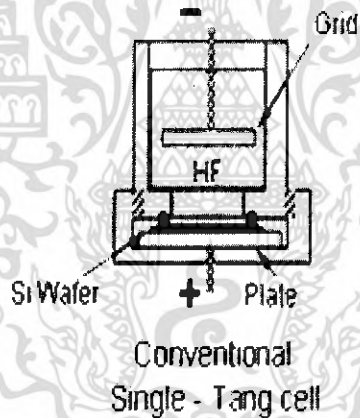
รูปที่3.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน ไบอัสในปฏิกิริยาการกัดและค่าตัวแปรต่าง ๆ ในพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.8 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

เทคนิคต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคในการปลูกผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆ เหล่านี้จะต้องอาศัยเทคนิคการสร้างและอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีราคาที่สูงมาก แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชั้นของพอร์ซซิลิคอนที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรเช่นกัน ด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี (Electrochemical etching) เนื่องจากมีกระบวนการสร้างในการสร้างที่ค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างชั้นของพอร์ซซิลิคอนก็มีราคาที่ไม่แพงอีกด้วย ซึ่งการสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีนี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พอร์ซซิลิคอนนั้นเป็นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นบนแผ่นซิลิคอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีที่เรียกว่า การ Electrochemical Etching ซึ่งจะต้องใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้า-เคมีดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ Electrochemical Etching

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้า-เคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนนี้จะประกอบด้วยแผ่นซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะใช้ทองเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ได้แก่กรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง จากรูปที่ 3.21 จะเห็นได้ว่าแผ่นผลึกซิลิคอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้า-เคมี โดยจะมีการใช้ O-ring เข้ามาเป็นส่วนที่ช่วยป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซลล์ซึ่งขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน มีดังนี้คือ

1. การเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Wafer Preparation)

ใช้แผ่นผลึกของซิลิคอนที่มีผิวด้านหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิด พี หรือ เอ็น ที่มีระนาบ (111) มีค่าพิคคความต้านทาน 6-12 โอห์ม - เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกซิลิคอนเท่ากับ 400 ไมโครเมตร

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Initial Cleaning) มีขั้นตอนดังนี้คือ

■ ทำความสะอาดผิวน้ำบริสุทธิ์ (dcionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic Cleaning)

■ ล้างด้วยน้ำสะอาด

■ กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5 % เป็นเวลา 2 นาที

■ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

■ ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะหนักที่ผิวหน้า

■ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

■ ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที

■ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

■ เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

■ ต้มในไตรโคโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก

■ ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที

■ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

■ จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5 % เป็นเวลา 20 นาที

■ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

■ เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน

โดยการนำเอาแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆข้างต้น ไปวางที่ตำแหน่งบริเวณด้านล่างของเซลล์ฟานเคมี ค่อยจากนั้นก็ทำการเทสารละลายไฮโดรฟลูออริกลงสู่เซลล์ แล้วทำการผิวน กระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่อั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอน และขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นทองที่จุ่ม อยู่ในสารละลายกรด ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมีขึ้น มีผลทำให้ที่บริเวณผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน ที่สัมผัสกับสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมากมาย โดย พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความพรุน (porosity) ของพอร์สซิลิคอนก็คือ เงื่อนไขที่ใช้ในระหว่าง

กระบวนการ Electrochemical Etching อันได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชนิดและสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอน
- ความหนาแน่นกระแส
- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
- เวลาในการ Electrochemical Etching

ซึ่งภายหลังจากการที่กระบวนการ Electrochemical Etching ได้ทำสำเร็จสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว ก็จะได้ชั้นของพอร์ซซิลิคอนเกิดขึ้นมาตรงบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.6

4. การทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้าย

หลังจากการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้วต่อจากนั้นก็ให้นำแผ่นผลึกซิลิคอนออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี ไปผ่านการทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้าย โดยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- แช่แผ่นในแอลกอฮอล์เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดละอองสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่ในชั้นของพอร์ซซิลิคอน
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ซึ่งเมื่อผ่านขั้นตอนสุดท้ายนี้แล้วก็จะได้ ตัวอย่างรูปถ่ายของแผ่นผลึกซิลิคอนที่บริเวณผิวหน้าเกิดขึ้นพอร์ซซิลิคอนขึ้นมา

บทที่ 4

การทดลองการสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

ในการทดลองนี้จะเน้นขบวนการสร้างพอร์สซิติคอนที่เหมาะสมกับการสร้างพอร์สซิติคอนให้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นขบวนการสร้างพอร์สซิติคอนที่มีความเป็นเอกกรุปเดียวกัน (Uniformity) ที่ดี สามารถควบคุมความลึกได้และสามารถเลือกพื้นที่ๆจะให้เกิดพอร์สหรือไม่ให้เกิดพอร์สก็ได้

การเพื่อให้ได้ลักษณะของพอร์สซิติคอนที่เหมาะสมจะนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพอร์สที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรถึง 800 นาโนเมตรต่ำและมีลักษณะที่เป็นเอกกรุปเดียวกัน (Uniformity) มากที่สุด

การทดลองสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ

- 4.1 การทดลองสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีกับแผ่นผลึกชนิดพี
- 4.2 การทดลองสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีกับแผ่นผลึกชนิดเอ็น/พี
- 4.3 การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน

4.1 การทดลองสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีกับแผ่นผลึกชนิดพี

4.1.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิติคอน

4.1.1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของเวลาในการกัดพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี
2. เพื่อศึกษาและสังเกต โครงสร้างของพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากปัจจัยทางเวลาที่ต่างกัน

4.1.1.2 การทดลอง

เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 20 เปอร์เซ็นต์ โดยผสมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 49 เปอร์เซ็นต์ และ แอลกอฮอล์ (Ethanol) ในอัตราส่วน 1 : 0.454 และคนให้เข้ากัน

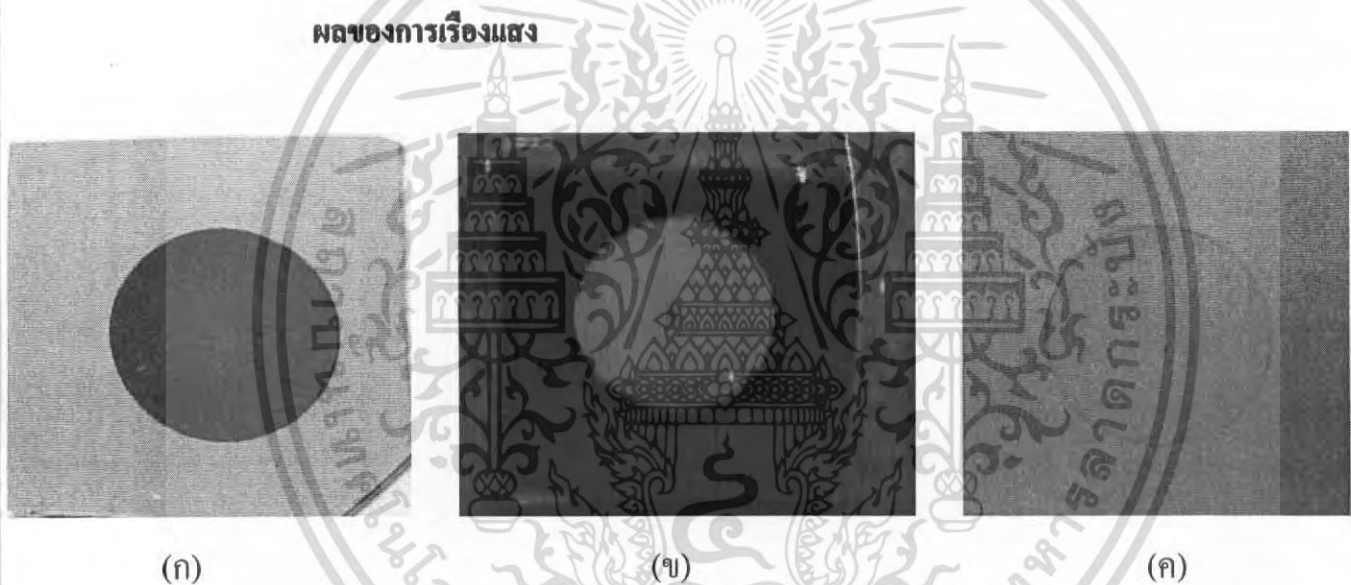
นำแผ่นซิติคอนมาทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐานแล้วกัดทางไฟฟ้า-เคมีด้วยกระแสที่ต่างกัน คือ 50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, 80 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แล้วสังเกตผลและนำแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างมาทำการวัดความพรุนและวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง

4.1.1.3 ผลการทดลอง

เมื่อจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลาย หลังจากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนสีของแผ่นซิลิคอน หลังจากนั้นจะเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กมากจากผิวแผ่นซิลิคอน ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีมากขึ้น ฟองก๊าซบางส่วนที่เกาะที่ผิวของแผ่นซิลิคอนจะรวมตัวกันใหญ่ขึ้นและจะลอยออกมาจากแผ่นเมื่อนำแผ่นซิลิคอนไปล้างในเอทานอล แล้วทิ้งไว้แห้ง จะเห็นอย่างชัดเจนว่าสีของแผ่นผลึกเปลี่ยนไป การเกิดของสีและลวดลายบนแผ่นผลึกเป็นไปอย่างเป็นระเบียบ โดยจากการทดสอบการเรืองแสง จะได้ว่าแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการสร้างชั้นพอร์สแล้วเมื่ออยู่ใต้แสง UV จะมีการเรืองแสงออกมาเป็นสีส้มแดง แสดงว่าแผ่นซิลิคอนนี้มีชั้นพอร์สซิลิคอนเกิดขึ้นจริง

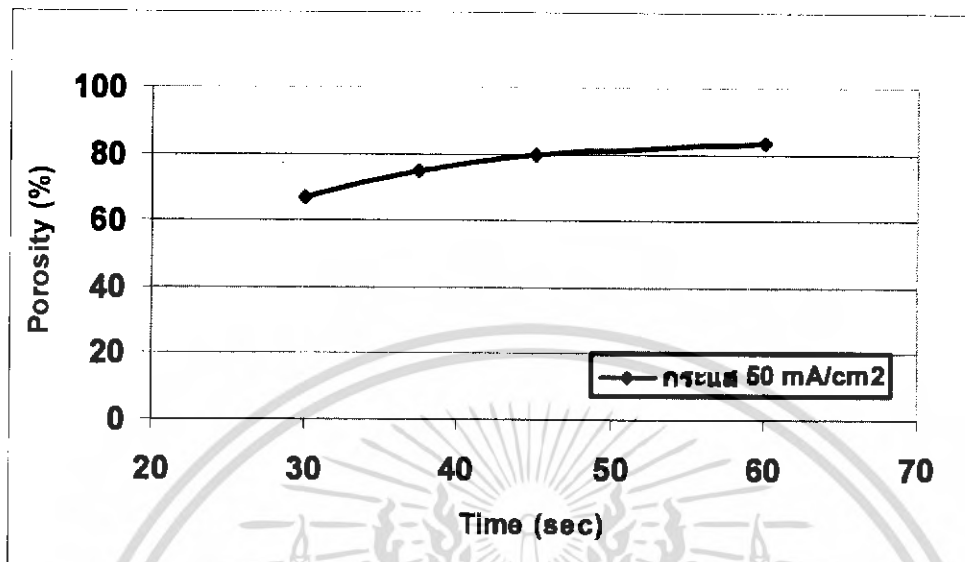


รูปที่ 4.1 รูปที่ผ่านขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการ การกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

