

เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์รัสซิลิคอนจากการกัดขี้ดือ
เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

SILICON SOLAR CELLS WITH STAIN ETCHED POROUS SILICON
AS AN ANTI-REFLECTION LAYER

สรวิศ มุงการนา
SORAWIT MOONGKANNA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2455-2

เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนจากการกัดย้อมสี
เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

SILICON SOLAR CELLS WITH STAIN ETCHED POROUS SILICON
AS AN ANTI-REFLECTION LAYER

สรวิศ มุ่งगरนา

SORAWIT MOONGKANNA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2455-2

**SILICON SOLAR CELLS WITH STAIN ETCHED POROUS SILICON
AS AN ANTI-REFLECTION LAYER**

SORAWIT MOONGKANNA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2455-2

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน จากการกัดข้อมลึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
นักศึกษา	นายสรวิศ มุ่งการนา
รหัสนักศึกษา	46061403
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช

บทคัดย่อ

ชั้นพอร์สซิลิคอน (PS) เป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก สามารถสร้างขึ้นบนผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนทั่วไปได้โดยง่าย และประหยัดที่สุดด้วยเทคนิคของการกัดข้อมลึ ด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และน้ำ ชั้นพอร์สซิลิคอนนี้มีคุณสมบัติพิเศษสามารถดูดกลืนแสงและลดการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดข้อมลึบนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ด้วยวิธีการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ ซึ่งจะไม่ทำความเสียหายให้แก่รอยต่อของเซลล์ที่อยู่ด้านล่างแต่อย่างใด และได้ศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอีกด้วย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนอยู่ที่ผิวด้านบนของเซลล์ซึ่งมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงต่ำประมาณ 20% สามารถมีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงกว่าเซลล์แบบธรรมดาทั่วไปซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงประมาณ 24.357% ผลดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์ (η) เพิ่มขึ้น 21.989% และมีค่ากำลังงานสูงสุด (P_m) เพิ่มขึ้นถึง 21.989% จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้สูงในการนำชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมลึไปใช้แทนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ และลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

Thesis	Silicon Solar Cells with Stain Etched Porous Silicon as an Anti-Reflection Layer
Student	Mr.Sorawit Moongkanna
Student ID	46061403
Degree	Master of Engineering
Programme	Microelectronics Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somkiat Supadech

ABSTRACT

Porous silicon (PS) or bulk silicon contains many small pores can be formed on any silicon surface using a very simple and inexpensive stain etching technique with the mixed solution of hydrofluoric acid and nitric acid. 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. In our study, we have focused on the selective formation of porous silicon layers by stain etching on the surface of silicon solar cell without disturbing the underlying junction characteristics. In this experiment the effects of porous silicon layer on the important parameters of silicon solar cell are also studied and compared with the conventional SiO₂ anti-reflected silicon solar cells. It shows that the short circuits current (I_{sc}) of cell with porous silicon layer (20% reflectance) is higher than the cell with SiO₂ layer about 24.357%, then it increases 21.989% of cell efficiency (η) and 21.989% of maximum power (P_m). In conclusion, it has high potential and possibility for replacing of SiO₂ layer by stain etched porous silicon layers to increase solar cell efficiency and reduce the cost of cell fabrication.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มโดยสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ศุภเดช ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบดีว่า ในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กรรมการพิจารณาหัวข้อ และเค้าโครงวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้งบประมาณในการวิจัยประจำปี พ.ศ. 2546 - 2547

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2549

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศูนย์ เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM) ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่อนุเคราะห์เครื่อง EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (ISET) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องวัด ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Tester และ SPI Simulator)

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และความ ช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยเหลือ เก็บข้อมูลในงานวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้ากำลังศึกษาอยู่

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้องของข้าพเจ้า ที่ให้การ สนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สรวิศ มุ่งการนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XV
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
รายการศัพท์เทคนิค.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.1 ประวัติและความเป็นมา.....	7
2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.1.2 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก.....	11
2.1.3 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย.....	12
2.1.4 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
2.2.1 ในภาวะที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับแสง.....	17
2.2.2 ในภาวะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง.....	19
2.3 พิลแฟคเตอร์และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน.....	24
2.4 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนาน ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
2.4.2 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
2.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	27
2.4.4 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	29
2.5 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน.....	30
2.5.1 สนามไฟฟ้าด้านหลัง.....	30
2.5.2 พอร์สซิลิคอน.....	33
บทที่ 3 พอร์สซิลิคอน.....	34
3.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน.....	34
3.1.1 ประเภทของพอร์สซิลิคอน.....	35
3.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน.....	37
3.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน.....	39
3.3.1 วิธีสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรน ด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	39
3.3.2 วิธีสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรน ด้วยแสงเลเซอร์.....	40
3.3.3 วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากคลื่นความถี่สูง.....	40
3.3.4 วิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี.....	41
3.3.5 วิธีการกัดข้อมสี่.....	44
3.4 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน.....	46
3.5 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน.....	48
3.6 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอน.....	48
3.6.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์.....	48
3.6.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง.....	50
3.6.3 ชีวการแพทย์.....	51
3.6.4 เครื่องตรวจจับ.....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 กระบวนการสร้าง.....	53
4.1 การออกแบบลวดลายและการสร้างโฟโต้มาส์ก.....	53
4.1.1 ลวดลายทดสอบที่ใช้ในการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยวิธีการกัดข้อมสี.....	53
4.1.2 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์.....	55
4.2 กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี.....	56
4.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์.....	56
4.3.1 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง.....	56
4.3.2 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน จากการกัดข้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง.....	70
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	84
5.1 การศึกษาการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสีบนผิวซิลิคอน และทดสอบคุณสมบัติ.....	84
5.1.1 การสร้าง และทดสอบคุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน.....	85
5.1.2 ผลของสภาพพื้นผิวหน้า และระนาบผลึก ที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	88
5.1.3 ผลของแสง อุณหภูมิ คลื่นเสียงความถี่สูง ที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	91
5.1.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน.....	95
5.1.5 ผลของเอทานอลที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	98
5.1.6 ผลของชั้น โลหะอลูมิเนียมบนผิวซิลิคอน.....	101
5.2 การศึกษาการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยวิธีการกัดข้อมสี.....	105
5.2.1 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้น้ำยาไวแสง.....	106
5.2.2 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้น โลหะอลูมิเนียม เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน.....	107
5.3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสีเป็นชั้นลดการ สะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน.....	111

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.1 การประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกักข้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบปรกติ.....	112
5.3.2 การประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกักข้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง.....	115
5.3.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกักข้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยใช้กระจกดันแบบชั้นเดียว.....	119
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	123
เอกสารอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก.....	131
ภาคผนวก ก. การสะท้อนแสงของผิวหน้าซิลิคอน และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนาแน่นระหว่าง 300Å - 6500Å.....	132
ภาคผนวก ข. น้ำยาไวแสงและน้ำยาขึ้นลวดลาย.....	136
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	140
ประวัติผู้เขียน.....	155

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง.....	29
5.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน.....	114
5.2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อน แสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน.....	117
5.3 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง กับเซลล์แสงอาทิตย์มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอน.....	118
5.4 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง แบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน.....	118
5.5 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกักข้อมสี เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยใช้กระจกชั้นแบบชั้นเดียว.....	122
6.1 การเปรียบเทียบชั้นลดการสะท้อนแสงแบบผิวซิลิคอนขัดมัน ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน.....	124

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองในบทที่ 5.....	6
2.1 การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.2 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.3 ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM 1.5.....	11
2.4 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ.....	12
2.5 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว.....	13
2.6 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกหลายรูป.....	14
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มอะมอร์ฟิออสซิลิคอน.....	16
2.8 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น.....	17
2.9 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น.....	18
2.10 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง.....	20
2.11 คุณสมบัติของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะได้รับแสง และยังไม่ได้รับแสง.....	23
2.12 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.13 สัญลักษณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.14 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง.....	31
2.15 ความหนาแน่นของพาหะจากการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลัง.....	31
2.16 ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง.....	32
2.17 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนาแน่นค่าต่างๆ ในฐานรองชนิดพี (ก) ไม่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (ข) มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง.....	33
3.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง.....	35
3.2 ประเภทของพอร์ซิลิคอนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (ก) ลักษณะหลุมตัน (ข) ลักษณะถุง (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (ง) ลักษณะโพรงปิด (จ) ลักษณะทะเล.....	36
3.3 ประเภทของพอร์ซิลิคอนแบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงขวดหมึก (ค) ทรงกรวย (ง) ทรงลูกบาศก์ (ค) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ประเภทของพอร์สซิติคอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน.....	37
3.5 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิติคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	38
3.5 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิติคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	39
3.6 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิติคอนในระดับนาโนเมตรจากคลื่นความถี่สูง.....	40
3.7 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี.....	41
3.8 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิติคอน.....	42
3.9 การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่.....	44
3.10 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิติคอนเพื่ออธิบายคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์.....	47
3.11 คุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนที่ความพรุนต่างกัน.....	51
3.12 เครื่องตรวจวัดปริมาณกลูโคสโดยใช้พอร์สซิติคอน.....	52
4.1 ลวดลายทดสอบขนาด 1.6×1.8 ตารางเซนติเมตร เพื่อใช้ในการตรวจสอบลวดลายโลหะ (ก) ลายเส้นที่มีขนาดต่างกัน (ข) ลวดลายตัวอักษร (ง) ลวดลายทดสอบต้นแบบ.....	54
4.2 ลวดลายของเซลล์แสงอาทิตย์จากการออกแบบ (ก) ขนาดลวดลายต่างๆ (ข) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบต่างๆ บนฐานรองเดียวกัน.....	55
4.3 การสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่.....	56
4.4 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (ก) ภาพถ่ายผิวหน้า (ข) ภาพตัดขวาง.....	83
5.1 ช่วงเวลาต่างๆ ในกระบวนการเกิดชั้นพอร์สซิติคอนจากวิธีการกัดข้อมสี่.....	85
5.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้จากการกัดข้อมสี่โดยใช้ (ก) กล้องไมโครสโคป (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	86
5.3 ภาพถ่ายการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิติคอน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	87
5.4 (ก) การวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยใช้เครื่องวัดความหนาของชั้นฟิล์มบาง (ข) แผนภาพการวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสง.....	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นซิลิคอน พอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....	88
5.6 การทดลองผลของสภาพพื้นผิวหน้าที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	89
5.7 การเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนที่บริเวณพื้นผิวขรุขระ.....	89
5.8 การขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC).....	90
5.9 (ก) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส (ข) ภาพถ่ายผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจากการขัดด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยกล้องไมโครสโคปรก่อนการกัดข้อมสี่ (ค) ภายหลังกการกัดข้อมสี่.....	90
5.10 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ก) บนผิวซิลิคอนระนาบ (111) (ข) บนผิวซิลิคอนระนาบ(100).....	91
5.11 การทดลองผลของแสงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน (ก) แสงห้องปรกติ (ข) แสงจากหลอดทั้งสเดน (ค) แสงจากหลอดฮาโลเจน (ง) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส.....	92
5.12 การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน (ก) อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	93
5.13 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมสี่ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	93
5.14 การทดลองผลของคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน (ก) ไม่มีการทำ sonication (ข) มีการทำ sonication ขณะการกัดข้อมสี่ (ค) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส.....	94
5.15 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคปร (ก) ไม่มีการทำ sonication (ข) มีการทำ sonication ขณะสร้างชั้นพอร์ส.....	95
5.16 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ไม่มีการทำ sonication (ข) มีการทำ sonication ขณะสร้างชั้นพอร์ส.....	95
5.17 การทดลองผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน.....	96
5.18 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ได้จากการกัดข้อมสี่ที่เวลาต่างๆ กัน.....	97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19	คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ จากการกัดข้อมสี่ ที่เวลาต่างๆ กัน.....98
5.20	การทดลองผลของเอทานอลที่มีต่อการเกิดพอร์ซเซิลิกอน (ก) ไม่ผสมเอทานอลในสารละลาย (ข) ผสมเอทานอลในสารละลาย (ค) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส.....99
5.21	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่ถ่ายจากกล้อง ไมโครสโคป (ก) ไม่ผสมเอทานอล (ข) ผสมเอทานอล 0.125 cc (ค) ผสมเอทานอล 0.25 cc (ง) ผสมเอทานอล 0.5 cc.....100
5.22	ภาพถ่ายการเรืองแสงของชั้นพอร์ซเซิลิกอน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต (ก) ไม่ผสมเอทานอล (ข) ผสมเอทานอล 0.125 cc (ค) ผสมเอทานอล 0.25 cc (ง) ผสมเอทานอล 0.5 cc.....100
5.22 (ต่อ)	ภาพถ่ายการเรืองแสงของชั้นพอร์ซเซิลิกอน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต (ก) ไม่ผสมเอทานอล (ข) ผสมเอทานอล 0.125 cc (ค) ผสมเอทานอล 0.25 cc (ง) ผสมเอทานอล 0.5 cc.....101
5.23	(ก) การทดลองผลของชั้น โลหะอลูมิเนียมบนผิวซิลิกอน (ข) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส.....102
5.24	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซเซิลิกอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (ก) และ (ค) ไม่มีชั้น AI เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน (ข) และ (ง) มีชั้น AI เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน.....102
5.24 (ต่อ)	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซเซิลิกอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (ก) และ (ค) ไม่มีชั้น AI เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน (ข) และ (ง) มีชั้น AI เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน.....103
5.25	คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซเซิลิกอนบนแผ่นผลึกซิลิกอนปรกติ และแผ่นซิลิกอนที่มีชั้น โลหะอลูมิเนียมเคลือบที่ผิวด้านบน ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ.....104
5.26	การวิเคราะห์หาโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่อง EDX (ก) ลอกอลูมิเนียมออกด้วยสารละลาย กรดฟอสฟอริก (ข) ใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัดทะลุชั้นอลูมิเนียม.....104
5.27	การเลือกสร้างชั้นพอร์ซเซิลิกอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้น้ำยาไวแสง.....106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้น้ำยาไวแสง.....107
5.29	การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิติคอน โดยวิธีที่ 1.....108
5.30	การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิติคอน โดยวิธีที่ 2.....109
5.31	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้น โลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิติคอน โดยวิธีที่ 1.....110
5.32	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้น โลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิติคอน โดยวิธีที่ 2.....110
5.33	เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิติคอน ไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิติคอน (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง.....112
5.34	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบ ซิติคอน ไดออกไซด์และแบบพอร์สซิติคอน.....113
5.35	คุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบ ซิติคอน ไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิติคอน.....113
5.36	เซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิติคอน ไดออกไซด์และแบบพอร์สซิติคอน (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง.....115
5.37	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิติคอน ไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิติคอน.....116
5.38	คุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิติคอน ไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิติคอน.....116
5.39	กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว.....120
5.40	เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว.....120
5.41	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดยใช้ กระจกต้นแบบชั้นเดียว.....121
5.42	คุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก กระจกต้นแบบชั้นเดียว.....121

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 การเปรียบเทียบกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง.....	126
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการสปินกับความหนาของ ฟิล์มน้ำยาไวแสง เบอร์ S1818.....	139

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
AC	Alternating Current	ไฟฟ้ากระแสสลับ
Al	Aluminium	อลูมิเนียม
AM	Air Mass	ความเข้มของการแผ่รังสี
ARC	Anti-Reflection Coating	ชั้นลดการสะท้อนแสง
Al/Si alloy	Aluminium/Silicon alloy	ซิลิคอนอัลลอยด์
BSF	Back Surface Field	สนามไฟฟ้าด้านหลัง
CVD	Chemical Vapor Deposition	การออกซิเดชันแบบซีวีดี
DC	Direct Current	ไฟฟ้ากระแสตรง
DI	De-Ionization water	น้ำปลอดไอออน
GaAs	Gallium Arsenide	แกเลียมอาเซไนซ์
P.R.	photoresist	น้ำยาไวแสง
PS	Porous Silicon	พอร์สซิลิคอน
Si	Silicon	ซิลิคอน

รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น
D_c	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน
D_h	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
E_c	คือ	ระดับพลังงานขอบล่างของแถบความนำ
E_{FN}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
E_{FP}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี
E_g	คือ	ช่องว่างแถบพลังงาน
E_i	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
E_{photon}	คือ	พลังงานของโฟตอน
E_v	คือ	ระดับพลังงานขอบบนของแถบวาเลนซ์
FF	คือ	ฟิลแฟคเตอร์
\mathcal{G}_{op}	คือ	อัตราการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง
h	คือ	ค่าคงตัวของพลังค์
I_{01}	คือ	กระแสอิ่มตัว
I_{02}	คือ	กระแสอิ่มตัวในบริเวณปลอดพาหะ
I_{light}	คือ	กระแสแสง
I_m	คือ	กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
I_p	คือ	กระแสแสง
I_{sc}	คือ	กระแสลัดวงจร
J	คือ	ความหนาแน่นกระแส
k	คือ	ค่าคงตัวของ โบสค์มันน์
L_c	คือ	ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน
L_h	คือ	ระยะการแพร่โฮล
n	คือ	ดัชนีหักเห
n	คือ	แฟคเตอร์ความไม่เป็นอุดมคติ
N_A	คือ	ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ
N_D	คือ	ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้
n_i	คือ	ความหนาแน่นอินทรินซิก
P_{in}	คือ	กำลังงานไฟฟ้าอินพุท

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

P_m	คือ	กำลังงานสูงสุด
q	คือ	ประจุอิเล็กทรอนิกส์
R_s	คือ	ความต้านทานอนุกรม
R_{sh}	คือ	ความต้านทานขนาน
T	คือ	อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์
V	คือ	ความต่างศักย์ที่ขั้ว
V_A	คือ	แรงดันไบอัส
V_m	คือ	แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
V_{oc}	คือ	แรงดันเปิดวงจร
ν	คือ	ค่าความถี่ของคลื่นแสง
η	คือ	ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน
τ	คือ	ค่าอายุของพาหะ
ρ	คือ	สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

กระจกต้นแบบ
กระบวนการโซคราลสกี
กระบวนการรวมตัวใหม่
กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้-
กระจกต้นแบบชั้นเดียว
กระแสรั่วไหล
กระแสแสง
กระแสอิ่มตัว
การกัดทางไฟฟ้า-เคมี
การกัดข้อมสี่
การดักจับแสง
การแพร่สารเจือด้วยความร้อน
การรวมตัวใหม่ที่ผิว
การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่-
จากการกัดข้อมสี่
การออกซิเดชันด้วยความร้อน
การออกซิเดชันแบบซีวีดี
การออกแบบ
กำแพงศักย์
ขี้ผึ้ง
ความสม่ำเสมอ
ควอนตัมไซค์เอฟเฟก
ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟก
คลื่นเสียงความถี่สูง
ชั้นลดการสะท้อนแสง
ซิลิคอนไดออกไซด์
ซินเตอร์ริง

ภาษาอังกฤษ

mask
Czochralski process
recombination process
one mask process
leakage current
photocurrent
saturation current
electrochemical etching
stain etching
light trapping
thermal diffusion
surface recombination
selective formation of stain etched porous Si
thermal oxidation
chemical vapor deposition
layout design
barrier
beeswax
uniformity
quantum size effect
quantum confinement effect
sonication
anti-reflection layer
silicon dioxide
sintering

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ซีลีเนียม	selenium
เซลล์แสงอาทิตย์	solar cell
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ไซกระจกตันแบบเดี่ยว	one mask solar cells
โซลาร์เซลล์	solar cell
เซลล์โฟโวลตาอิก	photovoltaic cell
ดัชนีหักเห	refractive index
ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	p-n junction diode
ไตรโคลโรเอทรีน	trichloroethylene
น้ำยาไวแสง	photoresist
บัสบาร์	busbar
ปรากฏการณ์โฟโวลตาอิก	photovoltaic effect
ผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน	single crystalline silicon, monocrystalline
ผลึกหลายรูปของซิลิคอน	poly or multi crystalline silicon
ผลึกระดับนาโนเมตรของซิลิคอน	nanocrystalline silicon
แผงเซลล์	module
พาราฟฟิน	paraffin
พอร์ซซิลิคอน	porous silicon
ฟิงก์เกอร์	finger
โฟตอน	photon
โฟโธมาสก์	photomask
โฟโธลูมิเนสเซนซ์	photoluminescence
โฟโธลิโธกราฟี	photolithography
ระดับพลังงานกระตุ้น	excited state
ระดับพลังงานที่ผิว	surface state
เวลาการเพาะบ่มสารละลาย	incubation time
เวลาการเหนี่ยวนำ	induction time
สารเจือปน	impurity
สารกึ่งตัวนำ	semiconductor

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

สารกึ่งตัวนำชนิดพี

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สถานะพื้น

สเปกตรัม

แสงมองเห็น

หลอดทังสเตน

หลอดฮาโลเจน

อะซิโตน

อะมอร์ฟัสซิลิคอน

อิเล็กตรอน

อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์

เอทานอล

แอนโนไดซ์เซชัน

โฮล

ภาษาอังกฤษ

p-type semiconductor

n-type semiconductor

ground state

spectrum

visible light

tungsten lamp

halogen lamp

acetone

amorphous silicon

electron

electroluminescence

ethanol

anodisation

hole

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทนเป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังเร่งศึกษา วิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นขั้นพื้นฐานทั้งทางตรงและทางอ้อมของการเกิดและดำรงอยู่ของชีวิตทั้งหลาย รูปแบบของพลังงานที่ใช้กันมากส่วนใหญ่อยู่ในรูปพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานหลักๆในปัจจุบัน คือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆเหล่านี้ นอกจากจะมีปริมาณจำกัดแล้ว ยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย ส่วนพลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนกั้นน้ำนั้น ได้พัฒนาไปถึงจุดอิ่มตัวแล้วสำหรับเกือบทุกประเทศ โดยปัจจุบัน โลกใช้พลังงานจากฟอสซิล 95% (น้ำมัน 42% ถ่านหิน 28% ก๊าซธรรมชาติ 25%) พลังงานทดแทนประเภทพลังน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ ลม คลื่น ชีวมวล 3% และพลังงานนิวเคลียร์ 2% ในขณะที่พลังงานสำรองของโลกประเภทน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินยังคงเหลือให้ใช้ไปได้อีกเพียง 40, 62 และ 218 ปี ตามลำดับ

ในประเทศไทยพลังงานไฟฟ้าได้มาจากการผลิตจากกระบวนการต่างๆ คือ ไฟฟ้าพลังความร้อน (จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง) 80% ไฟฟ้าพลังน้ำ 10% ส่วนพลังงานสำรองในประเทศ คือ ก๊าซธรรมชาติเราจะมีต่อไปอีกเพียง 20 ปี ถ่านหิน 60 ปี จะเห็นว่า เราต้องอาศัยการผลิตไฟฟ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นหลัก ซึ่งต้องอาศัยน้ำมันดิบจากต่างประเทศประมาณ 95% ของปริมาณการใช้ทั้งหมด และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในระยะกลาง และระยะยาว แนวทางแก้ปัญหา คือ การพยายามหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน การพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศตนเอง เช่น ความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสร้างไฟฟ้ารวมทั้งความร้อน ในกลุ่มพลังงานใหม่เหล่านี้ พลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างเด่นกว่าชนิดอื่น เพราะมีอยู่ทั่วไป มีไม่จำกัด สะอาด ไร้สิ่งแวดล้อม ดังนั้น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่หลายประเทศกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จทั้งในด้านเทคโนโลยี และเศรษฐกิจ เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษด้วย ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ หรือ โซลาร์เซลล์ (solar cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ และคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคตอันใกล้นี้ เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ คือ

1. พลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีอยู่ทุกที่ทั่วไป มีไม่จำกัด เป็นพลังงานที่สะอาด และติดต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากจะช่วยแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษอีกด้วย อีกทั้งประเทศไทยยังเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง
2. เซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันทีหรือจะมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อกักเก็บหรือแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับก็ได้
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น มากกว่า 95 % ทำจากซิลิคอนซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบน โลกรองจากออกซิเจน นั่นคือ เป็นวัตถุดิบที่มีมากมายเหลือใช้
4. ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน ทำให้ในแง่ของเทคโนโลยีและกระบวนการสร้างมีภาคอุตสาหกรรมรองรับ
5. มีกระบวนการสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

จากความสำคัญดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน ให้มีประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยมุ่งศึกษาวัสดุใหม่ที่จะนำมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (anti-reflection layer) บนเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะแนวทางหนึ่งในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เพิ่มมากขึ้น คือ การหาชั้นลดการสะท้อนแสงที่สามารถเก็บพลังงานโฟตอนที่มาจากแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด หรือให้เกิดการสะท้อนพลังงานออกไปน้อยที่สุดนั่นเอง ซึ่งถ้าสามารถเก็บพลังงานที่เข้ามาได้มากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ นอกจากจะได้กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงซึ่งราคาถูกและประสิทธิภาพสูงแล้ว ยังสามารถนำเทคนิคการเลือกสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่จากการกัดข้อมสึ (selective formation of stain etched porous silicon) มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังการศึกษา วิจัย และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ

1. การลดต้นทุนในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

2. การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษา งานวิจัยนี้จึงอาศัยพอร์สซิลิคอน (Porous Silicon : PS) จากการกัดข้อมสี (stain etching) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงและการสะท้อนแสงที่ต่ำ มาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น อีกทั้งในกระบวนการสร้างได้อาศัยเทคนิคการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่ ซึ่งวิธีนี้นอกจากจะสอดคล้องกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แล้วยังช่วยลดต้นทุนในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย [1-3]

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

โดยปรกติวัสดุทุกชนิดย่อมมีการสะท้อนแสง ไม่มีวัสดุใดในทางปฏิบัติที่จะสามารถดูดกลืนแสงได้ 100 % โดยไม่มีการสะท้อน ผิวหน้าของซิลิคอนก็เช่นเดียวกัน มีการสะท้อนแสงที่สูงโดยเฉลี่ยมากกว่า 60 % ซึ่งถ้านำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน อันเนื่องมาจากการสะท้อนของผิวหน้า เซลล์ที่ได้จึงมีประสิทธิภาพต่ำ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงขึ้นเพื่อช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากการสะท้อนลง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป ส่วนใหญ่จะมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (silicon dioxide : SiO_2) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างขึ้นได้หลายวิธี อาทิ กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) กระบวนการออกซิเดชันแบบซีวีดี (Chemical Vapor Deposition : CVD) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีล้วนแล้วแต่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลาในการสร้างด้วยกันทั้งสิ้น ทำให้กระบวนการสร้างมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้มีรายงานการประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนซึ่งได้จากวิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี (electrochemical etching) มาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ [4] ซึ่งสามารถเพิ่มกระแสลัดวงจรของเซลล์ได้ และทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม วิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมีนั้นมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองมากกว่าวิธีการกัดข้อมสี [5] ดังนั้น เพื่อเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งของการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสง งานวิจัยนี้จึงเสนอการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี ซึ่งมีการสะท้อนแสงต่ำบนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดอีกด้วย

สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ

1. ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมสี เมื่อนำมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้
2. เนื่องจากชั้นอนุลิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดพอร์สซิลิคอนได้ ดังนั้น ลวดลาย

อลูมิเนียมจะช่วยในการกำหนดการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสึได้เป็นอย่างดี

3. น้ำยาไวแสง (photoresist) สามารถใช้เป็นชั้นป้องกันการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสึได้

4. ความหนาของน้ำยาไวแสง มีผลต่อการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสึ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

พอร์สซิลิคอน (PS) เป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก นอกจากจะมีคุณสมบัติการเรืองแสง (photoluminescence) และการเปล่งแสง (electroluminescence) ที่อุณหภูมิห้องแล้ว ยังมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดีและมีการสะท้อนแสงที่ต่ำอีกด้วย ชั้นพอร์สซิลิคอนจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน [6-9] ชั้นพอร์สซิลิคอนสร้างได้หลายวิธีแต่ที่ง่ายและประหยัดที่สุดคือ วิธีการกัดข้อมสึ ซึ่งเนื้อซิลิคอนบางส่วนจะถูกละลายออกไปด้วยปฏิกิริยาเคมีของสารละลายที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และกรดไนตริก (HNO_3) ทำให้มีรูพรุนขนาดเล็กๆเกิดขึ้นมากมายกลายเป็นชั้นพอร์สซิลิคอนและมองเห็นเป็นสีต่างๆปรากฏขึ้น [10] อีกทั้งเมื่อไม่นานมานี้พบว่า ชั้นของอลูมิเนียมสามารถเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดพอร์สซิลิคอนได้ [11] ดังนั้นอัตราการเกิดชั้นพอร์สโดยวิธีการกัดข้อมสึผ่านซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่บนผิวหน้าจะสูงกว่าปกติ ซึ่งจากวิธีการนี้เราสามารถช่วยลดความหนาของอลูมิเนียมช่วยในการกำหนดการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสึได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถลดขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography process) ลง ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงตามไปด้วย

การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

1. การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยอาศัยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน ต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ $1,000^\circ\text{C}$ และระยะเวลาานซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างของเซลล์ หรือกระบวนการออกซิเดชันแบบซีวีดี ต้องใช้ก๊าซไซเรน (SiH_4) ซึ่งอันตราย และราคาแพงทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง ในขณะที่การใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง สามารถสร้างได้ง่ายด้วยระยะเวลารวดเร็ว ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งไม่ทำความเสียหายให้แก่รอยต่อของเซลล์ที่อยู่ด้านล่างแต่อย่างใด ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายลง

2. ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยลดการสะท้อนแสงเพียง

อย่างเดี่ยว ในขณะที่ชั้นพอร์สซิติคอนนอกจากจะช่วยลดการสะท้อนแสง (anti-reflection) แล้ว ยังมีคุณสมบัติในการดักจับแสง (light trapping) [6-9] อีกด้วย

3. กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิติคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะต้องผ่านกระบวนการโฟโวลติโรกราฟี่ประมาณ 3 ครั้ง ในขณะที่กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนจากการกักข้อมสีจะช่วยลดขั้นตอนกระบวนการโฟโวลติโรกราฟี่ลง 1 ครั้ง โดยอาศัยวิธีการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะที่

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้อยู่ที่ การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนจากวิธีการกักข้อมสี เช่น การสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิติคอน ช่วงเวลาที่ใช้ในการกักข้อมสี การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกักข้อมสี เป็นต้น เพื่อนำไปประยุกต์สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป ซึ่งคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิติคอนที่มีชั้นพอร์สซิติคอนจากการกักข้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงได้ถูกศึกษาและเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิติคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาการสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกักข้อมสีบนผิวซิติคอน และทดสอบคุณสมบัติ
2. ศึกษาผลของสภาพพื้นผิวหน้า และระนาบผลึก ที่มีต่อการเกิดพอร์สซิติคอน
3. ศึกษาผลของแสง อุณหภูมิ คลื่นเสียงความถี่สูง ที่มีต่อการเกิดพอร์สซิติคอน
4. ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิติคอน
5. ศึกษาผลของเอทานอล (ethanol) ที่มีต่อการเกิดพอร์สซิติคอน
6. ศึกษาการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้น้ำยาไวแสง
7. ศึกษาการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้น โลหะออกซิเดียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิติคอน
8. ศึกษาการประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิติคอนจากการกักข้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิติคอน

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่างๆ ตามรายละเอียด ดังนี้

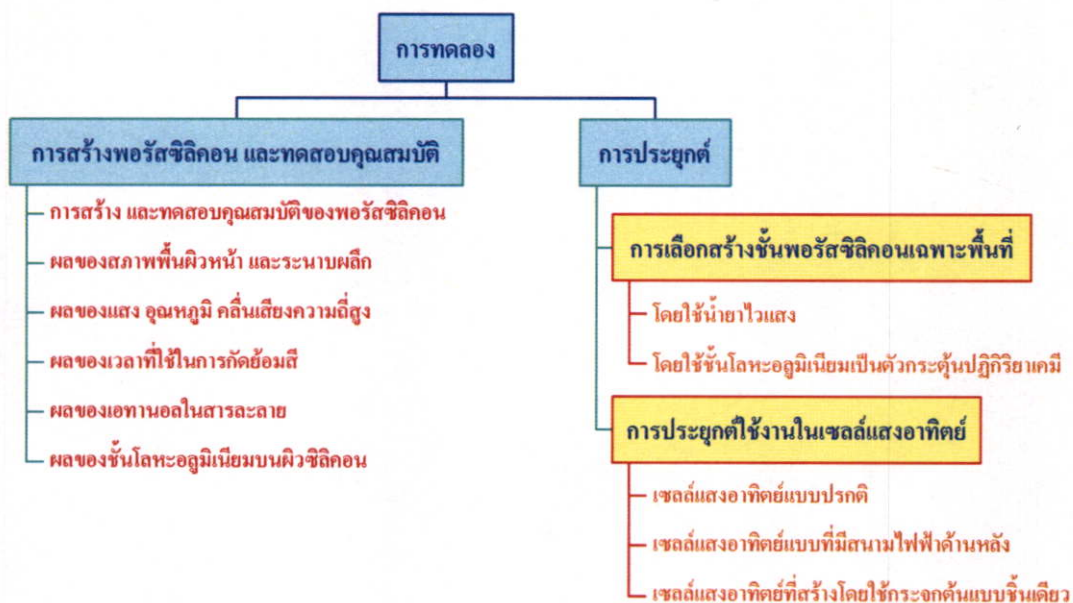
บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิดที่ใช้ ขั้นตอนการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน เช่น ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างและวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

บทที่ 3 พอร์สซิลิคอน กล่าวถึง โครงสร้าง ลักษณะแถบพลังงาน คุณสมบัติ การสร้างและประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอน

บทที่ 4 กระบวนการสร้าง กล่าวถึง การออกแบบลวดลายและกระบวนการสร้างโฟโตมาสก์ กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่ และกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึง การศึกษาการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่และทดสอบคุณสมบัติ การศึกษาการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสี่ และการศึกษาการประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสี่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองในบทที่ 5

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จาก บทที่ 5 และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์

บทที่ 2

เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หรือ เซลล์โฟโวลตาอิก (photovoltaic cell) คือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็นคล้ายกับโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction diode) หากแต่เซลล์แสงอาทิตย์จะมีขนาดใหญ่กว่าไดโอดมาก การเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1839 โดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Alexandre-Edmond Becquerel ที่สังเกตเห็นกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยๆที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุถูกแสง และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่าปรากฏการณ์โฟโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งเป็นภาษากรีก (Greek) โดย โฟโวล (photo) หมายถึง แสง และ โวลต์ (volt) มาจากชื่อของนักฟิสิกส์ชาวอิตาลีชื่อ โวลตา (Volta) ใช้แทนกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อนำค่าทั้งสองรวมกันจึงหมายถึง ไฟฟ้าที่เกิดจากแสง

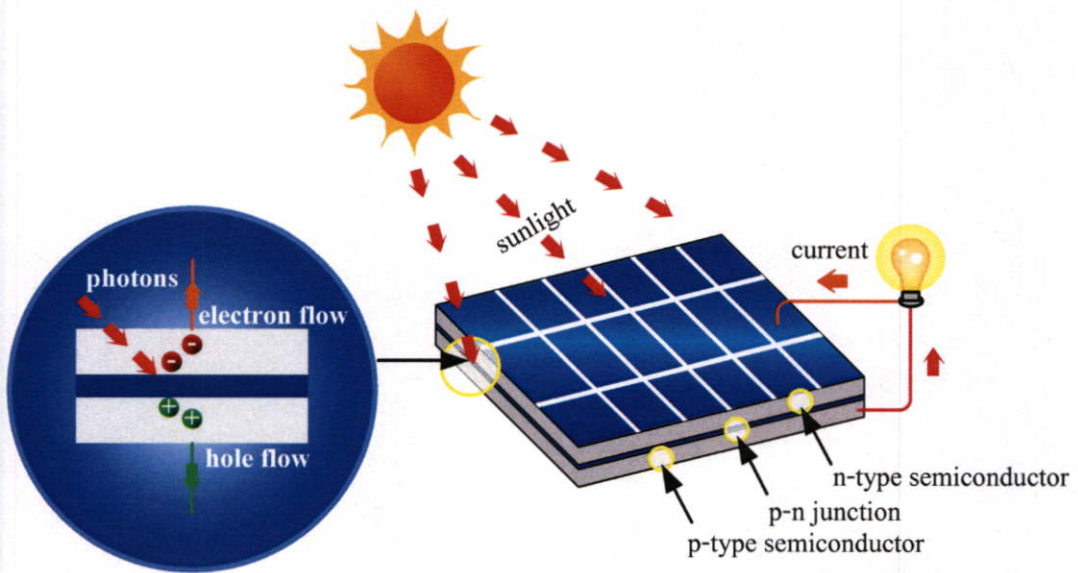
การสร้างรอยต่อพี-เอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้โดยวิธีการเดียวกันกับการสร้างไดโอด ซึ่งมักนิยมใช้วิธีการแพร่สารเจือปน (impurity) ชนิดเอ็นหรือชนิดพี เข้าไปในเนื้อของสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดตรงกันข้าม ในบทนี้จะได้กล่าวถึง ประวัติและความเป็นมา ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น และแนวทางการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 ประวัติและความเป็นมา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ซึ่งประยุกต์ใช้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงตกกระทบในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 บุคคลแรกที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน คือ Gerald Pearson นักวิจัยแห่งห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell Laboratories) ในปี ค.ศ.1954 ซึ่งเป็นช่วงหลังจากการค้นพบทรานซิสเตอร์โดย William Shockley นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการเดียวกันในปี ค.ศ.1949 ไม่นานนัก โดยในครั้งแรกนี้ เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น

เมื่อย้อนหลังกลับไปศึกษาถึงประวัติศาสตร์การค้นคว้าเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างแสง และ วัตถุในแง่ของไฟฟ้า จะทราบว่า ในปี ค.ศ. 1839 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Alexandre-Edmond Becquerel เป็นคนแรกที่ค้นพบว่า เมื่อแสงตกกระทบวัตถุจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยเอาขั้วโลหะสองขั้ว จุ่มในสารละลายอ็อกไซด์แล้วให้แสงกระทบได้เพียงขั้วเดียว ปรากฏว่า มีกระแสไหลในสายไฟที่ต่อระหว่างขั้วทั้งสอง แสดงให้เห็นถึงการเกิดกระแสไฟฟ้าในวัตถุเมื่อมีแสงตก

กระทบ และเขายังได้พบด้วยว่า เมื่อเปลี่ยนสี (ความยาวคลื่น, พลังงาน) ของแสง ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนตามด้วย



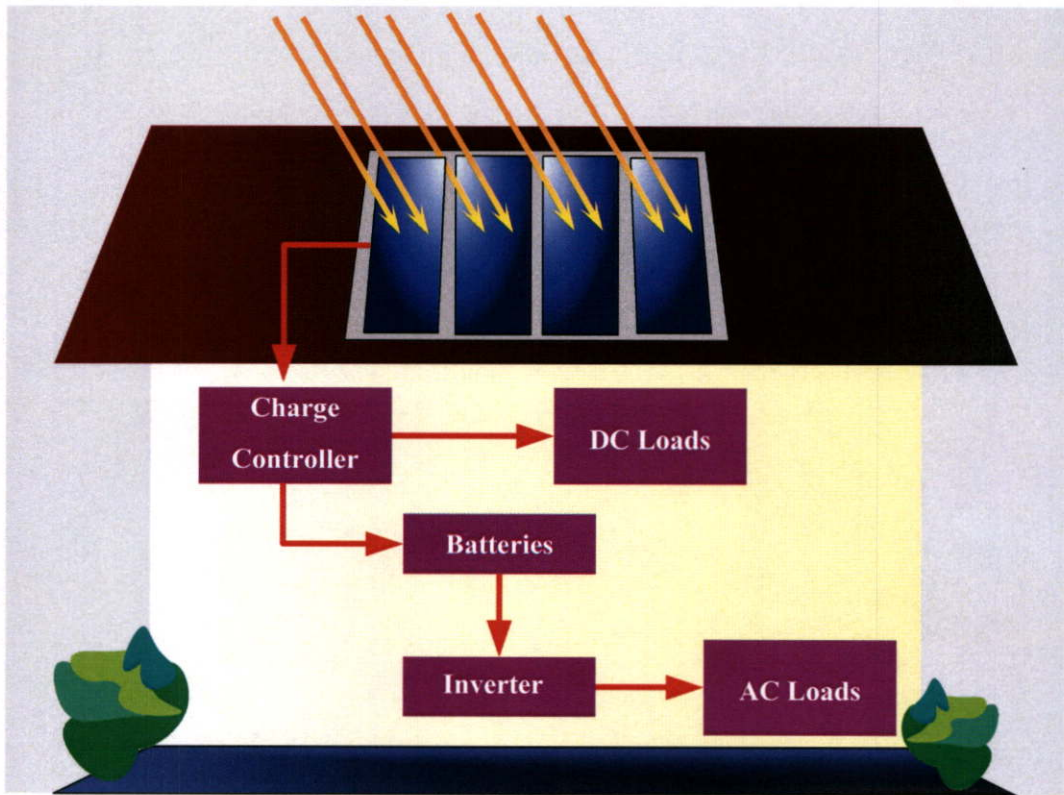
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์

ในปี ค.ศ. 1873 Willoughby Smith พบว่า เมื่อส่องแสงใส่ซีลีเนียม (selenium) ความต้านทานของมันจะเปลี่ยนไป แสดงให้เห็นว่า เกิดไฟฟ้าในของแข็งเมื่อถูกแสงได้ (photo conductivity) ในปี ค.ศ. 1876 Adams และ Day พบว่า เมื่อส่องแสงถูกซีลีเนียมจะเกิดความต่างศักย์ขึ้น ซึ่งเป็นการค้นพบครั้งแรกของการเกิดศักย์ทางไฟฟ้าจากแสง ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานของซีลีเนียมนั้นต่ำแค่ประมาณ 1% เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม สามารถนำเอาความรู้นี้ไปใช้ประโยชน์ในการวัดความเข้มของแสงในเครื่องถ่ายภาพเอกสารได้ เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1883 Fritts อธิบายทฤษฎีการทำงานของโฟโตโวลตาอิกเซลล์แบบซีลีเนียมได้เป็นครั้งแรก ต่อมาในปี ค.ศ. 1904 Hallwachs ได้ค้นพบคุณสมบัติทางแสงของสาร copper cupous oxide ปี ค.ศ. 1941 เริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีของการสร้างรอยต่อพี-เอ็น ด้วยวิธีการปลูกรอยต่อ (grown junction) และในปี ค.ศ. 1954 มีการค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สาร (thermal diffusion) ซึ่งเป็นปีเดียวกันกับที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา

2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงเซลล์จะจ่ายไฟฟ้าออกมา ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันที หรืออาจมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current : AC) แล้วจึงนำไปใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆทำงานได้ต่อไป ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจากธาตุซิลิคอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบน โลกรองจากออกซิเจน ทำให้ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ แต่การนำมาทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องมีเทคนิคและใช้พลังงาน นั่นคือ ต้องมีค่าใช้จ่าย ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบที่ไ้มากโดยแทบจะเรียกได้ว่าเป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบันก็ได้ ทรานซิสเตอร์ และ ไอซี (IC) แทบทั้งหมดสร้างโดยใช้ซิลิคอน นั่นก็คือ การจะนำซิลิคอนมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ในแง่ของวัตถุดิบ และอุตสาหกรรมมีรองรับอยู่แล้ว

อย่างไรก็ดี จากผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า วัสดุสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีค่าของช่องว่างพลังงาน (energy gap) ประมาณ 1.5 eV ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.43 eV และจากการทดลองสร้าง พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก GaAs ด้วยโครงสร้างที่เหมาะสมจะสามารถให้ประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานได้สูงถึง 30% แต่ทว่า GaAs เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาแพงซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน

พลังงานจากการแผ่รังสีต่อพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของดวงอาทิตย์ นอกบรรยากาศของโลก จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความเข้มของการแผ่รังสีนี้ เราเรียกว่า solar constant หรือที่นิยมเรียกกันว่า แบบ air mass zero เขียนย่อๆได้เป็น AM0 ซึ่งในงานโฟโตนิกส์ การแผ่รังสีแบบ AM0 กำหนดว่ามีค่าเท่ากับ 135.3 mW/cm^2

สำหรับบนพื้นผิวโลก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะสูญเสียไปในชั้นบรรยากาศของโลก เนื่องจากชั้นของก๊าซต่างๆ เช่น O_2 , O_3 , ไอน้ำ, CO_2 เป็นต้น ดังนั้นความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะลดลง และองค์การนาซ่า (NASA) แห่งสหรัฐอเมริกาได้เป็นผู้กำหนดมาตรฐานของพลังงานที่ได้รับในระดับน้ำทะเล เมื่อแสงอาทิตย์มีทิศทางตั้งฉากกับผิวโลกมีค่า 100 mW/cm^2 และกำหนดว่าเป็นการแผ่รังสีแบบ air mass 1 หรือเขียนย่อๆได้เป็น AM1 ค่าของพลังงานนี้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถ หรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า

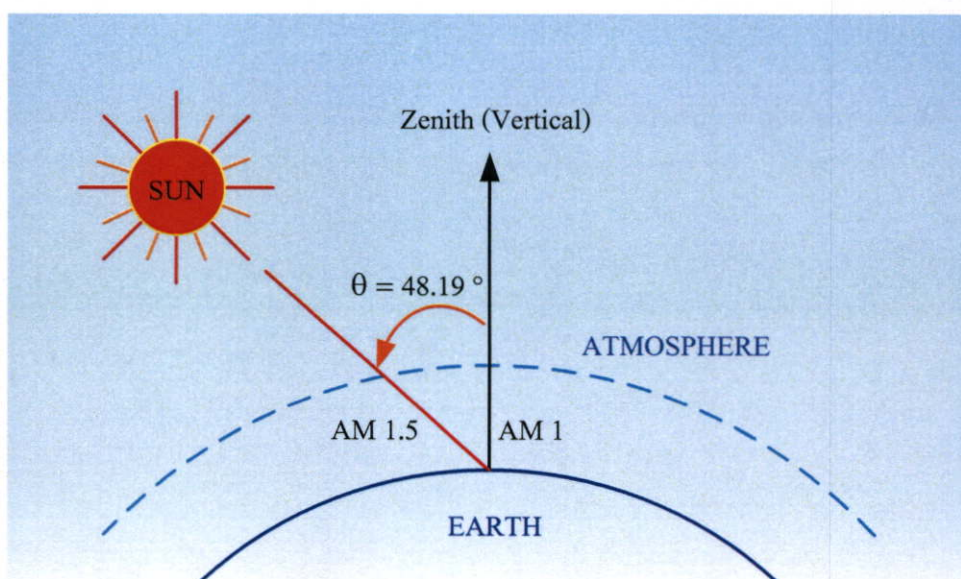
ลักษณะการแผ่รังสีแบบต่างๆ อาจพิจารณาได้ดังนี้คือ

$$\text{air mass} = \frac{1}{\cos \theta} = \sec \theta \quad (2.1)$$

เมื่อ θ คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ทำกับทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวโลกบริเวณที่ทำการวัด (solar zenith angle)

ดังนั้น ถ้าดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับโลกเป็นมุม 60° ลักษณะของการแผ่รังสีนี้จะเรียกว่าเป็นแบบ AM2

ยิ่งค่าของ air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่น ๆ ไม่เปลี่ยนแปลง พลังงานแสงอาทิตย์ที่มายังผิวโลกก็จะยิ่งมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่งคือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM1.5 ที่มุม $\theta = 48.19^\circ$ [12] ดังรูปที่ 2.3 มีค่าพลังงานรวมทั้งหมด 83.2 mW/cm^2



รูปที่ 2.3 ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM 1.5

2.1.2 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

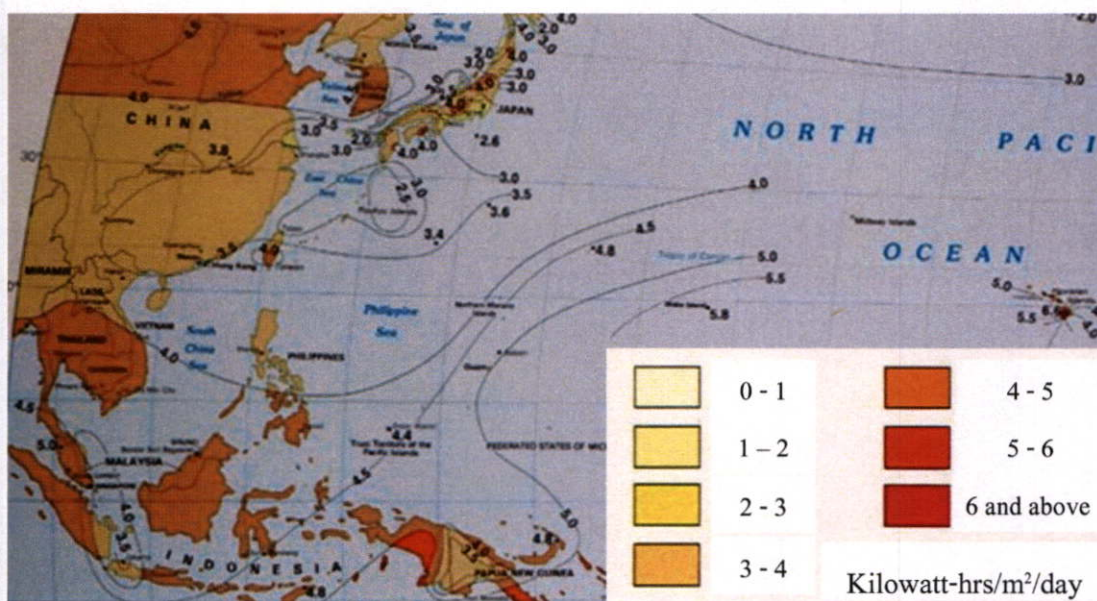
ลำแสง หรือรังสีของแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นโลก จะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน คือ

1. ลำแสงโดยตรง (direct sunlight)
2. ลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย (indirect or diffused sunlight)

ลำแสงอาทิตย์โดยตรงเป็นส่วนหนึ่งของแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจายเป็นส่วนหนึ่งของแสงอาทิตย์ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลก ประมาณกันว่า แม้แต่ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10 - 20% ของรังสีทั้งหมดที่ได้รับ ยิ่งในวันที่มีเมฆหมอก ปกคลุมมากๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายนี้จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

สเปกตรัม (spectrum) ของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจายจะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะ และทิศทางของการสะท้อน และแพร่กระจาย นอกจากนี้แล้ว ลักษณะการแพร่รังสีแบบ air mass ค่าสูงๆ จะมีผลทำให้ปริมาณของแสงที่ได้รับในส่วนแพร่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

2.1.3 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย



รูปที่ 2.4 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ

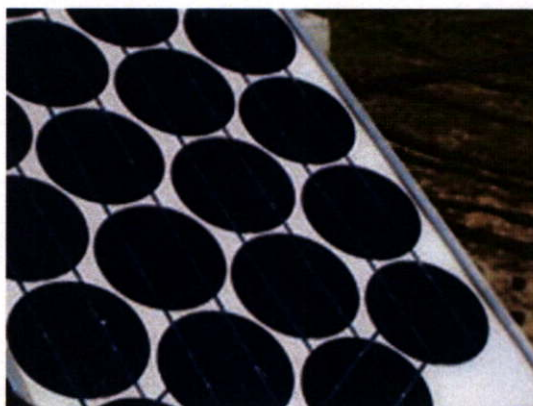
ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำ ขึ้นกับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากจะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานสูง จากรูปที่ 2.4 แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ พบว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ปานกลางแต่เป็นบริเวณกว้างโดยเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 1,300-1,600 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งถือได้ว่า ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

2.1.4 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานในปัจจุบันมากกว่า 95% ทำมาจากซิลิคอน อันประกอบไปด้วยผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน (single crystalline Si) ผลึกหลายรูปของซิลิคอน (multi crystalline Si) และอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous Si) ในที่นี้มากกว่า 90% อยู่ในรูปของผลึกซิลิคอนเพียงอย่างเดียว [13] ดังนั้น เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากผลึกของซิลิคอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. แบบผลึกรูปเดี่ยว (single crystal or monocrystalline wafers) เป็นการนำเอาแผ่นผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.999%) ซึ่งได้จากกระบวนการโจคราลสกี (Czochralski process) มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เซลล์ประเภทนี้มีราคาค่อนข้างแพง แต่ก็มีประสิทธิภาพของเซลล์ที่สูง ในทางการค้าเซลล์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 16-17% และ

สูงถึง 20% ในบางบริษัท (บริษัท Sunpower) เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้จะมีราคาสูงอีกทั้ง เมื่อนำไปประกอบเป็นแผงเซลล์ หรือ โมดูล (modules) จะทำให้สูญเสียพื้นที่บริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของเซลล์ และในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ยังไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นผลึกที่มีคุณภาพสูงเช่นนี้ จึงได้มีการนำเอาผลึกแบบหลายรูป (polycrystal) มาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์แทน เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก รูปเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว [14]

