

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างและการประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์ซซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์

แบบรอยต่อพี-เอ็น ของซิลิคอน

FORMATION AND APPLICATION OF POROUS SILICON LAYER

IN SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS



โดย
นายมนัสชัย ไชยนอก
นายมน มณีรักษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 55797
วัน,เดือน,ปี 5 พ.ค. 2548

.....
.....
.....

การสร้างและการประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์ซซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์
แบบรอยต่อพี-เอ็น ของซิลิคอน
FORMATION AND APPLICATION OF POROUS SILICON LAYER
IN SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS



ปริญญาบัตรนี้เป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 2546 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการเรื่อง

การสร้างและการประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์ซซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์
แบบรอยต่อพี-เอ็น ของซิลิคอน

FORMATION AND APPLICATION OF POROUS SILICON LAYER IN
SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS

จัดทำโดย

นายมนัสชัย ไชยนอก รหัส 44015251

นายมนโน มีรักษ์ รหัส 44015252

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมเกียรติ ศุกเดช



รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ.....

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.สมเกียรติ ศุกเดช)

วันที่ ๑ เมษายน ๒๕๖๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการ เรื่อง การประยุกต์ใช้งานพอร์ทัลลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้ ก้ำงใจ ก้ำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้ ทำให้การทำโครงการชิ้นนี้มีความก้าวหน้าขึ้นมาก ขอกราบขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ดิชมในโครงการนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และนักศึกษาปริญญาโทและเพื่อนนักศึกษาศึกษาปริญญาตรีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในหลายๆด้านโดยเฉพาะเรื่องคำแนะนำในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ จึงขอถือโอกาสแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย



นายณัฐชัย ไชยนอก

(นายณัฐชัย ไชยนอก)

นายมน มีรักษ์

(นายมน มีรักษ์)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างและการประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์สซิลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์ แบบรอยต่อพี-เอ็น ของซิลิกอน

นาย มนัสชัย ไชยนอก

นายมน โน มีร์ภย์

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

พอร์สซิลิกอนเป็นวัสดุใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ[1] จึงถูกนำไปใช้งานด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รายงานฉบับนี้ได้เสนอการทดลองและผลการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนบนผิวแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ(111) ด้วยเทคนิคการกัดด้วยสารละลาย (Stain etching) โดยใช้สารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริกและน้ำ อัตราการเกิดชั้นพอร์สซิลิกอนจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนและอุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ ชนิดและขนาดของสภาพความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นผลึกซิลิกอน และการกระตุ้นด้วยแสงยังช่วยเพิ่มอัตราการเกิดชั้นพอร์สได้อีกด้วย ชั้นพอร์สที่สร้างได้ ถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และคุณสมบัติการสะท้อนแสง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชั้นของพอร์สซิลิกอนสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ยังได้เสนอผลการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนเฉพาะบริเวณที่ต้องการ โดยใช้ชั้นของน้ำยาไวแสง (Photo resist) เป็นชั้นหน้ากักป้องกันการกัดของสารละลาย และด้วยเทคนิคดังกล่าว สามารถทำให้ได้กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบประหยัดและมีประสิทธิภาพสูง (Low cost and High efficiency) เนื่องจากสามารถลดขั้นตอนการสร้างจากกระบวนการเดิมและทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่ไวแสงของเซลล์ได้ จากการทดลองและเปรียบเทียบพบว่าเซลล์แบบใหม่ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเซลล์แบบดั้งเดิมที่ใช้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นราว 40% ค่าฟิลแฟกเตอร์เพิ่มขึ้นประมาณ 80% ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้นประมาณ 67-113 % และค่ากำลังงานสูงสุดเพิ่มขึ้นมากกว่า 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FORMATION AND APPLICATION OF POROUS SILICON LAYER IN SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS

Mr. Manuschai Chainok

Mr. Mano Meerak

Assoc.prof.Dr. Somkiat Supadech (Advisor)

Academic Year 2003

Abstract

Because of the many important properties of new material porous silicon[1], it is widely used in various field especially in electronic devices.

This paper presents the experiments and results of formation of porous silicon layer on the surface of single crystalline (111) plane silicon wafer by stain etching technique of HF, HNO₃ based solution. The growth rate of porous silicon layer depend on the ratio of acid and solution temperature, type and resistivity of silicon wafer, more over the growth rate is increased with light exposure during porous formation. The porous silicon layer can shows photoluminescence property and act as good anti - reflection layer.

The technique of selected area of porous silicon formation by using photo resist layer as the mask layer is also reported. By applying this technique, the simple, low cost and high efficiency silicon solar cells fabrication process is achieved. The steps of fabrication process is reduced, while active area is increased. From the experimental results, it is evident that the characteristics of silicon p-n junction solar cells with porous silicon anti-reflection layer are better than the conventional cells with silicon dioxide anti-reflection layer. The short circuits current, Fill Factor and cells efficiency are increased about 40%, 80%, and 67-113% respectively, while maximum power is increased more than 100%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
Abstract	IV
สารบัญ	VI
บทที่ 1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์	
บทนำ	1
ประวัติและความเป็นมา	2
เซลล์แสงอาทิตย์	4
พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี	6
รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก	10
ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	10
สารกึ่งตัวนำ	11
บทที่ 2 ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	
บทนำ	14
2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุล ขณะที่ไม่มีความเข้มแสงตกกระทบ	14
2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแสงตกกระทบ	18
2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแสงตกกระทบย้อนกลับ	21
2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	23
2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง	23
2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)	24
2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	27
2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรสมมูล	32
2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์	34
2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	37
2.9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_0	37
2.9.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_p	38
2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทำรายงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	39
2.11 การสะท้อนของแสงในตัวกลางต่างชนิดกัน	40
บทที่ 3 เทคโนโลยี และการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	42
บทนำ	42
3.1 การสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ	42
3.1.1 การเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์	42
3.1.2 การปลูกผลึกรูปเดี่ยว	43
3.2 การแพร่สารเจือ	44
3.3 การสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก	45
3.4 การประกอบรวมเป็นแผงเซลล์	47
3.5 การปรับปรุงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	49
3.6 การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	51
1. Back Surface Fields (BSF)	51
2. พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)	53
3.7 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	53
3.7.1 กรรมวิธีในการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน	61
3.7.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	61
3.7.3 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน	61
3.7.4 การทำความสะอาดผิวหน้า	64
3.8 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)	64
3.8.1 Thermal Oxidation	64
3.8.2 Chemical Vapor Deposition Oxidation (CVD)	66
3.9 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)	66
3.10 การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (Electroless nickel plating)	70
3.11 การเก็บบรรจุ	70
บทที่ 4 พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)	71
4.1 บทนำ	71
4.2 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน	72
4.4 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิคอน	74
4.4.1 แบ่งตามขนาดของแท่งพอร์ส	74
4.4.2 แบ่งตามลักษณะของรูพรุน	74
4.4.3 แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน	75
4.5 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน	75
4.6 พฤติกรรมทางแสง	77
4.6.1 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	77
4.6.2 พฤติกรรมทางแสงของผลึกซิลิคอน	78
4.6.3 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน	80
4.7 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน	82
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอน	83
5.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์	83
5.2 อุปกรณ์ทางแสง (Optical)	87
5.3 งานทางการแพทย์ (Biomedical)	87
5.4 เครื่องตรวจจับ (Sensor)	88
5.4.1 เครื่องตรวจจับความชื้น	89
5.4.2 เครื่องตรวจจับก๊าซ	90
5.5 การนำพอร์สไปประยุกต์ในด้านอื่น	91
บทที่ 6 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน	92
6.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี	92
6.1.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	93
6.1.2 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	94
6.1.3 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส ระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายไฮโดรฟลูออริก	98
6.1.4 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	99
6.1.5 กลไกการเกิดพอร์สซิลิคอน	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.1.6 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์ซเซิลิกอน	109
6.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอร์สที่สร้างด้วยวิธี Anodication	112
6.2 การสร้างพอร์ซเซิลิกอนด้วยวิธี Stain etching	114
6.2.1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี	114
6.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ซเซิลิกอน ที่สร้างจากวิธี Stain etching	115
6.3 การสร้างพอร์ซเซิลิกอนด้วยวิธี Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4)	116
6.4 การสร้างพอร์ซเซิลิกอนด้วยวิธี Laser breakdown ก๊าซไซเรน (SiH_4)	117
6.5 การสร้างพอร์ซเซิลิกอนด้วยวิธี High frequency discharge	118
บทที่ 7 การทดลองสร้างพอร์ซเซิลิกอน	120
7.1 การทดลองสร้างพอร์ซเซิลิกอนด้วยวิธีการกัดข้อมล	120
7.2 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์ซเซิลิกอน	121
7.3 การศึกษาผลกระทบจากปัจจัยภายนอกระหว่างการสร้างพอร์ซเซิลิกอน	128
7.4 การศึกษาผลกระทบจากปัจจัยภายในระหว่างการสร้างพอร์ซเซิลิกอน	143
7.5 การศึกษาการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซเซิลิกอน (Selection Area)	153
7.6 การศึกษาปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) ของพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากการกัดข้อมล	163
7.7 การศึกษาผลกระทบจากการ Sintering ภายหลังการสร้างพอร์ซเซิลิกอน	164
7.8 สรุปการทดลองการสร้างพอร์ซเซิลิกอนและรูปแบบพอร์ซเซิลิกอน ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์	166
บทที่ 8 การทดลองประยุกต์พอร์ซเซิลิกอนสำหรับเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	168
8.1 การออกแบบกระบวนการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์	168
8.2 การออกแบบกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	170
8.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	173
8.4 การวัดและทดสอบ	211
8.5 สรุปผลการทดลอง	217

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดยผู้วิจัยและเจ้าของลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก ค่าคงที่ทางฟิสิกส์	A
ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	E
ภาคผนวก ค สารเคมีและการใช้สารเคมี	I
ภาคผนวก ง ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของซิลิคอนไดออกไซด์ ที่มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 500Å จนถึง 6500Å	J
ภาคผนวก จ ประวัติทีมงาน	L
บรรณานุกรม	N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน	3
รูปที่ 1.2 การทดลองให้แสงตกกระทบขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว	3
รูปที่ 1.3 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์	4
รูปที่ 1.4 พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ	6
รูปที่ 1.5 แหล่งพลังงานต่างๆ ของโลก	7
รูปที่ 1.6 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก	9
รูปที่ 1.7 การหาค่ามุม θ โดยการพิจารณาเงาของแสง	9
รูปที่ 1.8 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ	10
รูปที่ 1.9 ลักษณะของผลึกซิลิคอนซึ่งถูกเจือด้วยอะตอม โบรอนและฟอสฟอรัส	13
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง	14
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น	15
รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ขณะที่ไม่มีไบอัส	15
รูปที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น ขณะที่ไม่มีเกิดรอยต่อพี-เอ็น	16
รูปที่ 2.5 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นแสดงด้วยแถบพลังงาน	17
รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง	18
รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง	19
รูปที่ 2.8 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	20
รูปที่ 2.9 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	21
รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	22
รูปที่ 2.11 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A	22
รูปที่ 2.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์	25
รูปที่ 2.14 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง	26
รูปที่ 2.15 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และ แรงดัน ของรอยต่อพี-เอ็นขณะที่ไม่ได้รับแสง และ ได้รับแสง	26
รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และ พารามิเตอร์ที่สำคัญ	28
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ในอุดมคติที่ 300K กับขนาด E_g ของสารกึ่งตัวนำ	31
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง	32
รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	32
รูปที่ 2.20 ลักษณะวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	33
รูปที่ 2.21 ผลของความต้านทานอนุกรม	35
รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานขนาน	35
รูปที่ 2.23 การลดลงของพลังงานขณะที่ยังค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น	36
รูปที่ 2.24 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	37
รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์	39
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง	40
รูปที่ 2.27 การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด	41
รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการเตรียมแร่ซิลิคอน	43
รูปที่ 3.2 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ	45
รูปที่ 3.3 การระเหยโลหะในสุญญากาศ เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์	46
รูปที่ 3.4 ประเภทของเส้นลวดนำ ไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยโลหะในสุญญากาศ	46
รูปที่ 3.5 แผ่นผลึกแบบ Polycrystalline ที่ผ่านการต่อสายแล้ว ในระบบโรงงานอุตสาหกรรม	47
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของโมดูลชนิดหนึ่ง	48
รูปที่ 3.7 การประกอบเซลล์เป็นโมดูล	48
รูปที่ 3.8 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว	49
รูปที่ 3.9 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.10 Collection Probability ของเซลล์ที่มี BSF และไม่มี BSF	52
รูปที่ 3.11 Dependence of key solar cell parameters upon the density of p-type dopants as obtained by high-performance experimental device:	53
รูปที่ 3.12 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไป	54
รูปที่ 3.13 กระบวนการมาตรฐานกระบวนการหนึ่งที่ใช้ใน ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์	59
รูปที่ 3.14 ลักษณะของแผ่นผลึกรูปเดี่ยว	60
รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพร์พอยท์โพรบ	63
รูปที่ 3.16 Identifying flats on a silicon wafer	63
รูปที่ 3.17 เครื่องมือการออกซิเดชัน แบบ Thermal Oxidation	66
รูปที่ 3.18 น้ำยา ไวแสงชนิดบวก และชนิดลบ	67
รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ที่ทำให้น้ำยาไวแสงกระจายสม่ำเสมอ (Photoresist spinner)	67
รูปที่ 3.20 กระบวนการ Photolithography โดยใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ	68
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างลวดลายแผ่น โฟโตมาส์กเซลล์แสงอาทิตย์	69
รูปที่ 3.22 การเก็บบรรจุเซลล์แสงอาทิตย์	70
รูปที่ 4.1 ภาคตัดขวางของ โครงสร้างนา โนพอร์สซิลิคอน	71
รูปที่ 4.2 ภาพจำลอง โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน	72
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน	73
รูปที่ 4.4 แผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างพอร์สซิลิคอน ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ	73
รูปที่ 4.5 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิคอนลักษณะต่าง ๆ	74
รูปที่ 4.6 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิคอนรูปร่างต่าง ๆ	75
รูปที่ 4.7 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	76
รูปที่ 4.8 แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ	78
รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพ โครงสร้างของแถบพลังงานแบบ Direct band gap	78
รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพ โครงสร้างของแถบพลังงานแบบ Indirect and gap	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิคอน	81
รูปที่ 5.1 The integrated reflectance spectra	84
รูปที่ 5.2 The reflectance spectra of an unpolished polycrystalline Si wafer and a porous-Si-etched polycrystalline Si wafer	85
รูปที่ 5.3 Optical transmission of a porous Si film	86
รูปที่ 5.4 แสดงพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดความพรุนต่าง ๆ กัน ที่ค่าความพรุนต่างกัน	79
รูปที่ 5.5 เครื่องตรวจจับกลูโคส โดยใช้พอร์สซิลิคอน ต่อขั้วด้วยทองคำรูปก้างปลา	88
รูปที่ 5.6 เครื่องตรวจจับความชื้น	89
รูปที่ 5.7 เครื่องตรวจจับก๊าซต่าง ๆ	90
รูปที่ 6.1 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ Anodization	92
รูปที่ 6.2 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ	94
รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิคอน	95
รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias	97
รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอน	99
รูปที่ 6.6 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่าง ๆ	100
รูปที่ 6.7 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกักเนื้อของผลึกซิลิคอน	102
รูปที่ 6.8 แสดงแบบจำลองการกักเนื้อของผลึกซิลิคอน	104
รูปที่ 6.9 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ โสไลต์ที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณเกินหลุม	105
รูปที่ 6.10 แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูหรือหลุม	
ที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน	106
รูปที่ 6.11 แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน	107
รูปที่ 6.12 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน	108
รูปที่ 6.13 แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบ ๆ ผนังของรูพรุน	108
รูปที่ 6.14 แสดงกลไกในการหยุดกักโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนชนิดพี	110
รูปที่ 6.15 แสดงแผนภาพบริเวณปลดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ	
พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน ไบอัสใน ปฏิกิริยาการกัดและค่าตัวแปรต่าง ๆ ในพอร์สซิลิคอน	113
รูปที่ 6.17 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching	114
รูปที่ 6.18 ผลเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching	116
รูปที่ 6.19 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ	117
รูปที่ 6.20 แสดงการ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทั้งสแตนกับแผ่นผลึกซิลิคอน	118
รูปที่ 7.1 ภาพขยายพอร์สซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งมีผิวหน้าขรุขระและผิวหน้าเรียบมัน	121
รูปที่ 7.2 ภาพขยายผิวหน้าแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมัน	123
รูปที่ 7.3 ภาพขยายพอร์สซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 2.5 นาที	123
รูปที่ 7.4 ภาพขยายพอร์สซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 3 นาที	123
รูปที่ 7.5 ภาพขยายพอร์สซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 3.5 นาที	124
รูปที่ 7.6 ภาพขยายพอร์สซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 4 นาที	124
รูปที่ 7.7 ภาพขยายพอร์สซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 5 นาที	124
รูปที่ 7.8 ภาพขยายพอร์สซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 7.5 นาที	125
รูปที่ 7.9 ภาพขยายพอร์สซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 10 นาที	125
รูปที่ 7.10 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากเงื่อนไขเวลาที่ต่างกัน	126
รูปที่ 7.11 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิลิคอนที่ สร้างจากเงื่อนไขเวลาที่ต่างกัน	127
รูปที่ 7.12 ภาพตัดขวางขยายของแผ่นซิลิคอนที่ยังไม่ถูกนำไปสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน ที่ถูกนำไปสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเวลา 5 นาที	128
รูปที่ 7.13 ภาพการทดลองกัดพอร์สซิลิคอน โดยควบคุมแสงและอุณหภูมิ	129
รูปที่ 7.14 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 5 นาที	130
รูปที่ 7.15 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงห้องและเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย โดยที่ใช้เวลา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารในกิจกรรมวิจัยในชั้นเรียนที่ดำเนินการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7.16 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอด Tungsten และเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย โดยที่ใช้เวลาในการจุ่มลงในสารละลายต่างกัน	132
รูปที่ 7.17 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอด Halogen และเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย โดยที่ใช้เวลาในการจุ่มลงในสารละลายต่างกัน	133
รูปที่ 7.18 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิลิคอนที่ถูกกระตุ้นด้วยปัจจัยแสงต่างกัน	133
รูปที่ 7.19 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอด Halogen โดยที่ใช้สารละลายที่มีอุณหภูมิต่างกัน และที่เวลาต่างๆ	135
รูปที่ 7.20 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอด Halogen	136
รูปที่ 7.21 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิลิคอนที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ	136
รูปที่ 7.22 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอด Halogen โดยใช้สารละลายที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ที่เวลาต่างๆ	137
รูปที่ 7.23 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิลิคอนที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ที่เวลาต่างๆ	137
รูปที่ 7.24 ภาพถ่ายพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วมและใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม	139
รูปที่ 7.25 ภาพถ่ายพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วมและการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม	139
รูปที่ 7.26 ภาพขยาย 20 เท่าของพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกและการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่7.27 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆเปรียบเทียบระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมและที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม	141
รูปที่7.28 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายที่มีอัตราส่วนของสารละลายต่างกัน ด้วยเวลา 20 นาที	142
รูปที่7.29 ภาพขยายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายที่มีอัตราส่วนของสารละลายต่างกัน ด้วยเวลา 20 นาที	142
รูปที่7.30 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายที่มีอัตราส่วนของสารละลายต่างกัน	143
รูปที่7.31 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกขีดลวดลายลงบนผิวก่อนทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายและมีการควบคุมปัจจัยภายนอกที่แตกต่างกัน	144
รูปที่7.32 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน0.1 โอห์มเซนติเมตรทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากสภาพความต้านทาน โดยจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา2.5 นาทีและ3 นาทีตามลำดับ	146
รูปที่7.33 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิลิคอนที่มี ค่าสภาพความต้านทาน0.1 โอห์มเซนติเมตร	146
รูปที่7.34 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่ผ่านการเจือด้วยทองคำ	147
รูปที่7.35 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนชนิดชนิดพีที่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัสอย่างเข้มข้นแล้วนำมากัดพอร์สซิลิคอน	148
รูปที่7.36 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่ถูกเจือด้วยทองคำแล้วนำมากัดพอร์สซิลิคอนภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดHalogen	149
รูปที่7.37 ภาพขยาย20เท่าแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่ถูกเจือด้วยทองคำแล้วนำมากัดพอร์ส	149
รูปที่7.38 ภาพเปรียบเทียบพอร์สที่เกิดจากการเคลือบผิวหน้าซิลิคอนด้วยชั้นอลูมิเนียม	151
รูปที่7.39 ภาพพอร์สที่เกิดจากการเคลือบผิวหน้าซิลิคอนด้วยชั้นอลูมิเนียมแล้วนำมากัดพอร์ส	152
รูปที่7.40 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของซิลิคอนที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นอลูมิเนียมก่อนการกัดพอร์ส ด้วยเวลาการกัดต่างกัน	152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.41 ภาพชั้นป้องกันการกัดที่เสียหาย	154
รูปที่ 7.42 ภาพพอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอน	154
รูปที่ 7.43 ภาพพอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซิลิคอน ผิวเรียบมีอุณหภูมิเหนียวเคลือบที่ผิวหน้า	155
รูปที่ 7.44 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของซิลิคอน ที่ถูกสร้างบนซิลิคอนผิวเรียบมีอุณหภูมิเหนียวเคลือบที่ผิวหน้า ซึ่งป้องกันการเกิด พอร์สด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก	156
รูปที่ 7.45 ภาพพอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซิลิคอน ผิวหยาบที่มีอุณหภูมิเหนียวเคลือบที่ผิวหน้า	157
รูปที่ 7.46 พอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซิลิคอน ผิวหยาบที่มีอุณหภูมิเหนียวเคลือบที่ผิวหน้าแล้วทำการ Sintering	158
รูปที่ 7.47 พอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซิลิคอน ผิวหยาบที่มีทองคำเคลือบที่ผิวหน้า	159
รูปที่ 7.48 พอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซิลิคอน ผิวหยาบที่มีทองคำเคลือบที่ผิวหน้าแล้วทำการ Sintering	160
รูปที่ 7.49 ภาพความเสียหายในการเลือกพื้นที่สร้างพอร์ส ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์สด้วยน้ำยาไวแสง	161
รูปที่ 7.50 ภาพการเตรียมแผ่นสำหรับการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้าง พอร์สซิลิคอนด้วยการใช้ความต่างของช่วงเวลาการเกิดพอร์ส	161
รูปที่ 7.51 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยการใช้ ความต่างของช่วงเวลาการเกิดพอร์ส	162
รูปที่ 7.52 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สที่ สร้างจากการกัดข้อมลึ	163
รูปที่ 7.53 พอร์สซิลิคอนที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนก่อนและหลังทำการ Sintering	165
รูปที่ 7.54 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ของพอร์สซิลิคอนก่อนและหลังทำการ Sintering	165
รูปที่ 8.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะสร้างขึ้น	168
รูปที่ 8.2 ลักษณะการเตรียมแผ่นสำหรับกัดพอร์ส	169

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 8.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	170
รูปที่ 8.4 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง แบบกั๊ดพอร์สก่อนการSintering	171
รูปที่ 8.5 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง แบบกั๊ดพอร์สหลังการSintering	172
รูปที่ 8.6 คุณสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแสงของเซลล์ Cell#1	214
รูปที่ 8.7 คุณสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแสงของเซลล์ Cell#2	214
รูปที่ 8.8 คุณสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแสงของเซลล์ Cell#3	214
รูปที่ 8.9 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์ที่ใช้พอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลด การสะท้อนซึ่งสูงขึ้นไปจากเซลล์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลด การสะท้อนแสง(Cell#1)	215
รูปที่ 8.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้	216
รูปที่ 8.11 เปรียบเทียบคุณสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแสงของเซลล์ Cell#1 และ Cell#2	217
รูปที่ 8.12 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่สามารถลดการสูญเสียพื้นที่และพลังงาน	218
รูปที่ 8.13 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่ให้สามารถลดการสะท้อนแสง เพิ่มพื้นที่รับแสงและเพิ่มการส่งผ่านแสงให้มากยิ่งขึ้น	219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	5
ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบขนาดของแหล่งพลังงานต่างๆ บน โลก	8
ตารางที่ 2.1 ค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน	29
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	40
ตารางที่ 3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ	50
ตารางที่ 3.2 จุดเด่น และจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ	51
ตารางที่ 6.1 สรุปลักษณะสำคัญๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการ ไบอัส เซลล์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน	96
ตารางที่ 8.1 ผลการทดลอง	170
ตารางที่ 8.2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็น ชั้นลดการสะท้อนซึ่งสูงขึ้นไปจากเซลล์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อน(Cell#1)	215

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานทั้งทางตรง, ทางอ้อมของการเกิด และดำรงอยู่ของชีวิตทั้งหลาย รูปแบบของพลังงานที่ใช้กันมากมักอยู่ในรูปพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานหลักๆ ในปัจจุบัน คือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆ เหล่านี้ นอกจากจะมีปริมาณจำกัดแล้ว ยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย ส่วนพลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนกั้นน้ำนั้น ได้พัฒนาไปถึงจุดอิ่มตัวแล้วสำหรับเกือบทุกประเทศ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความสามารถผลิตไฟฟ้าในระดับ 20000MWp โดยได้มาจากการผลิตต่างๆ คือ ไฟฟ้าพลังความร้อน (จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง) 80%, ไฟฟ้าพลังน้ำ 10% จะเห็นว่า เราต้องอาศัยการผลิตไฟฟ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นหลัก ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ดังกล่าวต้องนำเข้าเกือบทั้งหมด และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในระยะกลาง และระยะยาวแนวทางแก้ปัญหา คือ การพยายามหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน เช่น พลังงานนิวเคลียร์, การพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศตนเอง เช่น ความร้อนใต้พิภพ, พลังงานลม, พลังงานคลื่น, พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อสร้างไฟฟ้ารวมทั้งความร้อน ในกลุ่มพลังงานใหม่เหล่านี้ พลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างเด่นกว่าชนิดอื่น เพราะมีทั่วไป, มีไม่จำกัด, สะอาด, ไร้ต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จทั้งในด้านเทคโนโลยีและเศรษฐกิจ เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษด้วย ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงนั้น สามารถทำได้ โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่มนุษย์ได้พยายามประดิษฐ์คิดค้นขึ้นเรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์” หรือ “โซลาร์เซลล์” (Solar Cells)

ปัจจุบันได้มีการศึกษา, วิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 2 ประการ คือ

1. การลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์
2. การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงการนี้นำเสนอถึงการพัฒนาระบบการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพมากที่สุด, การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลอง คือ กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}), แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางอุดมคติ (P_m), ค่า

ค่าความเข้มของกระแสต่อพื้นที่ (J_{sc}), กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m), แรงดันที่ทำให้เกิด

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vm), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์จ่ายได้จริง (Pm), ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.), ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η), การหาค่าความต้านทานภายใน (Rs), ผลของค่าความต้านทานภายในต่อเซลล์แสงอาทิตย์ (Rss) และผลของความเข้มแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมทั้งเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back Surface Field (BSF) และการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating: ARC) แบบพอร์ซซิลิคอน (Porous Silicon: PS)

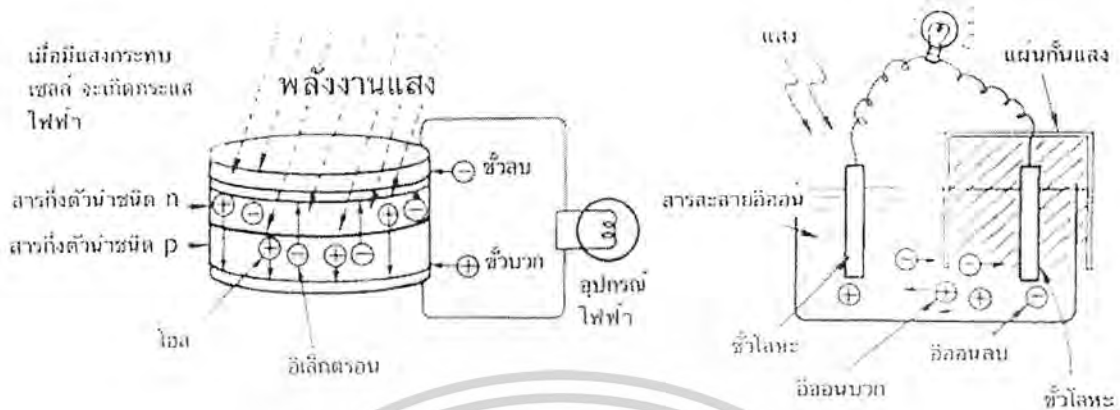
การทดลองนี้อาจจะมีต้นทุนในการทดลองสูงอยู่บ้าง ในการนำ Premium-Grade Silicon ที่มีราคาสูงมาใช้เป็นวัสดุในการทดลอง แต่ถ้ามองในมุมกลับกัน ยิ่งเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากเท่าไร ก็หมายถึง ในพื้นที่เซลล์เท่าเดิมเราจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น หรือในประสิทธิภาพที่เท่าเดิม เราสามารถสร้างเซลล์ได้ในพื้นที่ที่ลดลง นั่นก็คือเป็นการลดต้นทุนในการผลิตเซลล์ไปในตัวด้วย

ประวัติและความเป็นมา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ถึงประดิษฐ์ทางวิศวกรรมซึ่งประยุกต์ใช้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงตกกระทบในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า บุคคลแรกที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของ p-n junction ของผลึกซิลิคอน (ดังรูปที่ 1.1) ก็ือนักวิจัยชื่อ Gerald Pearson แห่ง Bell Laboratories ในปีค.ศ.1954 ซึ่งเป็นช่วงหลังจากการค้นพบทรานซิสเตอร์โดย William Shockley แห่ง Bell Laboratory ในปีค.ศ.1949 ไม่นานนัก โดยในครั้งแรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น

เมื่อย้อนหลังกลับไปศึกษาถึงประวัติศาสตร์การค้นคว้าเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างแสง และ วัตถุในแง่ของไฟฟ้าจะทราบว่า ในปี ค.ศ.1839 E.Bequerel นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เป็นคนแรกที่ค้นพบว่า เมื่อแสงตกกระทบวัตถุจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เขาได้ทำการทดลองดังรูปที่ 1.2 โดยเอาขั้วโลหะสองขั้วจุ่มในสารละลายอิออน แล้วให้แสงกระทบได้เพียงขั้วเดียว ปรากฏว่า มีกระแสไหลในสายไฟที่ต่อระหว่างขั้วทั้งสอง แสดงให้เห็นถึงการเกิดกระแสไฟฟ้าในวัตถุเมื่อมีแสงตกกระทบ และเขายังได้พบด้วยว่า เมื่อเปลี่ยนสี (ความยาวคลื่น, พลังงาน) ของแสง ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนตามด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน

รูปที่ 1.2 การทดลองให้แสงตกกระทบบนขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว

ในปี ค.ศ. 1873 Willoughby Smith พบว่า เมื่อส่องแสงใส่ selenium ความต้านทานของมันจะเปลี่ยนไป แสดงให้เห็นว่า เกิดไฟฟ้าในของแข็งเมื่อถูกแสงได้ (Photo Conductivity), ในปีค.ศ. 1876 Adams และ Day พบว่า เมื่อส่องแสงถูก selenium จะเกิดความต่างศักย์ขึ้น (Photovoltaic ใน selenium) ซึ่งเป็นการค้นพบครั้งแรกของการเกิดศักย์ทางไฟฟ้าจากแสง ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (แสงเป็นไฟฟ้า) ของ selenium นั้นต่ำแค่ประมาณ 1% เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำเอาความรู้นี้ไปใช้ประโยชน์ในการวัดความเข้มของแสงในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ได้ เป็นต้น

ในปีค.ศ.1883 นาย Fritts อดีบทฤษฎีการทำงานของ Photovoltaic cell แบบซีลีเนียมได้เป็นครั้งแรก ต่อมาในปีค.ศ.1904 นาย Hallwachs ได้ค้นพบคุณสมบัติทางแสงของสาร Copper Cuprous Oxide สำหรับในปีค.ศ. 1941 จึงเริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นด้วยวิธี Grown junction และในปีค.ศ. 1954 เริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สาร ซึ่งเป็นปีเดียวกันกับที่ Bell lab. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา

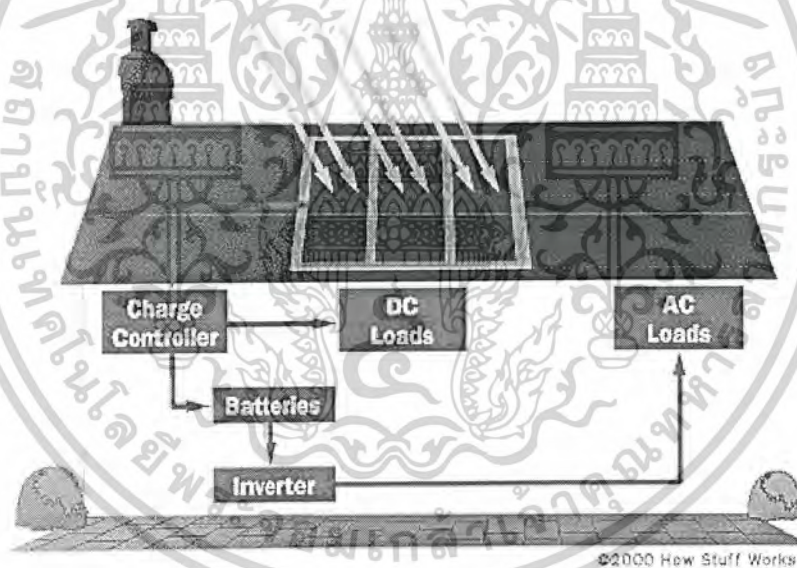
เซลล์แสงอาทิตย์ได้เริ่มเป็นที่สนใจในวงกว้างครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1958 เมื่ออเมริกาได้ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนดาวเทียม “วานการ์ด หมายเลข 1” เพื่อเป็นตัวจ่ายพลังงานสำหรับการสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีบนพื้นโลก หลักการทำงานก็เช่นเดียวกับระบบบนโลก คือ เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าซาร์จเข้าแบตเตอรี่ แล้วแบตเตอรี่จะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์การสื่อสาร ข้อดีข้อหนึ่งก็คือ ในอวกาศต่างจากบนโลกตรงที่มีอนุภาคพลังงานสูง (cosmic ray) ที่อาจจะทำลายแผงเซลล์ได้ จึงต้องมีอุปกรณ์เสริมเพื่อป้องกันเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ปีค.ศ.1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนา และสร้างขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานบนพื้นโลก โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ และการลดค่าต้นทุนในการสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงขยายวงออกไปอย่างกว้างขวาง จนกระทั่งในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก ซิลิคอนมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงถึงราว 15-24%

เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง เซลล์จะจ่ายไฟฟ้าออกมาซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันที หรืออาจมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current) แล้วจึงนำไปใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ทำงานได้ต่อไป ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนา และใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจากธาตุซิลิคอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลกรองจากออกซิเจน ทราบตามชายหาดของท้องทะเล, หินต่างๆ ที่เห็นรอบตัวเรา ก็มีซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลักๆ นั่นคือ เป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ (แต่การนำมาทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องมีเทคนิค และใช้พลังงาน นั่นคือ ต้องมีค่าใช้จ่าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนเป็นวัสดุที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน โดยแทบจะเรียกได้ว่าเป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมนี้เลยทีเดียว ทรานซิสเตอร์, ICs, LSI และ VLSI ทั้งหลายแทบทั้งหมดสร้างโดยใช้ซิลิคอนนี้

อย่างไรก็ดี จากผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า วัสดุสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความเหมาะสมที่สุด สำหรับการนำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีค่าของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ประมาณ 1.5 eV ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.43 eV ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และจากการทดลองสร้างก็ปรากฏว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก GaAs ด้วยโครงสร้างที่เหมาะสมจะสามารถให้ประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานได้สูงถึง 30% แต่ทว่า GaAs เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาแพงซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารซิลิคอน

SOLAR CELL MATERIAL CANDIDATES (FROM BYLANDER [13])

Material	Major materials					Experimental diffusion length (μ)
	Energy gap (eV)	Mobility (300 K) ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)		Lifetime (s)		
		μ_n	μ_p	τ_n	τ_p	
Si	1.1	1450	500	400		100
GaAs	1.4	8500	400	50	110^{-7}	5
CdS	2.6	340	615	100	10^{-7}	1
B	1.5	6000	4000			
Se (Hex)	1.6	2	17			
SiC (β)	2.6	1000	10			
As ₂ Se ₃	1.6	15	45			
Sb ₂ Se ₃	1.2	15	45			
AlSb	1.6	400	400			
GaP	2.2	>200	150			
CdAs ₂	1.0		100			
InP	1.2	4000	>600	2000	2	
ZnSe	2.6	500	16			
ZnTe	2.2	500	900			
CdSe	1.7	600				
CdTe	1.4	700	65			

Other materials

Material	Energy gap (eV)	Material	Energy gap (eV)
Ca ₂ Si	1.9	Ca ₂ Se ₃	1.9
Cu ₂ O	2.0	In ₂ Te ₃	1.2
Cu ₂ S	1.8	Sb ₂ S ₃	1.5
Cu ₂ Se	1.3	InN	2.5
CdAs ₂	1.0	BSb	2.6

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี

ดวงอาทิตย์อยู่ห่างจากโลกประมาณ 150 ล้านกิโลเมตร ปลดปล่อยพลังงานจากปฏิกิริยาฟิวชั่นออกสู่อวกาศในระดับ 9×10^{22} kcal/วินาที ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งเป็นพลังงานที่มากมายมหาศาล พลังงานนี้กระจายไปในอวกาศ และส่วนที่มาถึงโลกนั้นจะมีความเข้มข้นที่บริเวณนอกเขตบรรยากาศของโลกในระดับ 1.38 kW/ตารางเมตร (0.33 kcal/วินาที) คิดเป็นพลังงานที่โลกได้รับได้เป็น 42×10^{12} kcal/วินาที โดยในนี้ 30% จะสะท้อนกลับออกนอกบรรยากาศโลก ที่เหลือ 70% จะมาถึงโลก ซึ่งเมื่อเทียบกับพลังงานที่มนุษย์ทั้งโลกใช้ในปี 1988 คือ 10^{17} kcal จะเห็นว่า เทียบเท่ากับพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาถึง โลกเพียงแค่ประมาณ 40 นาทีเท่านั้น



รูปที่ 1.4 พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ

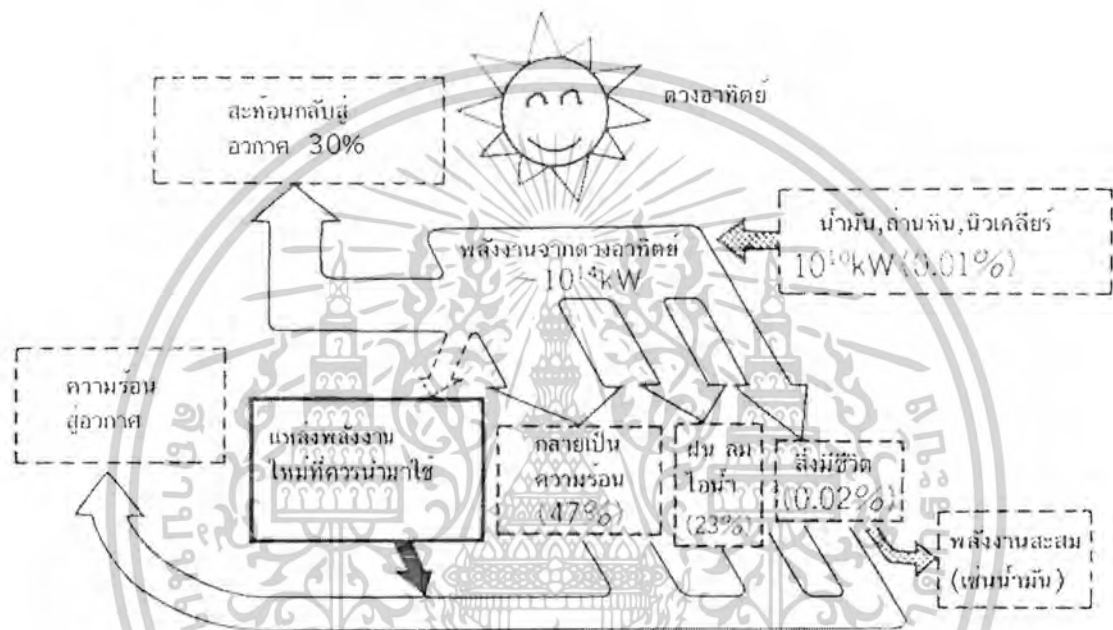
จะเห็นว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์นั้นมากมายมหาศาลเพียงใด และโลกของเราก็ได้วิวัฒนาการมาภายใต้เงื่อนไขทางพลังงานเช่นนี้ โดยพลังงานที่เข้าถึงผิวโลกจะเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่ผิวดิน และทะเล ทำให้เกิดลม, ไอน้ำ, ฝน และ วัฏจักรต่างๆ ของโลกทั้งทางกายภาพ

และชีวภาพ รวมทั้งทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงของพืช โดยคร่าวๆแล้วใน 70% ที่มาถึงผิวโลก

เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งมอบให้กับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเพื่อคนพิการที่พิการทางตา เมื่อคุณผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 42% จะกลายเป็นความร้อน ประมาณ 23% จะเป็นพลังงานในการเกิดวัฏจักรของน้ำ (ระเหย, เมฆ, ลม, ฝน) ประมาณ 0.02% เท่านั้นที่ถูกใช้ในการดำเนินชีวิตของพืช และสัตว์ การทับถมของซากสิ่งมีชีวิตเหล่านี้เกิดเป็นน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ก็เป็นการสะสมพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์ไว้ในรูปของพลังงานเคมีในสิ่งเหล่านั้นนั่นเอง นั่นคือ พลังงานที่เราได้จากเชื้อเพลิงเหล่านี้ล้วนมีต้นกำเนิดมาจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งสิ้น ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แหล่งพลังงานต่างๆ ของโลก

ตารางที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของพลังงานของแหล่ง หรือรูปแบบต่างๆ จะเห็นว่า พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ตกถึง โลกมีขนาดมหาศาลเมื่อเทียบกับอย่างอื่นๆ คือประมาณ 42 ล้านล้าน kcal/วินาที พลังงานลมจะมีลำดับรองลงมา คือ 0.088 ล้านล้าน kcal/วินาที ส่วนพลังงานความร้อนจากใต้พิภพซึ่งเป็นพลังงานจากภายในของโลกเองมีขนาด 0.0077 ล้านล้าน kcal/วินาที โดยสรุปแล้วจะเห็นว่า พลังงานในธรรมชาติบน โลกนั้น แทบทั้งหมดมาจากดวงอาทิตย์ก็ว่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานน้ำ	4.8×10^8	kcal/วินาที
พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง	7.2×10^8	kcal/วินาที
พลังงานความร้อนใต้พิภพ	77×10^8	kcal/วินาที
พลังงานลม	880×10^8	kcal/วินาที
พลังงานจากดวงอาทิตย์	420.000×10^8	kcal/วินาที

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบขนาดของแหล่งพลังงานต่างๆ บนโลก

พลังงานจากการแผ่รังสีต่อพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของดวงอาทิตย์ นอกบรรยากาศของโลกจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความเข้มของการแผ่รังสีนี้ เราเรียกว่า Solar Constant หรือที่นิยมเรียกกันว่า แบบ Air mass zero เขียนย่อๆ ได้เป็น AM0 ซึ่งในงาน Photovoltaic การแผ่รังสีแบบ AM0 กำหนดว่ามีค่าเท่ากับ 135.3 mW/cm^2

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

ลักษณะการแผ่รังสีแบบต่างๆ อาจพิจารณาได้ดังนี้คือ

$$Air.mass = \frac{1}{\cos \theta} = \sec \theta \quad (1.1)$$

เมื่อ θ คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ทำกับทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวโลกบริเวณที่ทำการวัด

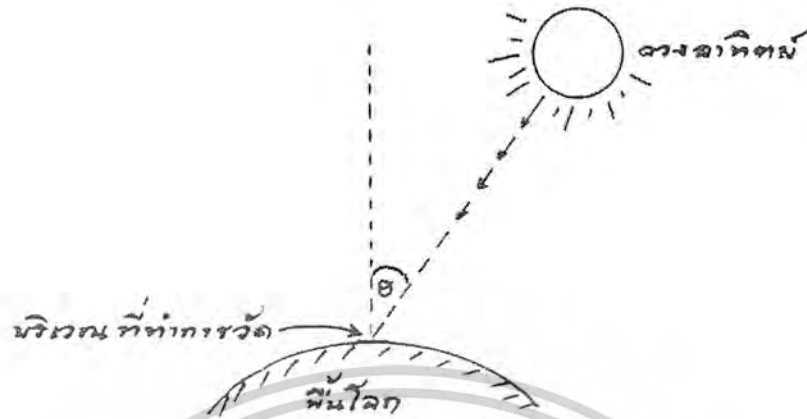
ดังนั้น ถ้าดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับโลกเป็นมุม 60° ลักษณะของการแผ่รังสีนี้จะเรียกว่า

เป็นแบบ AM2

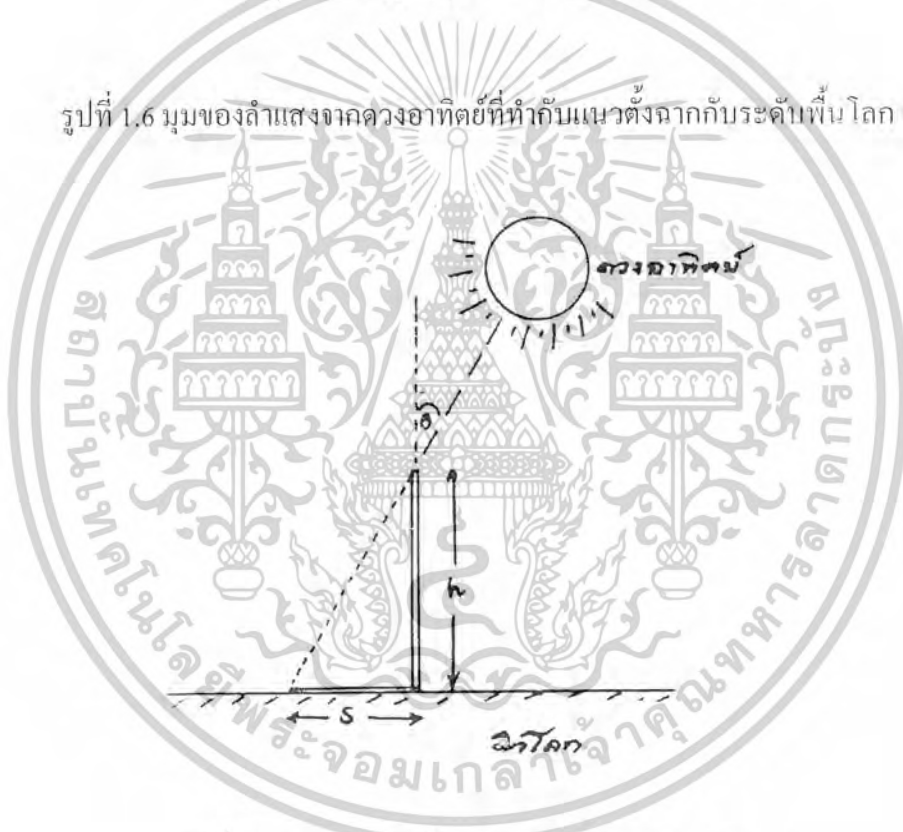
ตัวอย่างการหาลักษณะการแผ่รังสีทำได้ง่ายๆ โดยการพิจารณาเงาของวัตถุที่มีความสูง h วางอยู่ตั้งฉากกับผิวโลก ดังแสดงในรูปที่ 1.6 และรูปที่ 1.7 ถ้าหากความยาวของเงาที่เกิดขึ้นมีค่า s ดังนั้นค่าของ Air mass หาได้โดย

$$Air.mass = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad (1.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก



รูปที่ 1.7 การหาค่ามุม θ โดยการพิจารณาเงาของแสง

ยิ่งค่าของ Air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง พลังงานแสงอาทิตย์ที่มายังผิวโลกก็จะยิ่งมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่งคือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ลำแสง หรือรังสีของแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นโลก จะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน คือ

1. Direct sunlight หรือ ลำแสงโดยตรง
2. Indirect or Diffused sunlight ลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย

ลำแสงอาทิตย์โดยตรง หรือ Direct sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย หรือ Diffused sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลก ประมาณกันว่า แม้แต่ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10-20% ของรังสีทั้งหมดที่ได้รับ ยิ่งในวันที่มีเมฆหมอกปกคลุมมากๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายนี้จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

สเปกตรัมของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจายจะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อน และแพร่กระจาย นอกจากนี้แล้ว ลักษณะการแพร่รังสีแบบ Air mass ค่าสูงๆ จะมีผลทำให้ปริมาณของแสงที่ได้รับในส่วนแพร่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย



รูปที่ 1.8 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูง หรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากจะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาใช้งานสูง จากรูปที่ 1.8 แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ พบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ปานกลางแต่เป็นบริเวณกว้างโดยเฉลี่ยทั้งปีประมาณ

1,300-1,600 กิโลวัตต์/ ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยของประเทศต่างๆที่ได้รับพบว่า ประเทศไทยได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็นค่ารายวันเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 18.2 เมกะจูล/ตร.เมตร-วัน ซึ่งถือได้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

สารกึ่งตัวนำ

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งสร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ดังนั้น ทฤษฎีการทำงาน และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับทั้งโดยตรง และโดยทางอ้อมกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

วัสดุต่างๆที่มีอยู่ในโลกนี้ อาจพิจารณาจัดแบ่งออกเป็นหมู่ใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ได้เป็น 3 หมู่ คือ

1. วัสดุตัวนำ (Conductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น
2. วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าฉนวนแต่เลวกว่าตัวนำ เช่น Si, Ge เป็นต้น
3. วัสดุฉนวน (Insulator) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดี เช่น แก้ว, เบกาไลต์, ไมกา เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุแท้ (Element semiconductor) ได้แก่ ธาตุในหมู่ที่ 4 ของตารางพีริออดิก เช่น ซิลิคอน, เยอรมันเนียม, ดีบุก, คาร์บอน เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ (Compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ 3 และหมู่ที่ 5 เช่น GaAs, GaP และสารประกอบของธาตุในหมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 6 เช่น CdS เป็นต้น