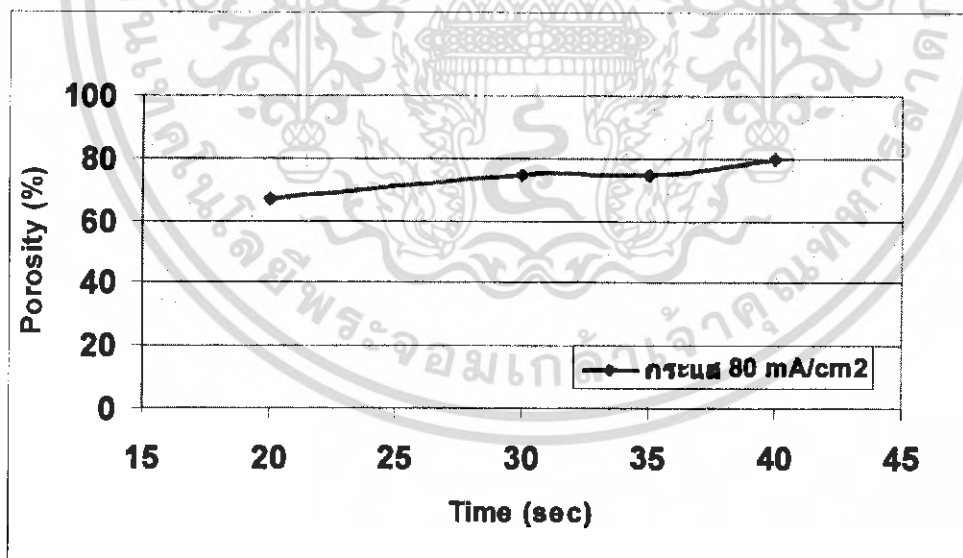
- (ก) แสดงส่วนของแผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนแล้ว
- (ข) แสดงการเรืองแสงของพอร์สซิลิคอน
- (ค) แสดงส่วนของแผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากทำการลอกชั้นพอร์สซิลิคอนออกแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่กำหนดกระแส

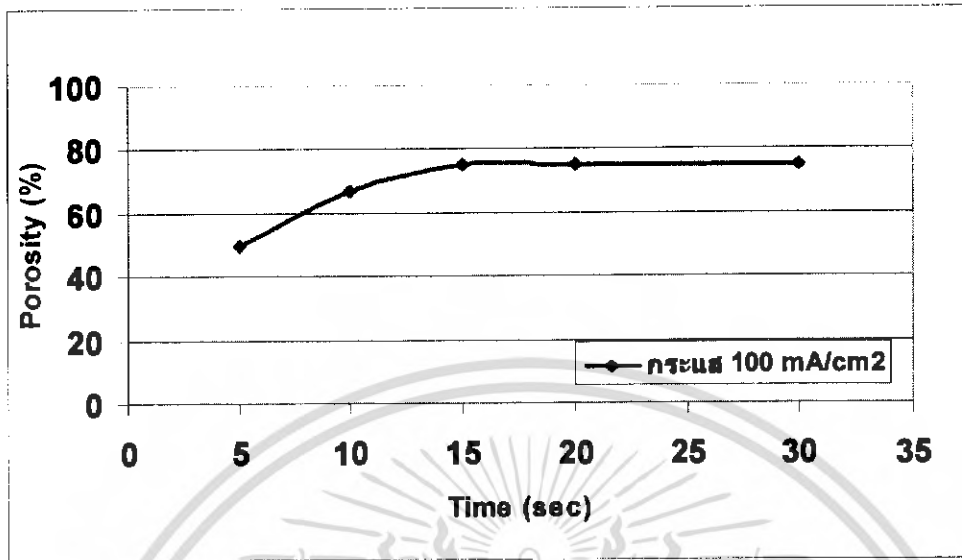


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

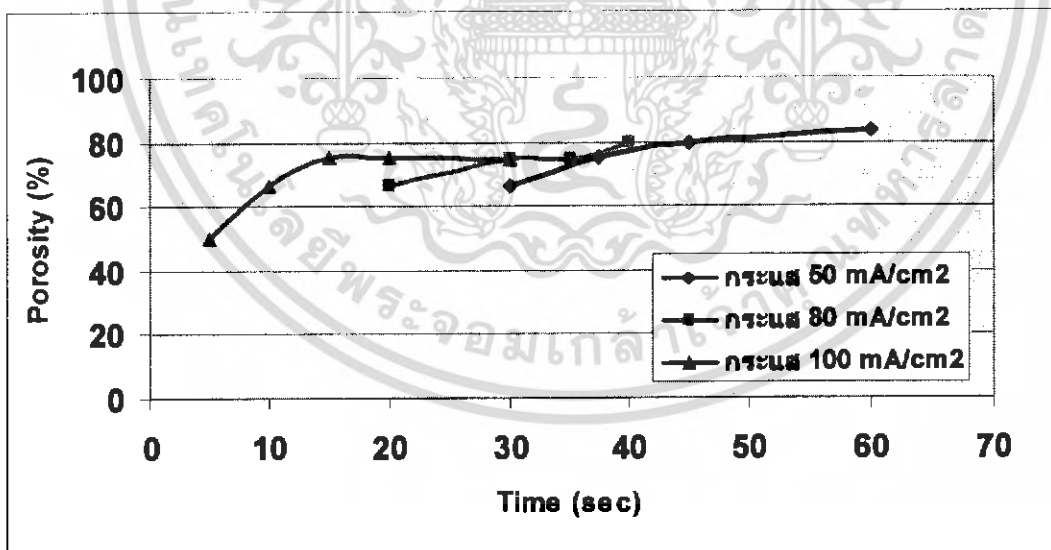


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 80 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



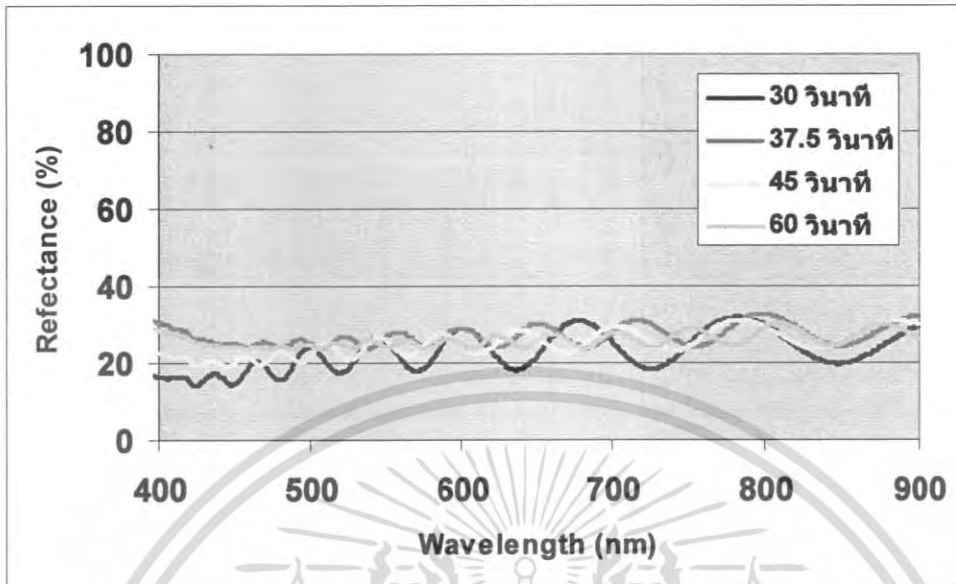
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร



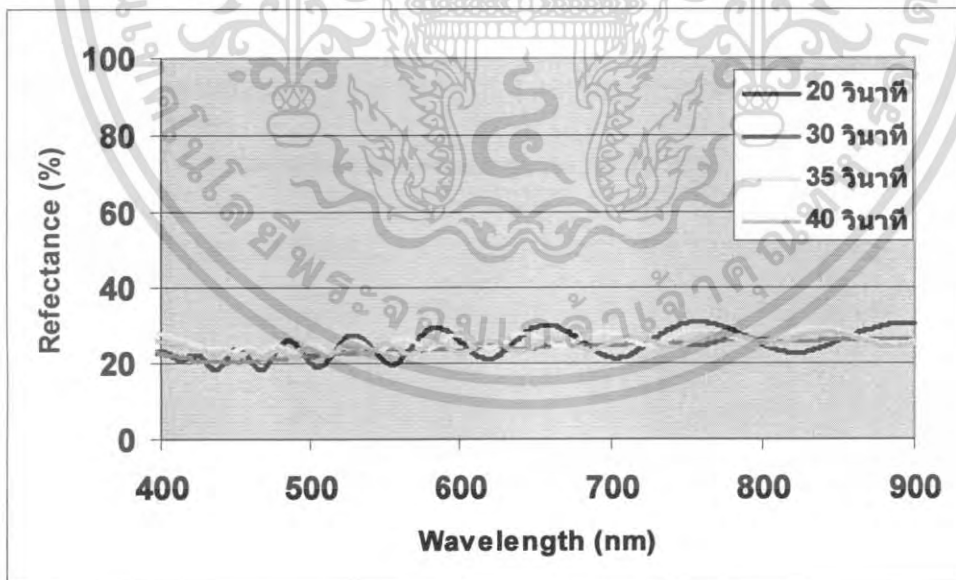
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 50, 80 และ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนกลับที่กำหนดความหนาแน่นกระแส

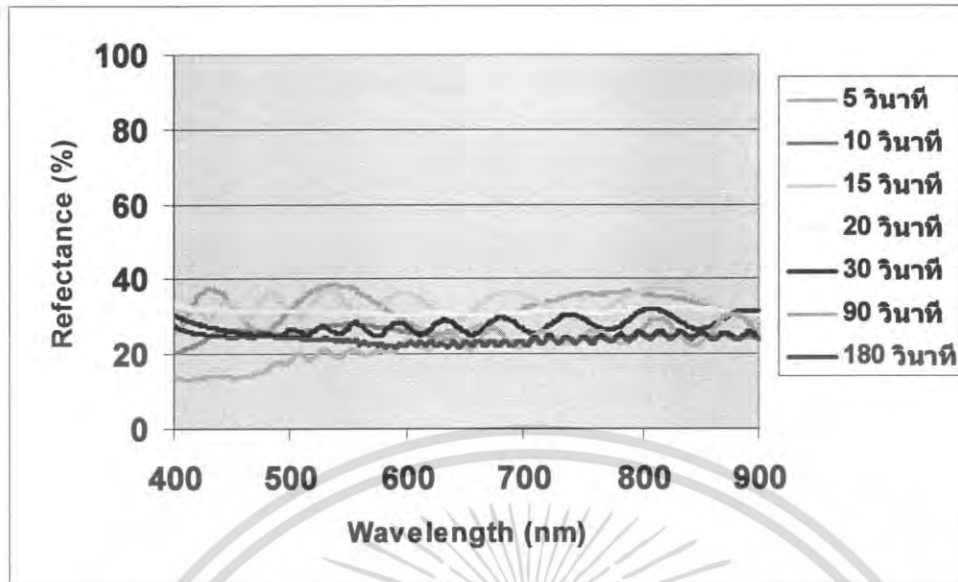


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 80 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซซีลิกอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ

4.1.2 การศึกษาผลของความเข้มกระแสที่ใช้ในการสร้างพอร์ซซีลิกอน

ด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี

4.1.2.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของความเข้มกระแสในการกัดพอร์ซซีลิกอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี
2. เพื่อศึกษาและสังเกต โครงสร้างของพอร์ซซีลิกอนที่สร้างขึ้นจากปัจจัยความเข้มกระแสที่ต่างกัน