2. แบบผลึกหลายรูป (poly or multi crystalline) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน ผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอนคือ แท่งซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของผลึกเล็กๆ (ขนาดระดับไมโครเมตรถึงระดับมิลลิเมตร) ของซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว โดยจะเทซิลิคอนที่หลอมเหลวลงในเบ้าหลอม (crucible) แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ ซึ่งก็จะได้แท่งของโพลีซิลิคอนที่มีรูปร่างตามเบ้าหลอมที่ใช้ หลังจากนั้น การนำไปทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะคล้ายกับกรณีของแบบผลึกรูปเดี่ยว คือ นำไปตัดเป็นเวเฟอร์ (wafer) หนาขนาด 300 - 400 ไมโครเมตร แล้วนำไปสร้างรอยต่อพี-เอ็นต่อไป เซลล์ชนิดนี้มีต้นทุนที่ถูกกว่าแบบผลึกรูปเดี่ยวแต่ก็มีประสิทธิภาพน้อยกว่าด้วย (ประมาณ 15 - 16%) อย่างไรก็ตาม ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แบบผลึกโพลี คือ รูปร่างของแผ่นเซลล์ซึ่งสามารถทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมได้ ทำให้มีช่องว่างบนแผงเซลล์น้อยกว่าแบบแผ่นกลม ทำให้สามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบแผ่นกลมถึง 25% เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกหลายรูปแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกหลายรูป [14]

3. แบบริบบอน (ribbon silicon) เทคโนโลยีของการสร้างแผ่นผลึกทั้งแบบผลึกรูปเดี่ยวที่เป็นแผ่นกลม และแบบผลึกหลายรูปที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมนั้น ยังคงเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองวัสดุอยู่ เนื่องจากต้องมีการตัดแผ่นผลึกทำให้ต้องเสียเนื้อของซิลิคอนไปส่วนหนึ่ง จึงได้มีการปรับปรุงเทคนิคต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแผ่นซิลิคอนให้เป็นแผ่นบาง และยาว ที่เรียกว่า ริบบอน (ribbon) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบผลึกหลายรูป ทำให้ไม่ต้องเสียเนื้อซิลิคอนในการตัดให้เป็นแผ่นบางๆ เทคนิคในการสร้างแผ่นผลึกแบบริบบอนมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีอีเอฟจี และเดนดริติก (dendritic)

อีเอฟจี (EFG) ย่อมาจาก Edge-defined film-fed growth เป็นวิธีการสร้างแผ่นผลึกที่คล้ายกับวิธีของโซคราลสกี ที่ต้องใช้เมล็ดผลึกไปหล่อ และดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องเล็กๆ บางๆ ที่ทำด้วยแกรไฟต์ เพื่อให้ซิลิคอนฟอร์มตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมยาวตามที่ต้องการ แผ่นผลึกที่ผลิตด้วยวิธีนี้ จะมีความหนาราว 150-300 ไมครอน มีความกว้างตั้งแต่ 5-10 เซนติเมตร ข้อเสียของริบบอนแบบอีเอฟจีนี้ คือ มีโครงสร้างของผลึกที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับวิธีของโซคราลสกีและการที่ซิลิคอนต้องถูกหลอมเหลวอยู่ภายในเบ้าหลอมแล้ว ยังต้องมีการดึงผ่านช่องแคบๆ ของแกรไฟท์อีก วิธีการเช่นนี้ทำให้แผ่นผลึกที่ได้มีความไม่สมบูรณ์สูง เนื่องจากสิ่งแปลกปลอม และสารเจือปนต่างๆ จากเบ้าหลอมและแผ่นแกรไฟต์สามารถเข้าไปในเนื้อซิลิคอนได้ง่าย วิธีการที่สามารถจะลดความไม่บริสุทธิ์ของแผ่นผลึกแบบริบบอนได้ก็คือ วิธีการแบบเดนดริติก

การดึงแผ่นผลึกริบบอนแบบเดนดริติก จะใช้เมล็ดผลึกไปหล่อ และดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องที่มีอยู่เฉพาะตรงขอบทั้ง 2 ด้าน เพื่อให้ซิลิคอนฟอร์มตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมในแบบริบบอน แผ่นผลึกที่สร้างด้วยวิธีนี้ จะมีความบริสุทธิ์สูงใกล้เคียงกับวิธีของโซคราลสกี เมื่อนำไปสร้างเซลล์ จะได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอีเอฟจี

ต้นทุนของเซลล์แบบบริบอบอนนั้นถือว่าถูกกว่าแบบชนิดอื่นเพราะมีการสูญเสียซิลิคอนน้อยกว่าทุกวิธี แต่เซลล์ที่ได้ก็มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าแบบอื่นคือประมาณ 13.5 - 15% และมีราคาจำหน่ายที่สูงเนื่องจากการผลิตที่ต่ำ

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกของซิลิคอนทั้ง 3 แบบดังกล่าว ถือเป็นอุตสาหกรรมที่รองรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์จากแผ่นเวเฟอร์ (wafer-based manufacturing) เนื่องจากการนำแผ่นซิลิคอน หรือเวเฟอร์ (wafer) ที่มีความหนาระหว่าง 180-240 ไมโครเมตร มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ และนำเซลล์แต่ละเซลล์มาต่อเชื่อมกันให้เป็น โมดูล (module) ก่อนนำไปใช้ ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์จากฟิล์มบาง (thin film) ถือเป็นอุตสาหกรรมที่รองรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์จากโมดูล หรือ แผงเซลล์ (module-based manufacturing) เพราะแผงเซลล์ที่เป็นฐานรองนั้นจะถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางต่างๆ ตามที่ต้องการ และทำการตัดออกเป็นแต่ละเซลล์ด้วยแสงเลเซอร์ (laser scribe) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มบางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. แบบฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon films) เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส มีวิธีการผลิตที่ต่างจากแบบผลึกโดยสิ้นเชิง ซึ่งเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางไม่ใช่เวเฟอร์ โดยจะสร้างแผ่นฟิล์มบางของซิลิคอนบนแผ่นฐานรองด้วยเทคนิคที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งจะมีระบบนำก๊าซที่มีซิลิคอนติดอยู่ เช่น ก๊าซไซเรน (SiH_4) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศ และตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีการกระตุ้น เช่น โดยใช้พลาสมา เพื่อส่งพลังงานให้ซิลิคอนแยกตัวออกจากก๊าซ เข้าไปจับตัวกันบนแผ่นฐานรอง โดยส่วนใหญ่จะเป็น แก้ว สแตนเลส หรือพลาสติก ซึ่งได้ทำให้การเคลือบชั้นตัวนำโปร่งแสงไว้ก่อน โดยมีอุณหภูมิบนแผ่นฐานรองประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ซิลิคอนจะทับถมสะสมบนแผ่น เกิดเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในขั้นตอนนี้ หากเราใส่ก๊าซที่มีโบรอน (boron) เช่น B_2H_6 เข้าไปด้วย เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดพี (p-type Si) และถ้าหากใส่ก๊าซที่มีฟอสฟอรัส (phosphorus) เช่น PH_3 เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type Si) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ด้วยวิธีนี้เราสามารถควบคุมการไหลของก๊าซ เพื่อสร้างให้เกิดชั้นฟิล์มบางต่างๆ ตามที่ต้องการได้

จุดเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส ก็คือ มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำมาก และอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีช่องว่างพลังงาน (energy bandgap) 1.7 eV มากกว่าแบบผลึกซิลิคอน (1.1 eV) ทำให้อัตราการดูดแสงของอะมอร์ฟัสซิลิคอนสูงกว่าแบบผลึกมาก จึงสามารถลดความหนาของฟิล์มเป็นระดับ 1 ไมโครเมตรได้ ในขณะที่แบบผลึกต้องทำอย่างน้อยหนาประมาณ 300 ไมโครเมตรซึ่งทั้งนี้ก็เพื่อความแข็งแรงทางกลของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย นั่นก็คือ อะมอร์ฟัสซิลิคอนสามารถประหยัดปริมาณของซิลิคอนได้มากกว่า และยังมีขมนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างเป็น ไดโอด (diode) 2 ตัวเรียงต่อกันเป็นชั้น (tandem cell) ให้เซลล์ด้านบนเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนเพื่อดูดกลืนแสงย่านที่ตามองเห็น (visible light) และปล่อยให้แสงย่านอินฟราเรด (infrared) ถูกดูดกลืน

โดยเซลล์ด้านล่างซึ่งเป็นผลึกระดับนาโนเมตรของซิลิคอน (nanocrystalline Si) ที่มีช่องว่างพลังงานเท่ากับผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน [14]

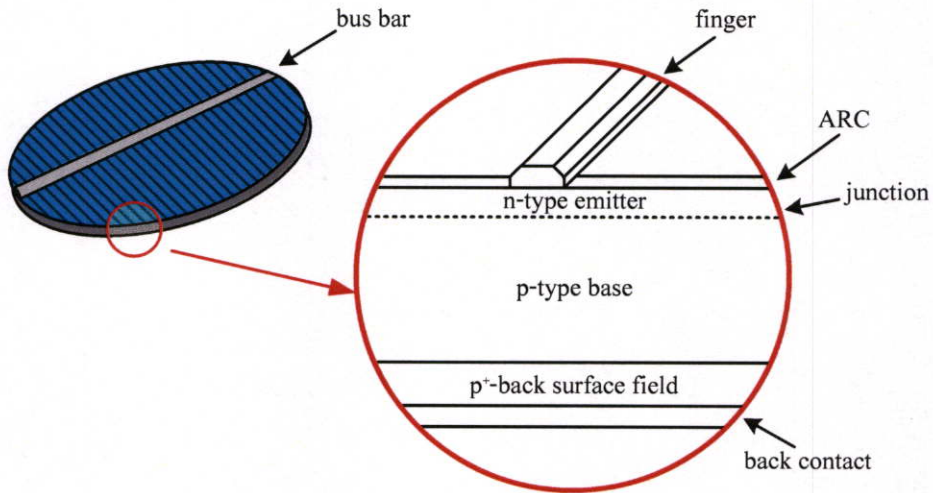
จุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส คือ ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ต่ำประมาณ 8% และเซลล์แบบนี้ยังมีอายุการใช้งานที่สั้น เมื่อนำไปใช้กับแสงแดด ปัญหาการเสื่อมลงของเซลล์แบบอะมอร์ฟัสนี้ยังเป็นปัญหาหลักที่ยังต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแก้ไขกันต่อไปอีก

2. แบบซีไอเอส (CIS) เซลล์แสงอาทิตย์แบบซีไอเอสถูกสร้างขึ้นด้วยฟิล์มบางของธาตุที่ประกอบไปด้วย ทองแดง (copper) อินเดียม (indium) และ ซีลีเนียม (selenium) มีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ $CuInSe_2$ หรือ $Cu(In_x Ga_{1-x})(Se_x S_{1-x})_2$ ฟิล์มบางของเซลล์แบบซีไอเอสจะมีความหนาน้อยกว่าเซลล์แบบโพลีอยู่ประมาณ 10 เท่า ประสิทธิภาพของเซลล์แบบซีไอเอสนี้สูงถึง 11% แต่เมื่อเทียบกับต้นทุนก็ยังมีราคาที่สูงอยู่มาก

เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Dye-sensitized (Dye-sensitized solar cells) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อีกแบบหนึ่งที่ใช้ปฏิกิริยาทางแสง-ไฟฟ้า-เคมี (photoelectrochemical cells) ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดย Michael Graetzel และคณะ เซลล์ชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Graetzer cells แนวความคิดของเซลล์แบบไดซ์-เซ็นซิไทซ์นั้นมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (process of photosynthesis) และกำลังอยู่ในขั้นตอนของการศึกษา วิจัย พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะประสิทธิภาพของเซลล์ชนิดนี้สามารถขึ้นไปได้ถึง 33% ในทางทฤษฎี และมีการคาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2010 จะเริ่มมีเซลล์ชนิดนี้ออกวางจำหน่ายในทางการพาณิชย์

2.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้น คุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ คือ



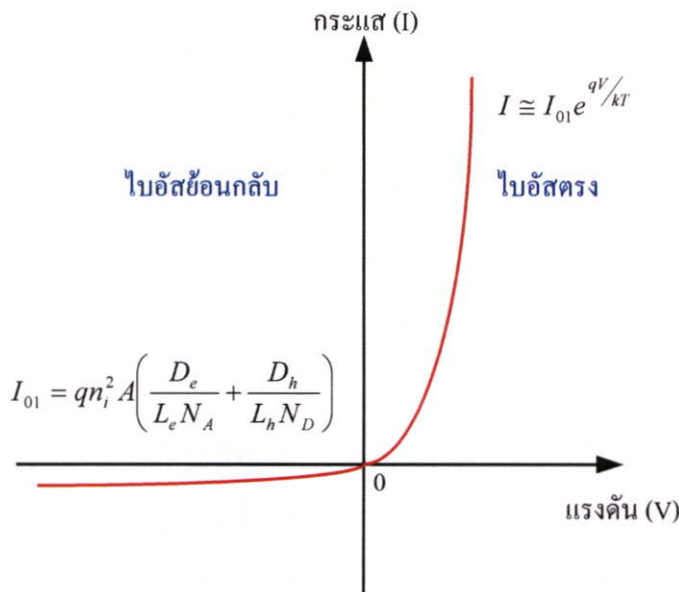
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น [15]

2.2.1 ในภาวะที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งกราฟนี้เราได้มาจากสมการไดโอด หรือ เรียกว่า Shockley diode equation หรือ สมการเรกติไฟร์ ดังสมการที่ 2.2

$$I = I_{01} \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ	I_{01}	คือ กระแสมีดิมิตัว
	V_A	คือ แรงดันไบอัสตรงภายนอก
	k	คือ ค่าคงตัวของโบสตันน์มีค่า = 8.62×10^{-5} eV/K
	T	คือ อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K) = 273 + อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูโลมบ์



รูปที่ 2.9 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

ลักษณะกราฟในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ (rectify) ของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งกระแสมีคือน้ำมืด (dark saturation current) I_{01} คือกระแสรั่ว (leakage current) ที่ไหลออกจากไดโอดขณะไม่ได้รับแสงภายใต้การไบอัสย้อนกลับ ดังสมการ

$$I_{01} = qn_i^2 A \left(\frac{D_e}{L_e N_A} + \frac{D_h}{L_h N_D} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น
	D_h	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
	D_e	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน
	N_A	คือ	ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ (cm^{-3})
	N_D	คือ	ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})
	n_i	คือ	ความหนาแน่นของประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำ (cm^{-3})

กระแสมีคือน้ำมืด (I_{01}) นี้เป็นกระแสจากสนามไฟฟ้า (drift current) เพราะแรงดันไบอัสย้อนกลับจะไปช่วยเพิ่มกำแพงศักย์ (barrier) ทำให้กระแสจากการแพร่ (diffusion current) ไม่สามารถข้ามมาได้ ในทางกลับกัน ภายใต้การไบอัสตรง แรงดันไบอัสจะช่วยลดกำแพงศักย์ลงทำให้พาหะแพร่ข้ามมาได้ และเกิดเป็นกระแสขึ้นจำนวนมาก ดังสมการ

$$I \cong I_{01} e^{\frac{qV}{kT}} \quad (2.4)$$

ซึ่งกระแสรวมของไดโอดทางอุดมคติเขียนได้ดังสมการ

$$I = I_{01} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

แต่ไดโอดในทางปฏิบัติจะมีพฤติกรรมแตกต่างจากไดโอดในทางอุดมคติ เนื่องจากมีผลของการรวมตัว (recombination) ในบริเวณปลอดพาหะ ค่าความต้านทานอนุกรม (series resistance : R_s) และค่าความต้านทานขนาน (shunts resistance : R_{sh}) ซึ่งสามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการที่ 2.6 [16] โดยเทอมที่ 1 เป็นผลจากกระแสมีดอิมิต์ว เทอมที่ 2 เป็นผลจากการรวมตัวในบริเวณปลอดพาหะ และเทอมที่ 3 เป็นผลมาจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขนาน

$$I = I_{01} \left(e^{\frac{q(V-IR_s)/kT}{} - 1} \right) + I_{02} \left(e^{\frac{q(V-IR_s)/nkT}{} - 1} \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

เมื่อ	I_{02}	คือ กระแสที่รวมตัวในบริเวณปลอดพาหะ
	n	คือ แฟกเตอร์ความไม่เป็นอุดมคติ (non-ideality factor) มีค่าระหว่าง 1 และ 2 (ในทางอุดมคติจะมีค่าเท่ากับ 1)
	R_s	คือ ความต้านทานอนุกรม
	R_{sh}	คือ ความต้านทานขนาน
	V	คือ ความต่างศักย์ที่ขั้ว (terminal voltage)
	k	คือ ค่าคงตัวของโบสตันน์มีค่า = 8.62×10^{-5} eV/K

2.2.2 ในภาวะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง (Illumination)

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง เราพิจารณากันว่า ในลำแสงประกอบไปด้วยกลุ่มของโฟตอน (photon) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 2.7

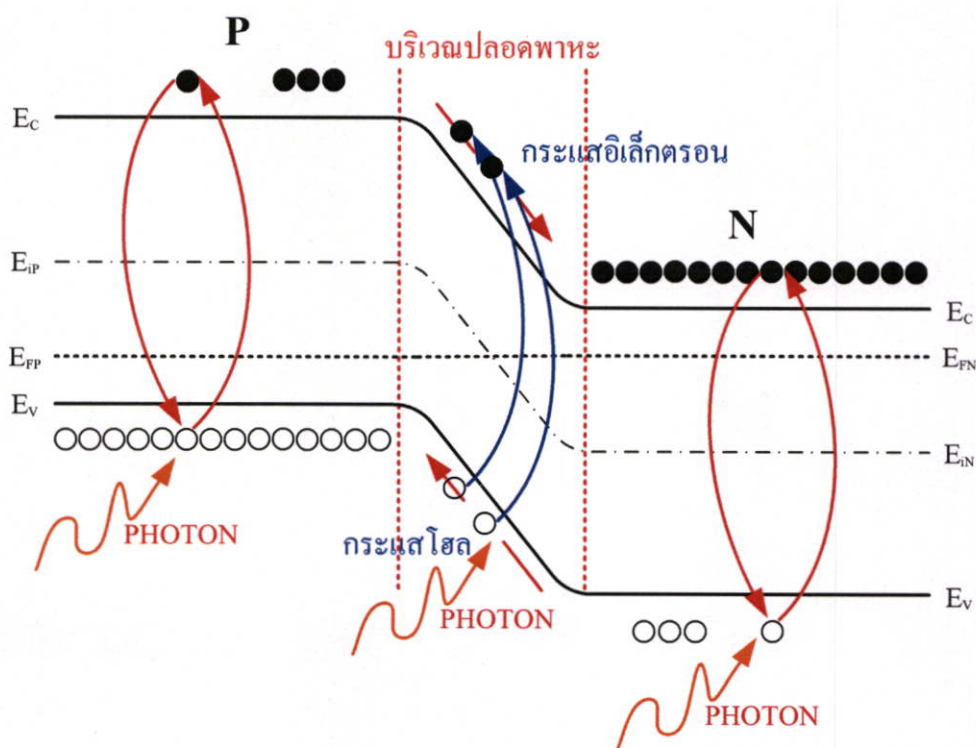
$$E_{\text{photon}} = h\nu \quad (2.7)$$

เมื่อ E_{photon} คือ พลังงานของโฟตอน

- h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.624×10^{-34} joule-sec
 v คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบรรยากาศรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์ให้สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในแถบความนำ (conduction band) ได้ และทิ้งให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ (valance band) ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่ยังไม่ได้รับไบอัสตรง ส่วนประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณที่ไม่มีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าก็จะเกิดการรวมตัว (recombination) ภายในเนื้อสาร ซึ่งคู่พาหะดังกล่าวจะไม่ก่อให้เกิดกระแส

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า กระแสแสง (photo current) หรือเขียนย่อๆ ว่า I_p หรือ I_{light} ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง กระแสแสง (I_{light}) ที่เกิดขึ้นจะมีทิศตรงข้ามกับกระแสมืด (I_{dark}) และกระแสที่ไหลออกมาจากขั้วของเซลล์สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I = I_{dark} - I_{light} \quad (2.8)$$

$$I = -I_{light} + \left[I_{01} \left(e^{q(V-IR_s)/kT} - 1 \right) + I_{02} \left(e^{q(V-IR_s)/nkT} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \right] \quad (2.9)$$

โดยที่ I_{light} คือ กระแสเนื่องจากแสง (photo current) แสดงได้ดังสมการ

$$I_{light} = qAg_{op}(L_h + L_e) \quad (2.10)$$

เมื่อ q คือ ประจุของอิเล็กตรอน

A คือ พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแสง

g_{op} คือ อัตราการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง (optical generation rate)

L_e, L_h คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสงจะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสง ไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจร ในภาวะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า I_{sc} ค่าของกระแสลัดวงจรหาได้จากสมการ 2.9 และประมาณค่าได้ดังสมการ

$$I = -I_{sc} + I_0 \left(e^{qV/nkT} - 1 \right) \quad (2.11)$$

ซึ่งขณะลัดวงจร $V_A = 0$ ดังนั้นสมการที่ 2.11 จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$I = -I_{sc} \quad (2.12)$$

โดยประมาณให้ ค่า $I_{light} = I_{sc}$

ในขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจรออก (open circuit) และที่รอยต่อได้รับแสง จะพบว่า กระแสที่ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรถูกเปิด แรงดันที่ปรากฏคร่อมรอยต่อพี-เอ็นขณะนี้ถูก

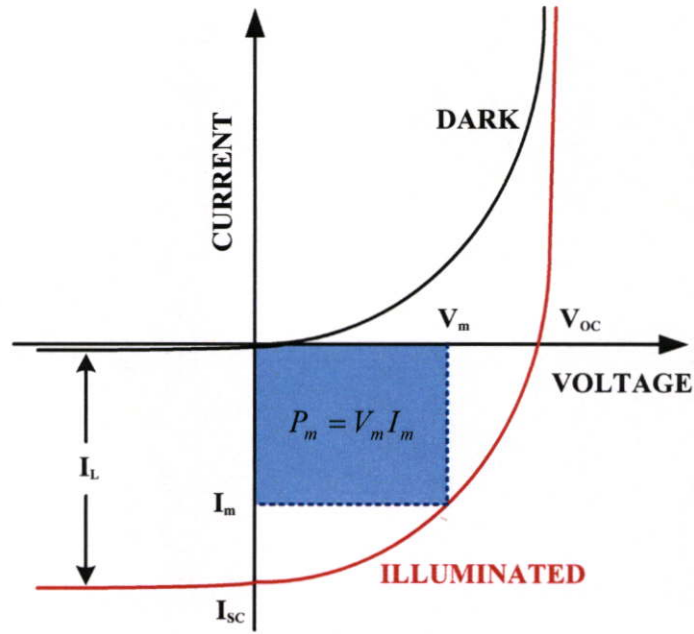
เรียกว่า แรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage) เขียนย่อๆว่า V_{oc} ค่าของ V_{oc} นี้หาได้จากสมการที่ 2.11 โดยแทนค่า $I = 0$ และ $V = V_{oc}$ ซึ่งจะได้สมการ

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (2.13)$$

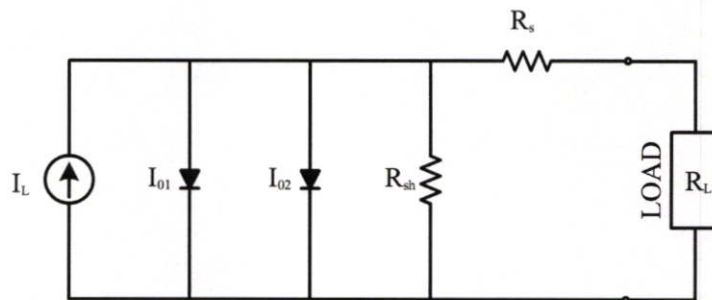
เพื่อให้แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) มีค่ามากที่สุด กระแสรั่ว (I_0) ก็จะต้องมีค่าน้อยที่สุด และเพื่อให้ความเข้มกระแสขณะลัดวงจร (J_{sc}) มีค่ามากที่สุด การรวมตัวภายในเซลล์จะต้องทำให้มีค่าน้อยที่สุด และการรวมตัวที่ผิว (surface recombination) ก็ต้องให้มีค่าน้อยที่สุดด้วยเช่นเดียวกัน [17]

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิดจะมีขนาดมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง, สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงเพื่อให้เกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล, ระยะเวลาพักของรอยต่อพี-เอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว, และค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไป กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน จะมีค่าประมาณ $35 - 40 \text{ mA/cm}^2$ และในกรณีของแกลเลียมอาเซนไนด์ค่า I_{sc} จะอยู่ราว 20 mA/cm^2 โดยวัดที่ค่า air mass zero (AM0)

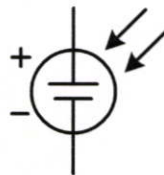
ส่วนค่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage : V_{oc}) จะมีค่าน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์ อย่างไรก็ตาม ค่า V_{oc} นี้จะมีขนาดจำกัด คือ สูงสุดไม่เกินค่าของความกว้างของช่องว่างพลังงาน และปกติค่าของ V_{oc} ในเซลล์แบบซิลิคอนมีค่าประมาณ 0.5-0.6 โวลต์ และในกรณีของสารแกลเลียมอาเซนไนด์ V_{oc} จะมีค่าราว 0.9 โวลต์ จากที่กล่าวมาข้างต้น ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน วงจรสมมูล และสัญลักษณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 รูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 คุณสมบัติของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ได้รับแสงและยังไม่ได้รับแสง [18]



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [16]



รูปที่ 2.13 สัญลักษณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ [16]

2.3 ฟิลแฟคเตอร์และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

อย่างไรก็ดีขณะที่นำเซลล์ไปใช้งาน เซลล์จะไม่อยู่ในภาวะลัดวงจร หรือเปิดวงจร ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์จะต้องถูกต่อเข้ากับโหลด (load) ซึ่งมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง ดังนั้นแรงดัน และกระแสที่เซลล์จ่ายออกมาให้แก่โหลดจะมีค่าน้อยกว่า ค่า V_{oc} และ I_{sc} โหลดซึ่งนำมาต่อ เมื่อมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมามีค่าสูงสุด หรือที่เรียกว่า ค่ากำลังงานสูงสุด (maximum power) ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลดได้ เขียนย่อๆ ได้ว่า P_m ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนอักษรย่อแทนเป็น I_m และ V_m ตามลำดับ นั่นคือ

$$P_m = I_m V_m \quad (2.14)$$

และค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการ

$$R_{load} = \frac{V_m}{I_m} \quad (2.15)$$

ค่าของ P_m , V_m , และ I_m แสดงได้ดังกราฟคุณสมบัติของเซลล์ในรูปที่ 2.11

ค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor) เขียนอักษรย่อเป็น FF ค่าของฟิลแฟคเตอร์ ถูกนิยามไว้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานสูงสุดที่เซลล์จะจ่ายให้แก่โหลดได้จริงกับค่าของพลังงานสูงสุดในทางอุดมคติที่เซลล์จ่ายได้ นั่นคือ

$$FF = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.16)$$

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก เซลล์ที่ใช้งานโดยทั่วไปค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.6 - 0.8 นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนด้วยย่อเป็น η ประสิทธิภาพของเซลล์ ถูกนิยามไว้ว่าเป็น อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์ นั่นคือ

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.17)$$

เมื่อ P_{in} คือ พลังงานที่ตกกระทบผิวหน้าของเซลล์ในหนึ่งวินาที หรือก็คือกำลังงานไฟฟ้าอินพุต นั่นเอง (input power)

เมื่อพิจารณาจากรวมผลของเซลล์แสงอาทิตย์จากรูปที่ 2.12 พบว่า ยิ่งกระแสอิ่มตัวของไดโอดมีค่าสูงขึ้น ยิ่งค่าความต้านทานอนุกรมในวงจรมีค่าสูงขึ้น และความต้านทานขนานในวงจรมีค่ายิ่งต่ำลง ย่อมส่งผลถึงค่ากำลังงานของเซลล์ที่จ่ายได้ต่ำลง หรือประสิทธิภาพที่ลดลงของเซลล์ด้วย เพราะค่าความต้านทานอนุกรมที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานจากผลของ I^2R ค่าความต้านทานขนานที่ลดต่ำลง และ หรือการเพิ่มขึ้นของกระแสอิ่มตัว (I_{02}) จะส่งผลถึงค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) และแรงดันที่ลดต่ำลง การที่เซลล์มีความเร็วในการรวมตัวที่ผิว (surface recombination velocity) ต่ำและมีค่าเวลาชีวิตในเนื้อสาร (bulk lifetime) ที่สูง จะช่วยปรับปรุงค่า I_{01} และคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก

พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เซลล์ได้รับเกิดจากการดูดกลืนพลังงาน โฟตอนที่มีค่าสูงมากกว่า E_G ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่า E_G จะไม่มีผลทำให้เกิดกระแสแสง และในโฟตอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงกว่า E_G อาจไม่เกิดกระแส แต่จะกระจายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งหากเป็นกรณีนี้ ประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลง ดังนั้น ขนาดของ E_G จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ [19] และอาจสรุปได้ว่า

$$E_G \propto \frac{1}{I_m} \quad \text{และ} \quad E_G \propto V_m$$

แสดงว่า E_G ค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของ $I_m V_m$ มีค่าสูงสุด หรือประสิทธิภาพของเซลล์สูงสุด เราเรียก E_G ค่านี้นว่า E_G (optimum) หรือ Optimum Energy Gap

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น I_{sc} , V_{oc} , P_m , F.F และ η ซึ่งมีค่าสูงๆ ใดๆ ก็ดี พารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ก็ถูกจำกัดด้วยแฟคเตอร์อื่นๆ มากมาย ซึ่งบางแฟคเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟคเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

2.4 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.1 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะใช้งาน จะเห็นได้ว่า กระแสเนื่องจากแสง (photo current) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (current source : I_L) ซึ่งจะจ่ายกระแสออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นในทางอุดมคติ ค่าความต้านทานอนุกรม (series resistance : R_s) เกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความต้านทานของบริเวณรอยสัมผัสโอมิก (ohmic contact) ระหว่างโลหะกับส่วนพี และส่วนเอ็น และค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมด เขียนตัวย่อได้เป็น R_s ส่วนค่าความต้านทานขนาน (parallel resistance หรือ shunt resistance : R_{sh}) เป็นค่าความต้านทานสมมติที่ขนานกับรอยต่อพี-เอ็น ในรอยต่อพี-เอ็นที่สมบูรณ์ หรือในทางอุดมคติ ค่าของ R_{sh} จะมีค่าเป็นอนันต์ (∞) และค่าของ R_s จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดเสียบ (defect) เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ โดยเฉพาะรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ย่อมมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏอยู่ จึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่า R_{sh} จึงไม่สูงเป็นค่าอนันต์ และค่า R_s ก็มีค่าไม่เป็นศูนย์ ผลของค่า R_s และ R_{sh} จะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนแปลงไป เซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อย และความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันลดลง เป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์ลดน้อยลงลงไปมาก อย่างไรก็ตามแล้วจะพบว่า ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทำงาน ค่าความต้านทานขนาน R_{sh} จะมีค่าสูงพอที่จะไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม R_s จะมีผลและบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อคุณสมบัติของเซลล์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง, การสร้าง จึงต้องพิจารณาผลของค่า R_s อย่างรอบคอบ และพยายามให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

2.4.2 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงาน จำเป็นต้องมีแสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอที่จะเป็นอิสระ และทิ้งให้โฮลเกิดขึ้น ดังนั้น ถ้าหากแสงที่มากกระทบมีความเข้มสูงมาก หรือก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮลเป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสง มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสง ทำให้มีการใช้เลนส์รวมแสงเพื่อเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้น แล้วฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เซลล์จ่ายกระแสได้สูง (เนื่องจากกระแสแสงแปรกับความเข้มแสงโดยตรง) โดยที่ประสิทธิภาพของเซลล์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้น ข้อดีของระบบรวมแสง (concentrating system) ก็คือ การเพิ่มกระแส โดยไม่ต้องเพิ่มพื้นที่ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าปกติ

2.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริง ๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็จะมีผลต่อกระแส และแรงดันที่ได้จากเซลล์ด้วย เมื่อพิจารณาสมการของกระแส I ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L

$$I = I_{light} - I_{dark}$$

จะพบว่า กระแส I นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องมาจากแสง I_{light} และกระแส I_{dark} ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{dark} และ I_{light}

1. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{dark}

เมื่อพิจารณาค่าของ I_{dark} ในสมการที่ 2.2 ซึ่ง I_{dark} มีค่าดังนี้

$$I_{dark} = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า I_0 จะมีผลต่อกระแส I_{dark} มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_0 โดยพิจารณาจากสมการของ I_0 ดังนั้น

$$I_0 = Aq n_i^2 \left[\frac{1}{N_A} \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{N_D} \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.18)$$

จากสมการของ I_0 จะพบว่า n_i^2 ของซิลิคอนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

$$n_i^2 = KT^3 e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad (2.19)$$

เมื่อ	n_i^2	คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำยกกำลังสอง (cm^{-6})
	K	คือ ค่าคงที่ของวัสดุ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ (สำหรับซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 5.4×10^{31})
	T	คือ อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K) = $273 +$ อุณหภูมิในหน่วยของศาเซลเซียส

จากสมการจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างเอ็กโปเนนเชียล เป็นผลให้ I_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย จากผลอันนี้แสดงว่า I_{dark} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{light}

เมื่อพิจารณาค่าของกระแส I_{light} ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงในสมการที่ 2.10

$$I_{\text{light}} = qAg_{op}(L_e + L_h)$$

เนื่องจาก I_{light} แปรผันตาม g_{op} และ L จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ L และ g_{op} จากสมการ

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.20)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร (Diffusion coefficient หรือ Diffusion constant) สำหรับที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้น จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมน้อยมาก จากสมการของ L จึงเหลืออยู่แต่ค่าอายุของพาหะ, τ (Carrier lifetime) ที่ต้องพิจารณา ซึ่งก็พบว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้น จะมีผลต่ออายุของพาหะน้อยมากเช่นกัน

องค์ประกอบอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อ I_{light} ก็คือ ค่าอัตราการเกิดของกระแส, g_{op} โดยพบว่าค่า g_{op} จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากช่องว่างพลังงานของสารจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานโฟตอนจากแสงสามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะได้มากขึ้นกว่าเดิม แต่ผลอันนี้เมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานจริงๆ ที่อุณหภูมิต่ำๆ และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย (ในช่วง 20 - 70 °C) อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า g_{op} น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า I_{light} จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากกับอุณหภูมิ

3. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (V_{oc}) ตามสมการที่ 2.13

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{\text{light}}}{I_0} + 1\right) \quad (2.13)$$

จากสมการนี้ค่า $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} ก็คือ I_0 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้ V_{oc} มีค่าลดลง

2.4.4 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น เนื่องจากแสงที่ส่องมากระทบผิวหน้าเซลล์จะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเอาไว้เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และมีบางส่วนสะท้อนไปจากผิวหน้าของเซลล์ แสงส่วนที่สะท้อนออกไปจากผิวหน้านี้เองที่สูญเสียไปโดยไม่เกิดประโยชน์ เพื่อที่จะนำแสงส่วนนี้มาใช้ประโยชน์อีก จึงควรมีชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของเซลล์ ชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ยอมให้แสงผ่านเข้าไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้ เมื่อแสงสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเซลล์ ชั้นลดการสะท้อนแสงจะทำให้แสงบางส่วนสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์อีก ช่วยให้เซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จึงทำให้เซลล์สามารถผลิตพลังงาน ไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย ชั้นลดการสะท้อนแสงจะช่วยให้แสงสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้มากเพียงใด จะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหและความหนาของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

สาร	ดัชนีหักเห (n)
SiO ₂	1.5
Porous Si	1.25 - 3
SiO	1.9
SnO ₂	2.1
ZnS	2.3
TiO ₂	2.6

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 2 ชนิด จะมีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับและส่วนหนึ่งหักเหผ่านตัวกลาง สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ (Coefficient of reflection : ρ) หาได้ดังนี้

$$\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.21)$$

โดยที่ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 2 ชนิด

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_2 ถ้า $n_1 < n_2$ แสงส่วนใหญ่จะหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 และแสงส่วนน้อยจะสะท้อนออกไปในทางตรงกันข้าม ถ้า $n_1 > n_2$ แล้วแสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับออกไป

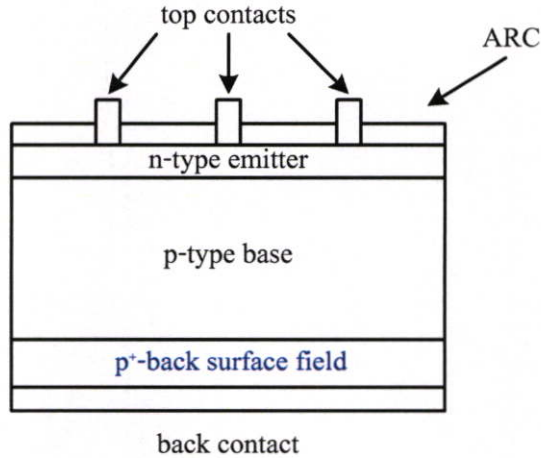
ถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 3 ชนิด ที่มีดัชนีหักเหแสงเป็น n_1 , n_2 และ n_3 ตามลำดับ ถ้า $n_1 < n_2 < n_3$ แสงส่วนใหญ่จะหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 2 และ 3 แสงส่วนที่สะท้อนออกจากผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 เมื่อมาถึงผิวหน้าของตัวกลางที่ 2 แสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับลงมายังผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 อีก และแสงส่วนน้อยหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 การสะท้อนกลับนี้เอง ที่ทำให้ผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น

2.5 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน

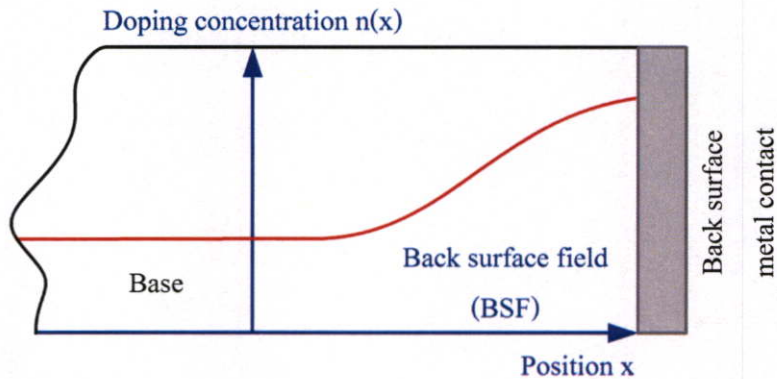
การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลัง (Back Surface Fields : BSF) เพื่อเพิ่มกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ และพัฒนาชั้นลดการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating : ARC) โดยใช้พอร์ซซิลิคอน (Porous Silicon: PS) จากวิธีการกัดข้อมีสี่ เพื่อให้พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เข้ามาถึงเซลล์สะท้อนออกไปน้อยที่สุด อีกทั้งการใช้พอร์ซซิลิคอนจากวิธีการกัดข้อมีสี่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงยังสามารถลดต้นทุนในกระบวนการสร้าง และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย ซึ่งรายละเอียดของชั้นพอร์ซซิลิคอนจะได้กล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3

2.5.1 สนามไฟฟ้าด้านหลัง

สนามไฟฟ้าด้านหลัง หรือที่นิยมเรียกกันว่า Back surface fields หรือ BSF เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ ปัจจุบันได้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการมาตรฐานในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงหลายแห่ง เนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้อย่างมากอีกด้วย การสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังสามารถทำได้โดยการแพร่อะตอมสารเจือให้มีความเข้มข้นสูง (heavily doped) ชนิดเดียวกับฐานรองในบริเวณด้านล่างของแผ่นฐานรอง (substrate) ติดกับขั้วสัมผัสด้านหลัง (back contact) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง และลักษณะความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่เกิดขึ้นจากการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลัง แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 ตามลำดับ

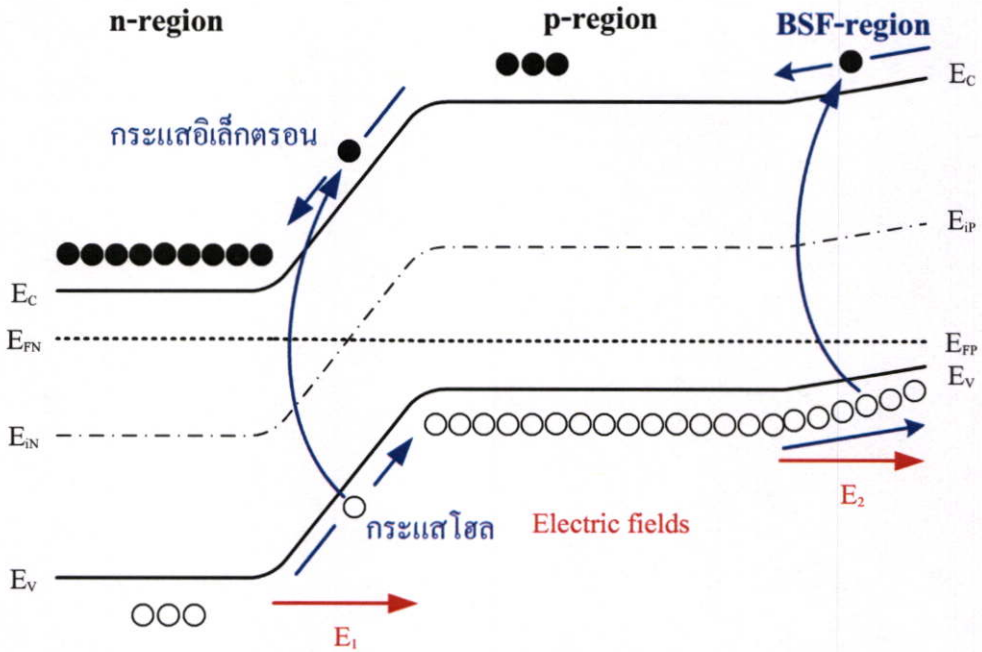


รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง [15]



รูปที่ 2.15 ความหนาแน่นของพาหะจากการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลัง [18]

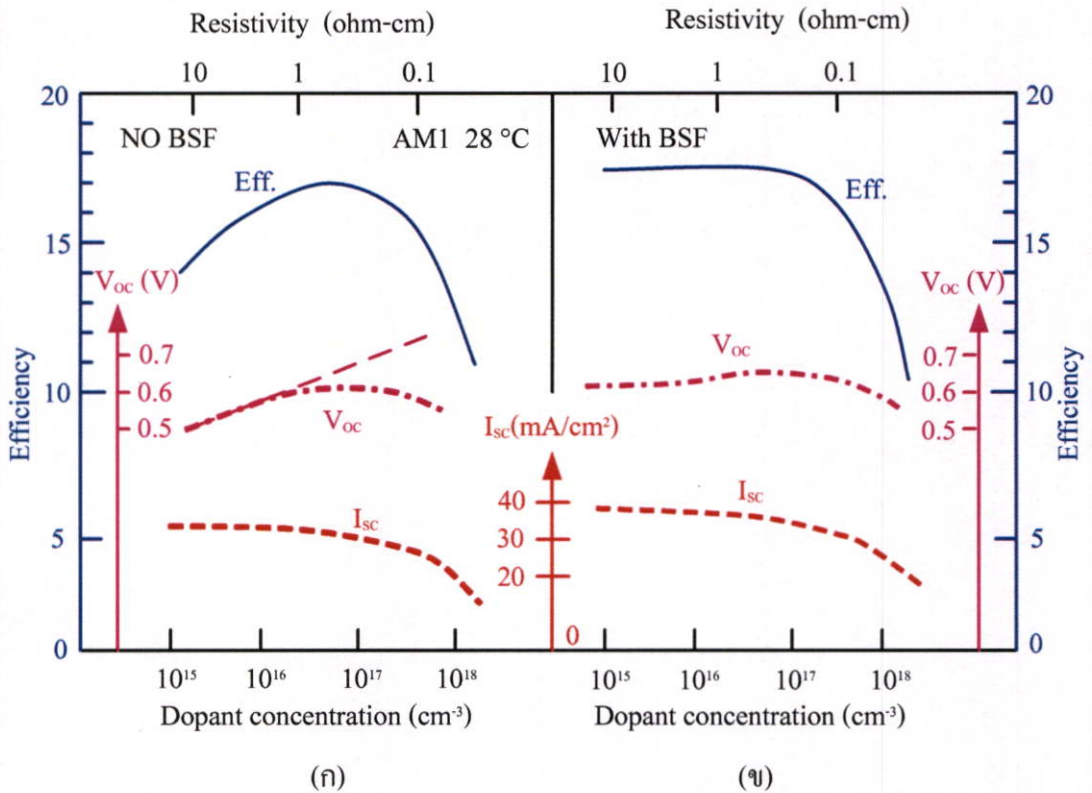
การรวมตัวของพาหะ (recombination) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวด้านหน้า (front surface) และด้านหลัง (back surface) ซึ่งความเร็วของการรวมตัว (recombination velocity) ที่บริเวณผิวด้านหลังโดยปกติแล้วจะมีค่าที่สูงมาก เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีรอยสัมผัสโอห์มิกปกคลุมอยู่ อีกทั้งการรวมตัวที่ผิวหน้าโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่าการรวมตัวที่ด้านหลังเพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่า ซึ่งถ้าสามารถลดการรวมตัวที่ผิวด้านหลังได้ ก็จะช่วยลดกระแสอิมิตัว (การลดกระแสอิมิตัว จะช่วยเพิ่มแรงดันเปิดวงจร) และช่วยเพิ่มกระแสลัดวงจรของเซลล์ได้ ผลดังกล่าวจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลังแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง

จากรูปที่ 2.16 สนามไฟฟ้า (E_2) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บประจุพาหะในบริเวณใกล้กับขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ทำให้โอกาสที่พาหะส่วนน้อยที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงนั้น มีโอกาสเปลี่ยนเป็นกระแสลัดวงจร (collection probability) ได้เพิ่มมากขึ้น ก่อนที่พาหะนั้นจะรวมตัวหมดไป ซึ่งจากการเพิ่มขึ้นของ collection probability นี้เองจะมีผลทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น ช่วยลดกระแสอิมิตัวลง ส่งผลให้แรงดันเปิดวงจรเพิ่มขึ้นด้วย [15,18,20-21]

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญคือ กระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ภายหลังจากเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังแสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนาแน่นค่าต่างๆ ในฐานรองชนิดพี (ก) ไม่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (ข) มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง [20]

เนื่องจากผิวหน้าของซิลิคอนจะมีการสะท้อนแสงที่สูงโดยเฉลี่ยมากกว่า 60% ซึ่งถ้าผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ซิลิคอน โดยที่ไม่มีการสร้างชั้นลดการสะท้อนมาปกคลุม ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากการสะท้อนของผิวหน้า เซลล์ที่ได้จึงมีประสิทธิภาพต่ำ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงขึ้นเพื่อช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากการสะท้อนลง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้พอร์ซซิลิคอนจากวิธีการกัดข้อมสีมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

2.5.2 พอร์ซซิลิคอน

พอร์ซซิลิคอน (Porous Si : PS) หรือ เนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ที่ได้จากวิธีการกัดข้อมสี (sain etching) นั้น มีการสะท้อนแสงที่ต่ำโดยเฉลี่ยแล้วต่ำกว่า 20% อีกทั้งพอร์ซซิลิคอนยังมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงด้วย ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้พอร์ซซิลิคอนจากการกัดข้อมสีมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating : ARC) ในเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ให้สูงขึ้น ซึ่งทฤษฎี กระบวนการสร้าง และการประยุกต์ใช้งานของพอร์ซซิลิคอน จะขอกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 3

พอร์สซิลิคอน

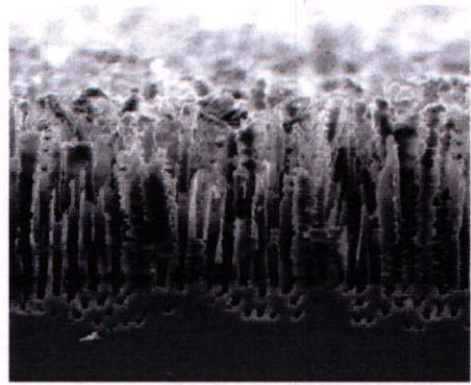
พอร์สซิลิคอนซึ่งเป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ได้ถูกค้นพบ และรู้จักกันมาเป็นเวลานานแล้วเมื่อปี ค.ศ. 1956 โดย Uhlir [6] แต่คุณสมบัติบางประการที่สำคัญ ซึ่งแตกต่างจากซิลิคอนโดยสิ้นเชิง เช่น คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) และคุณสมบัติอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence) ที่อุณหภูมิห้อง เพิ่งเป็นที่รู้จักกันเมื่อปี ค.ศ. 1990 โดย Leigh Canham [7] นอกจากนี้ ชั้นของพอร์สซิลิคอนยังสามารถดูดกลืนรังสีได้ดี และมีดัชนีการหักเห (refractive index) ต่ำและอยู่ในช่วงกว้าง คือ 1.25 - 3 อีกด้วย [11] ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง อาทิ ทางชีวการแพทย์ (biomedical) เครื่องตรวจจับต่างๆ (sensor) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (opto-electronics) ในบทนี้จะได้อธิบายถึง คุณสมบัติ ลักษณะแถบพลังงาน กระบวนการสร้าง และการนำชั้นพอร์สซิลิคอนไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ

3.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon : PS) มาจากคำว่า พอร์ส (porous) ที่หมายถึง รูพรุน รวมกับคำว่า ซิลิคอน (silicon) ซึ่งเป็นธาตุของแข็ง ใช้อธิบายผลึกขนาดระดับนาโนเมตรของซิลิคอน (nanocrystallites silicon) ที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีลักษณะที่แข็ง และเปราะ โครงสร้างระดับนาโนนี้ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยลักษณะแท่ง (columnar) หรือ ทรงกลม (dots or sphere) หรือ ลักษณะผสมของทั้งสอง ซึ่งมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (spongy skeleton) [22] จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าว จึงเรียกผลึกระดับนาโนเมตรของซิลิคอนนี้ว่า พอร์สซิลิคอน ลักษณะผิวหน้า และภาคตัดขวางแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



(ก)



(ข)

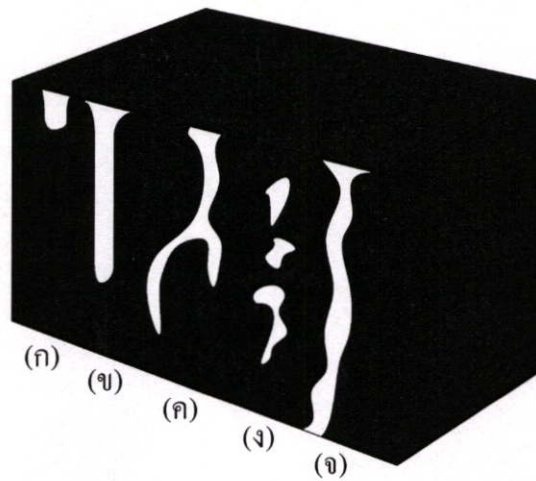
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง

3.1.1 ประเภทของพอร์สซิลิคอน

เนื่องจากโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน จะประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กหลายลักษณะแทรกตัวอยู่ระหว่างเนื้อซิลิคอน ทำให้การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิคอนสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทตามลักษณะของรูพรุน คือ แบ่งตามลักษณะของรูพรุน (pore type) แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (pore shape) และแบ่งตามขนาดของรูพรุน (pore size) [23]

ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (pore type) สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ลักษณะ ดังรูปที่ 3.2 คือ