ในบรรดาวัสดุไฟฟ้า เช่น ตัวนำ, ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะเห็นได้ว่าสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่น่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ แตกต่างจากตัวนำ และฉนวน คุณสมบัติที่เห็นได้ชัดก็คือ ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ จะเปลี่ยนแปลงได้โดยง่ายกับอุณหภูมิ หรือแสงจากภายนอก และที่สำคัญเมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือปนลงไปแม้เพียงเล็กน้อย ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะมีเฉพาะในสารกึ่งตัวนำเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (Intrinsic semiconductor) บางครั้งถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิด I (I-Type Semiconductor) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ กล่าวคือ ปราศจากการเจือปนด้วยอะตอมแปลกปลอม หรืออะตอมเจือปน (Impurity atom)

2. สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor) เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮลมีค่าน้อย ซึ่งถ้าคำนวณเป็นค่าความนำไฟฟ้าแล้วจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุตัวนำมาก และในทางปฏิบัติ เพื่อให้สารกึ่งตัวนำสามารถถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จำเป็นที่จะต้องเติมอะตอมสารเจือ ซึ่งผลของอะตอมสารเจือที่เติมจะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นอย่างมาก และยังสามารถควบคุมค่าความนำไฟฟ้าได้อีกด้วยซึ่งเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุอื่นว่าสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor)

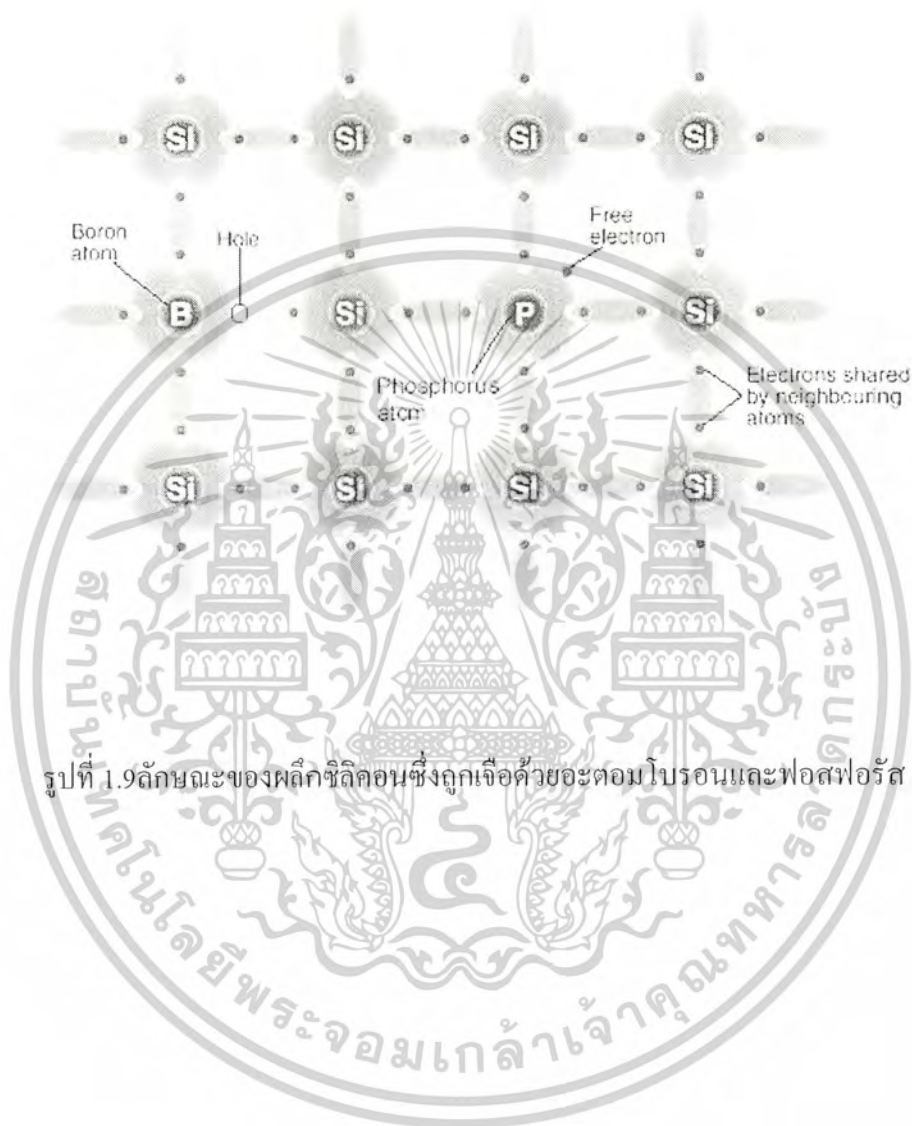
อะตอมสารเจือ (Impurity atoms) หมายถึง อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ III หรือกลุ่ม V ของตารางพีริออดิกของธาตุ ซึ่งใช้เติมลงไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้พาหะ เช่น อิเล็กตรอนหรือโฮล และปริมาณของพาหะตามที่ต้องการ อะตอมที่นำมาเป็นสารเจือควรจะต้องมีขนาดของอะตอม และคุณสมบัติกายภาพที่ใกล้เคียงกับอะตอมสารกึ่งตัวนำนั้นๆ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำได้ อะตอมสารเจือ อาจถูกจัดแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1.9 คือ

(ก) อะตอมสารเจือชนิดเอ็น (n-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ V ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส (P), สารหนู (As), พลวง (Sb) และบิสมัท (Bi) เป็นต้น และที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน ดังนั้น บางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้ให้” (Donor atoms) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้จะมีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมาก อิเล็กตรอนจึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้า ทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น” (n-Type Semiconductor) คำว่า เอ็น (n: Negative charge) หมายถึง ประจุลบ

(ข) อะตอมสารเจือชนิดพี (p-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ III ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น โบรอน (B), อะลูมิเนียม (Al), อินเดียม (In) และแกลเลียม (Ga) เป็นต้น และที่นิยมใช้งานมาก ได้แก่ โบรอน (B) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้โฮลหรือผู้รับอิเล็กตรอน ดังนั้นบางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้รับ” (Acceptor atoms) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้รับจะมีปริมาณโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก โฮลจึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้า ทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดพี” (p-Type Semiconductor) คำว่า พี (p: Positive charge) หมายถึง ประจุบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.9 ลักษณะของผลึกซิลิคอนซึ่งถูกเจือด้วยอะตอมโบรอนและฟอสฟอรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันนั้น มักมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็นคล้ายๆกับโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น หากแต่เซลล์แสงอาทิตย์จะมีขนาดใหญ่กว่าไดโอดหลายๆครั้งแสดงได้ในรูปที่ 2.1 ทั้งนี้เพื่อให้เซลล์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากพอที่จะนำไปใช้งานได้ การสร้างรอยต่อพี-เอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้โดยวิธีการเดียวกันกับการสร้างไดโอด ซึ่งมักนิยมใช้วิธีการแพร่สารเจือปน (Impurity) ชนิดเอ็น หรือชนิดพีเข้าไปในเนื้อของสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดตรงกันข้าม ในบทนี้จะได้กล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น ทั้งในขณะที่ไม่ได้รับแสง และในขณะที่ได้รับแสง



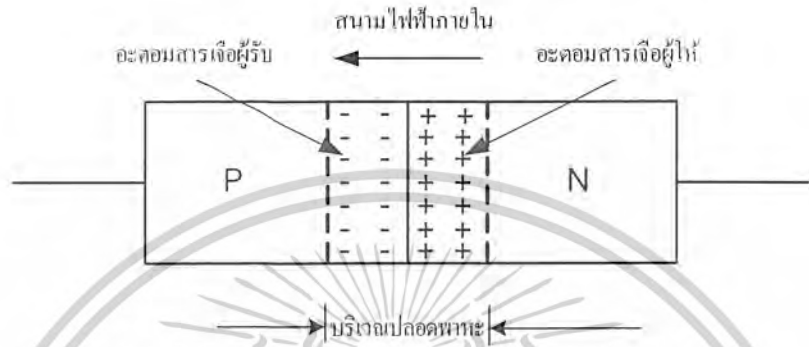
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้จริง

2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุล ขณะที่ไม่มีความดันไบอัส

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าด้านทั้งสองของรอยต่อมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของพาหะ กล่าวคือ โอลทางด้านพีจะมากกว่าโอลทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านพี จึงเป็นเหตุให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ เพื่อให้ด้านทั้งสองของรอยต่อมีพาหะเท่ากัน ดังนั้น พาหะจากด้านซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะแพร่ไปทางด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า คือ โอลทางด้านพีจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้ามาทางด้านพี การแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อนี้จะเกิดขึ้น

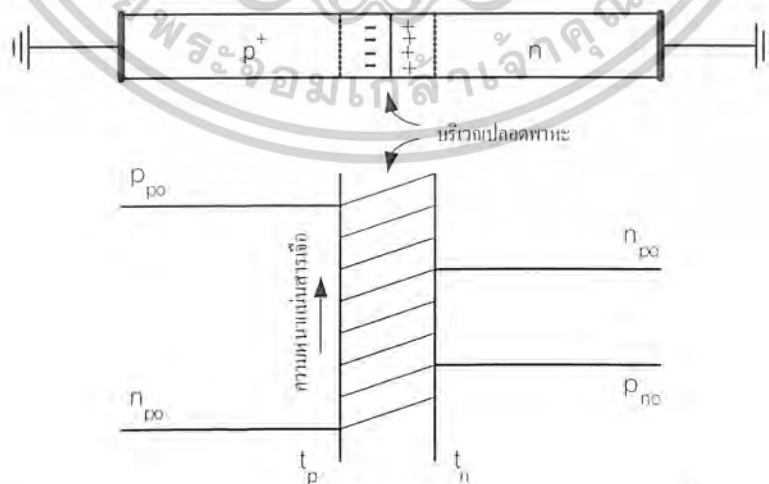
ที่บริเวณโกล์รอยต่อเป็นอันดับแรก ดังนั้น อะตอมสารเจือรับทางด้านพีบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็นเอกสารเป็นเอกลักษณ์ที่ส่งวันเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติเห็นไปไซประโยชน์คนดานการค
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน ลบ และอะตอมสารเจือผู้ให้ทางด้านเอ็นบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็นอิเล็กตรอนบวก ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนทั้งสองจะเริ่มทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ เรียกว่า สนามไฟฟ้าภายใน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะช่วยต่อต้านการเคลื่อนที่ของ โฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นจนกระทั่งสนาม ไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีผลพอดีทำให้โฮล และอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ในภาวะนี้จะไม่มีกระแสของพาหะใดๆข้ามรอยต่อเลย เราเรียกภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” ที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนาม ไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นจะเป็นบริเวณที่ไม่มีพาหะอยู่ เนื่องจากพาหะจะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าปัดออกไปจากบริเวณนี้ บริเวณดังกล่าวถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (Depletion region หรือ Space charge region หรือ Transition region)



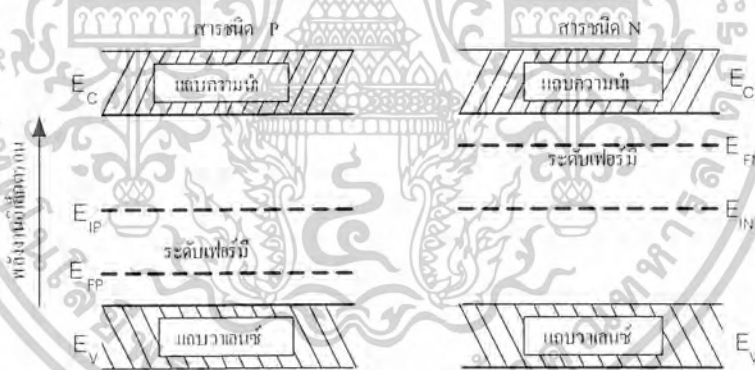
รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่ใช่ไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 การที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็นในบริเวณปลอดพาหะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น เราเรียกว่า “ศักย์สัมผัส” (Contact potential, V_0) หรือ “แรงดันภายใน” (Built in voltage) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (2.1)$$

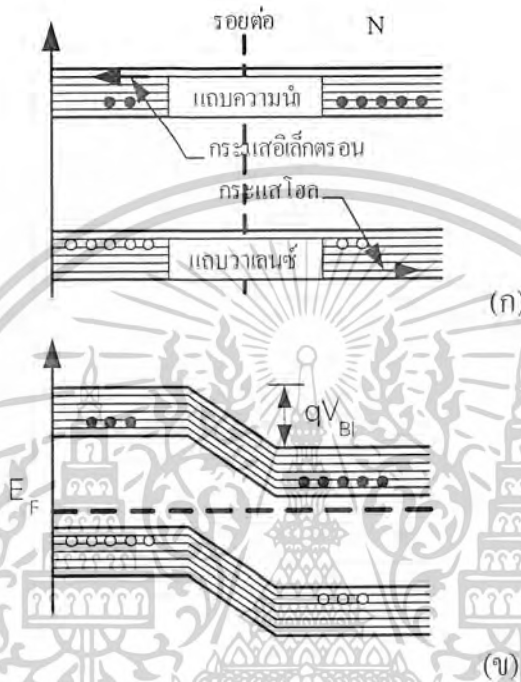
- เมื่อ V_0 คือ ศักย์สัมผัส (โวลต์)
 k คือ ค่าคงตัวของโบสตันน์มีค่า $= 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K
 T คือ อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K)
 q คือ ประจุอิเล็กตรอน $= 1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมบี้
 N_A คือ ความหนาแน่นของสารเจือรับ (cm⁻³)
 N_D คือ ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ (cm⁻³)
 n_i คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำ (cm⁻³)



รูปที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น
 ขณะยังไม่เกิดรอยต่อพี-เอ็น

ในการเขียนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band diagram) เราต้องพิจารณาถึงระดับเฟอร์มิเป็นหลักสำคัญ จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีระดับพลังงาน เฟอร์มิ E_F ไม่เท่ากัน แต่ในภาวะสมดุลระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อจะต้องต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันตลอดผ่านรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมาสัมผัสกันจะเกิดมีการถ่ายเทพาหะเกิดขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านที่มีระดับ E_F สูงกว่า คือ ด้านเอ็น ไปยังระดับพลังงานที่ว่างในแถบความนำของส่วนพีซึ่งมีระดับ E_F ต่ำกว่า และไหลจากส่วนพี-เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งจนไวสารหการเซงานเพอการศึกษาเทานน เมื่อนุญาติหนาไปไซประโยชน์ดานการคานไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะไหลเข้ามายังระดับที่ว่างในแถบวาเลนซ์ของส่วนเอ็น ขณะที่มีการถ่ายเทของพาหะข้ามรอยต่อนี้ ระดับเฟอร์มีจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับระดับใหม่ จนกระทั่งในภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มีของด้านเอ็น และด้านพีจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นแสดงด้วยแถบพลังงาน (ก) ขณะสัมผัส (ข) ภาวะสมดุลหลังสัมผัสแล้ว

ในภาวะสมดุล ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$X_m = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_0 (N_A + N_D)}{q \cdot N_A \cdot N_D}} \text{ cm.} \quad (2.2)$$

- เมื่อ X_m คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุล (cm.)
- ϵ คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำ
- V_0 คือ ศักย์สัมผัส (V.)

นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacity) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

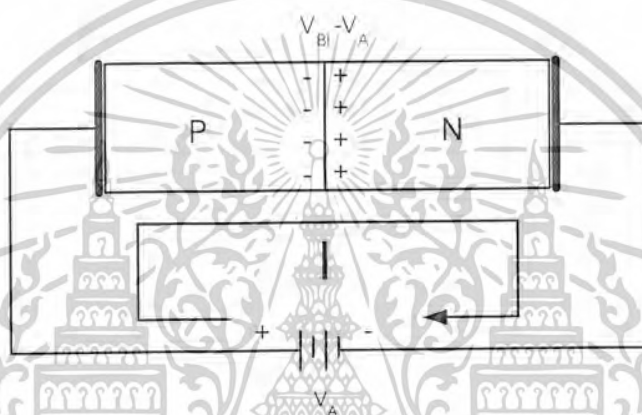
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_j = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot q \cdot N_A \cdot N_D}{2(N_A + N_D) \cdot V_0}} \quad \text{F/m}^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (F/m^2)

2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.6

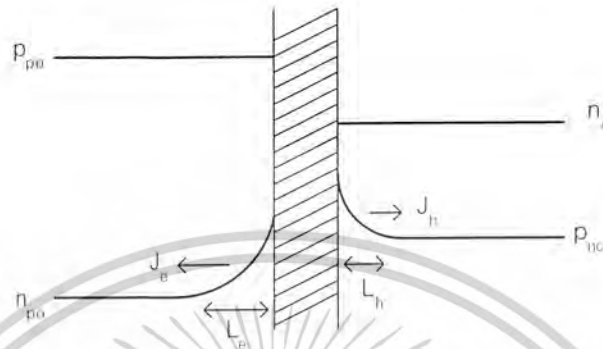
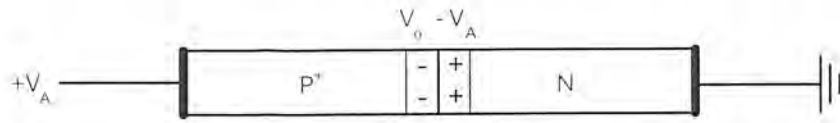


รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง

จากการพิจารณาว่า ความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงดันไบอัสตรงจากภายนอก (V_A) จะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นทั้งหมด ในลักษณะที่หักล้างหรือช่วยลดศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อพี-เอ็น เป็นผลให้แรงดันภายในรอยต่อ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะลดลง น้อยกว่าในกรณียังไม่ได้รับไบอัส ดังนั้น โหลดทางด้านพีสามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นสามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านพีได้โดยสะดวก เสมือนรอยต่อพี-เอ็นเป็นตัวนำ ขอมให้กระแสไหลผ่านได้ดี ซึ่งกระแสดังกล่าวจะถูกต้านทานเฉพาะความต้านทานอันเนื่องมาจากเนื้อสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมาก

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง โหลดทางด้านพีจะถูกฉีดเข้ามาทางด้านเอ็น ดังนั้น ปริมาณของโฮลทางด้านเอ็นบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อจะเพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกัน เมื่ออิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปทางด้านพี ปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านพีก็จะเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ
ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง

- เมื่อ p_{p0} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านพี ในภาวะสมดุล
- n_{p0} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านพี ในภาวะสมดุล
- n_{n0} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
- p_{n0} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
- L_n คือ ระยะการแพร่ของโฮล
- L_p คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

การเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะ อธิบายได้ด้วย สมการ “กฎของรอยต่อ” โดย

$$p_n|_{x_n} = p_{n0} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \tag{2.4}$$

$$n_p|_{x_p} = n_{p0} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \tag{2.5}$$

เมื่อ $p_n|_{x_n}, n_p|_{x_p}$ คือ ความหนาแน่นของโฮลที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ และ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ ตามลำดับ

เมื่อห่างออกไปจากบริเวณปลอดพาหะ พาหะส่วนน้อยจะมีการลดลง เนื่องจากมีการรวมตัว (Recombination) ของพาหะเกิดขึ้น ทำให้ปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามาลดลงกระทั่งในที่สุด เมื่อห่างจากขอบของบริเวณปลอดพาหะเป็นระยะ L_c และ L_h ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยจะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับในภาวะสมดุล นั่นคือ พาหะส่วนน้อยมีการรวมตัวของพาหะเกิดขึ้นจนหมดสิ้น โดยระยะ L_n และ L_p เรียก ระยะการแพร่ (Diffusion length) ของอิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ

เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะส่วนมาก n_{p0} และ p_{n0} มีค่ามากกว่าปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามารอยต่อ ดังนั้นค่าของ n_{p0} และ p_{n0} ที่บริเวณรอยต่อจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะมีการฉีดพาหะเข้ามารอยต่อ เมื่อพิจารณาที่รอยต่อจะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ คือ กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการไดโอด หรือเรียกว่า Shockley diode equation หรือ สมการเรกติไฟร์

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \tag{2.6}$$

เมื่อ
$$I_0 = Aqni^2 \left(\frac{D_p}{L_p n_n} + \frac{D_n}{L_n p_p} \right) \tag{2.7}$$

และ V_A คือ แรงดันไบอัสตรงภายนอก

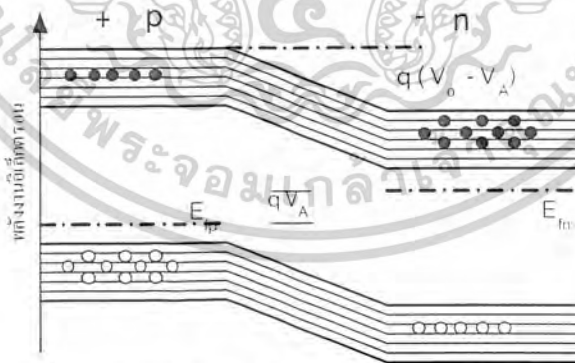
I_0 คือ กระแสอิ่มตัว

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

และขณะรอยต่อ ได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ระดับเฟอร์มีของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.8

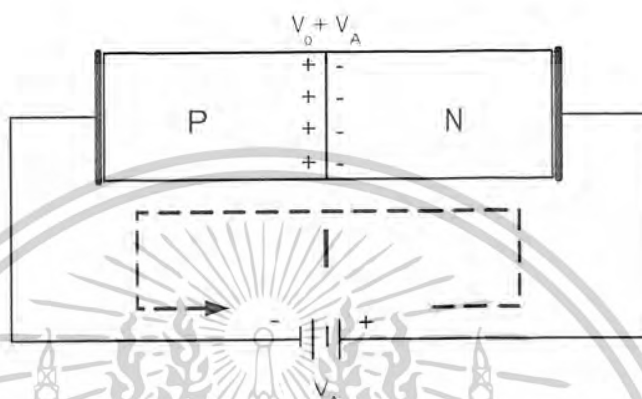


รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

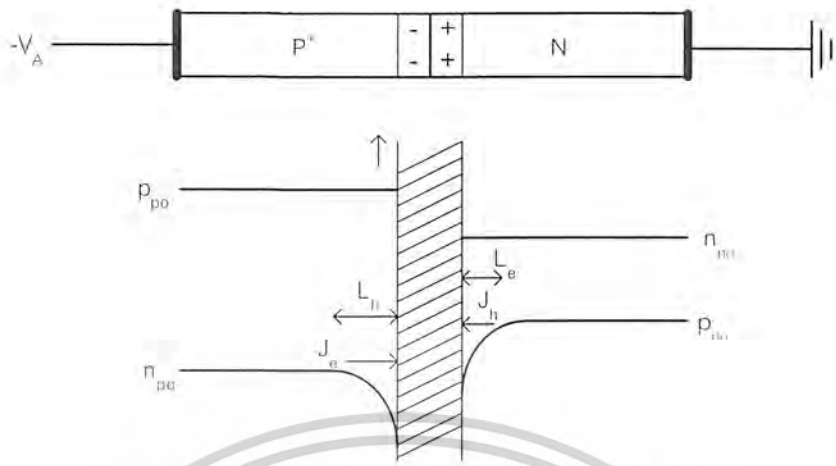
หากให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า V_A แล้ว แรงดัน V_A จะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อ ให้มีค่าสูงขึ้นจากเดิม ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ รอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้ จึงกระทำตัวคล้ายฉนวนซึ่งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น และกว้างกว่าในตอนที่ยังไม่ได้รับการไบอัส

เนื่องจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A จะทำให้พาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้น ปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆ บริเวณปลอดพาหะจะมีจำนวนลดลงดังรูปที่ 2.10 และสามารถหาความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยได้จากกฎของรอยต่อ คือ

$$p_n|_n = p_{n0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.8)$$

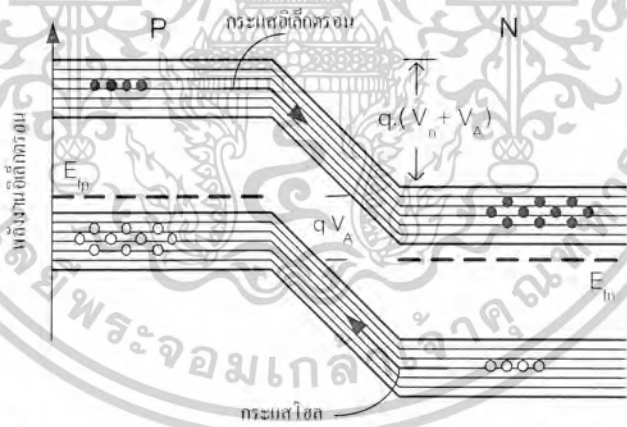
$$n_p|_p = n_{p0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ
ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ มีผลให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน qV_A ซึ่งใช้อธิบายว่าเกิดมีกระแสของพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น
ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A

จากสมการไดโอดในหัวข้อที่แล้ว เมื่อแทนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ จะได้ว่า

$$I \approx -I_0 \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายลบ หมายถึง กระแสย้อนกลับ มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีได้รับไบอัสตรง จะเห็นได้ว่า กระแส I_0 เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งมีค่าน้อยมาก และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้นอกจากอุณหภูมิของรอยต่อ

2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

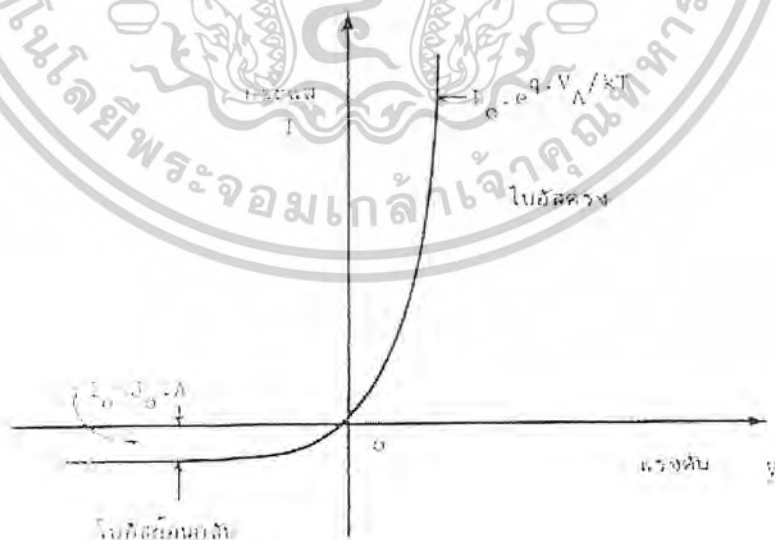
2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งกราฟนี้เราได้มาจากสมการที่ 2.6

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark)

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง เราพิจารณากันว่า ในลำแสงประกอบไปด้วยกลุ่มของ โฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu \quad (2.12)$$

เมื่อ	E_{photon}	คือ พลังงานของโฟตอน
	h	คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.624×10^{-34} joule-sec
	ν	คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์ให้สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในแถบ ความนำ (conduction band) ได้ และทำให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุ พาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่ยังไม่ได้รับแสง ดังแสดงในรูป ที่ 2.13

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง (Photo current)” หรือเขียนย่อๆ ว่า I_p หรือ I_{ph} ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นอาจเขียน ได้ว่า

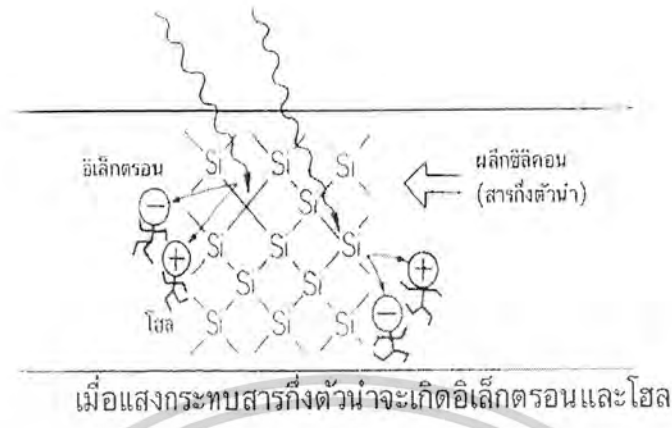
กรณีรอยต่อได้รับแสง (Illumination)

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right) - I_p \quad (2.13)$$

โดยที่ I_p คือ กระแสเนื่องจากแสง (photo current) และกระแสเนื่องจากแสงสามารถ แสดงได้โดยสมการที่ 2.14

$$I_p = q \cdot A \cdot g_{op} (L_p + L_n) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น คุณสมบัติทางไฟฟ้า จึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ และโดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็น อุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า นั่นก็คือ เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็น แหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งจะต้องให้ทั้งแรงดัน ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสงจะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสง ไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจร ในภาชนะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า I_{sc} ค่าของกระแสลัด วงจรนี้ พิจารณาหาได้จากสมการที่ 2.13 เมื่อกำหนดให้

ขณะลัดวงจร $V_d = 0$, ดังนั้นสมการที่ 2.13 จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$I = -I_p = I_{sc} \quad (2.15)$$

ในขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจรออก (open circuit) และที่รอยต่อได้รับแสง จะพบว่า กระแสที่ ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรถูกเปิด แรงดันที่ปรากฏคร่อมรอยต่อพี-เอ็นขณะนี้ถูกเรียกว่า “แรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage)” เขียนย่อๆว่า V_{oc} ค่าของ V_{oc} นี้หาได้โดยพิจารณาว่า

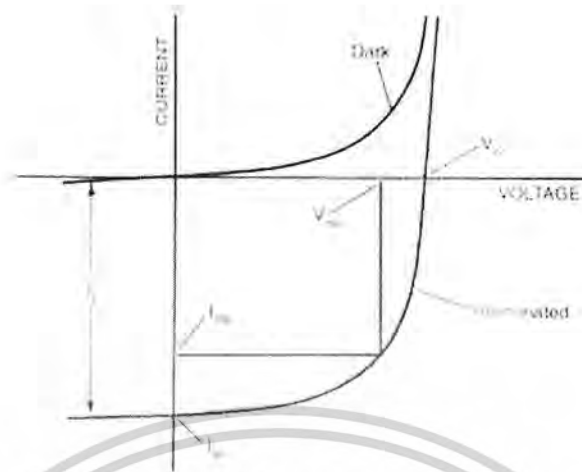
เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร $I = 0$, สมการที่ 2.13 เขียนใหม่ได้ว่า

$$0 = I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) - I_p$$

ดังนั้น $V_d = V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_p}{I_0} + 1 \right)$

หรือ $V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.16)$

ค่าของ I_{sc} และ V_{oc} แสดงไว้ในกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดง ในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิดขึ้นจะมีขนาดมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง, สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงเพื่อให้เกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล, ระยะเวลาพักของรอยต่อพี-เอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว, และค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไป กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน จะมีค่าประมาณ 35-40 mA/cm² และในกรณีของแกเลียมอาเซนายด์ค่า I_{sc} จะอยู่ราว 20 mA/cm² โดยวัดที่ค่า Air mass zero (AM0)

ส่วนค่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc}) จะมีค่ามากขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap: E_g) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์ อย่างไรก็ตาม ค่า V_{oc} นี้จะมีขนาดจำกัด คือ สูงสุดไม่เกินค่าของความกว้างของช่องว่างพลังงาน และปกติค่าของ V_{oc} ในเซลล์แบบซิลิคอนมีค่าประมาณ 0.5-0.6 โวลต์ และในกรณีของสารแกเลียมอาเซนายด์ V_{oc} จะมีค่าราว 0.9 โวลต์

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{(T + \beta)} \text{ eV} \tag{2.17}$$

เมื่อ α, β เป็นค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน

สารกึ่งตัวนำ	$E_g(0K)$	$\alpha(\times 10^4)$	β	$E_g(300K)$
GaAs	1.519	5.405	204	1.422
Si	1.17	4.73	636	1.125
Ge	0.7437	4.774	235	0.663

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

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (2.18)$$

และค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการที่ 2.19

$$R_{load} = \frac{V_m}{I_m} \quad (2.19)$$

ค่าของ P_m , V_m , และ I_m แสดงได้ดังกราฟคุณสมบัติของเซลล์ในรูปที่ 2.15

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ ค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor) เขียนอักษรย่อเป็น F.F ค่าของฟิลแฟคเตอร์ ถูกนิยามไว้ว่าคือ อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานสูงสุดที่เซลล์จะจ่ายให้แก่โหลดได้จริงกับค่าของพลังงานสูงสุดในทางอุดมคติที่เซลล์จ่ายได้ นั่นคือ

$$F.F = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.20)$$

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่าย

พลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก เซลล์ที่ใช้งาน โดยทั่วไปค่าฟิลแฟคเตอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าระหว่าง 0.6-0.8 นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญยิ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนตัวย่อเป็น η ประสิทธิภาพของเซลล์ ถูกนิยามว่าเป็น อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์ นั่นคือ

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

หรือ
$$= \frac{F \cdot F \times I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_m} \times 100\% \quad (2.21)$$

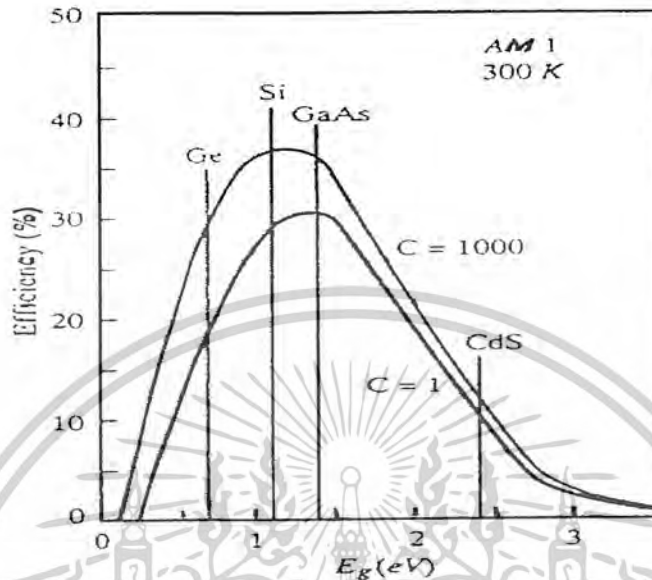
เมื่อ P_m คือ พลังงานที่ตกกระทบผิวหน้าของเซลล์ในหนึ่งวินาที หรือก็คือกำลังงานไฟฟ้าอินพุต นั่นเอง (Input power)

พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เซลล์ได้รับเกิดจากการดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าสูงกว่า E_G ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่า E_G จะไม่มีผลทำให้เกิดกระแสแสง และในโฟตอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงกว่า E_G อาจไม่เกิดกระแส แต่จะกระจายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งหากเป็นกรณีนี้ ประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลง ดังนั้น ขนาดของ E_G จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ จากสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16 อาจสรุปได้ว่า

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

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

นอกจากนี้ยังมีการใช้เลนส์รวมแสงเพื่อเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้น แล้วฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเลนส์ขนาดใหญ่สามารถเพิ่มความเข้มของแสงได้เป็นหลายร้อยเท่า ทำให้เซลล์จ่ายกระแสได้สูง เนื่องจากกระแสแสงแปรกับความเข้มแสงโดยตรง รูปที่ 2.17 แสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ 300K ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ โดยพลังงานแสงตกกระทบมีค่าเป็น 1 SUN และ 1000 SUN จะเห็นว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ข้อดีของระบบรวมแสง (Concentrating system) ก็คือ การเพิ่มกระแส โดยไม่ต้องเพิ่มพื้นที่ทำให้ระบบนี้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าปกติกับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

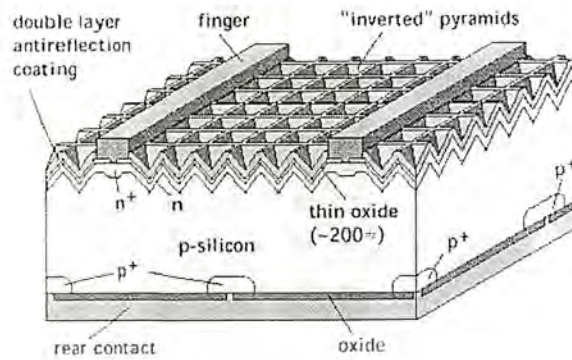


รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ 300K กับขนาด E_g ของสารกึ่งตัวนำ

จากกราฟในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าซิลิคอน และแกดเลียมอาเซไนด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาด E_g ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ในอุดมคติในทางทฤษฎี มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงสุด ราว 26% แต่มีปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อเซลล์ เช่น ความต้านทานอนุกรม (series resistance), ความต้านทานขนาน (shunt resistance), การสะท้อนกลับที่ผิว (surface reflection) และ อุณหภูมิใช้งาน ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงมาก โดยเซลล์ที่ขายในท้องตลาดมีประสิทธิภาพอยู่ราว 10-15% ปัจจุบันนี้การพัฒนา โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง โดยการลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสะท้อน ทำให้เซลล์ที่ได้มีประสิทธิภาพสูงถึง 30% ตัวอย่าง ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แบบประสิทธิภาพสูงดังแสดงในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

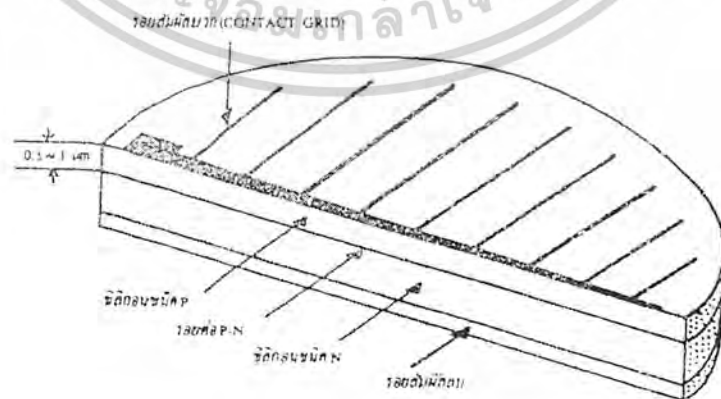


รูปที่ 2.18 ตัวอย่างลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง

เซลล์ที่กล่าวมาทั้งหมดปกติมักสร้างจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน (Silicon Single Crystalline) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพง เพื่อลดราคาของเซลล์จึงนิยมเอาผลึกหลายรูป หรือ (Poly Crystalline) หรืออะมอร์ฟัส (Amorphous) มาสร้างแทนผลึกรูปเดี่ยว ทำให้เซลล์เหล่านี้มีราคาถูกลง แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์ผลึกรูปเดี่ยว นอกจากนี้ยังมีการสร้างเซลล์แบบฟิล์มบาง (Thin Film) และแบบอื่นๆ อีกมากมาย แต่มีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ เซลล์ราคาถูกลง และประสิทธิภาพสูง เทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น I_{sc} , V_{oc} , P_m , F.F และ η ซึ่งมีค่าสูงๆ อย่างไรก็ดี พารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ก็ถูกจำกัดด้วยแฟกเตอร์อื่นๆ มากมาย ซึ่งบางแฟกเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟกเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรมุมุด

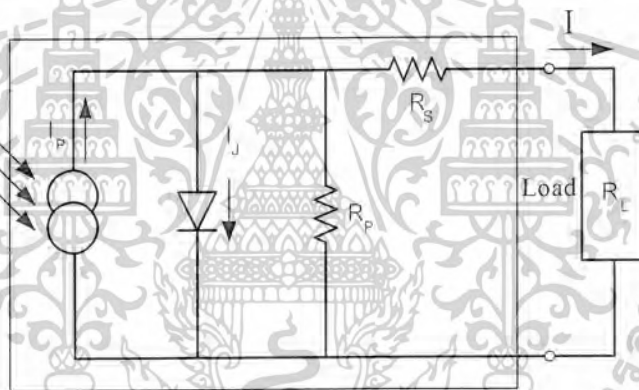


รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 โดยการแพร่สารเจือชนิดพี ลงไปในแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้น ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ ปกติความลึกของรอยต่อนี้จะมีค่าน้อยกว่า $1\mu\text{m}$. เพื่อให้พลังงานจากโฟตอนของลำแสงสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อได้สะดวก ชั้นป้องกันการสะท้อนของแสงมีหน้าที่ช่วยดูดกลืนแสง และช่วยลดการสะท้อนกลับของแสง จึงมีผลช่วยเพิ่มปริมาณการดูดกลืนแสง รอยสัมผัสทางด้านหน้าของเซลล์มักใช้โลหะอะลูมิเนียม ทำเป็นลายนิ้วมือหรือลายก้างปลา ทำหน้าที่รับกระแสที่ออกมาจากรอยต่อ ส่วนทางด้านล่างของเซลล์จะถูกฉาบด้วยอะลูมิเนียมเช่นกัน เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบของเซลล์ อย่างไรก็ตามการนำเซลล์ไปต่อร่วมกันหลายๆ เซลล์ นิยมใช้วิธีการบัดกรี ดังนั้น เพื่อให้สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้ จึงนิยมนำเซลล์ไปทำการชุบนิเกิล เพื่อให้ส่วนที่เป็นขั้วสัมผัสบวก และขั้วลบของเซลล์สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้

จากลักษณะของเซลล์ดังกล่าว เราสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

โดยที่ I_p	คือ กระแสเนื่องจากแสง
I_j	คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่มีแสง
I	คือ กระแสรวมที่ไหลผ่าน โหลดในวงจร
R_L	คือ โหลด
R_s	คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
R_p	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะใช้งาน จะเห็นได้ว่า กระแสเนื่องจากแสง (Photo current) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (current source: I_p) ซึ่งจะจ่ายกระแสออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นในทางอุดมคติ I_0 ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance: R_s) เกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความต้านทานของบริเวณรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) ระหว่างโลหะกับส่วนพี และส่วนเอ็น และค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมด เขียนตัวย่อได้เป็น R_s ส่วนค่าความต้านทานขนาน (Parallel resistance หรือ Shunt resistance: R_p) เป็นค่าความต้านทานสมมติที่ขนานกับรอยต่อพี-เอ็น ในรอยต่อพี-เอ็นที่สมบูรณ์ หรือในทางอุดมคติ ค่าของ R_p จะมีค่าเป็นอนันต์ (∞) และค่าของ R_s จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดเสีย (defect) เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ โดยเฉพาะรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ๆ ย่อมมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏอยู่ จึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่า R_p จึงไม่สูงเป็นค่าอนันต์ และค่า R_s ก็มีค่าไม่เป็นศูนย์ ผลของค่า R_s และ R_p จะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงได้ในรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ (R_s) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้จากเซลล์มาก จากวงจรสมมูล ซึ่งคิดที่ $R_s = 0$ และได้ I_R ออกมาดังนี้

$$I_R = I_p - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.22)$$

ซึ่งถ้า $R_s \neq 0$ แล้ว แรงดัน V_0 ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ และแรงดันที่ตกคร่อม R_s ซึ่งเท่ากับ $I_R R_s$ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริงๆ จะมีค่าดังนี้

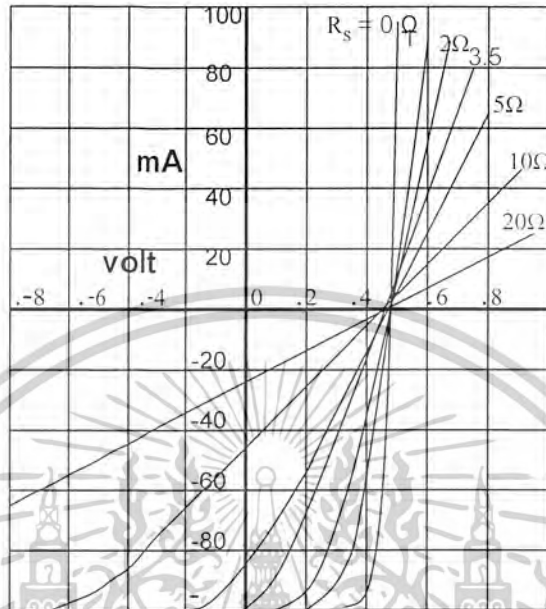
$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ (V)} = V_0 - I_R R_s$$

$$I_R = I_p - I_0 \left[e^{\left| \frac{q(V_0 + I_R R_s)}{kT} \right|} - 1 \right] \quad (2.23)$$

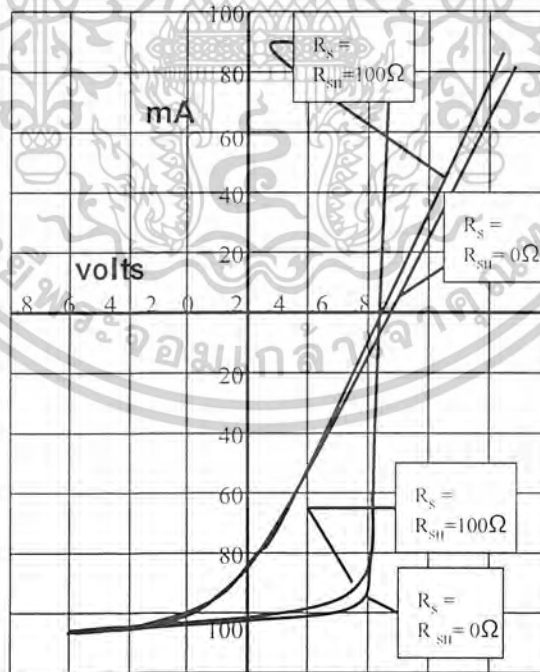
จากสมการที่ 2.22 สามารถนำไปเขียนกราฟ เพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2.20 จากรูปจะเห็นได้ว่า เซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสที่ตรงจนวน และความชันของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็ลดลงด้วย เป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์ลดลงน้อยลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรหาทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



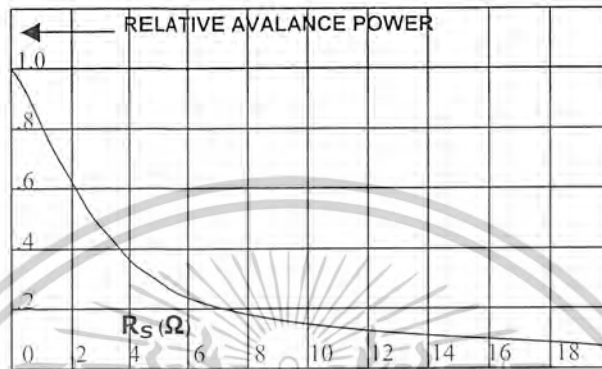
รูปที่ 2.21 ผลของความต้านทานอนุกรม



รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานขนาน

อย่างไรก็ดี โดยทั่วไปแล้วจะพบว่า ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งาน ค่าความต้านทานขนาน R_p จะมีค่าสูงพอที่จะไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม R_s จะมีผล และบทบาทที่สำคัญ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญต์เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

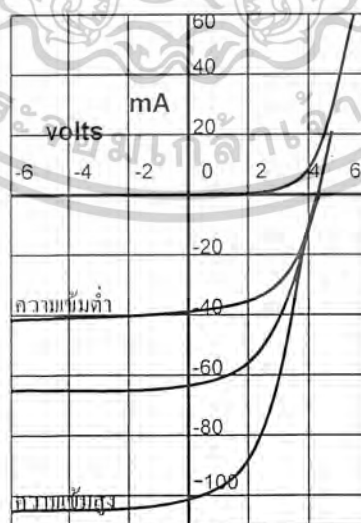
ยังต่อคุณสมบัติของเซลล์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง, การสร้าง จึงต้องพิจารณาผลของค่า R_s อย่างรอบคอบ และพยายามให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ ขณะที่ค่า R_s สูงขึ้น พลังงานสูงสุดซึ่งเซลล์จะสามารถจ่ายได้จะมีค่าลดลงและแสดงได้ดังในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงาน จำเป็นต้องมีแสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอที่จะเป็นอิสระ และทิ้งให้โฮลเกิดขึ้น ดังนั้น ถ้าหากแสงที่มาตกกระทบมีความเข้มสูงมาก หรือก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮลเป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสง มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริงนั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนก็จะมีผลต่อกระแส และแรงดันที่ได้จากเซลล์ด้วย เมื่อพิจารณาสมการของกระแส I_R ที่ไหลผ่านมายัง โหลด R_L

$$I_R = I_p - I_j \quad (2.24)$$

จะพบว่า กระแส I_R นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องมาจากแสง I_p และกระแส I_j ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_j และ I_p

2.9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_j

เมื่อพิจารณาค่าของ I_j ในสมการที่ 2.11 ซึ่ง I_j มีค่าดังนี้

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

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า I_0 จะมีผลต่อกระแส I_j มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_0 โดยพิจารณาจากสมการของ I_0 ดังนี้

$$I_0 = Aqn_i^2 \left[\frac{1}{N_A \left(\tau_n \right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{N_D \left(\tau_p \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (2.25)$$

จากสมการของ I_0 จะพบว่า n_i^2 ของซิลิคอนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

$$n_i^2 = 15 \times 10^{32} T^3 e^{\frac{-1.21}{kT}} \quad (2.26)$$

จากสมการจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างเอ็กโปเนนเชียล เป็นผลให้ I_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย จากผลอันนี้แสดงว่า I_j จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.9.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_p

เมื่อพิจารณาค่าของกระแส I_p ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงในสมการที่ 2.14

$$I_p = qAg_{op} (L_n + L_p)$$

เนื่องจาก I_p แปรผันตาม g_{op} และ L จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ L และ g_{op}

จากสมการ

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.27)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