4.1.2.2 การทดลอง

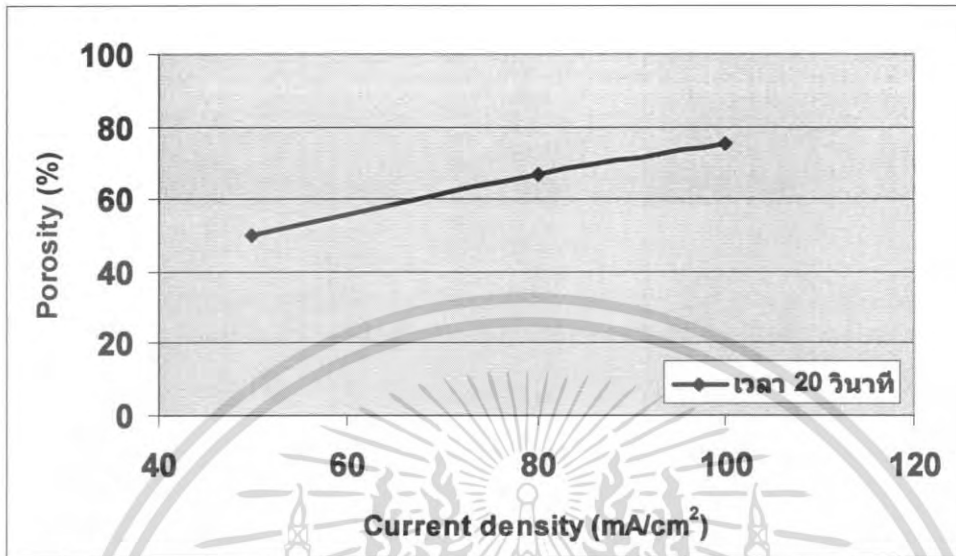
เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 20 เปอร์เซ็นต์ โดยผสมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 49 เปอร์เซ็นต์ และ แอลกอฮอล์ (Ethanol) ในอัตราส่วน 1 : 0.454 และคนให้เข้ากัน

นำแผ่นซิลิกอนมาทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐานแล้วกัดทางไฟฟ้า-เคมีด้วยเวลาต่างกัน คือ 20 วินาที, 30 วินาที แล้วสังเกตผลและนำแผ่นซิลิกอนที่ทำการสร้างมาทำการวัดการเรืองแสงและวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง

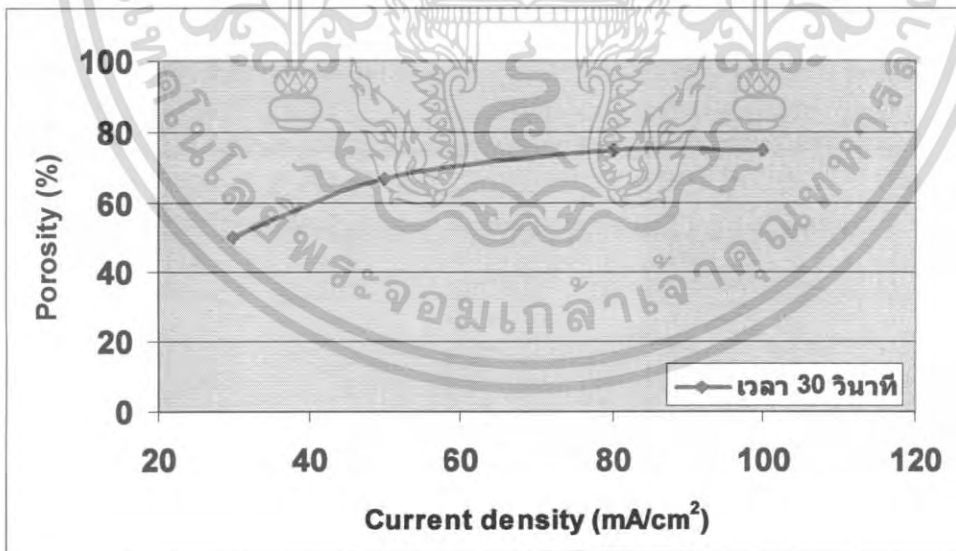
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 ผลการทดลอง

ผลของเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่กำหนดเวลา

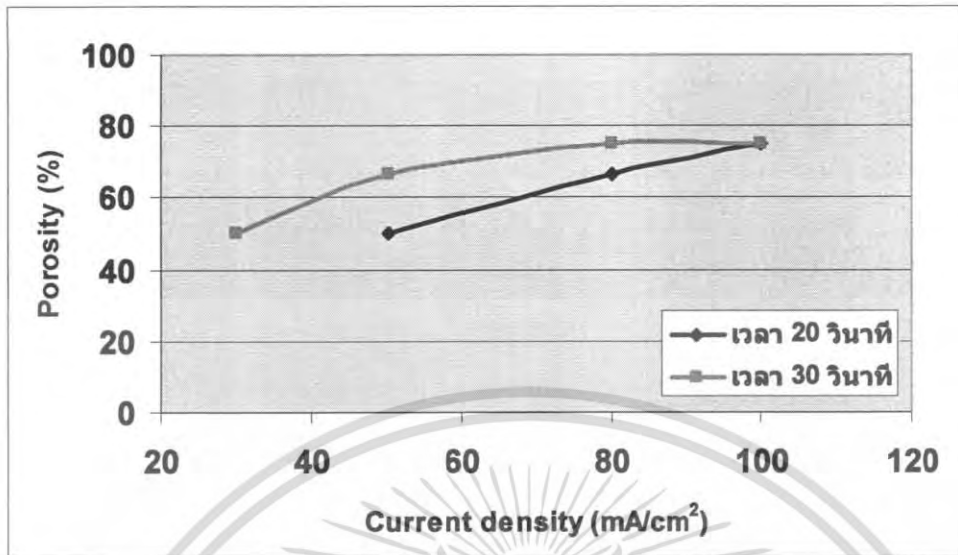


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้าเคมี โดยกำหนดเวลาที่ 20 วินาที



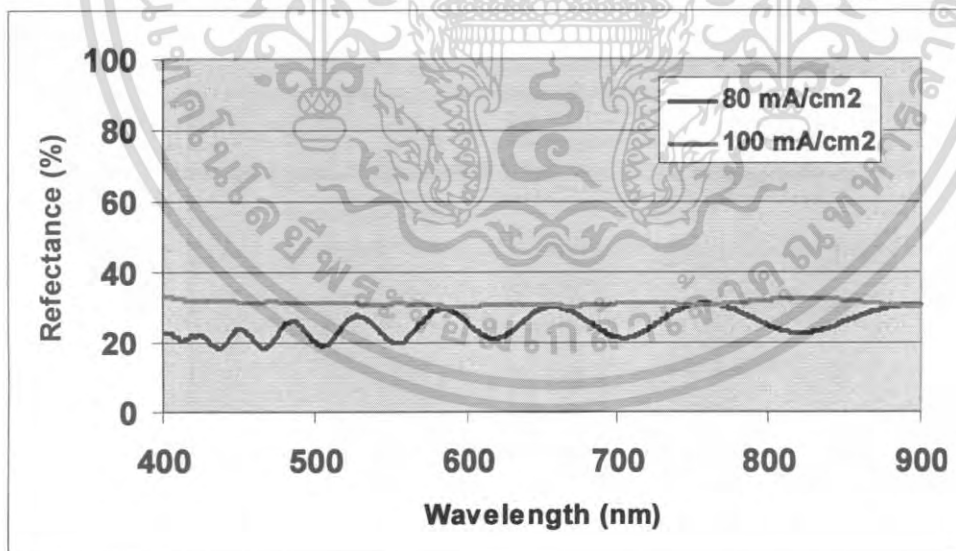
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้าเคมี โดยกำหนดเวลาที่ 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



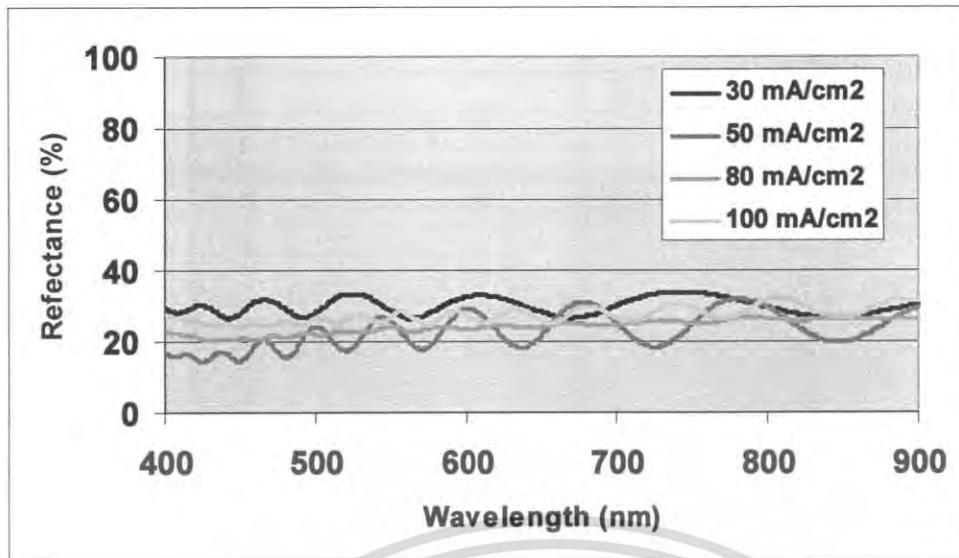
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดเวลาที่ 20 และ 30 วินาที

ผลของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่กำหนดเวลา



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิติคอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี 20 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซซิติกอนกับความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี 30 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่างๆ

4.2 การทดลองสร้างพอร์ซซิติกอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีกับแผ่นผลึกชนิดเอ็นออนพี

4.2.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์ซซิติกอน

4.2.1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของเวลาในการกัดพอร์ซซิติกอนด้วยวิธีการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี
2. เพื่อศึกษาและสังเกตโครงสร้างของพอร์ซซิติกอนที่สร้างขึ้นจากปัจจัยทางเวลาที่ต่างกัน

4.2.1.2 การทดลอง

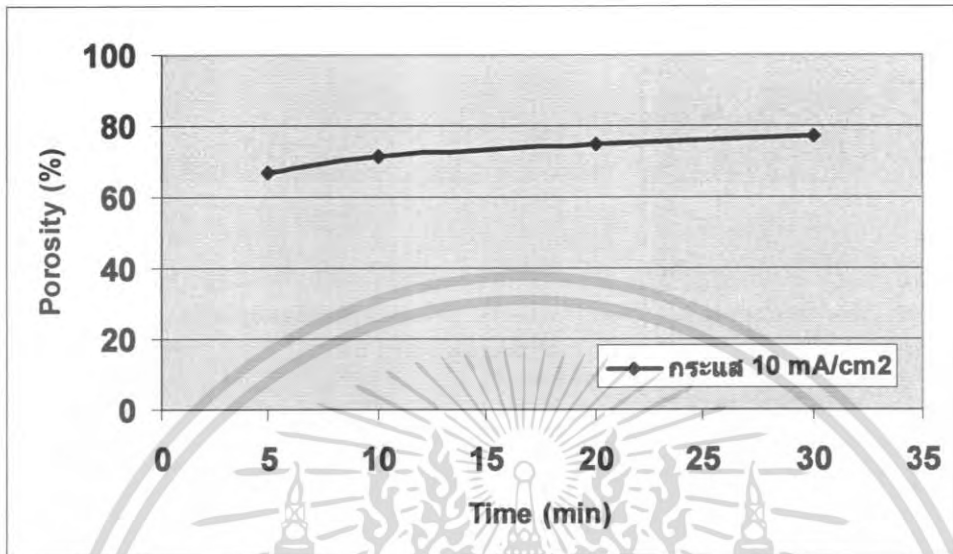
เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 20 เปอร์เซ็นต์ โดยผสมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 49 เปอร์เซ็นต์ และ แอลกอฮอล์ (Ethanol) ในอัตราส่วน 1 : 0.454 และคนให้เข้ากัน