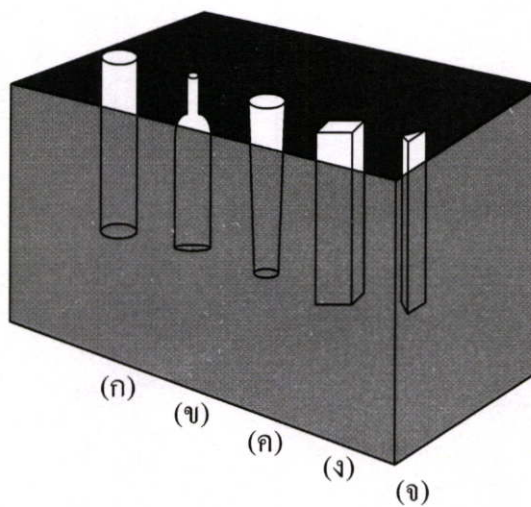
1. ลักษณะหลุมตัน (blind or saccate) เกิดขึ้นในกรณีที่ชั้นพอร์สซิลิคอนมีความบางมากๆ เหมือนเป็นฟิล์มบาง [24]
2. ลักษณะถุง (dead-end or saccate) ลักษณะรูพรุนคล้ายถุง โดยก้นถุงจะเป็นทางตัน คล้ายกับลักษณะหลุมตัน แต่จะมีความลึกที่มากกว่า
3. ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (interconnected or branched) รูพรุนมีลักษณะแตกกิ่งก้านและเชื่อมต่อถึงกันคล้ายรากไม้ที่มีรากฝอยกระจายทั่วไป
4. ลักษณะโพรงปิด (totally isolated or close) เหมือนมีโพรงอากาศแทรกอยู่ในเนื้อซิลิคอนจำนวนมาก [25-27]
5. ลักษณะทะลุ (through pores) รูพรุนจะเปิดที่ปลายทั้งสองด้าน จะพบลักษณะนี้ในโครงสร้างแบบเมมเบรน (membrane) ที่มีการกักแบบนานๆ ให้รูพรุนทะลุเนื้อซิลิคอนอีกด้านหนึ่ง [28]



รูปที่ 3.2 ประเภทของพอร์สซิติคอนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (ก) ลักษณะหลุมตัน (ข) ลักษณะ
 ถุง (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (ง) ลักษณะโพรงปิด (จ) ลักษณะทะลุ [29]

ประเภทของพอร์สซิติคอนเมื่อแบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (pore shape) สามารถแบ่งออก
 ได้เป็น 5 รูปร่าง ดังรูปที่ 3.3 คือ

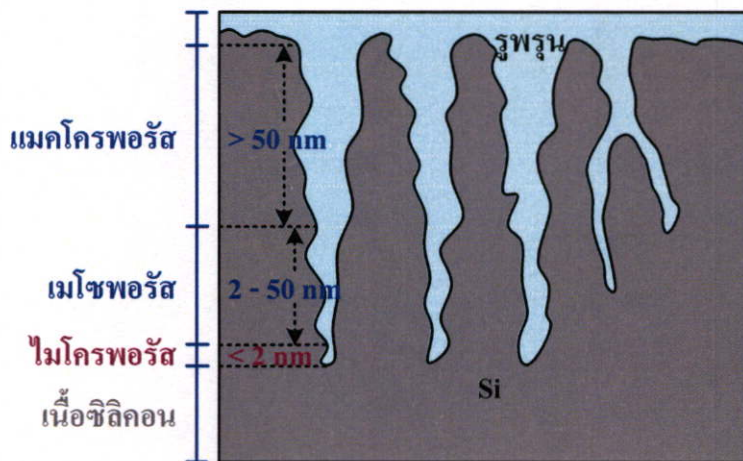
1. ทรงกระบอก (cylindrical)
2. ทรงขวดหมึก (ink-bottle) [30-31]
3. ทรงกรวย (funnel)
4. ทรงลูกบาศก์ (cuboid or slit) [32]
5. ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด (triangular or pyramidal)



รูปที่ 3.3 ประเภทของพอร์สซิติคอนแบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงขวด
 หมึก (ค) ทรงกรวย (ง) ทรงลูกบาศก์ (จ) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด [29]

ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน (pore size) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขนาด [33] แสดงดังรูปที่ 3.4 คือ

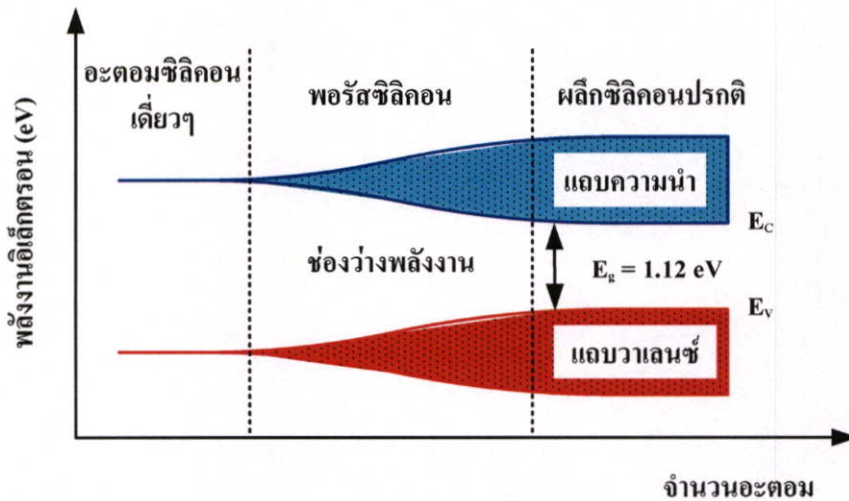
1. ไมโครพอร์ส (microporous) มีขนาดความกว้างของหลุม (pore width) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 นาโนเมตร โดยชั้นไมโครพอร์สนี้จะมีโครงสร้างที่ติดกับเนื้อของซิลิคอน
2. เมโซพอร์ส (mesoporous) มีขนาดความกว้างของหลุม (pore width) ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร
3. แมโครพอร์ส (macroporous) มีขนาดความกว้างของหลุม (pore width) มากกว่า 50 นาโนเมตร



รูปที่ 3.4 ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน

3.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิคอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้เกิดการแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการดังกล่าวถ้าสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิคอนเดิม



รูปที่ 3.5 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ [34]

จากรูปที่ 3.5 พบว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้น สามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาด โครงสร้างของผลึกซิลิคอนให้มีขนาดเล็กกลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะ โครงสร้างทางช่องว่างพลังงาน มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ควอนตัมไซส์เอฟเฟค (quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (quantum confinement effect)

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายใน โครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณ ที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติเหมือนในเนื้อผลึกซิลิคอนปรกติ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบ หรือบังคับด้วยลักษณะ และขนาดของโครงสร้างผลึก ทำให้ปรากฏการณ์ ควอนตัมไซส์เอฟเฟค (quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (quantum confinement effect) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ

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

เนื่องจากเนื้อซิลิคอนใน โครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นแท่ง (silicon wires) หรือลักษณะเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัม 1 มิติ (quantum

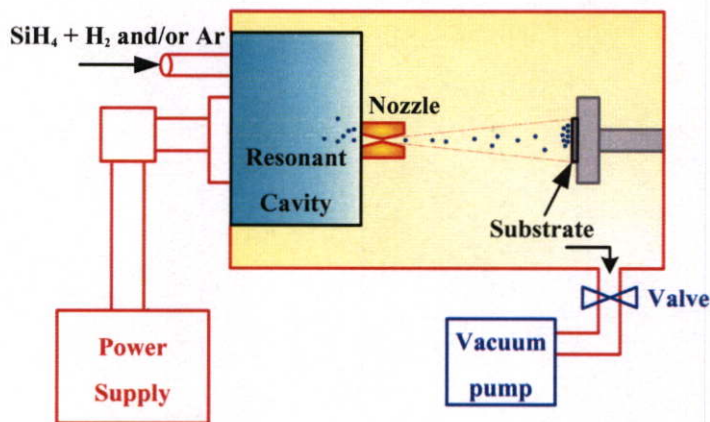
wire) นั่นเอง ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับนาโนเมตรของพอร์สซิลิคอน

3.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน

กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี คือ

3.3.1 วิธีสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

วิธีสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave plasma decomposition SiH_4) นี้สามารถสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites Si) ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ณ อุณหภูมิห้อง ถูกรายงานเป็นครั้งแรก โดย Takagi et al. [35] ซึ่งมีหลักการดังต่อไปนี้ คือ ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจะถูกสร้างขึ้นมาจากการสลายตัวของก๊าซไซเรน (SiH_4) กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) หรือก๊าซผสมของอาร์กอน (Ar) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลัง 150 วัตต์ ที่ความถี่ 2.45 GHz ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ [35]

ขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 จนไปถึง 2 นาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของก๊าซกับกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ ต่อจากนั้นผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรนี้จะถูกปล่อยผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตรไปยังภาชนะระบบปิด (chamber) ที่ภายในมีความดันอยู่ในระดับ 10^{-6} Torr โดยผลึกซิลิคอนที่มี

ขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นนี้จะถูกปล่อยให้ไปตกเคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็นควอทซ์ ณ ที่อุณหภูมิห้อง

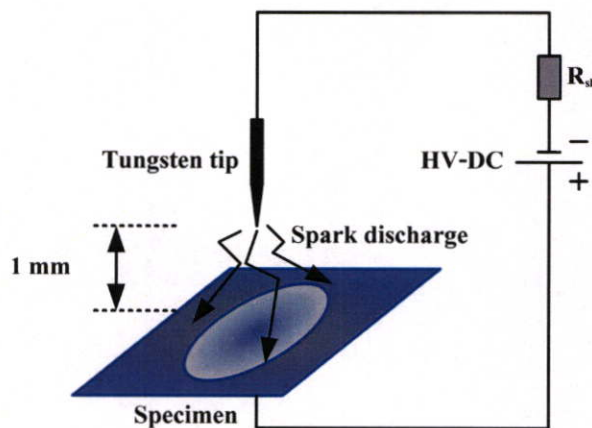
3.3.2 วิธีสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยแสงเลเซอร์

ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรยังสามารถสร้างขึ้นได้จากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยแสงเลเซอร์ (laser breakdown SiH_4) [36-37] โดยมีรายละเอียดวิธีการสร้างดังต่อไปนี้ คือ เริ่มต้นจากการที่ก๊าซไซเรนบริสุทธิ์ (Pure SiH_4) ที่มีความดันเท่ากับ 10, 15 หรือ 20 Torr จะถูกปล่อยเข้าไปยังในภาชนะระบบปิด (chamber) ซึ่งภายในมีความดัน (background pressure) ที่ต่ำกว่า 10^{-6} Torr ความดันของก๊าซไซเรนต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้น ในส่วนของเลเซอร์ที่ใช้นั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากระบบ $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ laser system โดยแสงเลเซอร์ที่ได้ออกมาจะถูกโฟกัสให้ผ่านเข้าไปยังภาชนะระบบปิด เพื่อทำให้เกิดการสปาร์ก (spark) ขึ้นภายในผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นจะตก (deposit) ลงบนฐานรองที่เป็นควอทซ์หรือแผ่นเยอรมันเนียม

3.3.3 วิธีการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนจากคลื่นความถี่สูง

เทคนิคในการสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรด้วยคลื่นความถี่สูง (high-frequency spark discharge) ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดยนาย Hummel และทีมงาน [38-39] โดยใช้การ spark discharge จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์สูงขนาด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งในการ spark แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 20 นาโนวินาที และเกิดขึ้นทุกๆ 60 ไมโครวินาที ดังแสดงในรูปที่

3.7

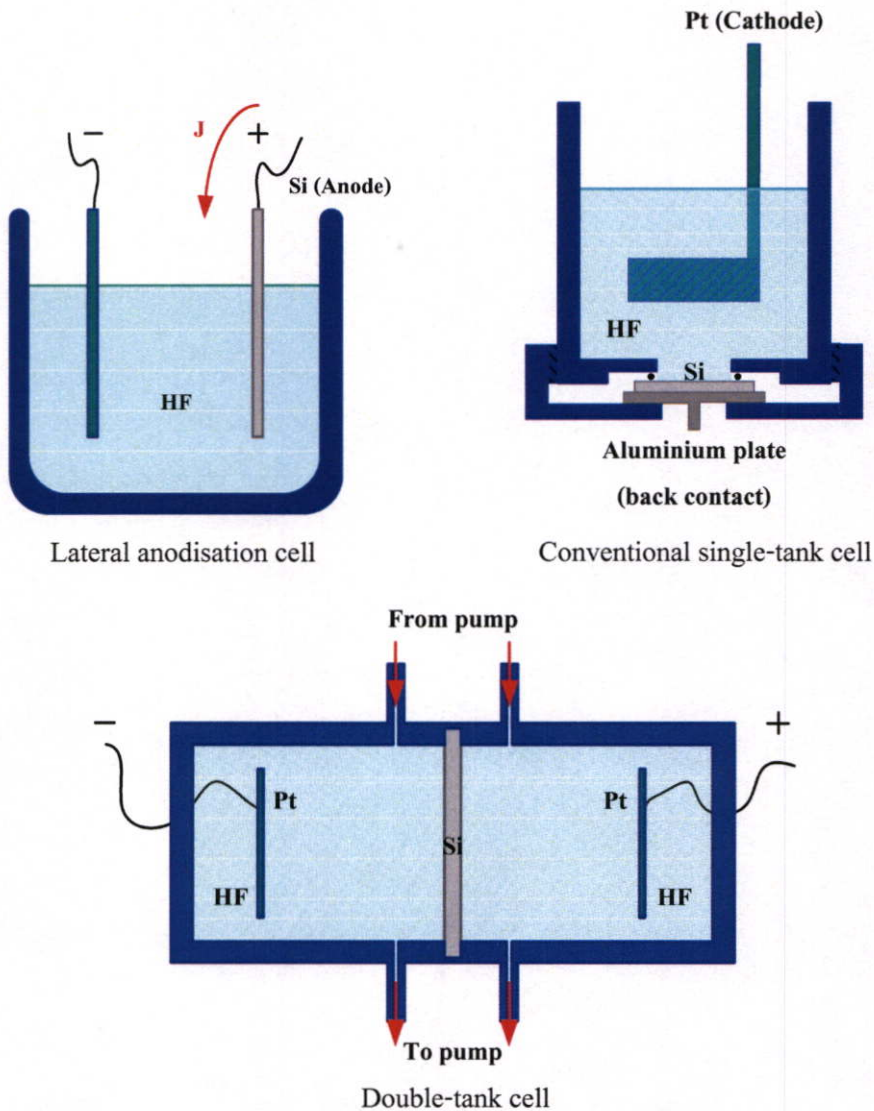


รูปที่ 3.7 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรจากคลื่นความถี่สูง [38-39]

จากรูปจะเห็นได้ว่าการ spark discharge จะเกิดขึ้นระหว่างปลายสุดของลวดทั้งสแตน ซึ่งอยู่ที่ขั้วแอโนด กับแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งอยู่ที่ขั้วแคโทด โดยการ Spark นั้นจะทำให้บริเวณซึ่งเกิดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรมีลักษณะเป็นบริเวณวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 5 มิลลิเมตร บนแผ่นผลึกซิลิคอน

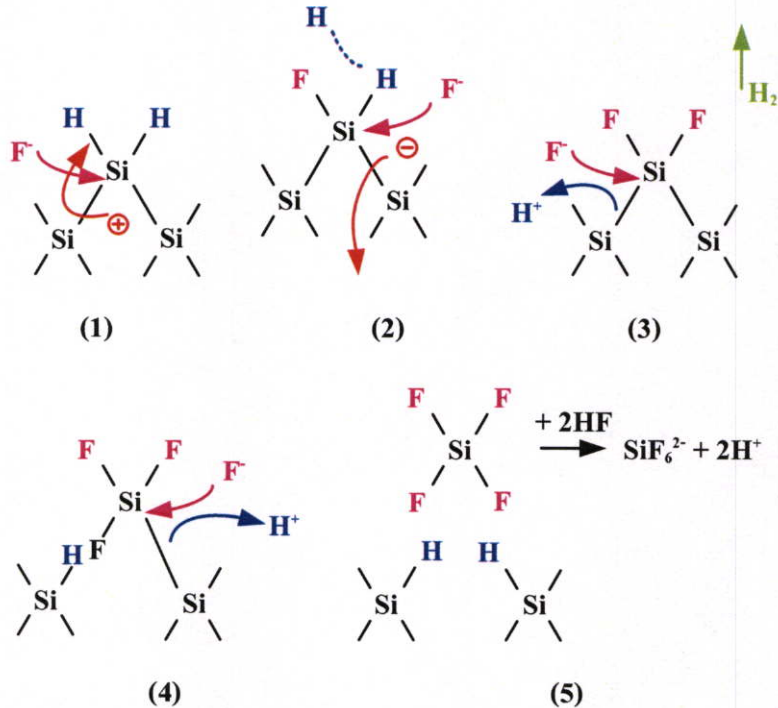
3.3.4 วิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี

พอร์สซิลิคอนสามารถสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการกัดทางไฟฟ้า-เคมี (electrochemical etching) ที่เรียกว่า แอนโอดิซเซชัน (anodisation) โดยใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี [40]

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนนี้ จะประกอบด้วย แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะใช้ทองเป็นขั้ว โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ใน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง โดยมีกลไกการ เกิดพอร์ซซิลิคอน ดังรูปที่ 3.9

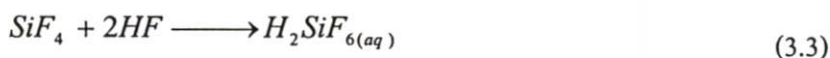
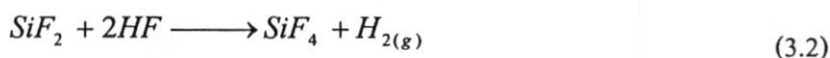
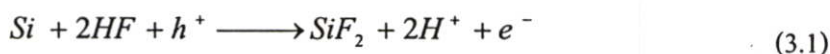


รูปที่ 3.9 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน [41]

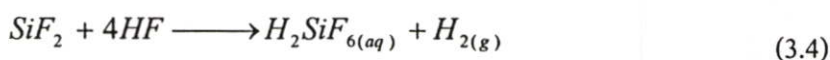
เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกรไบอัสแบบแอโนดิก ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อน ศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วแอโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจน ปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้ไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลาย พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการไบอัส เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก โดยมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้แก่ขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮล สามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิว สามารถถูกทำลายได้โดยไอออน ของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมา แทนดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่ เกิดขึ้นใน ขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้ไอออนของฟลูออรีน (F^-) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะ เข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยัง

ขั้วแอโนด ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอน (polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนที่อยู่ถัดเข้ามามีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นว่าอะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิคอน พร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิคอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้ คือ [41]



จากสมการที่ 3.2 และสมการที่ 3.3 สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวมใหม่ได้เป็น



จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3.1 ที่มีผลึกซิลิคอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้ จำเป็นที่จะต้องอาศัยโฮลในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF_2 ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอนต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_2 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ 3.2 ได้ผลลัพธ์เป็น SiF_4 หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นนี้เอง สังเกตได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้าย คือ สารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ 3.3

กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกัดด้วยไฟฟ้า-เคมีนั้น มีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ซึ่งพอร์สซิลิคอนที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันย่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้วย อาทิ พอร์สซิลิคอนที่มีค่าความพรุนมากๆ จะมีขนาด โครงสร้างแห่งซิลิคอนที่เล็กลง เป็นผลให้ช่องว่างพลังงานที่บริเวณชั้นพอร์สซิลิคอนกว้างมากขึ้น เป็นต้น

ปัจจัยหลักๆที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้า-เคมี มีดังนี้ คือ สภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอน ชนิดของสารเจือในเนื้อผลึกซิลิคอน ความหนาแน่น

กระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด

จากการศึกษา พบว่า โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนจะมีค่าความพรุนสูงขึ้น และมีความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนมากขึ้นเมื่อ เพิ่มค่าสภาพความต้านทานในผลึกซิลิคอนชนิดพี หรือลดค่าสภาพความต้านทานในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การเพิ่มความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา การลดความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และการเพิ่มเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด [42]

โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนจะมีค่าความพรุนน้อยลง และมีความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนน้อยลงถ้าหากปรับปัจจัยดังกล่าวไปในทางตรงกันข้ามกับการเพิ่มความพรุน

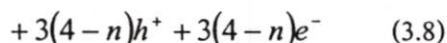
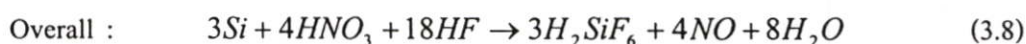
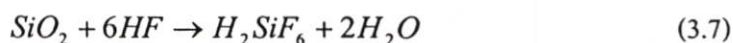
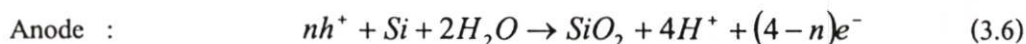
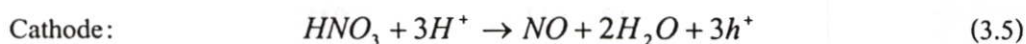
3.3.5 วิธีการกัดย้อมสี (stain etching)

การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดย้อมสี (stain etching) เริ่มมีการนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 [43] โดยทั่วไปการกัดย้อมสีผลึกซิลิคอนเพื่อสร้างชั้นพอร์ส สามารถทำได้ง่ายด้วยการจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายซึ่งประกอบด้วย กรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้น 47 wt.% กรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 60 wt.% และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ [44] นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้แสงสว่างเพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในขณะที่ทำการกัดด้วย



รูปที่ 3.10 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดย้อมสี

ตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์สขึ้น คือ การเกิดโฮล (h^+) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาการเกิด NO ดังสมการที่ (3.5) [45]



โดยปฏิกิริยาจะเริ่มต้นจากกรดไนตริก (HNO_3) ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) น้ำ (H_2O) และไฮล (h^+) และไฮลที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอน (Si) และน้ำ เกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ไฮโดรเจนไอออน และอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการที่ (3.6) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริก ได้เป็นสารละลาย H_2SiF_6 ดังสมการที่ (3.7) จากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆนี้เอง ทำให้เนื้อซิลิคอนบางส่วนถูกละลายออกไป และมีรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดขึ้น กลายเป็นชั้นพอร์ซซิลิคอน มองเห็นเป็นสีต่างๆปรากฏขึ้น ปฏิกิริยาเคมีรวมแสดงได้ดังสมการที่ (3.8)

ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีสันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์การแทรกสอดของคลื่นแสง และความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น วงรอบการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ (หลายๆครั้ง) ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมโครเมตรถึงประมาณ 1.5 ไมโครเมตร เป็นต้น [46] นอกจากนี้ ในกระบวนการกัดข้อมีสันนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ร่วมกับกรดไนตริก ก่อนที่จะนำไปทำการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน ซึ่งเรียกช่วงเวลาดังกล่าวว่า เวลาการบ่มสารละลาย (incubation period) [47]

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมีสัน คือ

1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา [48] โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อการเกิดไฮล (h^+) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์ซขึ้น อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น

2. ชนิดของสารเจือ และค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ซ มีผลอย่างมากต่อเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) ให้เกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนโดยตรง [49] เช่น ในซิลิคอนชนิดพี เวลาการเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสภาพต้านทานเพิ่มขึ้น (สภาพต้านทาน 0.004 $\Omega\cdot\text{cm}$ ใช้เวลาการเหนี่ยวนำ 30 วินาที เพิ่มขึ้นเป็น 9 นาทีเมื่อสภาพต้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 50 $\Omega\cdot\text{cm}$) ถ้าเป็นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น เวลาการเหนี่ยวนำจะลดลงเมื่อค่าสภาพต้านทานเพิ่มขึ้น (สภาพต้านทาน

0.15 $\Omega\cdot\text{cm}$ ใช้เวลาการเหนี่ยวนำ 10 นาที ลดลงเหลือ 8 นาทีเมื่อสภาพด้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 20 $\Omega\cdot\text{cm}$)

3. สภาพของผลึกซิลิคอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน [50] มีการทดลองกับแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป แผ่นซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส และอัลลอยด์ของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) ที่สร้างจากกระบวนการอีพิแทกซี (epitaxy process) เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่ พบว่า การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (UV) พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยวแผ่นซิลิคอน และแบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ได้ แต่พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะมอร์ฟัสกลับไม่แสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ส่วนกรณีอัลลอยด์ของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของเจอร์เมเนียม ($x = 0.04 - 0.41$) จะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลงในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายเกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่หยาบกว่าการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย [51]

วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้หลายวิธี ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคการปลูกผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆ เหล่านี้อาจจะต้องอาศัยเทคนิคการสร้าง และอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาที่สูงมาก แต่วิธีการสร้างชั้นพอร์สที่ง่ายที่สุด และประหยัดที่สุด [1] ทั้งยังสามารถปรับเข้ากับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดี คือ วิธีการกัดข้อมสี่ (stain etching) ผลึกซิลิคอนด้วยสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และน้ำ ชั้นของพอร์สซิลิคอนนอกจากจะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนโฟตอนได้ดีแล้วยังมีการสะท้อนแสงที่ต่ำ จึงเหมาะที่จะใช้เป็นชั้นดูดกลืนโฟตอน และชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี และการใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสี่ จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง และมีราคาต่ำ [3]

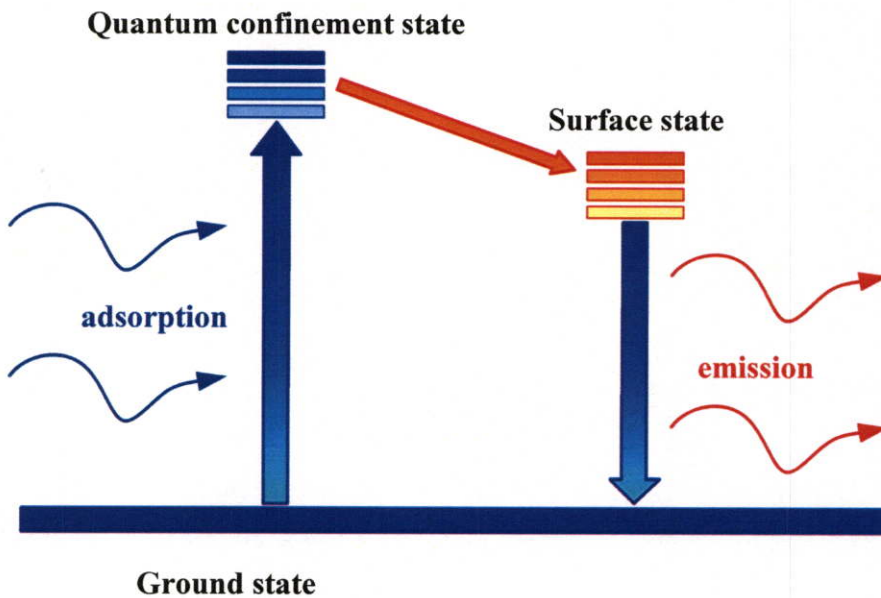
3.4 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

จากลักษณะ โครงสร้าง และส่วนประกอบของพอร์สซิลิคอน นักวิจัยหลายกลุ่มทั่วโลก เชื่อว่า คุณสมบัติของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน คือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ควอนตัมไซส์เอฟเฟกต์ (quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟกต์ (quantum confinement effect) [52-53] ขึ้น ภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิกอน ทำให้ขนาดช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิกอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิกอน

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สซิลิกอน [54] ซึ่งเกิดขึ้น เนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ทีผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั่นเอง

จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้เอง ทำให้เราสามารถทำการอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescent state model) ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิกอนเพื่ออธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดยสถานะแรกนั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟกต์ (quantum confinement effect) หรือควอนตัมเอฟเฟกต์ (quantum effect) ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิกอนได้รับพลังงานกระตุ้น

จากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลของการที่ช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานในนาโนพอร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เอง อิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

3.5 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง คือ

1. คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์สซิลิคอน พอร์สซิลิคอนมีลักษณะที่แข็ง เปราะ มีรูพรุนมากมาย มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง
2. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพอร์สซิลิคอน พอร์สซิลิคอนมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าซิลิคอนทำให้มีความต้านทานมากกว่าซิลิคอน และสามารถสร้างเป็นสารไดอิเล็กทริก (dielectric) ได้ พอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิคอน พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence) หรือคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence)

คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอนเหล่านี้สามารถควบคุมได้จากลักษณะโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างนั่นเอง และเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของพอร์สซิลิคอนนี้เองทำให้พอร์สซิลิคอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆมากมาย ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

3.6 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอน

เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติหลายอย่างที่โดดเด่น และมีคุณสมบัติทางวัสดุที่น่าสนใจซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับซิลิคอนทั่วไป ทำให้พอร์สซิลิคอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย และถูกคาดหวังว่าจะเป็นตัวทำให้เทคโนโลยีของซิลิคอนมีความสมบูรณ์ขึ้นในอนาคต

3.6.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

โดยธรรมชาติพอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าในชั้นสารซิลิคอน ดังนั้นจึงนำมาประยุกต์สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งฟิล์มบางของพอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนี

หักเหขึ้นอยู่กับค่าความพรุนซึ่งอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 1.25 ถึง 3 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในช่วงกว้าง

ศักยภาพของพอร์สซิลิคอนในการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย

1. การสะท้อนแสง (integrated reflectance) โครงสร้างที่เป็นพื้นผิวขรุขระอย่างมากของพอร์สซิลิคอน จะช่วยเพิ่มพื้นที่การรับแสง (light trapping) ในเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนนั้น นอกจากจะมีการสะท้อนแสงที่น้อยกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในการกัดผิวหน้าของผลึกซิลิคอนระนาบ (100) แล้ว การกัดผิวหน้าด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จะสามารถกระทำได้เฉพาะกับผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนที่มีระนาบ (100) เท่านั้น แต่ในขณะที่พอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้ในผิวหน้าของผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนไม่ว่าระนาบใดก็ได้ หรือในผลึกหลายรูปของซิลิคอนก็ตาม อีกทั้งยังดีกว่าการใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ซึ่งนิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน และเมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนแสงของพอร์สซิลิคอนที่สร้างบนผลึกหลายรูปของซิลิคอนกับชั้นลดการสะท้อนแบบอื่นๆ พบว่า การสร้างพอร์สซิลิคอนที่ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะมีการสะท้อนแสงเทียบได้กับวิธีการกัดผิวหน้าวิธีอื่นๆ ที่มีความซับซ้อนมากกว่า นอกจากนี้พอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้ง่าย ไม่ซับซ้อน มีข้อจำกัดน้อย และยังมีราคาถูกกว่าการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงที่ซับซ้อนมาก

2. คุณสมบัติการดูดกลืนแสง (absorption property) และคุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์สซิลิคอน (light-emission property) สามารถปรับแต่งได้ในช่วงที่กว้าง และเนื่องจากขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงาน (band gap) ในพอร์สซิลิคอนสามารถปรับได้ จึงมีความเหมาะสมในการหาจุดสมดุลสำหรับการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอน จะมีการตอบสนองทางแสงอย่างมากในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1000 นาโนเมตร จากทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดความกว้างช่องว่างพลังงานของชั้นดูดกลืนแสงประมาณ 1.5 อิเล็กตรอน โวลต์ จะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานสูงที่สุด ซึ่งขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานนี้อยู่ในช่วงที่ขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานในพอร์สซิลิคอนสามารถสร้างขึ้นได้ เนื่องจากการขยายได้ของขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานในพอร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้ พอร์สซิลิคอนเป็นวัสดุทางอุดมคติสำหรับชั้นรอยต่อบนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือใช้เป็นตัวดูดกลืนแสงที่ส่วนบนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

3. คุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนจะช่วยเปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) และแสงสีน้ำเงิน (blue light) ให้เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน ในเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอน

4. พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นซิลิคอนที่ปลูกผลึกด้วยวิธีโซลาราสถัก

(Czochralski-grown) จะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวรับอะตอมแปลกปลอมภายนอก หรืออีกนัยหนึ่ง คือ เป็นศูนย์กลางของสิ่งแปลกปลอมที่มารวมสมุขณะทำการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงไม่ไหวแพร่กระจาย ซึ่งคุณสมบัตินี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากผลึกซิลิคอนให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นมีหลายขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง

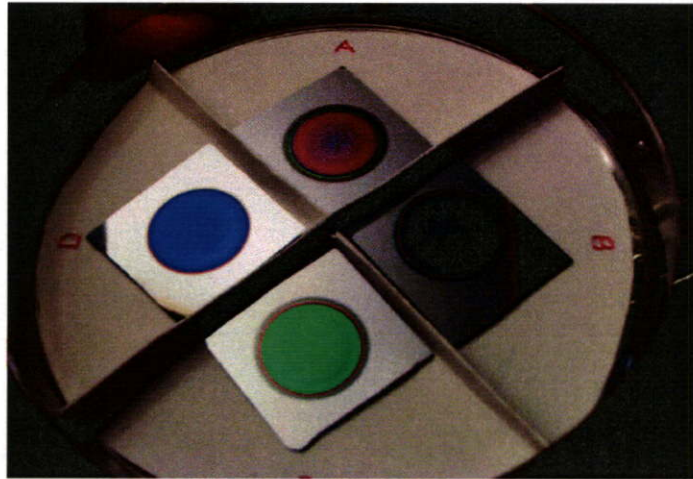
5. ความง่าย และศักยภาพของการสร้างพอร์สซิลิคอนในพื้นที่ขนาดใหญ่ จะช่วยให้พอร์สซิลิคอนเป็นเทคนิคที่เหมาะสมมากในการประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ดี ยังมีปัญหาบางประการที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอร์สซิลิคอนในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ การที่พอร์สซิลิคอนมีสภาพต้านทานสูง (high resistivity) อีกทั้งกระบวนการแพร่สารเจือ (dopant diffusion process) และกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ในกระบวนการสร้างเซลล์อาทิตย์ของซิลิคอนต้องการอุณหภูมิที่สูงมากกว่า 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มากกว่าอุณหภูมิที่ทำให้คุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์สซิลิคอนหมดสภาพไป

3.6.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (opto-electronic) [55]

พอร์สซิลิคอนเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจในการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติทางด้านแสง เนื่องจากพอร์สซิลิคอนสามารถเรืองแสงได้ที่อุณหภูมิห้อง และจากความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สามารถควบคุมได้จากกระบวนการสร้าง ทำให้พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติในการเรืองแสงได้ในช่วงกว้าง ทำให้สามารถควบคุมค่าความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาได้ และกำหนดช่วงของการเปล่งแสงได้ด้วย เพื่อนำมาประยุกต์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง [56]

แสงที่เปล่งออกมาจากพอร์สซิลิคอนนั้น ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งแสงที่เปล่งออกมามีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การเพิ่มหรือลดค่าความพรุนทำให้ค่าความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาเปลี่ยน รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างของพอร์สซิลิคอนที่มีค่าความพรุน 70-80 เปอร์เซ็นต์ จะเรืองแสงสีน้ำเงินเขียว ในขณะที่แผ่นที่มีค่าความพรุน 40 เปอร์เซ็นต์เรืองแสงสีแดง



รูปที่ 3.12 คุณสมบัติโฟโตนิกของโพรมิตีฟอสเฟตของโพรมิตีฟอสเฟตที่ความถี่ต่างกัน [56]

3.6.3 ชีวการแพทย์ (Biomedical) [57]

ได้มีการนำโพรมิตีฟอสเฟตไปใช้ในงานทางการแพทย์ตั้งแต่ในรายที่กระดูกหัก จนกระทั่งในรายที่เป็นมะเร็ง ผลึกซิลิกอนมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จึงสามารถเข้าไปในร่างกาย และถอดออกมาได้โดยร่างกายไม่ต่อต้าน และสามารถละลายได้โดยไม่ทำให้เกิดอันตราย

ซิลิกอนนั้นสามารถเข้าไปในร่างกายได้ เช่น เข้าไปในส่วนหูชั้นใน (cochlear) ซึ่งสามารถเปลี่ยนสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่งผ่านไปยังสมองโดยตรงแต่จะต้องมีระบบป้องกันจากกล้ามเนื้อและเลือด โพรมิตีฟอสเฟตที่ฉีดเข้าไปในร่างกายเพื่อเป็นตัวให้ยาแก่ร่างกายมนุษย์นั้น จะแทรกตัวอยู่ชั่วคราว ทำการรักษาให้ยา และละลายโดยไม่มีอะไรเหลืออยู่ในร่างกาย ซึ่งเราสามารถที่จะบรรจุน้ำ และระบบคำนวณตัวเล็กๆ เข้าไปเพื่อควบคุมเวลาและปริมาณของตัวยาที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถฝังเข้าไปในตัวคนไข้ และส่งผ่านข้อมูลมาที่แพทย์ได้โดยไม่ต้องมาตรวจได้อีกด้วย

การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์อื่นๆ เช่น เป็นวัสดุที่สะท้อนและกันน้ำย่อยได้ หรือ ฝังซิลิกอนไปที่ผิวเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านเคมีเพื่อตรวจสอบอาการมะเร็งจากเลือด เนื่องจากสามารถตรวจสอบเลือด และชี้ตำแหน่งที่เกิดเนื้องอก หรือทำเป็นยาเม็ดที่ผ่านไปยังท้องโดยปราศจากการถูกกักก่อนและส่งผ่านยาไปยังลำไส้ใหญ่ได้โดยตรง [58]

3.6.4 เครื่องตรวจจับ [59]

โพรมิตีฟอสเฟตนั้นนิยมนำไปทำเป็นเครื่องตรวจจับก๊าซ และความชื้น เนื่องจากการที่โพรมิตีฟอสเฟตมีอัตราส่วน ระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูง (มากกว่า $500 \text{ m}^2/\text{cm}^3$) ดังนั้น จึงสามารถที่จะดูดกลืน โมเลกุลต่างๆ ได้ดีที่ผิว เมื่อโมเลกุลเหล่านั้นมากระทบ จะทำให้คุณสมบัติเปลี่ยน เช่น

ประสิทธิภาพในการเรืองแสงลดลงเมื่ออยู่ในสารเคมีที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของโมเลกุลนั้นๆ เช่นเดียวกับ ผลของค่าไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) เมื่อผิวหน้าของพอร์ซซิลิคอนเติมไปด้วยโมเลกุลต่างๆ จึงนำมาเป็นพื้นฐานในการสร้างเครื่องตรวจจับความชื้นที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าและค่าไดอิเล็กทริกเมื่อได้รับความชื้นที่ผิวหน้า ตัวอย่างการนำชั้นพอร์ซซิลิคอนมาประยุกต์ในเครื่องตรวจวัดปริมาณกลูโคส แสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องตรวจวัดปริมาณกลูโคสโดยใช้พอร์ซซิลิคอน [58]

ข้อดีของพอร์ซซิลิคอน คือ สามารถสร้างได้ง่าย สามารถดัดแปลงไปใช้ในโรงงานทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากัดและการออกซิไดซ์ และสร้างรูปแบบ (pattern) ได้โดยวิธีการโฟโวลติโกราฟี ซึ่งสามารถสร้างได้ง่าย และนำมาสร้างเป็นเครื่องตรวจจับหลายชนิดได้ในอุปกรณ์ตัวเดียวและอุปกรณ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งได้

นอกจากที่กล่าวมาแล้ว พอร์ซซิลิคอนยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นตัวส่งผ่านคลื่น (waveguide) ใช้สร้างเป็นตัวกรองคุณภาพสูง (high-quality Filter) ที่สามารถกรองได้แม้กระทั่งจุลชีพ ใช้สร้างนาโนแมชชีน (Nano-machine) และอื่นๆอีกมากมาย [60]

บทที่ 4

กระบวนการสร้าง

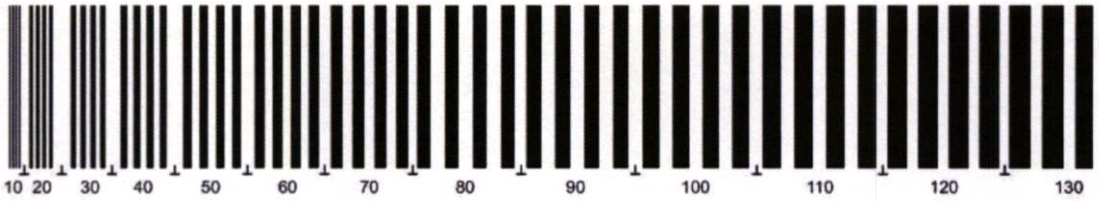
การออกแบบ (layout design) และการสร้างโฟโต 마스크 (photomask) เป็นสิ่งที่สำคัญอันดับแรกในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด เนื่องจากขนาดและความซับซ้อนของอุปกรณ์ทั้งหมด ต้องถูกกำหนดโดยการออกแบบ จากนั้นลวดลายที่ต้องการจะต้องถูกนำมาถ่ายทอดลงบนโฟโต 마스크 เพื่อใช้โฟโต 마스크เป็นต้นแบบในการสร้างลวดลายบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography) ต่อไป ในบทนี้จะได้กล่าวถึง การออกแบบลวดลายและการสร้างโฟโต 마스크 กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล และกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 การออกแบบลวดลายและการสร้างโฟโต 마스크

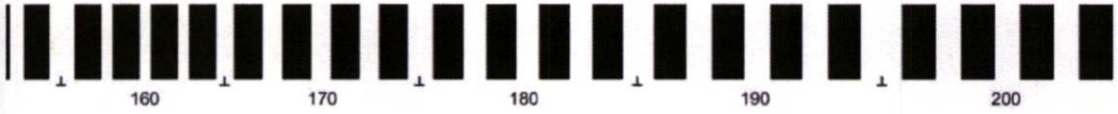
การออกแบบลวดลาย ถือว่าเป็นขั้นตอนแรกในการสร้างโฟโต 마스크 เพื่อจัดวางตำแหน่งของลวดลายให้ถูกต้อง และลวดลายที่ได้มีความเหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัด [61] ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบลวดลายโดยใช้โปรแกรม coreIDRAW Graphics Suite 12 เมื่อนำข้อมูลไฟล์ที่ออกแบบไว้ไปสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนฟิล์มแล้วนำไปติดบนกระจกใสจะทำให้ได้กระจกโฟโต 마스크สำหรับการทดลอง

4.1.1 ลวดลายทดสอบที่ใช้ในการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมล

ทำการออกแบบลวดลายทดสอบเพื่อวิเคราะห์ขนาด (Critical Dimension : CD) ของลายเส้นที่มีขนาดต่างกัน ตั้งแต่ 10 ไมโครเมตร - 1.5 มิลลิเมตร ในพื้นที่ 1.6 × 1.8 ตารางเซนติเมตร เพื่อใช้ในการศึกษา การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมล ลวดลายทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



(ก)



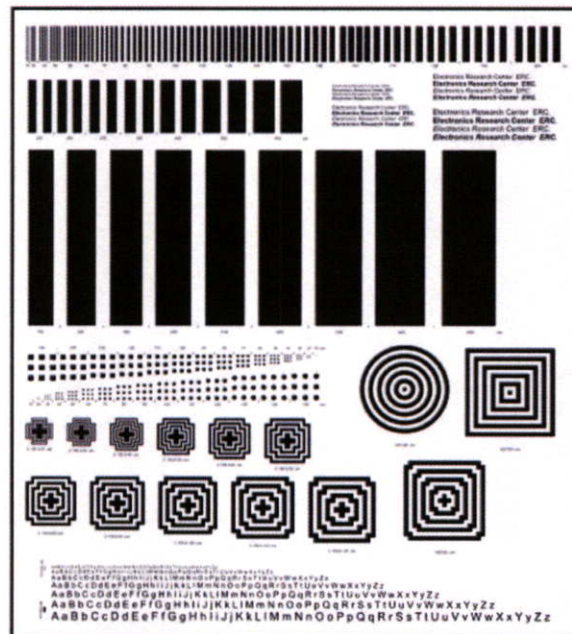
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.

Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.

Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.

Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.
Electronics Research Center ERC.

(ข)



1.8 cm

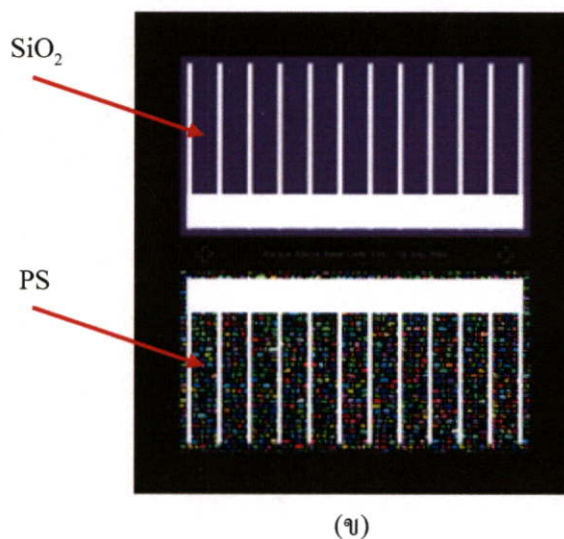
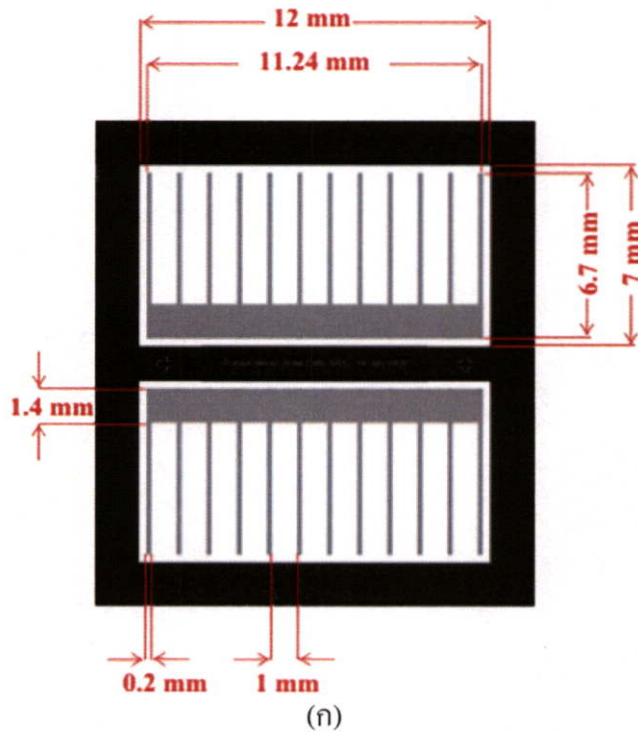
1.6 cm

(ค)

รูปที่ 4.1 ลวดลายทดสอบขนาด 1.6 × 1.8 ตารางเซนติเมตร เพื่อใช้ในการตรวจสอบลวดลายโลหะ
 (ก) ลายเส้นที่มีขนาดต่างกัน (ข) ลวดลายตัวอักษร (ง) ลวดลายทดสอบต้นแบบ

4.1.2 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1.6×1.8 ตารางเซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยออกแบบให้มีขนาดของฟิงเกอร์ (finger) และบัสบาร์ (busbar) เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และ 1.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างฟิงเกอร์ 1 มิลลิเมตร เซลล์ที่ได้มีพื้นที่รับแสงจริง (active area) ประมาณ 0.5 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.2 ลวดลายของเซลล์แสงอาทิตย์จากการออกแบบ (ก) ขนาดลวดลายต่างๆ (ข) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขั้นตอนการสะท้อนแสงแบบต่างๆ บนฐานรองเดียวกัน

4.2 กระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

การสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนโดยวิธีการกัดข้อมลทำได้โดยการจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF : 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO₃ : 60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ที่มีการเพาะบ่มสารละลายก่อนทำการกัด 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส แผ่นผลึกซิลิคอนสามารถใช้ได้ทั้ง ชนิดเอ็น และชนิดพี ดังรูปที่ 4.3



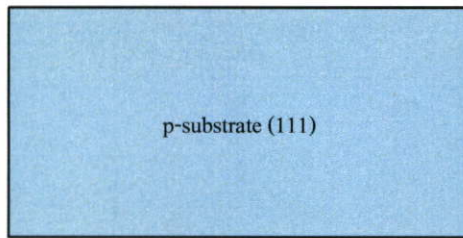
รูปที่ 4.3 การสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

4.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบแรกจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และแบบที่สองจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการกัดข้อมลเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ซึ่งกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแบบดังกล่าว แสดงได้ดังนี้ (ยกตัวอย่างในกรณีพื้นฐานรองเป็นซิลิคอน ชนิดพี)

4.3.1 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

1. แผ่นผลึกเริ่มต้น (initial wafer) ที่เป็นฐานรอง (substrate) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ผลึกซิลิคอนชนิดพี ที่มีระนาบ (orientation) (111)



2. การทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน (wafer cleaning) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก แบ่งเป็น

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อัลตราโซนิก (ultrasonic) ในน้ำขจัดไอออน (de-ionization water : DI) เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- ต้มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรโคโลโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เวลา 10 นาที
- อัลตราโซนิกในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

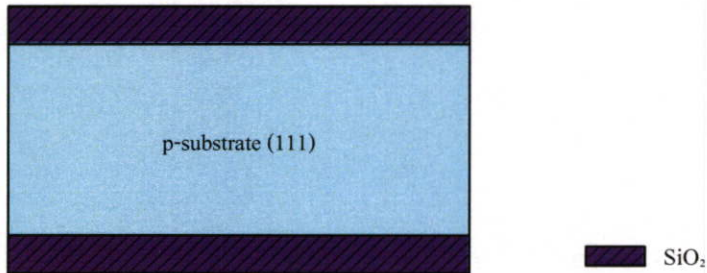
การลอกออกไซด์ (slice etching) ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (diffusion mask of impurity atoms) ใช้อุณหภูมิเตา $1,000^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิน้ำ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $6,000 \text{ \AA}$

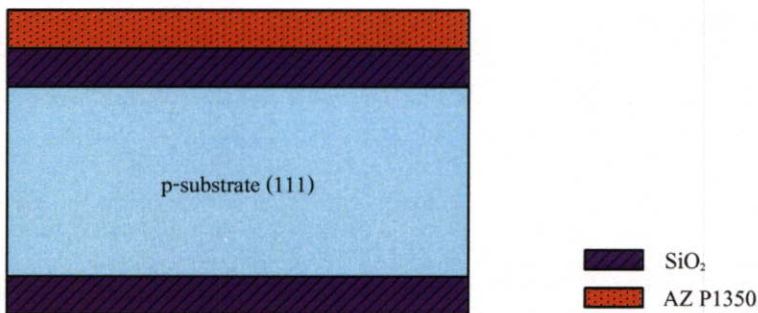
Oxidation

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง



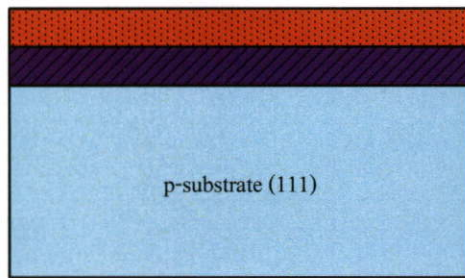
ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณด้านหลังแผ่นเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลัง (back surface field : BSF) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- ทาหน้าไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching)

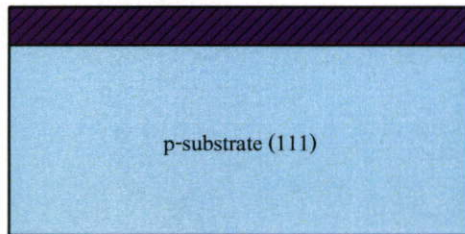
- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation อัตราส่วน $\text{HF}47\%:\text{6NH}_4\text{F}$)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



 SiO₂
 AZ P1350

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



 SiO₂

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคโลโรเอทิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิกในอะซิโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อน

ทำการแพร่สารเจือ

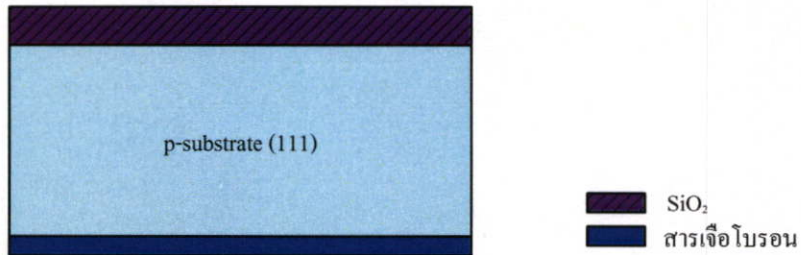
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4. การสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิด

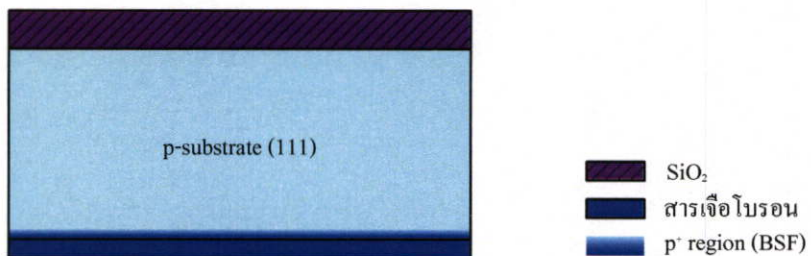
เดียวกับฐานรองที่มีความเข้มข้นสูง

กระบวนการ Pre-deposition

- หยอดสารละลายอะตอมสารเจือโบรอน ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ 150°C เวลา 10 นาที

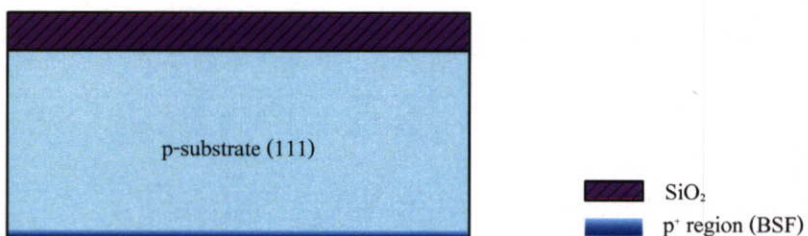


- Boron pre-deposition ที่ 1,000°C N₂ 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที



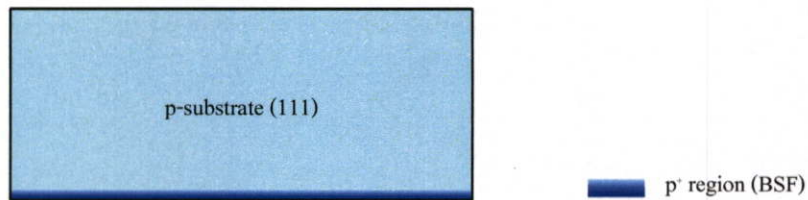
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือโบรอนที่ผิวหน้า

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับโบรอน (HF for boron) 10%
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching) เพื่อลอกออกไซด์หน้าบริเวณด้านหน้าออก เตรียมทำการสร้างออกไซด์ชั้นใหม่พร้อมกับการขับลึก (drive-in) อะตอมสารเจือโบรอน

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for boron อัตราส่วน HF47%:6NH₄F)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ดั้มในไตรโคโลโรเอทิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

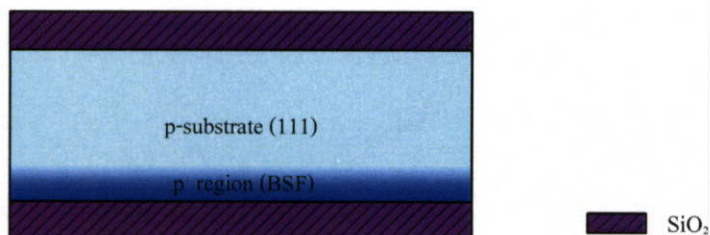
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในขณะที่สร้างรอยต่อพี-เอ็นและเป็นการขับเคลื่อน (drive-in) อะตอมโบรอนของสนามไฟฟ้า ด้านหลังไปในตัวด้วย ใช้อุณหภูมิเตา $1,000^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิน้ำ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $7,000 \text{ \AA}$

Oxidation

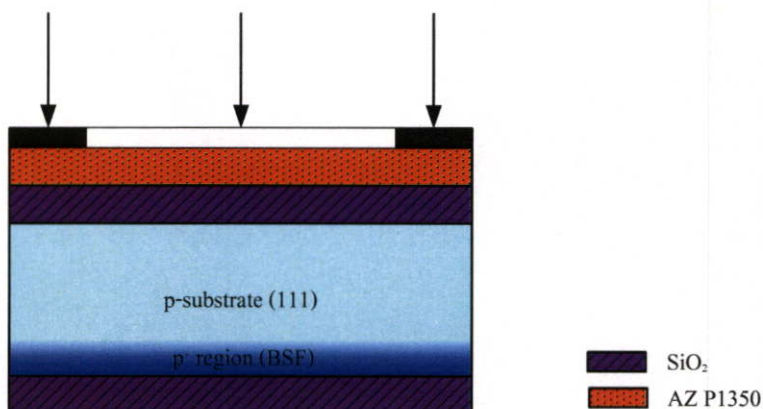
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 3 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 4 ชั่วโมง



6. Photo etching for n^+ -region เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือโฟโต้เอตซิงค์ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เรียกว่า N^+ -region Mask

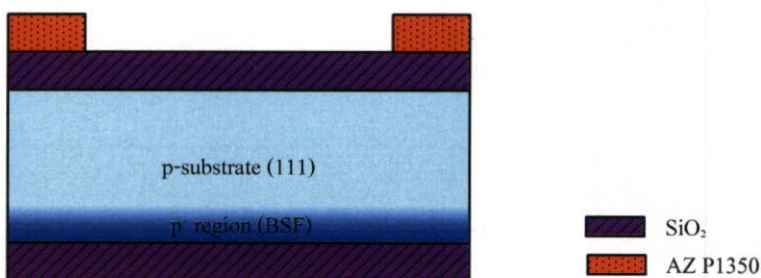
Photolithography Mask#1 (n^+ -region)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง (Alignment expose)

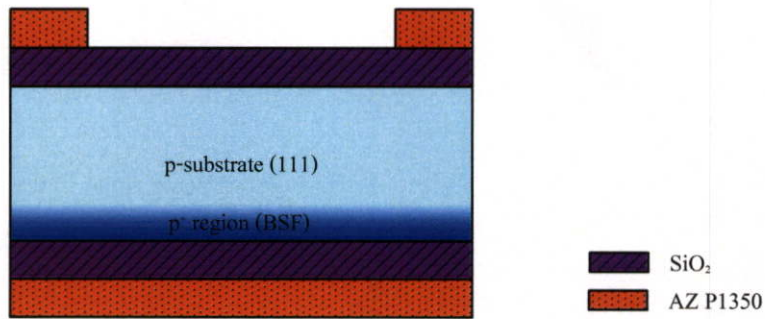


Develop ฟิล์ม โดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

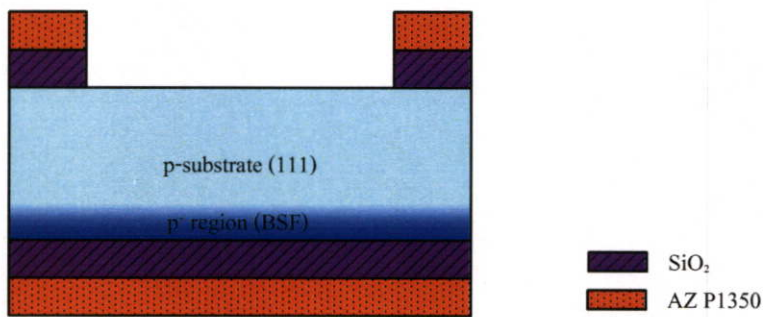


- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



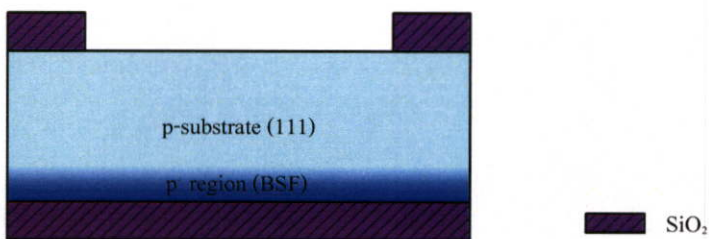
การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching) เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับการแพร่สารเจือ

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation อัตราส่วน HF47%:6NH₄F)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคโรเอทธีลีน เวลา 5 นาที

- อัลตราโซนิกในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

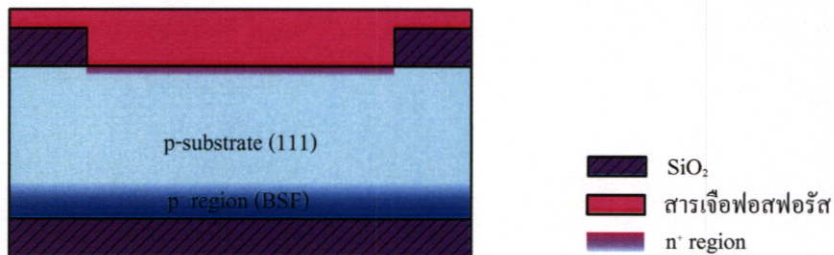
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างรอยต่อพี-เอ็น

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

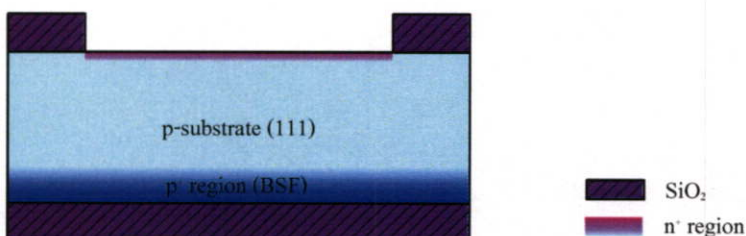
7. การสร้างรอยต่อพี-เอ็นที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดตรงกับข้ามกับฐานรอง ในที่นี้จะเป็นการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตร

กระบวนการ Pre-deposition

- หยอดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ 150°C เวลา 10 นาที

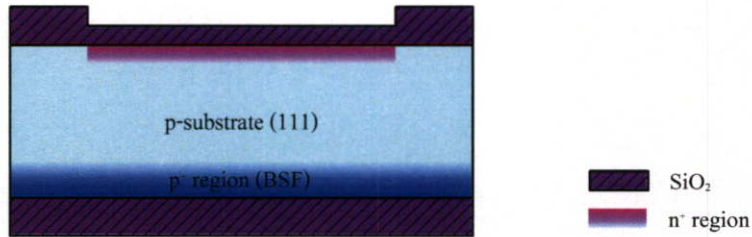


- Phosphorus pre-deposition ที่ 1,000°C N₂ 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที
- การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือฟอสฟอรัสที่ผิวหน้า
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับฟอสฟอรัส 10%
 - จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
 - จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



กระบวนการ Drive-in เพื่อขับลึกให้ได้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นตามต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงไปในตัวด้วย ซึ่งชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นมีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม

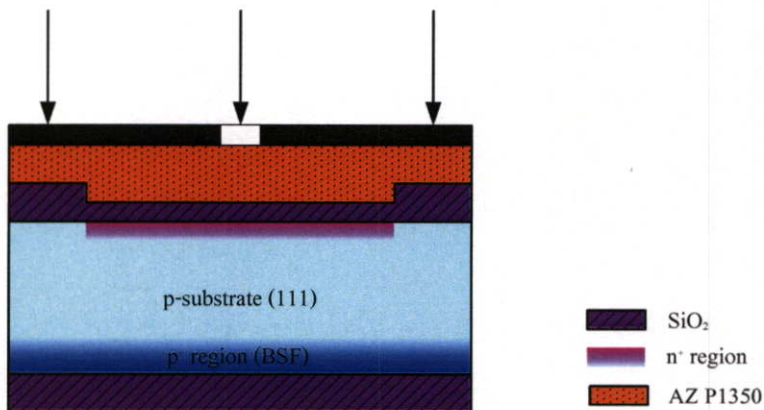
- Phosphorus drive-in ที่ $1,000^{\circ}\text{C}$ O_2 1,200 cc./min. (Dry), O_2 1,000 cc./min. (Wet)



8. Photo etching for contact เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณที่เป็นส่วนขั้วสัมผัส (contact) ของรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้ โฟโตมาสก์ชั้นที่ 2 เรียกว่า Contact Mask

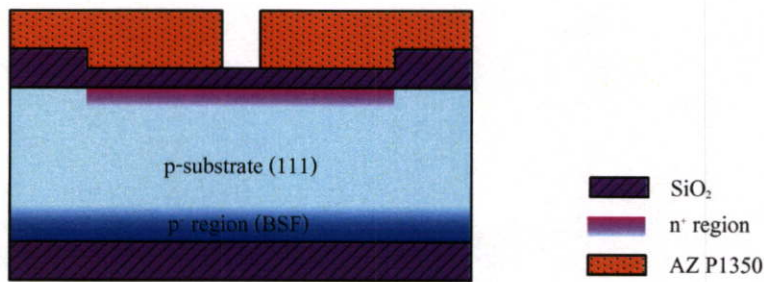
Photolithography Mask#2 (Contact)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง



Develop ฟิล์มโดย

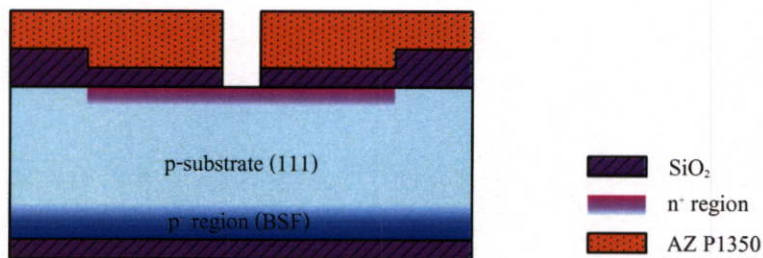
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที (Post bake)

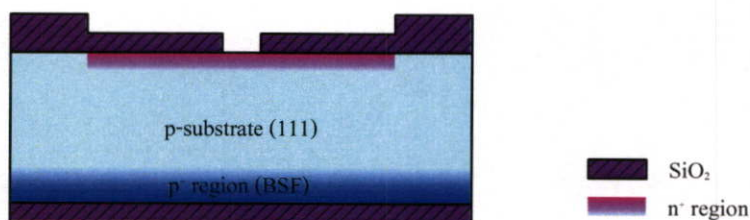
การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (oxide etching) บริเวณด้านหน้าที่มีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม และเนื่องจากออกไซด์บริเวณด้านหลังต้องลอกออกเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอยู่แล้วจึงไม่ได้ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหลัง

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for phosphorus อัตราส่วน HF47%:6NH₄F)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ดมในไตรโคโลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที

- อัลตราโซนิกในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

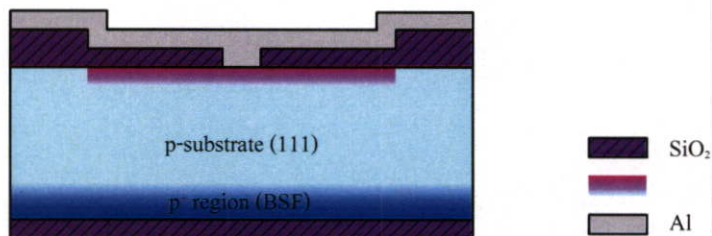
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการเคลือบชั้นโลหะ

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับฟอสฟอรัส 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

9. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) อลูมิเนียมชั้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นของโลหะนี้ได้แก่ อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

การเคลือบชั้นอลูมิเนียม

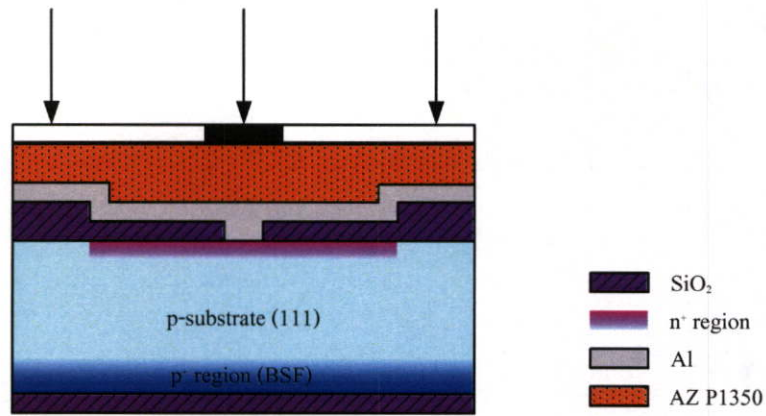
- ทำการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



10. Photo etching for metallization เป็นการสกัดชั้นของอลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน ให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ชั้นที่ 3 และเรียกว่า Metal Mask

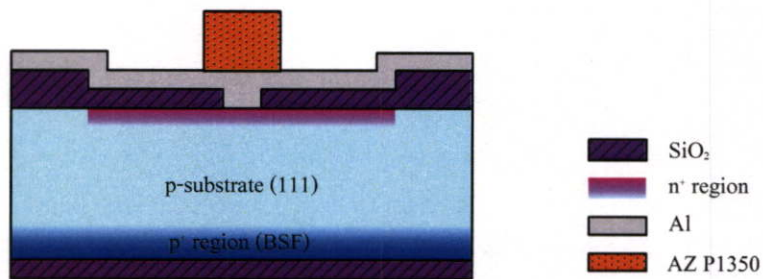
กระบวนการ Photolithography Mask#3 (Metal Mask)

- อบแผ่นไว้ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง



Develop ฟิล์ม โดย

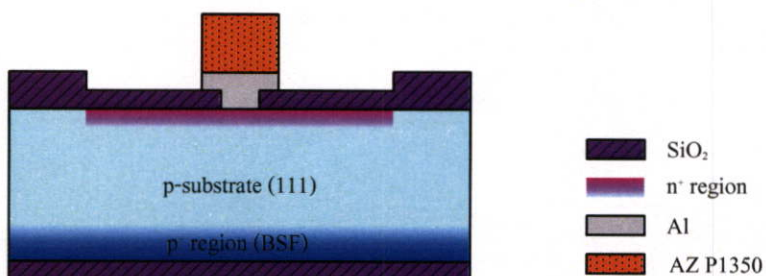
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที (Post bake)

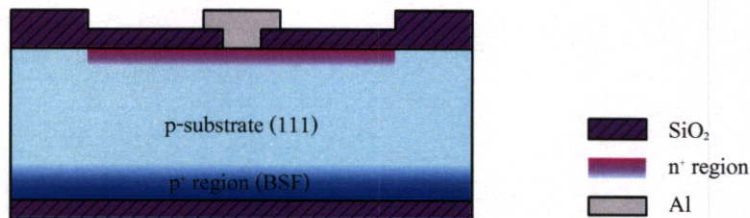
การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



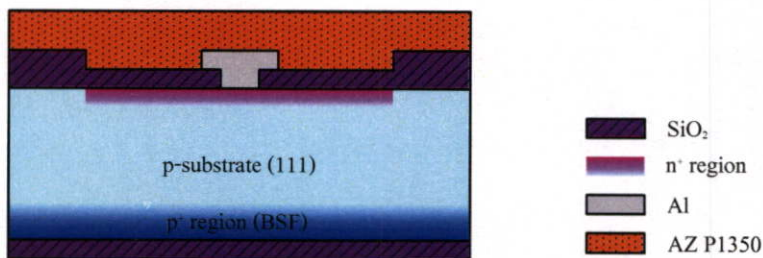
กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



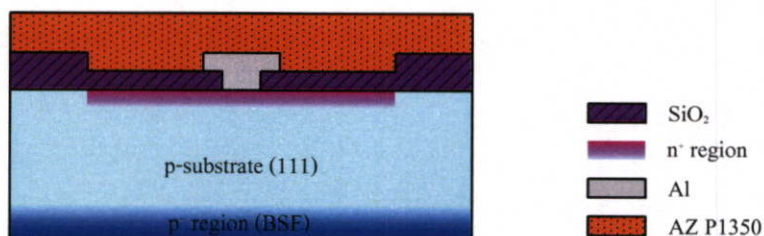
การลอกชั้นออกไซด์บริเวณด้านหลังแผ่นออก เพื่อเตรียมสร้างขั้วสัมผัสด้านหลัง

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- ทาหน้าไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



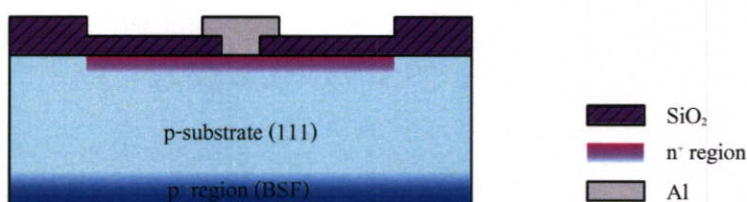
การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (oxide etching)

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for phosphorus อัตราส่วน $\text{HF}47\%:6\text{NH}_4\text{F}$)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



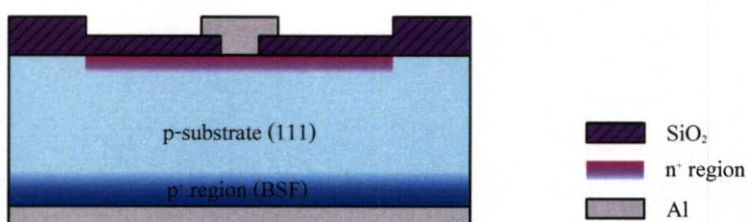
กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การเคลือบชั้นอนุภาคนิยาม

- ทำการเคลือบชั้นอนุภาคนิยามในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.

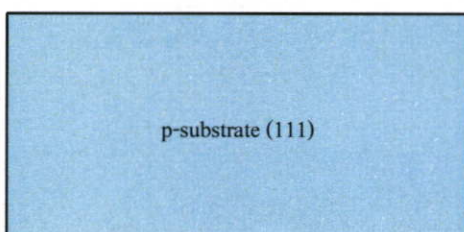


11. กระบวนการซินเทอริงค์ (sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นอัลลอย (Al-Si Alloy) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) ที่ดี และเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

- sintering ที่อุณหภูมิ 500°C N_2 1,000 cc./min. เวลา 12 นาที

4.3.2 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

1. แผ่นผลึกเริ่มต้น (initial wafer) ที่เป็นฐานรอง (substrate) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ผลึกซิลิคอนชนิดพี ที่มีระนาบ (orientation) (111)



2. การทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน (wafer cleaning) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก แบ่งเป็น

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อัลตราโซนิกในน้ำขจัดไอออน เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ดัมในกรดไนตริก (HNO_3) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- ดัมในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ดัมในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ดัมในไตรโคโลโรเอทธีลีน เวลา 10 นาที
- อัลตราโซนิกในอะซิโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างออกไซด์

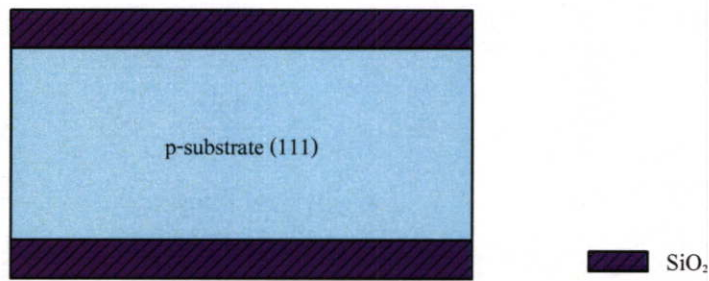
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (diffusion mask of impurity atoms) ใช้อุณหภูมิเตา $1,000^\circ\text{C}$ อุณหภูมิน้ำ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $6,000 \text{ \AA}$

Oxidation

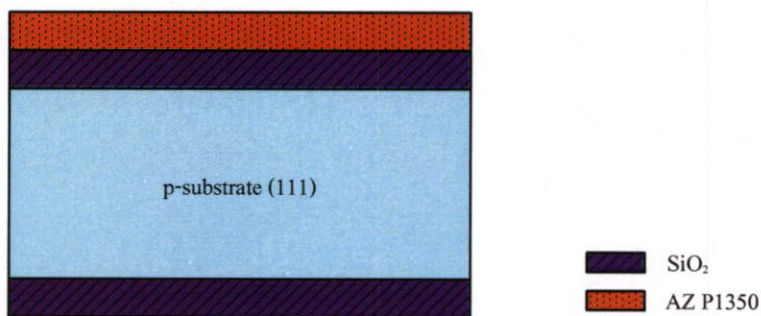
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง



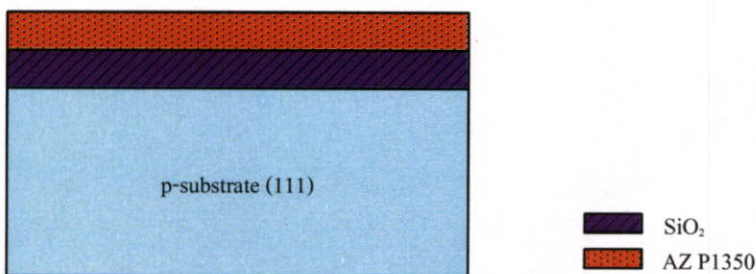
ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณด้านหลังแผ่นเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลัง (back surface field: BSF) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- ทาหน้ายาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching)

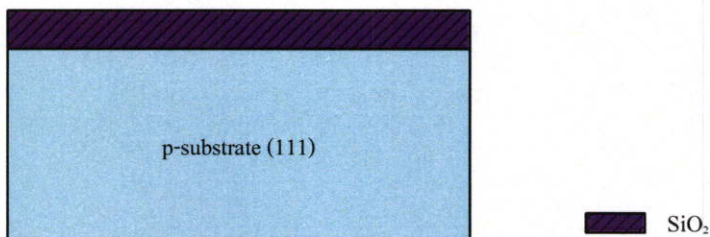
- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation อัตราส่วน HF47%:6NH₄F)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที

- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคโลโรเอทรีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อน

ทำการแพร่สารเจือ

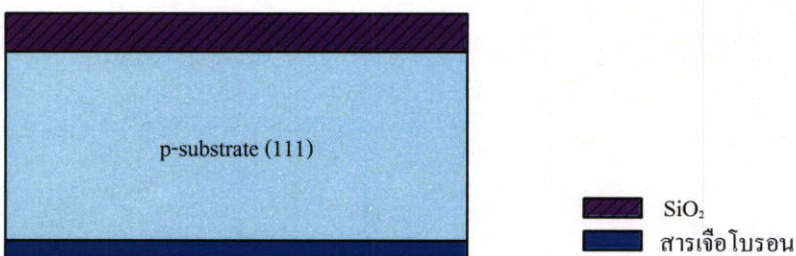
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4. การสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิด

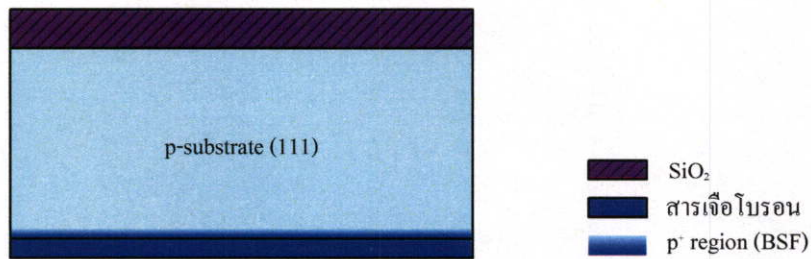
เดียวกับฐานรองที่มีความเข้มข้นสูง

กระบวนการ Pre-deposition

- หยดสารละลายอะตอมสารเจือโบรอน ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ 150°C เวลา 10 นาที

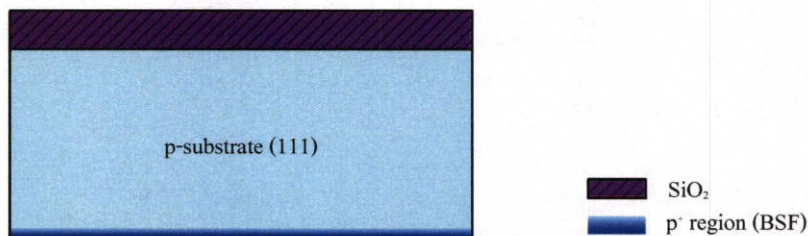


- Boron pre-deposition ที่ 1,000°C N₂ 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที



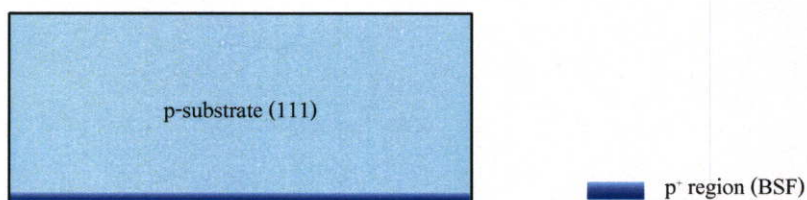
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือโบรอนที่ผิวหน้า

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับโบรอน (HF for boron) 10%
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching) เพื่อลอกออกไซด์หน้าบริเวณด้านหน้าออก เตรียมทำการสร้างออกไซด์ชั้นใหม่พร้อมกับการขับลึก (drive-in) อะตอมสารเจือโบรอน

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for boron อัตราส่วน HF47%:6NH₄F)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคโลโรเอทิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิกในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

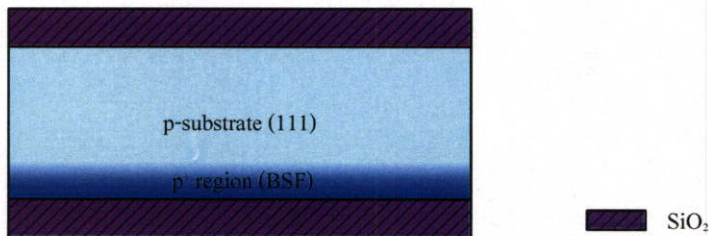
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในขณะที่สร้างรอยต่อพี-เอ็นและเป็นการขับลึก (drive-in) อะตอมโบรอนของสนามไฟฟ้า ด้านหลังไปในตัวด้วย ใช้อุณหภูมิเตา $1,000^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิน้ำ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $7,000 \text{ \AA}$

Oxidation

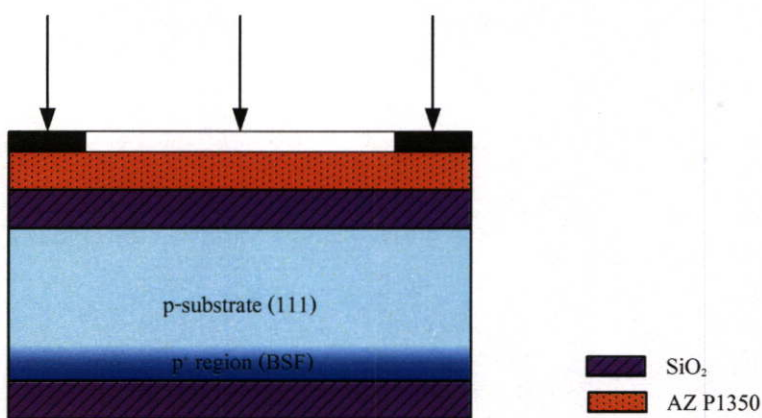
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 3 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 4 ชั่วโมง



6. Photo etching for n^+ -region เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือโฟโต้เอตซิงค์ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เรียกว่า N^+ -region Mask

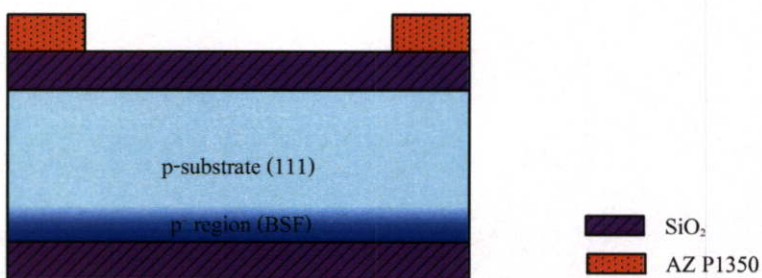
Photolithography Mask#1 (n^+ -region)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว $3,000$ รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง

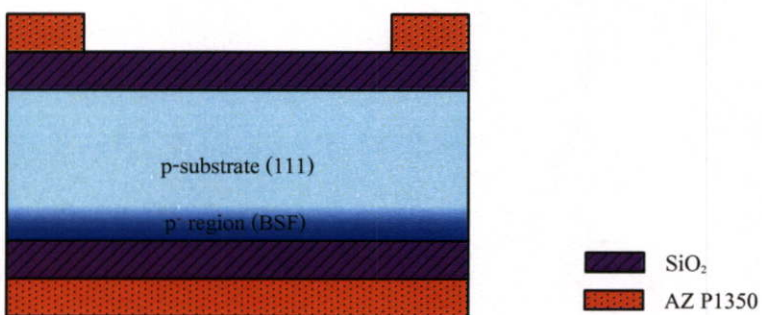


Develop ฟิล์มโดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

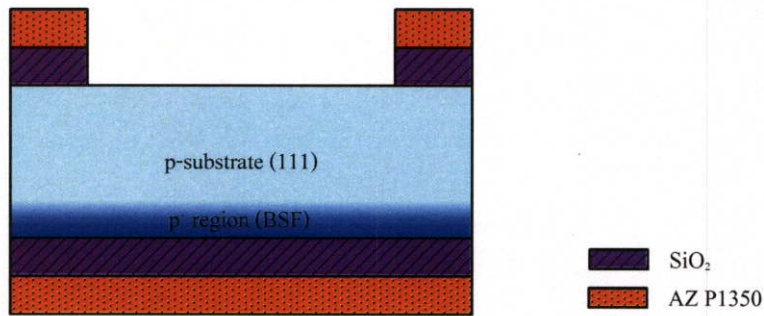


- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



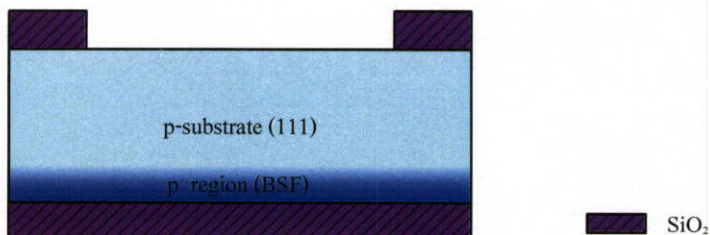
การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (oxide etching) เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับการแพร่สารเจือ

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation อัตราส่วน HF47%:6NH₄F)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคโลโรเอทธีลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

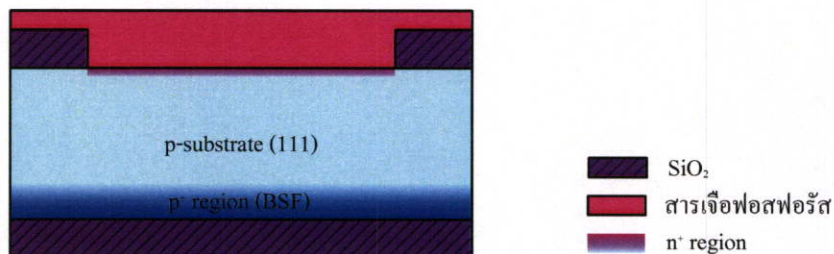
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. การสร้างรอยต่อพี-เอ็นที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดตรงกับข้ามกับฐานรอง ในที่นี้จะเป็นการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตร

กระบวนการ Pre-deposition

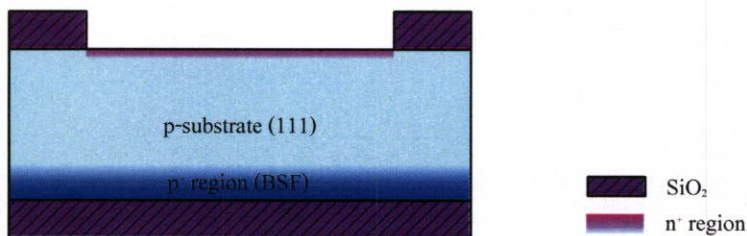
- หยดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ 150°C เวลา 10 นาที



- Phosphorus pre-deposition ที่ 1,000°C N₂ 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที

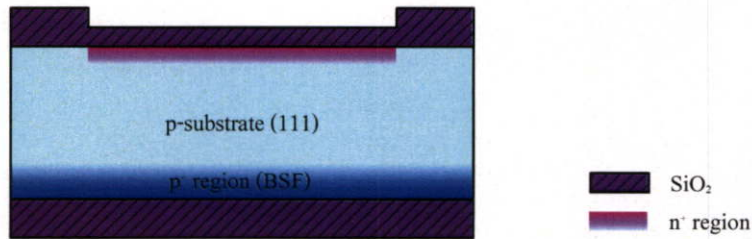
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือฟอสฟอรัสที่ผิวหน้า

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับฟอสฟอรัส 10%
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



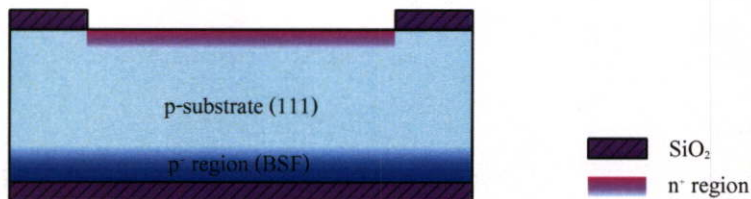
กระบวนการ Drive-in เพื่อขับลึกให้ได้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นตามต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงไปในตัวด้วย ซึ่งชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นมีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม

- Phosphorus drive-in ที่ $1,000^{\circ}\text{C}$ O_2 1,200 cc./min. (Dry), O_2 1,000 cc./min. (Wet)



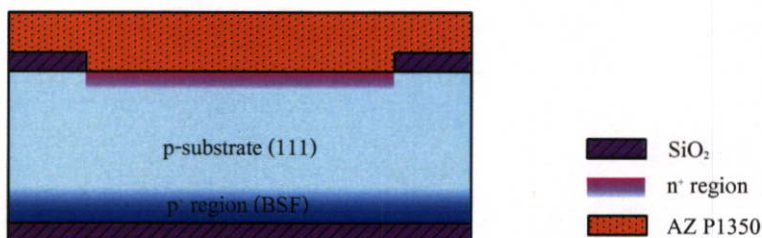
การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (oxide etching) บริเวณด้านหน้าที่มีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม และออกไซด์หน้าบริเวณด้านหลังแผ่นบางส่วนออกเพื่อเตรียมสร้างขั้วสัมผัส

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for phosphorus อัตราส่วน $\text{HF}47\%:6\text{NH}_4\text{F}$)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



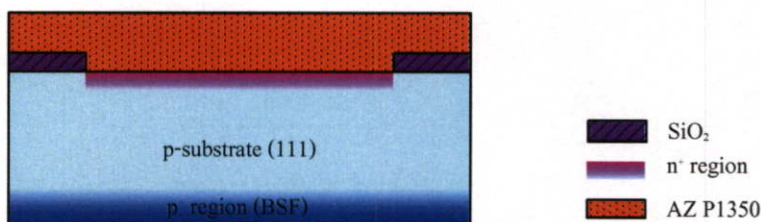
การลอกชั้นออกไซด์บริเวณด้านหลังแผ่นออก เพื่อเตรียมสร้างขั้วสัมผัสด้านหลัง

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- ทาหน้ายาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



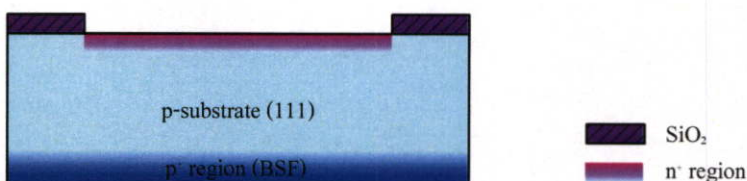
การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (oxide etching)

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for phosphorus อัตราส่วน $\text{HF}47\%:6\text{NH}_4\text{F}$)
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคโลโรเอทิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิกในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

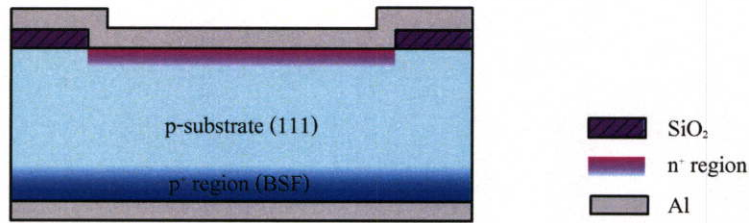
การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการเคลือบชั้นโลหะ

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับฟอสฟอรัส 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

8. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) อลูมิเนียมชั้นที่ผิวทั้งสองด้านของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นของโลหะนี้ได้แก่ อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีความหนาราว 1 ไมโครเมตร เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

การเคลือบชั้นอลูมิเนียม

- ทำการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



9. กระบวนการซินเทอริงค์ (sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นอัลลอย (Al-Si Alloy) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) ที่ดี และเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

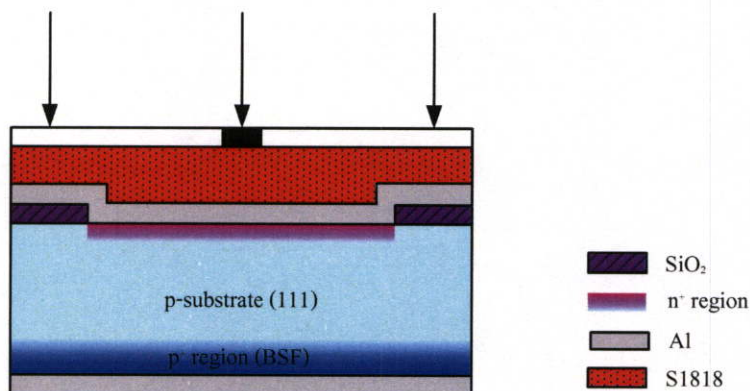
- sintering ที่อุณหภูมิ 500°C N_2 1,000 cc./min. เวลา 12 นาที

10. การเลือกสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ (Selective formation of stain etched porous

silicon) เป็นการสกัดชั้นของอลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) และในขณะเดียวกันก็สร้างพอร์ซซิลิคอนขึ้นเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงไปในตัว โฟโตมาสก์สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ขั้นที่ 2 และเรียกว่า Selective PS & Metal Mask

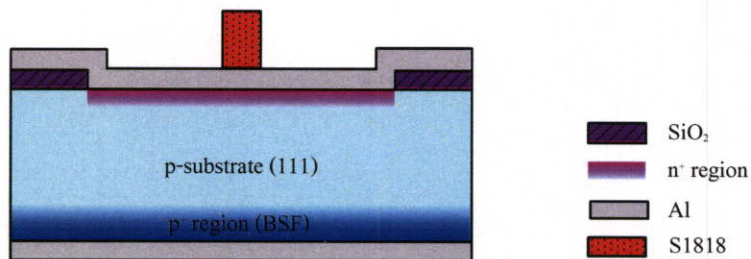
กระบวนการ Photolithography Mask#2 (Selective PS & Metal Mask)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (S1818) ที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 17 นาที
- ฉายแสง เวลา 17 วินาที

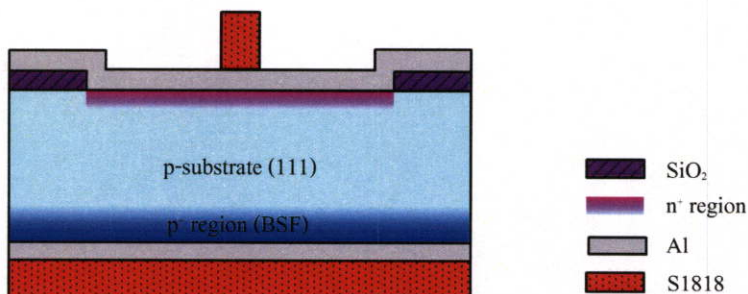


Develop फिल्म โดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 25 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 20 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

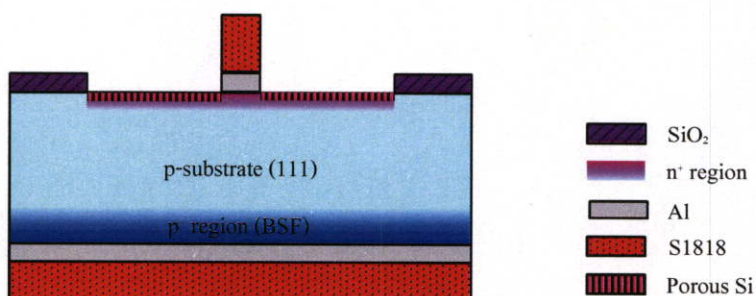


- อบฟิล์มที่ 90 °C เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 120 °C เวลา 30 นาที



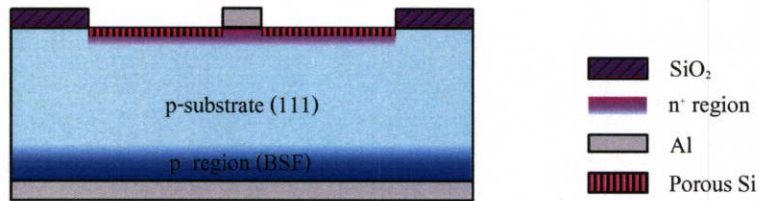
การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน

- จุ่มในสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา 40 วินาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

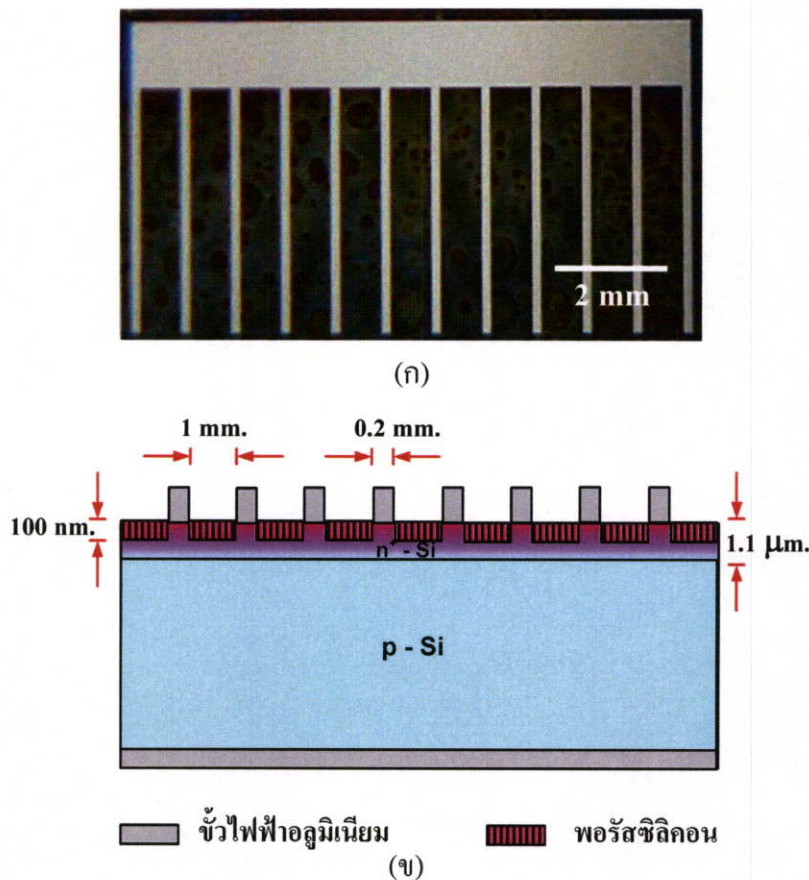


กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำจืดไอออน แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการกัดข้อมือเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่ได้จากกระบวนการสร้างดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (ก) ภาพถ่ายผิวหน้า (ข) ภาพตัดขวาง

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีความเหมาะสมจะนำไปประยุกต์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ควรจะมีกระบวนการสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้เวลาน้อย ราคาประหยัด ชั้นพอร์สซิติคอนมีการสะท้อนแสงที่ต่ำ และไม่ทำความเสียหายให้แก่รอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ด้านล่าง อีกทั้งยังสามารถเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่ได้ด้วย เพื่อที่จะให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว ในบทนี้จึงได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาการสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดข้อมีสึบนผิวซิติคอน และทดสอบคุณสมบัติ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมีสึ และส่วนที่สามเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิติคอนจากการกัดข้อมีสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิติคอน นอกจากนี้ในส่วนท้ายของบทยังมีการนำเสนอกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว (one mask process) อีกด้วย เพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้สูงในการนำชั้นพอร์สซิติคอนจากการกัดข้อมีสึไปใช้แทนชั้นซิติคอนไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิติคอน

5.1 การศึกษาการสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดข้อมีสึบนผิวซิติคอน และทดสอบคุณสมบัติ

การสร้างชั้นพอร์สซิติคอนโดยวิธีการกัดข้อมีสึในการทดลองนี้ กรณีปรกติทำได้โดยการจุ่มแผ่นผลึกซิติคอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF : 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO₃ : 60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ที่มีการเพาะบ่มสารละลายก่อนทำการกัด 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส แผ่นผลึกซิติคอนสามารถใช้ได้ทั้ง ชนิดเอ็น และชนิดพี

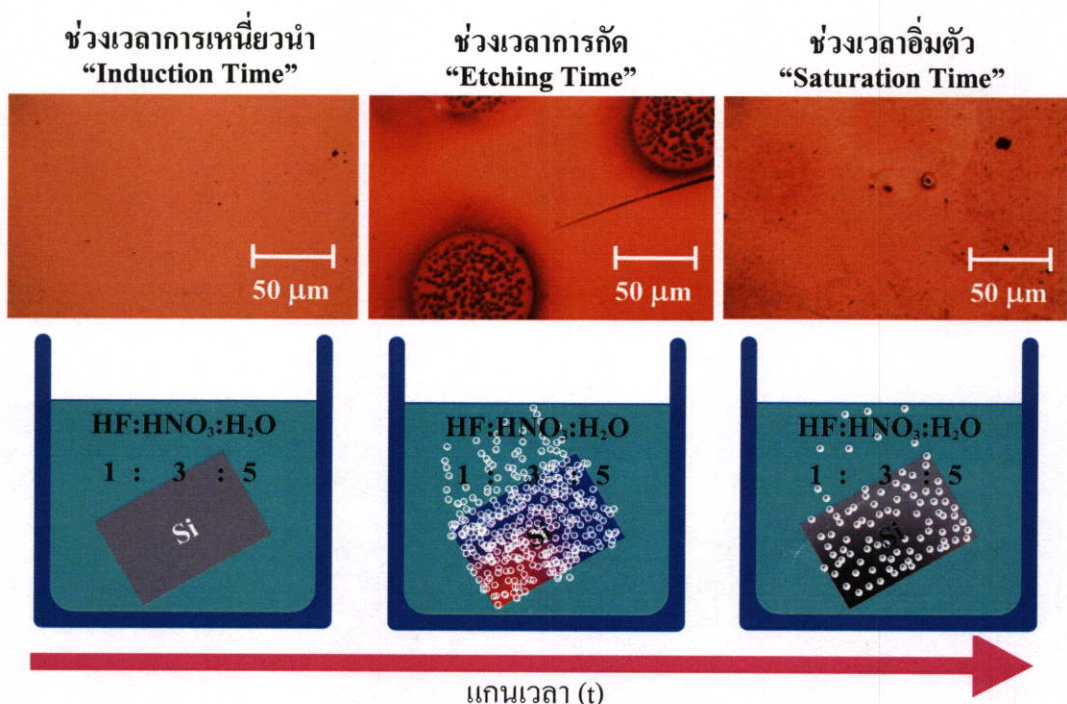
กรณีที่มีการกระตุ้นด้วยแสงขณะทำการกัดข้อมีสึ ใช้แสงจากหลอดทังสเตนขนาด 100 วัตต์ (ความเข้มขณะทำการทดลอง 15,000 lx.) และหลอดฮาโลเจน ขนาด 150 วัตต์ (ความเข้มขณะทำการทดลอง 15,000 lx.) สำหรับเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงที่ใช้ในการหน่วงปฏิกิริยาการเกิดพอร์สซิติคอน คือ อุปกรณ์ทำความสะอาดระบบอัลตราโซนิก ที่มีความถี่ 40 kHz.

คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิติคอนที่คลื่นแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆ ถูกวัดโดยใช้เครื่องวัดความหนาของชั้นฟิล์มบาง (Automatic Thin Film Measurement System Model 120) และถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าการสะท้อนแสงของชั้นซิติคอนไดออกไซด์ที่หนา 1,000 อังสตรอม ซึ่งนิยมใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป

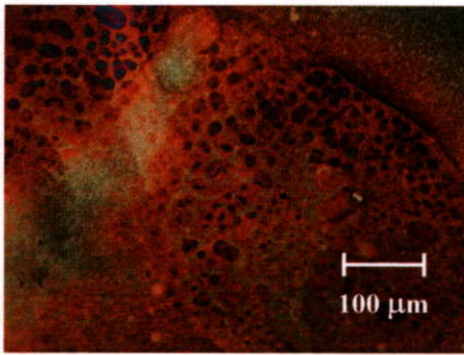
(คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 300 - 6,500 อังสตรอม แสดงในภาคผนวก ก) สำหรับคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ทดสอบโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ได้จากหลอดอัลตราไวโอเล็ต และเครื่องวัดความเข้มของแสงที่ใช้คือ Photocell Illuminator SPI 71

5.1.1 การสร้าง และทดสอบคุณสมบัติของพอร์ซซิลิคอน

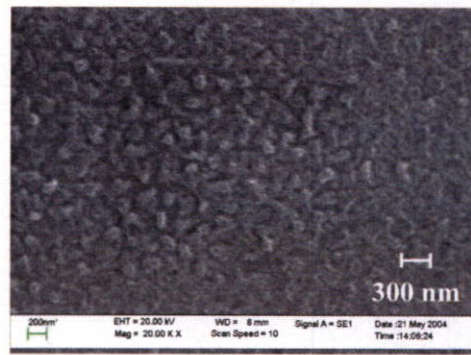
จากการทดลองพบว่า กระบวนการเกิดชั้นพอร์ซบนแผ่นผลึกซิลิคอน โดยวิธีการกัดข้อมีสสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงเวลา แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 คือ ช่วงเวลาแรกภายหลังการจุ่มแผ่นผลึกลงในสารละลาย จะไม่มีปฏิกิริยาใดๆ เกิดขึ้น เรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) ช่วงเวลาที่สอง เป็นช่วงเวลาของการเกิดชั้นพอร์ซ เรียกว่า ช่วงเวลาการกัด (etching time) จะมองเห็นฟองอากาศเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของแผ่นผลึก ซึ่งฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะรวมตัวกันใหญ่ขึ้น และสามารถทำให้แผ่นซิลิคอนลอยขึ้นสู่ผิวด้านบนได้ ขณะเกิดฟองก๊าซจะเริ่มมีสีต่างๆ ปรากฏขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของสีสันเมื่อเวลาผ่านไป และในที่สุดการเปลี่ยนสีจะน้อยลง และคล้ายกับไม่มีการเปลี่ยนสีซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สาม เรียกว่า ช่วงเวลาอิ่มตัว (saturation time) พอร์ซซิลิคอนที่สร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (111) ค่าสภาพความต้านทาน 3.6 $\Omega \cdot \text{cm}$ ผิวหน้ามันวาว ใช้เวลาการกัดข้อมีส 2 นาที มีลักษณะผิวหน้าแสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป เมื่อมองด้วยตาจะเห็นเป็นสีต่างๆ หลายสี ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์การแทรกสอดของคลื่นแสงเนื่องจากชั้นพอร์ซ



รูปที่ 5.1 ช่วงเวลาต่างๆ ในกระบวนการเกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนจากวิธีการกัดข้อมีส



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมสึโดยใช้

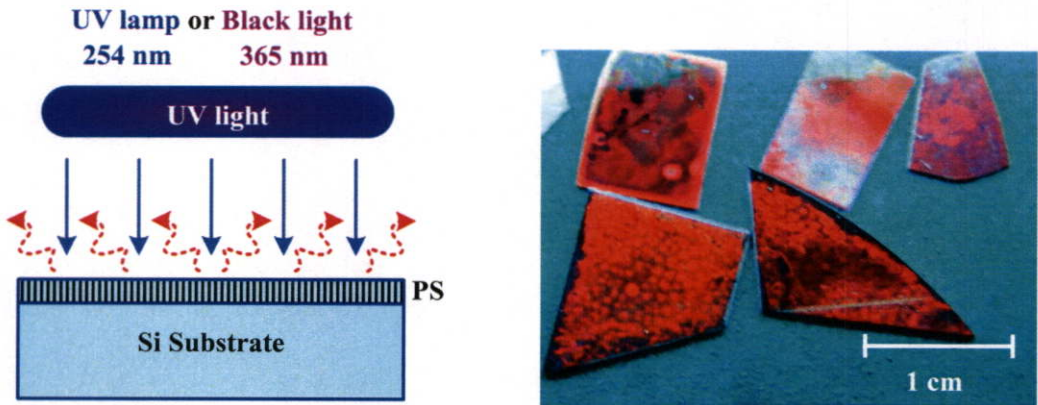
(ก) กล้องไมโครสโคป (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการทดลอง พบว่า ในซิลิคอนชนิดพี เวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสภาพต้านทานเพิ่มขึ้น คือ ค่าสภาพต้านทานในช่วง 0.001 - 0.05 $\Omega\cdot\text{cm}$ ใช้เวลาการเหนี่ยวนำ 5 - 7 วินาที เพิ่มขึ้นเป็น 150 วินาที และ 420 วินาที เมื่อค่าสภาพต้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 0.1 และ 10.5 $\Omega\cdot\text{cm}$ ตามลำดับ และในซิลิคอนชนิดเอ็น เวลาการเหนี่ยวนำจะลดลงเมื่อค่าสภาพต้านทานเพิ่มขึ้น คือ ค่าสภาพต้านทาน 0.06 $\Omega\cdot\text{cm}$ ใช้เวลาการเหนี่ยวนำ 360 วินาที ลดลงเหลือ 150 วินาที เมื่อค่าสภาพต้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 3.6 $\Omega\cdot\text{cm}$

อธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากโฮล (h^+) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้น ค่าสภาพต้านทานที่แตกต่างกันในซิลิคอนชนิดเอ็นและพี เป็นผลมาจากความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ต่างกัน ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นของประจุพาหะส่วนมาก และประจุพาหะส่วนน้อยโดยตรง ยิ่งค่าสภาพต้านทานในซิลิคอนชนิดพีต่ำลงมากเท่าใด ประจุพาหะส่วนมาก (โฮล) ก็ยังมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นง่ายและเร็ว ช่วงเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) จึงน้อยกว่าในซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพต้านทานสูง ในทางตรงกันข้าม ค่าสภาพต้านทานในซิลิคอนชนิดเอ็นยิ่งเพิ่มขึ้นมากเท่าใด ประจุพาหะส่วนน้อยซึ่งคือ โฮล จะยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เร็วกว่าในซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานต่ำ (ประจุพาหะส่วนมากคือ อิเล็กตรอน มีค่ามากกว่าประจุพาหะส่วนน้อยมากๆ) ช่วงเวลาการเหนี่ยวนำจึงลดลง

จึงอาจสรุปได้ว่า ชนิดของอะตอมสารเจือและค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมาสร้างชั้นพอร์ส มีผลโดยตรงต่อเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) ให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้น

จากการทดสอบคุณสมบัติโฟลลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างได้ ภายใต้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) พบว่า พอร์สซิลิคอนสามารถเรืองแสงได้เป็นอย่างดี โดยให้สีในช่วงสีแดงและสีส้มขึ้นกับความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้น ดังในรูปที่ 5.3 และความเข้มของแสงที่เปล่งจากชั้นพอร์สจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มของแสงอัลตราไวโอเลต

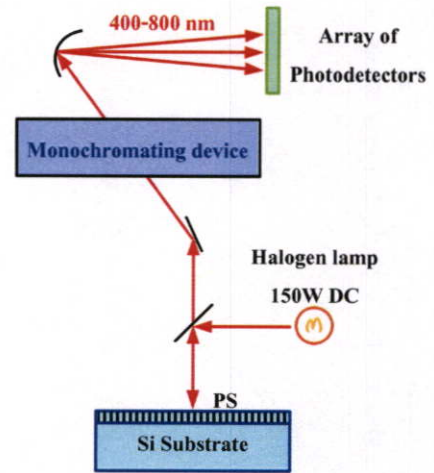


รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิลิคอน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติโฟลลูมิเนสเซนซ์ ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต

คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ในช่วง 400 - 800 นาโนเมตร ของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร ถูกวัด และเปรียบเทียบกับผิวเดิมของซิลิคอน ขณะที่ยังไม่มีชั้นพอร์ส โดยใช้เครื่องวัดความหนาของชั้นฟิล์มบาง (Automatic Thin Film Measurement System Model 120) ที่แสดงในรูปที่ 5.4 ผลการทดลองพบว่า ผิวหน้าเดิมของซิลิคอนมีการสะท้อนแสงโดยเฉลี่ยสูงกว่า 50% แต่ชั้นพอร์สมีการสะท้อนแสงที่ต่ำมาก โดยต่ำสุดเพียง 20% ในช่วง 500 - 700 นาโนเมตร ดังในรูปที่ 5.5 นอกจากนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการสะท้อนแสงของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่หนา 1,000 อังสตรอม ซึ่งนิยมใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป พบว่า ชั้นพอร์สซิลิคอนนี้มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำและใกล้เคียงกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าชั้นพอร์สซิลิคอนมีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงแทนซิลิคอนไดออกไซด์ได้

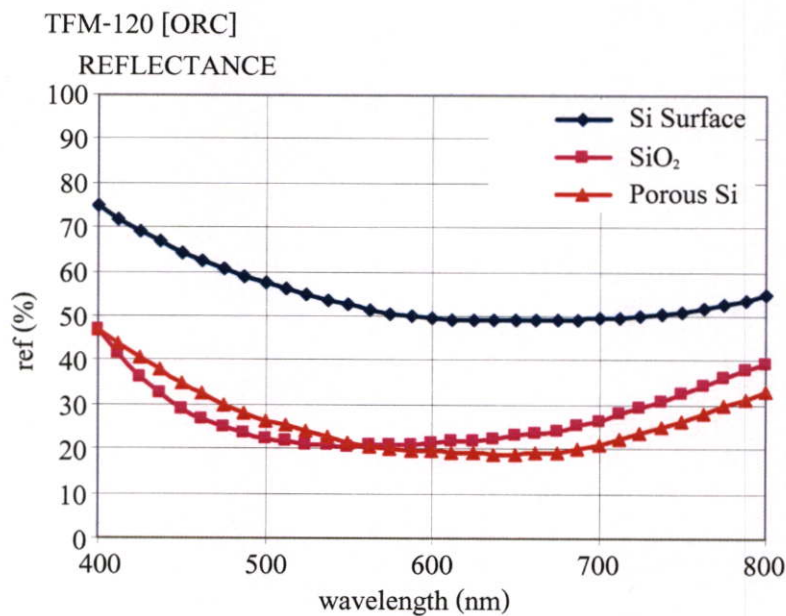


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.4 (ก) การวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยใช้เครื่องวัดความหนาของชั้นฟิล์มบาง (ข) แผนภาพการวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสง

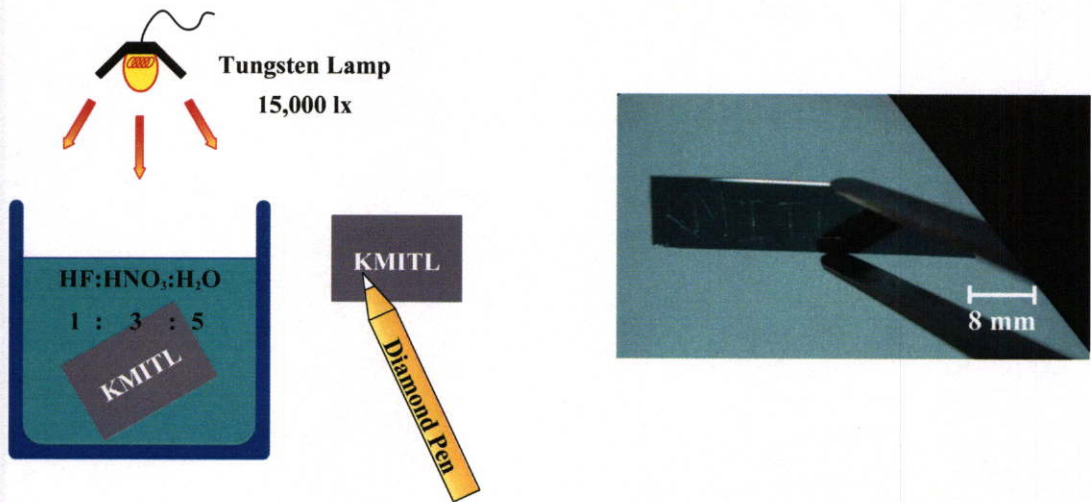


รูปที่ 5.5 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นซิลิคอน พอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

5.1.2 ผลของสภาพพื้นผิวของผลึกซิลิคอนที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน

เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวของผลึกซิลิคอนที่มีผลต่อการเกิดชั้นพอร์ส ได้มีการทดลองโดยนำแผ่นซิลิคอนที่มีผิวหน้าเรียบมันวาว มาขีดเขียนให้เป็นรอยด้วยปากกาหัวเพชร (diamond pen) ดังรูปที่ 5.6 แล้วทำการกัดข้อมสัตามปกติ พบว่า บริเวณผิวผลึกซิลิคอนที่มีรอยขีดข่วนจะเกิดชั้นพอร์ส

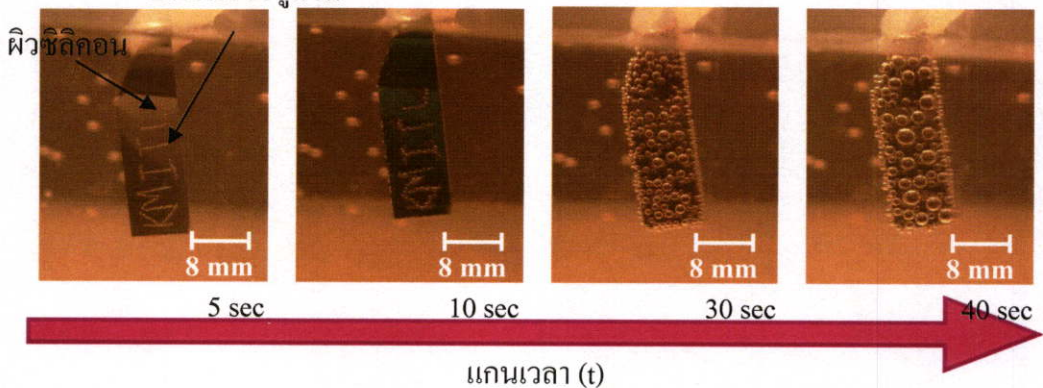
ขึ้นก่อนบริเวณที่มีผิวเรียบ เป็นผลมาจากบริเวณที่มีรอยขูดขีดจะมีพื้นผิวขรุขระ และมีความไม่สมบูรณ์ของผิวผลึกซิลิคอนทำให้ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายในบริเวณผิวขรุขระ ก่อนบริเวณที่มีผิวเรียบสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ผลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะบริเวณที่ต้องการได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการสร้างลวดลายของชั้นพอร์สซิลิคอนในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ได้



รูปที่ 5.6 การทดลองผลของสภาพพื้นผิวหน้าที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน

การเกิดชั้นพอร์สซิลิคอน

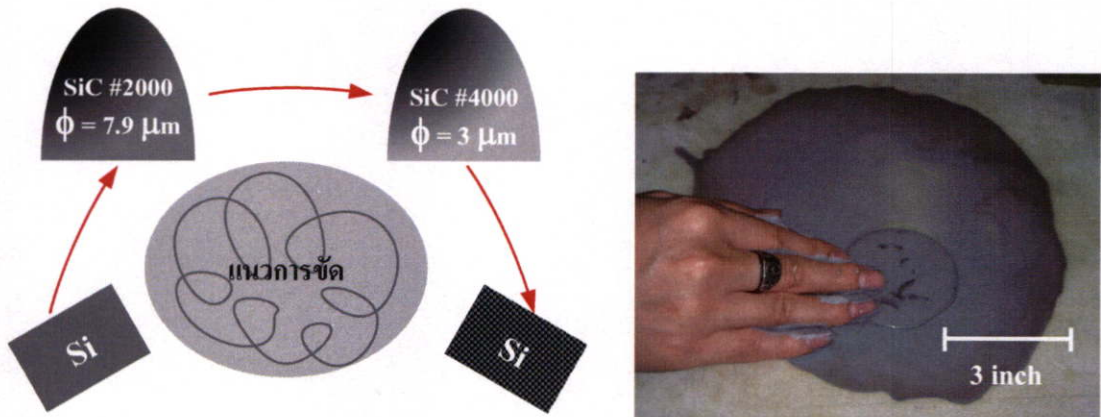
บริเวณรอยขูดขีด



รูปที่ 5.7 การเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนที่บริเวณพื้นผิวขรุขระ

เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่มีผิวเรียบมันวาว (mirror surface) และผิวขรุขระ (rough surface) ได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพี ระนาบ (111) ค่าสภาพความต้านทาน $0.16 \Omega \cdot \text{cm}$ ผิวหน้ามันวาว ทำการกัดข้อมสี่ตามปรกติ เปรียบเทียบกับแผ่นที่มีผิวหน้า

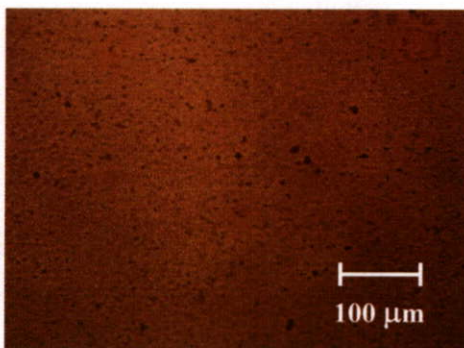
ขรุขระจากการขัดด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ดังรูปที่ 5.8 ด้วยเบอร์ 2000 และเบอร์ 4000 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผงขัด 7.9 ไมโครเมตร และ 3 ไมโครเมตร ตามลำดับ พบว่า ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ขรุขระจะเกิดชั้นพอร์สขึ้นก่อนผิวหน้าที่เรียบมันวาว โดยผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่เรียบมันวาวจะเริ่มเกิดชั้นพอร์สที่เวลา 160 วินาที ในขณะที่ผิวขรุขระใช้เวลาเริ่มเกิดเพียง 90 วินาที ซึ่งเวลาของการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนเร็วกว่าในกรณีผิวเรียบประมาณ 1.8 เท่า ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส และภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์สบนผิวซิลิคอนขรุขระ แสดงดังรูปที่ 5.9



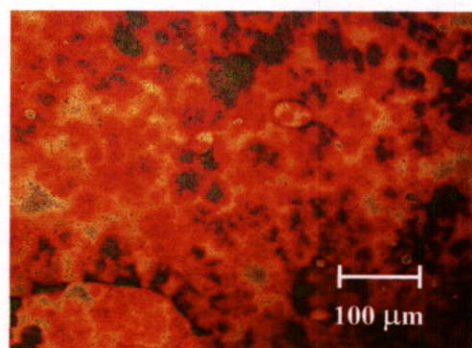
รูปที่ 5.8 การขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)

เวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส (วินาที)	ผิวเรียบ (Mirror surface)	ผิวขรุขระ (Rough surface)
		160 วินาที

(ก)



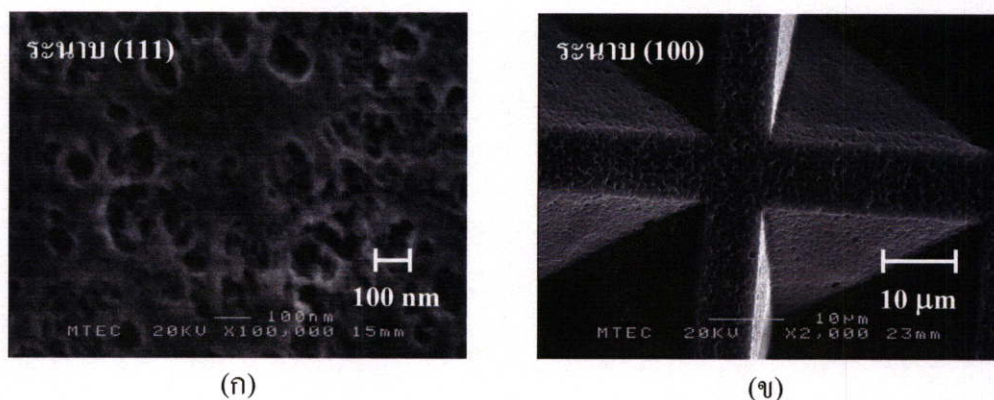
(ข)



(ค)

รูปที่ 5.9 (ก) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส (ข) ภาพถ่ายผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจากการขัดด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยกล้องไมโครสโคปก่อนการกัดข้อมสี่ (ค) ภายหลังจากการกัดข้อมสี่

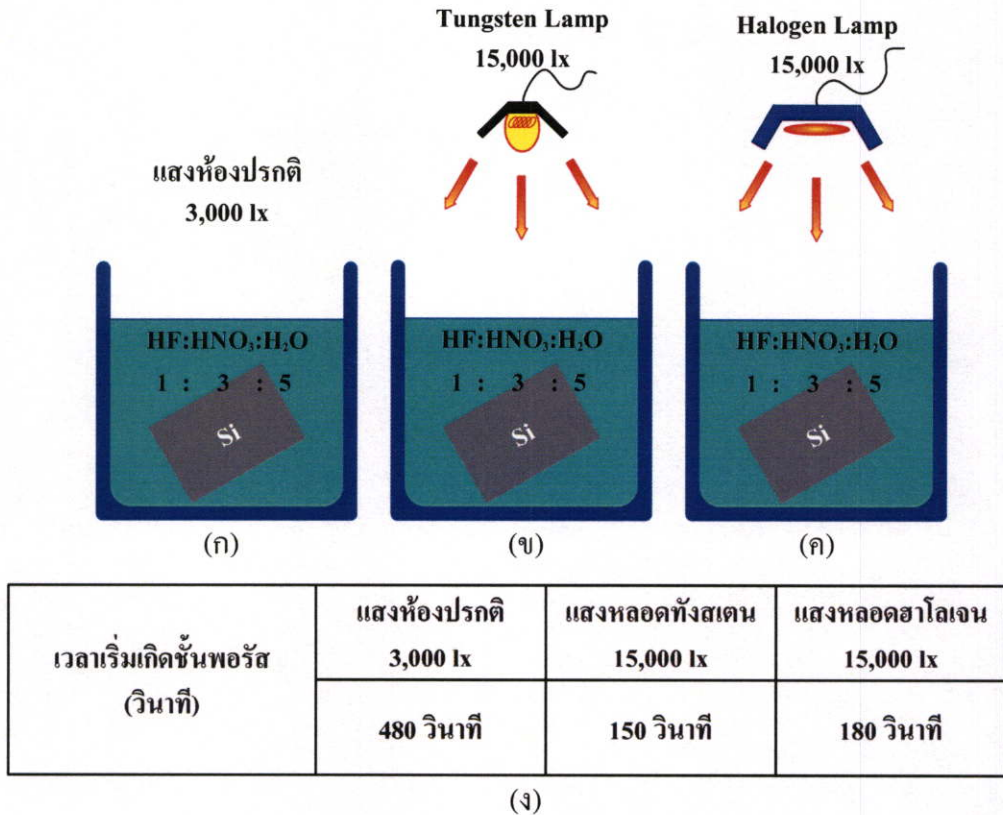
เพื่อศึกษาผลของระนาบผลึกซิลิคอนที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน ได้ทำการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นในแผ่นซิลิคอนชนิดพี ที่มีระนาบ (111) และระนาบ (100) ที่มีค่าสภาพต้านทาน $0.001 \Omega \cdot \text{cm}$ และ $5 - 10 \Omega \cdot \text{cm}$ ตามลำดับ ทำการกัดข้อมสี่ตามปกติ พบว่า กระบวนการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนบนแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) และลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 5.10 เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนในผลึกซิลิคอนระนาบ (111) ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็นชัดว่า ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากวิธีการกัดข้อมสี่ นอกจากจะสร้างขึ้นบนผิวซิลิคอนระนาบ (111) ได้แล้ว ยังสามารถสร้างขึ้นบนผิวซิลิคอนระนาบ (100) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน ในขณะที่การกัดผิวหน้าด้วยสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สามารถกระทำได้เฉพาะฐานรองที่มีระนาบ (100) เท่านั้น



รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ก) บนผิวซิลิคอนระนาบ (111) (ข) บนผิวซิลิคอนระนาบ(100)

5.1.3 ผลของแสง อุณหภูมิ คลื่นเสียงความถี่สูง ที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน

เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการเกิดพอร์สซิลิคอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยการฉายแสงขณะทำการกัดข้อมสี่ ได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ (111) ค่าสภาพความต้านทาน $4 - 10 \Omega \cdot \text{cm}$ ผิวหน้าเรียบมันวาว โดยใช้สารละลายปกติซึ่งในขณะที่ทำการกัดข้อมสี่ได้มีการฉายแสงจากหลอดทั้งสแตน (ความเข้ม 15,000 ลักซ์) หลอดฮาโลเจน (ความเข้ม 15,000 ลักซ์) และเปรียบเทียบกับการใช้แสงภายในห้องปกติ (3,000 ลักซ์) ดังรูปที่ 5.11

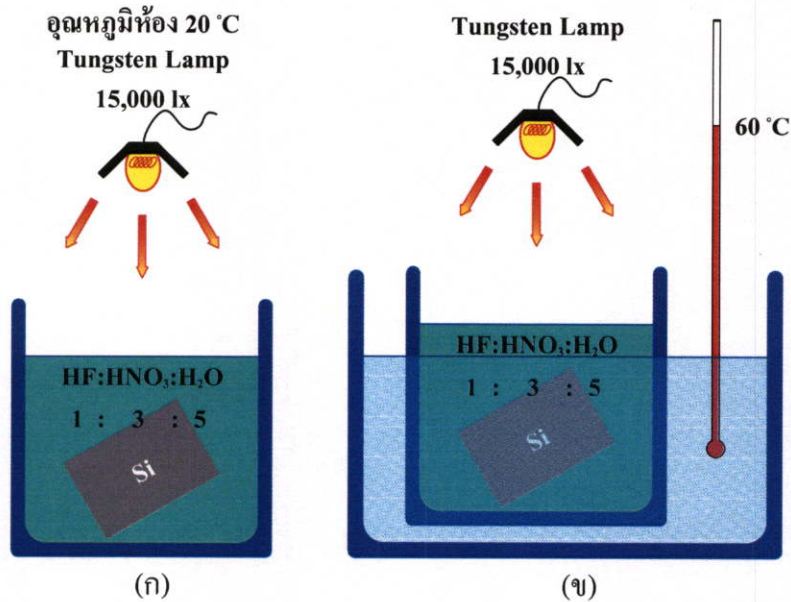


รูปที่ 5.11 การทดลองผลของแสงที่มีต่อการเกิดพอร์ซซิลิคอน (ก) แสงห้องปรกติ (ข) แสงจากหลอดทังสแตน (ค) แสงจากหลอดฮาโลเจน (ง) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ซ

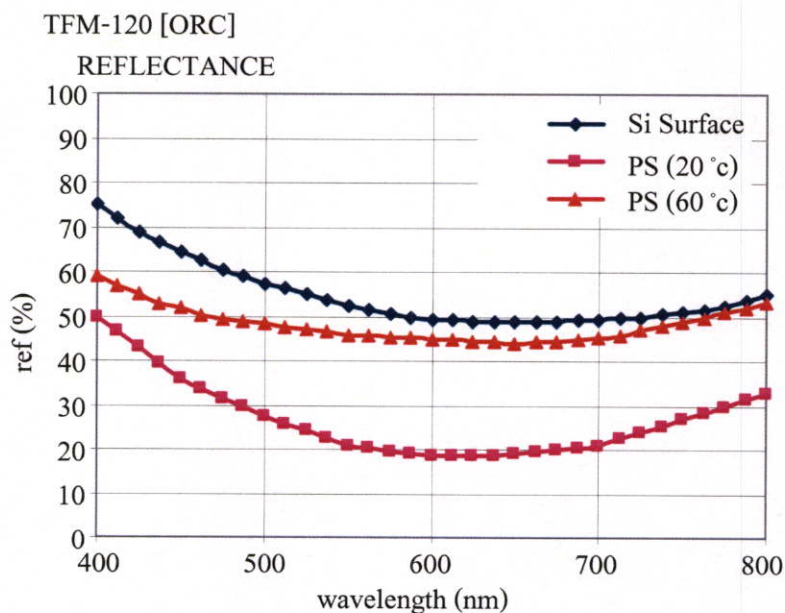
จากการทดลองพบว่า การฉายแสงทั้งจากหลอดทังสแตนและหลอดฮาโลเจน ทำให้มีการเกิดพอร์ซซิลิคอนที่สม่ำเสมอและเร็วกว่าการใช้แสงในห้องปรกติราว 3 เท่า กล่าวคือ การใช้แสงจากห้องปรกติจะใช้เวลาการเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เวลา 480 วินาที ลดลงเหลือ 150 และ 180 วินาที เมื่อมีการฉายแสงจากหลอดทังสแตนและหลอดฮาโลเจน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 (ง) ซึ่งผลดังกล่าวอธิบายได้ว่า แสงหรือโฟตอนเมื่อถูกดูดกลืนด้วยอะตอมสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และ โฮลที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์ซได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่า คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการใช้แสงกระตุ้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่การสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแสงของหลอดทังสแตนจะมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ที่ดีกว่าชั้นพอร์ซที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแสงของหลอดฮาโลเจนเล็กน้อย

การศึกษาผลของอุณหภูมิสารละลายที่มีต่อการสร้างพอร์ซซิลิคอน ได้ทำการทดลองโดยการกักข้อมสี ด้วยสารละลายปรกติที่ถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ใช้เวลาการกักข้อมสีนาน 5 นาที ดังรูปที่ 5.12 พบว่า ช่วงเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) และลักษณะภายนอกของชั้นพอร์ซที่ได้ไม่แตกต่างกัน คือ ใช้เวลาการเหนี่ยวนำให้เกิดชั้น

พอร์สที่ 150 วินาทีเท่ากัน แต่ชั้นพอร์สที่ได้จากสารละลายอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ให้คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ดีกว่าชั้นพอร์สที่ได้จากสารละลายอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5.13

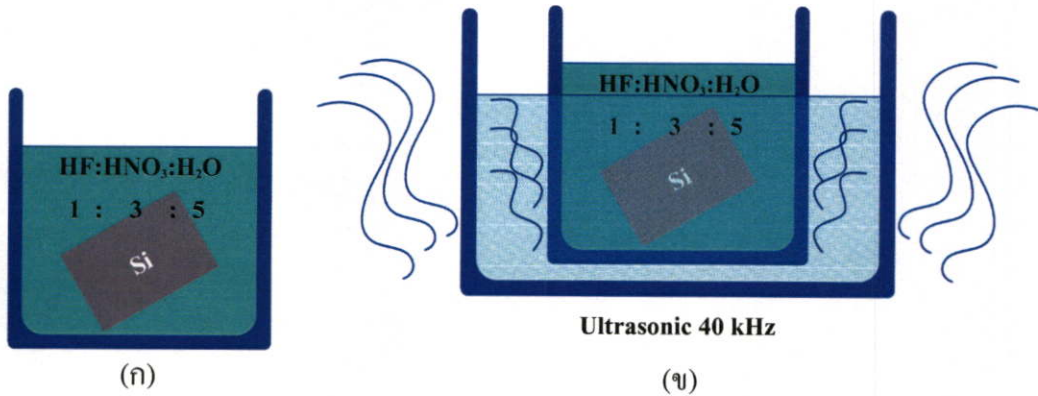


รูปที่ 5.12 การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน (ก) อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.13 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดด้วยสลิ ที่อุณหภูมิต่างกัน

สำหรับการศึกษาผลของคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน ได้ทำการทดลอง โดยการกัดข้อมสี่ ผลึกซิลิคอนชนิดพี ค่าสภาพต้านทาน $0.001 \Omega \cdot \text{cm}$ ในอุปกรณ์ทำความสะอาดด้วยระบบคลื่นเสียงความถี่สูง (sonication) ใช้เวลาการกัดข้อมสี่นาน 40 วินาที ดังรูปที่ 5.14



เวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส (วินาที)	ไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (without Sonication)	ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication)
		7 วินาที

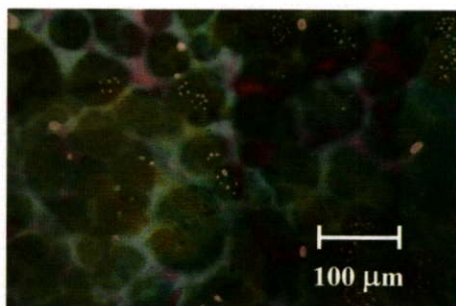
(ค)

รูปที่ 5.14 การทดลองผลของคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน (ก) ไม่มีการทำ sonication (ข) มีการทำ sonication ขณะการกัดข้อมสี่ (ค) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส

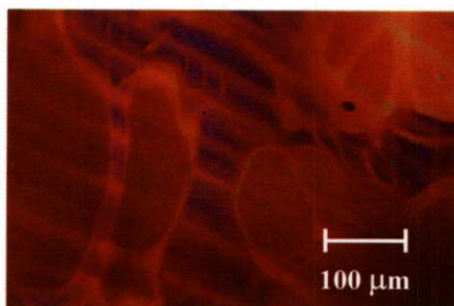
จากการทดลองพบว่า อัตราการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการรบกวนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง กล่าวคือ เวลาการเหนี่ยวนำที่ใช้จะเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ 7 วินาที (ขณะไม่มีการทำ sonication) เป็น 15 วินาที (ขณะมีการทำ sonication) ดังแสดงในรูปที่ 5.14 (ค) และเมื่อพิจารณากระบวนการเกิดจะพบอีกว่า ลักษณะฟองก๊าซที่ผิวหน้าผลึกซิลิคอนขณะเกิดชั้นพอร์ส จะเกิดขึ้นปริมาณน้อย มีขนาดเล็ก และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็วกว่าการไม่รบกวนด้วยคลื่นความถี่สูง ซึ่งผลดังกล่าวอาจนำไปใช้ประโยชน์เป็นวิธีการหน่วงปฏิกิริยาการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนได้

นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะของชั้นพอร์สที่ได้จากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงจะมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง เป็นผลมาจากคลื่นเสียงความถี่สูงจะรบกวนฟองก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ทำให้ฟองที่เกิดมีขนาดเล็ก สม่ำเสมอ และลอยขึ้นสู่ผิวได้เร็ว จึงช่วยทำให้ชั้นพอร์สที่ได้มีความสม่ำเสมอดีกว่า ซึ่งภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าจากกล้องไมโครสโคป และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงได้ดังรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่เวลาการกัด

ย่อมดีเดียวกัน พบว่า ชั้นพอร์ซซิติคอนที่ไม่มีการรบกวนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงจะมีการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าชั้นพอร์ซซิติคอนที่ถูกรบกวนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงขณะทำการกัดข้อมลีส ซึ่งเป็ผลมาจาก อัตราการเกิดชั้นพอร์ซซิติคอนที่ลดลงนั่นเอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์ซซิติคอนที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป

(ก) ไม่มีการทำ sonication (ข) มีการทำ sonication ขณะสร้างชั้นพอร์ซ



(ก)



(ข)

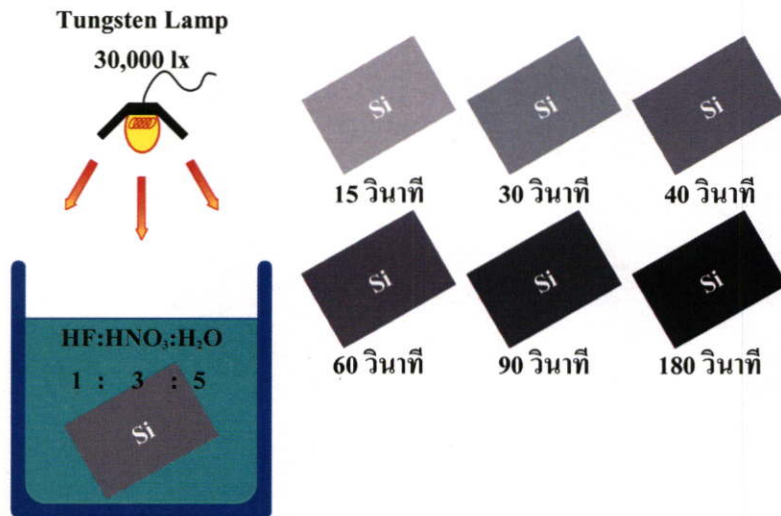
รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์ซซิติคอนที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องกราด (ก) ไม่มีการทำ sonication (ข) มีการทำ sonication ขณะสร้างชั้นพอร์ซ

5.1.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซซิติคอน

เพื่อศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซซิติคอน ได้ทำการทดลองโดยการจุ่มแผ่นผลึกซิติคอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF : 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO₃ : 60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ที่มีการเพาะบ่มสารละลายก่อนทำการกัด 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส โดยใช้แผ่นผลึกซิติคอนฐานรองชนิดพี ระนาบ (111) ค่าสภาพต้านทาน 0.001 Ω.cm ที่ทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำการแพร่ขับลึก (drive in) ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที เพื่อให้ได้

ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นสูง (n^+ -region) และเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น ใช้แสงจากหลอดทังสเตนขนาด 60 วัตต์ (ความเข้มแสงขณะทำการทดลอง 30,000 ลักซ์) กระตุ้นขณะทำการกัดข้อมลิต โดยใช้เวลาในการกัดข้อมลิตต่างๆ กัน คือ 15 วินาที 30 วินาที 40 วินาที 60 วินาที 90 วินาที และ 180 วินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 การทดลองผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอน

จากการทดลอง พบว่า ช่วงเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) ให้เกิดชั้นพอร์ซิลิคอนอยู่ที่ 5 วินาที แล้วจึงเริ่มเข้าสู่ช่วงเวลาที่สอง (etching time) คือ เกิดฟองก๊าซขนาดเล็กละเอียดบนผิวของแผ่นผลึกซึ่งเริ่มมีสีต่างๆ ปรากฏขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนสีเมื่อเวลาผ่านไป และในที่สุดการเปลี่ยนสีจะน้อยลง และคล้ายกับไม่มีการเปลี่ยนสีซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สาม เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 นาที ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซิลิคอนจากการกัดข้อมลิตที่เวลาต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 5.18 ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป และเมื่อใช้เวลากัดที่นานขึ้น ความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยชั้นพอร์ลิตที่ดียังให้คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) เหมือนเดิม



เวลา 15 วินาที



เวลา 30 วินาที



เวลา 40 วินาที



เวลา 60 วินาที



เวลา 90 วินาที

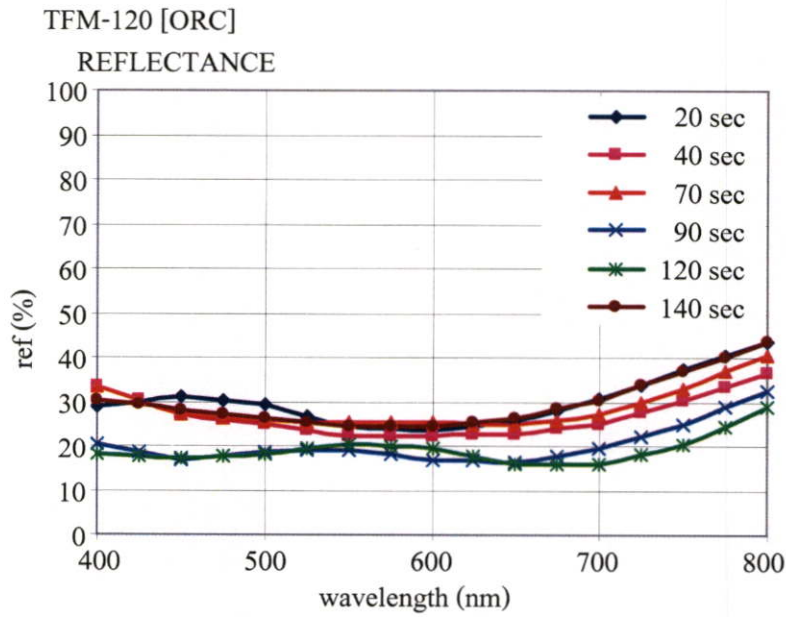


เวลา 180 วินาที

รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ได้จากการกักข้อมสีที่เวลาต่างๆ กัน

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ในช่วง 400 - 800 นาโนเมตร ของชั้นพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกักข้อมสีที่เวลาต่างๆ กัน พบว่า ช่วงเวลา 20 - 70 วินาที คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สที่ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 25 - 30% แต่ในช่วงเวลา 90 - 120 วินาที ชั้นพอร์สจะมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 20% โดยเฉลี่ย และถ้าใช้เวลาการกักมากกว่า 120 วินาที คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 5.19 ซึ่งเป็นผลมาจากเวลาการกักที่นานขึ้น เนื้อซิลิคอนจะถูกละลายเพิ่มขึ้น ทำให้

ความพรุนของชั้นพอร์สมากขึ้น จนเมื่อเนื้อซิลิคอนถูกละลายไปมากเข้าๆ บริเวณนั้นก็จะมึลักษณะคล้ายกับเมื่อเริ่มเกิดพอร์สซิลิคอนใหม่ๆ คือ พื้นผิวยังไม่มีความพรุนมากนักจึงทำให้คุณสมบัติการสะท้อนแสงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกัดข้อมสึควรจะอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 40 - 120 วินาที

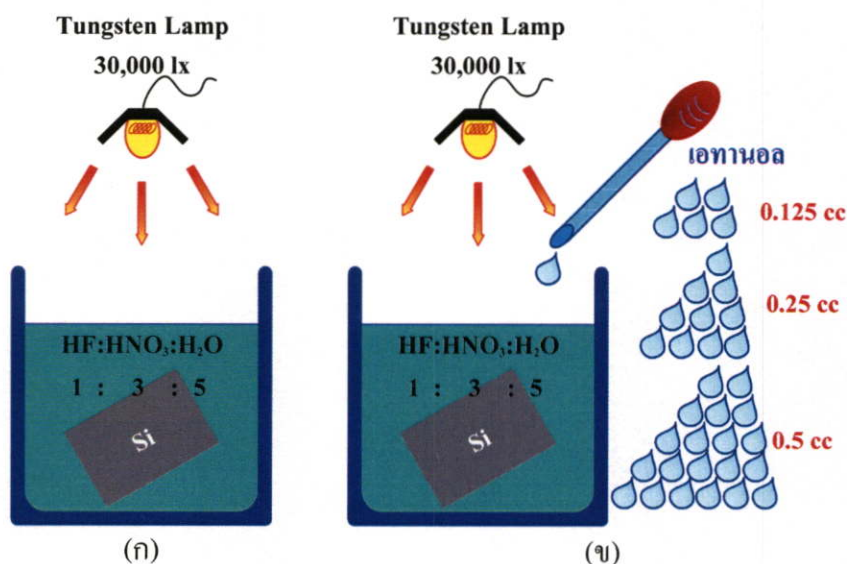


รูปที่ 5.19 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ จากการกัดข้อมสึ ที่เวลาต่างๆ กัน

5.1.5 ผลของเอทานอลที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน

เพื่อศึกษาผลของเอทานอลในสารละลายที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน ได้ทำการทดลองโดยการจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF : 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO₃ : 60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ที่มีการเติมเอทานอล (ethanol) ปริมาตร 0.125 0.25 และ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริกปริมาตร 90 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ (เอทานอล 1 หยด มีปริมาตร 0.025 ลูกบาศก์เซนติเมตร) มีการเพาะบ่มสารละลายก่อนทำการกัด 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส โดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนฐานรองชนิดพี ระนาบ (111) ค่าสภาพต้านทาน 0.001 Ω.cm ที่ทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำการแพร่ขับลึก (drive in) ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที เพื่อให้ได้ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นสูง (n⁺-region)

และเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น ใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ (ความเข้มแสงขณะทำการทดลอง 30,000 ลักซ์) กระตุ้นขณะทำการกัดโดยใช้เวลา 40 วินาที ดังรูปที่ 5.20

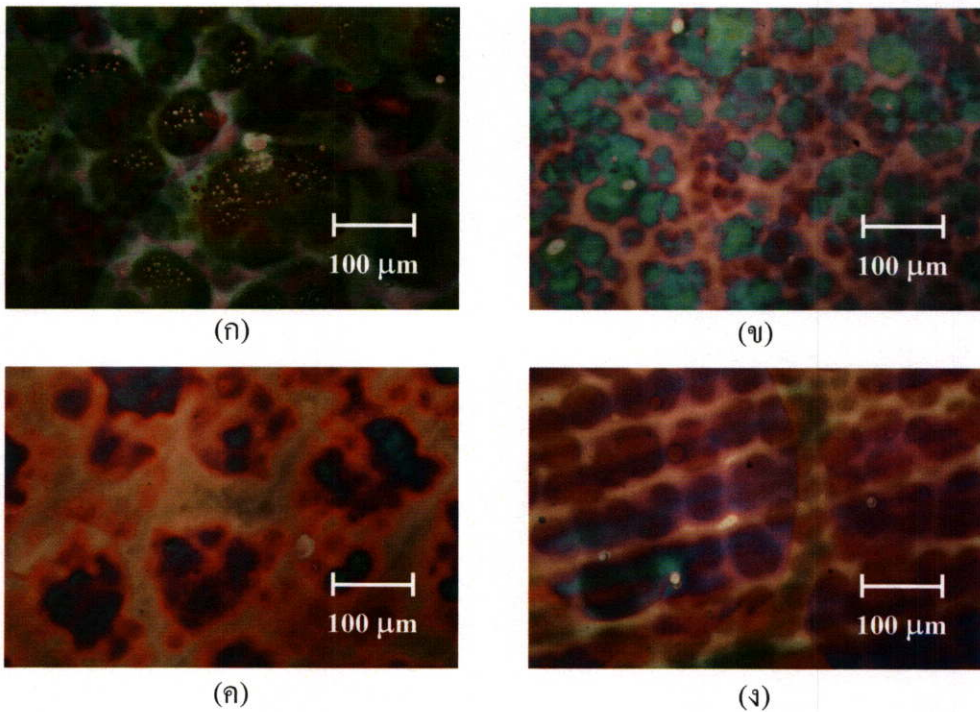


เวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ซ (วินาที)	สารละลายที่ไม่ผสมเอทานอล	ผสมเอทานอล 0.125 cc	ผสมเอทานอล 0.25 cc	ผสมเอทานอล 0.5 cc
	5 วินาที	5 วินาที	3 วินาที	เกิดขึ้นทันที

(ค)

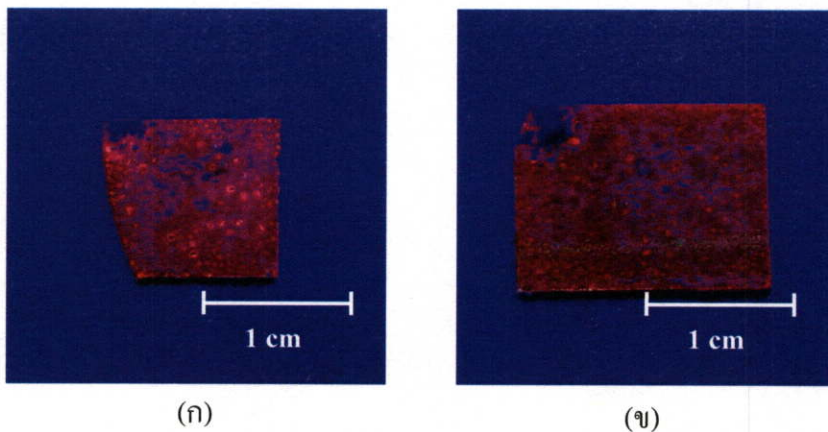
รูปที่ 5.20 การทดลองผลของเอทานอลที่มีต่อการเกิดพอร์ซซิลิคอน (ก) ไม่ผสมเอทานอลในสารละลาย (ข) ผสมเอทานอลในสารละลาย (ค) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ซ

จากการทดลอง พบว่า อัตราการเกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนจะเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการผสมเอทานอลในสารละลาย กล่าวคือ ในสารละลายที่ไม่ผสมเอทานอลจะใช้เวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) ให้เกิดชั้นพอร์ซที่ 5 วินาที ในขณะที่ สารละลายที่ผสมเอทานอลปริมาตร 0.125 0.25 และ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริกปริมาตร 90 ลูกบาศก์เซนติเมตรจะใช้เวลาการเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นพอร์ซที่ 5 วินาที 3 วินาที และเกิดขึ้นทันที ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5.20 (ค) อีกทั้งยังพบว่า ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดด้วยสียในสารละลายที่ผสมเอทานอลจะมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ดีกว่ากรณีที่ไม่ผสมเอทานอลในสารละลาย เนื่องจากเอทานอลจะช่วยลดแรงตึงผิวของสารละลาย ทำให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไม่เกาะที่ผิวหน้าของซิลิคอน ซึ่งภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าจากกล้องไมโครสโคปแสดงดังรูปที่ 5.21

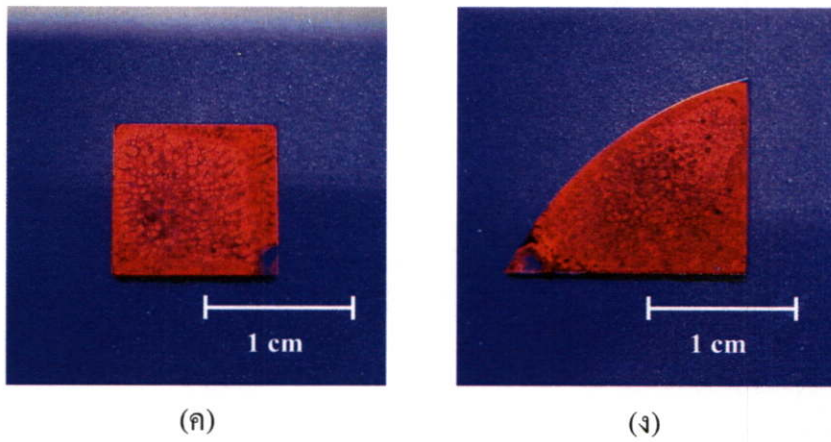


รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิติคอนที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป
 (ก) ไม่ผสมเอทานอล (ข) ผสมเอทานอล 0.125 cc (ค) ผสมเอทานอล 0.25 cc
 (ง) ผสมเอทานอล 0.5 cc

นอกจากนี้ เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ยังพบอีกว่า ความเข้มของแสงที่เปล่งจากชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้จากการกักข้อมสีในสารละลายที่ผสมเอทานอลจะเพิ่มขึ้น และมีความสม่ำเสมอมากกว่า แสดงได้ดังรูปที่ 5.22 ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการเกิดของชั้นพอร์สซิติคอนจะเร็วกว่า ในสารละลายที่ผสมเอทานอล และผลของเอทานอลที่ช่วยลดแรงตึงผิว ตามลำดับ



รูปที่ 5.22 ภาพถ่ายการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิติคอน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ก) ไม่ผสมเอทานอล
 (ข) ผสมเอทานอล 0.125 cc (ค) ผสมเอทานอล 0.25 cc (ง) ผสมเอทานอล 0.5 cc

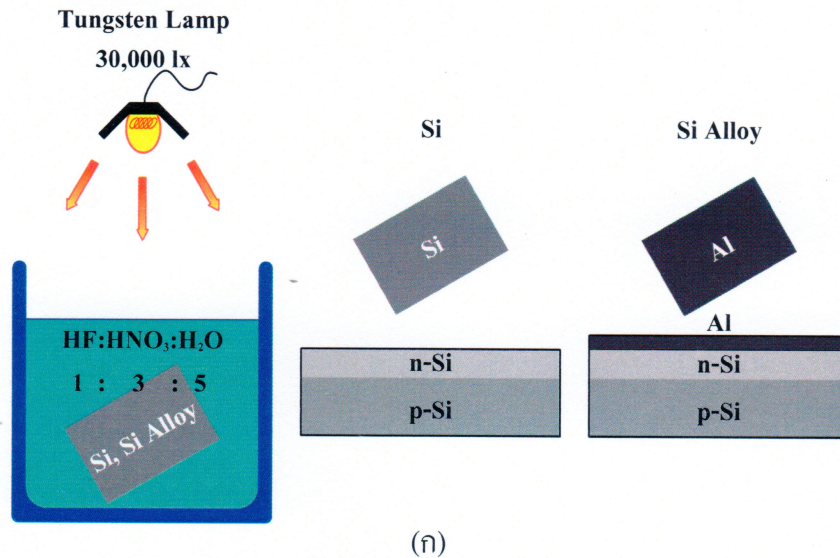


รูปที่ 5.22 (ต่อ) ภาพถ่ายการเรืองแสงของชั้นฟอสฟอริคคอน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติ โฟโวลูมิเนสเซนซ์ ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต (ก) ไม่ผสมเอทานอล (ข) ผสมเอทานอล 0.125 cc (ค) ผสมเอทานอล 0.25 cc (ง) ผสมเอทานอล 0.5 cc

5.1.6 ผลของชั้นโลหะอลูมิเนียมบนผิวซิลิคอน

เพื่อศึกษาผลของชั้น โลหะอลูมิเนียมบนผิวซิลิคอนที่มีต่อการเกิดชั้นฟอสฟอริคคอน ได้ทำการทดลองโดยนำแผ่นซิลิคอนชนิดพี ระบาย (111) ค่าสภาพต้านทาน 0.001 $\Omega \cdot \text{cm}$ ทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น แล้วนำไปสร้างชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร จากการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศ การซินเตอร์ริง (sintering) เพื่อให้ได้ซิลิคอนอัลลอยด์ (Al/Si alloy) ทำที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที ทำการกัดข้อมสี่แผ่นผลึกซิลิคอนปรกติ และแผ่นซิลิคอนที่มีชั้น โลหะอลูมิเนียมเคลือบที่ผิวด้านบน ใช้แสงจากหลอดทังสเตนกระตุ้นขณะทำการกัดข้อมสี่ ดังรูปที่ 5.23

ผลการทดลองเป็นที่น่าสังเกตว่า การเกิดชั้นฟอสฟอริคคอนในกรณีที่มีชั้น โลหะอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนจะมีอัตราการเกิดสูงกว่ากรณีของผิวซิลิคอนปรกติ กล่าวคือ ในกรณีของผิวซิลิคอนปรกติ จะเริ่มเกิดชั้นฟอสที่เวลา 5 วินาที ลดลงเหลือ 2 วินาที เมื่อมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 5.23 (ข) ทั้งนี้เป็นผลมาจากโฮล (h^+) ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอลูมิเนียมและกรดไนตริก ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดการกัดเนื้อซิลิคอนขึ้นทันที

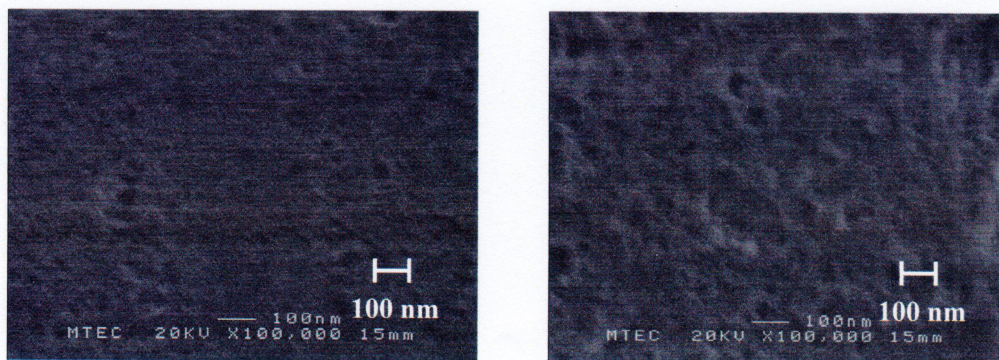


เวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส (วินาที)	แผ่น Si ปรกติ	แผ่น Si ที่มี Al เคลือบที่ผิวด้านบน
	5 วินาที	2 วินาที