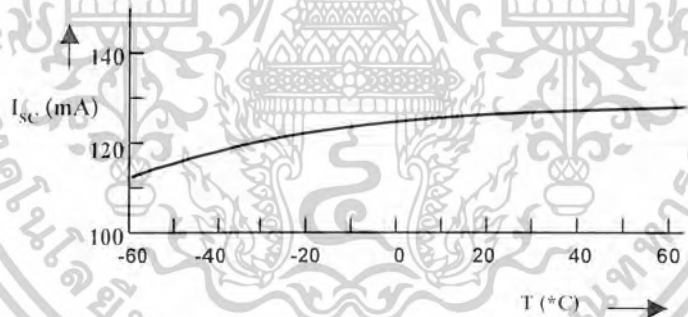
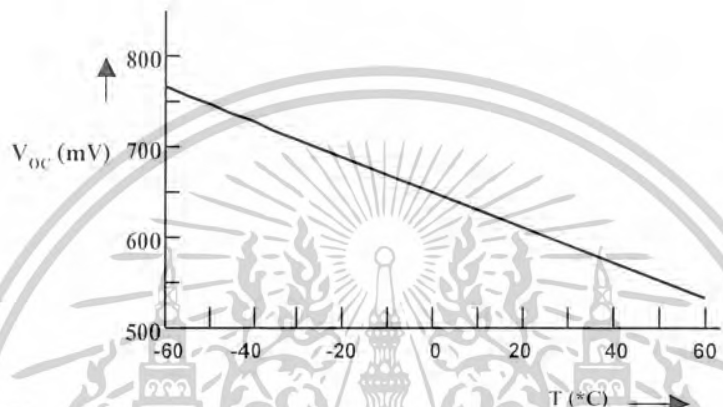
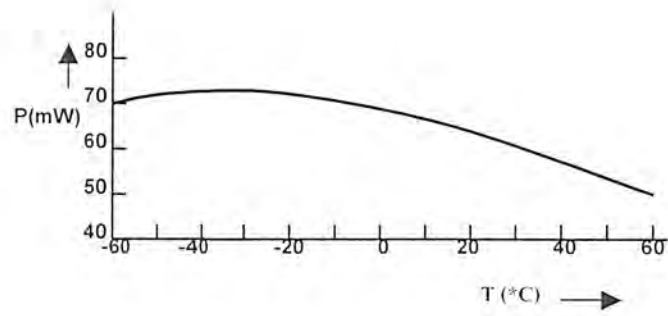
องค์ประกอบอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อ I_p ก็คือ ค่าอัตราการเกิดของกระแส, g_{op} โดยพบว่าค่า g_{op} จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากช่องว่างพลังงานของสารจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานโฟตอนจากแสงสามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะได้มากขึ้นกว่าเดิม แต่ผลอันนี้เมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานจริงๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย (ในช่วง $20-70^\circ\text{C}$) อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า g_{op} น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า I_p จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากกับอุณหภูมิ

2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรถูกเปิด (V_{oc}) ตามสมการที่ 2.16

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_0} + 1\right)$$

จากสมการนี้ค่า $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่า $\frac{k}{q}$ มีค่าต่ำมาก, ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} ก็คือ I_0 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้ V_{oc} มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{sc} , V_{oc} และ P_o ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.25

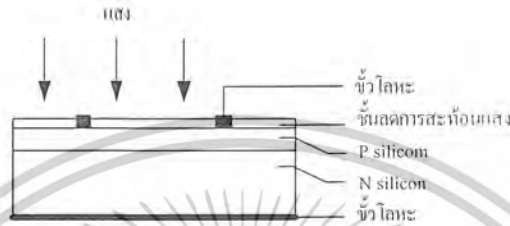


รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์

2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น เนื่องจากแสงที่ส่องมากระทบผิวหน้าเซลล์จะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเอาไว้เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และมีส่วนสะท้อนไปจากผิวหน้าของเซลล์ แสงส่วนที่สะท้อนออกไปจากผิวหน้านี้เองที่สูญเสียไปโดยไม่เกิดประโยชน์ เพื่อที่จะนำแสงส่วนนี้มาใช้ประโยชน์อีก จึงควรมีชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของเซลล์ ชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ยอมให้แสงผ่านเข้าไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้ เมื่อแสงสะท้อนกลับออกมาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผิวหน้าของเซลล์ ชั้นลดการสะท้อนแสงจะทำให้แสงบางส่วนสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์อีก ช่วยให้เซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จึงทำให้เซลล์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย ชั้นลดการสะท้อนแสงจะช่วยให้แสงสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้มากเพียงใด จะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหและความหนาของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

สาร	ดัชนีหักเห (n)
SiO ₂	1.5
SiO	1.9
SnO ₂	2.1
ZnS	2.3
TiO ₂	2.6

2.11 การสะท้อนของแสงในตัวกลางต่างชนิดกัน

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

$$\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \tag{2.28}$$

โดยที่ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 2 ชนิด

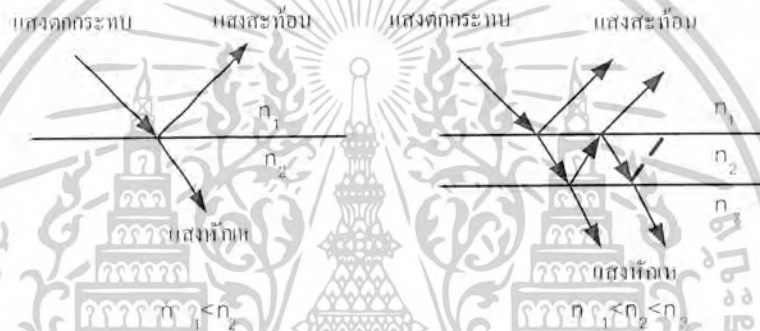
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_2

ถ้า $n_1 < n_2$ แสงส่วนใหญ่จะหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 และแสงส่วนน้อยจะสะท้อนออกไปในทางตรงกันข้าม ถ้า $n_1 > n_2$ แล้วแสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.27

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 ดังรูปที่ 2.27 การสะท้อนกลับนี้เอง ที่ทำให้ผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.27 การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยี และการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

Silicon Solar Cell Technology and Fabrication

บทนำ

ตั้งแต่ปี ค.ศ.1953 เป็นต้นมาก็ได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับยานอวกาศ หรือดาวเทียมต่างๆ จนกระทั่งถึงปี ค.ศ.1973 หลายบริษัทได้ให้ความสนใจที่จะนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลก จึงได้มีการพัฒนาการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดราคาในการผลิตลง ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ในอนาคต

เทคโนโลยีของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

1. การสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ
2. การแพร่สารเจือ
3. การสร้างขั้วไฟฟ้า
4. การต่อสายเก็บบรรจุเซลล์เพื่อทำเป็น โมดูล หรือแผงเซลล์

3.1 การสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

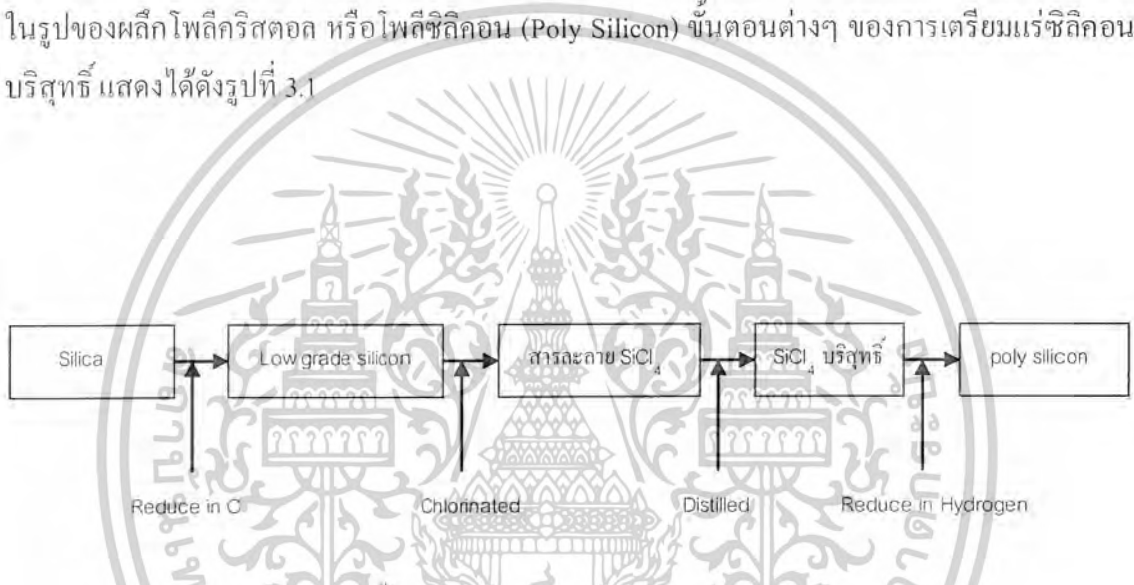
3.1.1 การเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์

แม้ว่าธาตุซิลิคอนจะเป็นธาตุที่มีอยู่มากมาย โดยเฉพาะบริเวณเปลือกโลกแต่ก็ไม่ปรากฏในลักษณะของแร่บริสุทธิ์ ส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของสารประกอบ เช่น ซิลิกา (Silica) หรือก็คือซิลิคอนไดออกไซด์ที่ไม่บริสุทธิ์ นอกจากนี้แล้วบางส่วนยังอยู่ในรูปของซิลิเกต (Silicate) ซึ่งหมายถึงสารประกอบของซิลิคอน, ออกซิเจน และธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ ซึ่งแร่ดังกล่าวนี้ ก็คือ ทรายนั่นเอง ในอุตสาหกรรมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำจากซิลิคอน จะนำทรายชั้นดี (มีสิ่งเจือปนน้อย) มาสกัดเพื่อให้ได้แร่ซิลิคอนที่บริสุทธิ์ แล้วจึงนำไปปลูก (Growth) เพื่อให้ได้ซิลิคอนในรูปของผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline) สำหรับการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดต่างๆ ต่อไป

ขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ก็คือ การสกัดทรายให้ได้แร่ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด กระบวนการแยกแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ ทำได้โดยการเผาซิลิกาพร้อมกับคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงในเตาไฟฟ้า ธาตุคาร์บอนจะทำหน้าที่ดึงออกซิเจนออกจากซิลิกา จึงทำให้ได้แร่ซิลิคอน แต่ยังไม่บริสุทธิ์ ซึ่งเรียกว่า “Low grade silicon” หรือบางครั้งก็เรียกว่า “เฟอโรซิลิคอน”

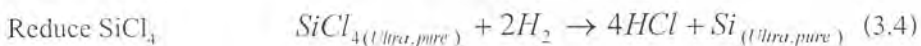
(Ferro silicon) กระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า “Reduce SiO₂” ดังแสดงในสมการที่ 3.1 จากนั้นจึงนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอา Low grade silicon ไปทำการ “คลอรีเนต” (Chlorinated) โดยรวมกับคลอรีน ในทางปฏิบัตินิยมใช้กรดเกลือ (HCl) เพื่อเป็นตัวทำละลายซิลิคอน จะทำให้ได้สารละลายซิลิคอนเตตระคลอไรด์ (SiCl₄) หรือ ไตรคลอโรไซเลน (SiHCl₃) ดังแสดงในสมการที่ 3.2 หรือสมการที่ 3.3 ซึ่งในสารละลายนี้จะมีเพียงซิลิคอนเท่านั้นที่ละลายรวมกับคลอรีน สารปะปนอื่นๆ จะตกตะกอน และแยกตัวออกไป เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (Ultra pure) จึงมีการกลั่นสารละลายนี้อีกครั้งหนึ่ง จากนั้นจึงนำไปทำการแยกแร่ซิลิคอนออกจากสารละลาย ซึ่งอาจทำได้โดยการทำให้ร้อนจัดในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 3.4 จากปฏิกิริยานี้ในที่สุดจะได้แร่ซิลิคอนที่บริสุทธิ์สูง แต่จะอยู่ในรูปของผลึกโพลีคริสตัล หรือโพลีซิลิคอน (Poly Silicon) ขั้นตอนต่างๆ ของการเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการเตรียมแร่ซิลิคอน

สมการเคมีของการเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่ขั้นตอนต่างๆ อาจสรุปได้ดังนี้



3.1.2 การปลูกผลึกรูปเดี่ยว

แร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ที่เตรียมได้ มักจะถูกนำไปหลอมละลาย และทำให้เป็นแท่งทรงกระบอก ซึ่งแท่งผลึกนี้จะมีคุณสมบัติเป็นผลึกหลายรูปหรือโพลีคริสตัล ก่อนที่จะนำไปใช้สร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จะต้องนำไปทำให้เป็นผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ ซึ่งกระบวนการที่ทำให้ได้ผลึกรูปเดี่ยว ถูกเรียกว่า “การปลูกผลึก (Crystal growth)” ที่ใช้คำว่าปลูกผลึก ก็เนื่องจาก คล้ายกับการปลูกต้นไม้ เมื่อ

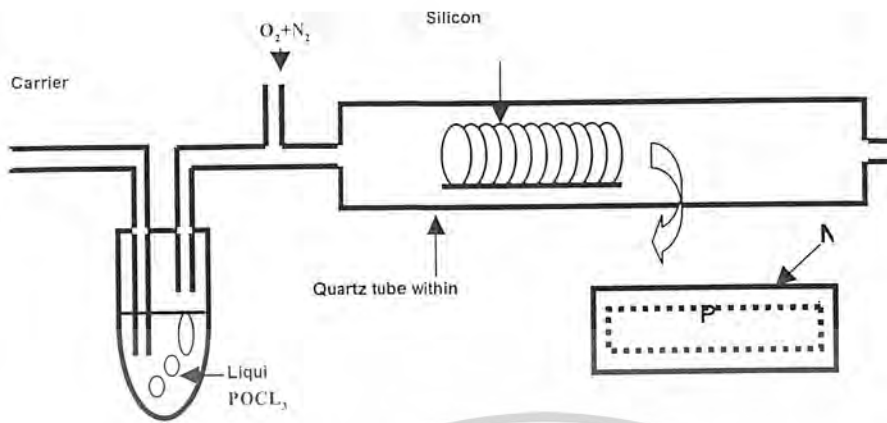
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะปลูกต้นอะไร ก็ต้องใช้เมล็ดของต้นนั้นมาปลูก จึงจะได้ต้นไม้ขนาดใหญ่ชนิดนั้น การปลูกผลึกก็เช่นกัน จำเป็นต้องใช้ชิ้นผลึกชิ้นเล็กๆ เป็นส่วนเริ่มต้นเพื่อการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ และเราเรียกชิ้นผลึกนี้ว่า “เมล็ดผลึก (Crystal seed)” ผลึกที่ได้จะมีคุณลักษณะเหมือนกับเมล็ดผลึกทุกประการ การปลูกผลึกรูปเดียวสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมกันได้แก่ วิธีโซคราสกี (Czochralski), วิธีโซนรีไฟนิ่ง (Zone refining) และวิธีฟลอยด์ซัน (Floating zone) โดยในที่นี้เราจะพูดถึงวิธีการที่นิยมทำกันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถปลูกผลึกได้ขนาดใหญ่ ซึ่งนั่นคือ วิธีโซคราสกี (Czochralski) และวิธีโซนรีไฟนิ่ง (Zone refining)

3.2 การแพร่สารเจือ

การแพร่สารเจือ เป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยรอยต่อพี-เอ็นนี้จะอยู่ลึกจากผิวหน้าลงไปประมาณ 0.1-0.5 ไมครอน การแพร่สารเจือส่วนมากจะใช้การแพร่ซิมฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูงราว $800-1000^{\circ}\text{C}$ ลงในฐานรองชนิดพีที่มีโบรอนแพร่ซิมอยู่ก่อนแล้วทั่วทั้งแผ่นผลึกตั้งแต่กระบวนการปลูกผลึก วิธีการแพร่ซิมฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะใช้ฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์ (POCl_3) เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ (Impurities source) เนื่องจากฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์มีลักษณะเป็นของเหลวระเหยง่าย จึงต้องนำไปใส่ไว้ในหม้อแก้ว (Bubble) ที่มีก๊าซเฉื่อยอย่างดี จากนั้นจึงใช้ก๊าซเฉื่อยพวกไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหย POCl_3 พร้อมกับบ่อน้ำช็อกชิลเงินเข้าไปในการแพร่สารที่มีแผ่นซิลิคอนวางอยู่ที่อุณหภูมิสูงราว $800-1000^{\circ}\text{C}$ จะเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางๆ ปกคลุมทั่วทั้งแผ่นผลึก พร้อมกันนั้นฟอสฟอรัสก็จะแพร่ซิมผ่านชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงไปในซิลิคอน การแพร่ซิมใช้เวลาราว 20 นาที ก็จะได้ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นบางๆ หนาราว 0.1-0.3 ไมครอน จากนั้นใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กัดชั้นออกไซด์ออกทั้งหมด ก็จะได้แผ่นซิลิคอนที่มีรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งรอยต่อที่ด้านหลังนี้จะถูกกำจัดให้หมดไปโดยการเคลือบอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นสารเจือปนชนิดพี ด้วยกระบวนการระเหยสารในสุญญากาศ แล้วจึงนำไปทำการแพร่ซิมอะลูมิเนียมให้ทะลุผ่านชั้นฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ $700-800^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้ P^+ บางๆ เกิดขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ

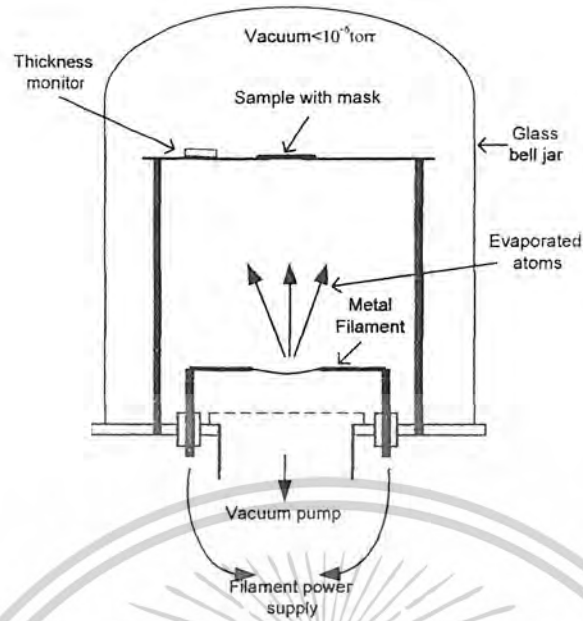
3.3 การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิก

เป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับต่อสายเพื่อนำไปใช้งาน โลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องบัดกรีได้ เพื่อความสะดวกในการต่อเซลล์หลายๆ เซลล์เข้าด้วยกัน โลหะที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ เงิน, นิกเกิล, ทองแดง, โททาเนียม ฯลฯ

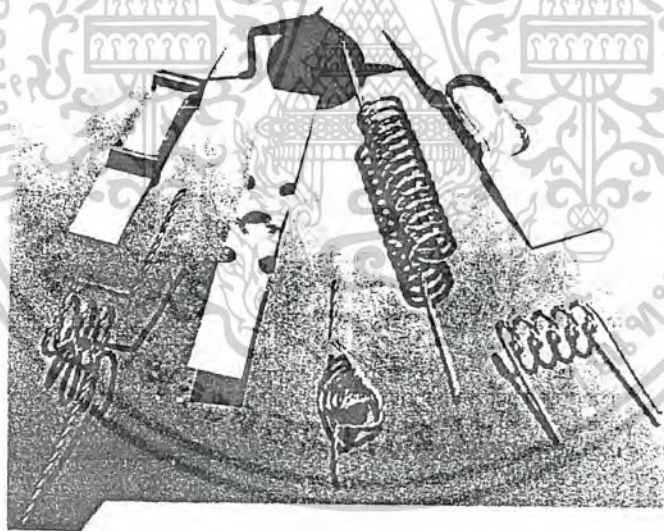
การสร้างขั้วไฟฟ้าจะใช้วิธีระเหยสารในสุญญากาศ ที่เรียกว่า Evaporations ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้าที่สร้างด้วยวิธีนี้จะประกอบด้วยขั้วโลหะ 3 ชั้น จากชั้นในสุด คือ เงิน, พาราเดียม และ โททาเนียมจะอยู่ชั้นนอกสุด โลหะทั้ง 3 ชนิด แต่ละชนิดจะถูกทำให้ระเหยในสุญญากาศ ผ่านช่อง โฟโตมาสก์ ซึ่งทำเป็นลวดลายตาข่าย (grid pattern) ไปเกาะติดอยู่ที่ผิวของซิลิคอนตามลำดับ ส่วนด้านหลังจะติดที่บัพทั้งหมด จากนั้นจึงนำไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500-600°C เป็นเวลา 5-30 นาที เพื่อให้โลหะติดแน่นกับซิลิคอน และทำให้ความต้านทานที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าลดลง

หลังจากสร้างขั้วโลหะแล้วจะใช้กระบวนการ Evaporations ระเหยสารพวกออกไซด์ไปเคลือบลงบนผิวหน้าของเซลล์ซึ่งโลหะที่ใช้แสดงในรูปที่ 3.3 หรืออาจจะใช้กระบวนการสร้างออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapour Deposition) สร้างชั้นออกไซด์บางๆ ของ SiO , SiO_2 , TiO_2 หรือ Ta_2O_5 ลงบนผิวหน้าของเซลล์ เพื่อใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และชั้นป้องกันผิวหน้า ซึ่งจะทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การระเหยโลหะในสุญญากาศ เพื่อสร้างชั้นไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์



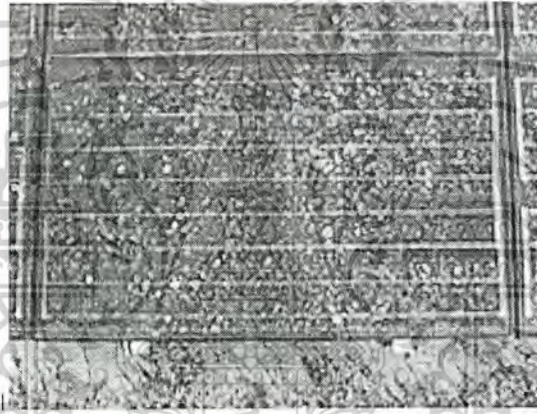
รูปที่ 3.4 ประเภทของเส้นลวดนำไฟฟ้าที่ให้ในการระเหยโลหะในสุญญากาศ

เนื่องจากการสร้างชั้นไฟฟ้าด้วยวิธี Evaporations นั้นทำให้ราคาในการผลิตเซลล์สูงมาก เซลล์ที่สร้างด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในงานทางด้านอวกาศ ซึ่งต้องการความทนทาน และมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไว้วางใจที่สูงกว่าเซลล์ที่ใช้บนพื้นโลก เมื่อมีการพัฒนากระบวนการผลิต เพื่อลดต้นทุนในการผลิตลง การสร้างขั้วไฟฟ้าจึงได้เปลี่ยนมาใช้วิธีการซิลสกรีน โลหะและการชุบด้วยไฟฟ้าแทน

การซิลสกรีนด้วยโลหะจะใช้โลหะเหลวพวกเงิน หรือนิเกิล สกรีนผ่านต้นแบบลวดลายลงบนแผ่นซิลิกอน ส่วนด้านหลังจะสกรีนที่บัพทั้งหมดแล้วจึงนำไปทำการแอนนีส เพื่อให้อโลหะติดแน่นเป็นเนื้อเดียวกับซิลิกอน หลังจากการแอนนีสแล้ว บางบริษัทจะนำเซลล์ไปทำการชุบตะกั่วเพื่อให้ขั้วไฟฟ้ามีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และไม่เกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย วิธีการชุบตะกั่ว หรือจะเรียกว่า ออบตะกั่ว ก็ทำได้โดยจะเริ่มจากการนำเซลล์ที่ผ่านการแอนนีสแล้ว ไปจุ่มลงในอ่างตะกั่วที่มีตะกั่วหลอมเหลวอยู่ ตะกั่วจะเกาะติดเฉพาะส่วนที่เป็นลวดลายโลหะทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เซลล์ที่ผ่านการชุบตะกั่วมาแล้วจะช่วยให้การต่อเซลล์เข้าด้วยกันสะดวกยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผ่นผลึกแบบ Polycrystalline ที่ผ่านการต่อสายแล้ว
ในระบบโรงงานอุตสาหกรรม

3.4 การประกอบรวมเป็นแผงเซลล์

แผงเซลล์ หรือ โมดูล (Modules) หรืออาร์เรย์ (Arrays) เกิดจากการนำเซลล์มาต่อรวมกันเป็นแผงเซลล์ แล้วเก็บบรรจุด้วยการซิลเป็นอย่างดี เพื่อกันความชื้น และสารเคมีที่อาจจะทำให้เซลล์เสียหายได้

การต่อเซลล์แต่ละเซลล์เข้าด้วยกันในแบบอนุกรม จะใช้แผ่นฟอยล์ของโลหะบางๆ เป็นตัวเชื่อม เพื่อให้มีการยึดหยุ่นได้บ้างเล็กน้อย หลังจากนั้นเซลล์เหล่านี้จะถูกนำไปวางบนแผ่นฉนวนฐานรอง ซึ่งอาจจะทำมาจากแก้ว หรืออีพ็อกซีก็ได้ แล้วจึงใช้แผ่นกระจกใสดปิดผิวหน้าด้านบนอีกครั้ง ระหว่างกระจกใสด้านหน้า และแผ่นฐานรอง จะใส่สารพวกซิลิโคนซึ่งเป็นสารที่แสงผ่านได้ดี และมีการยึดหยุ่นได้ เพื่อป้องกันไม่ให้เซลล์เสียหายจากการกระทบกับของแข็ง นอกจากนี้ยังเป็นตัวช่วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันความชื้น และสารเคมีได้อีกด้วย การเก็บบรรจุที่สมบูรณ์จะช่วยให้เซลล์มีอายุการใช้งานนานถึง 20 ปี หรือมากกว่านั้นได้

สำหรับการตรวจสอบแผงเซลล์จะใช้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ AM1 หรือ 100 mw/cm² ซึ่งในโรงงานต่างๆ ไป จะใช้เครื่องผลิตแสงอาทิตย์เทียม ที่เรียกว่า solar simulator เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ผลิตขึ้นมา



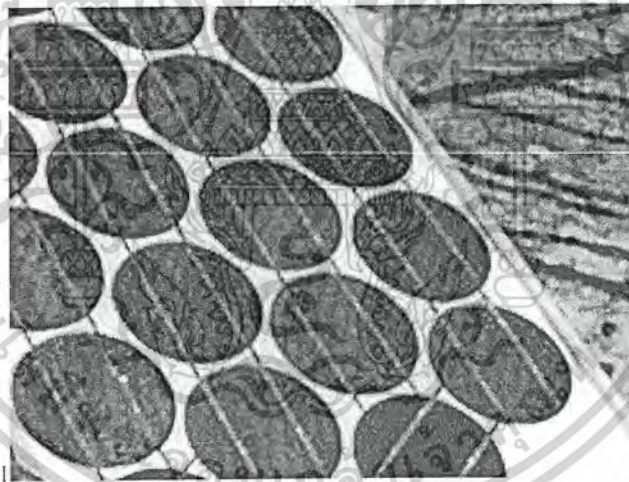
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของโมดูลชนิดหนึ่ง

รูปที่ 3.7 การประกอบเซลล์เป็น โมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 เป็นโมดูลที่แพร่หลายในปัจจุบัน เรียกว่าแบบ super strate โดยรูปที่ 3.7 แสดง ขั้นตอนการสร้าง ด้านที่รับแสงจะใช้วัสดุโปร่งใส เช่น แผ่นแก้ว ซึ่งจะเป็นตัวโครงสร้างทางกลของโมดูลด้วย เมื่อจัดวางเซลล์ทางไฟฟ้าแล้ว ก็จะอัดที่ว่างด้วยวัสดุเติมเต็มโปร่งใส เช่น PVB (polyvinyl butyrol) หรือ EVA (ethylene vinyl acetate) จากนั้นก็จะปิดด้านหลัง และหุ้มโมดูล ทั้งหมดด้วยเฟรม อะลูมิเนียม ประสิทธิภาพของโมดูลที่มีขายในท้องตลาดปัจจุบัน ที่มีขนาดประมาณ 40cm x 120cm คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนผลึกเดี่ยว 10-14% แบบโพลีซิลิคอน 8-12% และแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน 6-9 %

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบผลึกรูปเดี่ยวนี้ จะมีต้นทุนในการผลิตสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพของเซลล์สูงตามไปด้วย จึงเป็นที่เชื่อได้ว่าเทคโนโลยีในการสร้างเซลล์แบบผลึกรูปเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 3.8 จะยังคงมีใช้กันอยู่อีกนาน และยังคงใช้เวลามาก เพื่อพัฒนาหาทางนำเซลล์แบบอื่นมาใช้ และระยะเวลาในการใช้งานจะต้องไม่ต่ำกว่า 25 ปีด้วย ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เซลล์แบบผลึกรูปเดี่ยวสามารถใช้ได้



รูปที่ 3.8 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว

3.5 การปรับปรุงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบ่งได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ คือ แบบผลึก และแบบอะมอร์ฟัส ซึ่งการสร้างของแต่ละชนิดจะต่างกัน

- 1 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว
- 2 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกโพลี
- 3 ซิลิคอนแบบบริบบอน

4 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบอะมอร์ฟัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ จะเห็นว่า มีบางประเภท ที่ทำจากสาร กึ่งตัวนำแบบสารประกอบซึ่งไม่ใช่ซิลิคอน แต่โดยรวมแล้วยัง ไม่เป็นที่แพร่หลาย ด้วยเหตุผลทางด้านราคา และความยุ่งยากในการผลิต

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	สารกึ่งตัวนำที่เป็นวัสดุดิบ	ประสิทธิภาพของเซลล์	ประสิทธิภาพของโมดูล
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกเดี่ยว	15-24 %	10-14 %
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกโพลี	10-17 %	9-12 %
ซิลิคอน-อะมอร์ฟิส	Amorphous Silicon Amorphous SiC Amorphous SiGe	8-13 %	6-9 %
สารกึ่งตัวนำ 2 ชั้น	GaAs/InP CdS/CdTe	18-30 % (GaAs) 10-15 %	NA
สารกึ่งตัวนำ 3 ชั้น	CdS/CuInSe ₂	10-15 %	NA

ตารางที่ 3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ

หมายเหตุ NA หมายถึง not applicable or not available

ตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ จะเห็นว่าซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด ตามมาก็คือ ซิลิคอนแบบผลึกโพลี และแบบอะมอร์ฟิส อย่างไรก็ตามแบบโพลี และแบบอะมอร์ฟิสนั้น ยังมีโอกาสที่จะลดต้นทุนการผลิตได้อีกมากกว่าแบบผลึกเดี่ยว ยิ่งไปกว่านั้นแบบอะมอร์ฟิสนั้น ก็ยังมีจุดเด่นอื่นๆที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นไม่มี

ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์อื่นๆ นอกจากตระกูลซิลิคอนแล้วก็มีจุดเด่นจุดด้อยดังตารางที่ 3.2 ซึ่งในปัจจุบัน การใช้งานยังจำกัดอยู่ในการประยุกต์ลักษณะพิเศษ เช่น การใช้งานในอวกาศ ฯลฯ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตระกูล	ประสิทธิภาพ (%)	พลังงานในการผลิต	ราคา	วัตถุดิบ	ความเชื่อถือ	สิ่งแวดล้อม
ซิลิคอนผลึกเดี่ยว	15-24	Bad	Bad	Good	Very Good	Very Good
โพลีซิลิคอน	10-17	Good	Good	Good	Good	Very Good
อะมอร์ฟัสซิลิคอน	8-13	Very Good	Very Good	Very Good	Good	Very Good
GaAs	18-30	Bad	Very Bad	Bad	Very Good	Bad
CdS/ CdTe	10-15	Good	Good	Bad	Good	Bad
CdS/ CuInSe2	10-15	NA	NA	Bad	Good	Bad

หมายเหตุ NA หมายถึง not applicable or not available

ตารางที่ 3.2 จุดเด่น และจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

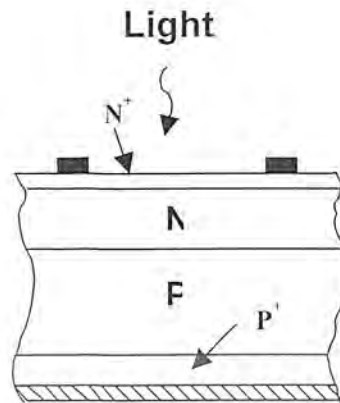
3.6 การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back Surface Fields (BSF) และวิธีการอาศัยผลของชั้นลดการสะท้อนของแสง Anti-Reflection Coating (ARC) แบบพอร์ซซิลิคอน (Porous Silicon, PS)

1. Back Surface Fields (BSF)

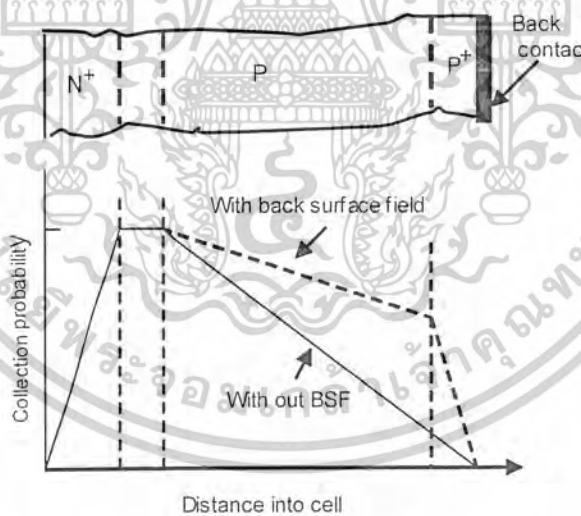
Back surface fields เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์วิธีดังกล่าวนี้ในปัจจุบันนี้ได้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมาตรฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงในหลายแห่ง เนื่องจากกระบวนการสร้าง back surface fields ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้อย่างมากอีกด้วย การทำ back surface fields (BSF) สามารถทำได้โดยการทำ High dope ชนิดเดียวกันกับฐานรองในบริเวณด้านล่างของแผ่น Substrate ใกล้เคียงกับ Back contact แสดงได้ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ
ด้วยวิธี Back Surface Fields (BSF)

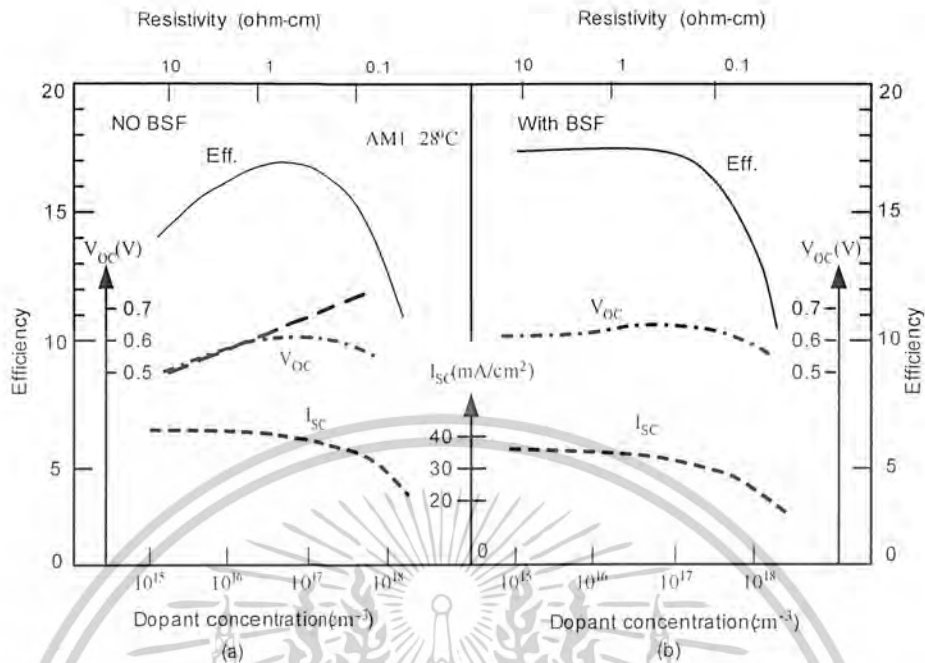
การทำ Back surface fields (BSF) จะมีผลช่วยเพิ่มกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) เนื่องจากการ back surface fields (BSF) จะเข้าไปช่วยเพิ่มค่าของ Collection Probability (f_c) โดยค่าของ Collection Probability จะหมายถึง พาหะส่วนน้อยที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงจะมีโอกาสเปลี่ยนเป็นกระแสลัดวงจร (I_{sc}) ได้เท่าใด และจากการเพิ่มขึ้นของค่า Collection Probability นี้จะมีผลทำให้ค่าของกระแสลัดวงจร (I_{sc}) เพิ่มขึ้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 Collection Probability ของเซลล์ที่มี BSF และไม่มี BSF

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญคือ กระแสลัดวงจร (I_{sc}), แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ภายหลังจากเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back surface field (BSF) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 Dependence of key solar cell parameters upon the density of p-type dopants as obtained by high-performance experimental device:

(a) Without a back surface field.

(b) With a back surface field.

2. พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)

การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำได้อีก โดยการอาศัยผลของชั้นลดการสะท้อนของแสง Anti-Reflection Coating (ARC) แบบพอร์สซิลิคอน (Porous Silicon, PS) ซึ่ง ทฤษฎี, กระบวนการสร้าง, และการประยุกต์ใช้งานของพอร์สซิลิคอนคอน จะขอกว่าในบทถัดไป

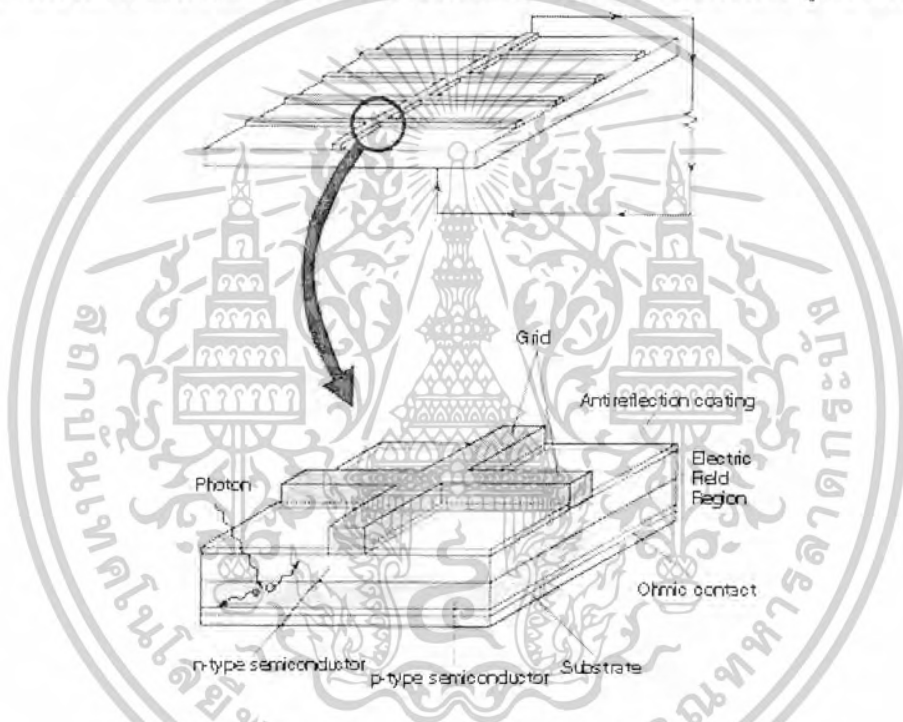
3.7 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้รับการพัฒนา และใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดนั้นเป็น เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุหลัก ทั้งที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยว (single crystal) และผลึกหลายรูป (polycrystal) และปัจจุบันนี้ได้มีการค้นคว้าเป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) แต่ประสิทธิภาพในการ เปลี่ยนพลังงานยังไม่สูงมากนัก

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสามารถในการที่จะ เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น เมื่อแสงตกกระทบ พลังงานแสงบางส่วนจะสะท้อนออกไปและบางส่วนจะถูกดูดกลืน ทำให้เกิดประจุพาหะอิสระขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ชนิด คือ ชนิดบวม ซึ่งเรียกว่า โฮล (hole) และชนิดลบ ซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอน ที่บริเวณของรอยต่อพี-เอ็นนี้ โดยธรรมชาติแล้วจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น อิทธิพลจากสนามไฟฟ้าดังกล่าว จะทำให้ประจุอิสระแยกจากกัน ถ้าหากต่อให้ครบวงจรแล้วก็ยอมที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ เพื่อที่จะให้กระแสที่ไหลนั้นมีปริมาณมากพอที่จะใช้งานได้นั้น พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นจะต้องมีขนาดใหญ่ และรับแสงได้มากที่สุด จากที่กล่าวไปข้างแล้วจะเห็นได้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์นั้น ทางหนึ่งที่ได้รับการพัฒนา ก็คือ การทำให้แสงที่ตกกระทบนั้นสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด หรือทำให้มีการสะท้อนของแสงน้อยที่สุด จึงมีการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงที่เรียกกันว่า “ชั้นลดการสะท้อน” โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไป

(anti-reflection) ชั้นลดการสะท้อนนี้ อาจทำโดยใช้สาร โปร่งแสงชนิดต่างๆ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂), ซิลิคอนมอนอกไซด์ (SiO) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นต้น การใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน เป็นกระบวนการที่ประหยัดที่สุดที่ได้โดยสะดวก จึงใช้กันกว้างขวาง และแพร่หลายทั่วไป นอกจากนี้ เพื่อให้รอยต่อได้รับพลังงานมากที่สุด รอยต่อดังกล่าวจึงจำเป็นต้องอยู่ใกล้ผิวหน้ามากที่สุดและในทางปฏิบัติแล้ว มักจะสร้างรอยต่อให้ลึกน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร (1 μm = 1 × 10⁻⁶ เมตร หรือ = 1 ในล้านเมตร)

แผ่นผลึกซิลิคอนที่สามารถจะสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้คั้นั้น ทั่วไปแล้วจะต้องมีพิสัยความต้านทานที่ต่ำกว่า 1 โอห์ม-ซม. และมีความหนาอยู่ในช่วง 200-400 ไมครอน ผิวของแผ่นผลึกที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรงงานทำออกจำหน่ายนั้นมีทั้งชนิดขัดมัน (mirrow polish) และชนิดขัดหยาบ (rush polish) แม้ว่าแบบผิวหน้าขัดมันจะสร้างได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่ราคาของแผ่นผลึกก็สูงกว่าด้วย ความจริงแล้ว โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นอยู่บนชนิดพี หรือสารกึ่งตัวนำชนิดพีอยู่บนชนิดเอ็นก็ได้ แล้วแต่แผ่นผลึกเริ่มต้น เพราะผลึกที่ทำจำหน่ายจากโรงงานนั้นมีเพียงชนิดเอ็นหรือชนิดพี ผู้สร้างจะต้องสร้างชั้นที่เหลือเอง เพราะคุณสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำของซิลิคอนบริสุทธิ์ จะมีความนำไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย การเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่นๆ ลงไปแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ความนำไฟฟ้าเปลี่ยนไปได้มาก และเช่นเดียวกัน การที่จะทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือเป็นชนิดพีนั้น ก็แล้วแต่ว่าสารเจือที่เติมลงไปนั้นเป็นอะไร ในทางปฏิบัติแล้วสารเจือชนิดเอ็น จะได้มาจากการเติมอะตอมของธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 5 เช่น ฟอสฟอรัส, สารหนู และพลวง เป็นต้น ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพีนั้น ได้มาจากการเติมอะตอมของธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 เช่น โบรอน, แกลเลียม, อินเดียม และอะลูมิเนียม เป็นต้น การเติมอะตอมสารเจือ หรือการแพร่สารเจือ นั้น จะต้องทำที่อุณหภูมิสูง และถ้าหากไม่มีสารบางอย่างเคลือบสารเจือก็จะแพร่เข้าไปในทุกส่วนของซิลิคอน การควบคุมไม่ให้อะตอมของสารเจือแพร่เข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการนั้น ทำได้โดยการสร้างชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์กั้นเอาไว้ ซึ่งการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ จะเรียกว่า การออกซิเดชัน แรกสุดซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกสร้างขึ้นมาครอบคลุมแผ่นผลึกซิลิคอนทั้งแผ่นก่อน จากนั้นโดยกระบวนการพิเศษ ที่เรียกว่า โฟโตลิโธกราฟี ซึ่งใช้สารไวแสงเคลือบ และถ่ายแบบลงคล้าย แล้วทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ซึ่งเรียกว่า เปิดช่องออกไซด์ หรือ window ทำให้สารเจือแพร่เข้าไปตามช่องที่เปิดไว้ สารเจือที่เข้าไปก็จะทำให้เกิดรอยต่อขึ้น ประจุพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงก็จะวิ่งเข้าหาขั้วโลหะ ถ้าหากขั้วโลหะถูกสร้างไว้ห่างไกลมาก ประจุที่เกิดขึ้นเหล่านี้ บางครั้งอาจจะเดินทางไปถึงขั้วโลหะก็จะเกิดการรวมตัวและหายไป เมื่อเป็นเช่นนี้ เพื่อเป็นการรวบรวมให้ได้กระแสมากที่สุด จึงนิยมสร้างขั้วโลหะให้เป็นแถบเล็กๆ ทั่วไปบน ผิวหน้า เพราะถ้าหากเป็นแถบใหญ่ๆ แล้ว แม้จะรวบรวมกระแสได้ดี แต่ก็จะไปบังแสงทำให้กระแสที่เกิดขึ้นไม่มีปริมาณมากพอ หลังจากทีแพร่สารเจือ และจับลึกลงแล้ว ก็จะเปิดช่องของซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำสวดลายขั้วโลหะ (contact grid) ทางด้านหน้า ส่วนทางด้านหลังก็จะใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบไว้ทิ้งไป ทำการเคลือบอะลูมิเนียมทั้งด้านหน้า และด้านหลังด้วยวิธีการระเหยสารในสุญญากาศ เมื่อผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแล้ว ก็จะได้สวดลายอะลูมิเนียมขั้วสัมผัส ตามที่ออกแบบไว้แต่แรก เพื่อให้อะลูมิเนียมที่สร้างขึ้น มีการสัมผัสกับซิลิคอนในลักษณะอัลลอยด์ จึงต้องนำเข้าเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 500°C ในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น 10 นาที เรียกว่า การแอนนิล (anneal) เนื่องจากว่าขั้วสัมผัสซึ่งเป็นโลหะอะลูมิเนียม นั้น แม้จะนำไฟฟ้าได้แต่ก็ไม่สามารถจะใช้ตะกั่วในการบัดกรีเพื่อต่อสายออกมาใช้งานได้ จึงต้องมีการสร้างชั้นของนิกเกิลเคลือบไปบนชั้นอะลูมิเนียมด้วยขบวนการเคมี และไม่ใช้ไฟฟ้า (เรียกว่า electroless plating) เซลล์ที่สร้างได้นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ยูทูปเห็นแล้วจะขอคืนค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าเสร็จสมบูรณ์ แต่ในการใช้งานนั้นอาจจะไม่สะดวกนัก หลังจากนั้นจึงมีการเก็บบรรจุในลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวๆ หรือเป็นแผงเซลล์ก็ได้ เซลล์แสงอาทิตย์นั้นปกติแล้ว ต่อ 1 เซลล์จะมีแรงดันประมาณ 0.5 โวลต์ ส่วนกระแสก็จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของเซลล์ การต่อเซลล์เป็นแผงนั้นก็จะมีทั้งการต่อขนานหรืออนุกรม ก็แล้วแต่จะต้องการกระแส หรือแรงดันขนาดไหน

สำหรับลำดับขั้นตอนในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จะพอสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. เลือกแผ่นผลึกตามต้องการ เช่น ชนิด ความหนา พิกัดความต้านทาน
2. ทำความสะอาดแผ่นผลึก
3. สร้างชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ครั้งแรก (first oxidation)
4. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดออกไซด์ด้านหน้า
5. แพร่สารเจือครั้งแรก (pre deposition)
6. ขับลึก และออกซิเดชัน (drive-in) ทำชั้นลดการสะท้อนแสง
7. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องทำขั้วสัมผัสโลหะ
8. เคลือบอะลูมิเนียมด้วยวิธีระเหยสารแข็งในสุญญากาศ
9. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อทำลวดลายขั้วไฟฟ้า
10. นำการแอนนีส
11. ชุบน้ำมันเคลือบขั้วไฟฟ้า
12. เก็บบรรจุ

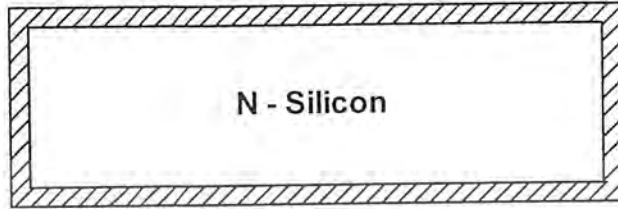
จากหัวข้อที่ 1 ถึง 12 นี้ ถ้าหากเราเขียนผังภาพตัดของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ก็จะแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งจะแสดงเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นผลึกชนิดเอ็น ถ้าหากเป็นแผ่นผลึกชนิดพีกระบวนการสร้างก็เป็นเช่นเดียวกัน จะต่างกันเฉพาะชนิดของสารเจือที่แพร่ในตอนก่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น

1. แผ่นผลึกเริ่มต้น

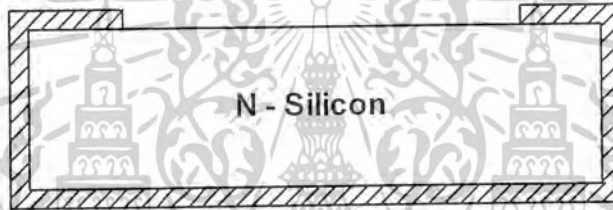
N - Silicon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

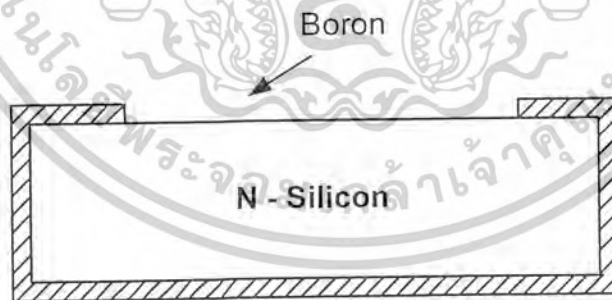
2. ออกซิเดชัน



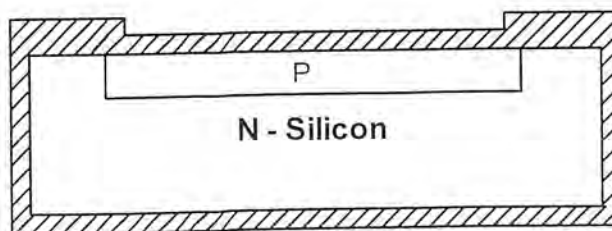
3. เปิดช่องออกไซด์ด้านหน้าเพื่อแพร่สารเจือ