นำแผ่นซิลิกอนมาทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐานแล้วกัดทางไฟฟ้า-เคมีด้วยกระแสที่ต่างกัน คือ 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แล้วสังเกตผลและนำแผ่นซิลิกอนที่ทำการสร้างมาทำการวัดความพรุนและวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง

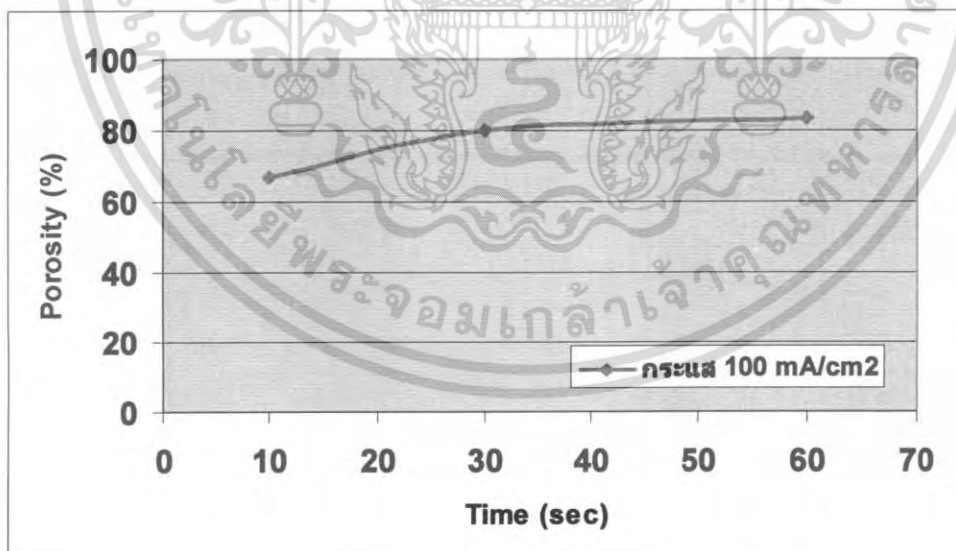
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.3 ผลการทดลอง

ผลของเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่กำหนดกระแส



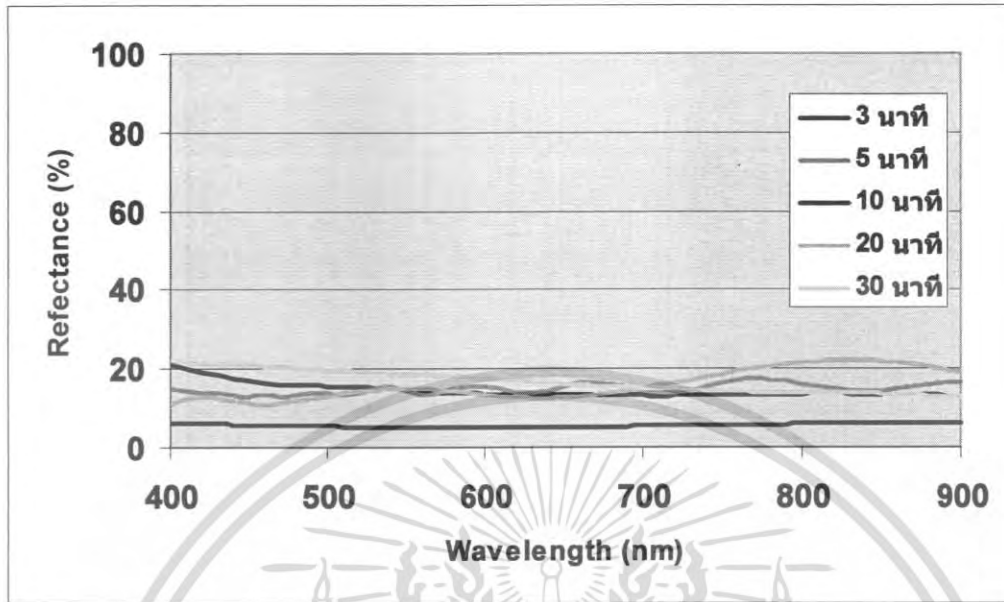
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดกระแสที่ 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร



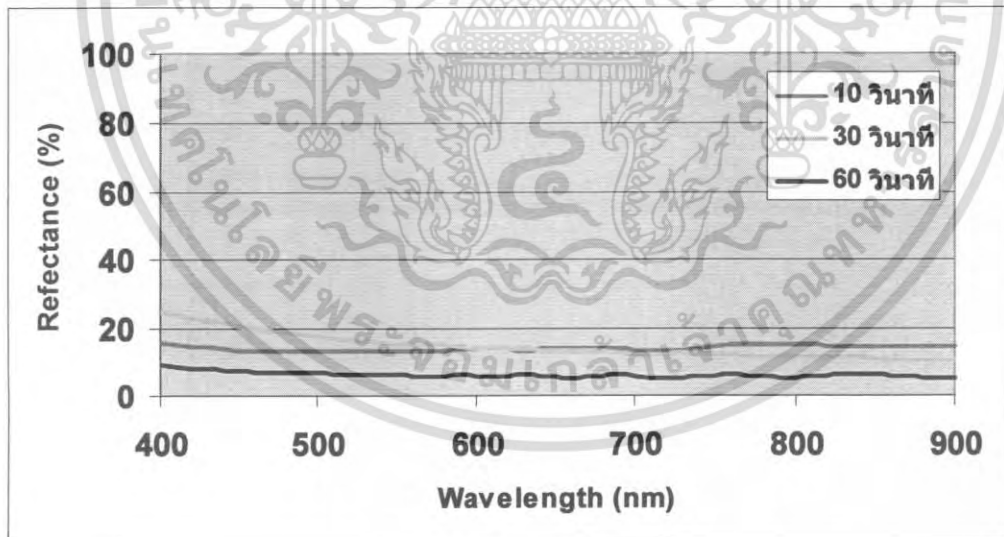
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดแบบไฟฟ้า-เคมี โดยกำหนดกระแสที่ 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่กำหนดกระแส



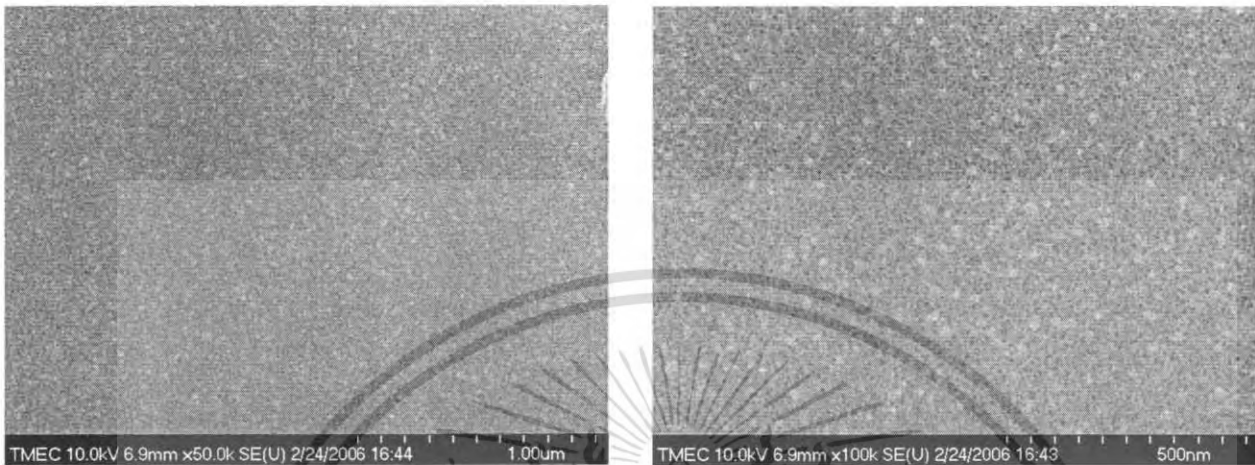
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซซิติคกับ ความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 10 มิลลิแอมป์ต่อตาราง เซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ



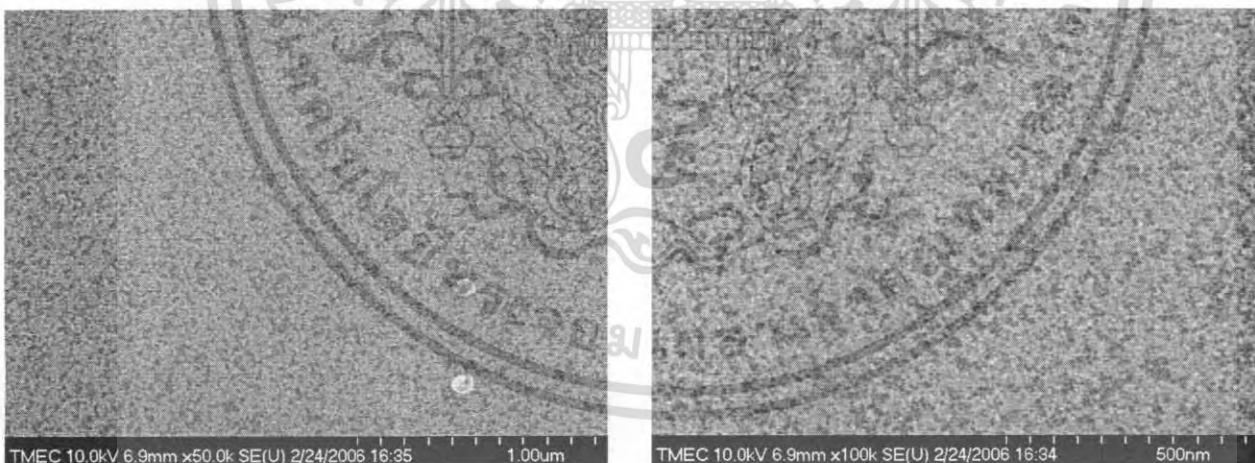
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซซิติคกับ ความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 100 มิลลิแอมป์ต่อตาราง เซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพแสดงผิวหน้าด้านบนของพอร์ซซิติกอน



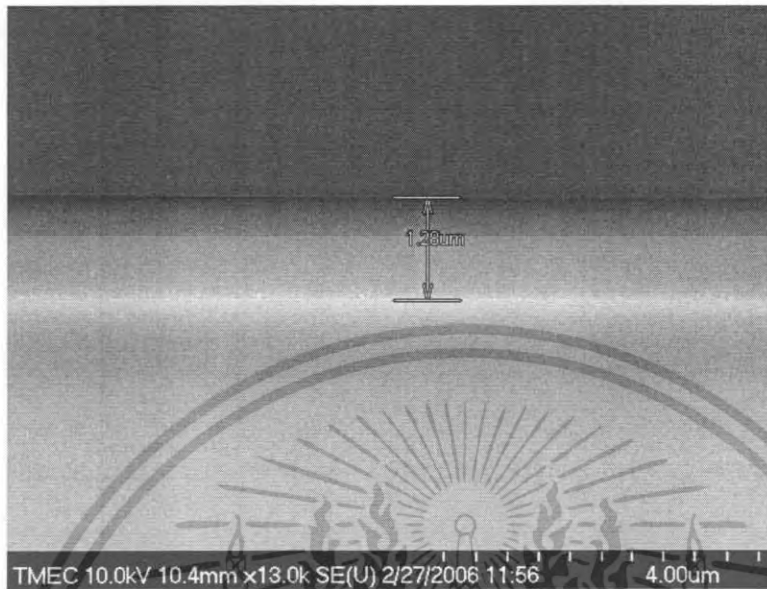
รูปที่ 4.18 ภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์ซซิติกอนที่สร้างขึ้นจาก
ความหนาแน่นกระแส 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร



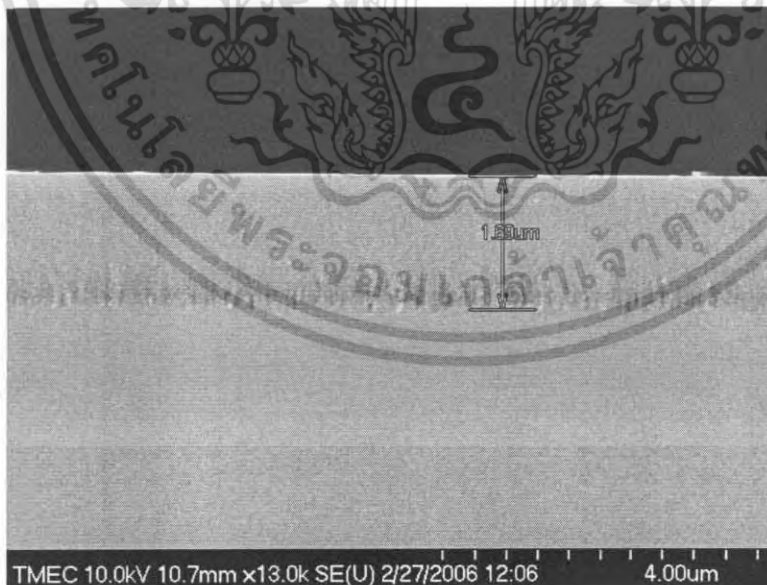
รูปที่ 4.19 ภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์ซซิติกอนที่สร้างขึ้นจาก
ความหนาแน่นกระแส 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิลิกอน



รูปที่ 4.20 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากความหนาแน่นกระแส
10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากความหนาแน่นกระแส
100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

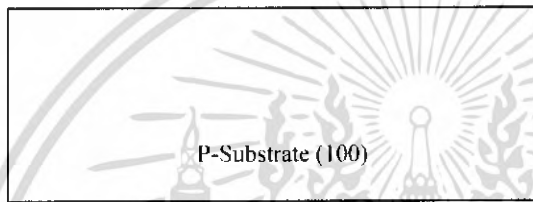
4.3 การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน

4.3.1 วัตถุประสงค์

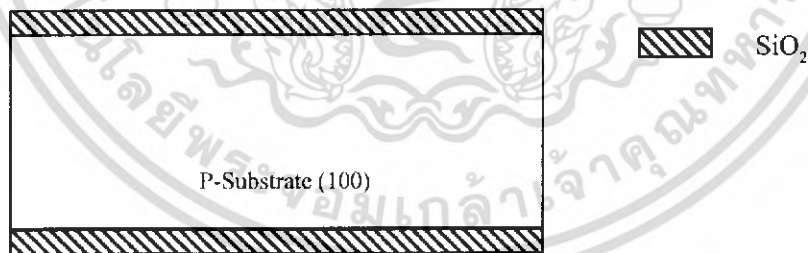
1. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน
2. เพื่อศึกษาผลที่ได้จากการใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนบนเซลล์แสงอาทิตย์

4.3.2 การทดลอง

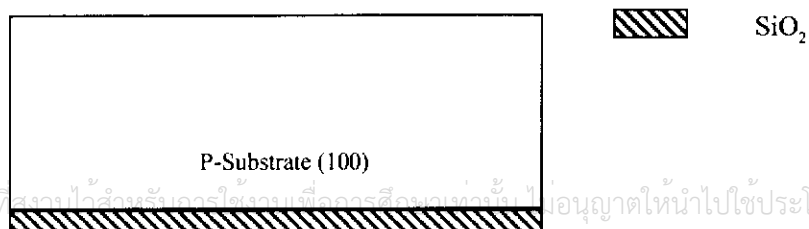
- นำแผ่นซิลิคอนชนิด P หนา 1 (111) ความต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ มาทำความสะอาดด้วยกระบวนการมาตรฐาน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษ โลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก



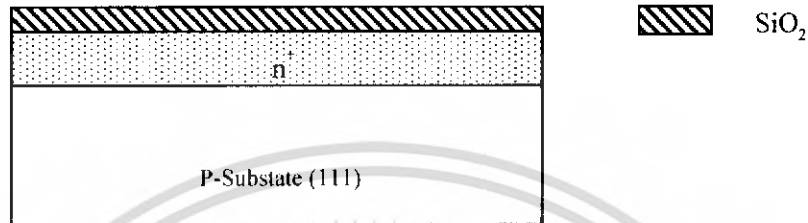
- ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบ Dry - Wet - Dry เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (Diffusion มิติโมบิลิตีต่อตารางเซนติเมตรsk of impurity atoms) ในขั้นตอนของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในส่วนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้อุณหภูมิเตา $1,050^{\circ}\text{C}$, อุณหภูมิน้ำ 90°C ให้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $5,500 \text{ \AA}$



- ทำการสร้างฟิล์มป้องกันทางด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อจะเป็นชั้นป้องกันในการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น จากนั้นทำการสกัดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ด้านบนออก เพื่อที่จะนำไปสร้างต่อพี-เอ็น ต่อไป



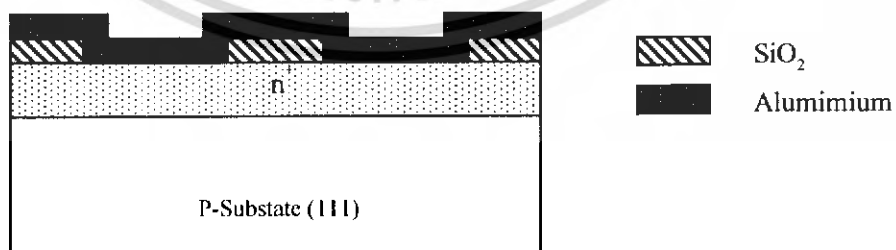
- ทำการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เข้มข้น (N^+) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี



- ทำการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 2 เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ในบริเวณที่จะสร้างขั้วต่อโลหะ

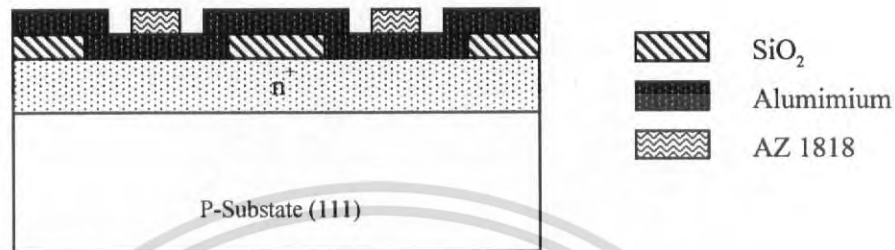


- ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยกระบวนการ Evaporation โดยจะได้ชั้นอลูมิเนียมมีความหนา 1 μm ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

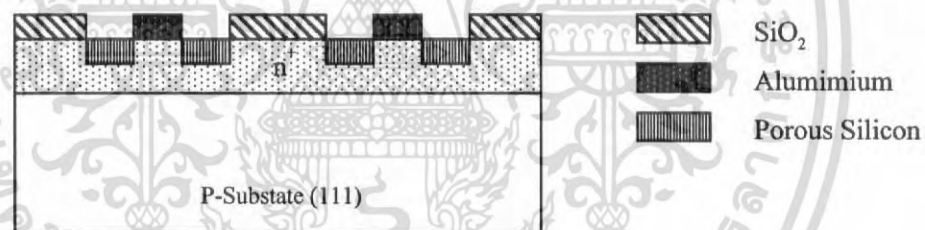


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

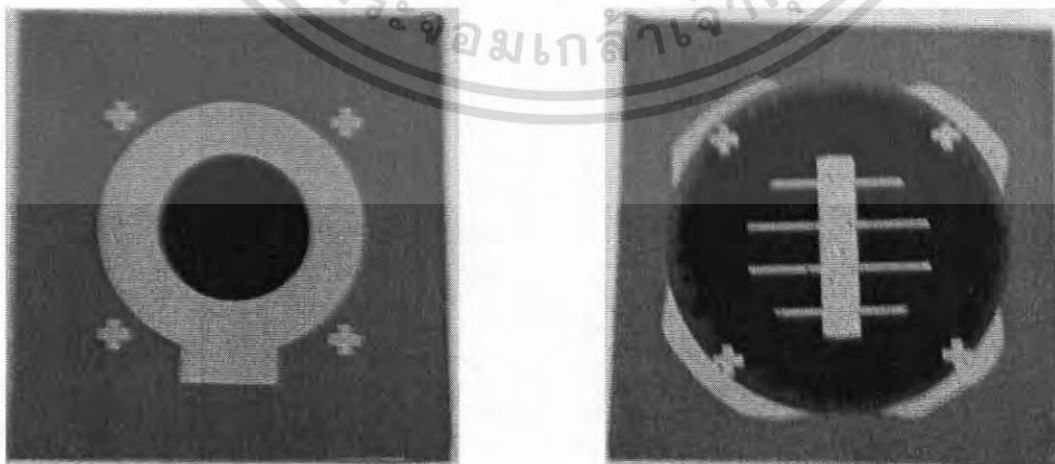
- ทำการเปิดชั้นของอลูมิเนียมด้วยกระบวนการโฟโวลติโกราฟี โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 3 เพื่อลอกชั้นอลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก ให้เหลือแต่บริเวณขั้วต่ออลูมิเนียม และส่วนอลูมิเนียมในส่วน of เซลล์ที่จะสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน แล้วจะเป็นการสร้างชั้นป้องกันด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az 1818 เพื่อทำการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนในบริเวณที่ต้องการ



- ทำการสร้างพอร์ซซิลิคอนในบริเวณที่ต้องการ โดยสารละลายจะทำการกัดทะลุชั้นอลูมิเนียมไปถึงชั้นของซิลิคอนจนเป็นพอร์ซซิลิคอน ก็จะได้เซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบไฟฟ้า-เคมีเป็นชั้นลดการสะท้อน