(ข)

รูปที่ 5.23 (ก) การทดลองผลของชั้น โลหะอลูมิเนียมบนผิวซิลิคอน (ข) ตารางเวลาเริ่มเกิดชั้นพอร์ส

นอกจากนี้ยังทำการทดลองเพิ่มเติม โดยการกัดข้อมสี่แผ่นผลึกซิลิคอนปรกติ และแผ่นซิลิคอนที่มีชั้น โลหะอลูมิเนียมเคลือบที่ผิวด้านบน ที่เวลา 40 และ 60 วินาที ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอน พบว่า ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้บนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ จะมีความพรุนสูงกว่ากรณีของผิวซิลิคอนปรกติ ดังในรูปที่ 5.24

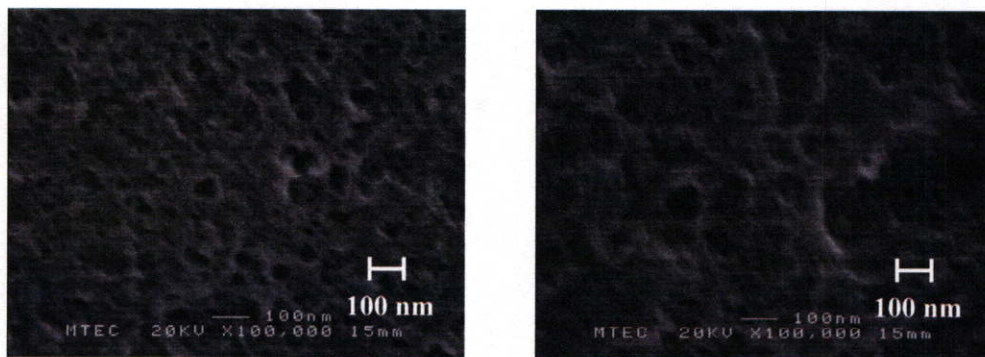


(ก)

ใช้เวลาการกัด 40 วินาที

(ข)

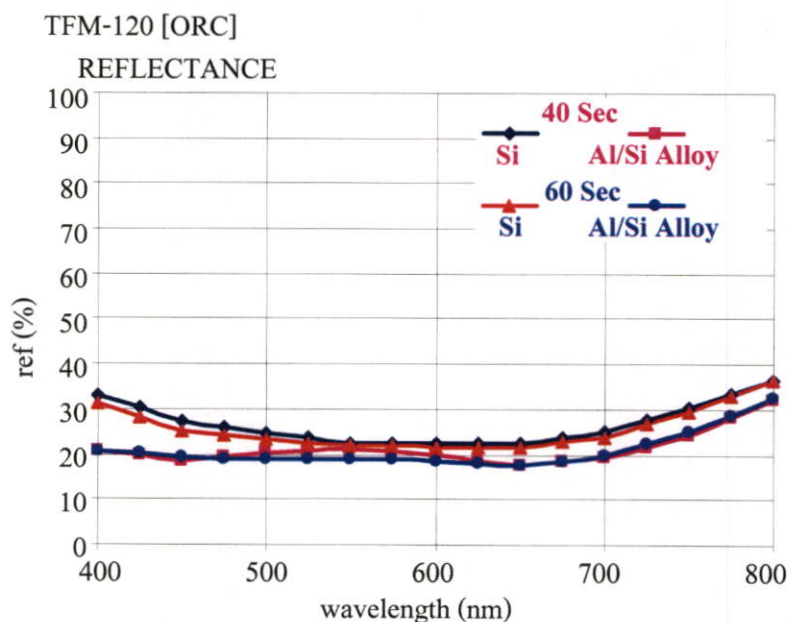
รูปที่ 5.24 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) และ (ค) ไม่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน (ข) และ (ง) มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน



(ก) ใช้เวลาการกัด 60 วินาที (ง)

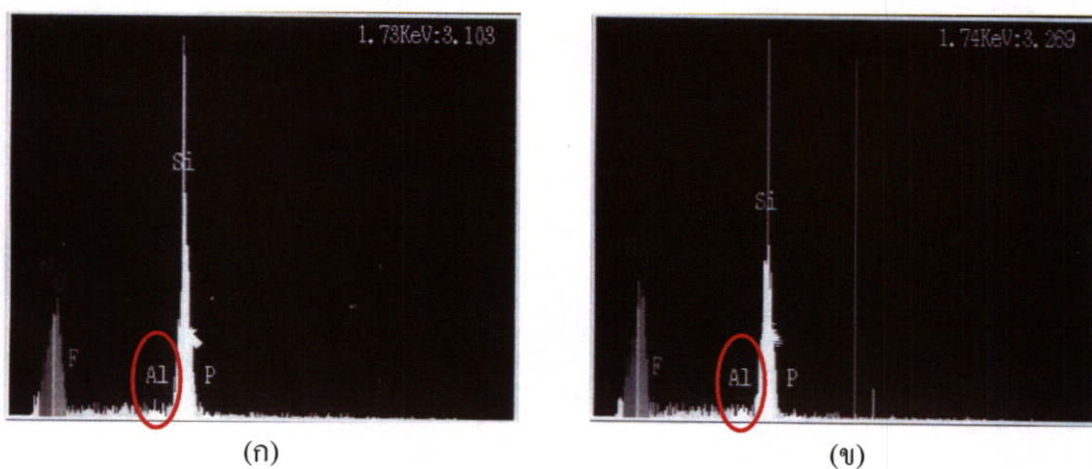
รูปที่ 5.24 (ต่อ) ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) และ (ค) ไม่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน (ข) และ (ง) มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ในช่วง 400 - 800 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.25 จะพบว่า คูณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสี่แผ่นผลึกซิลิคอนที่มีชั้นโลหะอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน จะมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่ากรณีการกัดข้อมสี่บนผิวซิลิคอนปกติ กล่าวคือ การกัดข้อมสี่บนผิวซิลิคอนปกติ คูณสมบัติการสะท้อนแสงจะอยู่ที่ 25 - 35% โดยเฉลี่ยในช่วง 400 - 800 นาโนเมตร ในขณะที่การกัดข้อมสี่แผ่นผลึกซิลิคอนที่มีชั้นโลหะอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน จะมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่ากรณีแรก คือ โดยเฉลี่ย 20% ในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการเกิดชั้นพอร์สบนผิวซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่สูงกว่าการเกิดบนผิวปกติ ทำให้คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ต่ำลง เมื่อใช้เวลาการกัดเท่าเดิม



รูปที่ 5.25 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซซิลิคอนบนแผ่นผลึกซิลิคอนปรกติ และแผ่นซิลิคอนที่มีชั้น โลหะอลูมิเนียมเคลือบที่ผิวด้านบน ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ

เมื่อนำชั้นพอร์ซซิลิคอนที่สร้างได้จากวิธีการกักข้อมสึบนผิวซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน มาวิเคราะห์หาโลหะอลูมิเนียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) ดังแสดงในรูปที่ 5.26 เปรียบเทียบกับการใช้กรดคัดอลูมิเนียม (สารละลายผสมของกรดฟอสฟอริก) ซึ่งใช้ในกระบวนการลอกชั้นโลหะอลูมิเนียมในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่วไป พบว่า ค่าที่ได้จากตัวอย่างชิ้นงานทั้งสองมีค่าน้อยมาก และใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่า ไม่มีโลหะอลูมิเนียมเหลืออยู่ที่ผิวหน้าของชิ้นงาน และในชั้นพอร์ซซิลิคอน



รูปที่ 5.26 การวิเคราะห์หาโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่อง EDX (ก) ลอกอลูมิเนียมออกด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก (ข) ใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัดทะลุชั้นอลูมิเนียม

ผลดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี โดยการใช้สารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กัดทะลุชั้นโลหะอลูมิเนียมเพื่อสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน ทำให้ได้ชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงต่ำ และใช้ระยะเวลาการสร้างที่รวดเร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

จากการทดลองศึกษาการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสึบนผิวซิลิคอน และทดสอบคุณสมบัติที่ผ่านมา อาจสรุปได้ว่า การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนให้มีความสม่ำเสมอ (uniformity) ที่ดี และมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำ ควรใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนความเข้ม 15,000 - 30,000 ลักซ์ ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีขณะทำการสร้าง และผสมเอทานอลปริมาตร 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริกปริมาตร 90 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้เวลาในการกัดประมาณ 40 วินาที ซึ่งเงื่อนไขนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงต่อไป

5.2 การศึกษาการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมสึ

การจะนำชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างได้จากวิธีการกัดข้อมสึ ไปใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะต้องสามารถเลือกพื้นที่ที่ต้องการให้เกิด หรือไม่ให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนได้ด้วย เนื่องจากในกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีนี้ ต้องเกี่ยวข้องกับสารละลายกรด ซึ่งถ้าไม่มีชั้นป้องกันผิวหน้าที่ดีพอแล้ว ก็จะทำให้ขั้วโลหะอลูมิเนียมของเซลล์เสียหายได้ อีกทั้งเมื่อไม่นานมานี้พบว่า ชั้นของอลูมิเนียมสามารถเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดพอร์สซิลิคอนได้ ดังนั้นอัตราการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดข้อมสึแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่บนผิวหน้า จะสูงกว่าปรกติ ซึ่งจากวิธีการนี้ทำให้สามารถใช้ลวดลายอลูมิเนียมช่วยในการกำหนดการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมสึได้เป็นอย่างดี จึงได้ทำการศึกษาการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมสึ

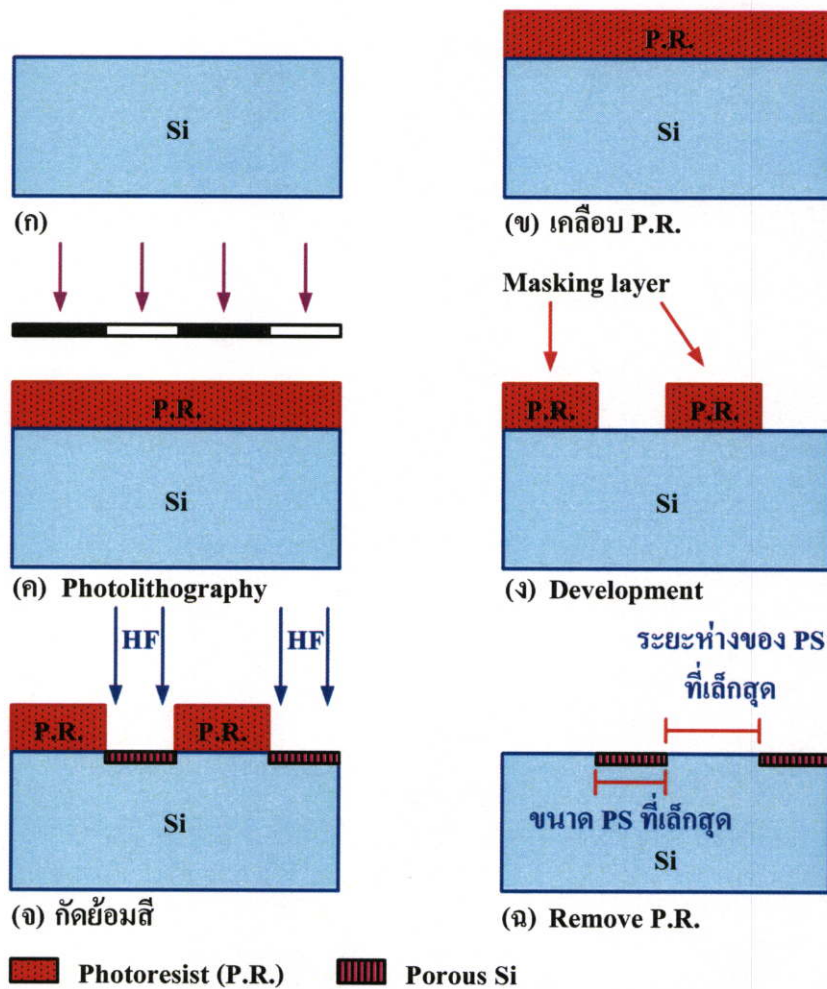
การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดข้อมสึในการทดลองนี้ทำได้โดยจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก (HF : 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO₃ : 60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:3:5 ใช้เวลาเพาะบ่มสารละลาย 30 นาที และใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี ชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร สร้างได้จากการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศ การซินเตอร์ริง (sintering) เพื่อให้ได้ซิลิคอนอัลลอยด์ (Al/Si alloy) ทำที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที กระจกมาส์กที่ใช้ได้จากการออกแบบลวดลายโลหะเพื่อทดสอบหาค่า Critical Dimension (CD) ของลายเส้นขนาดต่างๆ กันในพื้นที่ขนาด 1.6×1.8 ตารางเซนติเมตร โดยใช้โปรแกรม corelDRAW Graphics Suite 12 เมื่อนำข้อมูล

ไฟล์ที่ออกแบบไว้ไปสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนฟิล์มแล้วนำไปติดบนกระจกใสจะทำให้ได้กระจกโฟโตนิกส์สำหรับการทดลอง

น้ำยาไวแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตนิกส์เป็นชนิดบวกเบอร์ S1818 และ AZ P1350 ซึ่งมีความหนืด 22.3 cSt และ 4.8 cSt ตามลำดับ น้ำยาไวแสงเบอร์ S1818 สามารถสร้างลวดลายได้ละเอียดถึง 0.5 ไมโครเมตรส่วนน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ P1350 สร้างลวดลายได้เล็กที่สุด 4.5 ไมโครเมตรโดยน้ำยาทั้งสองใช้กับแสงที่มีความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร (g-line) และน้ำยาคีเวลดอป (developer) ที่ใช้คือ AZ-300 MIF

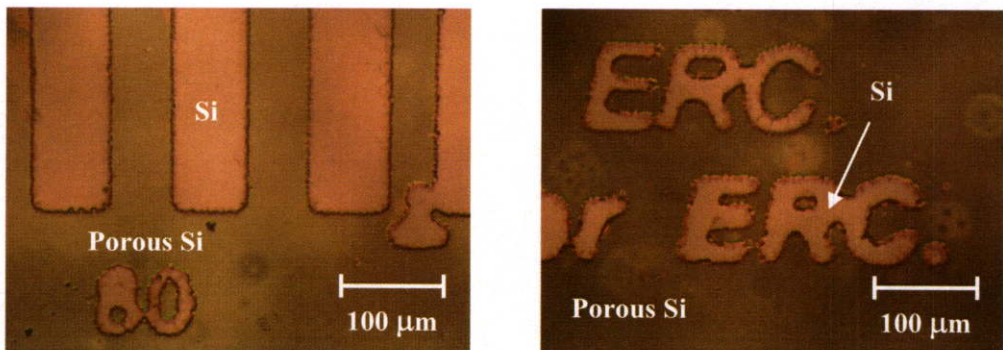
5.2.1 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้น้ำยาไวแสง

การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่บนแผ่นซิลิคอนสามารถทำได้ด้วยกระบวนการโฟโตนิกส์ (photolithography process) โดยใช้น้ำยาไวแสงเป็นชั้นป้องกัน (masking layer) ดังแสดงในรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้น้ำยาไวแสง

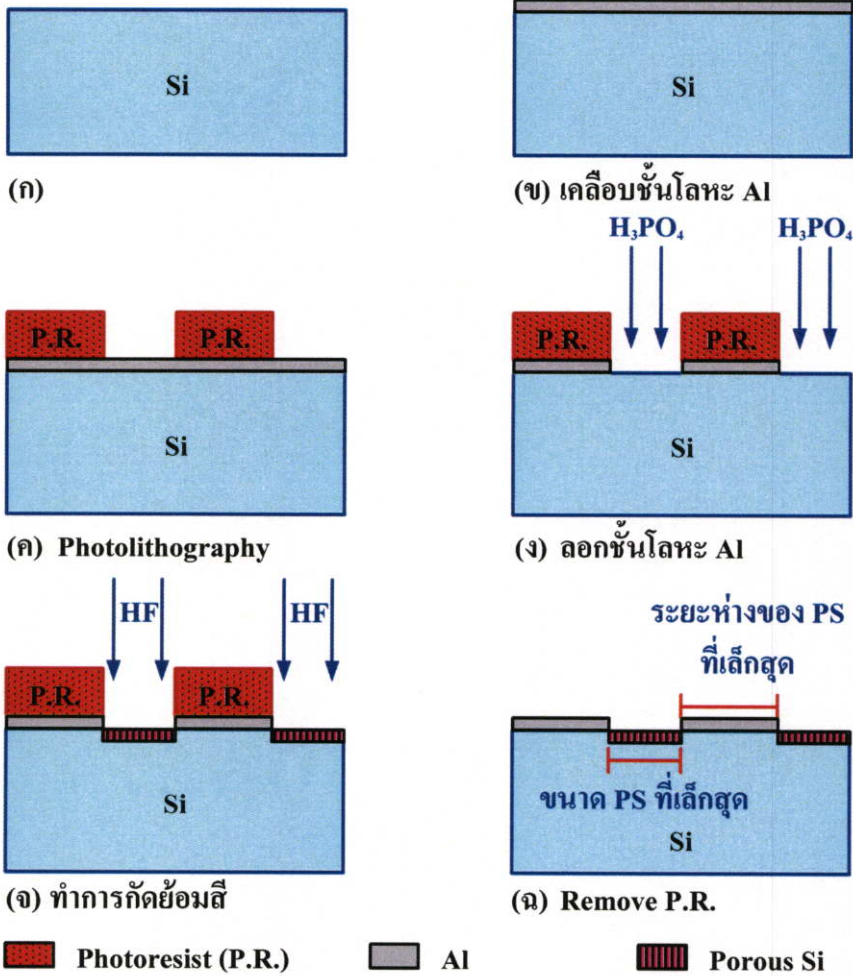
ชั้นของน้ำยาไวแสง AZ P1350 ที่มีความหนาในช่วง 5,000 - 7,000 อังสตรอม และ S1818 ที่มีความหนาในช่วง 13,000 - 16,500 อังสตรอม สามารถเป็นชั้นป้องกันผิวในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่บนแผ่นซิลิคอนได้ โดยมีระยะห่างของชั้นพอร์สซิลิคอนเล็กสุด 50 ไมโครเมตร ในกรณี AZ P1350 และ 30 ไมโครเมตรในกรณี S1818 โดยที่น้ำยาไวแสง AZ P1350 และ S1818 สามารถทนต่อสารละลายได้นานสุด 120 วินาที และ 180 วินาที ตามลำดับ ก่อนที่จะหลุดร่อนออก ภายถ่ายลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่มีการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่แสดงดัง ในรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 ภายถ่ายลักษณะผิวหน้าของการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้น้ำยาไวแสง

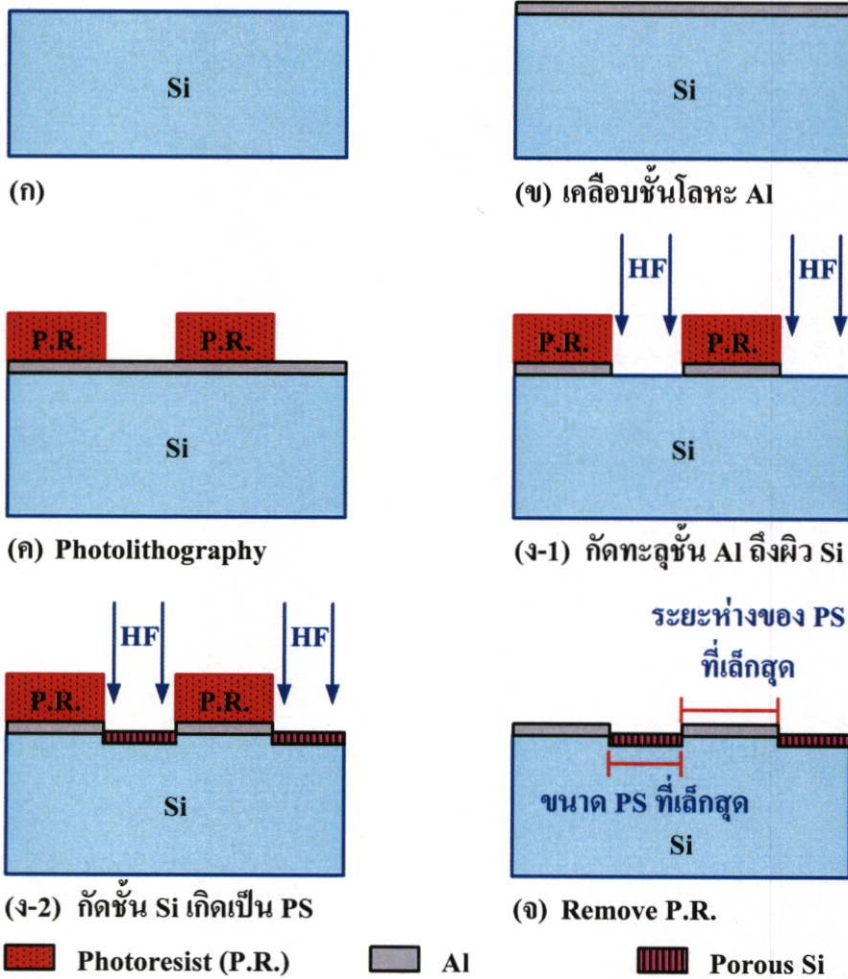
5.2.2 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน

การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนทำได้ 2 วิธีคือ วิธีที่ 1 ใช้กระบวนการโฟโวลติโครกราฟีเปิดชั้นของอลูมิเนียมบริเวณที่ต้องการจะสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนออกก่อนด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) แล้วจึงสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ด้วยสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ดังในรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้น โลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีที่ 1

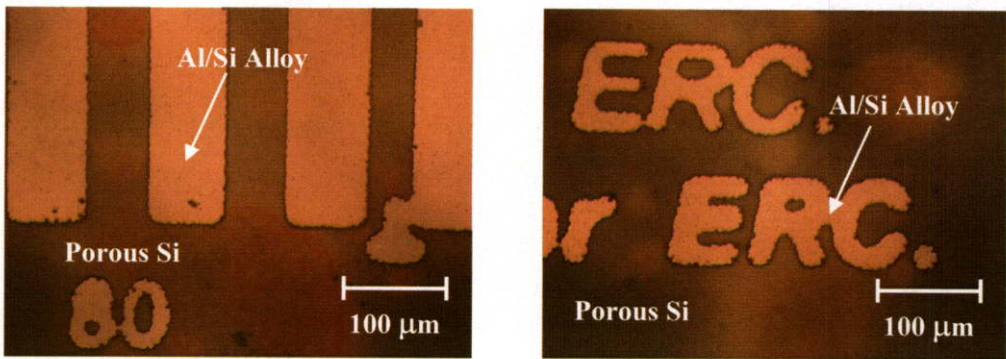
และวิธีที่ 2 ใช้คุณสมบัติของชั้นอลูมิเนียมที่เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอน และเนื่องจากสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิคอนสามารถกัดอลูมิเนียมได้ จึงทำการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยใช้สารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กัดทะลุชั้นอลูมิเนียมลงไปถึงผิวซิลิคอนและกัดชั้นซิลิคอนเกิดเป็นชั้นพอร์สซิลิคอน ดังในรูปที่ 5.30 ซึ่งในการทดลองนี้ชั้นอลูมิเนียมถูกแยกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีการทำซินเตอร์ริง (sintering) เพื่อให้ได้ซิลิคอนอัลลอยด์ (Al/Si Alloy) และกลุ่มที่ไม่มีการทำซินเตอร์ริง (sintering) เนื่องจาก พบว่า ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการซินเตอร์ริง (sintering) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที จะไม่แสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ส่วนคุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สที่ผ่านการซินเตอร์ริง และไม่ซินเตอร์ริง นั้นไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.30 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้น โลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีที่ 2

โดยวิธีที่ 1 พบว่าน้ำยาไวแสง AZ P1350 ใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าได้ เมื่อน้ำยาไวแสงมีความหนา $\geq 5,700$ อังสตรอม โดยมีระยะห่างของพอร์สซิลิคอนเล็กสุดประมาณ 60 ไมโครเมตร และกรณีของซิลิคอนอัลลอยด์ (Al/Si Alloy) ระยะห่างของพอร์สซิลิคอนเล็กสุดจะมีค่าประมาณ 50 ไมโครเมตร

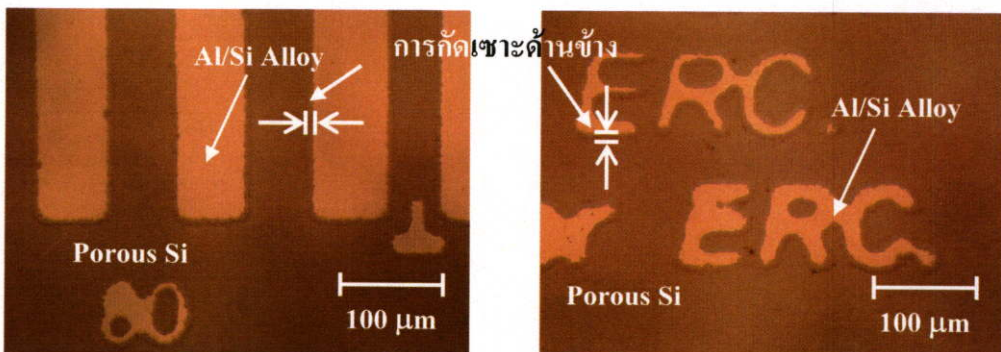
ส่วนน้ำยาไวแสง S1818 ที่มีความหนาในช่วง 13,000 - 16,500 อังสตรอม ใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าได้ โดยมีระยะห่างของพอร์สเล็กสุดประมาณ 30 ไมโครเมตร ภาพถ่ายผิวหน้าของการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยวิธีที่ 1 แสดงดังในรูปที่ 5.31 นอกจากนี้ น้ำยาไวแสงเบอร์ AZ P1350 และ S1818 สามารถทนต่อสารละลายได้นานสุด 100 วินาที และ 180 วินาที ตามลำดับ ก่อนที่จะหลุดร่อนออก



รูปที่ 5.31 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีที่ 1

ในการทดลองโดยวิธีที่ 2 ซึ่งเป็นการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน พบว่าน้ำยาไวแสง AZ P1350 ซึ่งมีความหนา $< 7,000$ อังสตรอม ไม่สามารถเป็นชั้นป้องกันผิวหน้าได้

สำหรับน้ำยาไวแสง S1818 ที่มีความหนา $\geq 13,000$ อังสตรอม ใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าได้ดี โดยมีระยะห่างของพอร์สเล็กสุด 30 ไมโครเมตร และสามารถทนต่อสารละลายได้นานสุด 160 วินาทีก่อนที่จะหลุดร่อนออก ภาพถ่ายผิวหน้าของการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยวิธีที่ 2 แสดงดังในรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.32 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีที่ 2

เป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะผิวหน้าของการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยใช้น้ำยาไวแสง และการใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 พบว่า การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีที่ 2 ลวดลายจะถูกกัดเซาะด้านข้างมากกว่าวิธีที่ 1

อย่างไรก็ดี เนื่องจากน้ำยาไวแสง S1818 มีราคาสูงกว่าน้ำยาไวแสง AZ P1350 มาก ดังนั้นเพื่อให้ น้ำยาไวแสง AZ P1350 สามารถใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าในการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีที่ 2 ได้ จึงทำการทดลองโดยการเคลือบชั้นน้ำยาไวแสง AZ P1350 ด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อ นาที สองครั้ง เพื่อให้ได้ความหนามากกว่า 7,000 อังสตรอม และมีความสม่ำเสมอที่ดี

จากผลการทดลอง น้ำยาไวแสง AZ P1350 สามารถใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าในการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีที่ 2 ได้ แต่มีระยะห่างของพอร์สซิลิคอนเล็กสุดประมาณ 60 ไมโครเมตรและสามารถทนต่อสารละลายได้นานสุด 100 วินาทีก่อนที่จะหลุดร่อนออก

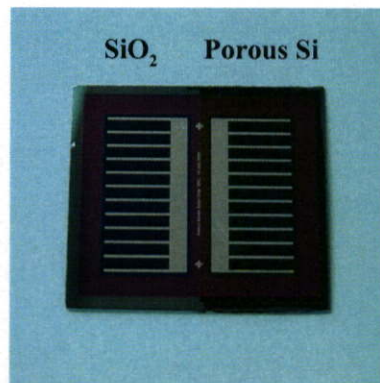
นอกจากนี้ การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีที่ 1 ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโลหะทองคำได้อีกด้วย โดยเปลี่ยนจากกรดคัลโคลุมิเนียม (สารละลายกรดฟอสฟอริก) เป็นกรดคัลคทอง (สารละลายกรดไฮโดรคลอริก) เพื่อลอกชั้นโลหะทองคำออกก่อนที่จะนำไปสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนต่อไป ส่วนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยวิธีที่ 2 ในขั้วโลหะทองคำ ไม่สามารถทำได้เนื่องจากสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก ใช้เวลาในการกัดชั้นทองคำมากกว่า 160 วินาทีทำให้น้ำยาไวแสงหลุดร่อนออก ก่อนที่จะเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้น

5.3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

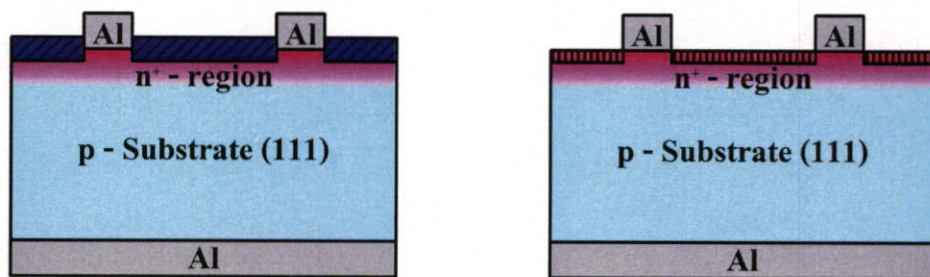
เพื่อให้การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือ ถูกต้อง และเห็นผลของชั้นลดการสะท้อนแสงเพียงอย่างเดียว จึงได้ทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงทั้งแบบซิลิคอนไดออกไซด์และแบบพอร์สซิลิคอนขึ้นบนแผ่นซิลิคอนฐานรองเดียวกัน โดยชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งหนาประมาณ 1,000 อังสตรอมได้จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) ขณะทำการแพร์ซบลิ๊ก (drive in) เพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น และชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอนซึ่งหนาประมาณ 100 นาโนเมตรได้จากวิธีการกัดย้อมสี (ใช้เวลาการกัดประมาณ 40 วินาที) ด้วยเทคนิคการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยใช้ชั้นโลหะอลูมิเนียมเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้น

5.3.1 การประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมลึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบปรกติ

ทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ฐานรองเป็นแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดพี ระบาย (111) มีค่าสภาพต้านทานในช่วง 3 - 5 $\Omega\cdot\text{cm}$ ทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที และทำการแพร่ขับเคลื่อน (drive in) ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 40 นาที เพื่อให้ได้ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นสูง (n^+ -region) และเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งวัดจากเครื่องวัดการกระจายความต้านทาน (Spreading Resistance Measuring Desk : SR-210) ได้ความลึกของรอยต่อประมาณ 1.1 μm . ที่ค่าสภาพความต้านทานแผ่น 30 Ω/\square โดยฝั่งหนึ่งจะมีซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1,000 อังสตรอมเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และอีกฝั่งหนึ่งจะมีชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมลึซึ่งหนาประมาณ 100 นาโนเมตรเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง แสดงได้ดังรูปที่ 5.33



(ก)



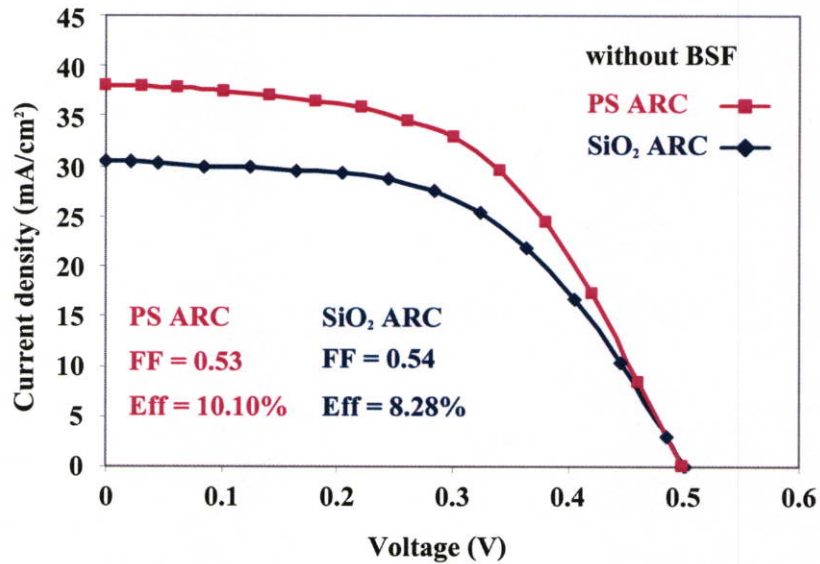
SiO₂
 Porous Si
 n⁺-region
 Al

(ข)

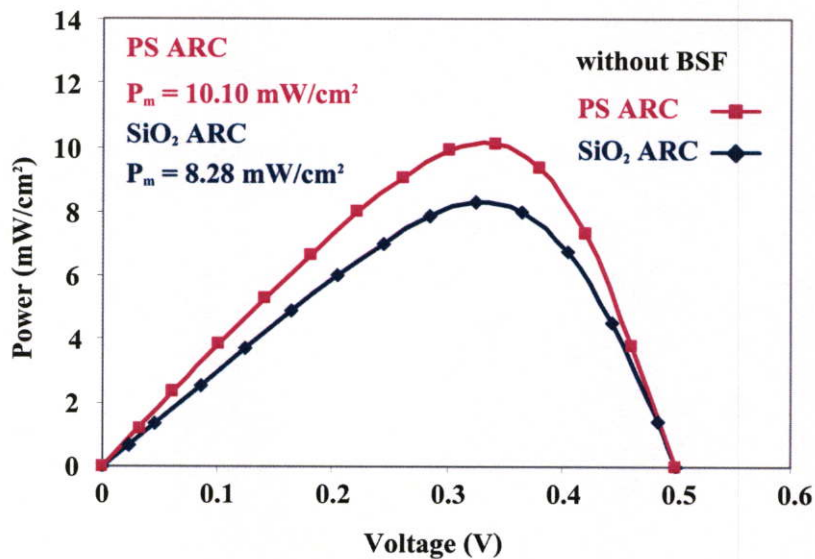
รูปที่ 5.33 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์

และแบบพอร์สซิลิคอน (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง

ผลการทดลองวัด ได้คุณสมบัติกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 5.34 และพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ดังรูปที่ 5.35 สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแบบ และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ คิดเป็นร้อยละ แสดงดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.34 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และแบบพอร์ซซิลิคอน



รูปที่ 5.35 คุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์ซซิลิคอน

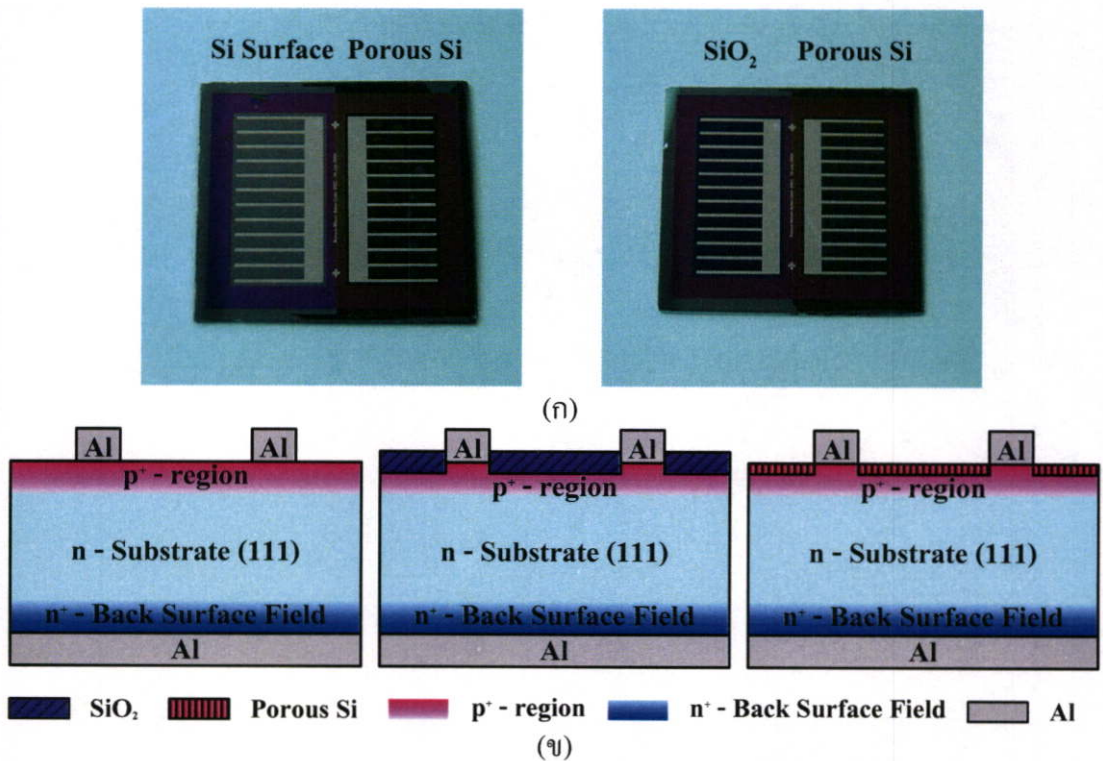
ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ AM 1.5 พลังงานรวม 100 mW/cm ² พื้นที่รับแสงของเซลล์ (active area) 0.5 cm ²	หน่วย	Anti-Reflection Coating (ARC)		ความ แตกต่าง (%)
		SiO ₂	PS	
		ความหนาแน่นกระแส (J_{sc})	mA/cm ²	30.538
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	mA	15.269	18.988	+24.357
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	V	0.501	0.500	-0.200
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	mW/cm ²	15.300	18.988	+24.105
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	mA	25.468	29.522	+15.918
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	V	0.325	0.342	+5.231
กำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	mW/cm ²	8.277	10.097	+21.989
ความต้านทานอนุกรม (R_s)	Ω	4.023	4.350	+8.128
ความต้านทานขนาน (R_{sh})	k Ω	3.100	3.250	+4.839
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF)	-	0.541	0.539	-0.370
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	%	8.277	10.097	+21.989

จากผลการทดลองคุณสมบัติกระแสและแรงดันในรูปที่ 5.34 จะเห็นได้ชัดว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน (PS) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบธรรมดาที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงถึง 24.357% ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอร์สซิลิคอน นอกจากจะมีการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว แต่ยังมีคุณสมบัติดักกลืนแสง (light trapping) ได้ดีอีกด้วย ดังนั้น เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจึงให้กระแสแสงได้มากกว่า และจากผลดังกล่าวทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบพอร์สซิลิคอนมีกำลังงานสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนไดออกไซด์ถึง 21.989% ดังในรูปที่ 5.35 สำหรับแรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) และค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) นั้น มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก

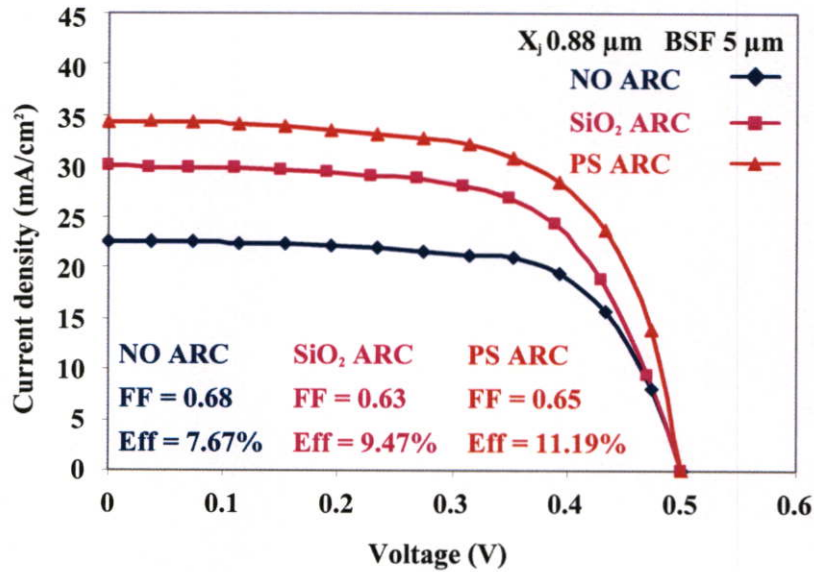
5.3.2 การประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (BSF Solar Cells)

ทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (Back Surface Field : BSF) โดยใช้ฐานรองเป็นแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (111) มีค่าสภาพต้านทานในช่วง 4 - 5 Ω.cm ทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 30 นาที และทำการแพร่ขับลิท (drive in) ที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าด้านหลังชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นสูง (n⁺-back surface field) ซึ่งวัดจากเครื่องวัดการกระจายความต้านทาน (Spreading Resistance Measuring Desk : SR-210) ได้ความลึกประมาณ 5 ไมโครเมตร จากนั้นจึงทำการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 30 นาที และทำการแพร่ขับลิท (drive in) ที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 40 นาที เพื่อให้ได้ชั้นซิลิคอนชนิดพีที่มีความเข้มข้นสูง (p⁺-region) และเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งวัดจากเครื่องวัดการกระจายความต้านทานได้ความลึกของรอยต่อประมาณ 0.88 ไมโครเมตร ในการทดลองนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง (without ARC) มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอน ไดออกไซด์หนาประมาณ 1,000 อังสตรอม และแบบพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดย้อมสีซึ่งหนาประมาณ 100 นาโนเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 5.36

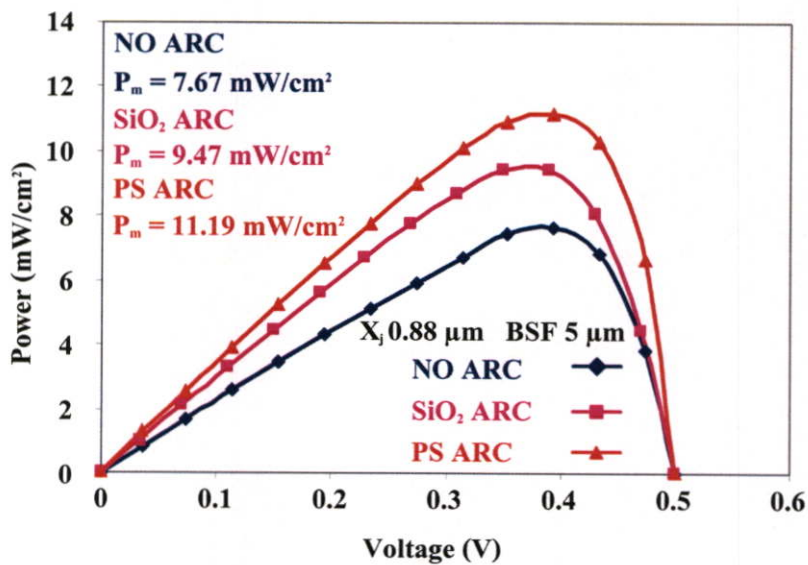


รูปที่ 5.36 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และแบบพอร์สซิลิคอน (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง

ผลการทดลองวัด ได้คุณสมบัติกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 5.37 และพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ดังรูปที่ 5.38 สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.37 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์ซซิลิคอน



รูปที่ 5.38 คุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์ซซิลิคอน

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอน ไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ AM 1.5 พลังงานรวม 100 mW/cm ² พื้นที่รับแสงของเซลล์ (active area) 0.5 cm ²	หน่วย	ชั้นลดการสะท้อนแสง (ARC)		
		No ARC	SiO ₂ ARC	PS ARC
ความหนาแน่นกระแส (J_{sc})	mA/cm ²	22.530	29.985	34.460
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	mA	11.265	14.993	17.230
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	V	0.500	0.501	0.500
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	mW/cm ²	11.265	15.022	17.230
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	mA	19.476	24.274	28.406
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	V	0.394	0.390	0.394
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	mW/cm ²	7.674	9.467	11.192
ความต้านทานอนุกรม (R_s)	Ω	3.039	2.617	2.172
ความต้านทานขนาน (R_{sh})	k Ω	3.907	2.450	3.257
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF)	-	0.681	0.630	0.650
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	%	7.674	9.467	11.192

จากผลการทดลองคุณสมบัติกระแสและแรงดันในรูปที่ 5.37 จะเห็นได้ชัดว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน (PS) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบธรรมดาที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสงถึง 52.952% ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบพอร์สซิลิคอนมีกำลังงานสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสงถึง 45.843% ดังในรูปที่ 5.38 สำหรับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ คิดเป็นร้อยละของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง และมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอน แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสง กับเซลล์แสงอาทิตย์มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอน

พารามิเตอร์	J_{sc}	V_{oc}	P_0	I_m	V_m	P_m	FF	η
หน่วย	mA/cm ²	V	mW/cm ²	mA	V	mW/cm ²	-	%
ความแตกต่าง (%)	+52.952	0.000	+52.952	+45.851	0.000	+45.843	-4.552	+45.843

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับเซลล์ที่ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ผลการทดลองเป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน (PS) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบธรรมดาที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงถึง 14.924% ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอร์สซิลิคอน นอกจากจะมีการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว แต่ยังมีคุณสมบัติดักคลื่นแสง (light trapping) ได้ดีอีกด้วย ดังนั้น เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจึงให้กระแสแสงได้มากกว่า และจากผลดังกล่าวทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบพอร์สซิลิคอนมีกำลังงานสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนไดออกไซด์ถึง 18.221% สำหรับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ คิดเป็นร้อยละของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน

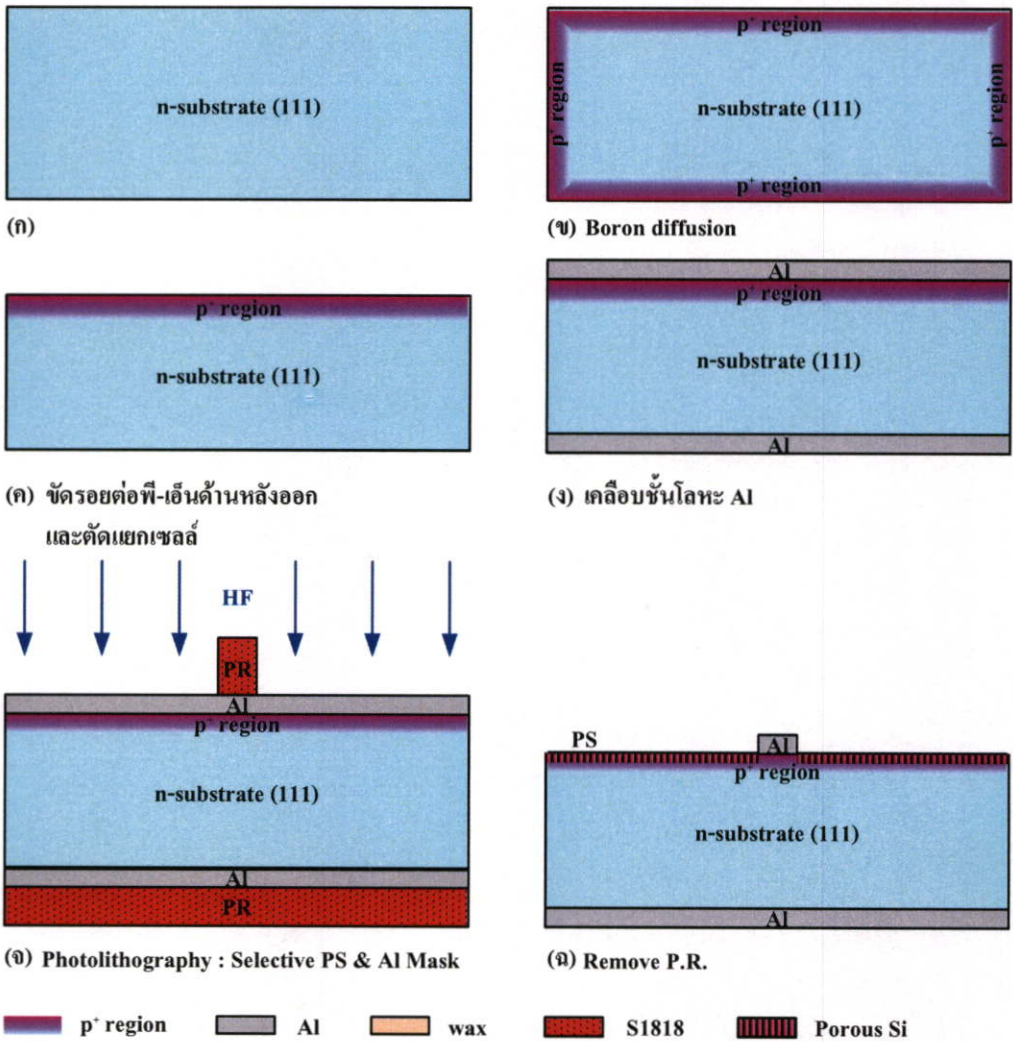
พารามิเตอร์	J_{sc}	V_{oc}	P_0	I_m	V_m	P_m	FF	η
หน่วย	mA/cm ²	V	mW/cm ²	mA	V	mW/cm ²	-	%
ความแตกต่าง (%)	+14.924	-0.200	+14.698	+17.022	+1.026	+18.221	+3.175	+18.221

เป็นที่น่าสังเกตว่า กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมลีสีเป็นลดการสะท้อนแสง ด้วยเทคนิคการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยมีน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ S1818 เป็นชั้นป้องกันผิวหน้า และใช้สารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กัดทะลุชั้นออกซิเจนลงไปถึงผิวซิลิคอน และกัดชั้นซิลิคอนเกิดเป็นชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นนั้น จะทำให้สามารถลดจำนวนกระจกมาส์กที่ใช้จาก 2 มาส์กให้เหลือเพียงมาส์กเดียวได้ โดยนำแผ่นซิลิคอน

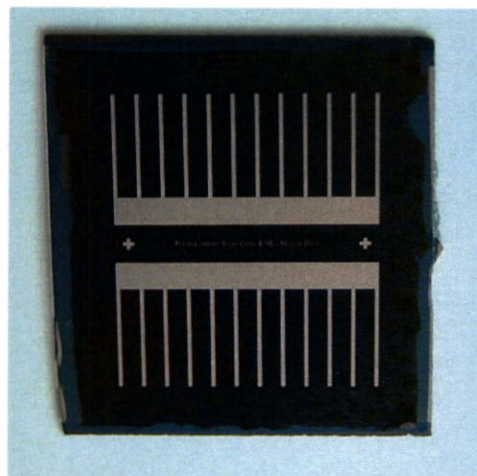
ฐานรองมาทำการแพร่สารเจือให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น ทำการขัดแผ่นซิลิคอนบริเวณด้านหลังที่เกิดรอยต่อพี-เอ็นออก ตัดแยกเป็นเซลล์ต่างๆ เคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียม และทำการซินเตอร์ริง แล้วจึงใช้เทคนิคการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ สร้างชั้นพอร์สซิลิคอนและขั้วไฟฟ้าขึ้นพร้อมกันก็จะได้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว (one mask solar cells) ซึ่งกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว (one mask process) จะได้นำเสนอในหัวข้อ 5.3.3 ต่อไป

5.3.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดด้วยลมตีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว

กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว แสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 5.39 คือ นำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (111) มีค่าสภาพต้านทานในช่วง 4-5 $\Omega \cdot \text{cm}$ ดังรูป 5.39 (ก) มาทำการแพร่สารเจือ โบรอนที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที และทำการแพร่ขับลึก (drive in) ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 40 นาที ดังรูป 5.39 (ข) เพื่อให้ได้ชั้นซิลิคอนชนิดพีที่มีความเข้มข้นสูง (p^+ -region) และเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น หลังจากนั้นนำแผ่นเซลล์มาเคลือบผิวหน้าด้วยขี้ผึ้ง (beeswax) หรือ พาราฟฟิน (paraffin wax) สำหรับป้องกันผิวหน้าขณะทำการขัดแผ่นซิลิคอนด้านหลังด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เพื่อกำจัดรอยต่อพี-เอ็นที่เกิดขึ้นด้านหลังออก ทำการขัดโดยใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 2000 ตามด้วยเบอร์ 4000 ตรวจสอบว่ารอยต่อพี-เอ็นที่เกิดขึ้นด้านหลังถูกขัดออกหมดแล้วด้วย โพรบเข็มร้อน (hot probe) หลังจากนั้นจึงทำความสะอาดแผ่นและทำการตัดแยกเซลล์ออก ดังรูปที่ 5.39 (ค) เคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียม ทำการซินเตอร์ริง ดังรูปที่ 5.39 (ง) และนำเซลล์มาทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียมและสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยเทคนิคการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ โดยมีน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ S1818 เป็นชั้นป้องกันผิวหน้า ใช้สารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กัดทะลุชั้นอลูมิเนียมลงไปถึงผิวซิลิคอนและกัดชั้นซิลิคอนเกิดเป็นชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้น ดังรูปที่ 5.39 (จ) ทำการลอกน้ำยาไวแสงออกก็จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว ดังรูปที่ 5.39 (ฉ) เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว แสดงดังรูปที่ 5.40