4. แพร่สารเจือครั้งแรก

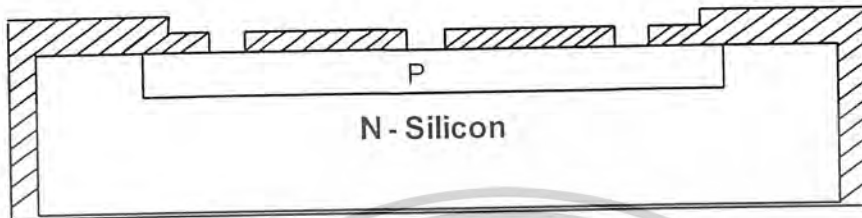


5. ขั้วลึกลงและออกซิเดชัน

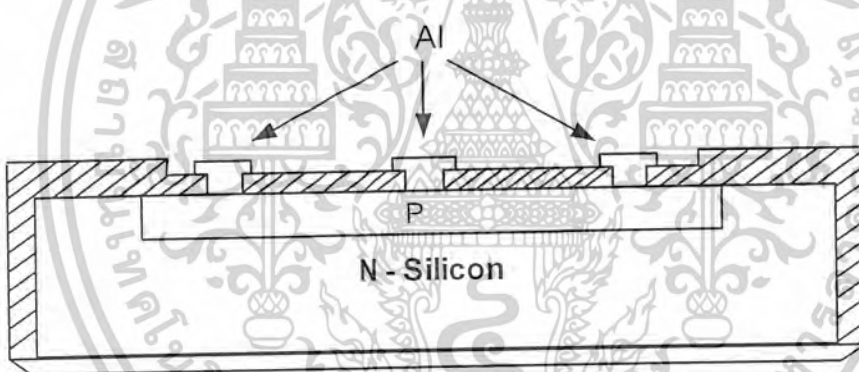


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

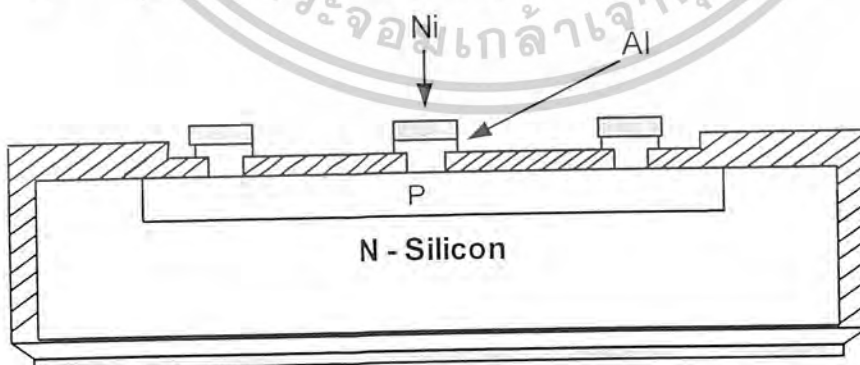
6. เปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วสัมผัสโลหะ



7. เคลือบอะลูมิเนียม, ทำสวดลาย, แอนนีสล

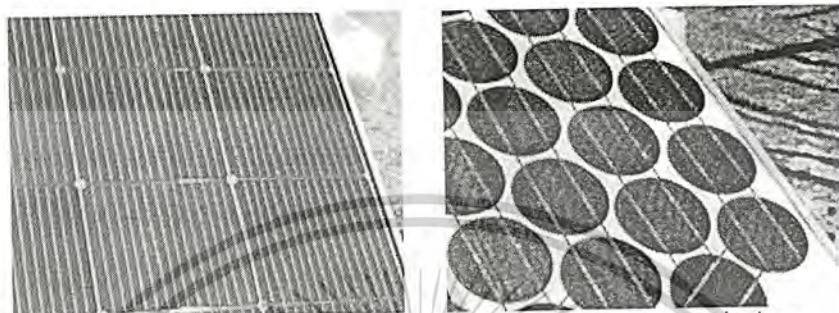


8. ชูบนิเกิล และพัฒนาที่จะเก็บบรรจุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9 เก็บบรรจุแบบเซลล์เดี่ยวๆ หรือเป็นแผงเซลล์



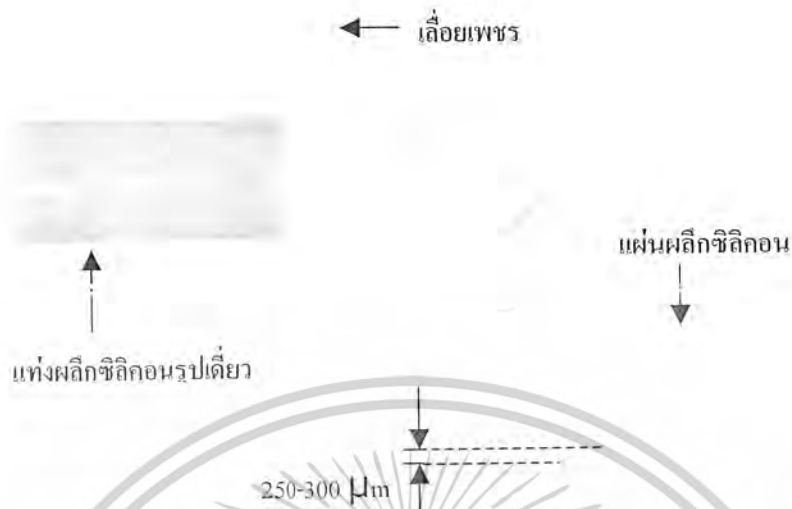
รูปที่ 3.13 การเก็บบรรจุกระบวนการมาตรฐานกระบวนการหนึ่งที่ใช้ใน

ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ชาร์ตในรูปที่ 3.13 เป็นกระบวนการมาตรฐานกระบวนการหนึ่ง ซึ่งใช้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ ในการศึกษา และพัฒนากระบวนการสร้าง พบว่า ในบางขั้นตอนสามารถจะลดลงได้ เช่น ไม่จำเป็นต้องเคลื่อนอะลูมิเนียมทางด้านหลัง และอาจจะไม่เคลื่อนอะลูมิเนียมเลยทั้ง 2 หน้าก็ได้ ที่กล่าวมาแล้วนั้นเป็นกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยสังเขปที่ทำการในห้องปฏิบัติการ ต่อไปจะได้กล่าวถึงรายละเอียดแต่พอสังเขปในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ นอกเหนือไปจากหัวข้อ การสร้างแผ่นผลึก, การแพร่สารเจือ, การสร้างขั้วไฟฟ้า และการต่อสายเก็บบรรจุเซลล์ ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในเรื่องเทคโนโลยีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนี้

เมื่อได้แท่งผลึกรูปเดี่ยว ซึ่งเรียกว่า อินกอต (Ingot) แล้ว นำแท่งผลึกรูปเดี่ยวไปตัดเป็นแผ่นผลึกบางๆ (crystal wafer) ด้วยใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษ (inside diameter) ดังแสดงในรูปที่ 3.33 ใบเลื่อยดังกล่าวนี้จะมีลักษณะเป็นวงแหวน และมีความคมอยู่ในวงชั้นใน โดยที่ใบเลื่อยจะถูกฉาบไว้ด้วยผงเพชร (diamond powder) ในการตัดผลึกจะต้องตัดให้ถูกระนาบ หรือแนวผลึก เพื่อให้มีความคมพอที่จะตัดเนื้อซิลิคอนซึ่งแข็งมากได้ เมื่อตัดเสร็จแล้วจะปรากฏรอยคมของเลื่อยขึ้นที่ผิวทั้งสองด้านของแผ่นผลึก ซึ่งรอยนี้จะกำจัดให้หมดไปโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี ($\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{CH}_3\text{COOH}$) แล้วจึงนำแผ่นผลึกที่ได้นี้ไปทำความสะอาดและขัด (Lapping) ด้วยผงขัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

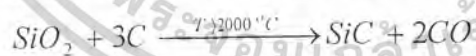


รูปที่ 3.14 ลักษณะของแผ่นผลึกรูปเตี้ย

ซึ่งพร้อมที่จะนำไปสร้างตั้งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

ในการขัด (Lapping) ผิวหน้าของแผ่นผลึก ผงขัดที่ใช้ ได้แก่ ผงเพชร, ผงโบรอนไนโตรด์, ผงซิลิกอนคาร์ไบด์, ผงอะลูมินา เป็นต้น สำหรับผงขัดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มี 2 ชนิด ดังนี้คือ

1. ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นผงที่ใช้ขัดเพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกเรียบ ซึ่งพบโดย Edward G. Acheson ในปี 1891 ผงขัดชนิดนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างทราย (SiO₂) กับคาร์บอน (C) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 2000 °C ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้า และได้ผงขัดที่มีคุณภาพไม่ดีไม่สามารถนำมาใช้ในการขัดได้ ปฏิกิริยาดังกล่าวมีสมการเคมีดังนี้



ในระหว่างที่ทรายและถ่าน (C) ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยากันในเตาไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูงจะใส่น้ำที่เดือดเข้าไปเพื่อให้ส่วนผสมเกิดรูขึ้น และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นสามารถผ่านออกไปได้ จะได้ SiC

ต่อจากนั้นนำผงขัด SiC ที่ได้ซึ่งยังคงมีขนาดใหญ่ไปบดด้วยเครื่องบด แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงคาน้ำที่มีขนาดช่องว่างแตกต่างกัน จะได้ผงขัด SiC ที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ หยาบ, ปานกลาง และละเอียด

สำหรับผงขัด SiC ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมี 4 เกรดด้วยกัน ดังนี้คือ

1. เกรด 600 ผงขัดเกรดนี้จะหยาบ คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 μ.
2. เกรด 1000 เม็ดผงขัดจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 μ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เกรด 2000 เป็นผงขัดที่ค่อนข้างละเอียด คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.9 μ .
4. เกรด 4000 เป็นผงขัด SiC ที่มีความละเอียดมากที่สุด คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง

3 μ .

2. ผงอะลูมินา (Alumina) ซึ่งก็คือ Aluminum oxide (Al_2O_3) เป็นผงขัดที่ใช้ขัดผิวผลึกที่เรียบแล้วให้เป็นมันวาวคล้ายกระจกเงา พบในปี ค.ศ. 1899 โดย Charles B. Jacobs โดยการนำเอาแร่ bauxite ซึ่งเป็นแร่อะลูมิเนียม ส่วนใหญ่ประกอบด้วย Aluminum oxide (Al_2O_3) มาหลอมละลายในเตาไฟฟ้า ซึ่งมีคาร์บอนเป็นขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว อยู่ในทิศตรงกันข้าม กระแสจากอิเล็กโทรดขั้วหนึ่งจะไปยังอีกขั้วหนึ่ง และอุณหภูมิ 3,700 $^{\circ}$ F แร่ bauxite นี้ จะละลายจะได้ Alumina ซึ่งมีขนาดใหญ่และประกอบด้วย Al_2O_3 ถึง 93-94%

ต่อจากนั้นดำเนินขั้นตอนเพื่อให้ได้ผงขัดที่มีขนาดเล็ก เช่นเดียวกับ SiC จะได้ผงขัด Alumina ที่มีขนาดต่างๆ กัน ผง Alumina ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีอยู่ด้วยกัน 2 ขนาด คือ ผงขัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 และ 0.05 μ

3.7.1 กรรมวิธีการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน

นำแผ่นผลึกซิลิคอนมาติดกับแท่น (die) ด้วยขี้ผึ้ง (Electronic-grade Wax) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงจนแผ่นผลึกติดแน่นดีแล้ว ผสมผง SiC กับน้ำบริสุทธิ์บนแผ่นกระจกให้เข้ากัน แล้วนำแผ่นซิลิคอนดังกล่าวมาขัดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขัดจนผิวหน้าแผ่นผลึกเรียบดีแล้ว จึงนำแผ่นผลึกออกจาก die แล้วนำไปทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกต่อไป

ในบางครั้งแผ่นผลึกซิลิคอน ที่มีอยู่มีขนาดหนาจนเกินไปไม่สามารถไปวางบน boat ได้ เราสามารถขัดแผ่นผลึกดังกล่าวให้บางลงได้ โดยขัดที่ด้านหลังของแผ่นผลึกด้วยผงขัด SiC

สำหรับการขัดด้วยผงขัด alumina คล้ายกับขัดด้วย SiC เพียงแต่นำแผ่นผลึกซิลิคอนไปขัดบนกระจกที่คลุมด้วยผ้าสักหลาด ส่วนขั้นตอนอื่นๆ เหมือนขัดด้วยผงขัด SiC

3.7.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดจนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอันหนึ่ง กล่าวคือ จะต้องเป็นแผ่นผลึกรูปเดี่ยว ซึ่งมีวิธีการปลูกผลึกดังที่กล่าวมาแล้ว ชนิดของสารเจือในแผ่นผลึก ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ความหนาของแผ่นผลึก และระนาบของแผ่นผลึก ในการวัดคุณสมบัติดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้ คือ

3.7.3 การวัดค่าพิสัยความต้านทาน

นอกจากระนาบ และขนาดของแผ่นเวเฟอร์ที่ถูกกำหนดขึ้นมา ตั้งแต่กระบวนการผลิตแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำแล้ว ค่าพิสัยความต้านทาน (Resistivity; ρ) ก็เช่นเดียวกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมสารเจือ (Doping) จากโรงงาน คำนี้เราต้องรู้ก่อนที่จะเริ่มกระบวนการสร้างขั้นอื่นๆ ต่อไป โดยทำการวัดจากอุปกรณ์ที่เรียกว่า “Four points probe” ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และสามารถวัดบนแผ่นผลึกได้เลย

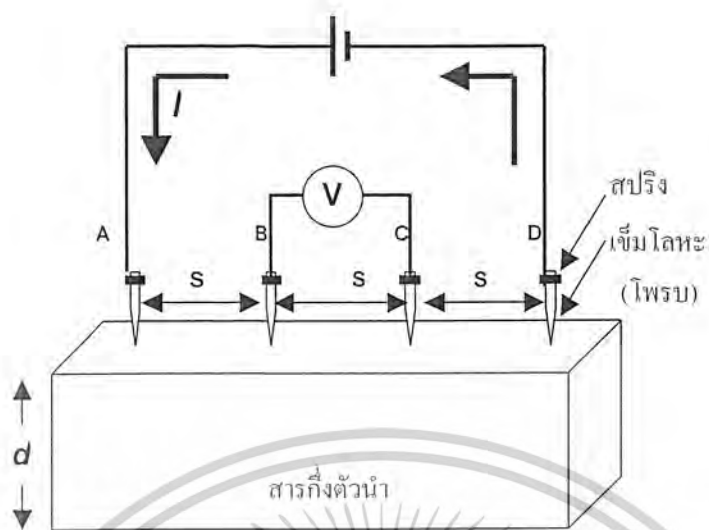
อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลม และอาจมีสปริงช่วย ทำให้ปลายของเข็มถูกกด และสามารถสัมผัสกับระนาบผิวด้านหน้าที่ขจัดมันของชั้นสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้งสี่อยู่ห่างกันเป็นระยะ S เท่าๆ กัน ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไป $S = 0.5 - 1$ มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.35 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสคงที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุด คือ เข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสาร และถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ในปัจจุบันเครื่อง Four points probe นี้ได้ทำเป็นเครื่องวัดที่มีการแสดงผลเป็นระบบตัวเลข ซึ่งแค่ใส่แผ่นเวเฟอร์เข้าไป แล้วกดปุ่มก็สามารถทราบค่าสภาพต้านทานได้ทันที เนื่องจากสภาพความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นที่ถูกแพร่สารเจือด้วย แต่เนื่องจากชั้นที่ถูกแพร่สารเจือนั้นมีขนาดบางมากๆ ราว 1-3 ไมโครเมตร จึงไม่สะดวกที่จะนำไปใช้เพื่อคำนวณ และหาพารามิเตอร์อื่นๆ ต่อ จึงนิยมที่จะบอกค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในอีกรูปแบบหนึ่งคือ “สภาพต้านทานแผ่น” (Sheet resistivity; ρ_s) มีหน่วยเป็นโอห์ม/ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นที่ถูกแพร่สารเจือ สำหรับเครื่อง Four points probe ก็มีโหมดให้เลือกโดยถ้าจะวัดแบบ Resistivity ธรรมดาจะใช้โหมด SLICE ถ้าต้องการวัด Sheet resistivity ก็ใช้โหมด SHEET โดย

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\sigma = q \cdot \mu_n \cdot n + q \cdot \mu_p \cdot p$$

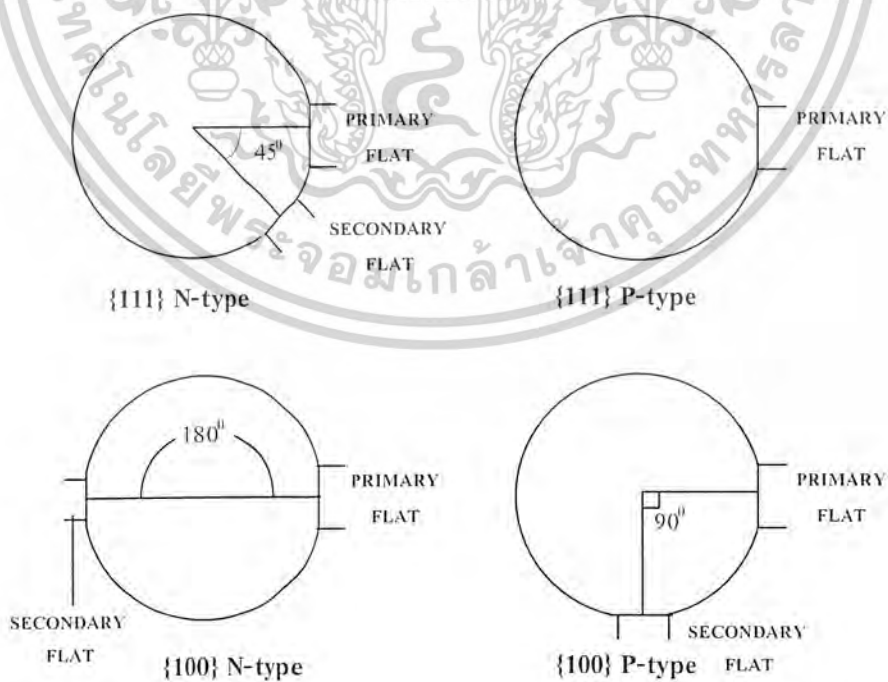
$$\rho_s = R_s \times \text{thickness}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพรบสี่โพรบ

ระนาบแต่ละแบบก็เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในแต่ละแบบ การเลือกระนาบของแผ่นผลึกซิลิคอนให้เหมาะสมกับประเภทของการเคลื่อนที่ของประจุพาหะนั้น จะทำให้การเคลื่อนที่ของประจุพาหะเป็นไปอย่างสะดวกให้ประสิทธิภาพสูงสุด และจะให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์อีกด้วย จะเห็นดังแสดงในรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.16 Identifying flats on a silicon wafer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 การทำความสะอาดผิวหน้า

1. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

เริ่มจากการนำแผ่นเวเฟอร์ไปล้างกับน้ำปลอดประจุ (Deionized water: DI) ด้วยเครื่อง Ultrasonic ซึ่งเป็นเครื่องสั่นอนุภาคของน้ำด้วยคลื่นเสียง เพื่อกำจัดสารพวกไขมันเป็นเวลา 2 นาที หรือจะเพิ่มสารเคมีจำพวก Alcohol, Acetone, Trichloroethylene, Isopropyl ล้างเพิ่มก็ได้ เมื่อเสร็จแล้วก็นำไปจุ่มน้ำ DI. อีกครั้งแล้วจึงนำไปต้มกับกรด HNO_3 ในบีกเกอร์ เพื่อกำจัดเศษโลหะ โดยจะแบ่งต้มเป็น 2 บีกเกอร์ บีกเกอร์ละ 5 นาที เพื่อความสะดวก จากนั้นจุ่มน้ำ DI. แล้วนำไปต้มในน้ำ DI. อีก 2 บีกเกอร์เช่นกัน บีกเกอร์ละ 5 นาที เพื่อกำจัดกรด จุ่มน้ำ DI. อีกครั้ง แล้วนำไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่ต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนก็เพราะ ก๊าซไนโตรเจนจะทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิคอนได้ยากกว่าอากาศธรรมดา

2. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

นำแผ่นเวเฟอร์ไปต้มใน Trichloroethylene 5 นาที แล้วนำไปทำ Ultrasonic ใน Acetone ต่ออีก 5 นาที ในขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังไม่ให้เปลวไฟหรือสะเก็ดไฟไปโดนสารเคมีทั้งสองตัวนี้ เพราะต่างเป็นสารไวไฟ จากนั้นนำไปจุ่มในน้ำ DI. อีก 2 บีกเกอร์ แล้วเป่าแห้งด้วย N_2

3. การ Slice etching

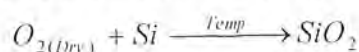
ถึงแม้แผ่นเวเฟอร์จะสะอาดจากสิ่งเจือปนแล้ว แต่แผ่นเวเฟอร์เองจะมีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมาก แต่เพื่อความเที่ยงตรงในกระบวนการสร้างจึงต้องกำจัดชั้นออกไซด์บางๆ นี้ออกไป โดยจุ่มลงในสารละลาย HF 5% 10 วินาที แล้วจุ่มในน้ำ DI. อีก 2 บีกเกอร์ และเป่าแห้งด้วย N_2

3.8 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

เป็นการสร้างชั้นของซิลิคอน ไดออกไซด์ขึ้นบนผิวของแผ่นซิลิคอน เพื่อใช้ป้องกันไม่ให้สารเจือปนเข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการขณะที่ทำการแพร่สารเจือ เพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น กระบวนการออกซิเดชันที่นิยมทำกันมี 3 วิธี คือ

3.8.1 Thermal Oxidation เป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่ง Thermal Oxidation ยังแบ่งออกได้อีกเป็น 2 วิธี คือ

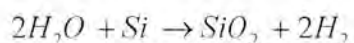
1. Dry Oxidation อุปกรณ์ที่ใช่แสดงได้ดังรูปที่ 3.37 โดยการนำแผ่นผลึกเข้าไปวางในท่อควอตซ์ที่อุณหภูมิ $800-1,200^\circ\text{C}$ และมีก๊าซออกซิเจนไหลผ่านด้วย ซิลิคอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปกคลุมผิวของแผ่นผลึก ขั้นตอนนี้แสดงได้ดังสมการ



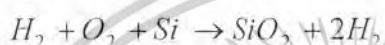
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Wet Oxidation กรรมวิธีเหมือน Dry Oxidation แต่เพิ่มความชื้นจากน้ำเข้าไปเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น ซึ่งทำได้ 3 วิธี

(ก) Stream System เป็นการเพิ่มไอน้ำเข้าไปในกระบวนการ โดยค้ำน้ำให้ได้อุณหภูมิประมาณ 90°C จะได้อิอน้ำแล้วปล่อยผ่านท่อควอตซ์ในขณะที่ออกซิเดชัน ดังรูปที่ 3.38 ชั้นตอนนี้แสดงได้ดังสมการ



(ข) Torch System (Burn Hydrogen) ใช้การปล่อยก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนเข้ารวมตัวกัน (สันดาป) แล้วจึงไปทำปฏิกิริยากับผิวแผ่นซิลิคอน แสดงได้ดังสมการ



วิธีนี้ต้องควบคุมปริมาณก๊าซไฮโดรเจนให้ดี ถ้ามากเกินไปอาจเกิดการระเบิดได้

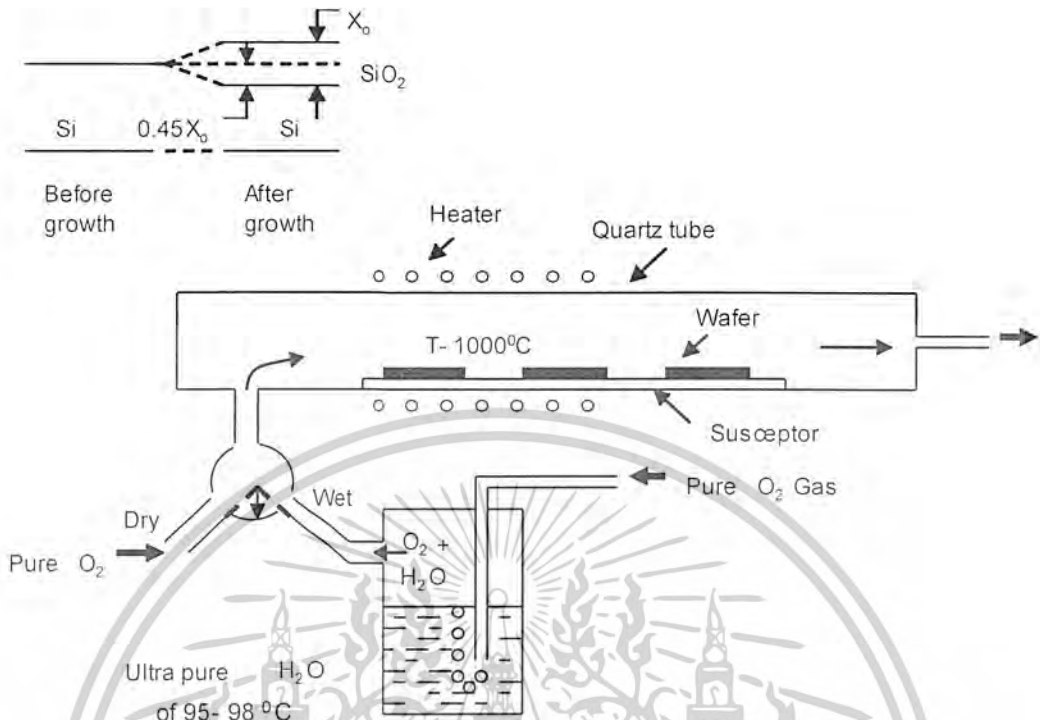
(ค) Flash System หรือ วิธีหยดน้ำ เป็นการหยดน้ำบริสุทธิ์ลงไปในช่วงแก้ว ซึ่งถูกทำให้ร้อนจนกลายเป็นไอ จากนั้นจะผ่านก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในช่วงแก้วนั้นเพื่อเป็นก๊าซพาหะ (Carrier gas) แล้วทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิคอน สมการการทำปฏิกิริยาเหมือนวิธี Stream System



อัตราการเกิดชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการ Thermal Oxidation ในช่วงแรกจะแปรผันตรงกับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้น อัตราการเกิดจะช้าลง โดยจะแปรผันตรงกับรากที่สองของเวลาแทน และโดยเฉลี่ยในความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น 54% จะเกิดขึ้นเหนือระดับผิวของแผ่นซิลิคอน ส่วนอีก 46% จะเกิดลึกลงไปจากระดับผิวของแผ่นซิลิคอน

กระบวนการ Wet Oxidation จะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ได้หนากว่าวิธี Dry Oxidation เมื่อใช้เวลาเท่ากัน เพราะโมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นแอตที่ฟอกซิเจนกับก๊าซไฮโดรเจน ทำให้อะตอมซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่คุณภาพที่ได้จาก Wet Oxidation จะด้อยกว่า คือ จะเกิดช่องว่างในชั้นออกไซด์มากกว่าวิธี Dry Oxidation ซึ่งจะกระทบต่อกระบวนการสร้างในขั้นต่อไปด้วย เช่นยากในการควบคุมความลึกในการแพร่สารเจือ ฯลฯ จึงมักใช้การออกซิเดชันแบบ Dry Oxidation ในขั้นส่วนที่สำคัญ เช่น เกท ในการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ และใช้สร้างแบบสลับชั้น Wet-Dry ในขั้นส่วนอื่นๆ

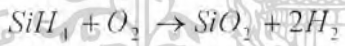
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 เครื่องมือการออกซิเดชัน แบบ Thermal Oxidation

3.8.2 Chemical Vapor Deposition Oxidation (CVD) เป็นกรรมวิธีการสร้างชั้นออกไซด์

ด้วยสารเคมี แสดงได้ดังสมการ



หรือ



กรรมวิธีนี้ สารตั้งต้นที่ใช้หายาก มีราคาแพง และยังเป็นก๊าซที่อันตรายอีกด้วย

3.9 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

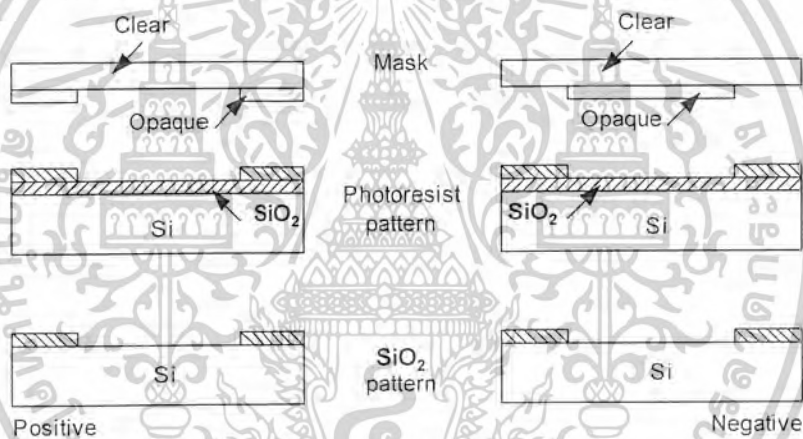
เมื่อเราได้ชั้นออกไซด์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็เป็นการสกัดหรือเปิดช่องของชั้นออกไซด์ ออกในบริเวณที่เราต้องการให้สารเจือปนวิ่งไป กระบวนการนี้นับเป็นหัวใจของกระบวนการสร้าง เลยก็ว่าได้ ขั้นตอนนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “โฟโตเอตซิง (Photo-etching)” ซึ่งกรรมวิธีต่างๆมีดังต่อไปนี้

เริ่มจากการอบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นหยดน้ำยาไวแสง (Photoresist) ซึ่งมีทั้งชนิดลบ (Way coat) หรือชนิดบวก (AZ) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ลงบนชั้นออกไซด์ ปั่นด้วย High speed spinner ดังแสดงในรูปที่ 3.19 เพื่อให้ น้ำยากระจายเป็นฟิล์มบางและสม่ำเสมอทั่วแผ่น อบแผ่นอีกครั้ง (อบฟิล์ม) แล้วจึงนำไปฉายแสงโดยมีโฟโตมาสก์บังอยู่อีกชั้นหนึ่ง ถ้าเป็นการฉายแสงตั้งแต่มาสก์ที่ 2 ขึ้นไป การปรับให้ตรงกับมาสก์ชั้นก่อนๆ เป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากรายละเอียดของงานมีขนาดที่เล็กมากๆ จึงต้องมีการปรับมาสก์ (Alignment) ผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งต้องใช้การฝึกฝนพอสมควร

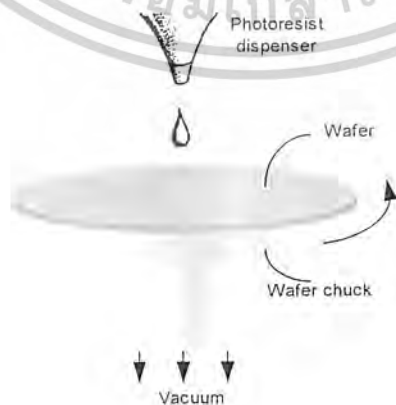
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อมาคือ การนำไปล้าง (Development) ด้วยสารเคมีต่างๆ ซึ่งถ้าน้ำยาไวแสงเป็นชนิดลบ ส่วนของน้ำยาไวแสงที่โดนแสงจะยึดติดกับผิวออกไซด์เมื่อนำไปล้าง แต่ถ้าน้ำยาไวแสงเป็นชนิดบวก ส่วนของน้ำยาไวแสงที่ไม่โดนแสงจะยึดติดกับผิวออกไซด์เมื่อนำไปล้าง ดังนั้น การจะเลือกชนิดของน้ำยาไวแสงที่ใช้งาน ก็ควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของงานที่นำไปใช้ด้วย

เคลือบฟิล์มด้านหลังของแผ่นเพื่อป้องกันชั้นออกไซด์ด้านหลังถูกทำลาย และไม่ให้มีการทำปฏิกิริยากับสารอื่น ฟิล์ม แล้วนำไปสกัดชั้นออกไซด์ออก (Oxide etching) ด้วยสารละลาย Buffer จำพวก HF (กรดกัดแก้ว) หรือ H_3PO_4 ออกไซด์ส่วนที่ถูกฟิล์มยึดเกาะเอาไว้จะไม่ถูกกัดออกไป ส่วนที่เหลือก็จะถูกกัดออกไปโดยอัตราส่วนการกัดชั้นออกไซด์ (Oxide rate) มีค่าประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ต่อนาที ภาชนะที่ใช้ต้องทำจาก “เทฟลอน” ซึ่งทนต่อสารละลายพวกนี้ เมื่อชั้นออกไซด์ถูกกัดจนเป็นที่ต้องการแล้ว ก็ต้องลอกฟิล์มออก โดยนำไปต้มกับกรด H_2SO_4 และต้มค่อน้ำ DI. เป็นขั้นตอนสุดท้าย ขั้นตอนทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.20 และตัวอย่างมาส์กแสดงดังรูปที่ 3.21

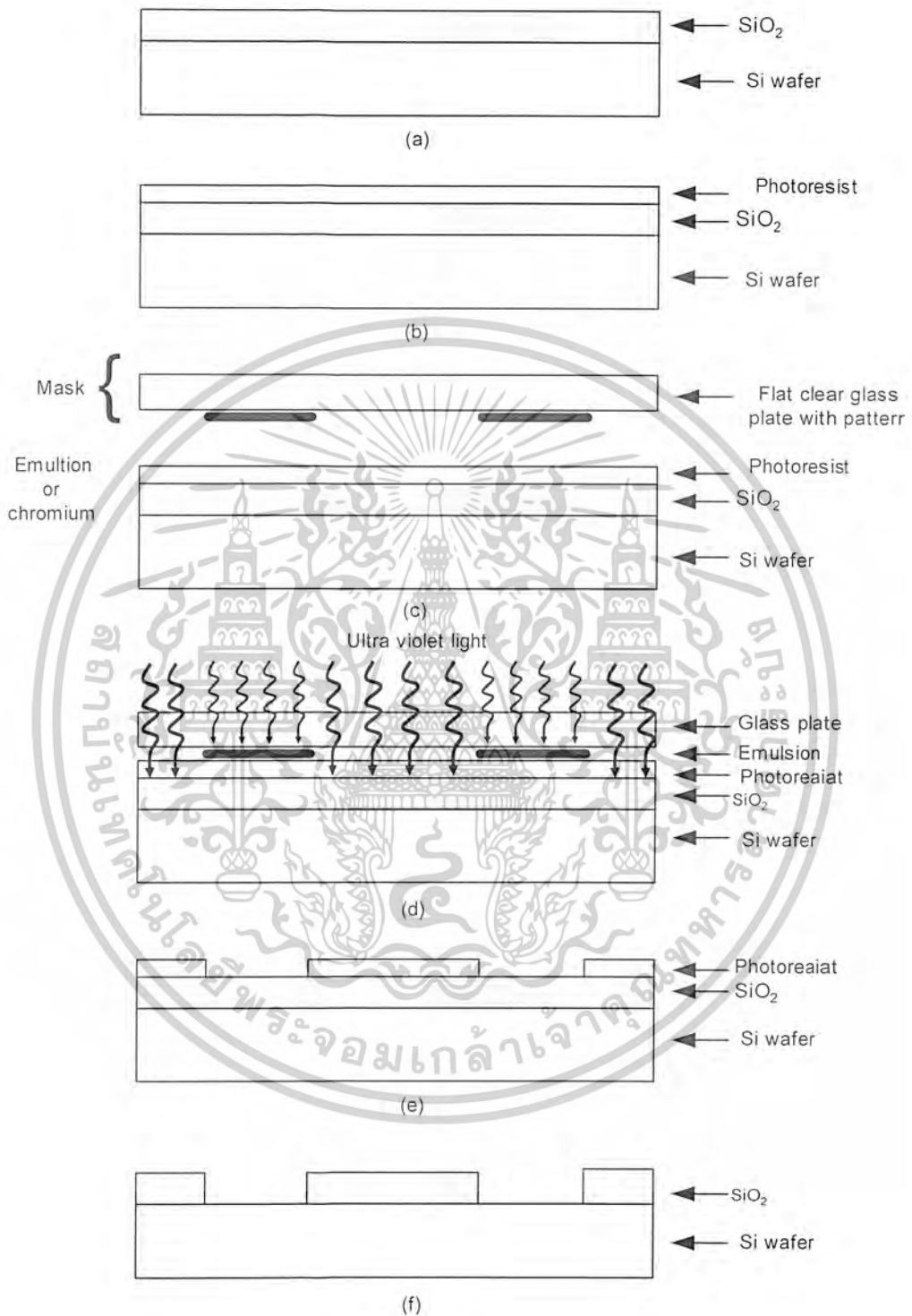


รูปที่ 3.18 น้ำยาไวแสงชนิดบวก และชนิดลบ



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ที่ทำให้ น้ำยาไวแสงกระจายสม่ำเสมอ (Photo resist spinner)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 กระบวนการ Photolithography โดยใช้ฉายาไวแสงชนิดลบ

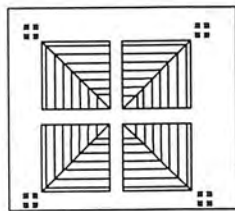
(a) growth of SiO_2 film; (b) coating with photoresist; (c) mask placed in proximity; (d) mask aligned

and brought into contact; (e) photoresist developed; (f) oxide etch and photoresist removed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สำหรับเปิดช่องออกไซด์
เพื่อแพร่สารเจือ

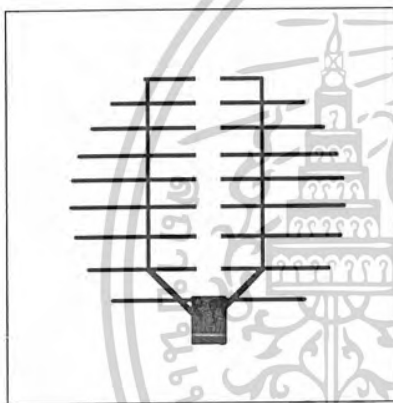


สำหรับเปิดช่องออกไซด์
เพื่อทำขั้วโลหะ

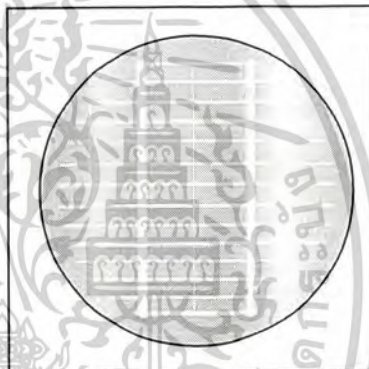


สำหรับทำลวดลาย
ขั้วโลหะ

ต้นแบบSC-1ต้นแบบชนิดบวก



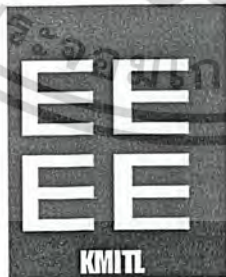
ต้นแบบ SC-2:ต้นแบบชนิดบวก
สำหรับเปิดช่องออกไซด์และทำลวดลาย
ขั้วโลหะ



ต้นแบบ SC-4:ต้นแบบชนิดลบ
สำหรับเปิดช่องออกไซด์



ชนิดลบ: ใช้เปิดช่องออกไซด์
เพื่อแพร่สารเจือ



ชนิดลบ: ใช้เปิดออกไซด์
เพื่อทำขั้วโลหะ



ชนิดบวก: ใช้ทำลวดลาย
ขั้วโลหะ

ต้นฉบับSC-3

รูปที่ 3.21 ตัวอย่างลวดลายแผ่นโฟโตมาส์กเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

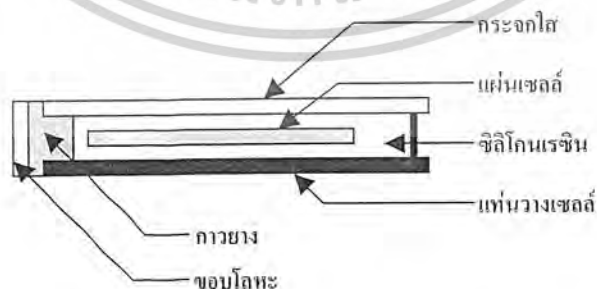
3.10 การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (Electroless nickel plating)

หลังจากที่ได้ทำการแปรสารเจือแล้ว เราจะนำเซลล์ไปชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า เพื่อสร้างชั้นโลหะให้กับเซลล์ การชุบนิเกิลนี้ไม่ต้องอาศัยผลทางไฟฟ้า แต่ใช้ผลทางความร้อนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้สะดวกในการชุบ อีกทั้งนิเกิลที่ได้ยังสามารถนำไปบัดกรีได้ง่ายอีกด้วย เมื่อได้โลหะนิเกิลติดที่ด้านหน้า และด้านหลังตามบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์เอาไว้ จากนั้นจึงนำไปทำความสะอาด และอบตะกั่วเพื่อทำให้ชั้นโลหะมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และสะดวกในการนำไปต่อสายใช้งาน

3.11 การเก็บบรรจุ

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องใช้งานกลางแจ้ง จึงต้องมีการเก็บบรรจุที่ดี เพื่อป้องกันฝุ่นละออง, ความชื้น และสารเคมี ไม่ให้เข้าไปรบกวนการทำงานของเซลล์ได้ นอกจากนี้แผงเซลล์ยังต้องมีความแข็งแรง ทนทานต่อความเสียหายทางเชิงกลที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ลูกเห็บ, นก, ของแข็งที่ตกหล่นลงมากระทบแผงเซลล์ และอื่นๆ

ในการเก็บบรรจุจะใช้แท่นวางแผ่นเซลล์ที่เป็นฉนวนไฟฟ้า มีความแข็งแรงและทนความร้อนได้ดี อาจจะใช้เป็นพวกแผ่นกระจกหรืออีพ็อกซี่ ฯลฯ แผ่นปิดด้านหน้าควรใช้กระจกใสผิวเรียบ บางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงผ่านกระจกไปกระทบเซลล์ ระหว่างกระจกด้านหน้ากับแท่นวางแผ่นเซลล์ จะเป็น ซิลิโคนเรซินแบบใส ที่มีลักษณะยืดหยุ่น ได้คล้ายยาง มีการดูดกลืนแสงน้อย ซึ่งจะช่วยป้องกันแผงเซลล์จากฝุ่นละอองและความชื้น ทั้งยังช่วยให้แผงเซลล์มีความแข็งแรงทนทานด้วย ที่บริเวณขอบแผงเซลล์จะใช้กาวยางและกรอบโลหะที่เป็นอะลูมิเนียมติดเอาไว้เพื่อกันน้ำ และเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผงเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การเก็บบรรจุเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)

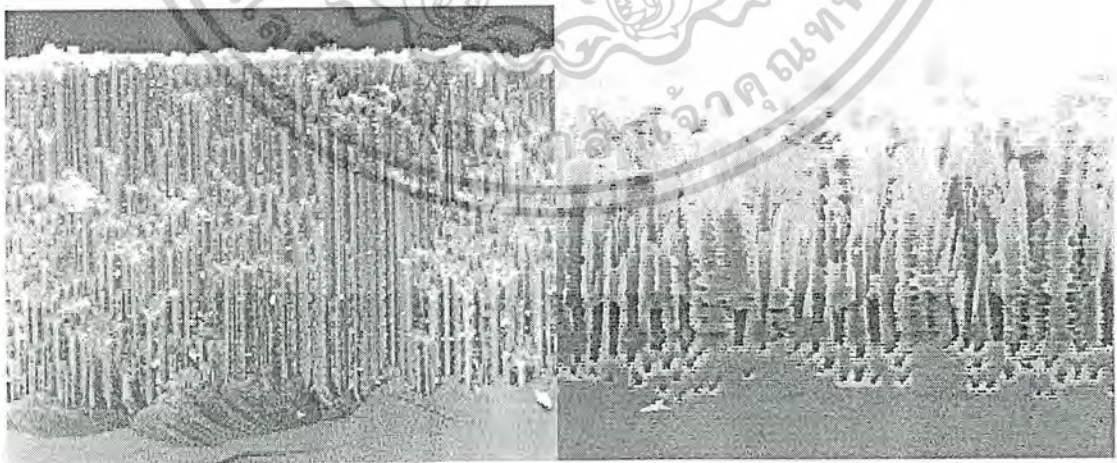
4.1 บทนำ

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

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

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

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

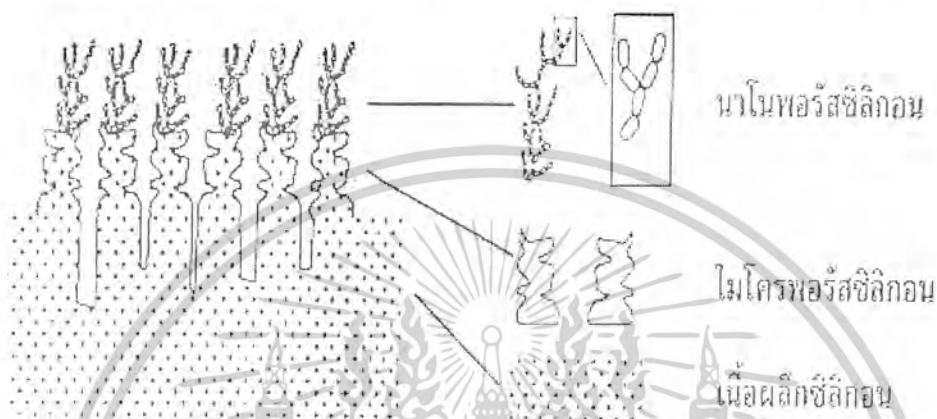


รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอน คือ ผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ อาจจะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจนถึงระดับไมโครเมตร โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน

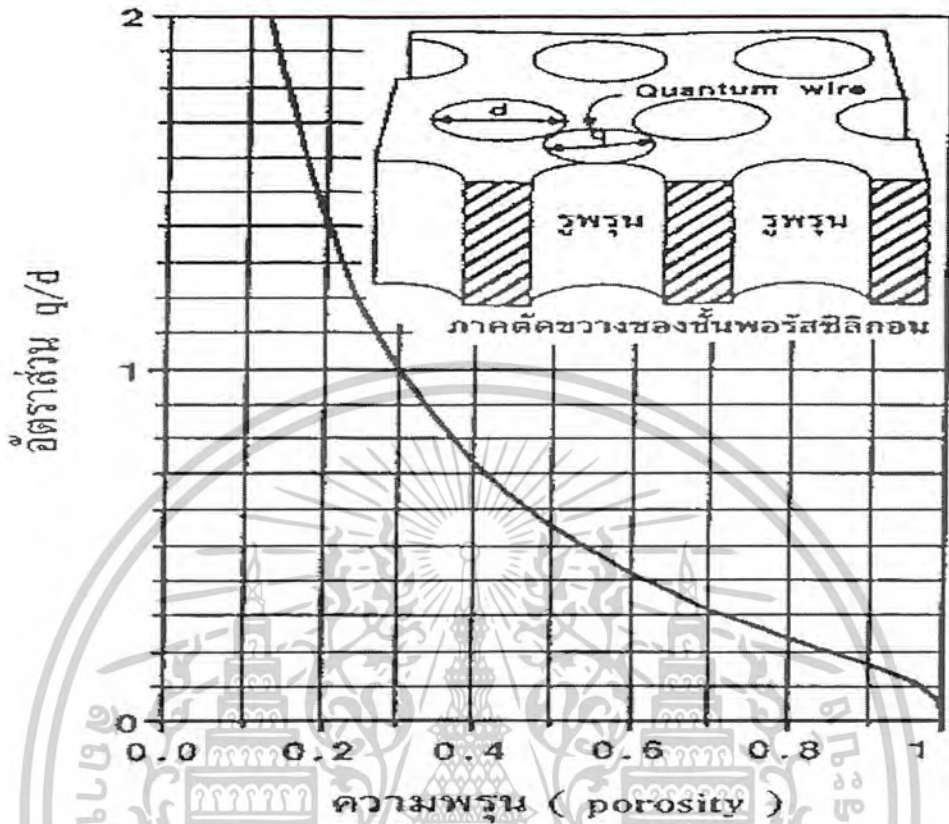
โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาค้นคว้า โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิกอนไฮไดรด์ (Si:H) หรือ ซิลิกอนออกไซด์ไฮไดรด์ (Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป

4.3 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน

วัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็ จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึง ลักษณะขนาด โครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวล หรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

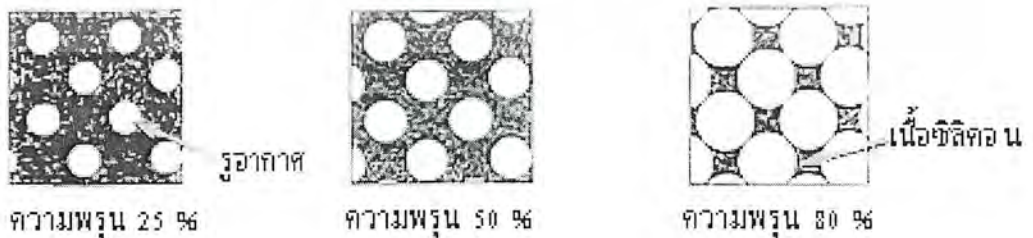
เป็นที่ทราบกันแล้วว่าพอร์สซิลิกอนนั้นก็คือ ผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก จำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอนที่เหลื่อ และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตร กับขนาดของ รูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์ซิลิคอน

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์ซิลิคอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้พอร์ซิลิคอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงใน รูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์ซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การแบ่งประเภทของพอร์สซิติคอน

4.4.1 แบ่งตามขนาดของแท่งพอร์ส

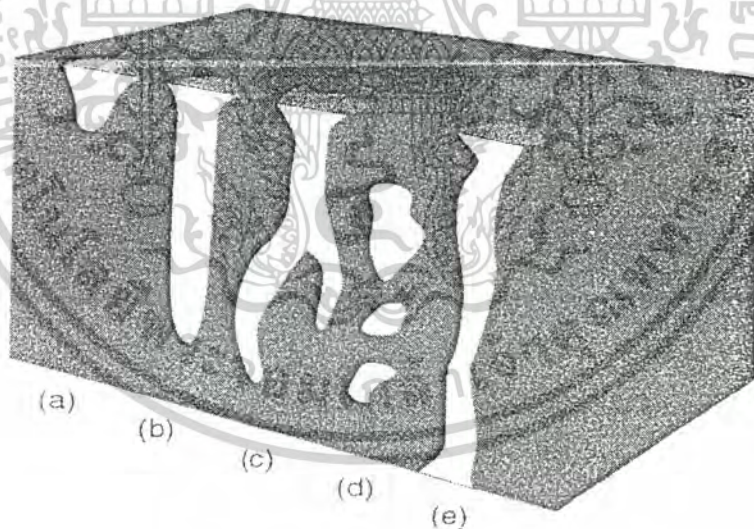
พอร์สซิติคอนสามารถถูกแบ่งได้ตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งของพอร์สได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

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

4.4.2 แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะของรูพรุนของพอร์สมีหลายลักษณะ แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. Saccate หรือ Blind มีลักษณะเป็นรูตันและไม่มีกรแยกของรูพรุน
2. Interconnected หรือ Banchad มีลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกหรือเชื่อมต่อของรู
3. Closed หรือ Totally Isolated มีลักษณะเป็นโพรงอากาศที่ปิดทุกด้าน
4. Through มีลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกทั้งสองด้าน