4.3.3 ผลการทดลอง



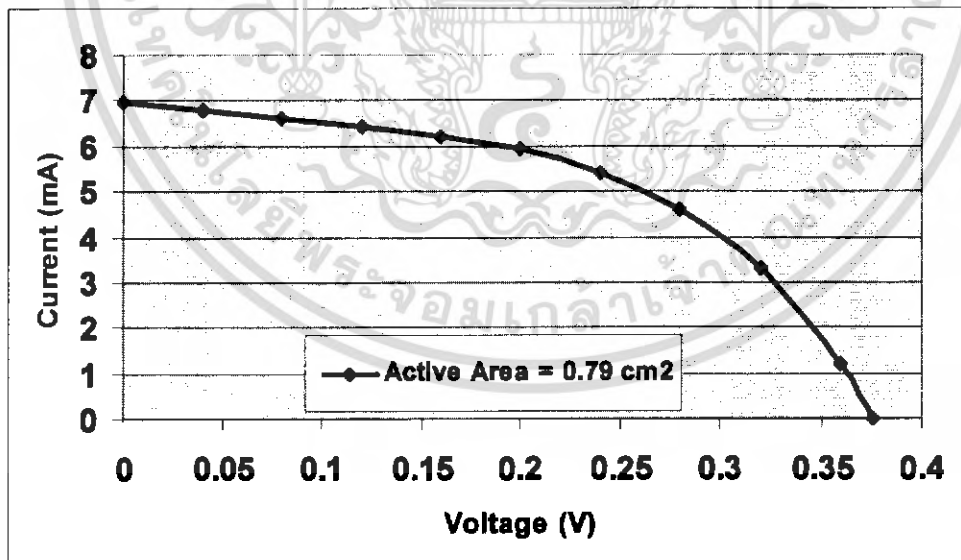
รูปที่ 4.22 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

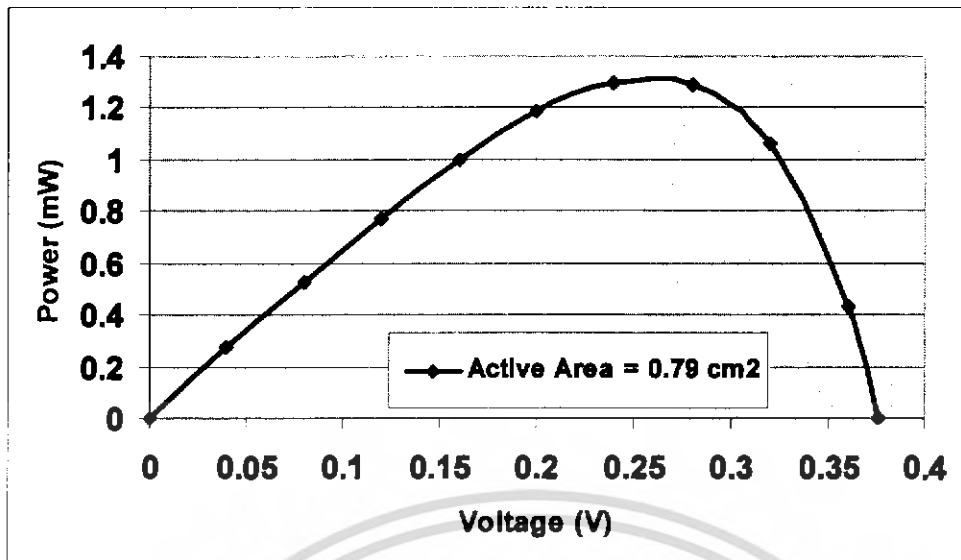
นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปวัดคุณสมบัติต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบได้ดังนี้
คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่สร้างจากแผ่น
ฐานรองสภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ ที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 0.79 ตารางเซนติเมตร

กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	7 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.38 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	1.3 mW
ความหนาแน่นกระแส (J_{sc})	=	8.9 mA
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	5.4 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.24 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	1.3 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.49
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	1.65 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.79 ตารางเซนติเมตร
อุณหภูมิ (Temp.)	=	27.6 °c
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นชั้นพอร์สซิลิคอน		



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน
เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 0.79 ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

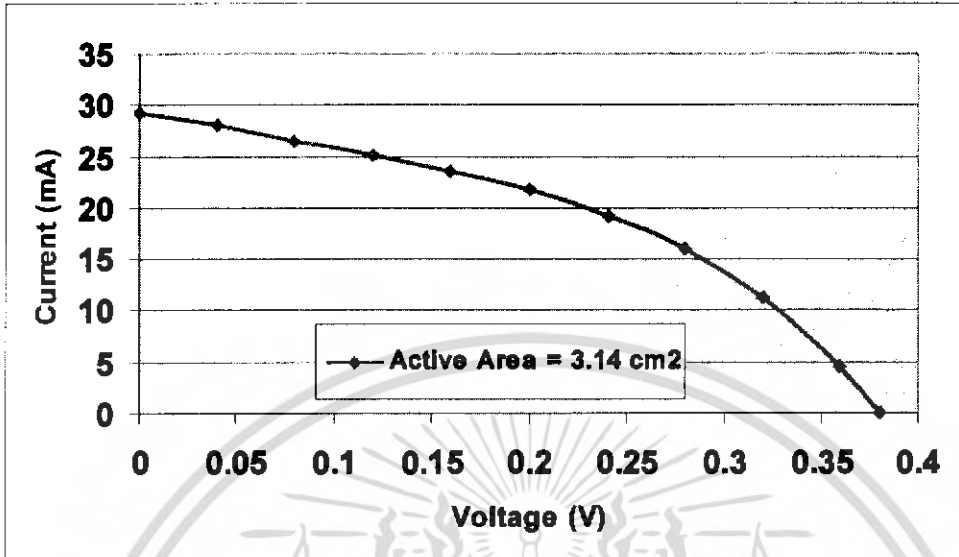


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 0.79 ตารางเซนติเมตร

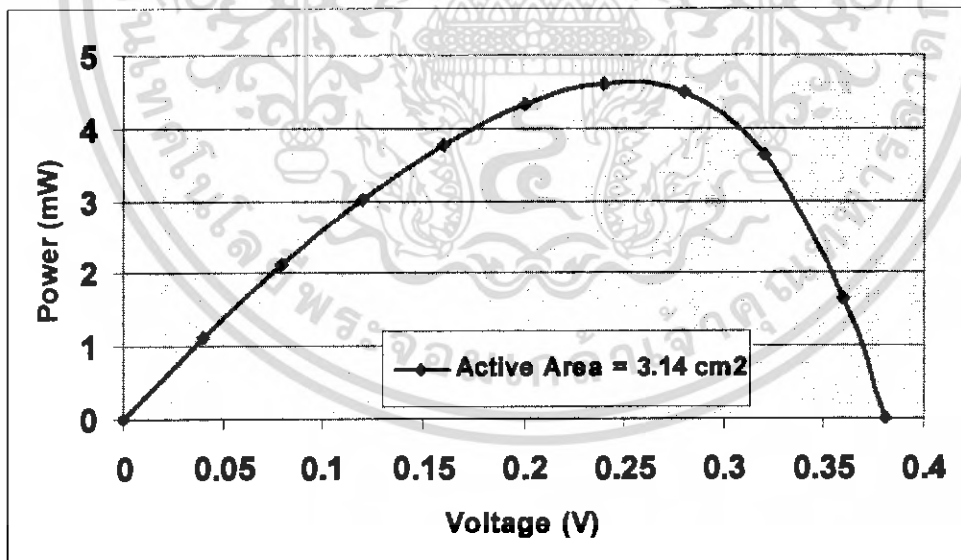
นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปวัดคุณสมบัติต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบได้ดังนี้ คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ ที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 3.14 ตารางเซนติเมตร

กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	29.32 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.38 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	4.6 mW
ความหนาแน่นกระแส (J_{sc})	=	9.33 mA
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	19.2 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.24 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.61 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.413
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	1.47 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	3.14 ตารางเซนติเมตร
อุณหภูมิ (Temp.)	=	28.29 °c
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นชั้นพอร์สซิลิคอน		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 3.14 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 3.14 ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่
สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ ที่มีพื้นที่รับแสงต่างกัน

ARC	Active Area (cm²)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	P_o (mW)	J_{sc} (mA)	I_m (mA)	V_m (V)	P_m (mW)	F.F.	Eff. (%)
Porous Silicon	0.79	7	0.376	1.3	8.9	5.4	0.24	1.3	0.49	1.65
Porous Silicon	3.14	29.32	0.38	4.6	9.33	19.2	0.24	4.61	0.41	1.47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยพื้นฐานที่เกี่ยวกับลักษณะและคุณสมบัติในการสะท้อนแสงของพอร์สซิลิคอน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ในที่นี้จะกล่าวถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นวัสดุที่สร้างขึ้นได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีของแผ่นผลึกซิลิคอน ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในเนื้อหาการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

1. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติการสะท้อนแสงของพอร์สซิลิคอนซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 5.1 และ 5.2
2. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อการทดลอง 5.3

นอกจากนี้แล้วการศึกษาพบว่าเนื้อหาทั้งสองส่วนข้างต้น ยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันอยู่อีกด้วยโดยรายละเอียดทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้สามารถสรุปการทดลองได้ดังนี้

จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขในการกัดทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งก็คือเงื่อนไขในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนนั่นเอง อันได้แก่ ความหนาแน่นของกระแส และเวลาที่ใช้ในการกัดทางไฟฟ้าเคมี จะมีผลต่อลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติในการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอน โดย

5.1 การศึกษาทดลองเกี่ยวกับ โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนเงื่อนไขในการกัดทางไฟฟ้าเคมีต่างๆ อย่างใดอย่างหนึ่งคือ

- การเพิ่มความหนาแน่นกระแส ($30-100 \text{ mA/cm}^2$)
- การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกัดทางไฟฟ้าเคมี (10 วินาที – 30 นาที)

จะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงชันกว่าเดิมได้ ซึ่งการที่ชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงชันนั้น สามารถสรุปได้ว่าเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้เนื่องจากการกัดทางไฟฟ้าเคมีตามเงื่อนไขในการกัดทางไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั่นเอง

5.2 การศึกษาทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติการสะท้อนแสงของพอร์สซิลิคอน

จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนเงื่อนไขในการกัดทางไฟฟ้าเคมีต่างๆ อย่างใดอย่างหนึ่งคือ

- การเพิ่มความหนาแน่นกระแส (30-100 mA/cm²)
- การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกัดทางไฟฟ้าเคมี (10 วินาที – 30 นาที)

จะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าเดิมได้ ซึ่งการที่ชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำลงนั้น สามารถสรุปได้ว่าเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้เนื่องจากการกัดทางไฟฟ้าเคมีตามเงื่อนไขในการกัดทางไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั่นเอง

5.3 การศึกษาทดลองเกี่ยวกับการนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

จากการทดลองการสะท้อนแสงของพอร์สซิลิคอนที่มีค่าที่ต่ำมาก คือ ที่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ คือ

- การสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี ที่มีค่าความเข้มข้นกระแส 10 mA เวลา 10 นาที และมีความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 20 เปอร์เซ็นต์
- การสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี ที่มีค่าความเข้มข้นกระแส 100 mA เวลา 1 นาที และมีความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 20 เปอร์เซ็นต์

จากนั้นจะนำเงื่อนไขข้างต้นมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะผ่านกระบวนการโฟโวลติโกราฟี ด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก 1818 ซึ่งจะสามารถทนต่อการกัดทางไฟฟ้าเคมีได้เป็นเวลาประมาณ 3 นาที

จากผลการทดลองจะทำให้เราทราบถึงปัญหาของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากการลัดวงจรของชั้น พี-เอิน ซึ่งอาจสันนิษฐานถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากชั้น พี-เอิน ที่ทำการทดลองนั้นที่ความลึกประมาณ 1 ไมครอน แต่จากภาพตัดขวางของการกัดแบบไฟฟ้าเคมีนั้น มีความลึกของชั้นพอร์สซิลิคอนประมาณ 1.3-1.7 ไมครอน ซึ่งเกินขนาดของชั้น พี-เอิน ที่เราได้ทำการสร้างไว้ไปแล้ว จึงทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งทางแก้ไขอาจทำได้โดยการลดเวลาที่ใช้ในการกัดทางไฟฟ้าเคมีหรือลดค่าความเข้มข้นทางกระแส เพื่อให้ขนาดของชั้นพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลง จนไม่เกินขนาดของชั้น พี-เอิน ที่เราสร้างขึ้นของเซลล์แสงอาทิตย์