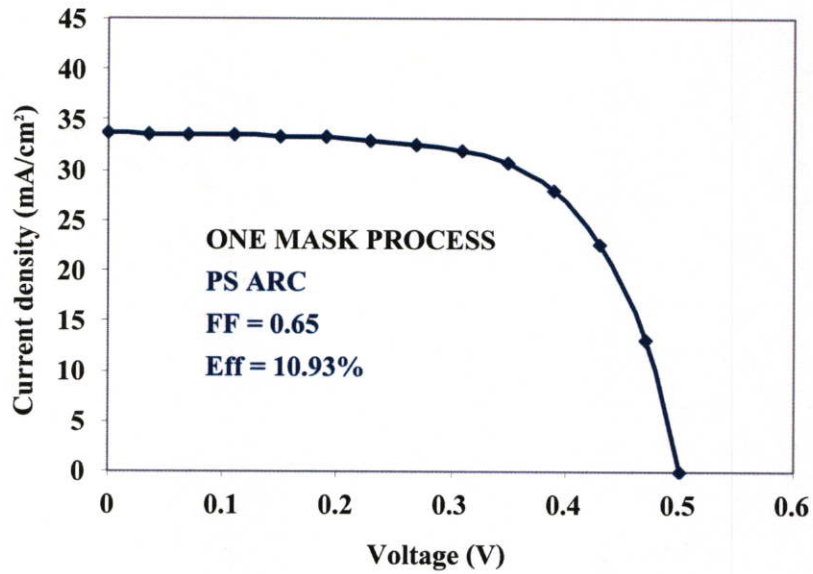


รูปที่ 5.39 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว

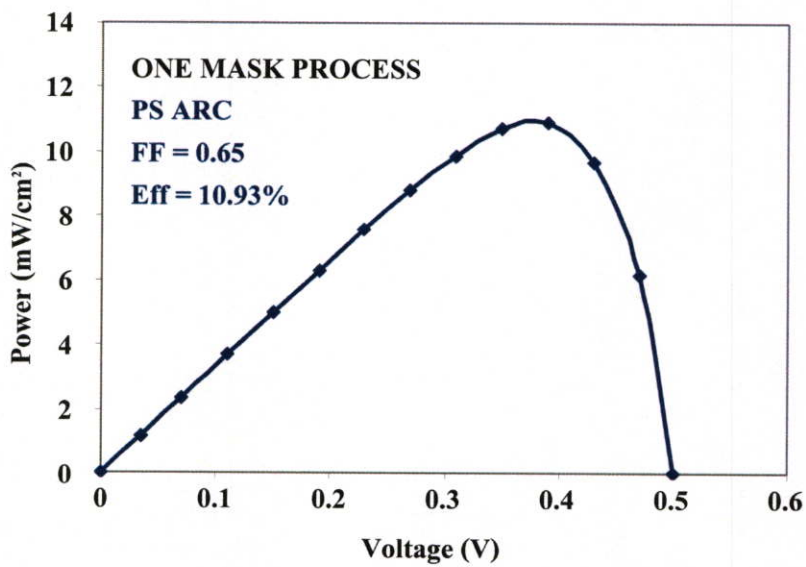


รูปที่ 5.40 เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว

ผลการทดลองวัด ได้คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติกอนจากการกัดข้อมือเป็นขั้นตอนการสะท้อนแสง โดยใช้กระจกตันแบบชั้นเดียว (one mask solar cells) ดังแสดงในรูปที่ 5.41 และพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ ดังรูปที่ 5.42 สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.41 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดยใช้กระจกตันแบบชั้นเดียว



รูปที่ 5.42 คุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากกระจกตันแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 5.5 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ AM 1.5 พลังงานรวม 100 mW/cm ² พื้นที่รับแสงของเซลล์ (active area) 0.5 cm ²	หน่วย	มีค่าเท่ากับ
ความหนาแน่นกระแส (J_{sc})	mA/cm ²	33.746
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	mA	16.873
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	V	0.501
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	mW/cm ²	16.907
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	mA	28.035
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	V	0.390
กำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	mW/cm ²	10.394
ความต้านทานอนุกรม (R_s)	Ω	2.487
ความต้านทานขนาน (R_{sh})	k Ω	3.451
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF)	-	0.647
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	%	10.934

จากผลการทดลอง เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่สร้างโดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว มีความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) กำลังงานสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) เท่ากับ 33.746 mA/cm² 0.501 V 10.394 mW/cm² และ 10.934% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่า กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยอาศัยเทคนิคการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมสึ (selective formation of stain etched porous silicon) นั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ทำให้ลดจำนวนกระจกมาสก์ที่ใช้เหลือเพียงกระจกชั้นเดียวเท่านั้น ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงต้องใช้กระจกมาสก์ถึง 3 กระจก ทำให้กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นเดียว (one mask process) มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ด้วย

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยวิธีการกัดข้อมีสึ เพื่อนำไปประยุกต์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมีสึบนผิวซิลิคอน และทดสอบคุณสมบัติ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมีสึ และส่วนที่สามเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมีสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน จากการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้ง่ายด้วยวิธีการกัดข้อมีสึผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนในสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และน้ำ ในสัดส่วน 1:3:5 ที่ใช้เวลาเพาะบ่ม 30 นาที กระบวนการเกิดชั้นพอร์สสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) ช่วงเวลาการกัด (etching time) และช่วงเวลาอิ่มตัว (saturation time) ชั้นพอร์สสามารถให้คุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ได้ดี โดยให้สีในช่วงสีแดงและสีส้มขึ้นกับความพรุน และชั้นพอร์สซิลิคอนยังมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำใกล้เคียงกับชั้นของซิลิคอน โดยออกไซด์อีกด้วย

อัตราการเกิดและคุณสมบัติของชั้นพอร์สซิลิคอน สามารถเปลี่ยนแปลงและควบคุมได้ด้วยเงื่อนไขต่างๆ คือ

1. ชนิดของอะตอมสารเจือและค่าสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมาสร้างชั้นพอร์ส มีผลโดยตรงต่อเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) ให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้น
2. บริเวณผิวผลึกซิลิคอนที่มีรอยขูดขีดหรือผิวขรุขระ (rough surface) จะเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นก่อนบริเวณที่มีผิวเรียบมันวาว (mirror surface) และระนาบผลึก ไม่มีผลต่อการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกัดข้อมีสึ โดยสามารถสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นบนผลึกระนาบ (111) หรือ (100) ก็ได้
3. การฉายแสงขณะทำการกัดข้อมีสึจะทำให้มีการเกิดพอร์สซิลิคอนที่สม่ำเสมอ และเร็วกว่าการใช้แสงในห้องปรกติ
4. ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมีสึในสารละลายที่อุณหภูมิห้องจะให้คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าชั้นพอร์สที่ได้จากสารละลายอุณหภูมิสูง
5. อัตราการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนจะลดลงเมื่อมีการรบกวนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง แต่ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จะมีความสม่ำเสมอดีกว่า
6. ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาการกัดข้อมีสึนานขึ้น

7. อัตราการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนจะเร็วขึ้น และมีความสม่ำเสมอที่ดี เมื่อมีการผสม เอทานอล (ethanol) ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก

8. การเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนในกรณีที่มีชั้นโลหะอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนจะมีอัตราการเกิดและความพรุนสูงกว่ากรณีของผิวซิลิคอนปกติ ทำให้คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ต่ำลง เมื่อใช้เวลากการกัดเท่าเดิม อีกทั้งยังไม่มีโลหะอลูมิเนียมหลงเหลืออยู่ในชั้นพอร์สซิลิคอน ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

จากการศึกษาในส่วนแรกนี้ แสดงให้เห็นชัดเจนว่า ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมสี่ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนแทนชั้นของซิลิคอน ไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี และมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้เวลาน้อย ราคาประหยัด ชั้นพอร์สซิลิคอนมีการสะท้อนแสงที่ต่ำ และยังมีคุณสมบัติตรงกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย ซึ่งการเปรียบเทียบชั้นลดการสะท้อนแสงแบบผิวซิลิคอนขัดมัน ซิลิคอน ไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน แสดงได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบชั้นลดการสะท้อนแสงแบบผิวซิลิคอนขัดมัน ซิลิคอน ไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน

ARC	Reflectance	Process	Temperature	Cost	Time	Other
Si Polish Surface	High	NA	NA	NA	NA	NA
SiO ₂	Low	Complex	High	Expensive	Long	- Crystal defect - Deep Junction
Porous Si - Stain Etching	Low	Very Simple	Very Low	Very Cheap	Very Short	- Crystal defect free - Absorption Layer

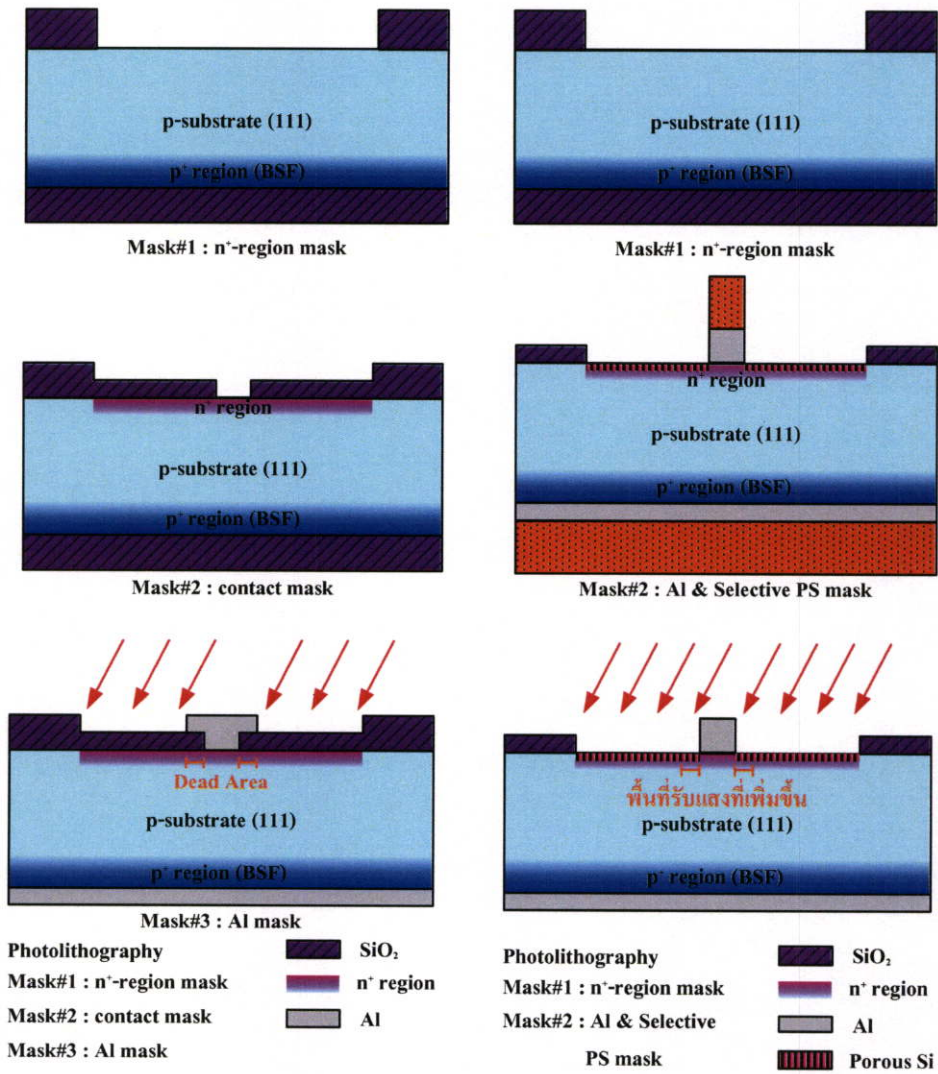
สำหรับการศึกษาการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่โดยวิธีการกัดข้อมสี่ในส่วนที่สอง สรุปได้ว่า สามารถเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนได้ โดยใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 และเบอร์ S1818 เป็นชั้นป้องกัน แต่น้ำยาไวแสงเบอร์ S1818 จะให้ความละเอียดของลวดลายดีกว่า และสามารถเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นโลหะอลูมิเนียมอยู่ที่ผิวด้านบนได้ หรือจะใช้วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 สองชั้น ซึ่งจะช่วยลดต้นทุน อีกทั้งยังทำให้สามารถใช้ลวดลายอลูมิเนียมในการกำหนดการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ได้ และยังช่วยลดขั้นตอนของกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟี ซึ่งเทคนิคนี้มีประโยชน์มากในกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านแสง เช่น โฟโต้ดีเทค

เตอร์ หรือเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ทำให้ได้โฟโต้เทคเตอร์และเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูก

การทดลองในส่วนสุดท้าย การประยุกต์ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบปรกติที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอนพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน (PS) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) กำลังงานสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบธรรมดาที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (Back Surface Field) ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอร์สซิลิคอนนอกจากจะมีการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว แต่ยังมีคุณสมบัติดักกักแสง (light trapping) ได้ดีอีกด้วย ดังนั้น เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจึงให้กระแสแสงได้มากกว่า และจากผลดังกล่าวทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนมีกำลังงานสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างเซลล์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับเซลล์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง พบว่า กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงนั้นจะใช้กระจกมาสก์ทั้งสิ้น 3 มาส์ก คือ มาส์กที่ 1 : n^+ -region mask มาส์กที่ 2 : contact mask และมาส์กที่ 3 : Al mask ในขณะที่กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะใช้กระจกมาสก์เพียง 2 มาส์กเท่านั้น คือ มาส์กที่ 1 : n^+ -region mask และมาส์กที่ 2 : Al & Selective PS mask ซึ่งนอกจากจะทำให้ลดจำนวนกระจกมาสก์และกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟีลงแล้ว ยังช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสง (active area) ของเซลล์ได้อีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 6.1

ยิ่งไปกว่านั้น การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสึเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยอาศัยเทคนิคการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ ซึ่งไม่ทำความเสียหายให้แก่รอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ด้านล่างนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กระจกชั้นแบบขึ้นเดียว (one mask process) ได้ ทำให้ลดจำนวนกระจกมาสก์ที่ใช้ลง เหลือเพียงกระจกชั้นแบบขึ้นเดียว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงแล้ว ทำให้วิธีนี้มีต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ำลง อีกทั้งเซลล์ที่ได้ยังมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพ และความเป็นไปได้สูงในการนำชั้นพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกัดข้อมสึไปใช้แทนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนต่อไปในอนาคต



รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ สุภเดช, สรวิศ มุ่งการนา, มนัสชัย ไชยนอก, มโน มีร์ภักย์ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยการกัดข้อมสี่เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON 27). vol.2. พฤศจิกายน 2547. หน้า237-240
- [2] สรวิศ มุ่งการนา, สมเกียรติ สุภเดช และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสี่” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28). vol.2. ตุลาคม 2548. หน้า1109-1112
- [3] สรวิศ มุ่งการนา, สมเกียรติ สุภเดช และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสี่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28). vol.2. ตุลาคม 2548. หน้า1113-1116
- [4] C.C. Striemer, F.Shi, and P.M. Fauchet. “Electrochemical Etching of Silicon for Inexpensive and Effective ARCs” 11th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Process. Estes Park, CO, NREL. 19-22 August 2001
- [5] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. “การศึกษาคุณสมบัติภูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิคอน” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542
- [6] A. Uhlir. “Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF Acid” **Tech. J.** vol.35. 1956. pp.333.
- [7] L. T. Canham. **Appl. Phys. Lett. (USA)**. vol.57. 1990. pp.1096
- [8] Y.S. Tsuo, Y.Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb. “Potential Application of Porous Silicon in Photovoltaics” **Photovoltaics Specialists Conference**. May 1993. pp.287-293
- [9] V. M. Aroutiounian, K. R. Maroutyan, A. L. Zatikyan and K. J. Touryan. “Calculations of the reflectance of porous silicon and other antireflection coating to silicon solar cells” **Thin Solid Films**. vol.403-404. 1 February 2002. pp.517-521.
- [10] S. Shih, K. Jung, D. Tsai, K.-H. Li, D.-L. Kwong, J.C. Campbell. **Appl. Phys. Lett. (USA)**. vol.60. 1992. pp.1863
- [11] D. Dimova-Malinovska, M. Sendova-Vassileva, N. Tzenov, M. Kamenova. **Thin Solid Films (Switzerland)**. vol.297. 1997. pp.9

- [12] C. Gueymard, D. Myers, K. Emery. "reference irradiance spectra for solar energy systems testing" **Solar Energy**. vol.73 issue.6. December 2002. pp.443-467
- [13] A. Rohatgi. "Road to cost-effective crystalline silicon photovoltaics" **Proc. of the 3rd WCPEC**. Osaka, Japan. 2003
- [14] Eric Seale. "Available types of solar cells - materials and packaging." [Online]. Available : http://www.solarbotics.net/starting/200202_solar_cells/200202_solar_cell_types.html. 2002.
- [15] Tomas Markvart. **SOLAR ELECTRICITY**. England : John Wiley & Son Ltd., 1994
- [16] M. Ben Damiani. "INVESTIGATION OF LIGHT INDUCED DEGRADATION IN PROMISING PHOTOVOLTAIC GRADE SILICON AND DEVELOPMENT OF POROUS SILICON ANTI-REFLECTION COATING FOR SILICON SOLAR CELLS" Degree Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. Georgia Institute of Technology. April 2004
- [17] สมเกียรติ สุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544
- [18] Hans Joachim Moller. **Semiconductors for Solar Cells**. England : Artech House. 1993
- [19] สมเกียรติ สุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545
- [20] A. Martin Green. **SOLAR CELLS Operating Principle, Technology and System Applications**. Australia : Prentice-Hall, Inc. 1982
- [21] Adolf Goetzberger et al. Rachel Waddington (Translated). **Crystalline Silicon Solar Cells**. England : John Wiley & Son Ltd., 1994
- [22] G.C. John V.A. Singh. **Physics report**. 263, 1195. 93-151.
- [23] J. Rouquerol et al. **Pure Appl. Chem. (UK)**. vol.66 no.8. 1994. pp.1739-1758
- [24] G. Mauckner et al. **J. Lumin (Netherlands)**. vol.57. 1993. pp.211-215
- [25] T. Unagami, M.Seki. **J. Electrochem. Soc. (USA)**. vol.125. no.8. 1978. pp.1339-1344
- [26] H. Baumgart, R.C. Frye, L.E. Trimble, H.J. Leamy, G.K. Celler. **Laser and Electron Beam Interactions With Solids**. Elsevier. 1982. pp.609-614
- [27] V. Labunov, V. Bondarenko, L. Glinenko, A. Dorofeev, L. Tabulina. **Thin Solid Films (Switzerland)**. vol.137. 1986. pp.123-134
- [28] P.C. Searson. **Appl. Phys. Lett. (USA)**. vol.59. 1991. pp.832-834

- [29] L.T. Canham. "Pore type, shape size, volume and surface area in porous silicon"
PROPERTIES OF Porous Silicon. England ; Short Run Press Ltd., 1997
- [30] Y. Watanabe, Y. Arita, T. Yokoyama, Y. Igarashi. **J. Electrochem. Soc. (USA).** vol.122.
1975. pp.1351
- [31] T. Unagami. **J. Electrochem. Soc. (USA).** vol.127 no.2. 1980. pp.476-483
- [32] T. Yau, R. Laiho, L. Meikkila. **J. Vac. Sci. Technol. B (USA).** vol.12 no.4. 1994. pp.2437-
2439
- [33] T.R. Guilinger, M.J. Kelly, E.H. Chason, T.J. Headley, A.J. Howard. **J. Electrochem. Soc.**
(USA). vol.142. 1995. pp.1634
- [34] H.F. Wolf. **SEMICONDUCTORS.** WILEY-INTERSCIENCE a division of John &
Sons. 1971. pp.50
- [35] H. Takagi, M. Mitomi, R. Yano and T. Nakagiri. **Solid State Phys.** vol.27. 1992. pp.875
- [36] Y. Kanemitsu, T. Ogawa, K. Shiraishi and K. Takeda. **Phys. Rev.** B48. 1993. pp.4883
- [37] T. Kawaguchi and S. Miyazima. **Japan J. Appl. Phys.** vol.32. 1993. pp.L215
- [38] R.E. Hummel, A. Morrone, M. Ludwing and S.S. Chang. **Appl. Phys. Lett.** vol.63. 1993.
pp.2771
- [39] M.H. Ludwing, E.E. Hummel and M. Stora. **Thin Solid Films.** vol.255. 1995. pp.103
- [40] A. Halimaoui. "Porous silicon formation by anodisation" **PROPERTIES OF Porous**
Silicon. England ; Short Run Press Ltd., 1997
- [41] W. Lang, P. Steiner, H. Sandmaier. "Porous silicon:a novel material for Microsystems"
Sensor and Actuators. A51. 1995. pp.31-36
- [42] A. Halimaoui. **Surf. Sci. Lett. (Netherlands).** vol.306. 1994. pp.L550-L554
- [43] A. Gee. **J. Electrochem. Soc. (USA).** vol.107. 1960. pp.787
- [44] R.J. Archer. **J. Phys. Chem. Solids (UK).** vol.35. 1956. pp.333
- [45] S. Shih, K. Jung, D. Tsai, K.-H. Li, D.-L. Kwong, J.C. Campbell. **Appl. Phys. Lett. (USA).**
vol.60. 1992. pp.1863
- [46] W.A. Pliskin, E.E. Conrad. **IBM J. Res. Dev. (USA).** vol.8. 1964. pp.43
- [47] R.W. Fathauer, T. George, A. Ksendzov, R.P. Vasquez. **Appl. Phys. Lett. (USA).** vol.60.
1992. pp.995
- [48] R.J. Archer. **J. Phys. Chem. Solids (UK).** vol.14. 1960. pp.104
- [49] A. Steckl, J. Xu, H. Mogul, S. Mogren. **Appl. Phys. Lett. (USA).** vol.62. 1993. pp.1982

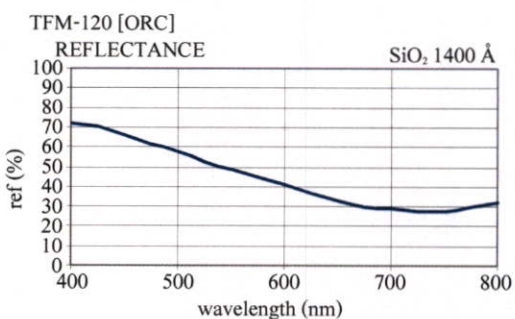
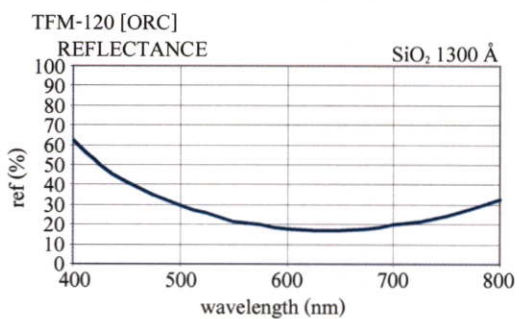
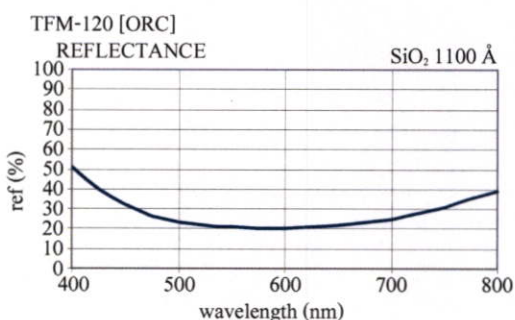
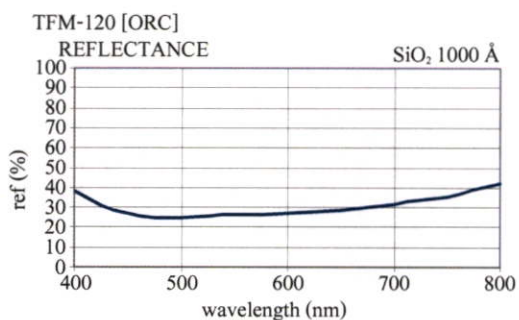
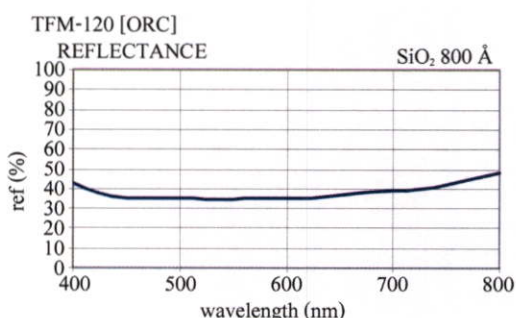
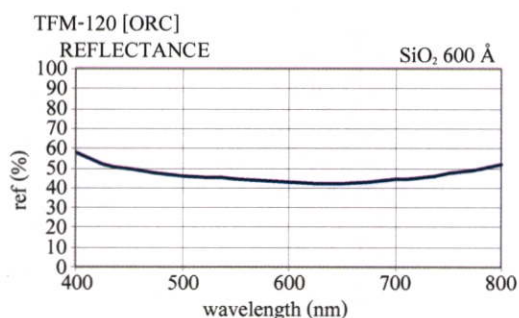
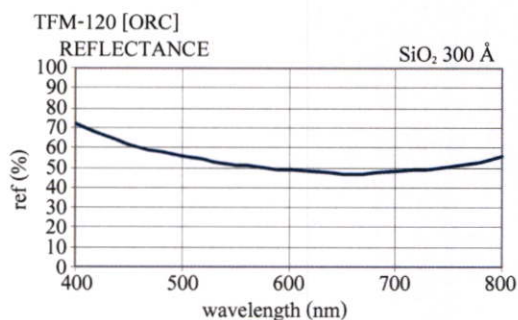
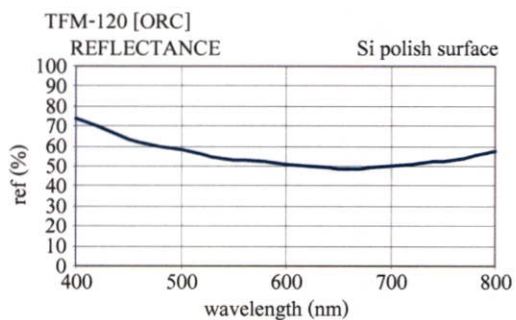
- [50] A. Steckl, J. Xu, H. Mogul. **Appl. Phys. Lett. (USA)**. vol.62. 1993. pp2111
- [51] R. Chandler-Henderson, J.L. Coffey, L. Files-Sesler. **J. Electrochem. Soc. (USA)**. vol.141. 1994. pp.L166
- [52] V. Lehmann and U. Gosele. "Porous silicon formation : A Quantum Wire Effect" **Appl. Phys. Lett.** vol.58 no.8. 1991. pp.856-858
- [53] A. Halimaoui, C. Oules and G. Bomchil. "Electroluminescence in the visible rang during anodic oxidation of porous silicon films" **Appl. Phys. Lett.** vol.59. no.3. 1991. pp.304-306
- [54] Y. Kanemitsu. "Luminescence properties of nanometer-size Si crystallites : core and surface states" **Phys. Rev. B.** vol.49. no.23. 1994. pp.16845-16848
- [55] V.P. Bondarenko and V.A. Yakovtseva. "Optoelectronic applications of porous silicon" **PROPERTIES OF Porous Silicon.** England ; Short Run Press Ltd., 1997
- [56] H. Föll, M. Christophersen, J. Carstensen and G. Hasse. [Online]. Available : <http://www.techfak.uni-kiel.de>. 2004.
- [57] L.T. Canham. "Biomedical applications of porous silicon" **PROPERTIES OF Porous Silicon.** England ; Short Run Press Ltd., 1997
- [58] J. Das, S. M. Hossain, S. Chakraborty and H. Saha. "Role of parasitics in humidity sensing by porous silicon" **Sensors and Actuators A: Physical.** vol.94. October 2001. pp.44-52
- [59] M.J. Sailor. "Sensor applications of porous silicon" **PROPERTIES OF Porous Silicon.** England ; Short Run Press Ltd., 1997
- [60] LEIGH CANHAM. "CHAPTER 12 APPLICATION AREAS" **PROPERTIES OF Porous Silicon.** England ; Short Run Press Ltd., 1997
- [61] ชลิดา คูหาเรือง. "กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับลวดลายขนาด 5 ไมครอนบนซิลิคอนไดออกไซด์และอลูมิเนียม" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547

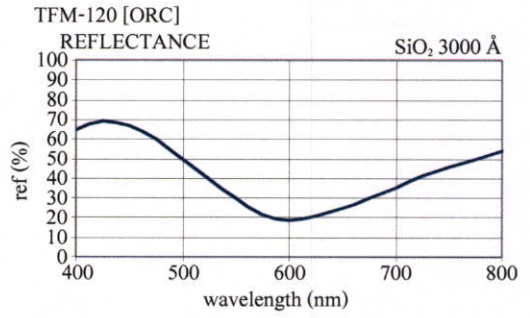
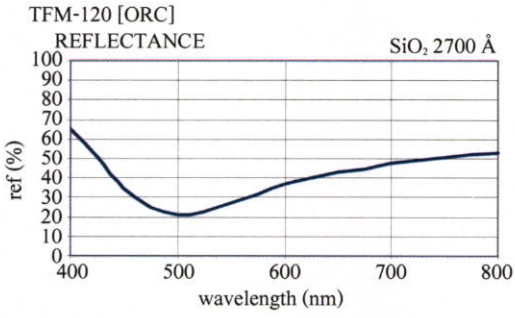
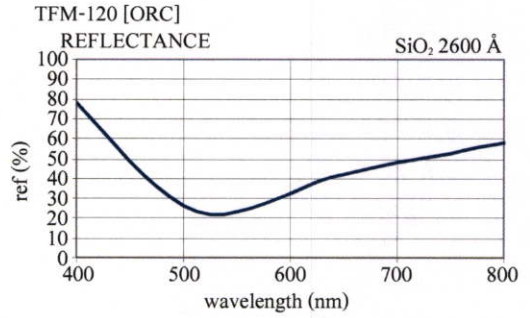
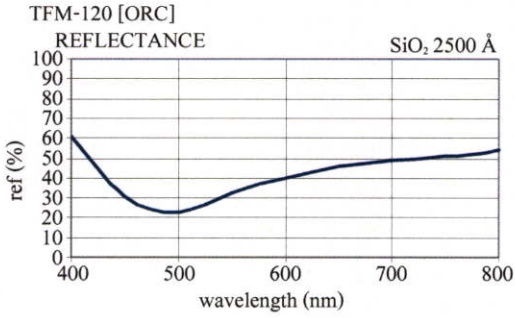
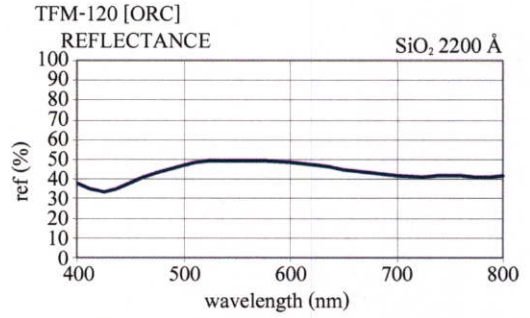
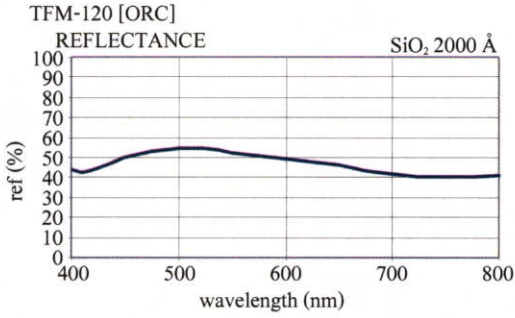
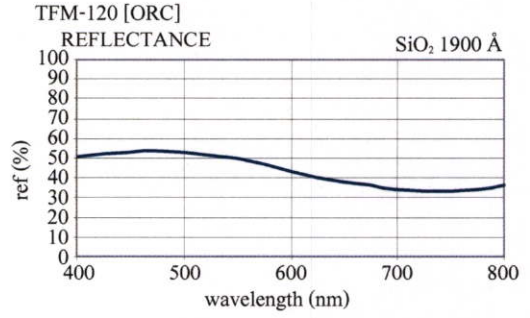
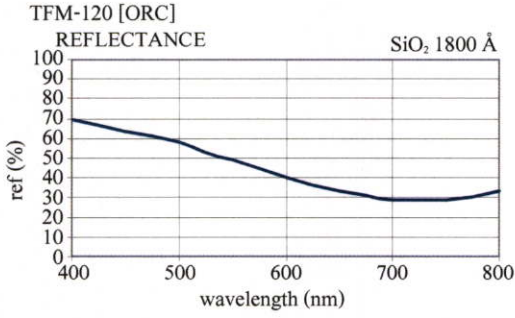
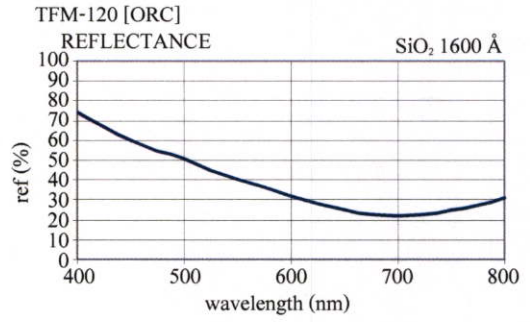
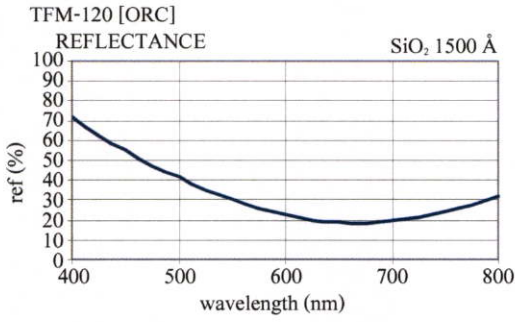
ภาคผนวก

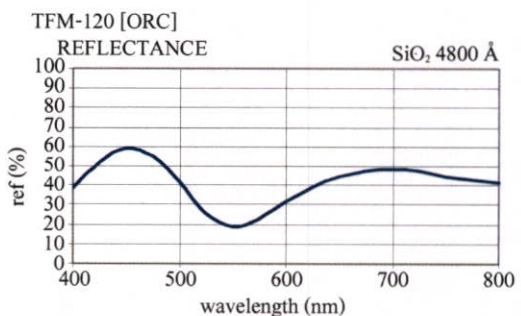
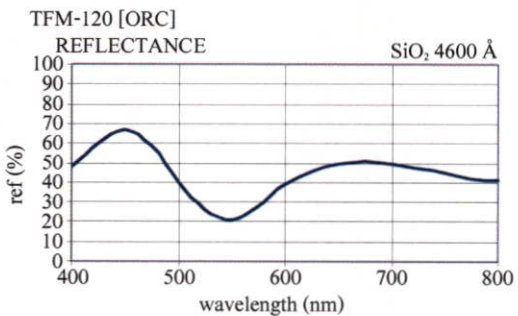
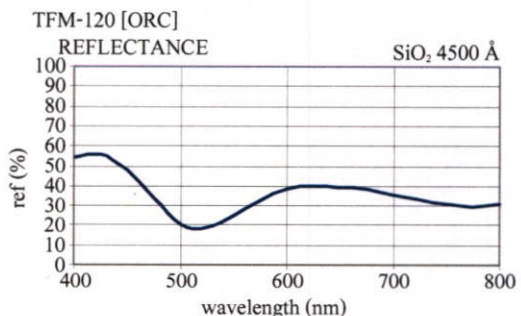
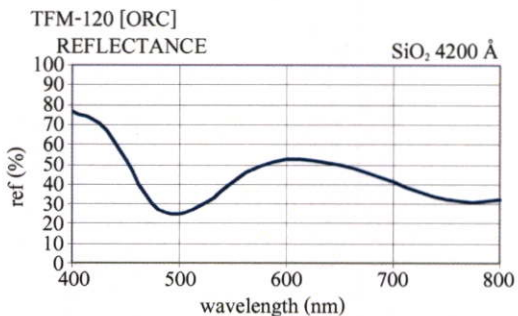
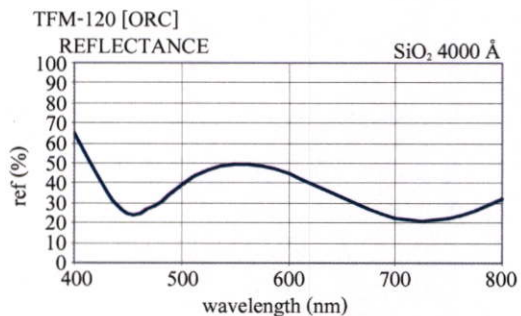
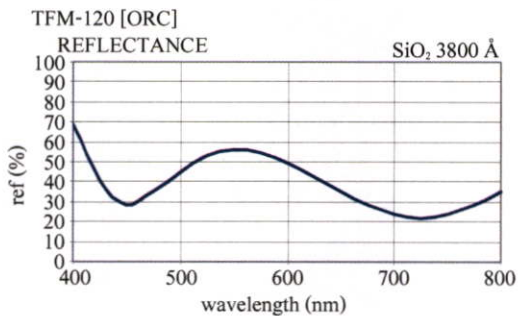
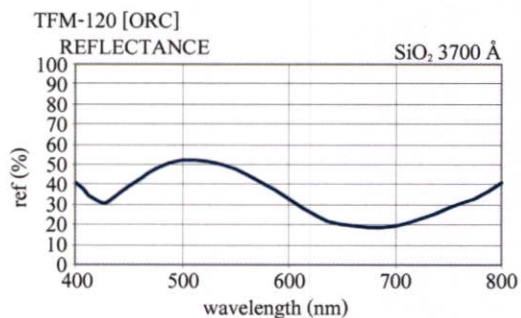
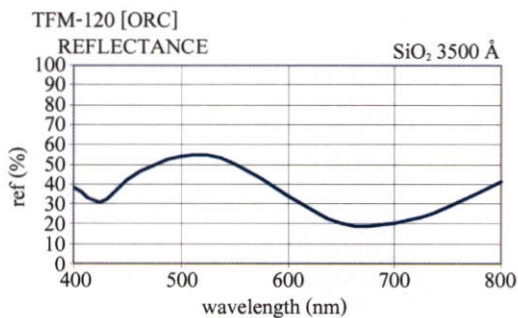
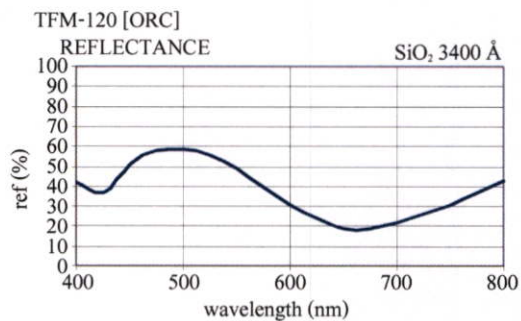
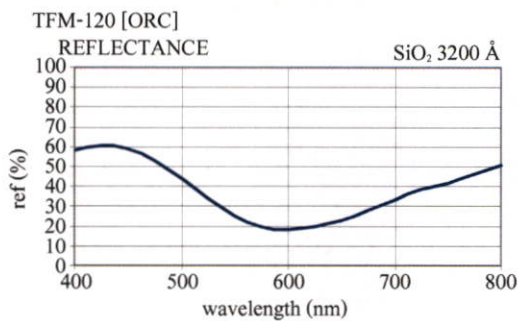
ภาคผนวก ก.

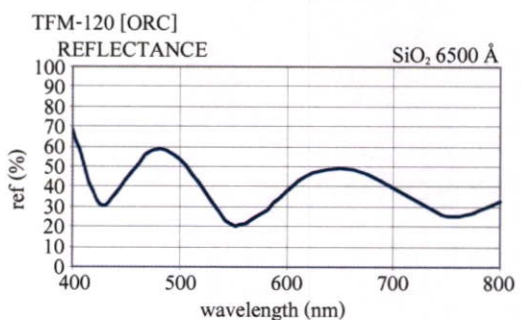
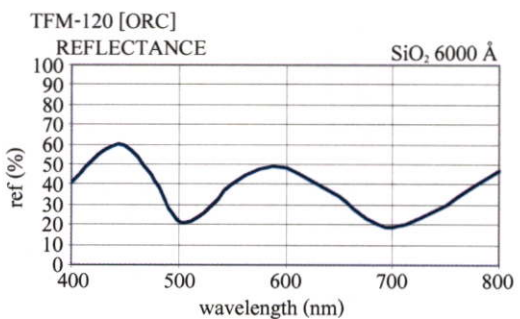
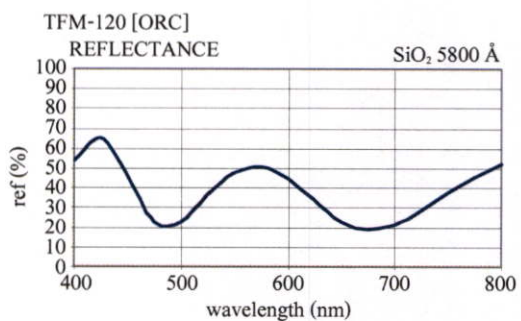
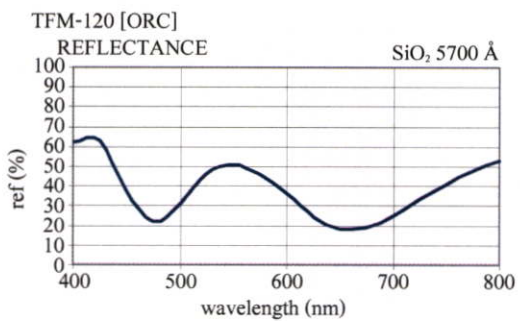
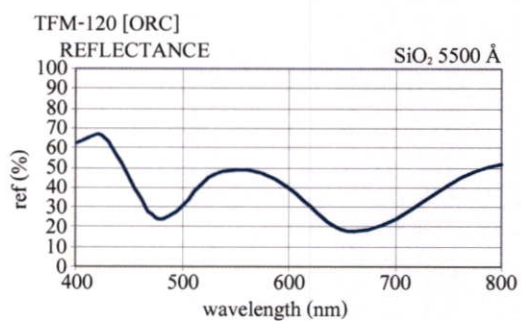
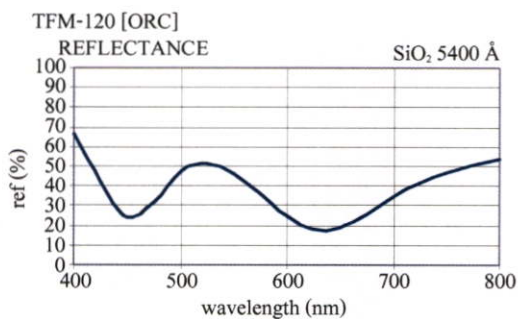
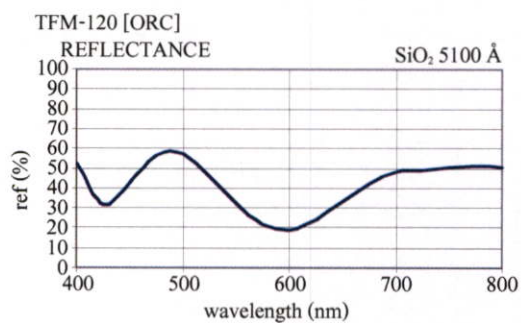
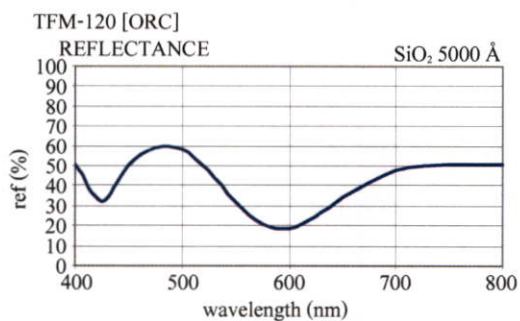
การสะท้อนแสงของผิวหน้าซิลิกอน และชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

ที่ความหนาระหว่าง 300Å - 6500Å









ภาคผนวก ข.

น้ำยาไวแสงและน้ำยาจั้นลวดลาย

ภาคผนวก ข จะกล่าวถึง ข้อมูลของน้ำยาไวแสงและน้ำยาจั้นลวดลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการทราบคุณสมบัติของน้ำยาไวแสงก่อนใช้งาน จะทำให้สามารถใช้งานน้ำยาไวแสงได้อย่างถูกต้อง

AZ 300 MIF Developer

High Purity

Organic Aqueous Alkaline

MIF Developer

1. Description

AZ 300 MIF developer is an organic aqueous alkaline developer based on TMAH. It has low metal ions . Lot - to - lot consistency is achieved through strict quality control.

AZ 300 MIF developer contains no surfactant and can be used in dip, puddle, and spray process

2. Properties

- 1) Appearance : Clear (colorless)
- 2) Specific Gravity (25 °C) : 1.000 ± 0.010

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

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
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)

MICROPOSIT

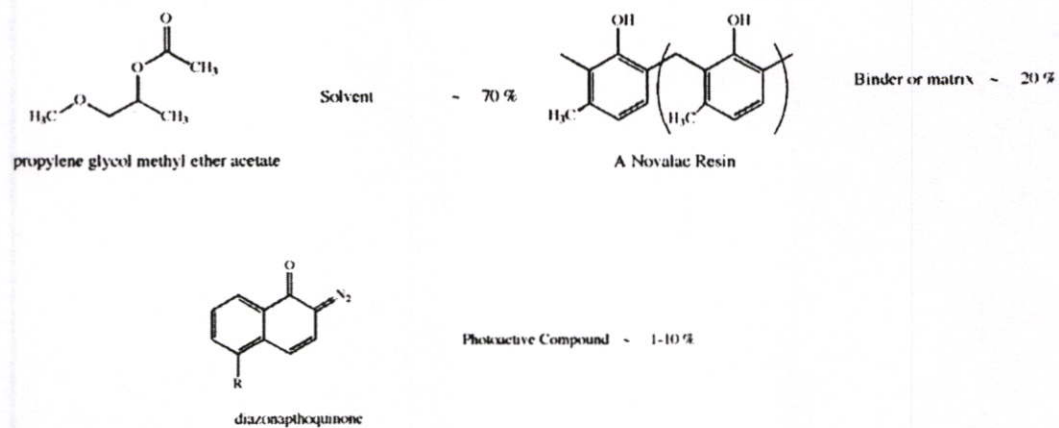
S1818 Series Photoresist

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

Features

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

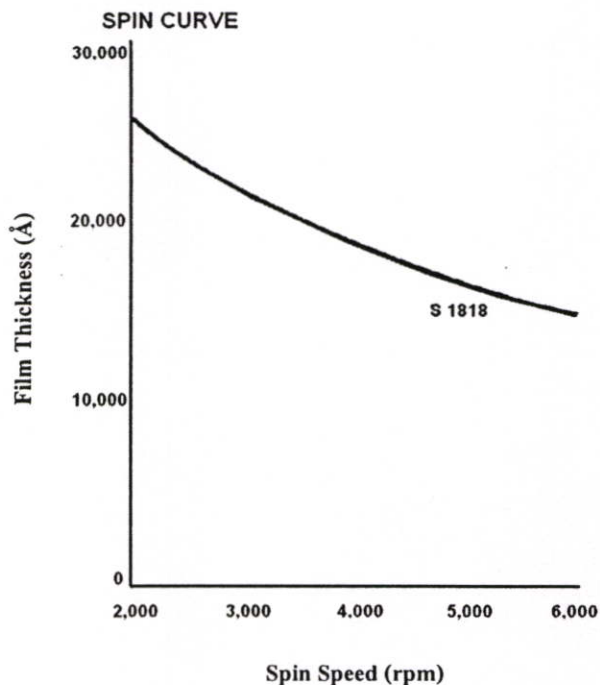
Component Photoresist



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
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.



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการสปินกับความหนาของฟิล์ม
น้ำยาไวแสง เบอร์ S1818

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. สมเกียรติ สุกเดช สรวิศ มุ่งการนา มนัสชัย ไชยนอก มโน มีรักษ์ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การสร้างชั้นพอร์ซซิติกอนโดยการกักด้อยอมสีเพื่อใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิติกอน,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON 27), Vol.2, หน้า 237-240, โรงแรม โซฟีเทล ราชฯ ออคิต ขอนแก่น, ขอนแก่น, 11-12 พฤศจิกายน, 2547
2. สรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ สุกเดช และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การเลือกสร้างชั้นพอร์ซซิติกอนเฉพาะที่โดยวิธีการกักด้อยอมสี,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28), Vol.2, หน้า 1109-1112, โรงแรม เพิร์ล วิจเล็จ, ภูเก็ต, 20-21 ตุลาคม, 2548
3. สรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ สุกเดช และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิติกอนจากการกักด้อยอมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28), Vol.2, หน้า 1113-1116, โรงแรม เพิร์ล วิจเล็จ, ภูเก็ต, 20-21 ตุลาคม, 2548

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27
27th Electrical Engineering Conference

Volume II

สาขาบทความ

- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น



ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น



การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนโดยการกัดข้อมติเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน Formation of Porous Silicon by Stain Etching for Anti-Reflection Layer of Silicon Solar Cells

สมเกียรติ คุนเดช ธีรวิศ มุ่งกรานา มนต์ชัย ไชยนอก มโน มีรักษ์ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384 E-mail : kssomkia@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

พอร์ซิลิคอนซึ่งเป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก สามารถสร้างได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่าย และประหยัดที่สุดได้แก่ วิธีการกัดข้อมติด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และน้ำ คุณสมบัติที่สำคัญ เช่น การเรืองแสง การเปล่งแสง และการดูดกลืนโฟตอน ทำให้พอร์ซิลิคอนถูกนำไปใช้งานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านแสง รายงานฉบับนี้ ได้เสนอการทดลอง และผลการทดลองสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนโดยวิธีการกัดข้อมติ รวมทั้งผลการทดสอบคุณสมบัติของชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างได้ โดยเฉพาะคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ นอกจากนี้ ได้ศึกษาผลของสภาพผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีต่อการเกิดชั้นพอร์ซิลิคอน การกระตุบอัตราการเกิด และการหน่วงพอร์ซิลิคอน ด้วยแสงและคลื่นเสียงความถี่สูงตามลำดับ รวมทั้งผลของอุณหภูมิ จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างได้จากการกัดข้อมติมีศักยภาพสูงที่จะใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนได้ออกไซด์ได้เป็นอย่างดี แต่การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ง่ายกว่า และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ การใช้ชั้นพอร์ซิลิคอนจะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูก

คำสำคัญ: พอร์ซิลิคอน, การกัดข้อมติ, เซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

Porous silicon or bulk silicon which contains many small pores, can be formed by various methods but the easiest and cheapest method is Stain Etching of silicon crystal with the mixed solution of hydrofluoric acid and nitric acid. Because the important properties of porous silicon such as photoluminescence, electroluminescence and high efficiency of photon absorption so it is widely used, especially in the field of optoelectronic devices. This paper presents the experiments and results of formation of porous silicon by stain etching, the investigation of growth rate and properties of porous film that obtained by difference conditions such as temperature of solution and surface

condition of initial silicon wafer are reported. Moreover the effects of light illumination and sonication during the formation of porous silicon are also proposed. The experiment results show high potential applications of porous silicon by stain etching for the low cost and high efficiency silicon solar cells manufacturing industry.