รูปที่ 4.5 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิติคอนลักษณะต่าง ๆ

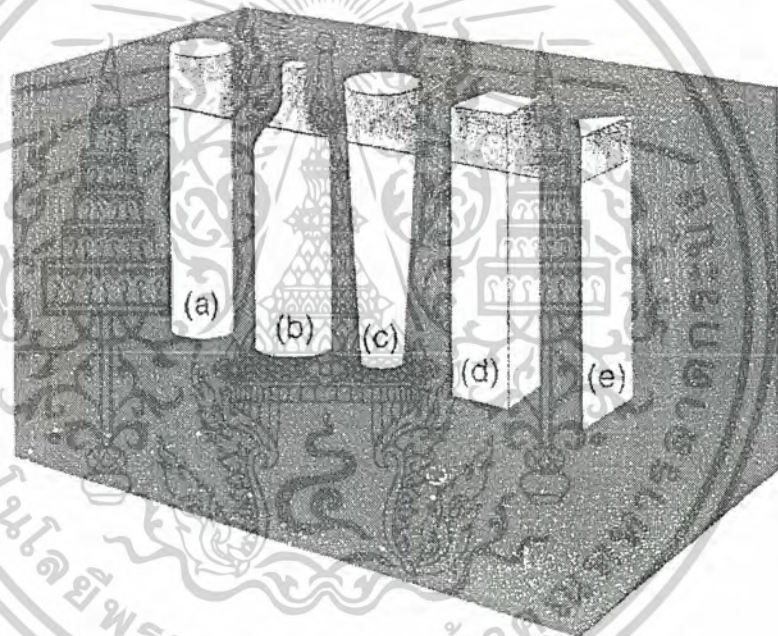
ซึ่งลักษณะของแท่งพอร์สที่แตกต่างกันสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูพรุนของพอร์สซิติคอนนอกจากขนาดและลักษณะที่แตกต่างกันแล้วยังมีรูปร่างได้หลายแบบ โดยรูปร่างของรูพรุนที่พบส่วนใหญ่มีอยู่ 5 แบบ ได้แก่

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

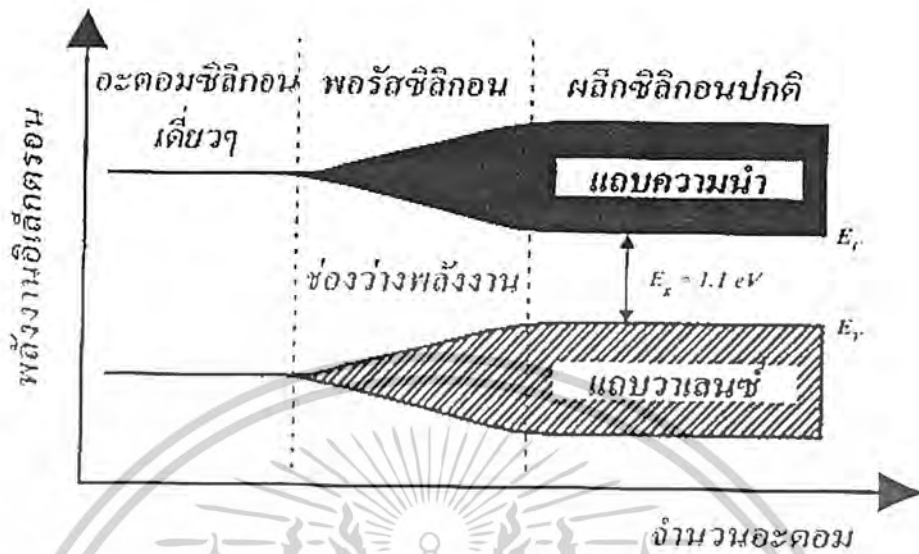


รูปที่ 4.6 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิติคอนรูปร่างต่าง ๆ

4.5 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิติคอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิติคอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการหลอมละลายกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้การแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะนำไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิติคอนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้น สามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาด โครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะ โครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect

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

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

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์ซซิลิกอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์ซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์สซิติคอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิติคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้าง นาโนเมตรของพอร์สซิติคอน

4.6 พุทธิกรรมทางแสง

4.6.1 พุทธิกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

วิธีการที่จะศึกษาถึงขนาด หรือลักษณะของช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state ให้ได้ผลดีที่สุด ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เพราะว่าการดูดกลืนแสงก็ดี หรือการเปล่งแสงก็ดี เกิดจากควรรที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานใดๆ มีการดูดกลืนแสง แล้วคายแสงออกมา เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานซึ่งค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงาน โฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมานั่นเอง

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

การเปล่งแสงในลักษณะโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการกระตุ้นพาหะอิเล็กตรอนด้วยวิธีการส่องแสง (Excitation by light) จนพาหะอิเล็กตรอนมีพลังงานมากเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบความนำได้ แต่เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนเหล่านี้มีความไม่เสถียรในสถานะใหม่นี้ ดังนั้นจึงต้องตกกลับมาอยู่ในสถานะเดิมโดยจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง ซึ่งค่าพลังงานที่ปล่อยออกมานี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องกระโดดมารวมตัวกับโฮล โดยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (E) กับความยาวคลื่นของแสง (λ) เป็นดังนี้คือ

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.1)$$

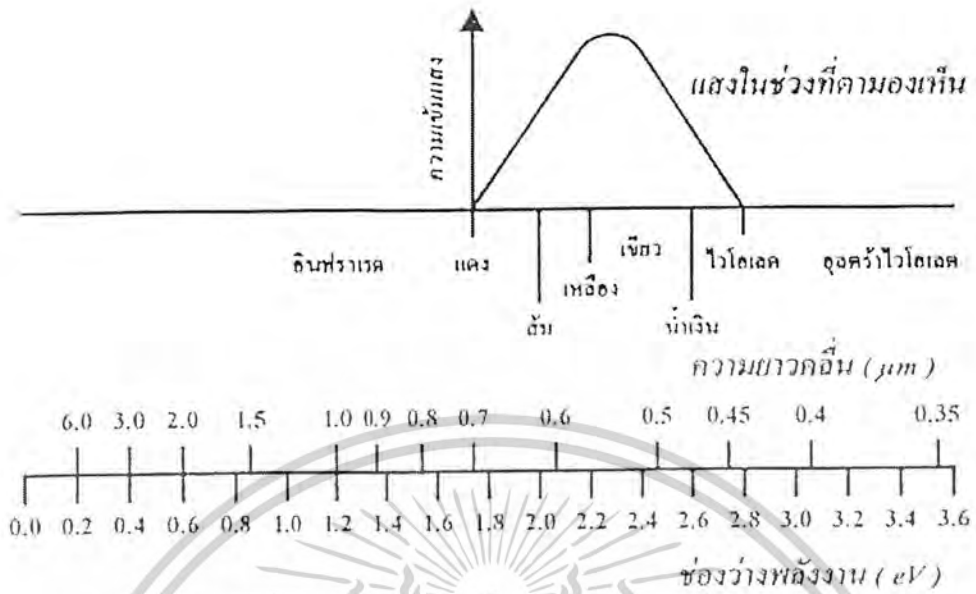
โดยที่ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์ $= 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$

c เป็นความเร็วแสง $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{1240}{E} (\text{eV}) \quad (4.2)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า การที่แสงที่เปล่งออกมาจะมีความยาวยาวคลื่นหรือสีต่างๆ ได้นั้น ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่คายออกมานั่นเอง โดยสีของของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

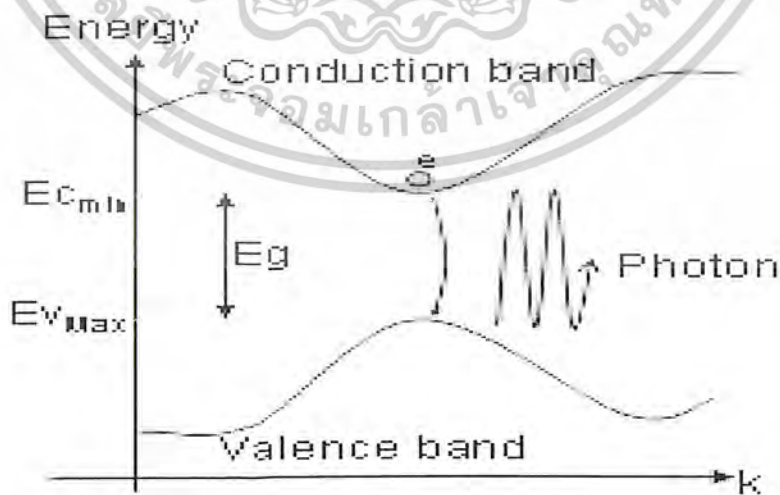


รูปที่ 4.8 แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ

4.6.2 พฤติกรรมทางแสงของผลึกซิลิคอน

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่แถบพลังงานหนึ่ง ในลักษณะที่มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการดูดกลืนแสงและค่าความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้น จะต้องเท่ากับพลังงานโฟตอนของแสงที่เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งกฎนี้จะถูก เรียกว่า กฎการอนุรักษ์พลังงาน นอกจากนี้แล้วยังมีกฎที่อนุรักษ์โมเมนตัมอีกด้วย

โดยในวัสดุที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ Direct band gap ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ ค่า wave number (k) ก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะจะไม่มีเปลี่ยนแปลงแต่อย่างไร ทั้งนี้เนื่องจาก ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ดังนั้น จึงทำให้ในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการ ดูดกลืนแสง ค่าโมเมนตัม ($\hbar k$) ของอิเล็กตรอนทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่เสมอ เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนี้ คือ

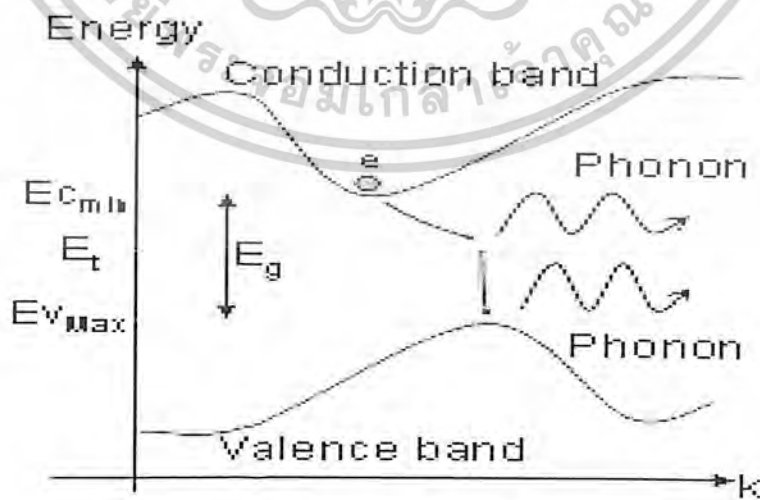
$$k_1 - k_2 = 0 \quad : \text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad (4.3)$$

$$E_1 - E_2 = h\nu \quad : \text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน} \quad (4.4)$$

- โดยที่
- k_1 = เป็น wave number ของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
 - k_2 = เป็น wave number ของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ
 - E_1 = เป็น พลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
 - E_2 = เป็น พลังงานของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ

เมื่ออิเล็กตรอนที่ขึ้น ไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (E_2) กลับลงมาสู่ในสถานะเดิม (E_1) ก็จะมีการคายพลังงานออกมามีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสองสถานะ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานแต่อย่างใด ทำให้วัสดุที่มี โครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะเช่นนี้ จึงมีคุณสมบัติทางแสงที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสงกันมา ดังตัวอย่างเช่น GaAs เป็นต้น

แต่สำหรับผลึกซิลิคอนแล้ว กลับมีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ Indirect and gap ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่าระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ทำให้ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำได้นั้น จะต้องอาศัยการรับหรือคายพลังงานโฟนอน (E_p) ให้กับอะตอมในโครงผลึก ซึ่งการรับหรือคายพลังงานของโฟนอนนี้จะช่วยให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ

$$k_2 = k_1 \pm k_p \quad : \text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad (4.5)$$

$$E_2 - E_1 = h\nu \pm E_p \quad : \text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน} \quad (4.6)$$

โดยที่

E_p เป็นพลังงานของโฟนอน

k_p เป็น wave number ของโฟนอน

เครื่องหมายบวก (+) เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงาน (E_p) หรือโมเมนตัม ($h k_p$) จากโฟนอน ส่วนเครื่องหมายลบ (-) เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนคายพลังงานหรือโมเมนตัมให้แก่โฟนอน

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าผลึกซิลิคอนหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะนี้ เมื่ออิเล็กตรอนมีการดูดหรือคายพลังงาน จะมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปเพื่อทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงผลึก (โฟนอน) ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้ผลึกซิลิคอนจึงมีคุณสมบัติทางแสงที่ไม่เหมาะสมสำหรับที่จะนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง

4.6.3 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

กลไกในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอน

จากลักษณะ โครงสร้าง และส่วนประกอบของพอร์สซิลิคอน หลากๆกลุ่มวิจัยทั่วโลกเชื่อว่าคุณสมบัติของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน คือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect ขึ้น ภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอน ทำให้อินเตอร์แวกซ์ของแถบพลังงานของนาโนพอร์ส

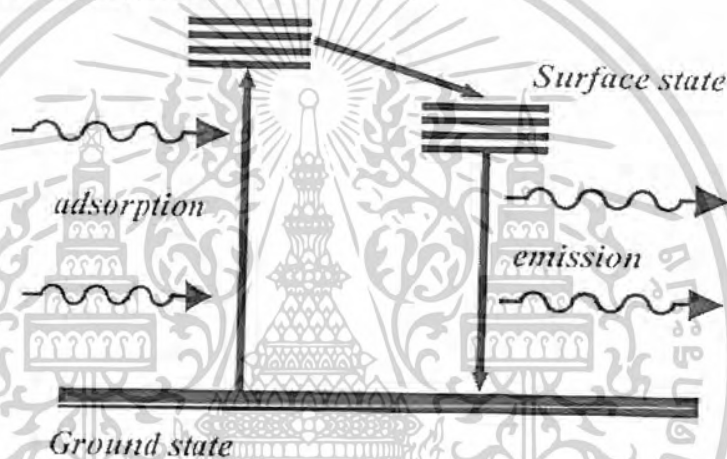
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิลิคอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกชิลิคอน

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สชิลิคอน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สชิลิคอนนั่นเอง

จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้เอง ทำให้เราสามารถทำการอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สชิลิคอน ได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescent state model) ดังแสดงในรูปที่ 4.11

Quantum confinement state



รูปที่ 4.11 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สชิลิคอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดยสถานะแรกนั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอร์สชิลิคอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ quantum confinement effect หรือ quantum effect ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอร์สชิลิคอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สชิลิคอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลของการที่ช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานในนาโนพอร์สชิลิคอนนี้เอง จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับ โฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เองอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 คุณสมบัติของพอร์สซีลิกอน

พอร์สซีลิกอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลากหลายอย่าง ตัวอย่างเช่น

คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์สซีลิกอน

พอร์สซีลิกอนมีลักษณะที่แข็ง เปราะ มีรูปทรงมากมาย มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพอร์สซีลิกอน

พอร์สซีลิกอนมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าซิลิกอนทำให้มีความต้านทานมากกว่าซิลิกอน สามารถสร้างเป็นสารDielectric พอร์สซีลิกอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิกอน พอร์สซีลิกอนสามารถเปล่งแสงได้จากการให้พลังงานไฟฟ้า (Electroluminescence) หรือแสง (Photoluminescence)

จุดที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับพอร์สซีลิกอนก็คือคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้สามารถควบคุมได้จากลักษณะโครงสร้างของพอร์สซีลิกอนซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างนั่นเอง และเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของพอร์สซีลิกอนนี้เองทำให้พอร์สซีลิกอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย ดังที่จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอน

เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติหลายอย่างที่โดดเด่น และมีคุณสมบัติทางวัสดุที่น่าสนใจ ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับซิลิคอนทั่วไป ทำให้พอร์สซิลิคอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย และถูกคาดหวังว่าจะเป็นตัวทำให้เทคโนโลยีของซิลิคอนมีความสมบูรณ์ขึ้นในอนาคต

5.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์

(Applications of Porous Silicon in Photovoltaics)

โดยธรรมชาติพอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าในชั้นสารซิลิคอน ดังนั้นจึงนำมาประยุกต์สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่ง พิล์มบางของพอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับค่าความพรุนซึ่งอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 1.25 ถึง 3 ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในช่วงกว้างศักยภาพของพอร์สซิลิคอนในการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

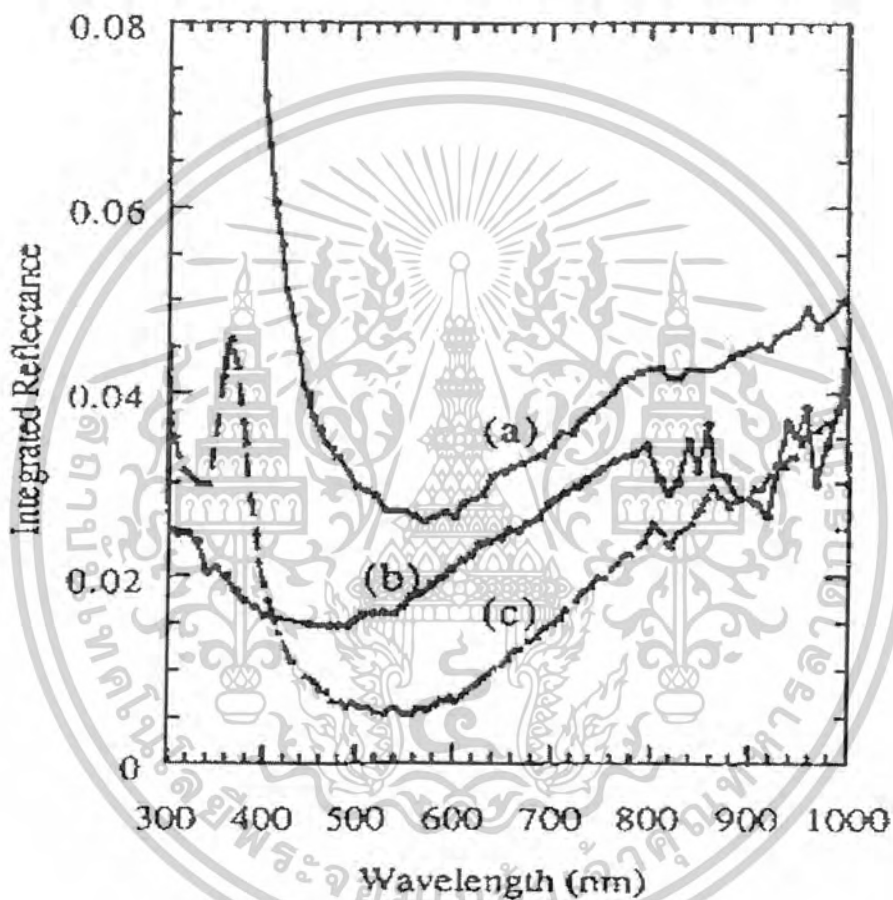
(Potential Porous Silicon Applications in Photovoltaics)

ศักยภาพที่ได้เปรียบในการนำพอร์สซิลิคอนมาใช้ในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย

1. การสะท้อนแสง (Integrated Reflectance) โครงสร้างที่เป็นพื้นผิวขรุขระอย่างมากของพอร์สซิลิคอน จะช่วยเพิ่มพื้นที่การรับแสง (light trapping) ในเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นฟิล์มพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นเป็นชั้นป้องกันการสะท้อน จะมีการสะท้อนแสงน้อยกว่าการใช้สารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการกัดผิวหน้าของผลึกซิลิคอนระนาบ (100) มาก อีกทั้งยังดีกว่าการใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (Antireflection coating: ARC) ซึ่งการใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงนิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน การสะท้อนแสงของพอร์สซิลิคอนได้ถูกนำมาเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 5.1 เพื่อให้เห็นถึงชั้นลดการสะท้อนแสง (AR) บนพื้นผิวซิลิคอนที่ดีที่สุด ซึ่งได้จากการปกคลุมผิวหน้าของซิลิคอนด้วย ชั้นลดการสะท้อนแสงถึง 2 ชั้น ประกอบไปด้วย MgF_2 หนา 90 นาโนเมตร ($n = 1.38$) และ ZnS หนา 53 นาโนเมตร ($n = 2.3$) แต่ที่น่าสังเกตคือ การกัดผิวหน้าด้วยสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สามารถกระทำได้ดีกับผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีระนาบ (100) เท่านั้น ในขณะที่พอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้ในผิวหน้าของผลึกเดี่ยวของซิลิคอนไม่ว่าระนาบใดก็ได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างได้ในผลึกหลายรูป

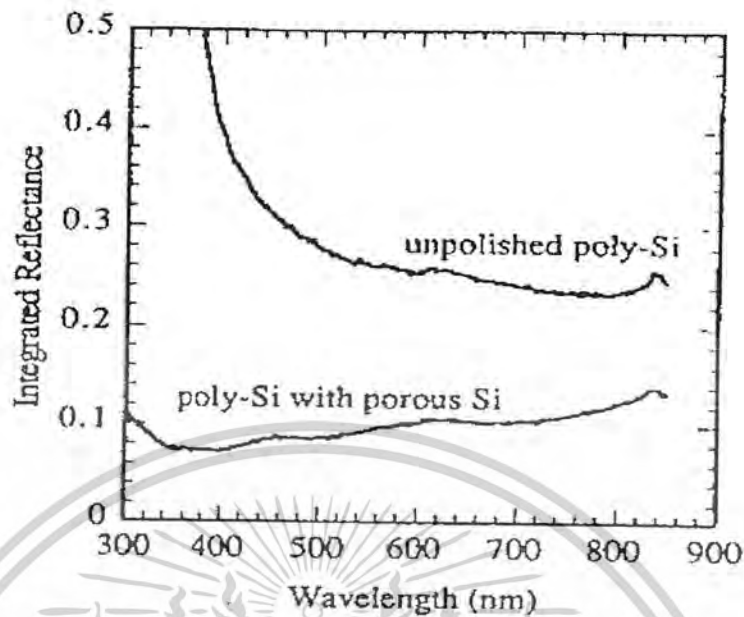
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของซิลิคอนด้วย ดังรูปที่ 5.2 เปรียบเทียบการสะท้อนแสงของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างบนผลึกหลายรูปของซิลิคอน ดังนั้นเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่า การสร้างพอร์ซซิลิคอนที่ผิวหน้าในผลึกของซิลิคอนจะมีการสะท้อนแสงเทียบได้กับวิธีการกัดผิวหน้าวิธีอื่นๆที่มีความซับซ้อนมากกว่า และพอร์ซซิลิคอนสามารถสร้างได้ง่ายไม่ซับซ้อนมีข้อจำกัดน้อยและราคาถูกกว่าการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงที่ซับซ้อน



รูปที่ 5.1 The integrated reflectance spectra of (a) KOH-textured Si with a SiO_2 AR coating, (b) a porous-Si-textured Si, and (c) KOH-textured Si with an additional double-layer AR coating.

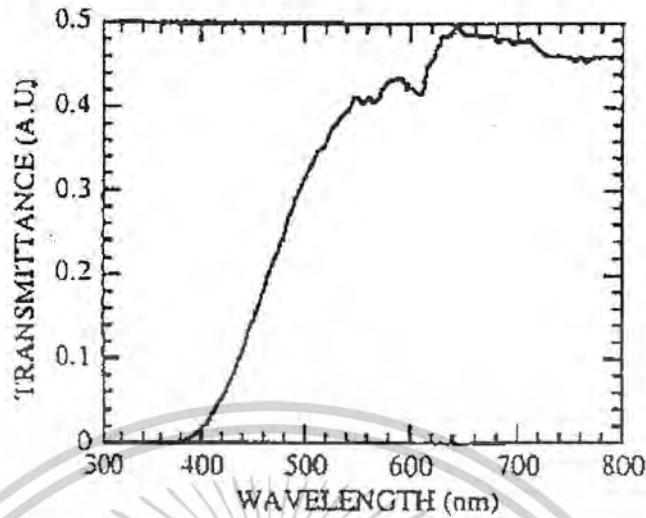
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 The reflectance spectra of an unpolished polycrystalline Si wafer and a porous-Si-etched polycrystalline Si wafer

2. คุณสมบัติการดูดกลืนแสง (Absorption property) และคุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์สซิลิคอน (light-emission property) สามารถปรับแต่งได้ในช่วงที่กว้าง รูปที่ 5.3 แสดงถึงการวัดคุณสมบัติการส่งผ่านของพอร์สซิลิคอน (porous Si transmission) และเนื่องจากขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงาน (bandgap) ในพอร์สซิลิคอนสามารถปรับได้ จึงเหมาะสมในการหาจุดสมดุลในการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอน จะมีการตอบสนองทางแสงอย่างมากในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1000 นาโนเมตร จากทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดความกว้างช่องว่างพลังงานของชั้นดูดกลืนแสงประมาณ 1.5 อิเล็กตรอน โวลต์ จะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานสูงที่สุด ซึ่งขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานนี้อยู่ในช่วงที่ขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานในพอร์สซิลิคอนสามารถสร้างขึ้นได้ เนื่องจากการขยายได้ของขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานในพอร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้ พอร์สซิลิคอนเป็นวัสดุทางอุดมคติสำหรับชั้นรอยต่อบนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือใช้เป็นตัวดูดกลืนแสงที่ส่วนบนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 Optical transmission of a porous Si film

3. คุณสมบัติโฟโตนิกส์ของพอร์สซิลิคอนจะช่วยเปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และแสงสีน้ำเงิน (blue light) ให้เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน ในเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอน
4. พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นซิลิคอนที่ปลูกผลึกด้วยวิธีโซคราลสกี (Czochralski-grown) จะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวรับอะตอมแปลกปลอมภายนอก หรืออีกนัยหนึ่งจะเป็นศูนย์กลางของสิ่งแปลกปลอมที่มารวมสะสมและทำการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิสูงไม่ให้แพร่กระจาย ซึ่งคุณสมบัตินี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากผลึกซิลิคอนให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นมีหลายขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง
5. ความง่าย และศักยภาพของการสร้างพอร์สซิลิคอนในพื้นที่ขนาดใหญ่ ภายใต้กระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี จะช่วยให้พอร์สซิลิคอนเป็นเทคนิคที่เหมาะสมมากในการประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ดี ยังมีปัญหาบางประการที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอร์สซิลิคอนใน โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ การที่พอร์สซิลิคอนมีสภาพต้านทานสูง (high resistivity) และกลไกการส่งผ่านของประจุพาหะในพอร์สซิลิคอน (charge carrier transport mechanisms of porous Si) ทำให้ยากต่อการออกแบบโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง โดยใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นดูดกลืนแสง (light-absorbing layer) อีกทั้งกระบวนการแพร่สารเจือ (Dopant diffusion process) และกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process) ในกระบวนการสร้างเซลล์อาทิตย์ของซิลิคอนต้องการอุณหภูมิที่สูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

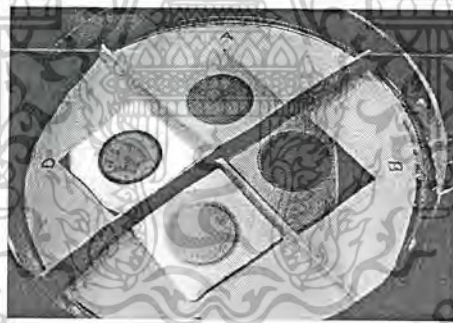
มากกว่า 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มากกว่าอุณหภูมิที่ทำให้คุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์ซเซิลิกอนหมดสภาพไป

5.2 อุปกรณ์ทางแสง (Optical)

พอร์ซเซิลิกอนเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจในการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติทางด้านแสง เนื่องจากพอร์ซเซิลิกอนสามารถเรืองแสงได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพอร์ซเซิลิกอนสร้างจากกระบวนการกัดแบบไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีประจุโพลที่เป็นตัวกำหนดขนาดของแท่งพอร์สให้แตกต่างกัน

จากขนาดของแท่งพอร์สที่แตกต่างกันนั้น ทำให้พอร์ซเซิลิกอนมีคุณสมบัติในการเรืองแสงได้ในช่วงกว้าง เราจึงสามารถควบคุมค่าความยาวคลื่น และความกว้างของสเปกตรัมของแสงได้ เพื่อนำมาประยุกต์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

แสงที่เปล่งออกมาจากพอร์ซเซิลิกอนนั้น ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งแสงที่เปล่งออกมามีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการเพิ่มหรือลดค่าความพรุนทำให้ค่าความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาเปลี่ยน รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างของพอร์ซเซิลิกอนที่มีค่าความพรุน 70-80 เปอร์เซ็นต์ จะเรืองแสงสีน้ำเงินเขียว ในขณะที่แผ่นที่มีค่าความพรุน 40 เปอร์เซ็นต์เรืองแสงสีแดง



รูปที่ 5.4 แสดงพอร์ซเซิลิกอนที่มีขนาดความพรุนต่าง ๆ กัน ที่ค่าความพรุนต่างกัน จะเรืองแสงที่ต่างกันด้วย

5.3 งานทางการแพทย์ (Biomedical)

ได้มีการนำพอร์ซเซิลิกอนไปใช้ในงานทางการแพทย์ตั้งแต่ในรายที่กระดูกหักจนกระทั่งในรายที่เป็นมะเร็ง ฟลูออโรซเซิลิกอนมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร จึงสามารถเข้าไปในร่างกายและถอดออกมาได้โดยร่างกายไม่ต่อต้าน และสามารถละลายได้โดยไม่ทำให้เกิดอันตราย

ซีพซีลิกอนนั้นสามารถเข้าไปในร่างกายได้ เช่น เข้าไปในส่วนหูชั้นใน (Cochlear) ซึ่งสามารถเปลี่ยนสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งผ่านไปยังสมองโดยตรงแต่จะต้องมีระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันจากกล้ามเนื้อ และเลือด พอร์สซิลิคอนที่ไม่ต้องการการปกป้องนั้นสามารถที่จะเข้าไปในส่วนที่พิการ และ โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์และทำให้ยาสชนิดต่าง ๆ มีผลภายในร่างกายโดยอัตโนมัติ

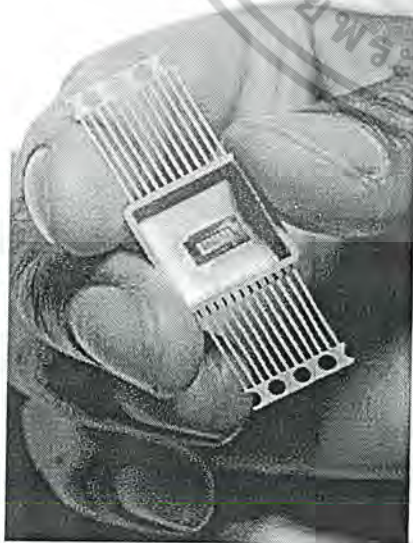
พอร์สซิลิคอนที่ฉีดเข้าไปนั้นจะอยู่ชั่วคราวและทำการรักษาให้ยาและละลายโดยไม่มีอะไรเหลือ ซึ่งเราสามารถที่จะบรรจุและระบบคำนวณตัวเล็ก ๆ เข้าไปเพื่อควบคุมเวลาและปริมาณ นอกจากนี้ยังสามารถฝังเข้าไปในตัวคนไข้และส่งผ่านข้อมูลมาที่แพทย์ได้โดยไม่ต้องมาตรวจ

การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์อื่น ๆ เช่น เป็นวัสดุที่สะท้อนและกันน้ำย่อยได้ หรือ ฝังซิลิคอนไปที่ผิวเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านเคมีเพื่อตรวจสอบอาการมะเร็งจากเลือด เนื่องจากสามารถตรวจสอบเลือด และชี้ตำแหน่งที่เกิดเนื้องอก หรือทำเป็นยาเม็ดที่ผ่านไปยังท้อง โดยปราศจากการถูกกักร่อนและส่งผ่านยาไปยังลำไส้ใหญ่ได้โดยตรง

5.4 เครื่องตรวจจับ (Sensor)

พอร์สซิลิคอนนั้นนิยมนำไปทำเป็นเครื่องตรวจจับก๊าซ และความชื้น

จากการที่พอร์สซิลิคอนมีอัตราส่วน ว่างระหว่าง พื้นที่ผิว และ ปริมาตรมาก (มากกว่า $500 \text{ m}^2/\text{cm}^3$) ดังนั้นจึงสามารถที่จะดูดกลืนโมเลกุลต่าง ๆ ที่ที่ผิว เมื่อ โมเลกุลเหล่านั้นมากระทบ จะทำให้คุณสมบัติเปลี่ยน เช่น ประสิทธิภาพในการเรืองแสงลดลงเมื่ออยู่ในสารเคมีที่ต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของโมเลกุลนั้น ๆ เช่นเดียวกับ ผลของค่าคงที่ dielectric และค่าความนำ เมื่อผิวหน้าของพอร์สซิลิคอนเต็มไปด้วยโมเลกุลต่าง ๆ จึงนำหลักการของค่าความนำและความจุเหล่านี้มาเป็นพื้นฐาน ในการสร้างเครื่องตรวจจับความชื้นที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความนำและค่าคงที่ dielectric เมื่อได้รับความชื้นที่ผิวหน้า



รูปที่ 5.5 เครื่องตรวจจับกลูโคส โดยใช้พอร์สซิลิคอน ต่อจิวด้วยทองคำรูปก้างปลาเพื่อที่จะทำให้เกิดแสงเหนี่ยวนำโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และได้พบว่าในการเคลือบทางไฟฟ้าด้วย copper sulphide ลงบนโครงสร้างพอร์ซเซลิคอน สามารถตรวจจับก๊าซแอมโมเนียได้ไวกว่าชั้นออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำและฟิล์มที่สร้างจาก cuprous sulphide ที่ใช้โดยทั่วไปซึ่งได้นำมาเป็นเทคนิคในการตอบสนองต่อโมเลกุลอื่น ๆ

ข้อดีของพอร์ซเซลิคอน คือ สามารถสร้างได้ง่าย สามารถดัดแปลงไปใช้ในโรงงานทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาการกัดและการออกซิไดซ์ และสร้างรูปแบบ (Pattern) โดยวิธีการโฟโตลิโทกราฟี ซึ่งสามารถสร้างได้ง่ายและนำมาสร้างเป็นเครื่องตรวจจับหลายชนิดได้ในอุปกรณ์ตัวเดียวและอุปกรณ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งได้

5.4.1 เครื่องตรวจจับความชื้น

เครื่องตรวจจับที่มีใช้อยู่ในนั้นไม่สามารถแสดงผลเป็นแสงให้เห็นได้ หากเรานำพอร์ซเซลิคอน มาประยุกต์ใช้เนื่องจากมันจะเปลี่ยนค่าคงที่ dielectric และค่าความนำเมื่อได้รับความชื้น และพอร์ซเซลิคอนสามารถตอบสนองได้ไวกว่าเครื่องตรวจจับที่ทำมาจากเซรามิก และยังมีคุณสมบัติอื่นที่ดีกว่า ยกตัวอย่างเช่น สร้างได้หลายครั้ง , ค่าฮิสเทอเรซิสต่ำ , ตอบสนองไว , ทนความร้อนสูง , ต้องการพลังงานต่ำ และ สามารถตอบสนองต่อความชื้นได้ในช่วงกว้าง



รูปที่ 5.6 เครื่องตรวจจับความชื้น

โดยเครื่องตรวจจับความชื้นที่ทำมาจากพอร์ซเซลิคอนนั้น ได้มีการพัฒนาให้นำไปเป็นสาร dielectric ใน capacitive sensor โดยเป็นสาร dielectric และนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการวัด, โรงงานผลิต , การเกษตร , ฯลฯ

เช่นเดียวกับพอร์ซเซลิคอนที่คุณสมบัติในการตรวจจับความชื้นสามารถควบคุมได้โดยตัวแปรต่าง ๆ เช่น ค่าความเข้มข้นกระแส , ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก , และระดับในการเรืองแสง พอร์ซเซลิคอนนั้นมีโครงสร้างระดับนาโนเมตร ที่ค่าความจุและความนำขึ้นอยู่กับ การจ่ายความถี่ ซึ่งจะทำให้ค่าเหล่านั้นลดลงโดยการเพิ่มค่า Parasitic capacitance และความต้านทานที่รอยต่อระหว่างชั้น และการเชื่อมต่อภายในเครื่อง ซึ่งการเปลี่ยนค่าความจุและค่าความนำโดยการกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่และขนาดและการกระจายของแท่งพอร์สซิลิคอน และรูปร่างที่สัมพันธ์กับผิวพอร์ส ซึ่งจะพิจารณาว่าจุดเชื่อมต่อที่ผิวหน้ากับความชื้น

5.4.2 เครื่องตรวจจับก๊าซ

จากการที่แท่งพอร์สมีขนาดที่ค่อย ๆ เพิ่มหรือลดลงนั้น สามารถที่จะนำไปสร้างเป็นเครื่องตรวจจับก๊าซได้หลายชนิดภายในพื้นที่เดียวกัน และสามารถที่จะนำไปสร้างเป็น “จุ่มอิลเล็กทรอนิกส์” ได้ ซึ่งในปัจจุบันเครื่องตรวจจับก๊าซนี้ได้สร้างไว้บนมอส ซึ่งเครื่องตรวจจับที่อาศัยผลของสนามไฟฟ้าหรือค่าความนำโพลีเมอร์นั้นมีความสามารถต่ำที่จะตรวจสอบก๊าซที่มีกลิ่นที่มีความเข้มข้นน้อย เนื่องจากมีชั้นสารที่ใหญ่และอาศัยหลักการจำค่าต่าง ๆ สำหรับพอร์สซิลิคอนที่ทำเป็นจุ่มอิลเล็กทรอนิกส์นั้น มีความน่าเชื่อถือ, และสามารถตรวจจับกลิ่นอาหารและไวน์, หรือประยุกต์กับกลิ่นอะไรก็ได้ที่มนุษย์กำหนด ความน่าเชื่อถือ, และสามารถตรวจจับกลิ่นอาหารและไวน์, หรือประยุกต์กับกลิ่นอะไรก็ได้ที่มนุษย์กำหนด



รูปที่ 5.7 เครื่องตรวจจับก๊าซต่าง ๆ

เครื่องตรวจจับก๊าซนี้มีการตอบสนองที่ไวและยังสร้างได้ง่ายและราคาถูก สามารถสร้างบนพอร์สซิลิคอนได้ นักวิจัยแห่งมหาวิทยาลัย Brescia ได้กล่าวว่าเทคนิคในการใช้เยื่อบาง ๆ ของพอร์สซิลิคอน บนฐานรองอะลูมินา สามารถตรวจจับไนโตรเจนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 ppb จน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 20 ppb ได้โดยปราศจากฝุ่นละออง ซึ่งมีราคาถูก , ต้องการพลังงานต่ำ , และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง

เครื่องตรวจจับก๊าซฟลูออโรฟอสเฟต(Fluorophosphate) ที่อยู่บนอุปกรณ์ทางด้านแสง เมื่อแสงสีขาวตกกระทบลงบนตัวกรองพอร์ซเซลิคอนที่สร้างขึ้นบนฐานรองซิลิคอนนั้นจะสะท้อนกลับโดยผิวของพอร์ซเซลิคอน โดยที่ชั้นกรองพอร์ซเซลิคอนจะประกอบไปด้วยแท่งพอร์ซที่มีขนาดค่อย ๆ ใหญ่ ทำให้ดัชนีหักเหมีค่าเรียงตามขนาด เมื่อพันธะระหว่างซิลิคอนและไฮโดรเจนที่ผิว สัมผัสกับละอองของก๊าซ ทำให้ชั้นความหนาที่สามารถมองเห็นของพอร์ซเซลิคอนเปลี่ยนแปลงไป โดยมุมจะเลื่อนเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงตามความเข้มข้นของละออง ประโยชน์ของวิธีนี้ คือ มีความไวในการตอบสนอง และสามารถเกิดขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดแสง และสามารถตรวจจับได้ในระยะไกล และยังสามารถตรวจจับโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรงที่ผิว

5.5 การนำพอร์ซไปประยุกต์ในด้านอื่น

พอร์ซเซลิคอนยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นตัวส่งผ่านคลื่น(Waveguide), ใช้สร้างเป็นตัวกรองคุณภาพสูง(Hi-quality Filter)ที่สามารถกรองได้แม้กระทั่งจุลชีพ, ใช้สร้างนาโนแมชชีน(Nano-machine), และอื่นๆอีกมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

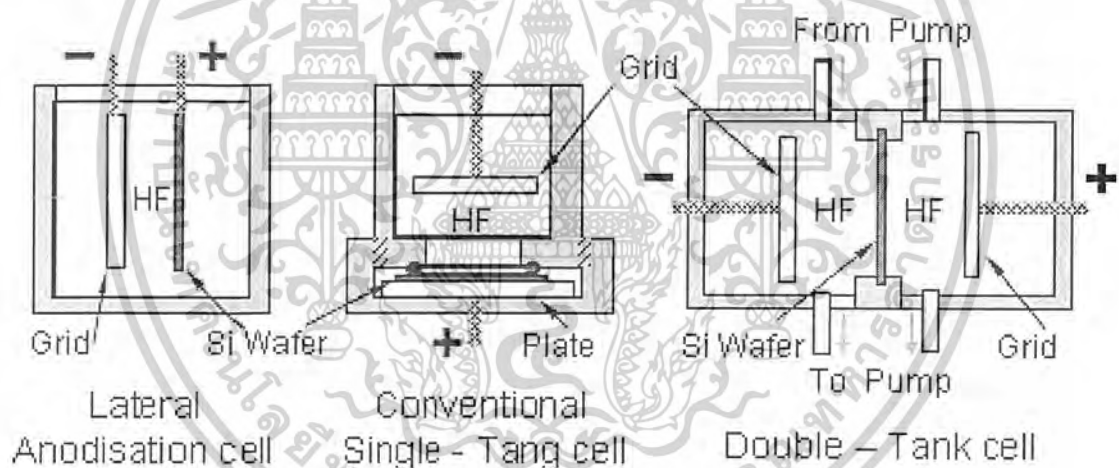
บทที่ 6

กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน

ในกระบวนการสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกซิลิคอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites) นั้นมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน โดยในหัวข้อนี้จะได้พิจารณาถึงเทคนิคและวิธีการสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรแบบต่าง ๆ

6.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

พอร์สซิลิคอนนั้นเป็นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี ที่เรียกว่า Anodisation ซึ่งจะต้องใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ Anodisation

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนนี้ จะประกอบด้วย แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะใช้ทองเป็นขั้ว โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง

6.1.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

การกักร่อนของสารใด ๆ สามารถนิยามได้ว่าเป็นความเสื่อมโทรมของสาร เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปจะเป็นการเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และมักจะเริ่มจากผิวนอกของสารนั้นเสมอ โดยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

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



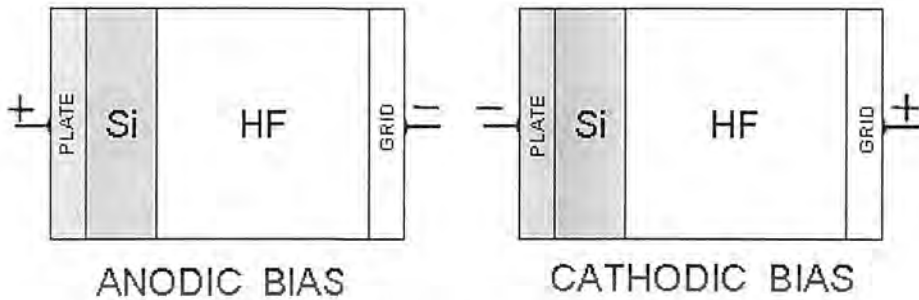
โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) ได้

2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเทและเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลายปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ



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

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนดหรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชนิดหนึ่งจะเป็นแคโทด



รูปที่ 6.2 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ

พิจารณาเซลล์ไฟฟ้าในรูปที่ 6.2 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอน (Si) ซึ่งจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้าของทอง (Au) ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดเช่นกันจากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (Anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิคอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้ผลึกซิลิคอนสามารถถูกกัดได้

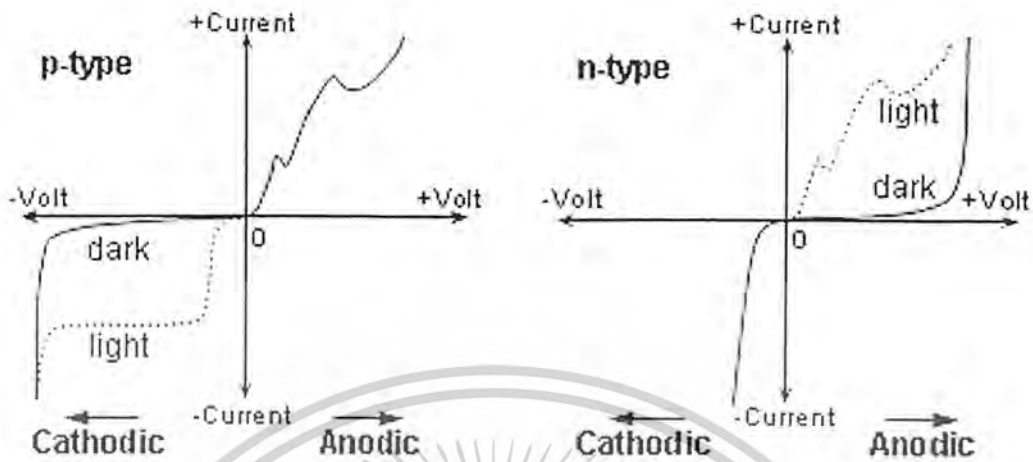
2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (Cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดผลึกซิลิคอนขึ้น

6.1.2 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบชอตต์กีไดโอด (Schottky diode) ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัส (interface) กันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ ผลึกซิลิคอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ระหว่างผลึกซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ภายใต้เงื่อนไขในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง ว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แตกต่างกันอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิคอนชนิดพี และเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากรูปที่ 6.3 จะแสดงลักษณะกระแสแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias และแบบ Cathodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ Cathodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในผลึกซิลิคอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง (Photocurrents) เช่นเดียวกันกับโคโอดทั่วไป ส่วนในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลึกซิลิคอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Cathodic bias ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 (ข)

จากลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้าทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ถูกทำให้การสรุปลักษณะที่สำคัญ ๆ เอาไว้ในตารางที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 สรุปลักษณะสำคัญๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัส
เซลล์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

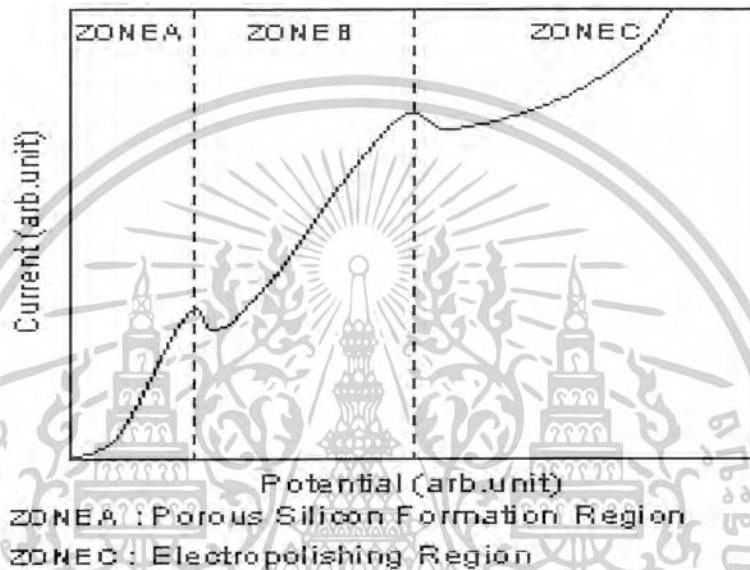
ชนิดของผลึก ซีลิกอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบ Cathodic bias	แบบ Anodic bias
ชนิดพี	<input type="checkbox"/> เนื้อของผลึกซีลิกอนจะไม่ถูกกัด <input type="checkbox"/> ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky	<input type="checkbox"/> เนื้อของผลึกซีลิกอนถูกกัด โดย <input type="checkbox"/> จะเกิด โครงสร้างของพอร์ส ซีลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ <input type="checkbox"/> จะเกิดการกัดผิวหน้าของผลึก ซีลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ <input type="checkbox"/> ลักษณะการ ไบอัสเป็นแบบ Forward-biased Schottky
ชนิดเอ็น	<input type="checkbox"/> เนื้อของผลึกซีลิกอนจะไม่ถูกกัด <input type="checkbox"/> ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky	<input type="checkbox"/> เนื้อของผลึกซีลิกอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย <input type="checkbox"/> จะเกิด โครงสร้างของพอร์ส ซีลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ <input type="checkbox"/> จะเกิดการกัดผิวหน้าของผลึก ซีลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ <input type="checkbox"/> ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky

จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองลักษณะมีพฤติกรรมเป็น rectifying เหมือนกัน โดยในการเกิดของพอร์สซีลิกอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ anodic bias เท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Cathodic bias จะไม่เกิดพอร์สซีลิกอนขึ้นไม่ว่าชนิดของผลึกซีลิกอนจะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของผลึกซีลิกอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias นั้นเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ดังนั้น ในระหว่างการ anodic bias จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นผลึกซีลิกอนชนิดเอ็นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias ของทั้งผลึกซิลิคอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias

จากรูปข้างต้นลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยยอดกราฟอยู่ 2 จุดด้วยกัน โดยยอดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A (Porous Silicon Formating Regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นมากี่ต่อเมื่อค่ากระแส (I) ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก (I_{ps}) ส่วนในบริเวณ B (Transition Regions) ที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของซิลิคอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน ไปสู่ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้า ซึ่งอยู่ในบริเวณ C (Electropolishing Regions) โดย โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนเช่นเดียวกับกับพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า (Electropolishing) ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ยอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากยอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ Negative Impedance ขึ้นโดย

ในส่วนของยอดกราฟแรก

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดที่ จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ Quantum Size Effect ขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นพอร์ซซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดอื่น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆ โครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน และเมื่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุมโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นพอร์ซซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น