บรรณานุกรม

- [1] Leigh Canham. **“Properties of Porous Silicon”** Short Run Press Ltd.,1997
- [2] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. **“เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”** แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
- [3] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. **“ดึงประคินสู่สารกึ่งตัวนำ”** แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545
- [4] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. **“เทคโนโลยีการสร้าง และการใช้งานเซลด์แสงอาทิตย์”** แผนกตำรา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. **“เทคโนโลยีวงจรรวม”** เอกสารประกอบวิชาเทคโนโลยีวงจรรวม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546
- [6] นายมนัสชัย ไชยนอก **“การประยุกต์ใช้งานพอร์ซซิลิคอนในเซลด์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น”**
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546
- [7] Martin A.Green. **“Solar Cells Operating Principles, Technology and System Application”**
Prentice-Hall, Inc., 1982
- [8] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. **“การศึกษาคุณสมบัติของชั้นพอร์ซซิลิคอน”**
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542
- [9] Y.S. Tsoo, Y. Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb. **“Potential Applications Of
Porous Silicon in Photovoltaics”** Photovoltaic Specialists Conference, 1993. Conference
Record of the Twenty Third, IEEE,USA
- [10] Funktiomella Material. **“Porous Silicon”** Chelsie Dickson,Stockholm
- [11] J. Xu and A. J. Steckl. **“Stain-etched porous silicon visible light emitting”**
University of Cincinnati, Ohio, 1995
- [12] ชลิตา คูหาเรือง. **“กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสร้างอวคฉายขนาด 5 ไมครอน
บนซิลิคอนไดออกไซด์และอูมิเนียม”**วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (rest mass of an electron)	m_e	9.109×10^{-31} kg
มวลนิ่งของโปรตอน (rest mass of proton)	m_p	1.672×10^{-27} kg
มวลนิ่งของนิวตรอน (rest mass of neutron)	m_n	1.675×10^{-27} kg
ประจุอิเล็กตรอน (electron charge)	q	1.602×10^{-19} C.
อัตราส่วนระหว่างประจุ กับมวลนิ่งของอิเล็กตรอน	q/m_e	1.76×10^{11} C/kg.
ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)	h	6.626×10^{-34} J-sec
	$\hbar = h/2\pi$	4.136×10^{-15} eV-sec
ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)	k	1.31×10^{-23} j/K
		8.617×10^{-5} eV/K
เลขคงที่อะโวกาโด (Avagadro's number)	N_0	6.023×10^{26} (k mol) ⁻¹
ความเร็วแสงในสุญญากาศ (speed of light in space)	C	2.998×10^8 m/sec
อัตราส่วนมวล โปรตอนและอิเล็กตรอน	m_p/m_e	1836
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ (Permittivity of free space)	ϵ_0	8.854×10^{12}
		$c^2/N.m^2(F/m)$
ค่าเปอร์มิอะบิลิตีในสุญญากาศ (Permeability of free space)	μ_0	1.257×10^{-6}
		T.m/A(H/m)
ค่ารัศมีของบอห์ร์ (Bohr radius)	a_0	5.292×10^{-11} m
ค่าคงที่ของริดเบิร์ก (Rydberg constant)	R	1.097×10^7 m ⁻¹
ค่าคงที่ของสเตฟาน (Stagan's constant)	σ	5.67×10^{-8} w/m ²
ค่าบอห์ร์แมกนีตอน (Bohr mahneton)	μ_B	9.273×10^{-24} J/T
ค่าคงที่อิเล็กตรอนโวลต์ (1 electron – volts)	eV	1.602×10^{-19} J
ค่าพลังงานจูล (1 Joule)	J	6.242×10^{18} eV
ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)	K	⁰ C+273.15 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300 K)

คุณสมบัติ	ซิลิคอน	เจอร์เมเนียม	แกลเลียม อาเซไนด์	หน่วย
ความหนาแน่นอะตอม	5×10^{22}	4.4×10^{22}	2.2×10^{22}	cm^{-3}
ช่องว่างพลังงาน (E_g)	1.12	0.66	1.42	eV
มวลยังผล				
อิเล็กตรอน (m_n^*/m_0)	1.182	0.553	0.0655	
โฮล (m_p^*/m_0)	0.81	0.357	0.524	
ความหนาแน่นสถานะ				
ที่แถบนำ (N_c)	3.22×10^{19}	1.03×10^{19}	4.21×10^{17}	cm^{-3}
ที่แถบวาเลนซ์ (N_v)	1.83×10^{19}	5.35×10^{18}	9.52×10^{16}	
ความหนาแน่นพาหะ				
อินทรีนซิก (n_i)	1×10^{10}	2.17×10^{13}	2.49×10^6	cm^{-3}
สภาพคล่องที่ low doping				
μ_n (electron)	1350	3900	8800	$\text{cm}^2/\text{V-S}$
μ_p (hole)	480	1900	4000	
สนามไฟฟ้าพังทลาย	3×10^5	105	4×10^5	V/cm
Breakdown field				
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (K)	11.8	15.8	13.1	
จุดหลอมละลาย	1,410	940	1240	$^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
น้ำหนักอะตอม	60.08	
ความหนาแน่นอะตอม	2.310-22	cm ⁻³
ความต้านทาน (ที่ 300 K)	>1016	Ω-cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	3.9	
จุดหลอมเหลว	1700	°C
ความร้อนจำเพาะ	1.0	J/g °C
การนำความร้อน	0.014	W/cm-°C
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	0.5x10 ⁻⁶	(°C) ⁻¹

4. คุณสมบัติของซิลิกอน

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	g/cm ⁻³
ความหนาแน่น	2.328	cm ⁻³
ความหนาแน่นอะตอม	2.96 x10 ²²	
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3 x10 ⁻⁴	eV/°C
จุดหลอมเหลว	1417	°C
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว ระบาย 100	580	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร ระบาย100	1260	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิว ระบาย100	400	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสาร ระบาย 100	230	cm ² /V.s
ดัชนีหักเห	3420	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อน	1.57	W/cm-°C
การขยายตัว เนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	(°C) ⁻¹
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	Å
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	cm ² /dym
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิคอนบริสุทธิ์	1.45×10^{10}	cm ⁻³



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข จะกล่าวถึง ข้อมูลของน้ำยาไวแสงและน้ำยาขึ้นลวดลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการทราบคุณสมบัติของน้ำยาไวแสงก่อนใช้งาน จะทำให้สามารถใช้น้ำยาไวแสงได้อย่างถูกต้อง

AZ P1350 Series Photoresist

For Photo Mask and Optical Disk Manufacturing

High Adhesion

For g – line Exposure

1. Description

Az 1350 series photoresist is suitable for photomask and optical disk manufacturing , especially for the processes requiring high adhesion properties . It is formulated with the safer solvent propylene glycol monomethyl ether acetate (PGMEA) rather than ethylene glycol acetate (EGA)

2. Features

- 1) Good resolution and linearity.
- 2) Wide exposure latitude and DOF margin.
- 3) Good adhesion.
- 4) Small dark erosion.

3. Storage Condition

Keep in sealed original container. Protect from sunlight. Store in a cool and dry room.

4. Handling Precaution / First Aid

- 1) handle with care. Keep away from heat, sparks, and open flames.
- 2) Keep away from skin. Wear gloves and protective clothing as needed.
- 3) First Aid

If skin contact: Wash affected areas with soap and water.

If eye contact : Flush with water for at least 15 min. Contact physician.

If inhaled : Move into fresh air.

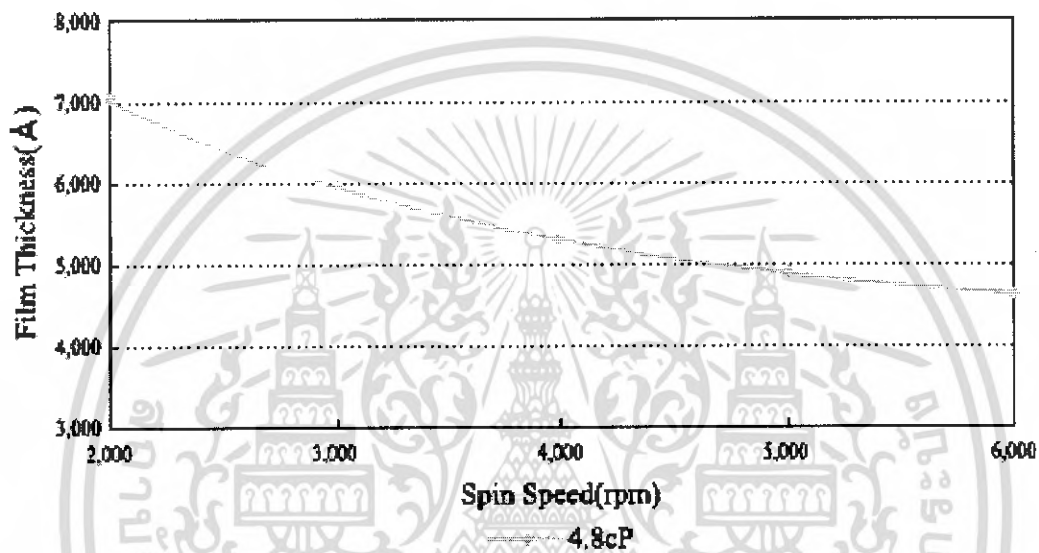
5. Specifications

Solid Content (wt%) 16.2 ± 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Viscosity / 25 °C	4.8 ± 0.5
Specific Gravity	1.010 ± 0.005
Water Content (wt%)	0.5 max
Solvent	propylene glycol monomethyl ether acetate (PGMEA)

Spin Curve



รูปที่ ข. 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการสปินเนอร์กับความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง เบอร์ AZ1350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MICROPOSIT

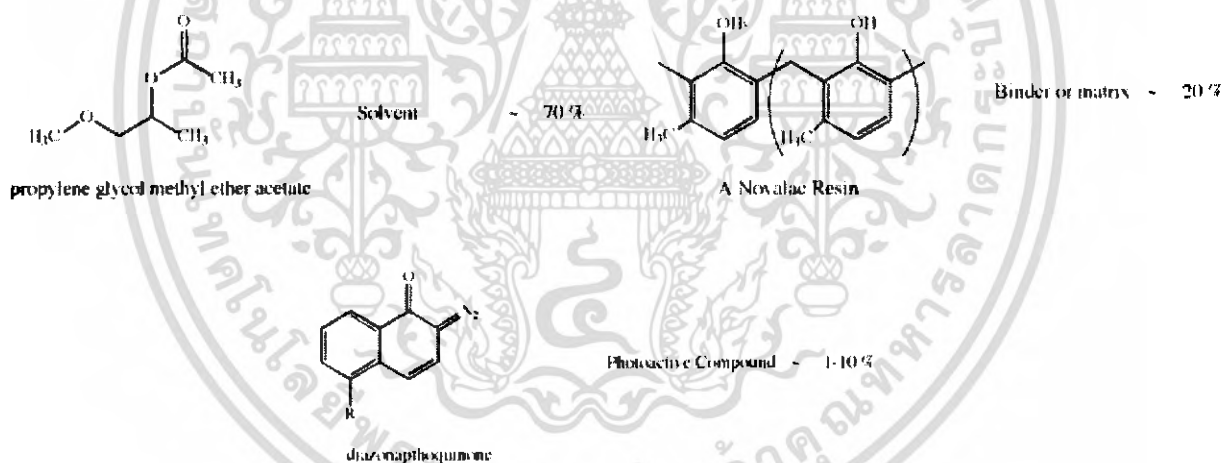
S1818 Series Photoresist

S1800 positive g – Line photoresist is an industry proven, general purpose resist for conventional device applications.