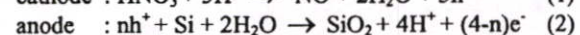
Keywords : porous silicon, stain etching, solar cells

1. บทนำ

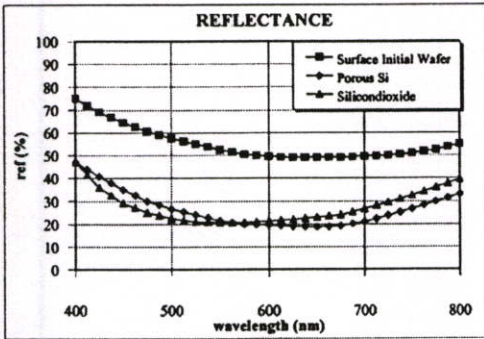
พอร์ซิลิคอนได้ถูกค้นพบ และรู้จักกันมาเป็นเวลานานแล้วเมื่อปี ค.ศ. 1956 โดย Uhlir [1] แต่คุณสมบัติบางประการที่สำคัญซึ่งแตกต่างจากซิลิคอนโดยสิ้นเชิง เช่น การเรืองแสง (Photoluminescence) และการเปล่งแสง (Electroluminescence) ที่อุณหภูมิห้อง เพิ่งเป็นที่รู้จักกันเมื่อปี ค.ศ. 1990 โดย Leigh Canham [2] นอกจากนี้ ชั้นของพอร์ซิลิคอนยังสามารถดูดกลืนรังสีได้ดี และมีดัชนีการหักเห (Refractive index) ต่ำและอยู่ในช่วงกว้าง คือ 1.25 - 3 อีกด้วย [3] ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ทำให้ชั้นพอร์ซิลิคอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ชั้นพอร์ซิลิคอนสามารถสร้างได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายที่สุด และประหยัดที่สุด [4] ที่ยังสามารถปรับเข้ากับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดี คือ วิธีการกัดข้อมติ (stain etching) ผลึกซิลิคอนด้วยสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และน้ำ

ชั้นของพอร์ซิลิคอนนอกจากจะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนโฟตอนได้ดีแล้วยังมีการสะท้อนแสงที่ต่ำ จึงเหมาะที่จะใช้เป็นชั้นดูดกลืนโฟตอน และชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี และการใช้ชั้นพอร์ซิลิคอนจากการกัดข้อมติ จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง และมีราคาต่ำ [5]

โดยทั่วไปการกัดข้อมติผลึกซิลิคอนเพื่อสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนสามารถทำได้ง่ายด้วยการจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายซึ่งประกอบด้วย กรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้น 47 wt.% กรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 60 wt.% และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ ตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์ซิลิคอน คือ การเกิดโฮล (h⁺) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาการเกิด NO ดังสมการที่ (1) [6]



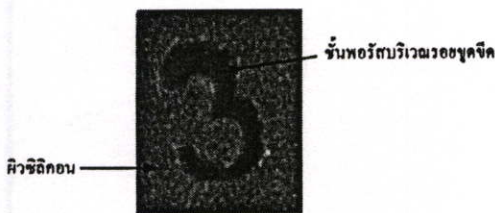
คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ในช่วง 400 nm. - 800 nm. ของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ความหนาประมาณ 150 nm. ถูกวัด และเปรียบเทียบกับผิวเดิมของซิลิคอนขณะที่ยังไม่ขึ้นพอร์ซ ผลการทดลองพบว่า ผิวหน้าเดิมของซิลิคอนมีการสะท้อนแสงโดยเฉลี่ยสูงกว่า 50% แต่ชั้นพอร์ซมีการสะท้อนแสงที่ต่ำมาก โดยต่ำสุดเพียง 20% ในช่วง 500 - 700 nm. ดังในรูปที่ 4 นอกจากนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การสะท้อนแสงของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่หนา 1,000 Å ซึ่งนิยมใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป พบว่า ชั้นพอร์ซซิลิคอนนี้มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ดีและเท่ากับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าชั้นพอร์ซซิลิคอนมีศักยภาพสูงที่จะใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงแทนซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 4 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นซิลิคอน พอร์ซซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

3.2 ผลของสภาพพื้นผิวหน้าที่มีต่อการเกิดพอร์ซซิลิคอน

เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวของผลึกซิลิคอนที่มีผลต่อการเกิดชั้นพอร์ซ ได้มีการทดลองโดยนำแผ่นซิลิคอนที่มีผิวหน้าเรียบมันวาว มาขีดเขียนให้เป็นรอยด้วย Diamond pen แล้วทำการกัดข้อมีสตามปกติ พบว่า บริเวณผิวผลึกซิลิคอนที่มีรอยขีดจะเกิดชั้นพอร์ซขึ้นก่อนบริเวณที่มีผิวเรียบ ซึ่งผลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซเฉพาะบริเวณที่ต้องการได้ ดังในรูปที่ 5 ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการสร้างผลผลิตของชั้นพอร์ซซิลิคอนในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ได้

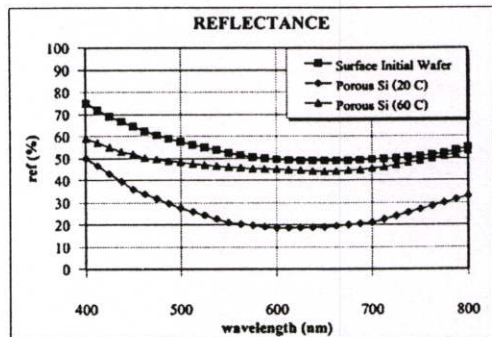


รูปที่ 5 การเกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนที่บริเวณพื้นผิวขรุขระ

3.3 ผลของแสง อุณหภูมิ คลื่นเสียงความถี่สูง ที่มีต่อการเกิดพอร์ซซิลิคอน

เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการเกิดพอร์ซซิลิคอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยการฉายแสงขณะทำการกัดข้อมีส ได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (111) ค่าสภาพความต้านทาน 4 Ω.cm ผิวหน้าเรียบมันวาว โดยใช้สารละลายปกติซึ่งในขณะทำการกัดข้อมีสได้มีการฉายแสงจากหลอดทั้งสแตน หลอดฮาโลเจน และเปรียบเทียบกับการใช้แสงภายในห้องปกติ พบว่า การฉายแสงทั้งจากหลอดทั้งสแตนและหลอดฮาโลเจน ทำให้มีการเกิดพอร์ซที่เร็วกว่าการใช้แสงในห้องปกติราว 3 เท่า ซึ่งผลดังกล่าวอธิบายได้ว่า แสงหรือโฟตอนเมื่อถูกดูดกลืนด้วยอะตอมสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และโฮลที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดชั้นพอร์ซได้ดีดังในสมการที่ (1) นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆของพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการใช้แสงของหลอดทั้งสแตนจะมีความสม่ำเสมอ (Uniformity) ที่ดีกว่าชั้นพอร์ซที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแสงของหลอดฮาโลเจน

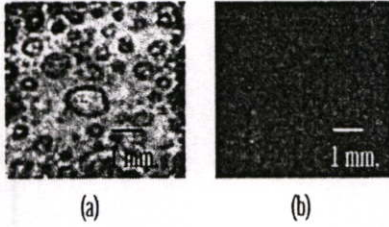
การศึกษามผลของอุณหภูมิสารละลายที่มีต่อการสร้างพอร์ซซิลิคอน ได้ทำการทดลองโดยการกัดข้อมีส ด้วยสารละลายปกติที่ถูกควบคุมอุณหภูมิ 20 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า ลักษณะภายนอกของชั้นพอร์ซที่ได้ไม่แตกต่างกัน แต่ชั้นพอร์ซที่ได้จากสารละลายอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ให้คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ดีกว่าชั้นพอร์ซที่ได้จากสารละลายอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมีส ที่อุณหภูมิต่างกัน

สำหรับการศึกษามผลของคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีต่อการเกิดพอร์ซซิลิคอน ได้ทำการทดลองโดยการกัดข้อมีส ในอุปกรณ์ทำความสะอาดด้วยระบบคลื่นเสียงความถี่สูง (sonication) จากการทดลองพบว่า อัตราการเกิดชั้นพอร์ซจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการบวกรวนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งผลดังกล่าวอาจนำไปใช้ประโยชน์เป็นวิธีการ

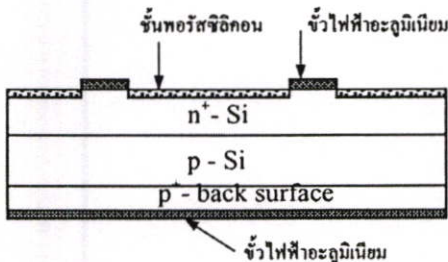
หน่วยงานปฏิบัติการเกิดขึ้นพอรัสได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะของชั้นพอรัสที่ได้จากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงจะมีความสม่ำเสมอดีกว่าวิธีที่ไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสม่ำเสมอของชั้นพอรัสซิลิคอน (a) ไม่มีการทำ sonication (b) มีการทำ sonication ขณะสร้างชั้นพอรัส

4. สรุป

ชั้นพอรัสซิลิคอนสามารถสร้างได้ง่ายด้วยวิธีการกัดอ้อมสี ผลึกรูปเดี่ยวซิลิคอนในสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก (47 wt%) กรดไนตริก (60 wt%) และน้ำ ในสัดส่วน 1:3:5 ชั้นพอรัสที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟิล์มบางอยู่บนผิวผลึกซิลิคอน และสามารถให้คุณสมบัติ Photoluminescence ได้ดี และมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำไม่แตกต่างจากชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ อัตราการเกิดและคุณสมบัติของชั้นพอรัส สามารถเปลี่ยนแปลงและควบคุมได้ด้วยเงื่อนไขต่างๆ ผลการทดลองในรายงานนี้ แสดงให้เห็นว่า ชั้นพอรัสซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการกัดอ้อมสีซึ่งบางมาก สามารถนำมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนแทนชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี และมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสร้างได้ง่ายไม่ยุ่งยาก และไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย เหมือนกับการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งต้องใช้กระบวนการสร้างที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้การสร้างชั้นพอรัสด้วยวิธีนี้ยังสอดคล้องกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นชั้นพอรัสซิลิคอน ยังมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือสามารถดูดกลืนโฟตอนได้ดี จึงสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนโฟตอนได้อีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ให้สูงขึ้น ตัวอย่างโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอรัสเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงแสดงได้ดังในรูปที่ 8



รูปที่ 8 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

ซึ่งเซลล์ดังกล่าวจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูก รายละเอียดของการสร้าง และคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์กำลังดำเนินการวิจัยอยู่ และจะได้นำเสนอต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากเงินรายได้ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2546 - 2547

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Uhler, "Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF Acid," Tech. J., vol.35, pp. 333, 1956
- [2] L. T. Canham, Appl. Phys. Lett. (USA), vol.57, pp.1096, 1990
- [3] V. M. Aroutiounian, K. R. Maroutyan, A. L. Zatikyan and K. J. Touryan, "Calculations of the reflectance of porous silicon and other antireflection coating to silicon solar cells," Thin Solid Films, vol. 403-404, pp.517-521, 1 February 2002
- [4] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, "การศึกษาคุณสมบัติคุณสมบัติของชั้นพอรัสซิลิคอน," วิทยานิพนธ์ วท.ม. สจล., หน้า 53-56, 2542
- [5] Y.S. Tsuo, Y.Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb, "Potential Application of Porous Silicon in Photovoltaics," Photovoltaics Specialists Conference., pp.287-293, 10-14 May 1993
- [6] S. Shih, K. Jung, D. Tsai, K.-H. Li, D.-L. Kwong, J.C. Campbell, Appl. Phys. Lett. (USA), vol.60, pp.1863, 1992



สมเกียรติ สุเดช ปริญญา : รองศาสตราจารย์ระดับ 9
ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



สรวิศ มุ่งการนา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปริญญา : กำลังศึกษา
ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์



มนัสชัย ไชยชอก วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



มนโน มีร์ชัย วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ปริญญา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 7
ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 28th Electrical Engineering Conference



Volume II

Electrical Engineering

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



Western
Digital



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
20 - 21 ตุลาคม 2548
ณ โรงแรม เฟิร์ล วิลเลจ จ.ภูเก็ต

การเลือกสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสิ Selective Formation of Porous Silicon by Stain Etching

ศรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ สุขเดช และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนจลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384 E-mail : kssomkia@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้เสนอการทดลอง และผลการทดลองการเลือกสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสิบนแผ่นซิลิคอนและแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นโลหะอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน โดยใช้หน้ายาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 และเบอร์ S1818 เป็นชั้นป้องกันในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า หน้าทั้งสองชนิดสามารถเป็นชั้นป้องกันได้ แต่หน้ายาไวแสงเบอร์ S1818 จะให้ความละเอียดของลวดลายดีกว่า ซึ่งไปกว่านั้นยังสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการเลือกสร้างพอร์ซิลิคอนบนซิลิคอนที่มีชั้นโลหะอลูมิเนียมเคลือบอยู่ด้านบน โดยการกัดทะลุผ่านชั้นอลูมิเนียมลงไปได้อีกด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้ทำให้สามารถใช้ลวดลายอลูมิเนียมในการกำหนดการเลือกสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสิได้ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านแสงอื่นๆ เช่น โฟโตดีเทคเตอร์หรือเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เพื่อให้ได้ตัวอุปกรณ์แสงที่มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูกลง

คำสำคัญ : พอร์ซิลิคอน, การกัดข้อมสิ, การเลือกสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่

Abstract

This paper presents the experiments and results of selective formation of porous silicon by stain etching on silicon surface and aluminium coated silicon surface. The positive photo-resists of AZ P1350 and S1818 have been used as the masking layer in photolithography process. The experimental results show that both of photo-resists are good masking layers but S1818 provided the higher selectivity of porous silicon layer. Moreover, the S1818 photo-resist can be used as masking layer in forming porous silicon layer by etching through aluminium metal layer. Also, using Al patterns can provide routes for selective formation of porous silicon as well. By this simple technique, it is very useful for making low cost and high efficiency silicon photo detectors and silicon solar cells with porous silicon as anti-reflection layer.

Keywords : porous silicon, stain etching, selective formation of PS

1. บทนำ

พอร์ซิลิคอนซึ่งถูกค้นพบในปี ค.ศ.1956 [1] นอกจากจะมีคุณสมบัติการเรืองแสง (Photoluminescence) และการเปล่งแสง (Electroluminescence) ที่อุณหภูมิห้องแล้ว [2] ยังมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนโฟตอนได้ดีและมีการสะท้อนแสงที่ต่ำอีกด้วย ชั้นพอร์ซิลิคอนจึงเป็นวัสดุใหม่ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง [3] การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนและประเภทที่สุด คือ วิธีการกัดข้อมสิ (Stain Etching) [4] ด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และกรดไนตริก (HNO₃) เมื่อซิลิคอนบางส่วนจะถูกละลายออกไปด้วยปฏิกิริยาเคมี และมีรูพรุนขนาดเล็กรวมกัน กลายเป็นชั้นพอร์ซิลิคอน มองเห็นเป็นสีต่างๆ ปรากฏขึ้น [5]

ไม่นานมานี้พบว่า ชั้นของอลูมิเนียมสามารถเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดพอร์ซิลิคอนได้ [6] ดังนั้นอัตราการเกิดชั้นพอร์ซิลิคอนโดยวิธีการกัดข้อมสิบนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่บนผิวหน้าจะสูงกว่าปกติ ซึ่งจากวิธีการนี้เราสามารถใส่ลวดลายอลูมิเนียมช่วยในการกำหนดการเลือกสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสิได้เป็นอย่างดี

2. การสร้าง และการทดลอง

การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนโดยวิธีการกัดข้อมสิในการทดลองนี้ทำได้โดยจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารละลายผสมของ HF (47 wt.%) HNO₃ (60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:3:5 ใช้เวลาเพาะบ่มสารละลาย 30 นาที และใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี ชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm . สร้างได้จากการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศ การ Sintering เพื่อให้ได้ Al/Si Alloy ทำที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 12 นาที กระจกมาสักที่ใช้ได้จากการออกแบบลวดลายโลหะเพื่อทดสอบหาค่า Critical Dimension (CD) ของลายเส้นขนาดต่างๆกันในพื้นที่ขนาด 1.6×1.8 cm² โดยใช้โปรแกรม corelDRAW Graphics Suite 12 เมื่อนำข้อมูลไฟล์ที่ออกแบบไว้ไปสแกนด้วย laser

scanner ลงบนฟิล์มแล้วนำไปติดบนกระจกใสจะทำให้ได้กระจกโฟโต้มาส์กสำหรับการทดลอง

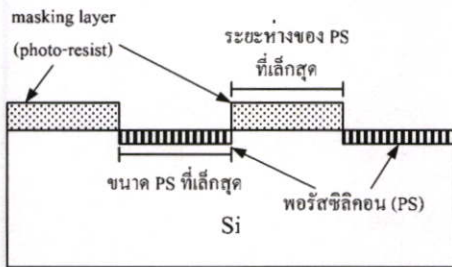
น้ำยาไวแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีเป็นชนิดบวกเบอร์ S1818 และ AZ P1350 ซึ่งมีความหนืด 22.3 cSt และ 4.8 cSt ตามลำดับ S1818 สามารถสร้างลวดลายได้ละเอียดถึง 0.5 μm . ส่วน AZ P1350 สร้างลวดลายได้เล็กที่สุด 4.5 μm . โดยน้ำยาทั้งสองใช้กับแสงที่มีความยาวคลื่น 465 nm. (g-line) และน้ำยาดิวเวลอป (Developer) ที่ใช้คือ AZ-300 MIF

การเคลือบน้ำยาไวแสงใช้อุปกรณ์สปินเนอร์ (Spinner) ซึ่งความหนาของชั้นน้ำยาไวแสงที่ได้จะขึ้นกับความเร็วยรอบของการหมุน ดังในตารางที่ 1 เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นความหนาของฟิล์มจะลดลง แต่ความสม่ำเสมอ (uniformity) จะดีขึ้น ปกติมักใช้ความเร็วรอบประมาณ 4,000-5,000 rpm.

3. ผลการทดลอง และการอภิปราย

3.1 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอน

การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอนสามารถทำได้ด้วยกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี (Photolithography Process) โดยใช้น้ำยาไวแสงเป็นชั้นป้องกัน (Masking layer) ดังแสดงในรูปที่ 1

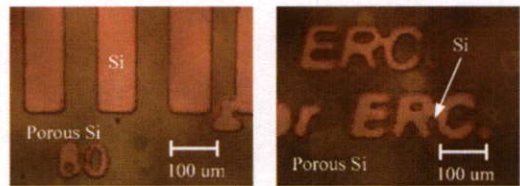


รูปที่ 1 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอน

ชั้นของน้ำยาไวแสง AZ P1350 ที่เคลือบด้วยความเร็วรอบในช่วง 4,000-2,000 rpm. ซึ่งหนา 5,000-7,000 Å และ S1818 ที่เคลือบด้วยความเร็วรอบในช่วง 5,000-3,000 rpm. ซึ่งหนา 13,000-16,000 Å สามารถเป็นชั้นป้องกันผิวในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอนได้ โดยมีระยะห่างของชั้นพอร์สซิลิคอนเล็กสุด 50 μm . ในกรณี AZ P1350 และ 30 μm . ในกรณี S1818 ดังในตารางที่ 1 นอกจากนี้ น้ำยาไวแสง AZ P1350 และ S1818 สามารถทนต่อสารละลายผสมของ HF ได้นานสุด 120 วินาที และ 180 วินาที ตามลำดับ ก่อนที่จะหลุดร่อนออก ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่มีการเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่แสดงดังในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นผลึก Si โดยใช้น้ำยาไวแสงเบอร์ AZ P1350 และ S1818 เป็นชั้นป้องกัน

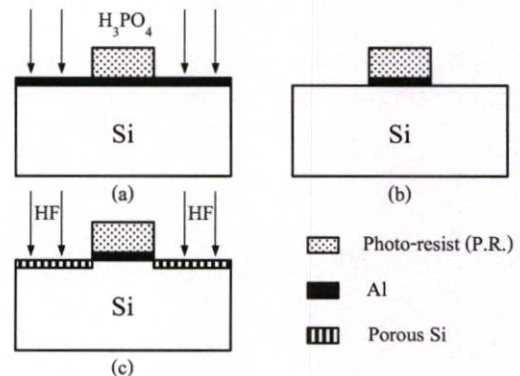
ความเร็วการสปิน rpm.	ความหนาน้ำยาไวแสง (Å)		ความสามารถในการเลือกสร้างลวดลายบน Si (ระยะห่างของPSที่เล็กสุด)	
	AZ P1350	S1818	AZ P1350	S1818
2,000	7,000	-	ได้ (50 μm)	-
3,000	5,700	16,000	ได้ (50 μm)	ได้ (30 μm)
4,000	5,000	14,500	ได้ (50 μm)	ได้ (30 μm)
5,000	4,500	13,000	ไม่ได้	ได้ (30 μm)



รูปที่ 2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่มีการเลือกสร้างพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่

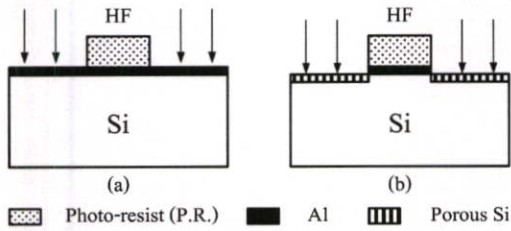
3.2 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นออกซิเจนเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน

การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นออกซิเจนเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนทำได้ 2 วิธีคือ วิธีที่ 1 ใช้กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีเปิดชั้นของออกซิเจนบริเวณที่ต้องการจะสร้างชั้นพอร์สออกก่อนด้วยสารละลาย H_3PO_4 แล้วจึงสร้างชั้นพอร์สเฉพาะที่ด้วยสารละลายผสมของ HF ดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นออกซิเจนเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน โดยวิธีที่ 1

และวิธีที่ 2 ใช้คุณสมบัติของชั้นอลูมิเนียมที่เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดชั้นพอร์ซซิลิคอน และเนื่องจากสารละลายผสมของ HF ที่ใช้ในการสร้างพอร์ซซิลิคอนสามารถกัดอลูมิเนียมได้ จึงทำการเลือกสร้างชั้นพอร์ซโดยใช้สารละลายผสมของ HF กัดทะลุชั้นอลูมิเนียมลงไปถึงผิวซิลิคอนและกัดชั้นซิลิคอนเกิดเป็นชั้นพอร์ซ ดังในรูปที่ 4 ซึ่งในการทดลองนี้ชั้นอลูมิเนียมถูกแยกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีการทำ Sintering เพื่อให้ได้ Al/Si Alloy และกลุ่มที่ไม่มีการทำ Sintering



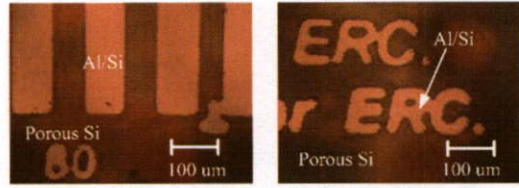
รูปที่ 4 การเลือกสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน โดยวิธีที่ 2

โดยวิธีที่ 1 พบว่าน้ำยาไวแสง AZ P1350 ใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าได้ เมื่อน้ำยาไวแสงถูกเคลือบด้วยความเร็วรอบ ≤ 3000 rpm. หรือมีความหนา $\geq 5,700$ Å โดยมีระยะห่างของพอร์ซเล็กที่สุดประมาณ 60 μm . และกรณีของ Al/Si Alloy จะมีระยะห่างของพอร์ซเล็กที่สุดประมาณ 50 μm . ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการเลือกสร้างพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นผลึก Si ที่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนและใช้น้ำยาไวแสง AZ P1350 โดยวิธีที่ 1

ความเร็วการสปิน rpm.	ความหนาน้ำยาไวแสง (Å)	ความสามารถในการเลือกสร้างลวดลายบน Al (ระยะห่างของ PS ที่เล็กที่สุด)	
		Al/Si	Al/Si Alloy
2,000	7,000	ได้ (60 μm)	ได้ (50 μm)
3,000	5,700	ได้ (60 μm)	ได้ (50 μm)
4,000	5,000	ไม่ได้	ไม่ได้
5,000	4,500	ไม่ได้	ไม่ได้

ส่วนน้ำยาไวแสง S1818 ที่ถูกเคลือบด้วยความเร็วรอบ 5,000-3,000 rpm. หรือความหนา 13,000-16,500 Å ใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าได้ โดยมีระยะห่างของพอร์ซเล็กที่สุดประมาณ 30 μm . ภาพถ่ายผิวหน้าของการเลือกสร้างพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่ โดยวิธีที่ 1 แสดงดังในรูปที่ 5 นอกจากนี้ น้ำยาไวแสงเบอร์ AZ P1350 และ S1818 สามารถทนต่อสารละลายผสมของ HF ได้นานสุด 100 วินาที และ 180 วินาที ตามลำดับก่อนที่จะหลุดร่อนออก



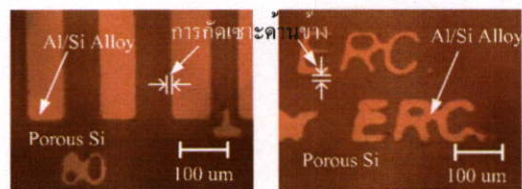
รูปที่ 5 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนที่มีการเลือกสร้างพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่ โดยวิธีที่ 1

ในการทดลองโดยวิธีที่ 2 ซึ่งเป็นการเลือกสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนพบว่าน้ำยาไวแสง AZ P1350 ที่ถูกเคลือบด้วยความเร็วรอบ 2,000-5,000 rpm. ซึ่งมีความหนา $< 7,000$ Å ไม่สามารถเป็นชั้นป้องกันผิวหน้าได้

สำหรับน้ำยาไวแสง S1818 ที่ถูกเคลือบด้วยความเร็วรอบ 5,000-3,000 rpm. ซึ่งมีความหนา $\geq 13,000$ Å ใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าได้ดี โดยมีระยะห่างของพอร์ซเล็กที่สุด 30 μm . ดังในตารางที่ 3 และสามารถทนต่อสารละลายผสมของ HF ได้นานสุด 160 วินาทีก่อนที่จะหลุดร่อนออก ภาพถ่ายผิวหน้าของการเลือกสร้างพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีที่ 2 แสดงดังในรูปที่ 6

ตารางที่ 3 ผลการเลือกสร้างพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นผลึก Si ที่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน และใช้น้ำยาไวแสง S1818 โดยวิธีที่ 2

ความเร็วการสปิน rpm.	ความหนาน้ำยาไวแสง (Å)	ความสามารถในการเลือกสร้างลวดลายบน Al (ระยะห่างของ PS ที่เล็กที่สุด)	
		Al/Si	Al/Si Alloy
3,000	16,500	ได้ (30 μm)	ได้ (30 μm)
4,000	14,500	ได้ (30 μm)	ได้ (30 μm)
5,000	13,000	ได้ (30 μm)	ได้ (30 μm)



รูปที่ 6 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนที่มีการเลือกสร้างพอร์ซซิลิคอนเฉพาะที่ โดยวิธีที่ 2

เป็นที่น่าสังเกตว่า การเกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนในกรณีที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนจะมีอัตราการเกิดสูงกว่ากรณีของผิวซิลิคอนปกติ ทั้งนี้เป็นผลมาจากโซลที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอลูมิเนียมและกรดไนตริก ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดการกัดเนื้อซิลิคอนขึ้นทันที และชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้นั้นแผ่น

EE010

ซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ จะมีความพรุนสูงกว่ากรณีของผิวซิลิคอนปกติ ดังในรูปที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะผิวหน้าของการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่บนผิวซิลิคอน และบนผิวซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน โดยวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 พบว่า การสร้างพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่บนผิวซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน โดยวิธีที่ 2 ลวดลายจะถูกกัดเจาะด้านข้างมากกว่าวิธีที่ 1



(a) (b)

รูปที่ 7 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซิลิคอนด้วยเครื่อง SEM (a) ไม่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน (b) มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน

อย่างไรก็ดี เนื่องจากน้ำยาไอแสง S1818 มีราคาสูงกว่าน้ำยาไอแสง AZ P1350 มาก ดังนั้นเพื่อให้ น้ำยาไอแสง AZ P1350 สามารถใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้า การเลือกสร้างพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่บนผิวซิลิคอนที่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน โดยวิธีที่ 2 ได้ จึงทำการทดลองโดยการเคลือบน้ำยาไอแสง AZ P1350 ด้วยความเร็วรอบ 3000 rpm. สองครั้ง เพื่อให้ได้ความหนามากกว่า 7,000 Å และมีความสม่ำเสมอที่ดี

จากผลการทดลอง น้ำยาไอแสง AZ P1350 สามารถใช้เป็นชั้นป้องกันผิว ในการเลือกสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่บนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นอลูมิเนียมเคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน โดยวิธีที่ 2 ได้ แต่มีระยะห่างของพอร์ซิลิคอนเล็กสุดประมาณ 60 μm. และสามารถทนต่อสารละลายผสมของ HF ได้นานสุด 100 วันีก่อนที่จะหลุดร่อนออก

4. สรุป

ชั้นพอร์ซิลิคอนนอกจากจะสามารถสร้างได้ง่ายด้วยวิธีการกัดข้อมีสัณฐานรูปร่างเดียวซิลิคอนในสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริกและน้ำ ในสัดส่วน 1:3:5 แล้ว ยังสามารถสร้างโดยการกัดทะลุผ่านชั้นอลูมิเนียมที่อยู่บนผิวซิลิคอนได้อีกด้วย โดยชั้นพอร์ที่ได้อีกยังให้คุณสมบัติโฟโตลูมินิเซนซ์ และมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำไม่แตกต่างจากชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ผลการทดลองในรายงานนี้แสดงให้เห็นว่า สามารถเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนได้โดยใช้น้ำยาไอแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 และเบอร์ S1818 เป็นชั้นป้องกัน แต่น้ำยาไอแสงเบอร์ S1818 จะให้ความละเอียดของลวดลายดีกว่า และสามารถเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นโลหะอลูมิเนียมอยู่ที่ผิวด้านบนได้ หรือจะใช้วิธีการเคลือบน้ำยาไอแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 สองชั้น ซึ่งจะช่วยลดต้นทุน อีกทั้งทำให้สามารถใช้ลวดลายอลูมิเนียมในการกำหนดการเลือกสร้างชั้น

พอร์ซิลิคอนเฉพาะที่ได้ และยังช่วยลดขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ซึ่งเทคนิคนี้มีประโยชน์มากในกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านแสง เช่น โฟโอดีเทคเตอร์ หรือเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ทำให้ได้โฟโอดีเทคเตอร์และเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณจากเงินรายได้ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ประจำปี 2546-2547 ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง SEM และขอขอบคุณนายเศรษฐชัย เวชพุกภัยไพฑูย์ นายวิบูลย์ กิ่งชะกิจ นางสาวศศิภาณูญ์ เดชะบรรณะปัญญา ที่ช่วยในการทดลองและเก็บข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Uhlir, "Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF Acid," Tech. J., vol.35, pp. 333, 1956
- [2] L. T. Canham, Appl. Phys. Lett. (USA),, vol.57, pp.1096, 1990
- [3] Y.S. Tsuo, Y.Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb, "Potential Application of Porous Silicon in Photovoltaics," Photovoltaics Specialists Conference., pp.287-293, 10-14 May 1993
- [4] สมเกียรติ สุกเดช สรวิศ มุ่งการนา มนต์ชัย ไชยนอก มโน มีรักษ์ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนโดยการกัดข้อมีสัณฐานรูปร่างเดียวซิลิคอนในสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และ น้ำ ในสัดส่วน 1:3:5 แล้ว ยังสามารถสร้างโดยการกัดทะลุผ่านชั้นอลูมิเนียมที่อยู่บนผิวซิลิคอนได้อีกด้วย โดยชั้นพอร์ที่ได้อีกยังให้คุณสมบัติโฟโตลูมินิเซนซ์ และมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำไม่แตกต่างจากชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ผลการทดลองในรายงานนี้แสดงให้เห็นว่า สามารถเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนได้โดยใช้น้ำยาไอแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 และเบอร์ S1818 เป็นชั้นป้องกัน แต่น้ำยาไอแสงเบอร์ S1818 จะให้ความละเอียดของลวดลายดีกว่า และสามารถเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นโลหะอลูมิเนียมอยู่ที่ผิวด้านบนได้ หรือจะใช้วิธีการเคลือบน้ำยาไอแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 สองชั้น ซึ่งจะช่วยลดต้นทุน อีกทั้งทำให้สามารถใช้ลวดลายอลูมิเนียมในการกำหนดการเลือกสร้างชั้น
- [5] S. Shih, K. Jung, D. Tsai, K.-H. Li, D.-L. Kwong, J.C. Campbell, Appl. Phys. Lett. (USA),, vol.60, pp.1863, 1992
- [6] D. Dimova-Malinovska, M. Sendova-Vassileva, N. Tzenov, M. Kamenova, Thin Solid Films (Switzerland),, vol.297,pp.9, 1997



สรวิศ มุ่งการนา ,
ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช ,
รองศาสตราจารย์ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ,
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 8 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซิลิกอนจากการกัดข้อมือเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง Silicon Solar Cells with Stain Etched Porous Silicon as an Anti-Reflection Layer

สวีท มุ่งगरนา สมเกียรติ ชุมเดช และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384 E-mail : kssomkia@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ชั้นพอร์ซิลิกอน (PS) สามารถสร้างขึ้นบนผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนทั่วไปได้โดยง่ายและประหยัดที่สุดด้วยเทคนิคของการกัดข้อมือสี่ชั้น PS นี้มีคุณสมบัติพิเศษสามารถดูดกลืนแสงและลดการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างชั้น PS โดยวิธีการกัดข้อมือสี่บนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งจะไม่ทำความเสียหายให้แก่รอยต่อของเซลล์ที่อยู่ด้านล่างแต่อย่างใด และได้ศึกษาผลของชั้น PS ที่มีต่อพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอีกด้วย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น PS อยู่ที่ผิวด้านบนของเซลล์ซึ่งมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงต่ำประมาณ 20% สามารถมีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงกว่าเซลล์แบบธรรมดาทั่วไปซึ่งมีชั้น SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงประมาณ 19.88% ผลดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์ (η) เพิ่มขึ้น 24.41% และมีค่ากำลังงานสูงสุด (P_m) เพิ่มขึ้นถึง 19.64% จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้สูงในการนำชั้น PS จากการกัดข้อมือสี่ไปใช้แทนชั้น SiO_2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ และลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน

คำสำคัญ : พอร์ซิลิกอน, การกัดข้อมือสี่, ชั้นลดการสะท้อนแสง, เซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

Porous silicon (PS) can be formed on any silicon surface using a very simple and inexpensive stain etching technique. Because of the excellent light trapping and anti-reflection properties of PS layer, it is widely used as an anti-reflection layer of solar cell. In our study, we have focused on the formation of PS layers by stain etching on the surface of silicon solar cell without disturbing the underlying junction characteristics. In this experiment the effects of PS layer on the important parameters of silicon solar cell are also studied and compared

with the conventional SiO_2 anti-reflected silicon solar cells. It shows that the short circuits current (I_{sc}) of cell with PS layer (20% reflectance) is higher than the cell with SiO_2 layer about 19.88%, then it increases 24.41% of cell efficiency (η) and 19.64% of maximum power (P_m). In conclusion, it has high potential and possibility for replacing of SiO_2 layer by stain etched PS layers to increase solar cell efficiency and reduce the cost of cell fabrication.

Keywords : porous silicon, stain etching, anti-reflection layer, solar cells

1. บทนำ

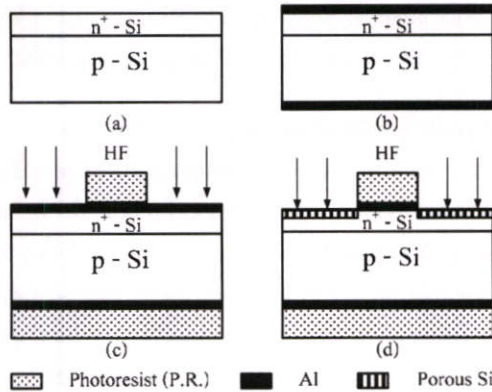
พอร์ซิลิกอน (PS) ซึ่งเป็นเนื้อซิลิกอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก นอกจากจะมีคุณสมบัติการเรืองแสงและการเปล่งแสงที่อุณหภูมิห้องแล้ว ยังมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดีและมีการสะท้อนแสงที่ต่ำอีกด้วย ชั้น PS จึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน [1-3] ชั้น PS สร้างได้หลายวิธีแต่ที่ง่ายและประหยัดที่สุดคือ วิธีการกัดข้อมือสี่ (Stain Etching) [4] ซึ่งเนื้อซิลิกอนบางส่วนจะถูกละลายออกไปด้วยปฏิกิริยาเคมีของสารละลายที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และกรดไนตริก (HNO_3) ทำให้มีรูพรุนขนาดเล็กๆเกิดขึ้นมากมายกลายเป็นชั้น PS และมองเห็นเป็นสีต่างๆปรากฏขึ้น [5]

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีรายงานการประยุกต์ใช้ชั้น PS ซึ่งได้จากการกัดข้อมือสี่ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) มาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ [6] ซึ่งสามารถเพิ่มกระแสลัดวงจรของเซลล์ได้ และทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม วิธีการกัดข้อมือสี่ทางไฟฟ้าเคมีแม้จะทำให้ได้ชั้น PS ที่มีความสม่ำเสมอที่ดี แต่ก็มีต้นทุนสูงและสิ้นเปลืองมากกว่าวิธีการกัดข้อมือสี่ ดังนั้น เพื่อเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งของการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสง การทดลองนี้จึงเสนอการสร้าง PS ด้วยวิธีการกัดข้อมือสี่บนเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด ผลของชั้น PS ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูก

ศึกษาและเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเซลล์ที่มีชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอีกด้วย

2. กระบวนการสร้าง

ลำดับขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น PS จากวิธีการกัดข้อมือ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงแสดงได้ดังในรูปที่ 1

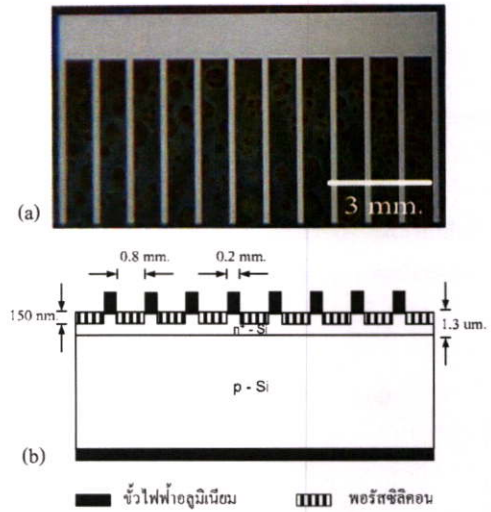


รูปที่ 1 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอน จากวิธีการกัดข้อมือเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

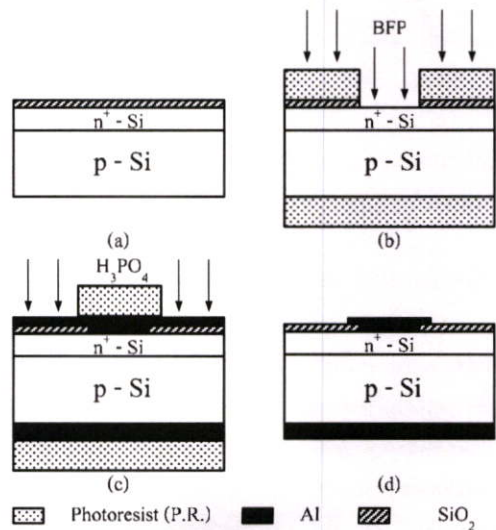
ซึ่งทำได้โดยนำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดพี ระบาย(111) มีค่าสภาพต้านทานในช่วง 6-12 Ω.cm ไปทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 30 นาที และทำการแพร่ขับลิท (Drive in) ที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 40 นาที เพื่อให้ได้ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นสูง (n⁻ region) และเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นซึ่งวัดจากเครื่อง Spreading Resistance Measuring Desk: SR-210 ได้ลิท 1.3 μm. ที่ค่าสภาพความต้านทานแผ่น 30 Ω/□ หลังการแพร่สารเจือและเกิดรอยต่อพี-เอ็นแล้ว ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนจะถูกทำให้สะอาดแล้วนำไปเคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm. โดยเทคนิค Vacuum evaporation ที่ความดัน 1×10⁻⁶Torr. ทั้งด้านบนและด้านล่างของเซลล์ และเพื่อให้ได้รอยสัมผัสโอห์มมิกที่ดี จึงทำการซินเตอร์ริง (Sintering) ให้เกิด Al/Si Alloy ที่ 500 °C เป็นเวลา 12 นาที หลังจากนั้นนำเซลล์ที่ได้มาทำกระบวนการโฟโวลิตโรกราฟี (Photolithography) เพื่อสร้างลวดลายของอูมิเนียมและสร้างชั้น PS โดยเทคนิคการเลือกสร้างชั้น PS เฉพาะที่ โดยมีน้ำยาไอแสงชนิดบวกเบอร์ S1818 เป็นชั้นป้องกันผิวหน้า ใช้สารละลายผสมของ HF กัดทะลุชั้นอูมิเนียมลงไปถึงผิวซิลิคอนและกัดชั้นซิลิคอนเกิดเป็นชั้น PS ขึ้นโดยใช้เวลาการกัด 40 วินาที ภาพถ่ายผิวหน้าและภาพตัดขวางของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น PS เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงแสดงดังรูปที่ 2

สำหรับขั้นตอนการสร้างและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงแสดงดังรูปที่ 3 โดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีการสร้างรอยต่อพี-เอ็นและมีชั้น SiO₂ บางประมาณ 1,000 Å เรียบร้อยแล้ว มาผ่านกระบวนการโฟโวลิตโรกราฟีเพื่อเปิดชั้น

ออกไซด์บริเวณขั้วสัมผัสด้านบนออก ก่อนที่จะนำไปเคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียมทั้งสองด้าน หลังจากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการโฟโวลิตโรกราฟีอีกครั้งเพื่อสร้างลวดลายของอูมิเนียมที่ด้านบนของเซลล์ต่อไป แล้วจึงนำเซลล์ที่ได้มาทำการ Sintering เพื่อสร้างขั้วสัมผัสโอห์มมิกให้แก่เซลล์



รูปที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (a) ภาพถ่ายผิวหน้า (b) ภาพตัดขวาง

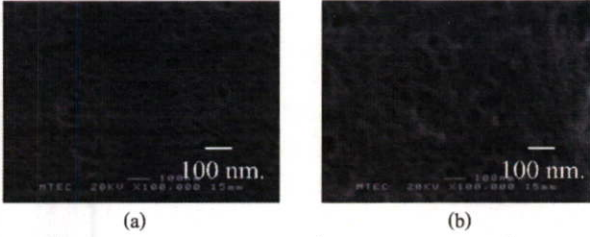


รูปที่ 3 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

3. การทดลอง และผลการทดลอง

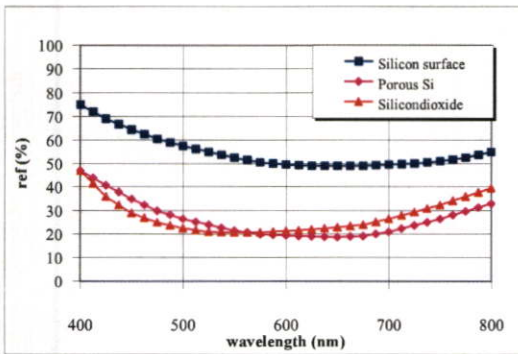
3.1 คุณสมบัติของชั้นพอร์ซซิลิคอน

ชั้นของ PS ที่สร้างขึ้นบนเซลล์แสงอาทิตย์ มีความหนาประมาณ 150 nm. และมีลักษณะผิวหน้าแสดงดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซซิลิคอนด้วยเครื่อง SEM (a) ไม่มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน (b) มีชั้น Al เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบน

จากการวัดและเปรียบเทียบคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ในช่วง 400-800 nm. ของชั้น PS กับชั้น SiO₂ ที่หนา 1,000 Å ซึ่งนิยมใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบธรรมดาทั่วไป และกับผิวเดิมของซิลิคอน ด้วยเครื่อง Automatic Thin Film Measurement System Model 120 พบว่า ผิวหน้าเดิมของซิลิคอนมีการสะท้อนแสงโดยเฉลี่ยมากกว่า 50% แต่ชั้น PS มีการสะท้อนแสงที่ต่ำและใกล้เคียงกับชั้น SiO₂ โดยมีค่าต่ำสุดเพียง 20% ในช่วง 500-700 nm. ดังในรูปที่ 5

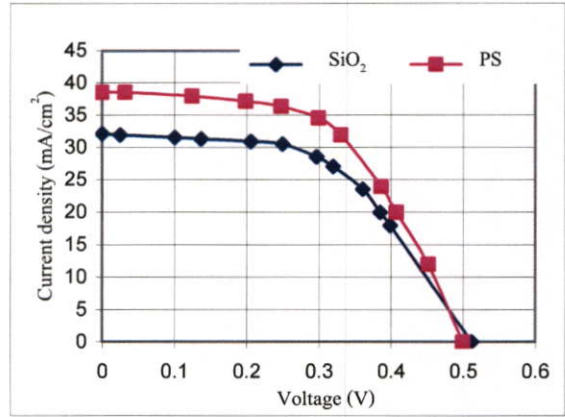


รูปที่ 5 การสะท้อนแสงของชั้น PS และชั้น SiO₂ ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

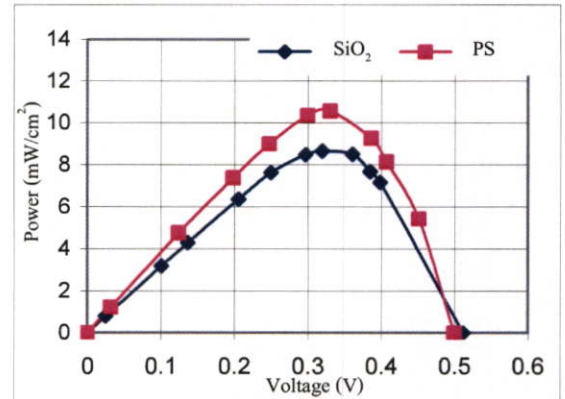
อย่างไรก็ดี แม้ว่าชั้น PS จะมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับชั้น SiO₂ แต่การสร้างชั้น SiO₂ ทั้งวิธีการแบบความร้อน (Thermal oxidation) หรือวิธีการ Chemical Vapor Deposition ต่างก็ยุ่งยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงกว่าการสร้างชั้น PS จากวิธีการกักข้อมล ดังนั้น ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าชั้น PS มีศักยภาพสูงที่จะใช้เป็นตัวลดการสะท้อนแสงแทนชั้น SiO₂ ได้เป็นอย่างดี

3.2 ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นซึ่งมีพื้นที่รับแสง 0.5 cm² โดยมีชั้น PS และ SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ในขณะที่ได้รับแสงที่มีความเข้มแสง 125,000 lx. จากหลอด Tungsten halogen ขนาด 275 W. แสดงดังรูปที่ 6 และพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์จ่ายออกมาได้แสดงดังในรูปที่ 7



รูปที่ 6 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น PS และชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 7 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น PS และชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

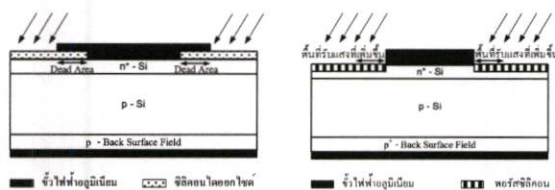
จากผลการทดลองในรูปที่ 6 จะเห็นได้ชัดว่าเซลล์ที่ใช้ชั้น PS เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงกว่าเซลล์แบบธรรมดาที่ใช้ชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงถึง 19.88% ทั้งนี้เนื่องจากชั้น PS นอกจากจะมีการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับชั้น SiO₂ แล้ว แต่ยังมีคุณสมบัติกักข้อมลแสง (light trapping) ได้ดีอีกด้วย ดังนั้นเซลล์ที่มีชั้น PS จึงให้กระแสแสงได้มากกว่า และจากผลดังกล่าวทำให้เซลล์แบบ PS มีกำลังงานสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมากกว่าเซลล์แบบ SiO₂ ถึง 19.64% และ 24.41% ตามลำดับ สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแบบแสดงได้ดังในตารางที่ 1

ในการทดลองครั้งนี้ยังได้สร้างชั้น PS ขึ้นบนเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้น Back Surface Field อยู่ด้านล่างของเซลล์ และเปรียบเทียบกับเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบเดียวกันแต่มีชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงดังแสดงในรูปที่ 8

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) และพอร์ซิลิคอน (PS)

คุณสมบัติ	Anti-Reflection Coating		% การเปลี่ยนแปลง
	SiO ₂	PS	
I _{sc} (mA)	16.1	19.3	+19.88
V _{oc} (V)	0.512	0.500	-2.34
P _m (mW)	4.43	5.30	+19.64
F.F.	0.52	0.55	+5.77
Eff (%)	10.24	12.74	+24.41

ผลการทดลองและเปรียบเทียบเป็นไปในลักษณะเดียวกันคือ พบว่าเซลล์แบบ PS มีกระแสดีควจกร กำลังงานสูงสุดและประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แบบ SiO₂ ประมาณ 5.29% 5.13% และ 5.14% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น SiO₂ และชั้น PS เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง จะพบอีกด้วยว่า กระบวนการสร้างเซลล์ที่มีชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงนั้นจะใช้กระบวนการมาสก์ทั้งสิ้น 3 มาส์กคือ มาส์กที่ 1 : n⁺-region มาส์กที่ 2 : contact mask และมาส์กที่ 3 : Al mask ในขณะที่กระบวนการสร้างเซลล์ที่มีชั้น PS เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะใช้กระบวนการมาสก์เพียง 2 มาส์กเท่านั้น คือ มาส์กที่ 1 : n⁺-region และมาส์กที่ 2 : Selective Al mask ซึ่งนอกจากจะทำให้ลดจำนวนกระบวนการมาสก์และกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลงแล้ว ยังช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสง (active area) ของเซลล์ได้อีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 8



(a) Solar Cells with SiO₂ ARC (b) Solar Cells with PS ARC
รูปที่ 8 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น Back surface field

4. สรุป

ชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมลด้วยสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก สามารถสร้างได้ง่ายและประหยัดที่สุด ชั้นพอร์ซิลิคอนนี้มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งชั้นดูดกลืนแสงและเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ดี เมื่อนำมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนจะทำให้กระบวนการสร้างเซลล์ทำได้ง่าย รวดเร็ว ไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบธรรมดาทั่วไปที่ใช้ชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ยิ่งไปกว่านั้นเซลล์แบบพอร์ซิลิคอนยังสามารถให้กระแสสูง กำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้สูงกว่าเซลล์แบบ SiO₂ ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึง

ศักยภาพและความเป็นไปได้สูงที่จะนำชั้นของพอร์ซิลิคอน มาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แทนชั้นของ SiO₂ เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินรายได้ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ประจำปี 2546-2547 ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง SEM และขอขอบคุณนางสาวศศิภาณูญ์ เตชะบรรณระพีญา นายเศรษฐชัย เวชพฤษย์ไพฑูย์ นายวิบูลย์ กิ่งสะกิจ ที่ช่วยในการทดลองและเก็บข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Uhler, "Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF Acid," Tech. J., vol.35, pp. 333, 1956
- [2] L. T. Canham, Appl. Phys. Lett. (USA), vol.57, pp.1096, 1990
- [3] Y.S. Tsuo, Y.Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb, "Potential Application of Porous Silicon in Photovoltaics," Photovoltaics Specialists Conference., pp.287-293, 10-14 May 1993
- [4] สมเกียรติ สุขเกษ สรวิศ มุ่งการนา มนต์ชัย ไชยนอก มโน มีรักษ์ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนโดยการกัดข้อมลเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, Vol.2, หน้า 237-240, 2547
- [5] S. Shih, K. Jung, D. Tsai, K.-H. Li, D.-L. Kwong, J.C. Campbell, Appl. Phys. Lett. (USA), vol.60, pp.1863, 1992
- [6] C.C. Striemer, F.Shi, and P.M. Fauchet, "Electrochemical Etching of Silicon for Inexpensive and Effective ARCs," 11th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Process., 19-22 August 2001, Estes Park, CO, NREL



สรวิศ มุ่งการนา ,
ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ,
รองศาสตราจารย์ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ,
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 8 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสรวิศ มุ่งการนา
วัน เดือน ปีเกิด	16 กรกฎาคม 2524
ที่อยู่	จังหวัดกรุงเทพมหานคร 64 หมู่บ้านปรีชา1 ซอยพัฒนาการ39 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250 โทรศัพท์ 0-2362-6121
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบและกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน 2.) พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมสี่และการกัดทางไฟฟ้า-เคมี

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] สมเกียรติ สุกเดช สรวิศ มุ่งการนา มนัสชัย ไชยนอก มโน มีร์กษ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยการกัดข้อมสี่เพื่อใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON 27), Vol.2, หน้า 237-240, โรงแรมโซฟิเทล ราชธานี ออคิด ขอนแก่น, ขอนแก่น, 11-12 พฤศจิกายน, 2547
- [2] สรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ สุกเดช และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดข้อมสี่,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28), Vol.2, หน้า 1109-1112, โรงแรม เพิร์ล วิงเล็ง, ภูเก็ต, 20-21 ตุลาคม, 2548
- [3] สรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ สุกเดช และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสี่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28), Vol.2, หน้า 1113-1116, โรงแรม เพิร์ล วิงเล็ง, ภูเก็ต, 20-21 ตุลาคม, 2548