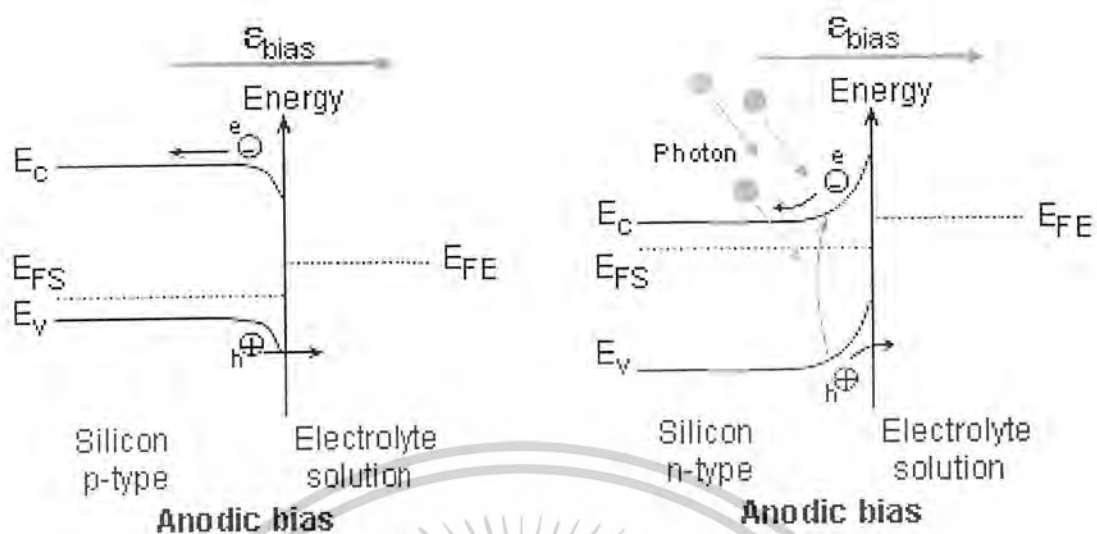
ในส่วนยอดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณ Transition region กับ Electropolishing region การที่กระแสมีค่าลดลง เป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ขึ้นที่บริเวณผิวของพอร์ซซิลิคอนในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

6.1.3 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายไฮโดรฟลูออริก

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น เป็นที่ทราบกันแล้วว่าที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะมีลักษณะเป็นแบบ Schottky interface โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 6.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่าการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

ในสารซิลิคอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากการไบอัสแบบไปหน้า ทำให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ก)

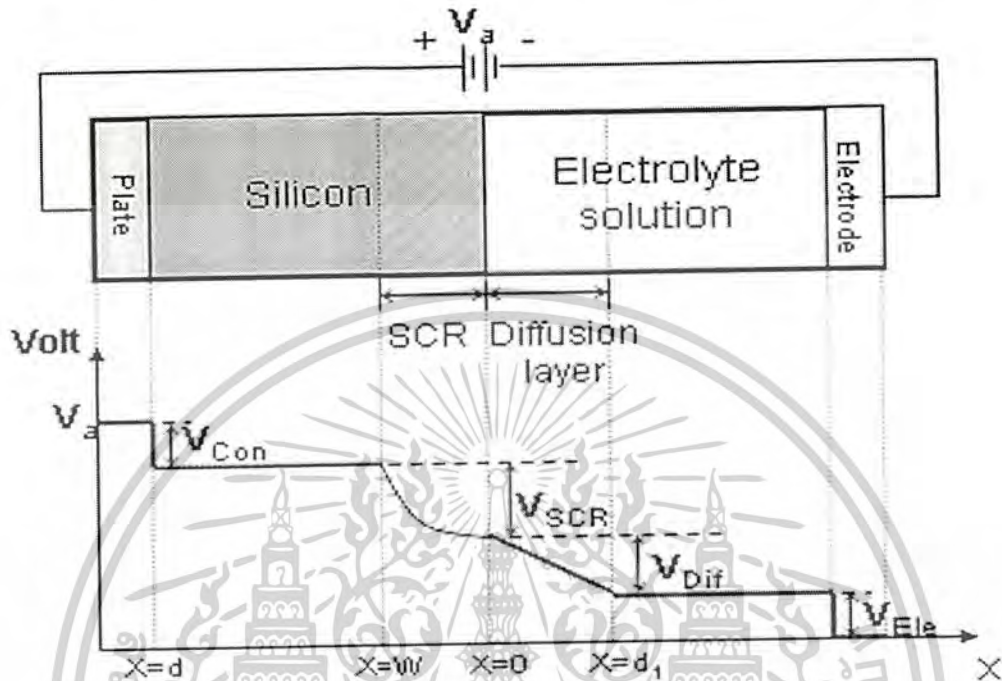
ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบ Anodic bias ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการ Anodisation จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้แก่ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ข)

6.1.4 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เซลล์ไฟฟ้าที่มีใช้ในกระบวนการกัดแบบ porous etching จะประกอบด้วยผลึกซิลิคอน ซึ่งถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีกรไบอัสเซลล์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมีในลักษณะ anodic bias ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่าง ๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่าง ๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่ d เป็นความหนาของผลึกซิลิคอน, w เป็นความกว้างของบริเวณปลดพาหะนำกระแส (Space Charge Region: SCR) ส่วน d_1 เป็นความกว้างของบริเวณ diffusion layer ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากภาพจะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าคร่อมบริเวณต่าง ๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ ในเนื้อของผลึกซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับผลึกซิลิคอน (V_{Con})
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลดพาหะนำกระแส (V_{SCR})

ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้ V_a เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้ารวมของระบบได้ดังนี้ คือ

$$V_a = V_d + V_{SCR} + V_{Con} + V_{Elec} \quad (6.3)$$

ศักดาไฟฟ้า V_{con} กับ V_{elec} ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของพอร์สซิลิคอนแบบเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้น จึงทำให้สมการที่ (2.5) สามารถเขียนได้เป็น

$$V_a = V_d + V_{SCR} + \text{Constant} \quad (6.4)$$

จากสมการที่ (6.4) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Diffusion layer (V_{Dif}) กับ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Space Charge Region (V_{SCR}) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

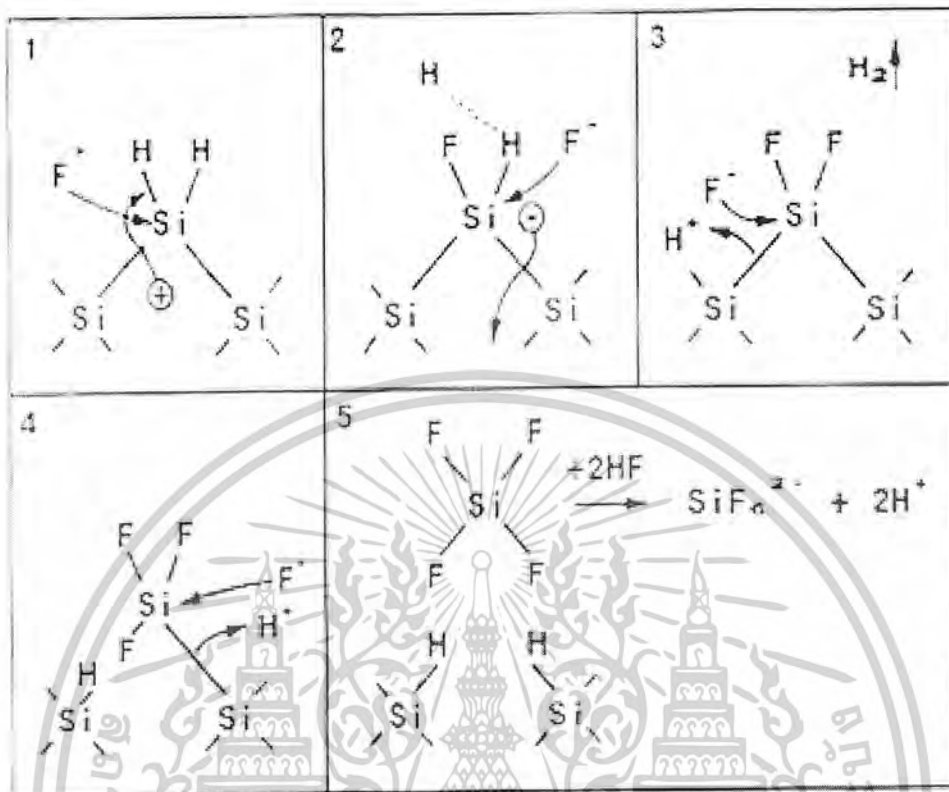
ในผลึกซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ทำให้ไม่เกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้นในผลึกซิลิคอน ดังนั้น ศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Diffusion layer (V_{Dif}) นั่นเอง โดย V_{Dif} นี้จะควบคุมอ็อนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณ diffusion layer

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

6.1.5 กลไกการเกิดพอร์สซิลิคอน

ก. ปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิคอน

ในสภาวะปกติ เมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ผลึกซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมี และขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.7



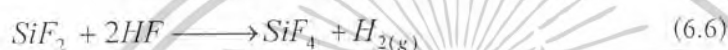
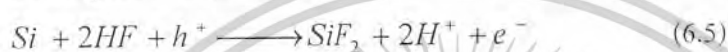
รูปที่ 6.7 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกีดเนื้อของผลึกซิลิคอน

เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกระแสไบอัสแบบ anodic bias ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วแอโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ anodic bias โดยมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้แก่ขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้ โดรนอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทนดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้อิออนของฟลูออรีน (F^-) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะเข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิด

โมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาลเลนซ์อิเล็กตรอน (polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนที่อยู่ถัดเข้ามามีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิคอน พร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิคอน อะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



จากสมการที่ 5.6 และสมการที่ 5.7 สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวมใหม่ได้เป็น



จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 6.5 ที่มีผลึกซิลิคอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยไฮโดรในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF_2 ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอนต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_2 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ 5.6 ได้ผลิตภัณฑ์เป็น SiF_4 หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นนี้เอง สังเกตได้ว่า จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้อัตราผลผลิตสุดท้าย คือ สารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ 6.7

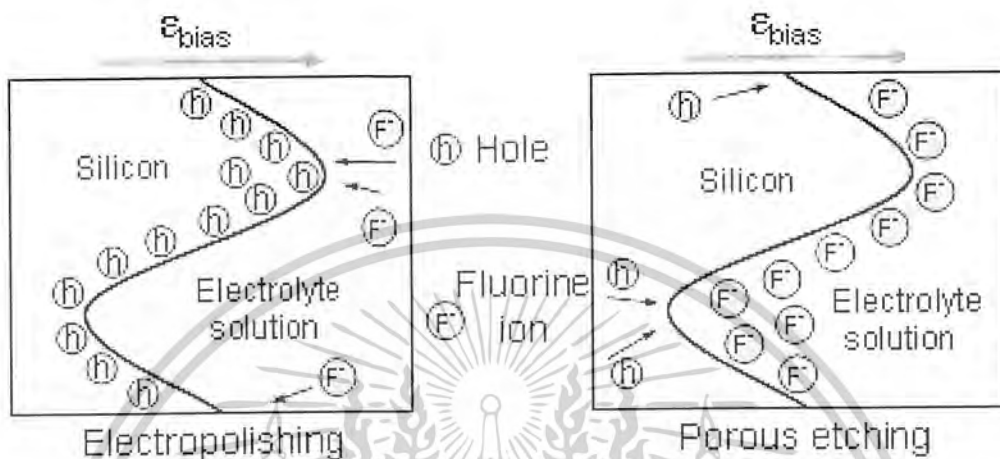
ข. การเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิคอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ผลึกซิลิคอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จะไม่ถูกสารละลายกัดแต่อย่างใด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบ anodic bias แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ให้กระแสไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

- แบบ Elctroplishing
- แบบ Porous etching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการ Anodization โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะมีตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ กล่าวคือ



รูปที่ 6.8 แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ โดยที่

- (ก) ลักษณะการกัดแบบ Electropolishing
- (ข) ลักษณะการกัดแบบ Porous etching

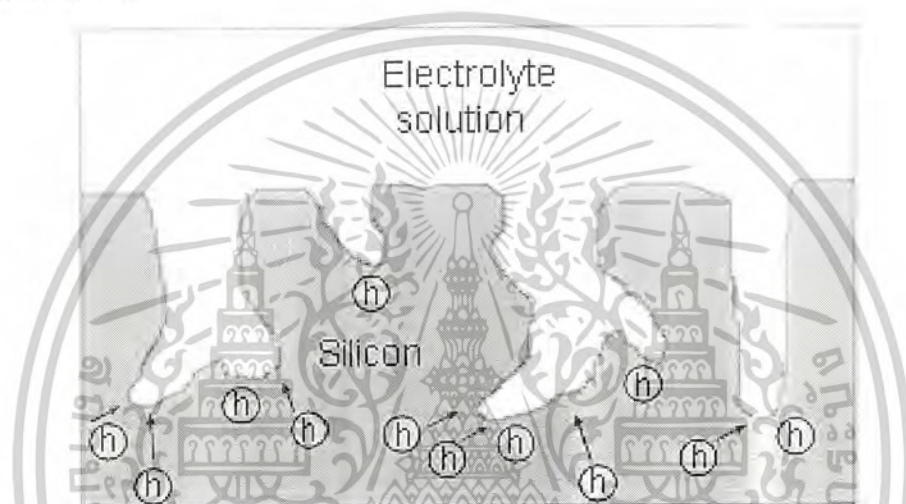
การกัดแบบ Electropolishing

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีในปริมาณสูงๆ ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนมีปริมาณของพาหะโฮลสะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอ็อกซิจนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด โดยอ็อกซิจนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า ดังนั้น ถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 6.8 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุดของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงเอาอ็อกซิจนของฟลูออรีนเข้ามาทำปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นส่วนมาก มีผลทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้น จึงเรียกรกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า (Electropolishing) นั่นเอง

การกัดแบบ Porous etching

ส่วนลักษณะการกัดแบบ Porous etching จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสในปริมาณต่ำๆ ซึ่งจะทำให้ปริมาณอ็อกซิจนของฟลูออรีนในสารละลายกรดมีจำนวนที่มากกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนโฮล ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน ทำให้การกักในลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวนโฮล ดังนั้น ถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือรอยซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิวหรือจุดบกพร่องต่าง ๆ ในผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 6.8 (ข) เมื่อทำการไบอัสแบบ Anodic bias ให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมหรือจุดบกพร่องเหล่านี้มีปริมาณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่บริเวณอื่น ๆ ซึ่งจะดึงเอาพาหะโฮลเข้ามายังจุด ๆ นี้กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณก้นหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไปเนื้อของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 6.9 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

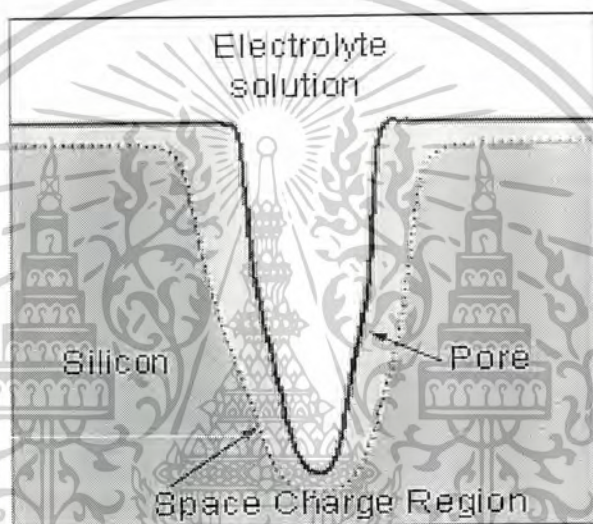
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกในการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้ว พบว่า ผลึกซิลิคอนทั้งสองชนิดจะมีกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ Anodic bias

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้อธิบายมาข้างต้น

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดอื่น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ Anodic bias จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (revers bias) ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณ Space Charge Region มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้น ถ้าบริเวณผิวของผลึกซิลิคอนชนิดอื่นมีลักษณะเป็นหลุมซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบ ๆ หลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้นรอบ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูหรือหลุมที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน

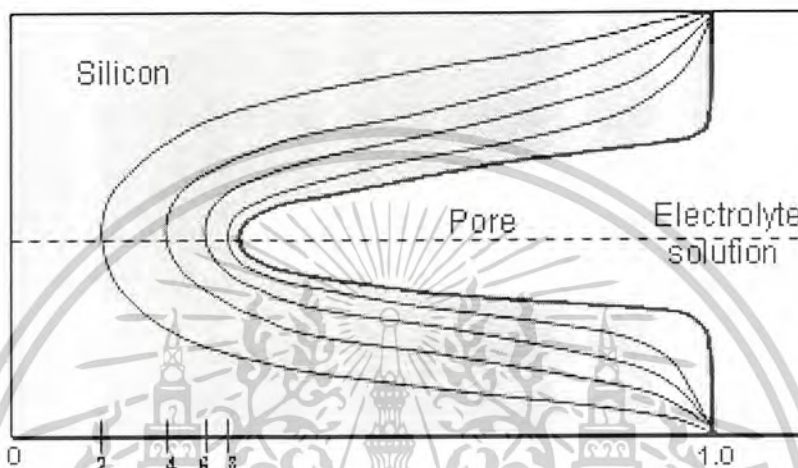
โดยความกว้างของบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$W = \frac{(2\epsilon_s \epsilon_0 V_{SCR} / q N_D)^{1/2}}{\quad} \quad (6.9)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 6.9 จะเห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณ Space Charge Region จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ Space Charge Region (V_{SCR}) และจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D) ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น



รูปที่ 6.11 แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน

ซึ่งบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ รูพรุน จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 6.11 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน (E_s) มีค่าเท่ากับ

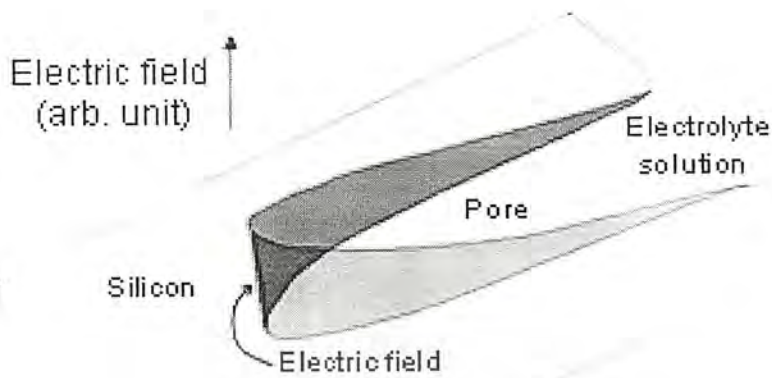
$$E_s = 2V_{SCR} / W \tag{6.10}$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบ ๆ ก้นหลุมของรูพรุน (E'_s) จะมีค่า

$$E'_s = V_{SCR} / r \tag{6.11}$$

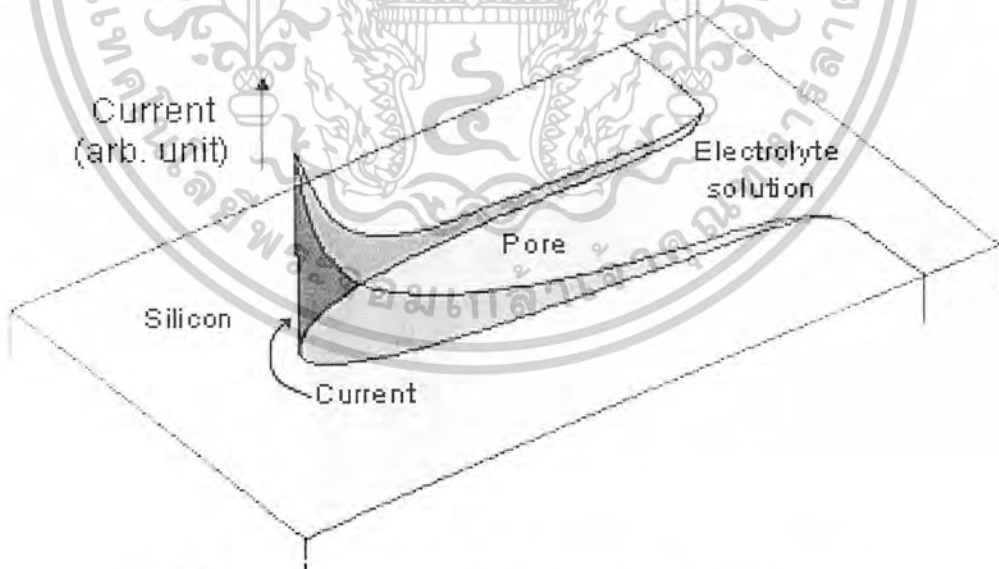
โดยที่ r = รัศมีของก้นหลุมของรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน

จากรูปที่ 6.12 จะเห็นได้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูพรุนจะมีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ผนังบริเวณก้นหลุมของรูพรุนจะมีปริมาณของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าบริเวณนงรอบ ๆ ของรูพรุนอยู่ถึงประมาณ 2-3 เท่า ส่วนผนังบริเวณปากรูจะมีค่าต่ำสุดจนเกือบมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งจากการที่ก้นหลุมของรูพรุนมีขนาดของสนามไฟฟ้าในปริมาณสูงนั้น มีผลทำให้สามารถดึงพาหะนำกระแส (โฮล) มาที่บริเวณนี้ก้นได้มาก ส่งผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมจะมีปริมาณกระแสที่สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบ ๆ ผนังของรูพรุน

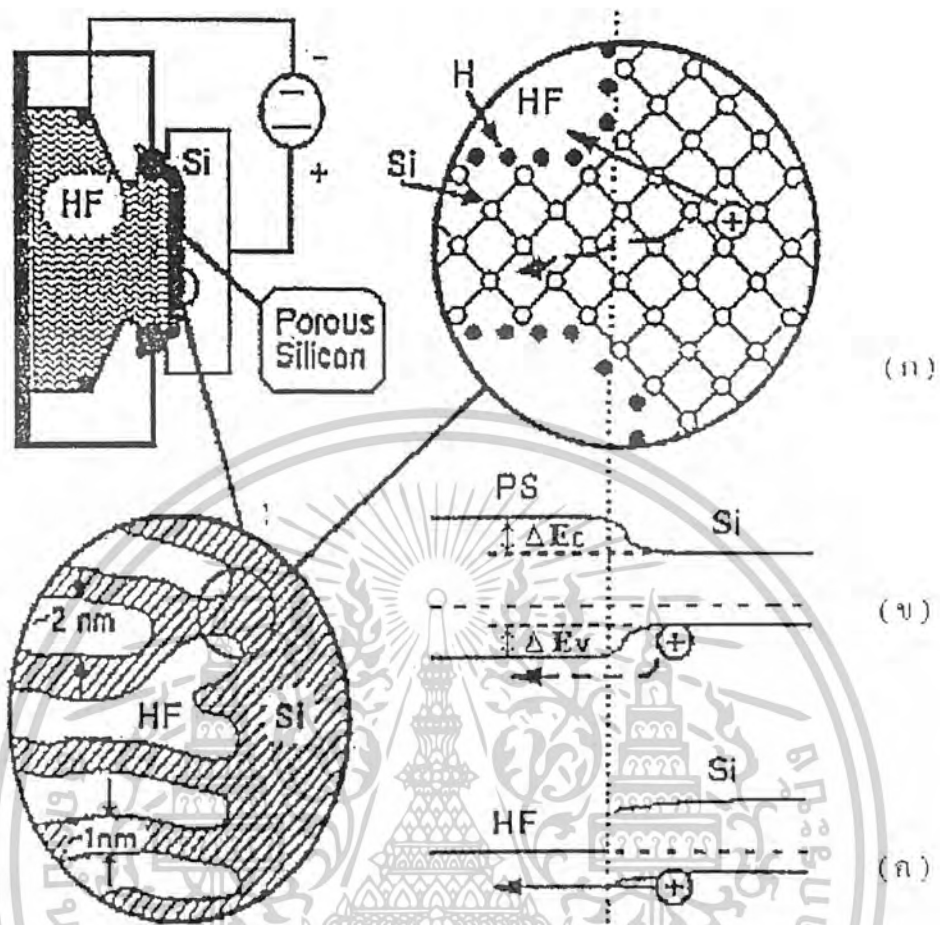
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.6 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้เราทราบถึงกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยพหุหน้ากระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิคอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญต่อกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนในแบบ porous etching หรือ anodic etching ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการกัดที่สามารถลดขนาดของโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตรได้ด้วยกระบวนการ ที่เรียกว่า Self aligned process ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดตั้งแต่ในระดับไมโครเมตรจนถึงโครงสร้างในระดับ 2-3 นาโนเมตรได้ โดยไม่จำเป็นต้องอาศัย masking layer หรือวิธีการ nanolithography แต่อย่างไร แต่กระบวนการนี้จะอาศัยกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน โดยในหัวข้อนี้พิจารณาถึงกลไกในการหยุดกัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษา พบว่า พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ Anodic bias จะทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกในการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพีจะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect ขึ้นในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 6.14



- รูปที่ 6.14 แสดงกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนชนิดพี โดยที่
- (ก) แสดงโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล
 - (ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอนก่อนผ่านเข้าไปใน โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน
 - (ค) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอนผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพูน

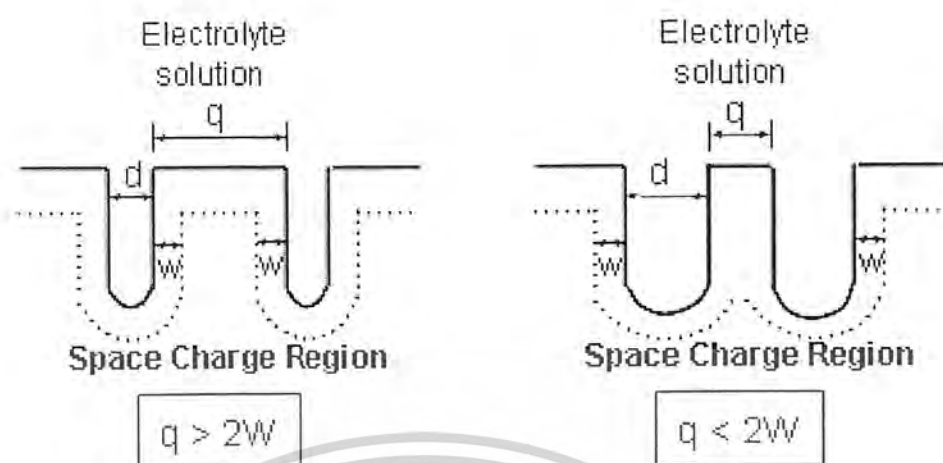
จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดพีจะถูกกัดจนเกิดเป็น โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.14 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในพอร์สซิลิคอน (E_{ps}) มีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect นั่นเอง ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนที่ระหว่างพอร์สซิลิคอนกับผลึกซิลิคอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็ ก้าพวงศักย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ ΔE_v สำหรับโฮล และเท่ากับ ΔE_c สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้น การที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์ซิลิคอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดโครงสร้างในส่วนนี้ต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่า ΔE_v ดังแสดงในรูปที่ 6.14 (ข) แต่ถ้าเมื่อไหร่ก็ตามที่ค่าแรงศักย์ ΔE_v มีค่ามากกว่าพลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนของนาโนพอร์ซิลิคอนได้ ผลที่ตามมา ก็คือ เกิดการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนในส่วนนี้ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ΔE_v นั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนพอร์ซิลิคอน โดย ΔE_v จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนพอร์ซิลิคอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัดในส่วนของนาโนพอร์ซิลิคอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนพอร์ซิลิคอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่จะถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีสามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์ซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 6.14 (ค) ดังนั้น จึงทำให้ที่บริเวณก้นหลุมของพอร์ซิลิคอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่องได้

พอร์ซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ Anodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ W ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ดังนั้น กลไกในการหยุดกัดของพอร์ซิลิคอนสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นแล้ว จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์ซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 แสดงแผนภาพบริเวณปลดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่
(ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า $2W$
(ข) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า $2W$

จากรูปที่ 6.15 (ก) จะเห็นได้ว่าพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นมาจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกทำการกัดจะทำให้ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอน (q) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพูนภายในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลดพาหะนำกระแส (SCR) ปกคลุมอยู่รอบๆ รูพูนแต่ละรู ในกรณีนี้ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลดพาหะนำกระแส ($q > 2W$) ดังนั้น จึงยังสามารถทำการกัดเพื่อลดขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไหร่ก็ตามที่ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนมีขนาดที่น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลดพาหะนำกระแส ($q < 2W$) ดังแสดงในรูปที่ 6.15 (ข) ถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ขึ้น

6.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอร์สที่สร้างด้วยวิธี Anodication

กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมีนั้นมีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ซึ่งพอร์สซิลิคอนที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันย่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้วย อาทิ พอร์สซิลิคอนที่มีค่าความพรุนมากจะมีความหนาของโครงสร้างแต่ละซิลิคอนที่เล็กลงเป็นผลให้ช่องว่างพลังงานที่บริเวณชั้นพอร์สซิลิคอนกว้างมากขึ้น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

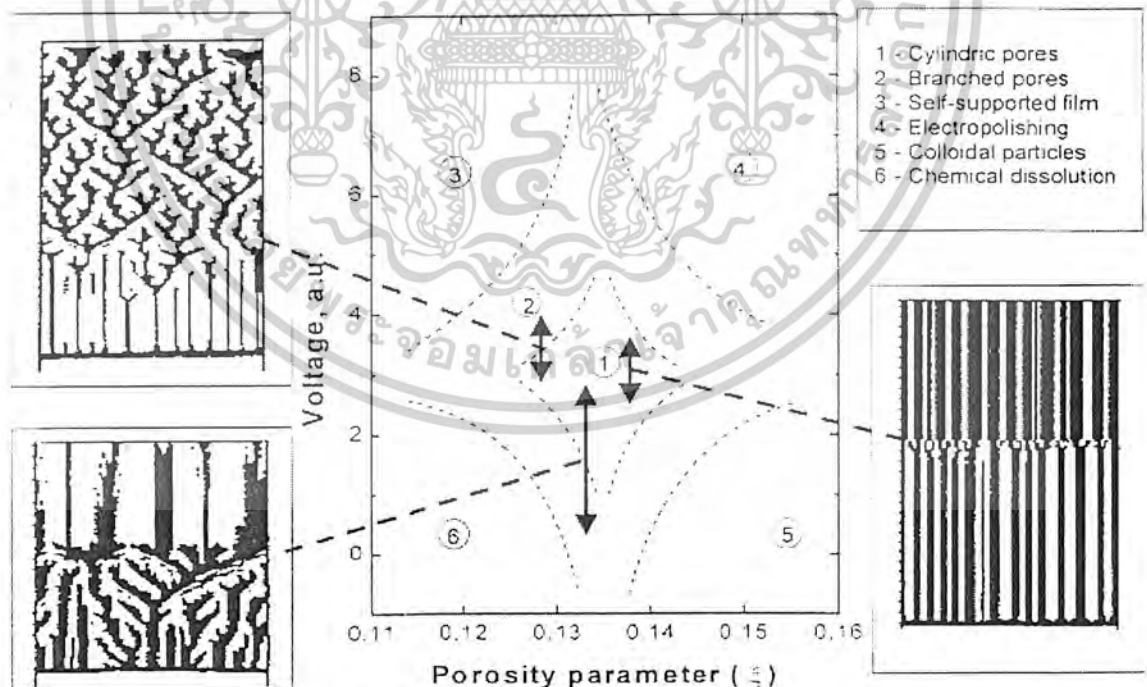
ปัจจัยหลักๆที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี มีดังนี้

1. สภาพความต้านทานของผลึกซิติคอน
2. ชนิดของสารเจือในเนื้อผลึกซิติคอน
3. ความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา
4. ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
5. เวลาที่ใช้ในกระบวนการ

จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างของพอร์สซิติคอนจะมีค่าความพรุนสูงชันและมีความหนาของชั้นพอร์สซิติคอนมากขึ้นถ้า

1. เพิ่มสภาพความต้านทานของผลึกซิติคอนในผลึกซิติคอนชนิด พี
2. ลดสภาพความต้านทานของผลึกซิติคอนในผลึกซิติคอนชนิด เอ็น
3. เพิ่มความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา
4. ลดความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
5. เพิ่มเวลาที่ใช้ในกระบวนการ

โครงสร้างของพอร์สซิติคอนจะมีค่าความพรุนน้อยลงและมีความหนาของชั้นพอร์สซิติคอนน้อยลงถ้าหากปรับปัจจัยดังกล่าวไปในทางตรงกันข้ามกับการเพิ่มค่าความพรุน

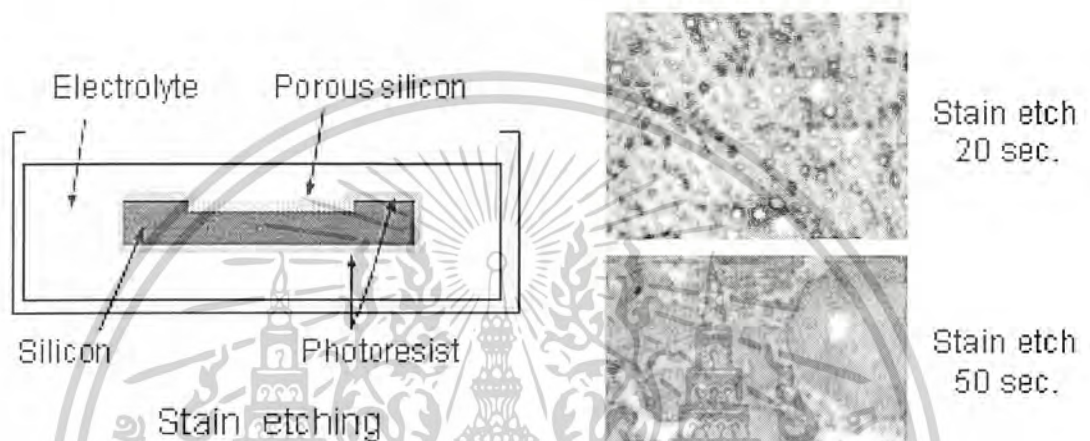


รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน ไบอัสในปฏิกิริยาการกัดและค่าตัวแปรต่างๆ ในพอร์สซิติคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching

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



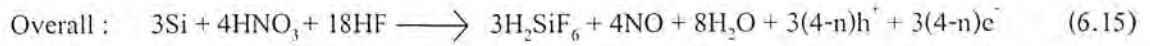
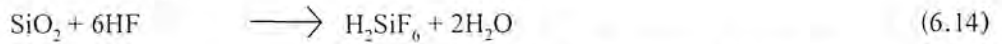
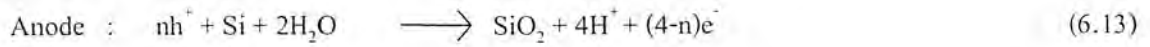
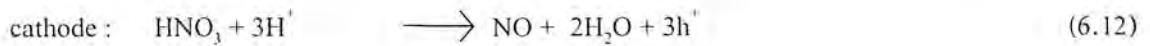
รูปที่ 6.17 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และ ตัวอย่างของพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี

6.2.1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี

จุดสำคัญของการกัดแบบข้อมสี(Stain etching) ก็คือ การทำให้เกิดประจุ โพลเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF)ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก(Nitric : HNO_3)เพื่อทำให้เกิดประจุ โพล ดังสมการที่ 5.12 หลังจากนั้นประจุ โพลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation reaction)ได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 5.13 ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เองสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอน ไดออกไซด์บางส่วนออก ดังสมการที่ 5.14 ซึ่งการเกิดซิลิคอน ไดออกไซด์และการถูกกัดออกของซิลิคอน ไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยาเหมือนอย่างกรณีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี(Anodication) ดังนั้นลักษณะ โครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ(Non-uniform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมสี่



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีส้มเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวินสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีส้มจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมครอน ถึงประมาณ 1.5 ไมครอน เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าในกระบวนการกัดแบบข้อมสี่ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกพร้อมกับกรดไนตริกสักครู่ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยากัดในขั้นต่อไป ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพาะฟักตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้ในกระบวนการกัดนั่นเอง เรียกว่า "การบ่มสารละลาย (Incubation)"

6.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากวิธี Stain etching

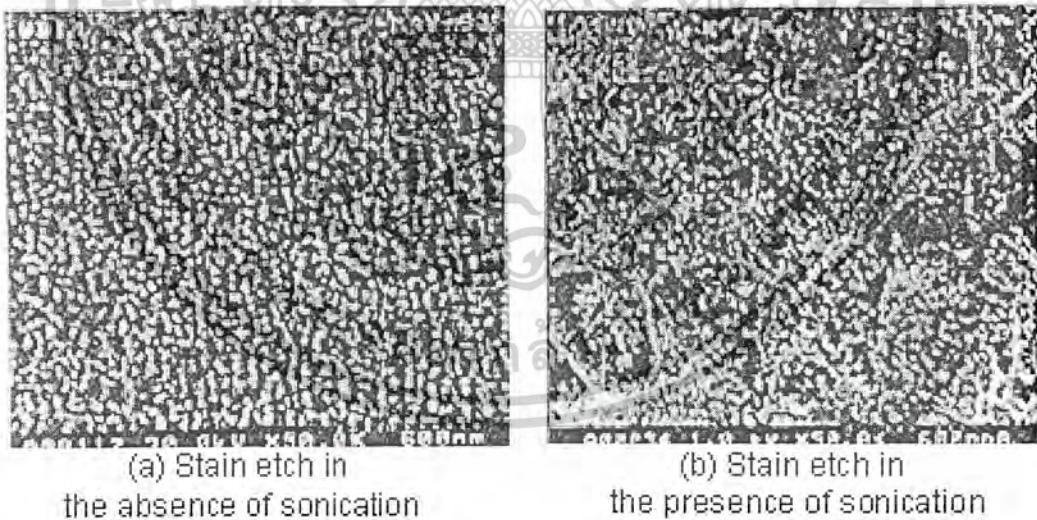
1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ โดยที่อัตราการเกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ HF:HNO₃:H₂O ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น

2. ชนิดของสารเจือและค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ซ มีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดของชั้นพอร์ซซิลิคอนซึ่งทำให้มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำ "Incubation" โดยตรง โดยที่ผลึกซิลิคอนชนิดพี จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 30 วินาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.004 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้เวลาในการบ่มสารละลาย 9 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 50 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าเป็นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 10 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.15 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้เวลาในการบ่มสารละลาย 8 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นต้น

3. สภาพของผลึกซิลิคอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน มีการทดลองกับแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline), แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป (poly crystalline), แผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous) และชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) ที่สร้างจากกระบวนการEpitaxi เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมีภายใต้บรรยากาศเดียวกัน พบว่า จากการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต(UV) พอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยวแผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติPhotoluminescence (PL) แต่ พอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบAmorphousกลับไม่แสดงคุณสมบัติPhotoluminescence(PL) ส่วนกรณีชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) ที่สร้างจากกระบวนการEpitaxi พบว่าการเพิ่มค่าความหนาแน่นของเจอร์เมเนียม(Ge_x)จะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิดPhotoluminescence(PL)ลดลงในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้กัดและการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของกระบวนการทำปฏิกิริยาล้วนมีผลกระทบต่อโครงสร้างและลักษณะของพอร์ซซิลิคอนที่จะเกิดขึ้น เช่น การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลาย เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์ซซิลิคอนที่หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์ซซิลิคอนที่หยาบกว่าการสร้างชั้นพอร์ซโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.18 ภาพเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching

รูป (a) พอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

รูป (b) พอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

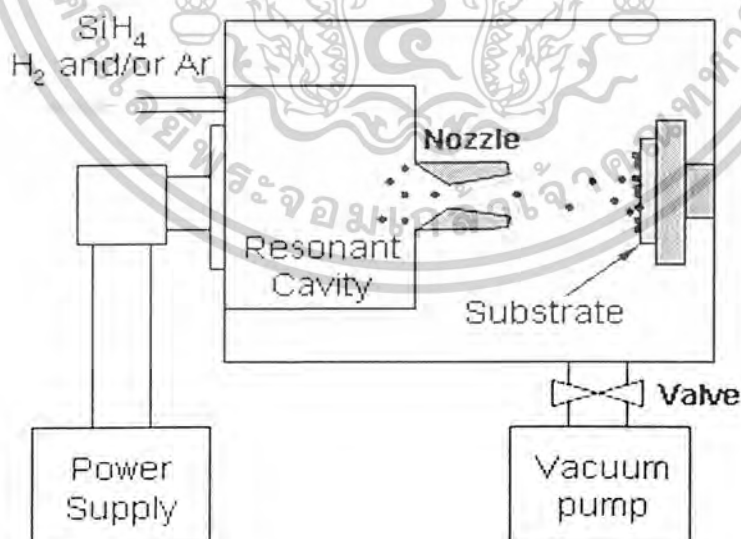
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4)

ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites Si) ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ณ ที่อุณหภูมิห้องนั้น สามารถทำการสร้างขึ้นมาได้ด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4) โดยวิธีการสร้างแบบนี้ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรก โดย Takagi et al. มีหลักการดังต่อไปนี้ คือ ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจะถูกสร้างขึ้นมาด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4) กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) หรือก๊าซผสมของอาร์กอน (Ar) ในช่อง resonant cavity โดยมีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลัง 150 W ที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อทำให้เกิด plasma ขึ้นภายใน ซึ่งลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.20

ขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 จนถึง 2 นาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของก๊าซ กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ ต่อจากนั้นผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรนี้จะถูกปล่อยผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตรไปยังภาชนะระบบปิด (chamber) ที่ภายในมีความดันอยู่ในระดับ 10^{-6} Torr โดยผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นนี้จะถูกปล่อยให้ไปตกเคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็น คิวartz ณ ที่อุณหภูมิห้อง

SiH_4 Microwave plasma Decomposition



รูปที่ 6.19 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4)

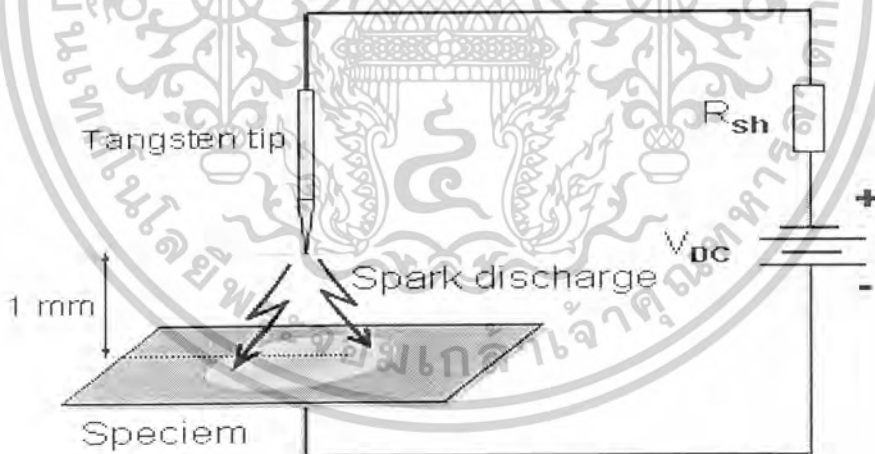
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Laser breakdown ก๊าซไซเรน (SiH_4)

ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรยังสามารถสร้างขึ้นได้จากวิธีการ laser breakdown ของก๊าซไซเรน (SiH_4) โดยมีรายละเอียดวิธีการสร้างดังต่อไปนี้ คือ เริ่มต้นจากการที่ก๊าซไซเรนบริสุทธิ์ (Pure SiH_4) ที่มีความดันเท่ากับ 10, 15 หรือ 20 Torr จะถูกปล่อยเข้าไปยังในภาชนะระบบปิด (chamber) ซึ่งภายในมีความดัน (background pressure) ที่ต่ำกว่า 10^{-6} Torr ความดันก๊าซไซเรนต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้น ในส่วนของเลเซอร์ที่ใช้ที่นี่มีแหล่งกำเนิดมาจากระบบ Nd^{3+} : YAG laser system โดยแสงเลเซอร์ที่ได้ออกมาจะถูกโฟกัสให้ผ่านเข้าไปยังภาชนะระบบปิด เพื่อทำให้เกิดการ Spark ขึ้นภายในผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นจะถูก deposit ลงบนฐานรองที่เป็นควอตซ์หรือแผ่นเยอรมันเนียม

6.5 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี High frequency discharge

เทคนิคในการสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ spark discharge ที่ความถี่สูงได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดยนาย Hummel และทีมงาน โดยการ spark discharge ที่เกิดขึ้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์สูง ขนาด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งในการ spark แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 20 ns และเกิดขึ้นทุก ๆ 60 μs ดังแสดงในรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.20 แสดงการ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทังสเตนกับแผ่นผลึกซิลิคอน

จากรูปจะเห็นได้ว่าการ spark discharge จะเกิดขึ้นระหว่างปลายสุดของลวดทังสเตน ซึ่งอยู่ที่หัวอาโนด กับแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งอยู่ที่ขั้วแคโทด โดยการ Spark นั้นจะทำให้บริเวณซึ่งเกิดโกรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างของผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรมีลักษณะเป็นบริเวณวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 5 มิลลิเมตร บนแผ่นผลึกซิลิคอน

เทคนิคต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคการปลูกผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆ เหล่านี้อาจจะต้องอาศัยเทคนิคการสร้าง และ อุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาที่สูงมาก แต่ในการทดลองสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนนี้ได้ทำการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรเช่นกัน ด้วยวิธีการกัดข้อมสี (Stain Etching) เนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับการนำไปใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ อาทิ การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ซึ่งพอร์ซิลิคอนที่ใช้ในงานในลักษณะนี้จะต้องไม่หนามาก และไม่จำเป็นต้องควบคุมค่าความพรุนอย่างละเอียดมากนัก อีกทั้งกระบวนการสร้างต้องไม่ยุ่งยาก และ ใช้ต้นทุนต่ำ ดังนั้นการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี (Stain etching) จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดลองสร้างพอร์สซิลิโคน

ในการทดลองสร้างพอร์สจะเน้นขบวนการสร้างพอร์สซิลิโคนที่เหมาะสมกับการสร้างพอร์สซิลิโคนให้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งควรจะเป็นขบวนการสร้างพอร์สที่ใช้เวลาในการสร้างน้อยที่สุด มีความง่ายและถูกที่สุด สามารถเลือกพื้นที่ๆจะให้เกิดพอร์สหรือไม่ให้เกิดพอร์สก็ได้

เพื่อให้ได้ลักษณะของพอร์สซิลิโคนที่เหมาะสมจะนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพอร์สที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรถึง 800 นาโนเมตรต่ำและมีลักษณะที่เป็นเอกรูปเดียวกัน (Uniformity) มากที่สุด

7.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิโคนด้วยวิธีการกัดด้วยอมลี

7.1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตกระบวนการกัดพอร์สซิลิโคนด้วยวิธีการกัดด้วยอมลี
2. เพื่อศึกษาและสังเกตกลไกการเกิดพอร์สซิลิโคนด้วยวิธีการกัดด้วยอมลี

7.1.2 การทดลอง

เตรียมแผ่นซิลิโคนชนิดเอ็น หนา 111 ไมครอน ค่าสภาพความต้านทาน $0.05 \text{ โอห์มเซนติเมตร}$ ซึ่งมีผิวหน้าขรุขระจากการนำไปขัดกับผงซิลิโคนคาร์ไบด์ (SiC) เกรด 2000 และแผ่นซิลิโคนชนิดพี หนา 111 ไมครอน ค่าสภาพความต้านทาน $10.5 \text{ โอห์มเซนติเมตร}$ ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมันวาว

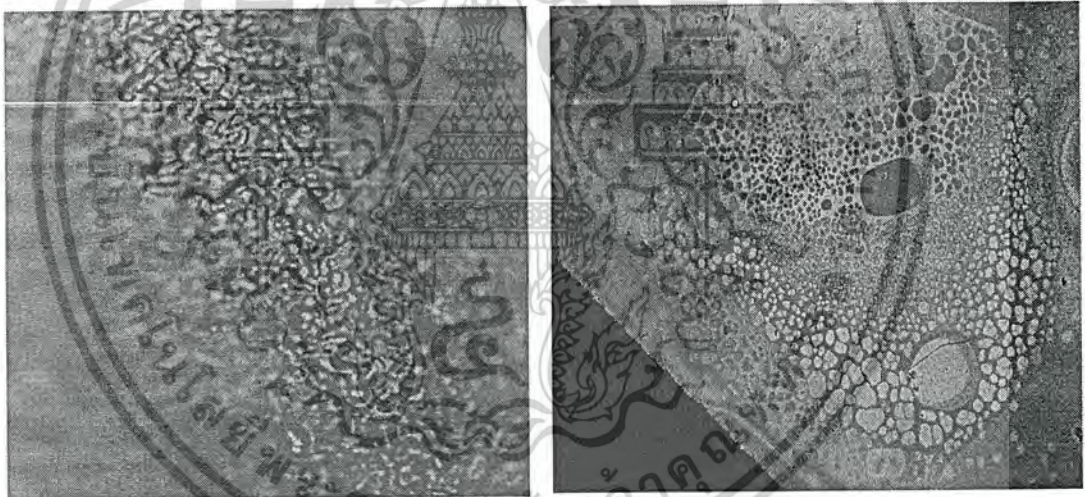
เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ Di ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ในช่วงนี้ก็ด้วยการตัดแผ่นซิลิโคนขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิโคนไดออกไซด์ออกให้หมด หลังจากผสมสารละลายได้ประมาณ 30 นาทีแล้วก็นำแผ่นซิลิโคนที่เตรียมไว้จุ่มลงในสารละลายแล้วสังเกตผล

7.1.3 ผลการทดลอง

กรณีแผ่นซิลิโคนชนิดเอ็นผิวขรุขระ เมื่อจุ่มแผ่นซิลิโคนลงในสารละลาย หลังจากนั้นประมาณ 5 วินาทีที่จะปรากฏเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กมากจากผิวแผ่นซิลิโคน ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีมากขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนสีของแผ่นซิลิโคน ฟองก๊าซเหล่านี้มีบางส่วนที่เกาะที่ผิวของแผ่นซิลิโคนและรวมตัวกันใหญ่ขึ้นจนกระทั่งพาแผ่นซิลิโคนขึ้นสู่ผิวน้ำสารละลาย เมื่อนำแผ่นซิลิโคนไปล้างในน้ำ Di เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำแผ่นซิลิโคนไปล้างในน้ำ Di ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วเป่าให้แห้ง จะเห็นอย่างชัดเจนว่าสีสันทนของแผ่นผลึกเปลี่ยนแปลงไป การเกิดของสีและลวดลายบนแผ่นผลึกเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบลักษณะเป็นจุดกลมและมีหลากหลายสี ชั้นของพอร์ซซีลิกอนมีความโปร่งแสงและมีฟองอากาศเม็ดเล็กๆกระจายอยู่ภายในคล้ายกับชั้นซีลิกอนไดออกไซด์