FEATURES

- Fast photo speed and High resolution
- Good adhesion
- Good dry etching resistance
- Good film retention

Component Photoresist



Components without CAS numbers are Trade Secret

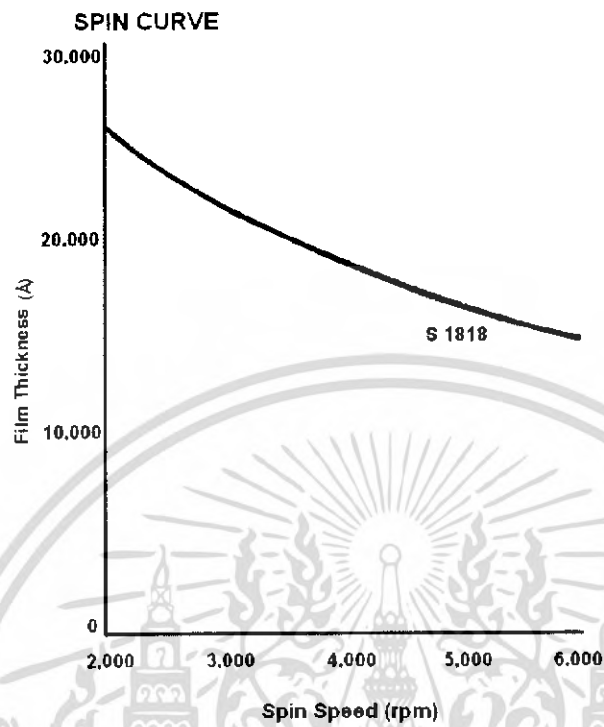
Component Name	CAS# / Codes	Concentration
Electronic grade propylene glycol monomethyl ether acetate	108-65-6	65.00 - 75.00
Mixed cresol novolak resin		20.00 - 30.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Component Name	CAS# / Codes	Concentration
Nonionic Surfactant		0.01 - 1.00
Diazo Photoactive Compound		1.00 - 10.00
cresol	1319-77-3	0.01 - 0.99

Physical State	Viscous liquid
Color	Red
Odor	Sweet
VOC (g/l)	741.06
Specific Gravity	1.055
pH	Neutral
Boiling Range/Point (°C/F)	145.8/295
Flash Point (PMCC) (°C/F)	40.5-46.1 / 105-115
Explosion Limits (%)	Lower limit 1.5 at 20 °C. Upper limit 7.0 at 20 °C.
Solubility in Water	Insoluble.
Vapor Density (Air = 1)	Heavier than air.
Evaporation Rate	Slower than ether
Vapor Pressure	Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate: 3.7 mmHg at 20 °C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



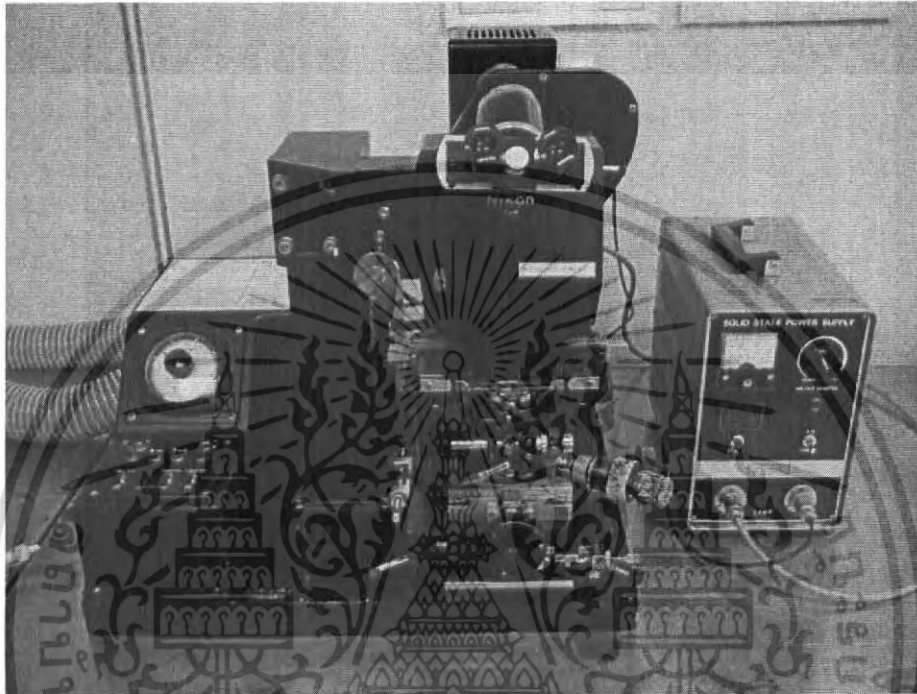
รูปที่ ก. 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการสปินเนอร์กับความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง เบอร์ S 1818

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

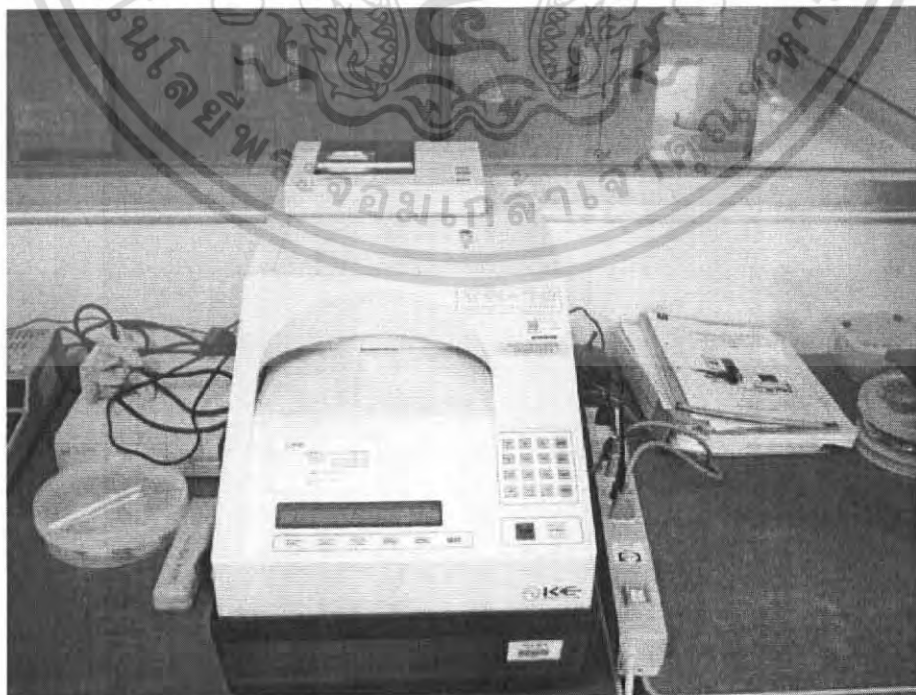
ภาคผนวก ค

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1 Alignment expose



2. Four point probe resistivity testing



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Automatic thin film measurement

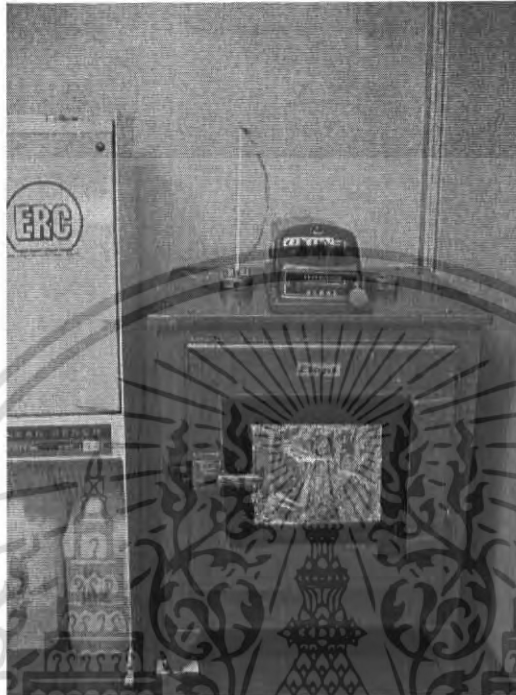


4. Spinner

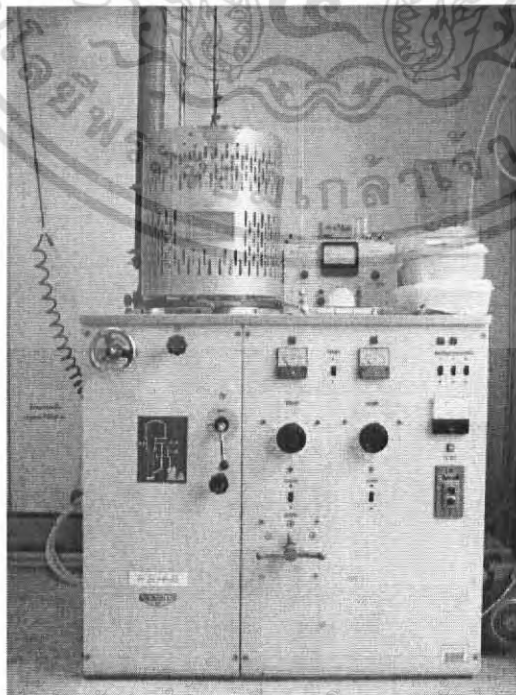


เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเวลาหรับการเขงานเพื่การศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญเตหนาเปเชประยชนดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตู้อบไล่ความชื้น



6. Evaporator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เตา Oxidation และ Sintering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม

1.1 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์

หรือที่เรียกว่า น้ำยาบัฟเฟอร์ (buffer solution)

น้ำยาบัฟเฟอร์ใช้สำหรับการกัดซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับแพร่สารเจือ หรือเพื่อทำรอยสัมผัส (contact) ให้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ น้ำยาที่ใช้มีอัตราในการกัดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้ตามความจำเป็นของงาน

น้ำยาบัฟเฟอร์ 1

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 %	1	ส่วน
แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH ₄ F)	6	ส่วน

ผสมกันโดยปริมาตร มีอัตราการกัด (etching rate) ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

น้ำยาบัฟเฟอร์ 2

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 %	1	ส่วน
แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH ₄ F)	10	ส่วน

ผสมกันโดยปริมาตร มีอัตราการกัดประมาณ 600 อังสตรอมต่อนาที (10 อังสตรอมต่อวินาที)

1.2 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียม

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียมใช้สำหรับการกัดอะลูมิเนียมเพื่อทำลวดลาย ขั้วโลหะบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ มีส่วนผสมของสารเคมีโดยปริมาตร ดังนี้

กรดฟอสฟอริก (H ₃ PO ₄)	80	ส่วน
กรดไนตริก (HNO ₃)	5	ส่วน
กรดอะซิติก (CH ₃ COOH)	5	ส่วน
น้ำบริสุทธิ์ (deionized water; DI water)	10	ส่วน

1.3 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดพอร์ซซิลิคอน แบบ Stain etching

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 %	1	ส่วน
กรดไนตริก (HNO ₃)	3	ส่วน
น้ำบริสุทธิ์ (deionized water; DI water)	5	ส่วน

ภาคผนวก จ

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- Ultrasonic ใน DI เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มใน Trichloroethylene (C_2HCl_3) เวลา 10 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH_3COCH_3) เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้