กรณีแผ่นซีลิกอนชนิดพีอีวีเรียบมัน เมื่อจุ่มแผ่นซีลิกอนลงในสารละลาย หลังจากนั้นประมาณ 20 นาทีจึงจะปรากฏเกิดฟองก๊าซจากผิวแผ่นซีลิกอน หลังจากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนสีสันทนอย่างรวดเร็วพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟองอากาศ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะคล้ายคลึงกับกรณีแผ่นซีลิกอนชนิดอื่น แต่จะแตกต่างกันตรงที่ปริมาณฟองก๊าซที่เกิดมีปริมาณน้อยกว่าและลักษณะของฟองก๊าซจะมีขนาดใหญ่กว่า(กรณีแผ่นซีลิกอนชนิดอื่นฟองก๊าซจะมีขนาดเล็กละเอียดกว่า) นอกจากนี้ลักษณะของพอร์ซซีลิกอนที่ได้จะมีสีสันทนที่สดใสกว่า เมื่อนำไปส่องผ่านกล้องขยายจะเห็นว่ามีความคล้ายกับซีลิกอนไดออกไซด์ และจะมองเห็นจุดสีหลายสีรูปร่างกลมจำนวนมาก(กรณีแผ่นซีลิกอนชนิดอื่นจะเห็นจุดสีไม่ชัดเจน)



(ก)

(ข)

รูปที่ 7.1 รูป ก. ภาพขยายพอร์ซซีลิกอนที่เกิดบนแผ่นซีลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งมีผิวหน้าขรุขระ

รูป ข. ภาพขยายพอร์ซซีลิกอนที่เกิดบนแผ่นซีลิกอนชนิดพี ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมัน

7.2 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์ซซีลิกอน

7.2.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของเวลาในการกักพอร์ซซีลิกอนด้วยวิธีการกักข้อมสี
2. เพื่อศึกษาและสังเกตการสะท้อนแสงของพอร์ซซีลิกอนที่สร้างขึ้นจากปัจจัยทางเวลาที่ต่าง

กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.2 การทดลอง

ในการทดลองนี้ จะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพี ระบาย(111) มีค่าสภาพความต้านทาน $0.1\Omega\text{cm}$ หนา 0.1 มิลลิเมตร ผิวเรียบมัน ตัดแผ่นซิลิคอน ขนาดประมาณ 0.5 ตารางเซนติเมตร

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับ กรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ D_2O ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที หลังจากผสมสารละลายได้ประมาณ 30 นาทีแล้วก็นำแผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแผ่นตาม กระบวนการมาตรฐานและลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกหมดแล้วจุ่มลงในสารละลายด้วยเวลาต่าง กัน คือ 2.5 นาที, 3 นาที, 3.5 นาที, 4 นาที, 5 นาที, 7.5 นาที, 10 นาที แล้วสังเกตผล

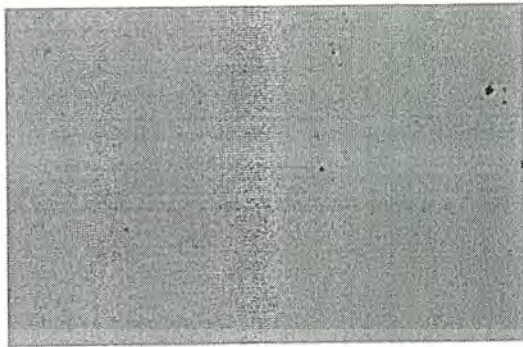
7.2.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองแบ่งลักษณะการเกิดขึ้นของพอร์สออกเป็น 3 ช่วง

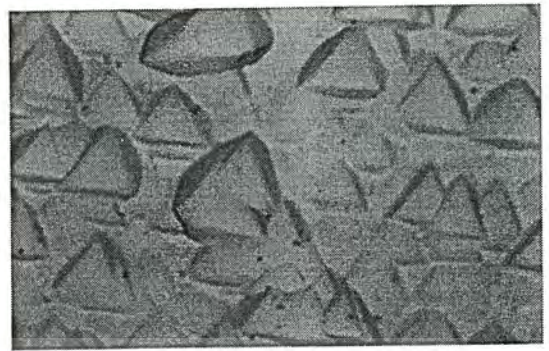
ช่วงเริ่มเกิด (แผ่นซิลิคอนที่ใช้เวลาสร้างพอร์ส 2.5 นาที) เป็นช่วงเวลาที่เพิ่งจะเกิดพอร์ส ซิลิคอนที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (เริ่มเกิดฟองก๊าซในบางพื้นที่ โดยมักจะเริ่มเกิดจากบริเวณที่ ขรุขระที่สุดก่อน) จนกระทั่งพอร์สซิลิคอนที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่านั้นเกิดตามทั่วผิวหน้า (หลังจากเริ่มเกิดฟองก๊าซประมาณ 30 วินาที)

ช่วงเปลี่ยนสี (แผ่นซิลิคอนที่ใช้เวลาสร้างพอร์ส 3 นาที ถึง 4 นาที) เป็นช่วงเวลาที่พอร์สเกิด ทั่วผิวหน้าเริ่มมีสีส้มและลวดลายชัดเจนจนกระทั่งสีส้มและลวดลายเหล่านี้เริ่มเลือน ในช่วงนี้พบว่ามี การเปลี่ยนแปลงสีส้มที่รวดเร็วมากและเกิดฟองก๊าซเป็นจำนวนมาก จะเห็นอย่างชัดเจนว่าสีส้มของ แผ่นผลึกจะเปลี่ยนแปลงคล้ายวงรอบสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ การเกิดของสีและลวดลายบนแผ่น ผลึกเป็นจุดสีอย่างไม่เป็นระเบียบมีความโปร่งแสงและมีหลากหลายสีส้ม มีฟองอากาศเม็ดเล็กๆกระจายอยู่ ภายใน(ลักษณะคล้ายคลึงกับพอร์สในการทดลองที่ 1)

ช่วงหลุมบ่อ (แผ่นซิลิคอนที่ใช้เวลาสร้างพอร์ส 3.5 นาที ถึง 10 นาที) เป็นช่วงเวลาที่พอร์ส เริ่มเกิดหลุมบ่อที่ผิวหน้าอย่างชัดเจนเมื่อมองผ่านกล้องขยายขนาด $4000\times$ พบว่าอย่างไรก็ตาม สีส้ม ของพอร์สซิลิคอนที่ได้เริ่มมีจำนวนสีน้อยลง ลวดลายจุดทรงกลมก็จางลง และยังพบอีกว่ายิ่งใช้เวลา สร้างพอร์สซิลิคอนนานมากขึ้นจะเกิดหลุมบ่อที่กระจายอยู่ทั่วบนพื้นผิวมากขึ้น โดยที่หลุมบ่อเหล่านี้ จะมีขนาดและความลึกมากขึ้นเมื่อใช้เวลาสร้างพอร์สซิลิคอนนานขึ้น



FRONT VIEW (200X)

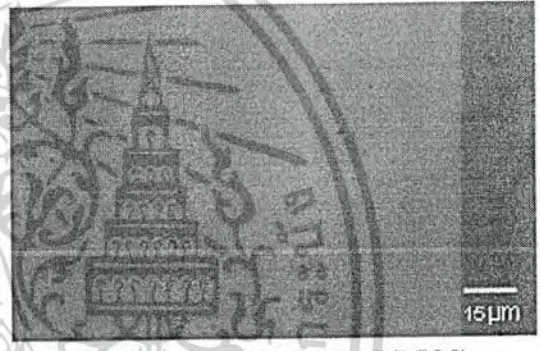


BACK VIEW (4000X)

รูปที่ 7.2 ภาพขยายผิวหน้าแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมัน

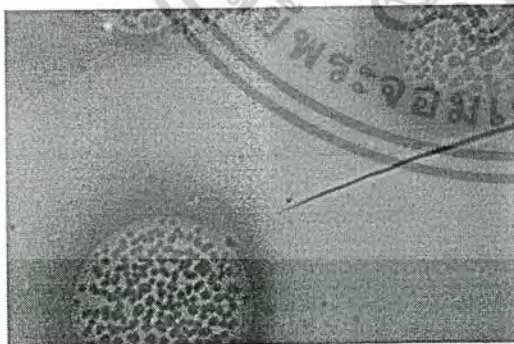


FRONT VIEW (200X)

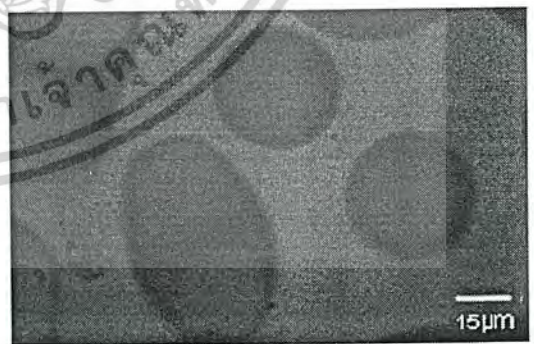


FRONT VIEW (4000X)

รูปที่ 7.3 ภาพขยายพอร์ตซิลิกอนที่เกิดบนแผ่นซิลิกอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 2.5 นาที



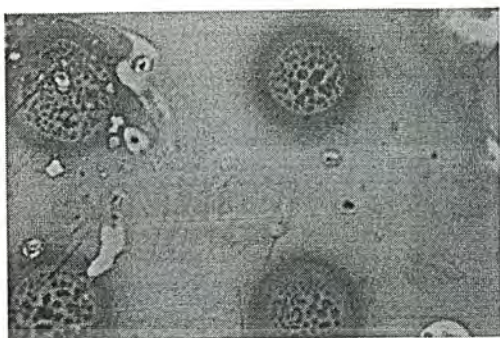
FRONT VIEW (200X)



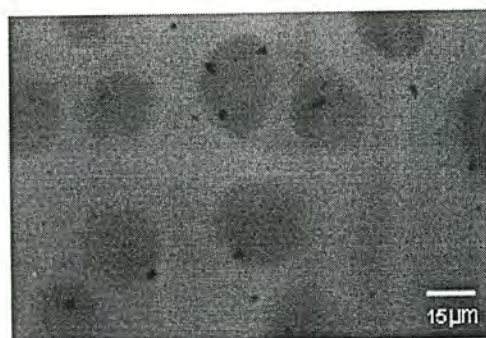
FRONT VIEW (4000X)

รูปที่ 7.4 ภาพขยายพอร์ตซิลิกอนที่เกิดบนแผ่นซิลิกอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

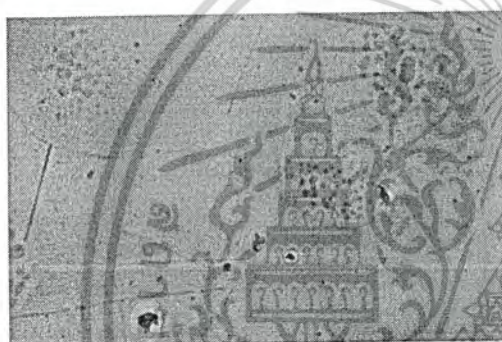


FRONT VIEW (200X)

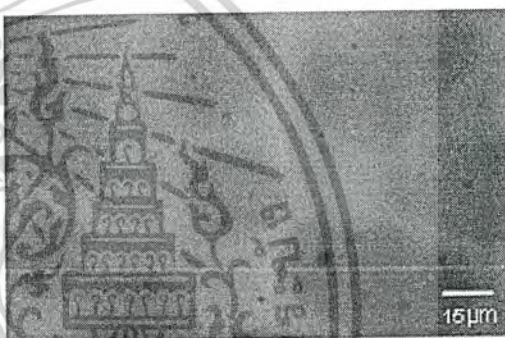


FRONT VIEW (4000X)

รูปที่ 7.5 ภาพขยายพอร์ซเซิลิกอนที่เกิดบนแผ่นซิลิกอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 3.5 นาที



FRONT VIEW (200X)

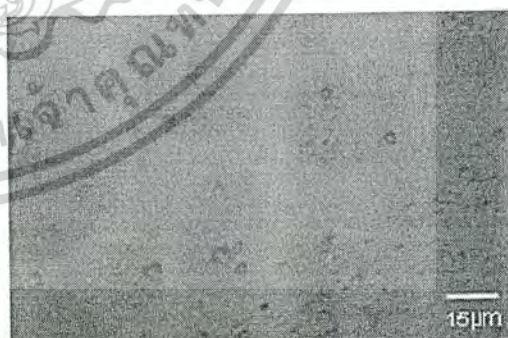


FRONT VIEW (4000X)

รูปที่ 7.6 ภาพขยายพอร์ซเซิลิกอนที่เกิดบนแผ่นซิลิกอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 4 นาที



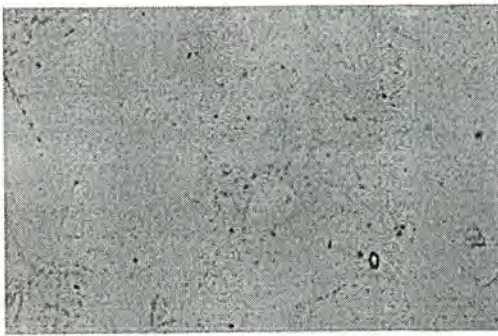
FRONT VIEW (200X)



FRONT VIEW (4000X)

รูปที่ 7.7 ภาพขยายพอร์ซเซิลิกอนที่เกิดบนแผ่นซิลิกอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

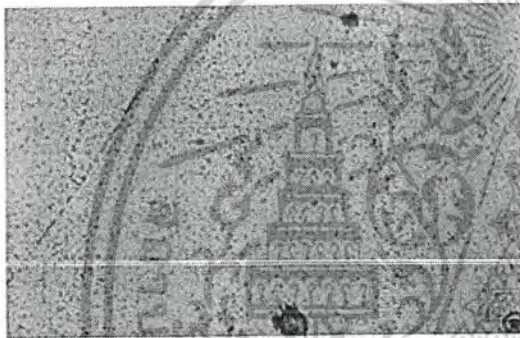


FRONT VIEW (200X)

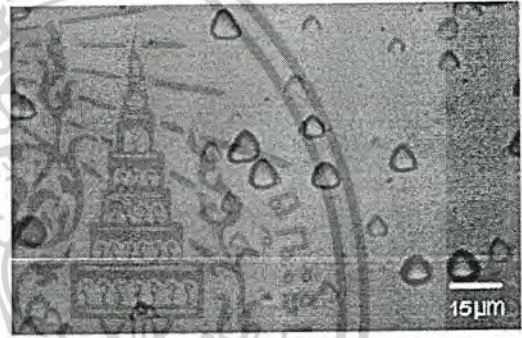


FRONT VIEW (4000X)

รูปที่ 7.8 ภาพขยายพอร์ซซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 7.5 นาที



FRONT VIEW (200X)

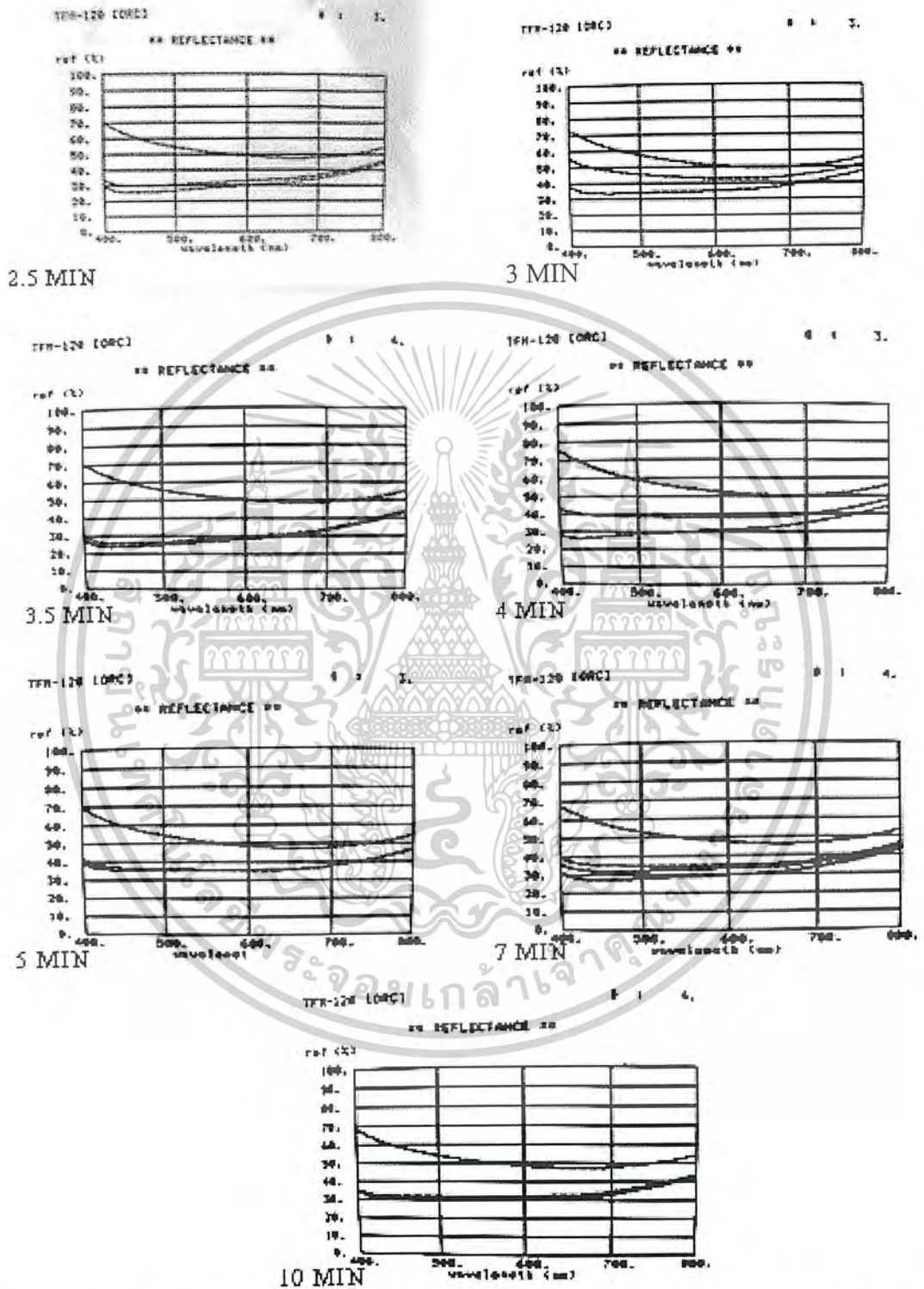


FRONT VIEW (4000X)

รูปที่ 7.9 ภาพขยายพอร์ซซิลิคอนที่เกิดบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบชนิดพี ด้วยเวลา 10 นาที

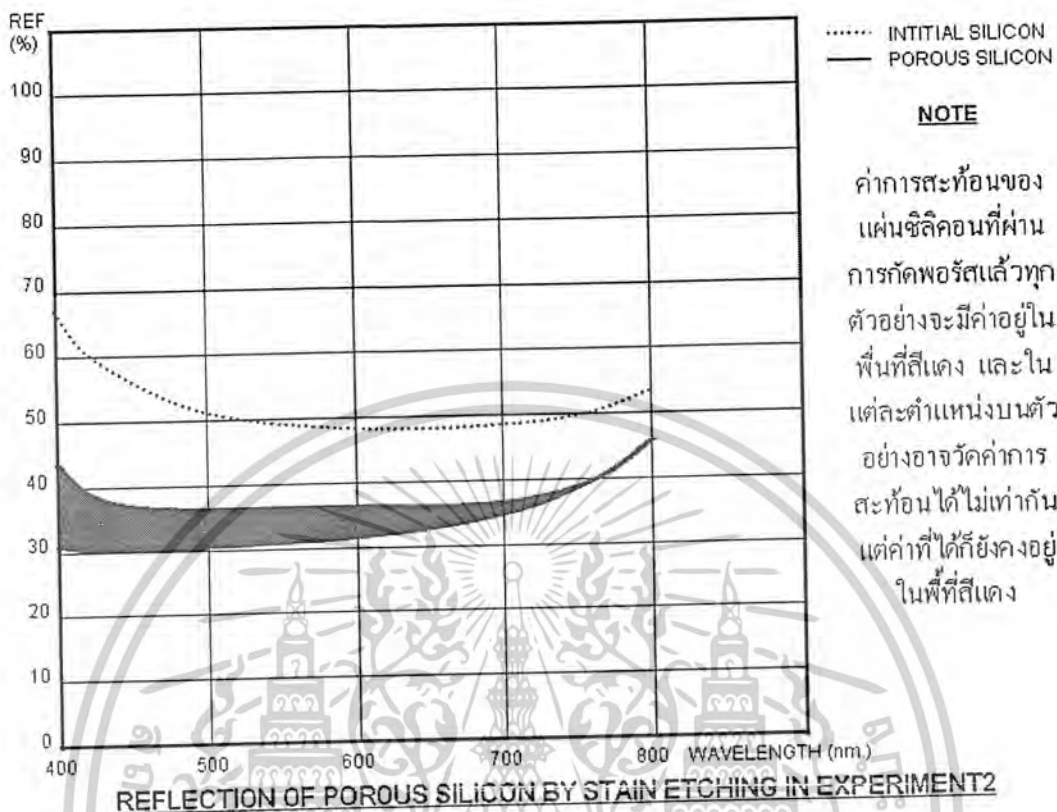
เมื่อนำพอร์ซซิลิคอนที่ได้ไปทำการวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 นาโนเมตร ถึง 800 นาโนเมตร ของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างในช่วงเวลา 2.5 นาที ถึง 10 นาที จะอยู่ที่ประมาณ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร อยู่ที่ประมาณ 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ถึง 800 นาโนเมตร ซึ่งลดลงจากแผ่นซิลิคอนที่ยังไม่ถูกนำไปสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนดังกราฟที่ 7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.10 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากเงื่อนไขเวลาที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

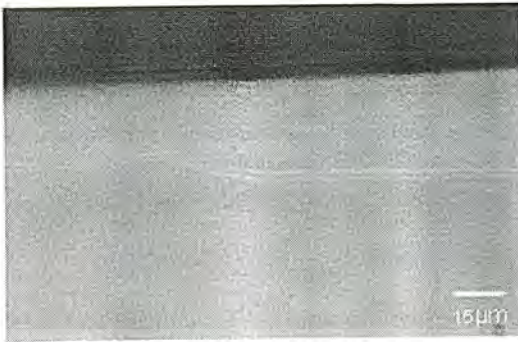


รูปที่ 7.11 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากเงื่อนไขเวลาที่แตกต่างกัน

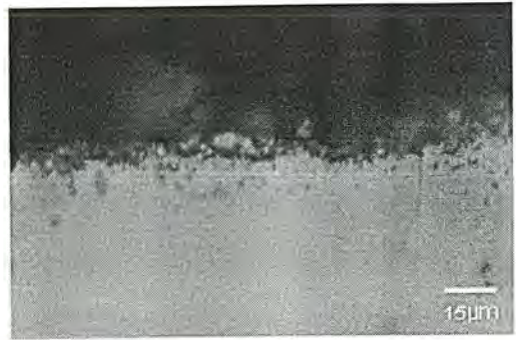
และเมื่อนำพอร์สซิลิคอนที่ได้ไปส่องดูภาพตัดขวาง พบว่าพอร์สซิลิคอนที่ใช้เวลาสร้างนานๆ (ใช้เวลาสร้างในช่วง 3.5 นาที ถึง 10 นาที) ซึ่งจะเกิดหลุมบ่อจำนวนมากมากขึ้นบนพื้นผิว หลุมเหล่านี้กินลึกลงในเนื้อผลึกซิลิคอน ทำให้ผิวหน้าแผ่นผลึกขรุขระมากขึ้น โดยที่ถ้ายังเพิ่มเวลาการสร้างให้นานขึ้นหลุมบ่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเหล่านี้จะยังกินลึกลงในเนื้อผลึกซิลิคอนมากขึ้น เช่นตัวอย่างในรูปที่ 7.9 รูป ข. ภาพตัดขวางขยายของแผ่นซิลิคอนที่ถูกนำไปสร้างชั้นพอร์สด้วยเวลา 5 นาที

ซึ่งในกรณีการนำชั้นพอร์สซิลิคอน ไปประยุกต์ใช้งานเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น หลุมพอร์สเหล่านี้ไม่ควรลงลึกจนถึงขนาดทำลายโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมสี่ซึ่งใช้เวลาในช่วงเปลี่ยนสีจะมีความลึกของหลุมไม่มากจนถึงขนาดทำลายโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) SIDE VIEW (4000X)



(ข) SIDE VIEW (4000X)

รูปที่ 7.12 รูป ก. ภาพตัดขวางขยายของแผ่นซีลิกอนที่ยังไม่ถูกนำไปสร้างชั้นพอร์สซีลิกอน
รูป ข. ภาพตัดขวางขยายของแผ่นซีลิกอนที่ถูกนำไปสร้างชั้นพอร์สซีลิกอนด้วยเวลา 5 นาที

7.3 การศึกษาผลกระทบจากปัจจัยภายนอกระหว่างการสร้างพอร์สซีลิกอน

7.3.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลกระทบของความร้อนในระหว่างการกัดพอร์สซีลิกอน
2. เพื่อศึกษาและสังเกตผลกระทบของแสงในระหว่างการกัดพอร์สซีลิกอน
3. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของคลื่นในระหว่างการกัดพอร์สซีลิกอน
4. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ กับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์

7.3.2.1 การทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1 ผลกระทบของปัจจัยภายนอกต่อเวลาที่ใช้ในการเกิดขึ้นของชั้นพอร์สซีลิกอน เตรียมแผ่นซีลิกอนชนิดเอ็น หนา 111) มีค่าสภาพความต้านทาน 4 โอห์มเซนติเมตร ผิวเรียบมัน ตัดแผ่นซีลิกอน ขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร เพื่อสังเกตความเป็นเอกรูปเดียวกัน (Uniformity) ของพอร์ส ทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน แล้วลอกชั้นซีลิกอนได้ออกให้หมด

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ Di ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองกัดชั้นพอร์สซีลิกอนภายใต้เงื่อนไขภายนอกที่แตกต่างกันคือ

- การสร้างชั้นพอร์สซีลิกอนภายใต้แสงจากหลอด Tungsten ขนาด 100 วัตต์ ส่องห่างจากแผ่นซีลิกอนขณะจุ่มอยู่ในสารละลายประมาณ 5 เซนติเมตร (ความเข้มแสงประมาณ 15,000 lx) ที่อุณหภูมิห้อง

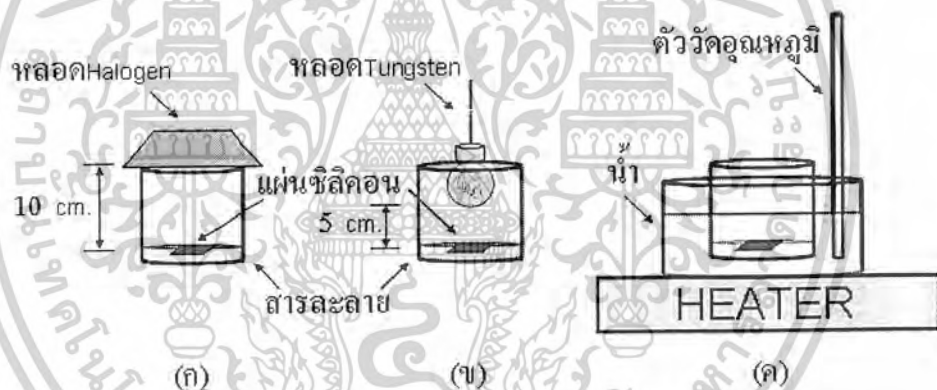
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การสร้างชั้นพอร์สซิติคอนภายใต้แสงจากหลอดHalogen ขนาด150วัตต์ส่องห่างจากแผ่นซิติคอนขณะจุ่มอยู่ในสารละลายประมาณ 10 เซนติเมตร (ความเข้มแสงประมาณ10, 000 lx) ที่อุณหภูมิห้อง

-การสร้างชั้นพอร์สซิติคอนโดยเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้สูงกว่าอุณหภูมิห้อง โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส

-การสร้างชั้นพอร์สซิติคอนโดยเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้สูงกว่าอุณหภูมิห้อง โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และอยู่ภายใต้แสงจากหลอดTungsten ขนาด100วัตต์ส่องห่างจากแผ่นซิติคอนขณะจุ่มอยู่ในสารละลายประมาณ 5 เซนติเมตร

สังเกตผลและเพื่อให้สามารถเห็นผลที่กระทบต่อเวลาการเกิดขึ้นของชั้นพอร์สซิติคอน ได้ชัดเจนขึ้นจะทำการเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขเวลาเดียวกัน และใช้สารละลายเหมือนกัน โดยจะเน้นการวิเคราะห์ในช่วงเวลาเริ่มเกิดเป็นหลัก



รูปที่ 7.13 รูป ก. ภาพการทดลองกักพอร์สซิติคอนภายใต้แสงจากหลอดHalogen

รูป ข. ภาพการทดลองกักพอร์สซิติคอนภายใต้แสงจากหลอด Tungsten

รูป ค. ภาพการทดลองกักพอร์สซิติคอน โดยเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย

7.3.3.1 ผลการทดลองที่ 1

ผลการทดลองพบว่า ลักษณะการเกิดพอร์สบนแผ่นซิติคอนมีความคล้ายคลึงกัน คือ เริ่มเกิดจากบริเวณขอบแผ่น ฟองก๊าซเกิดเป็นปริมาณเล็กน้อยและเป็นฟองขนาดใหญ่กว่ากรณีการสร้างพอร์สบนแผ่นซิติคอนที่มีพื้นผิวขรุขระ พอร์สที่เริ่มเกิดจากขอบแผ่นจะลามเข้าสู่กลางแผ่น แล้วเต็มพื้นที่แผ่นในที่สุด โดยที่พอร์สซิติคอนที่สร้างภายใต้แสงจากหลอด Tungsten ขนาด100วัตต์ และเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย มีการเกิดที่รวดเร็วและลามทั่วบริเวณผิวแผ่นมากที่สุด รองลงมาคือ พอร์สซิติคอนที่สร้างภายใต้แสงจากหลอดHalogen ขนาด150วัตต์ ที่อุณหภูมิห้อง, พอร์สซิติคอนที่สร้างภาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แสงจากหลอด Tungsten ที่อุณหภูมิห้อง และพอร์สซิติคอนที่สร้างโดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียสและใช้แสงห้อง ตามลำดับ

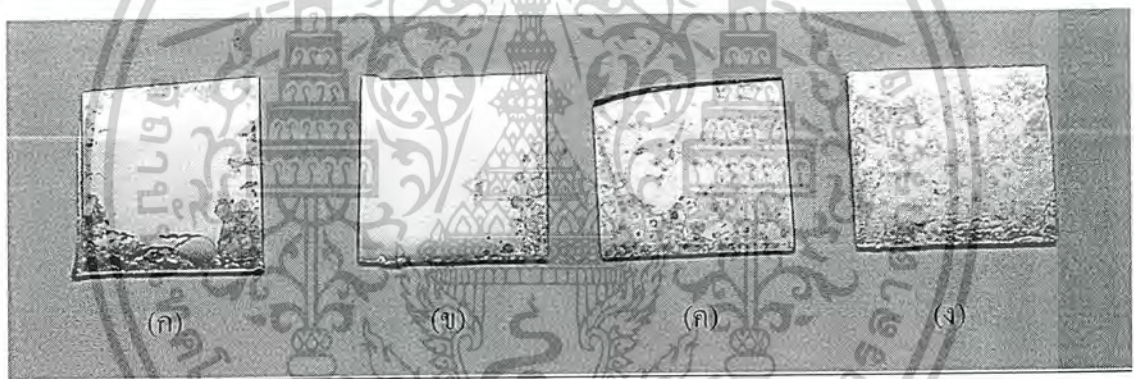
ผลการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิติคอนภายใต้เงื่อนไขภายนอกที่แตกต่างกัน ด้วยเวลา 5 นาที

- พอร์สซิติคอนที่สร้างภายใต้แสงจากหลอด Tungsten ขนาด 100 วัตต์ ที่อุณหภูมิห้อง เกิดพอร์สเฉพาะบริเวณขอบแผ่น

- พอร์สซิติคอนที่สร้างโดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียสและใช้แสงห้อง เกิดพอร์สปริมาณน้อยบริเวณขอบแผ่น

- พอร์สซิติคอนภายใต้แสงจากหลอด Halogen ขนาด 150 วัตต์ ที่อุณหภูมิห้อง เกิดพอร์สเกือบทั่วทั้งแผ่น

- พอร์สซิติคอนที่สร้างโดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และอยู่ภายใต้แสงจากหลอด Tungsten ขนาด 100 วัตต์ เกิดพอร์สทั่วทั้งแผ่นพอดี



รูปที่ 7.14 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิติคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 5 นาที

รูป ก. ภาพพอร์สซิติคอนที่กักภายใต้แสงจากหลอด Tungsten ที่อุณหภูมิห้อง

รูป ข. ภาพพอร์สซิติคอนที่กักภายใต้แสงห้อง และเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย

รูป ค. ภาพพอร์สซิติคอนที่กักภายใต้แสงจากหลอด Halogen ที่อุณหภูมิห้อง

รูป ง. ภาพพอร์สซิติคอนที่กักภายใต้แสงจากหลอด Tungsten และเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย

7.3.2.2 การทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 ผลกระทบของแสงที่มีต่อการสร้างพอร์สซิติคอน

เตรียมแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 111) มีค่าสภาพความต้านทาน 4 โอห์มเซนติเมตร ผิวเรียบมัน ตัดแผ่นซิลิคอน ขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน แล้วลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกให้หมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ D_2O ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

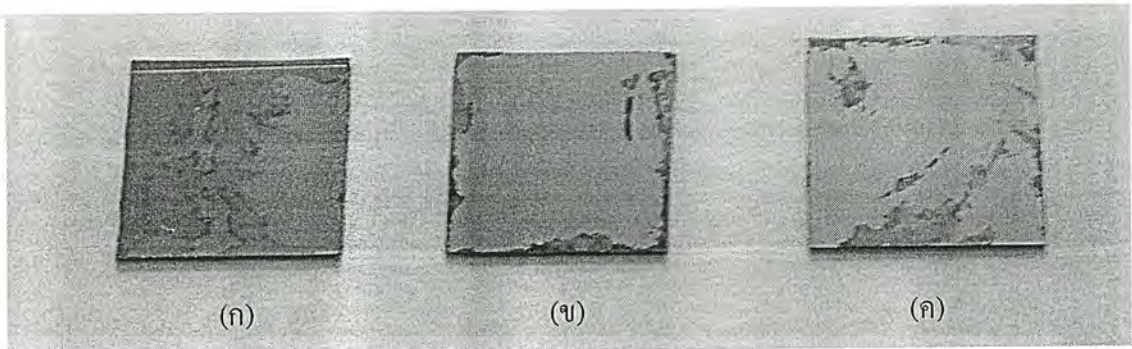
ทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยเปรียบเทียบระหว่างการสร้างชั้นพอร์สภายใต้แสงห้อง การสร้างชั้นพอร์สภายใต้แสงจากหลอดTungsten ขนาด100วัตต์ส่องห่างจากแผ่นซิลิคอนขณะจุ่มอยู่ในสารละลายประมาณ 5 เซนติเมตร และการสร้างชั้นพอร์สภายใต้แสงจากหลอดHalogen ขนาด150วัตต์ส่องห่างจากแผ่นซิลิคอนขณะจุ่มอยู่ในสารละลายประมาณ 10 เซนติเมตร

และเพื่อเร่งการเกิดของชั้นพอร์สซิลิคอนจะทดลองสร้างชั้นพอร์ส จะทำการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส โดยจะเน้นการวิเคราะห์ในช่วงเวลาเริ่มเกิดพอร์สทั่วทั้งแผ่นซิลิคอนเป็นหลัก

7.3.3.2 ผลการทดลองที่ 2

ผลการทดลองพบว่า ลักษณะการเกิดพอร์สบนแผ่นซิลิคอนมีความคล้ายคลึงกัน คือ เริ่มเกิดจากบริเวณขอบแผ่น ฟองก๊าซเป็นฟองขนาดใหญ่กว่ากรณีการสร้างพอร์สบนแผ่นซิลิคอนที่มีพื้นผิวขรุขระ กรณีแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงห้องแม้จะเพิ่มอุณหภูมิสารละลายเพื่อเร่งการเกิดพอร์สแต่อัตราการเกิดและการแพร่กระจายของพอร์สก็ยังมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการกระตุ้นการเกิดด้วยแสงจากหลอดTungstenและแสงจากหลอดHalogen ซึ่งกรณีการกระตุ้นการเกิดด้วยแสงจากหลอดTungsten จะใช้เวลาเพื่อให้เกิดพอร์สทั่วผิวแผ่นเพียง 2.5 นาที และกรณีการกระตุ้นการเกิดด้วยแสงจากหลอดHalogen จะใช้เวลาเพื่อให้เกิดพอร์สทั่วผิวแผ่นเพียง 3 นาที ส่วนกรณีการกระตุ้นการเกิดด้วยแสงห้อง ใช้เวลาจุ่มในสารละลายถึง 8 นาที พอร์สที่ได้ก็ยังกระจายไม่ทั่วแผ่น

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพอร์สที่เวลาเดียวกัน พบว่าพอร์สที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดHalogen จะมีสีส้มและลวดลายมากที่สุด รองลงมาก็คือ พอร์สที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงห้องและพอร์สที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดTungsten ตามลำดับ



รูปที่ 7.15 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนโดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงห้องและเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย โดยที่ใช้เวลาในการจุ่มลงในสารละลายแตกต่างกัน

รูป ก. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 2 นาที

รูป ข. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 3 นาที

รูป ค. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 8 นาที



รูปที่ 7.16 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนโดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอด Tungsten และเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย โดยที่ใช้เวลาในการจุ่มลงในสารละลายต่างกัน

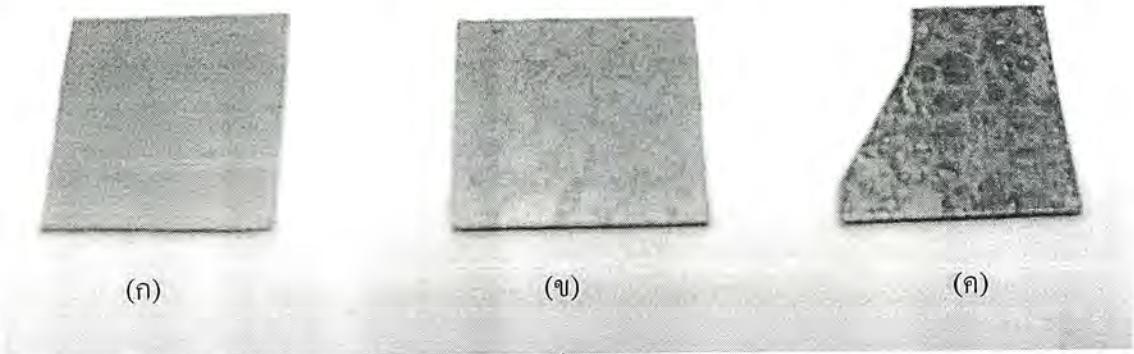
รูป ก. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 1.5 นาที

รูป ข. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 2 นาที

รูป ค. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 2.5 นาที

รูป ง. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 3 นาที

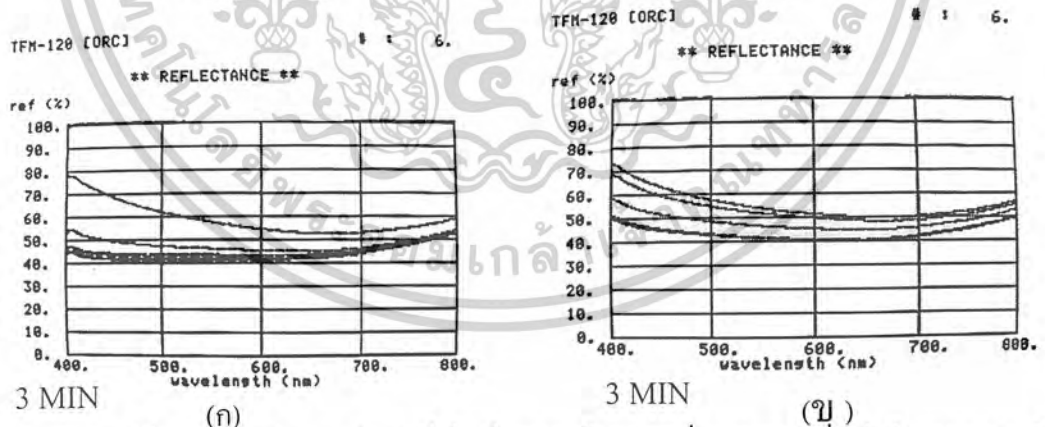
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.17 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอดHalogen และเพิ่มอุณหภูมิสารละลาย โดยที่ใช้เวลาในการจุ่มลงในสารละลายต่างกัน

- รูป ก. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 2 นาที
- รูป ข. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 3 นาที
- รูป ค. จุ่มลงในสารละลาย ใช้เวลา 4 นาที

เมื่อพิจารณาที่อัตราการสะท้อนแสง พบว่าพอร์ซที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจากหลอด Halogen และพอร์ซที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจากหลอด Tungsten มีอัตราการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกัน แต่พอร์ซที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจากหลอด Tungsten จะมีความเป็นเอกรูปทั่วทั้งแผ่น (Uniform) มากกว่าพอร์ซที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจากหลอด Halogen



รูปที่ 7.18 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์ซซิลิคอนที่ถูกกระตุ้นด้วยปัจจัยแสงต่างกัน

- รูป ก. ภาพพอร์ซซิลิคอนที่สร้างภายใต้แสงจากหลอด Tungsten ขนาด100วัตต์
- รูป ข. ภาพพอร์ซซิลิคอนที่สร้างภายใต้แสงจากหลอด Halogen ขนาด150วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2.3 การทดลองที่3

การทดลองที่3 ผลกระทบของอุณหภูมิของสารละลายที่มีต่อการสร้างพอร์สซิลิคอน

เตรียมแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย(111) มีค่าสภาพความต้านทาน0.05โอห์มเซนติเมตร ซึ่งมีผิวหน้าขรุขระจากการนำไปขัดกับผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เกรด 2000 และแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (111) มีมีค่าสภาพความต้านทาน4โอห์มเซนติเมตร ผิวเรียบมัน ตัดแผ่นซิลิคอน ขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน แล้วลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกให้หมด

เตรียมสารละลายที่จะใช้ โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำDi ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารละลายที่อุณหภูมิห้องและการใช้สารละลายที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส

และเพื่อเร่งการเกิดของชั้นพอร์สซิลิคอนจะสร้างชั้นพอร์สภายใต้แสงจากหลอดHalogen ขนาด150วัตต์ส่องห่างจากแผ่นซิลิคอนขณะจุ่มอยู่ในสารละลายประมาณ 10 เซนติเมตร โดยจะเน้นการวิเคราะห์ในช่วงเวลาเริ่มเกิดพอร์สทั่วทั้งแผ่นซิลิคอนเป็นหลัก

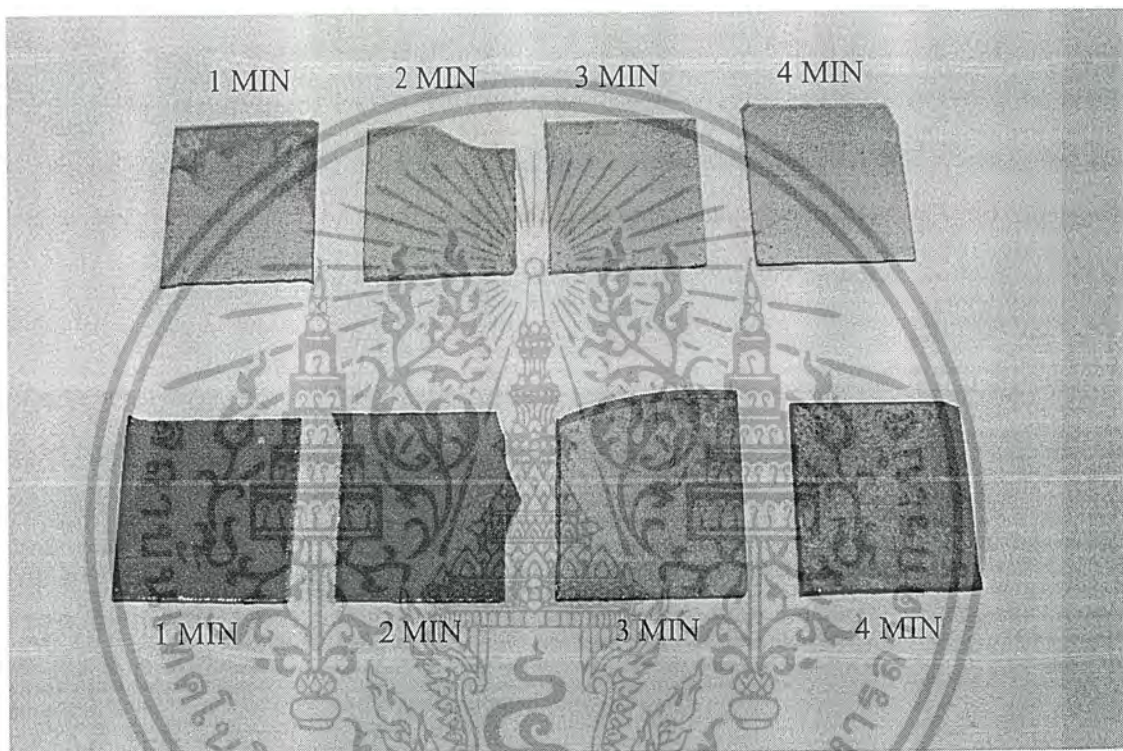
7.3.3.3 ผลการทดลองที่3

ผลการทดลองพบว่า ลักษณะการเกิดพอร์สบนแผ่นซิลิคอนยังคงเหมือนการทดลองที่ผ่านมา คือ กรณีแผ่นขรุขระปรากฏเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กมากจากผิวแผ่นซิลิคอน ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีมากขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนสีของแผ่นซิลิคอน ส่วนกรณีแผ่นซิลิคอนผิวเรียบมัน เมื่อจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลาย หลังจากนั้นประมาณ20นาทีจึงจะปรากฏเกิดฟองก๊าซจากผิวแผ่นซิลิคอน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะคล้ายคลึงกับกรณีแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น แต่จะแตกต่างกันตรงที่ปริมาณฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าและลักษณะของฟองก๊าซจะมีขนาดใหญ่กว่า

ผลการทดลองที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างด้วยสารละลายที่อุณหภูมิห้องกับสารละลายที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ก็คือ สีสนของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างด้วยสารละลายที่อุณหภูมิห้องจะมีสีสนที่เข้มและเห็นได้ชัดเจนกว่า ซึ่งที่สีสนของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างด้วยสารละลายที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสจะมีสีสนที่มีความโปร่งแสงมากกว่า โดยที่ลวดลายของพอร์สซิลิคอนทั้งสองกรณียังคงคล้ายคลึงกันต่างกันก็เพียงความคมชัดของลวดลาย ซึ่งพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างด้วยสารละลายที่อุณหภูมิห้องจะมีความคมชัดมากกว่าพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างด้วยสารละลายที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้จะมีลักษณะการเกิดและลักษณะของพอร์สซิทคอนจะมีความคล้ายคลึงกัน แต่ผลที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดอีกข้อก็คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิทคอนพอร์สที่ถูกสร้างด้วยสารละลายที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าต่ำกว่าพอร์สที่ถูกสร้างด้วยสารละลายที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสอย่างมาก

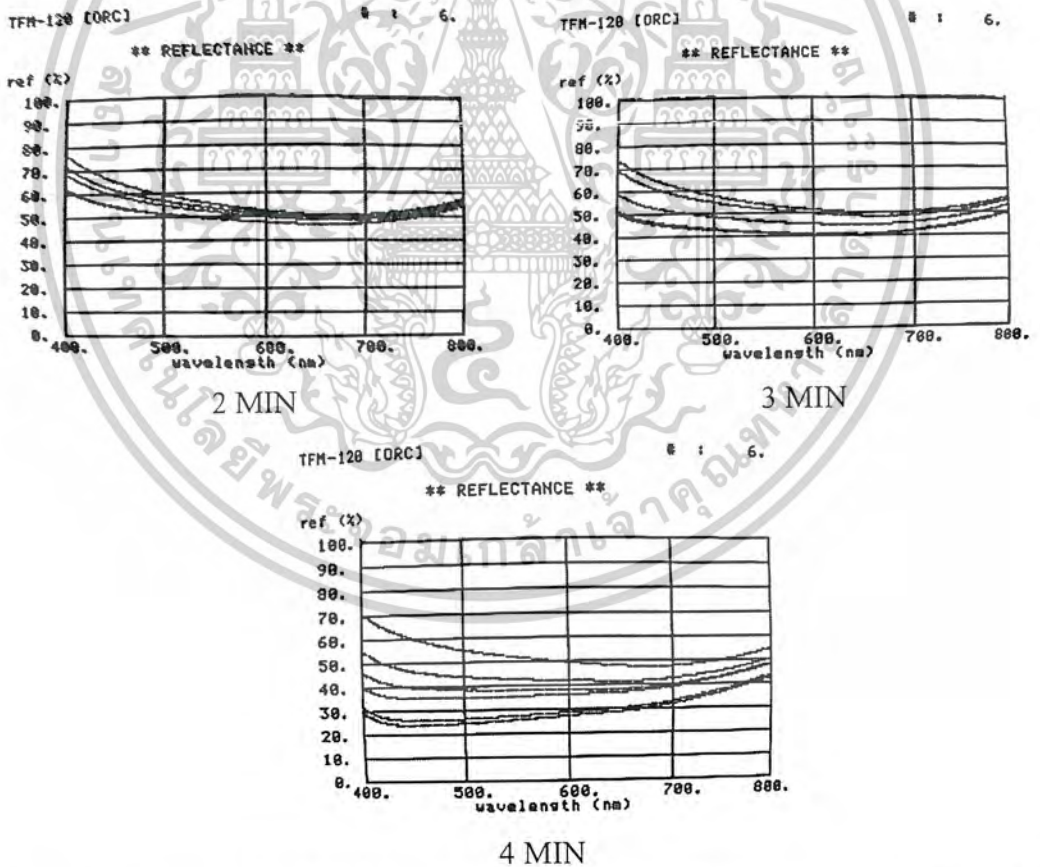


รูปที่ 7.19 ภาพถ่ายเปรียบเทียบสีส่นของแผ่นซิทคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์สซิทคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอดHalogen ซึ่งใช้สารละลายที่มีอุณหภูมิต่างกัน ที่ใช้เวลาในการกัดพอร์สเท่ากับ 1 นาที, 2 นาที, 3 นาที และ 4 นาทีตามลำดับ
แถวบน. จุ่มลงในสารละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
แถวล่าง. จุ่มลงในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

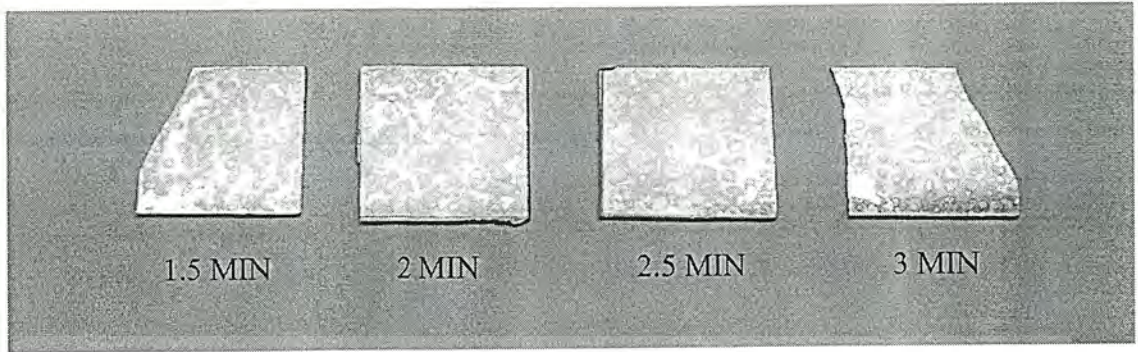


รูปที่ 7.20 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอดHalogen โดยใช้สารละลายที่มีอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ

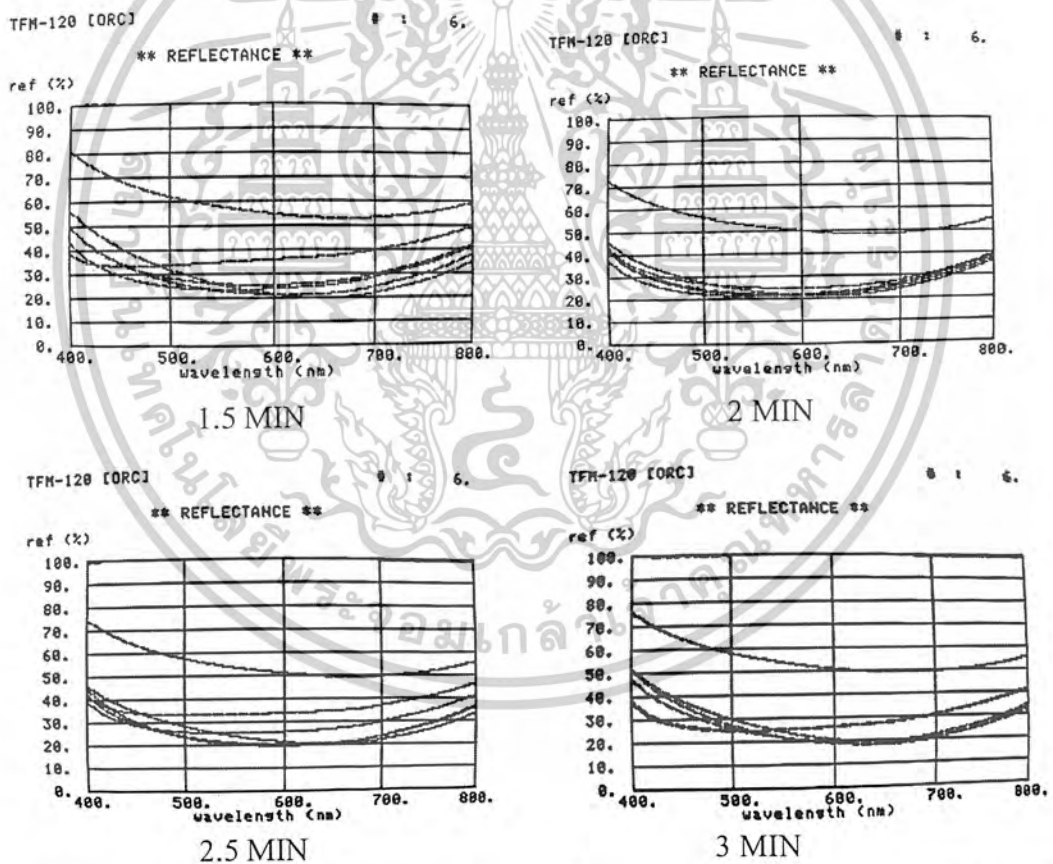


รูปที่ 7.21 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์ซซิลิคอนที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.22 ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์ซซีฟิล์ม โดยการจุ่มลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอดHalogen โดยใช้สารละลายที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 7.23 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์ซซีฟิล์มที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2.4 การทดลองที่4

การทดลองที่4 ผลกระทบของคลื่นที่มีต่อการสร้างพอร์สซิลิคอน

แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (111) ที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.5 โอห์มเซนติเมตร ผิวด้านหยาบ และแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (111) ที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.06 โอห์มเซนติเมตร ผิวหน้าเรียบมัน ตัดแผ่นซิลิคอน ขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน แล้วลอกชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ออกให้หมด และเตรียมแผ่นซิลิคอนชนิดพี ระบาย(111) ที่มีค่าสภาพความต้านทาน 1.36 มิลลิโอห์มเซนติเมตร มีผิวหน้าที่เรียบมัน ผ่านการเจือด้วยฟอสฟอรัส เข้าไปอย่างเข้มข้นด้วยการPre-deposition ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 30 นาที แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 40 นาที แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ออกให้หมด

เตรียมสารละลายที่จะใช้ โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ O_2 ในอัตราส่วน $1:3:5$ ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

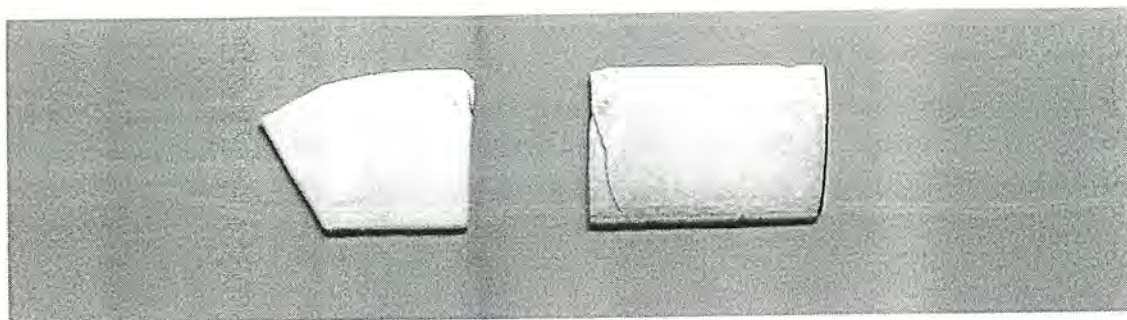
ทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน โดยเปรียบเทียบระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมและการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม สังเกตผล

7.3.3.4 ผลการทดลองที่4

จากการทดลองพบว่า ในระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม ลักษณะการเกิดพอร์สบนแผ่นซิลิคอน ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีน้อยมาก หรือไม่เกิดเลย พร้อมกับการเปลี่ยนสีของแผ่นซิลิคอน ทำให้พอร์สที่ได้เกิดลวดลายวงกลมน้อยมาก เนื่องจากมีฟองก๊าซจับที่ผิวแผ่นน้อยมากนั่นเอง ส่วนสีสันที่ได้ยังคงมีที่สดใสเหมือนการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม

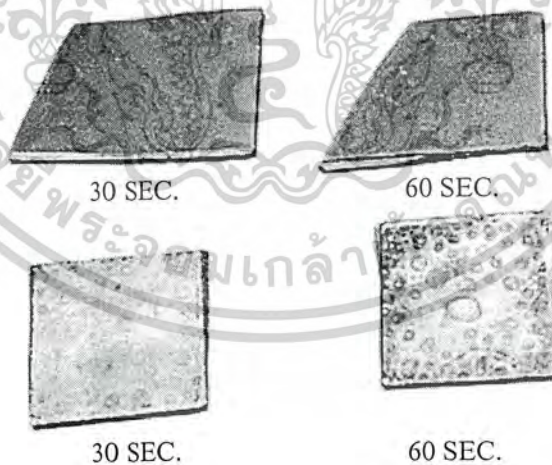
นอกจากนี้ยังพบว่า การกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมจะใช้เวลาในการเริ่มเกิดพอร์สนานกว่าการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม และจะใช้เวลาในช่วงเปลี่ยนสีสันใกล้เคียงกัน ซึ่งการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมจะใช้เวลาในการเปลี่ยนสีสันนานกว่าเล็กน้อย(มีเวลาช่วงเปลี่ยนสีที่นานกว่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.24 ภาพถ่ายพอร์สซิติคอนเปรียบเทียบระหว่างการกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม (เส้นทางซ้ายมือ) กับการกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม (เส้นทางขวามือ) บนแผ่นซิติคอนชนิดอื่น ผิวหน้าเรียบมัน เป็นเวลา 6 นาที พบว่าการกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วมจะใช้เวลาในการเริ่มเกิดพอร์สนานกว่า (6 นาทีแล้วยังไม่ค่อยเกิด) การกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิก

และเมื่อนำพอร์สซิติคอนที่ได้ไปส่องภาพขยาย จะสังเกตเห็นว่า ที่เวลาเท่าๆกัน การกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วมจะมีลักษณะการเกิดของชั้นพอร์สที่บางกว่าการกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม

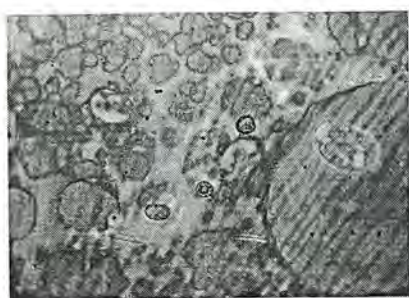


รูปที่ 7.25 ภาพถ่ายพอร์สซิติคอนเปรียบเทียบระหว่างการกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วมและการกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม

แถวบน. การกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม

แถวล่าง. การกักพอร์สซิติคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม

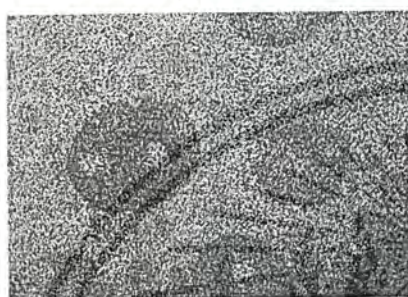
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

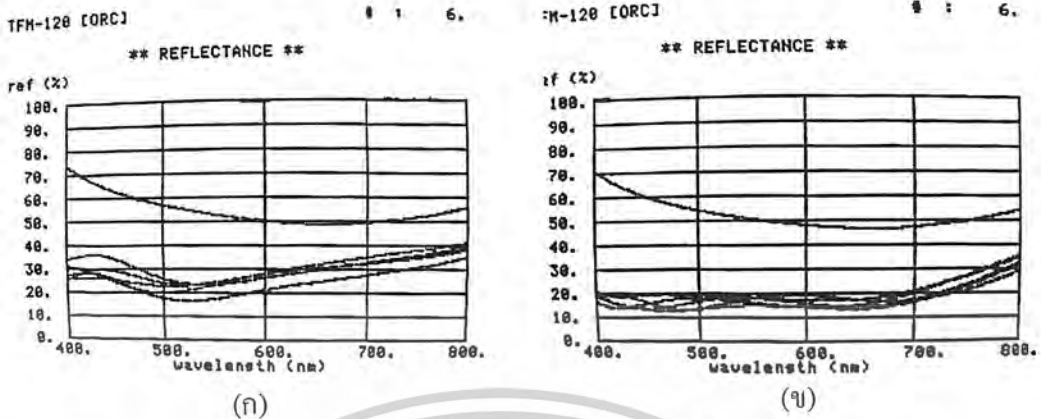


(ง)

รูปที่ 7.26 ภาพขยาย 20 เท่าของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างการกัดพอร์สซิลิกอนด้วยสารละลาย
 ที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคและการกัดพอร์สซิลิกอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิค
 รูป ก. การกัดพอร์สซิลิกอนชนิดผิวหน้าเรียบมัน โดยไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม
 รูป ข. การกัดพอร์สซิลิกอนชนิดผิวหน้าเรียบมัน โดยมีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม
 รูป ค. การกัดพอร์สซิลิกอนชนิดผิวหน้าขรุขระด้าน โดยไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม
 รูป ง. การกัดพอร์สซิลิกอนชนิดผิวหน้าขรุขระด้าน โดยมีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม

เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเท่าๆกัน ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆโดยใช้
 เจ็อนไออื่นๆเหมือนกันพบว่า การกัดพอร์สซิลิกอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้า
 ร่วมจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆต่ำกว่าพอร์สซิลิกอนที่ถูกกัดด้วยสาร
 ละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเกิดพอร์สลดลงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.27 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆเปรียบเทียบระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม (รูป ก.) และการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม(รูป ข.) โดยกัดพอร์สซิลิคอนลงบนแผ่นซิลิคอนชนิดพี ระนาบ(111) มีผิวหน้าที่เรียบมัน ผ่านการเจือด้วยฟอสฟอรัสเข้าไปอย่างเข้มข้น

7.3.2.5 การทดลองที่5

การทดลองที่5 ผลกระทบของอัตราส่วนของสารละลายที่มีต่อการสร้างพอร์สซิลิคอน

เตรียมแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ(111) ค่าสภาพความต้านทาน0.05โอห์มเซนติเมตร ซึ่งมีผิวหน้าขรุขระจากการนำไปขัดกับผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เกรด 2000 และแผ่นซิลิคอนชนิดพี ระนาบ (111) ค่าสภาพความต้านทาน10.5โอห์มเซนติเมตร ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมันวาว ตัดแผ่นซิลิคอนขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน แล้วลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกให้หมด

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำDi ในอัตราส่วนที่ต่างกันคือ 1:3:5, 1:4:5 และ 2:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากสารละลายดังกล่าว สังเกตและเปรียบเทียบผล

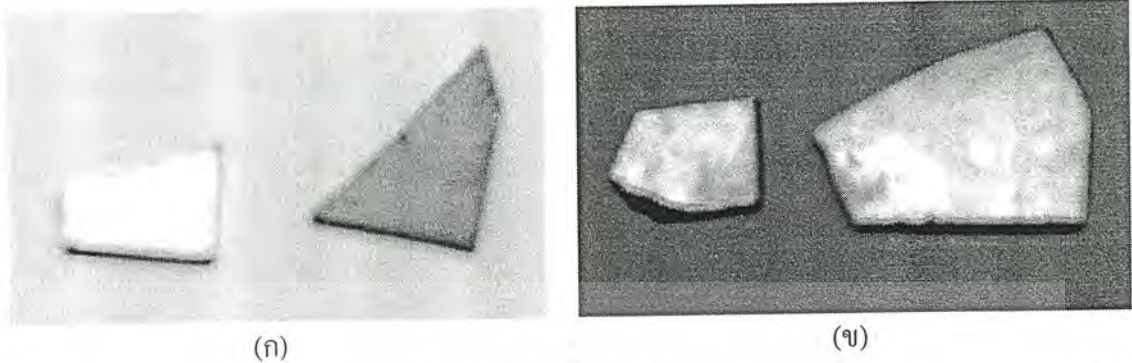
7.3.3.5 ผลการทดลองที่5

จากการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารละลายอัตราส่วน 1:4:5 กับสารละลายอัตราส่วน 2:3:5 ในซิลิคอนทั้งสองชนิด สารละลายอัตราส่วน 1:4:5 จะช่วงใช้เวลาเริ่มเกิดที่สั้นกว่าอย่างมาก (เริ่มเกิดพอร์สเร็วกว่า) เมื่อเข้าสู่ช่วงเปลี่ยนสี สารละลายอัตราส่วน 1:4:5 จะเกิดฟองก๊าซน้อยกว่า และพอร์สที่ได้จะมีสีโทนเทาขาวๆไม่ค่อยมีสีส้ม ต่างจากสารละลายอัตราส่วน 2:3:5 จะเกิดฟอง

ก๊าซมากกว่าและพอร์สที่ได้จะมีสีส้มสดใสคล้ายคลึงกับสารละลายอัตราส่วน 1:3:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

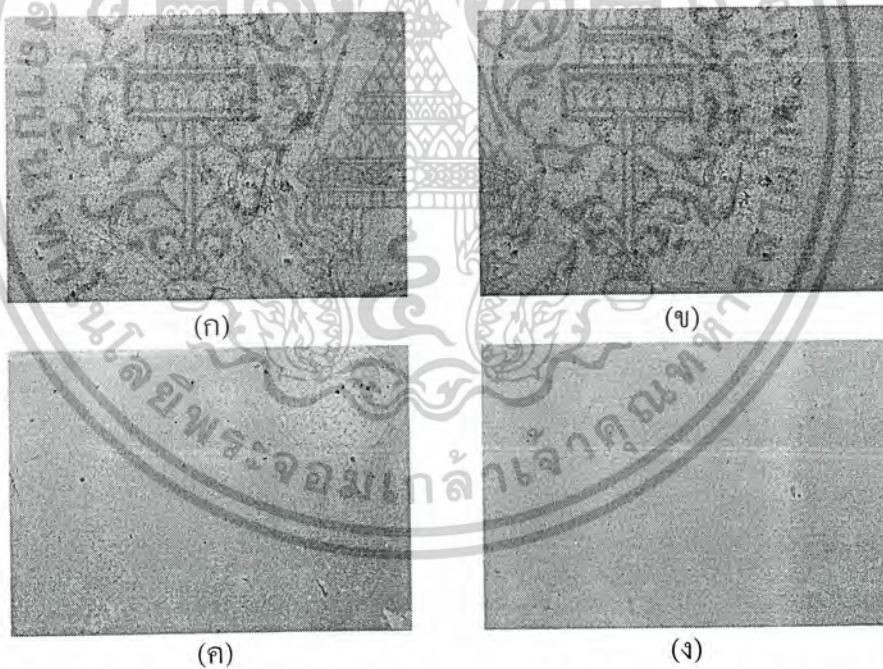


รูปที่ 7.28 ภาพถ่ายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายที่มี

อัตราส่วนของสารละลายต่างกัน ด้วยเวลา 20 นาที

รูป ก. พอร์ซที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 1:4:5

รูป ข. พอร์ซที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 2:3:5



รูปที่ 7.29 ภาพขยายแผ่นซิลิคอนที่ถูกทดลองสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน โดยการจุ่มลงใน

สารละลายที่มีอัตราส่วนของสารละลายต่างกัน ด้วยเวลา 20 นาที

รูป ก. ภาพขยาย 20 เท่าของพอร์ซที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 1:4:5

รูป ข. ภาพขยาย 160 เท่าของพอร์ซที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 1:4:5

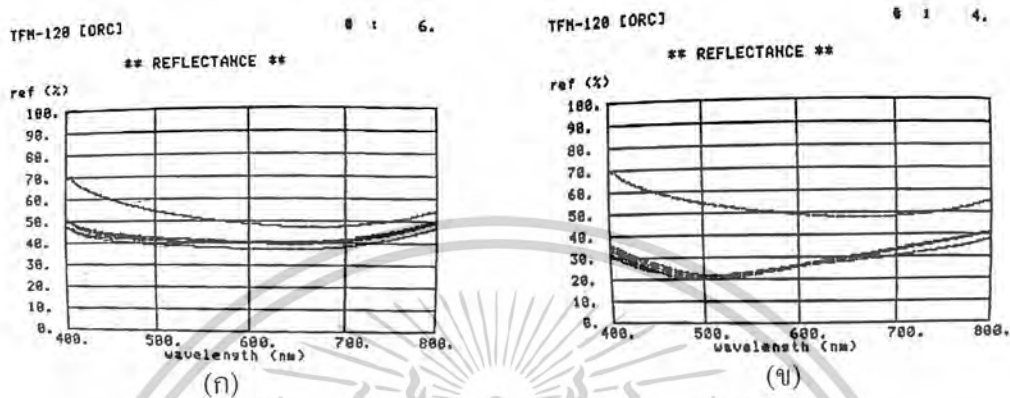
รูป ค. ภาพขยาย 20 เท่าของพอร์ซที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 2:3:5

รูป ง. ภาพขยาย 160 เท่าของพอร์ซที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 2:3:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเท่าๆกัน ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ พอร์สที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 2:3:5 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าสารละลายอัตราส่วน 1:4:5 ตลอดย่านวัด



รูปที่ 7.30 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิลิคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายที่มีอัตราส่วนของสารละลายต่างกัน ด้วยเวลา 20 นาที

รูป ก. พอร์สที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 1:4:5

รูป ข. พอร์สที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ใช้อัตราส่วน 2:3:5

กรณีสารละลายอัตราส่วน 1:3:5 ผลที่ได้เหมือนกับการทดลองที่ 7.1 กรณีแผ่นซิลิคอนชนิดที่ผิวเรียบมัน

7.4 การศึกษาผลกระทบจากปัจจัยภายในระหว่างการสร้างพอร์สซิลิคอน

7.4.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลกระทบจากความราบเรียบของพื้นผิวที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน
2. เพื่อศึกษาและสังเกตผลกระทบจากสภาพความต้านทานที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน
3. เพื่อศึกษาและสังเกตผลกระทบจากสารเจือที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน
4. เพื่อศึกษาและสังเกตผลกระทบจากการเคลือบโลหะลงบนพื้นผิวที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน

ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.2.1 การทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1 ผลกระทบจากความราบเรียบของพื้นผิวที่มีต่อการเกิดพอร์สซิติคอน

จากการทดลองทดลองที่ผ่านมาเป็นที่น่าสังเกตว่าแผ่นซิติคอนที่มีผิวหน้าหยาบด้านขรุขระจะเกิดพอร์สได้รวดเร็วกว่าแผ่นซิติคอนที่มีผิวหน้าเรียบมันเป็นเงาเพื่อให้เห็นผลชัดเจนขึ้นจะทำการทดลองสร้างพอร์สบนผิวหน้าที่มีการขีดเขียนให้เป็นรอย

โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ Di ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ซึ่งจะทดลองใช้แสงจากหลอด Halogen เป็นตัวกระตุ้น กับทดลองใช้แสงห้องเป็นตัวกระตุ้น

ทดลองจุ่มแผ่นซิติคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายแล้วสังเกตผล โดยจะเน้นการพิจารณาช่วงเวลาที่เริ่มเกิดพอร์สเป็นหลัก

7.4.3.1 ผลการทดลองที่ 1

เมื่อจุ่มแผ่นซิติคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลาย บริเวณที่ทำการขีดแผ่นซิติคอนไว้จะเกิดพอร์สก่อนบริเวณอื่น โดยบริเวณที่เป็นรอยลึกที่สุดจะเกิดก่อน เช่นเดียวกับบริเวณที่มีรอยขีดข่วนเล็กๆที่ไม่ได้ตั้งใจสร้างขึ้นและบริเวณด้านขอบแผ่น ซึ่งความแตกต่างของเวลาในการเริ่มเกิดของพอร์สระหว่างพื้นผิวเรียบกับพื้นผิวขรุขระ ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเจนมากในกรณีที่แผ่นซิติคอนมีค่าสภาพความต้านทานสูงๆ หรือมีความเรียบของผิวหน้ามากๆ ซึ่งปกติจะมีช่วงเวลาเริ่มเกิดที่นาน



รูปที่ 7.31 ภาพถ่ายแผ่นซิติคอนที่ถูกขีดลวดลายลงบนผิวก่อนทดลองสร้างพอร์สซิติคอน โดยการจุ่มลงในสารละลายและมีการควบคุมปัจจัยภายนอกที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.2.2 การทดลองที่2

การทดลองที่2 ผลกระทบจากสภาพความต้านทานที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิโคน

เตรียมแผ่นซิลิโคนชนิดพี ระบาย (111) ค่าสภาพความต้านทาน10.5โอห์มเซนติเมตร และแผ่นซิลิโคนชนิดพี ระบาย (111) ค่าสภาพความต้านทาน0.1โอห์มเซนติเมตร ซึ่งแผ่นซิลิโคนทั้งสองมีผิวหน้าเรียบมันวาว

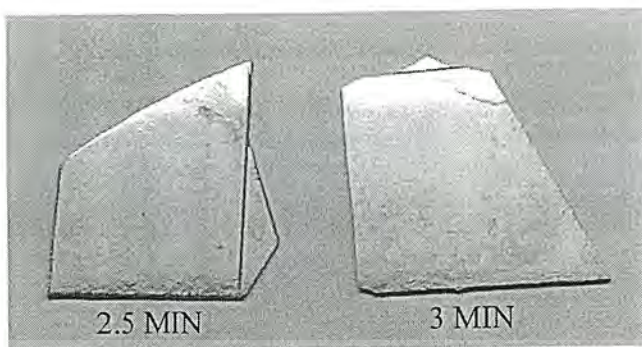
เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำDi ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองกัดพอร์สภายใต้ปัจจัยภายนอกที่เหมือนกัน เพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้สูงกว่าอุณหภูมิห้อง โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และอยู่ภายใต้แสงจากหลอดTungsten ขนาด100วัตต์ส่องห่างจากแผ่นซิลิโคนขณะจุ่มอยู่ในสารละลายประมาณ 5 เซนติเมตร แล้วสังเกตผล

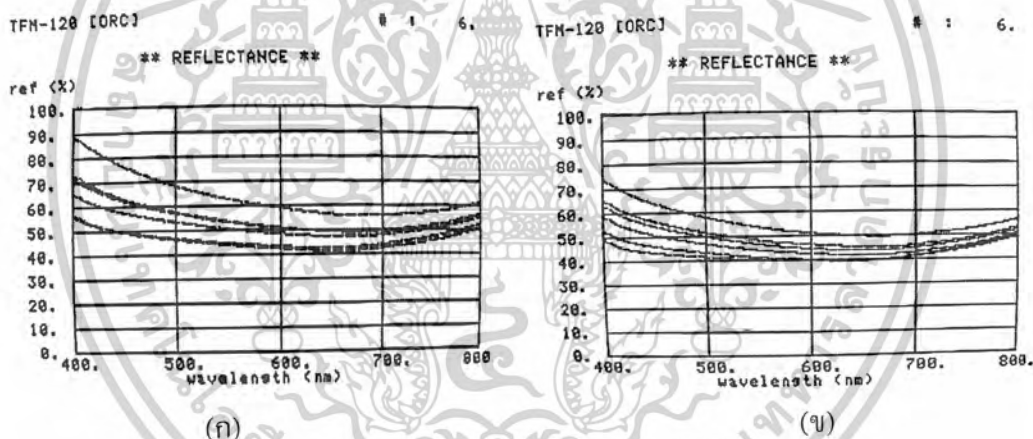
7.4.3.2 ผลการทดลองที่2

พอร์สที่เกิดจากแผ่นซิลิโคนที่มีค่าสภาพความต้านทาน0.1โอห์มเซนติเมตรจะเริ่มเกิดพอร์สหลังจากจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลาประมาณ 1 นาที และจะขึ้นเกิดเต็มแผ่นหลังจากจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลาประมาณ 3 นาที โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเหมือนกับการกัดพอร์สบนแผ่นซิลิโคนที่มีผิวหน้าเรียบมัน และพอร์สซิลิโคนที่ได้มีลักษณะโปร่งใส มีสีอ่อนน้อย และมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในระดับประมาณ40ถึง50เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีการกัดพอร์สบนแผ่นซิลิโคนชนิดเอ็นที่มีระบาย (111) ค่าสภาพความต้านทาน4โอห์มเซนติเมตร ผิวหน้าเรียบมันวาว เพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้สูงกว่าอุณหภูมิห้อง โดยเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และอยู่ภายใต้แสงจากหลอดTungsten ขนาด100วัตต์ส่องห่างจากแผ่นซิลิโคนขณะจุ่มอยู่ในสารละลายประมาณ 5 เซนติเมตรในการทดลองที่2 เรื่องผลกระทบของแสงที่มีต่อการสร้างพอร์สซิลิโคน ซึ่งต่างกันตรงที่ชนิดสารเจือและค่าสภาพความต้านทานเท่านั้น

กรณีแผ่นซิลิโคนที่มีค่าสภาพความต้านทาน10.5โอห์มเซนติเมตร จุ่มลงในสารละลายจนกระทั่งนานเวลาประมาณ 5 นาทีก็ยังไม่เกิดปรากฏการณ์ใดๆ



รูปที่ 7.32 ภาพถ่ายแผ่นซัลไฟคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.1 โอห์มเซนติเมตร ทดลองสร้างชั้นพอร์ซซัลไฟคอนเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากสภาพความต้านทาน โดยจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 2.5 นาทีและ 3 นาทีตามลำดับ



รูปที่ 7.33 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์ซซัลไฟคอนที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.1 โอห์มเซนติเมตร โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และอยู่ภายใต้แสงจากหลอด Tungsten ขนาด 100 วัตต์

- รูป ก. พอร์ซที่ถูกจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 2.5 นาที
- รูป ข. พอร์ซที่ถูกจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.2.3 การทดลองที่3

การทดลองที่3 ผลกระทบจากสารเจือที่มีต่อการเกิดพอร์สซิติคอน

เตรียมแผ่นซิติคอนชนิดพี ระนาบ(111) ที่มีค่าสภาพความต้านทาน 1.36 โอห์มเซนติเมตร มีผิวหน้าที่เรียบมัน ผ่านการเจือด้วยฟอสฟอรัสเข้าไปอย่างเข้มข้นด้วยการPre-deposition ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 30 นาที แล้วนำไปขัดลึกลง ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 40 นาที แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิติคอนไดออกไซด์ออกให้หมด

เตรียมแผ่นซิติคอนชนิดเอ็น ระนาบ(100) ที่มีค่าสภาพความต้านทาน 7.12 โอห์มเซนติเมตร ผ่านการเจือทองคำเข้าไปด้วยการเคลือบชั้นทองคำที่ผิวด้วยเครื่องEvaporatorแล้วนำไปขัดลึกลงและ Quenchingด้วยเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิติคอนไดออกไซด์ออกให้หมด

รูปที่7.34 ภาพถ่ายแผ่นซิติคอนชนิดเอ็นที่ผ่านการเจือด้วยทองคำ สังเกตเห็นบริเวณที่ทองคำย้อนกลับสู่ผิวหน้าของแผ่นซิติคอน และบริเวณที่ทองคำแพร่ลงในเนื้อซิติคอนได้อย่างชัดเจน

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับ กรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำDi ในอัตราส่วน $1:3:5$ ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

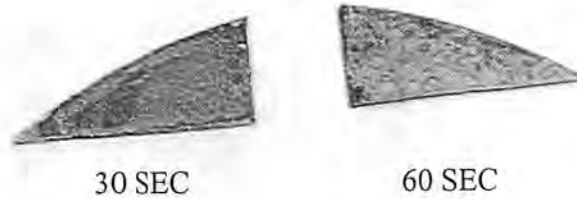
ทดลองจุ่มแผ่นซิติคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายแล้วสังเกตผล

7.4.3.3 ผลการทดลองที่3

กรณีแผ่นซิติคอนชนิดพีที่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัสอย่างเข้มข้นเมื่อทำการกัดชั้นพอร์ส พบว่า มีการเกิดพอร์สที่รวดเร็วมาก ใช้เวลาเริ่มเกิดเพียง 10 วินาที เกิดฟองก๊าซเป็นปริมาณมาก พอร์สที่ได้มีสี สันสดใส ลักษณะเหมือนพอร์สที่สร้างบนซิติคอนพื้นผิวเรียบมันทั่วไป แต่ใช้เวลาสร้างที่น้อยกว่า มากๆ

และเมื่อเปรียบเทียบกับกรัดพอร์สบนแผ่นซิติคอนชนิดพีที่ยังไม่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัส พบว่าแม้จะจุ่มลงในสารละลายนานถึง 1 นาทีก็ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.35 ภาพถ่ายแผ่นซีลิกอนชนิดชนิดพีที่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัสอย่างเข้มข้นแล้วนำมากัดพอร์สซีลิกอน โดยใช้เวลาในการกัดที่น้อยมากที่สุดคือ 30 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับจากซ้ายมือไปขวามือ

กรณีแผ่นซีลิกอนชนิดเอ็นที่ผ่านการเจือด้วยทองคำเมื่อทำการกัดชั้นพอร์ส พบว่าบริเวณที่มีการเจือด้วยทองคำมีการเกิดพอร์สที่รวดเร็วมาก เกิดฟองก๊าซเป็นปริมาณมาก ฟองก๊าซมีขนาดเล็ก และพอร์สที่ได้เป็นจุดดำกระจายทั่วบริเวณที่ทองคำแพร่ลงลึกในเนื้อซีลิกอน

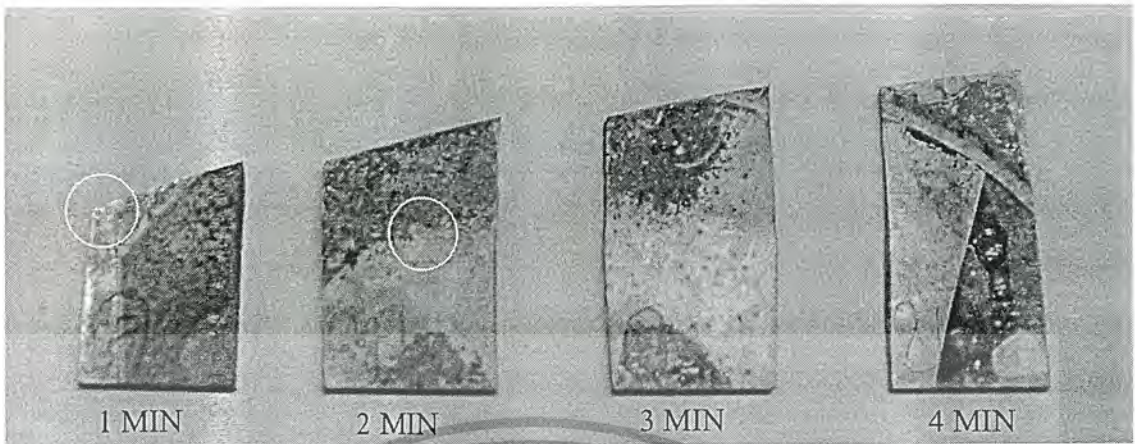
ต่างจากบริเวณที่ไม่ถูกเจือด้วยทองคำมีการเกิดพอร์สที่ช้ากว่า เกิดฟองก๊าซเป็นน้อยมาก ฟองก๊าซมีขนาดใหญ่กว่า แต่พอร์สที่ได้มีสีน้ำตาลใสกว่า

ส่วนบริเวณที่ถูกเจือด้วยทองคำแต่กลับมีทองคำปริมาณมากกลับออกมาที่พื้นผิวซีลิกอนจนสังเกตเห็นได้ชัดเจนนั้น มีการเกิดพอร์สที่รวดเร็ว เกิดฟองก๊าซเป็นปริมาณมาก ฟองก๊าซมีขนาดเล็ก แต่พอร์สที่ได้ไม่เป็นจุดดำ และเป็นโทนสีอ่อนไม่มีสีน้ำตาลใสมากนัก

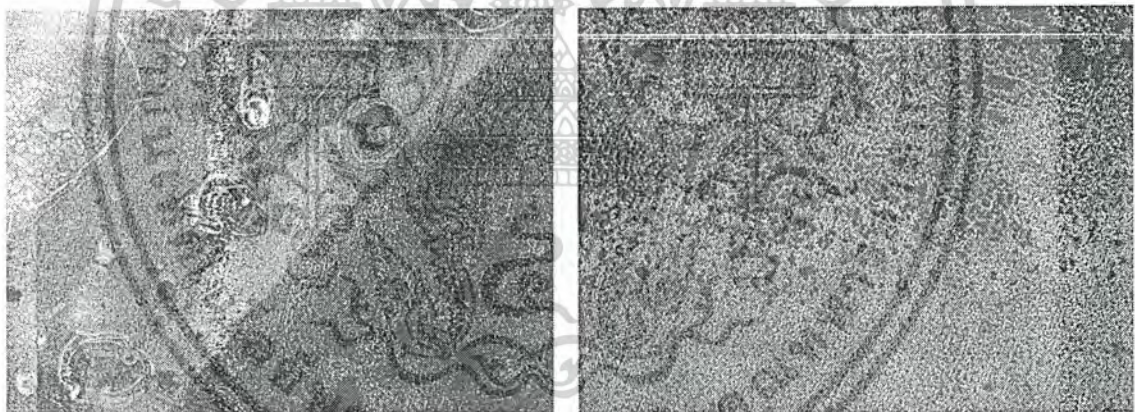
จากผลการทดลองนี้ ทำให้สามารถแบ่งพื้นที่การเกิดพอร์สในรูปแบบที่แตกต่างกันได้ 3 บริเวณ คือ

- บริเวณที่ถูกเจือด้วยทองคำเข้าไปในเนื้อซีลิกอน
- บริเวณที่ถูกเจือด้วยทองคำแต่กลับมีทองคำปริมาณมากกลับออกมาที่พื้นผิวซีลิกอนจนสังเกตเห็นได้ชัดเจน
- และบริเวณที่ไม่มีถูกเจือด้วยทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.36 ภาพถ่ายแผ่นซิงค์คอนซันติคเอนที่ถูกเจือด้วยทองคำแล้วนำมากัดพอร์ซิงค์คอน ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดHalogen โดยใช้เวลาในการกัดต่างกันคือ 1 นาที 2 นาที 3 นาที และ 4 นาที ตามลำดับจากซ้ายมือไปขวามือ จะสังเกตเห็นว่าเกิดพื้นผิว 3 รูปแบบ



รูปที่ 7.37 ภาพขยาย 20 เท่าจากรูปถ่ายแผ่นซิงค์คอนซันติคเอนที่ถูกเจือด้วยทองคำแล้วนำมากัดพอร์ซิงค์คอน
รูป ก. ภาพขยายบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างบริเวณไม่ถูกเจือทองคำกับบริเวณที่ถูกเจือด้วยทองคำ
รูป ข. ภาพขยายบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างบริเวณมีทองคำกลับมาหนาแน่นที่ผิวกับบริเวณที่ทองคำแพร่ซึมในเนื้อซิงค์คอน

จากผลการทดลองนี้ทำให้เกิดแนวคิดในการสร้างพอร์ซิงค์ที่ใช้เวลาน้อย และการเลือกพื้นที่ในการสร้างชั้นพอร์ซิงค์เป็นบางที่ (Selection Area) ซึ่งจะทำให้การทดลองในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.2.4 การทดลองที่4

การทดลองที่4 ผลกระทบจากการเคลือบโลหะลงบนพื้นผิวที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิกอน

เตรียมแผ่นเตรียมแผ่นซิลิกอนชนิดพี ระบาย(111) ที่มีค่าสภาพความต้านทาน $0.06\ \Omega\text{cm}^2$ เซนติเมตร มีผิวหน้าเรียบมัน ทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกให้หมด แล้วนำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ผิวด้วยเครื่องEvaporator

แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น ระบาย (111) มีมีค่าสภาพความต้านทาน $4\ \Omega\text{cm}^2$ เซนติเมตร ผิวเรียบมัน ทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกให้หมด แล้วนำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ผิวด้วยการ Sputtering ให้ชั้นอลูมิเนียมหนา $5000\ \text{Å}$ ปกคลุมผิวหน้าในบางส่วน จากนั้นกัดอลูมิเนียมออกในบางส่วนให้เหลืออลูมิเนียมเพียงบางๆ (เกือบหมด) ด้วยกรดกัดอลูมิเนียม

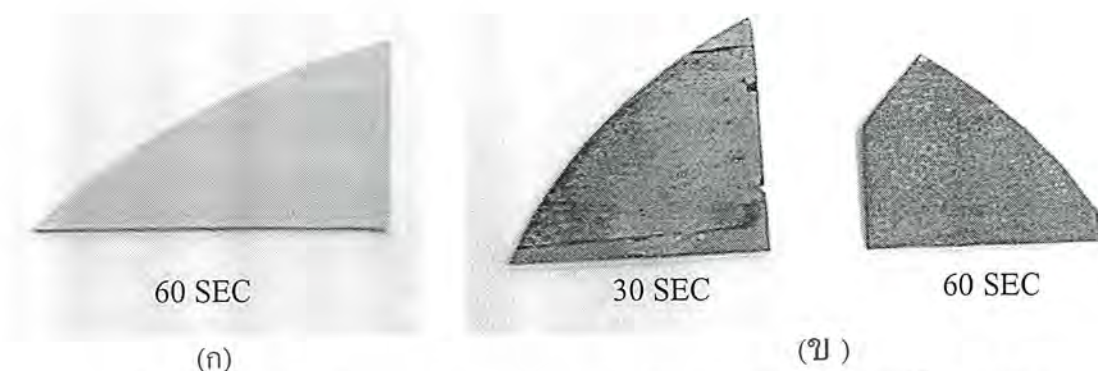
เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ H_2O ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิกอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายแล้วสังเกตผลเทียบกับการทดลองที่3 ผลกระทบจากสารเจือที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิกอน กรณีแผ่นซิลิกอนชนิดพี

7.4.3.4 ผลการทดลองที่4

พบว่า มีการเกิดพอร์สที่รวดเร็วมาก โดยเริ่มจากการละลายของชั้นอลูมิเนียมเมื่อจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลาประมาณ 25 วินาที แล้วทดแทนด้วยการเกิดพอร์สซึ่งจะเกิดขึ้นพร้อมกันทั่วทั้งบริเวณที่ถูกปกคลุมด้วยอลูมิเนียม เกิดฟองก๊าซเป็นปริมาณมาก พอร์สที่ได้มีสีมันสดใส ลักษณะเหมือนพอร์สที่สร้างบนซิลิกอนพื้นผิวเรียบมันทั่วไป แต่ใช้เวลาสร้างที่น้อยกว่ามากๆ และพอร์สที่เกิดกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วแผ่นในบริเวณที่เคยมีการเคลือบด้วยอลูมิเนียม

และเมื่อเปรียบเทียบกับกรัดพอร์สบนแผ่นซิลิกอนชนิดพีที่ยังไม่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัส พบว่าแม้จะจุ่มลงในสารละลายนานถึง 1 นาทีก็ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ



รูปที่ 7.38 ภาพเปรียบเทียบพอร์สที่เกิดจากการเคลือบผิวหน้าซัลฟอนด้วยชั้นอลูมิเนียม
รูป ก. ภาพแผ่นซัลฟอนชนิดพีทีที่ไม่ถูกเคลือบด้วยชั้นอลูมิเนียม แม้จะจุ่มลงในสารละลายนานถึง 1
นาทีก็น่าจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ

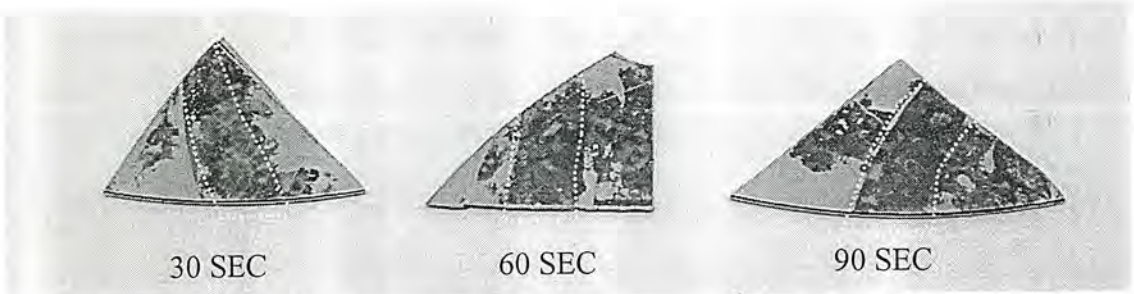
รูป ข. ภาพพอร์สที่เกิดบนแผ่นซัลฟอนชนิดพีทีที่ถูกเคลือบด้วยชั้นอลูมิเนียม ที่เวลาการแช่ในสาร
ละลายนาน 30 วินาทีจะสังเกตเห็นร่องรอยการเริ่มแทนที่อลูมิเนียมด้วยพอร์สซัลฟอน ที่เวลาการแช่
ในสารละลายนาน 60 วินาทีเกิดพอร์สทั่วทั้งบริเวณแผ่น

จากการทดลองกัดพอร์สลงบนพื้นผิวที่มีอลูมิเนียมปกคลุมหนาต่างกันพบว่า
บริเวณที่มีอลูมิเนียมหนาปกคลุมอยู่ มีการเกิดพอร์สที่รวดเร็วมาก โดยเริ่มจากการละลายของ
ชั้นอลูมิเนียมแล้วทดแทนด้วยการเกิดพอร์สซึ่งจะเกิดขึ้นพร้อมกันทั่วทั้งบริเวณที่ถูกปกคลุมด้วย
อลูมิเนียม เกิดฟองก๊าซเป็นปริมาณมาก พอร์สที่ได้มีสีสนิมใส ลักษณะเหมือนพอร์สที่เกิดแทนที่
อลูมิเนียมดังที่ทดลองมาแล้ว

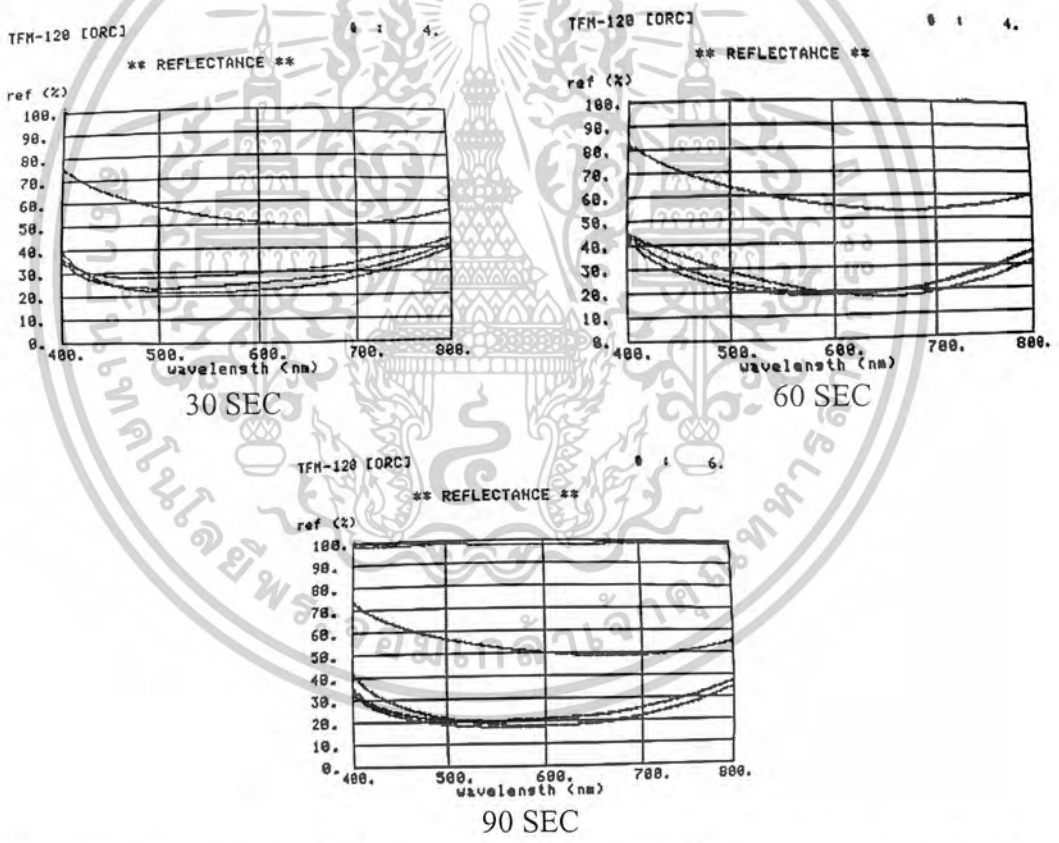
บริเวณที่มีอลูมิเนียมบางๆปกคลุมอยู่ มีการเกิดพอร์สลักษณะเหมือนพอร์สที่เกิดแทนที่
อลูมิเนียมหนา แต่การเกิดพอร์สจะช้ากว่า และพอร์สยังกระจายตัวได้ไม่เต็มพื้นที่

บริเวณที่ไม่มีการเคลือบอลูมิเนียม มีการเกิดพอร์สลักษณะการเกิดเหมือนพอร์สที่เกิดบนพื้น
ผิวเรียบมันทั่วไป โดยพอร์สที่ได้มีลักษณะเหมือนกับพอร์สในบริเวณอื่น แต่การเกิดพอร์สจะช้ากว่า
และมีพอร์สเกิดในบางตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.39 ภาพพอร์สที่เกิดจากการเคลือบผิวหน้าซิลิคอนด้วยชั้นอลูมิเนียมแล้วนำมากัดพอร์ส ด้วยเวลาที่ใช้จุ่มสารละลายที่ต่างกัน โดยที่ภายในกรอบเส้นประคือบริเวณที่เคลือบด้วยอลูมิเนียมหนา 5000 Å บริเวณซ้ายของกรอบเส้นประคือบริเวณที่ไม่ถูกเคลือบด้วยอลูมิเนียม และบริเวณขวาของ กรอบเส้นประคือบริเวณที่ถูกเคลือบด้วยอลูมิเนียมอย่างบาง



รูปที่ 7.40 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของซิลิคอนที่ถูกปกคลุม ด้วยชั้นอลูมิเนียมก่อนการกัดพอร์ส ด้วยเวลาการกัดต่างกัน

จากผลการทดลองนี้ทำให้เกิดแนวคิดในการสร้างพอร์สที่ใช้เวลาน้อย และการเลือกพื้นที่ในการสร้างชั้นพอร์สเป็นบางที่ (Selection Area) ซึ่งจะทำการทดลองในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5 การศึกษาการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซเซิลิกอน (Selection Area)

7.5.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซเซิลิกอน (Selection Area)

7.5.2.1 การทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซเซิลิกอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์ซที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

เตรียมแผ่นซิลิกอนชนิดพี ระนาบ (111) ค่าสภาพความต้านทาน 10.5 โอห์มเซนติเมตร ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมันวาว แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน ลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกให้หมด สร้างชั้นฟิล์มจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 ในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์ซด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ของเซลล์แสงอาทิตย์มาทำการฉายแสง

เตรียมแผ่นซิลิกอนชนิดพี ระนาบ (111) ที่มีค่าสภาพความต้านทาน 1.36 มิลลิโอห์มเซนติเมตร มีผิวหน้าที่เรียบมัน ผ่านการเจือด้วยฟอสฟอรัสเข้าไปอย่างเข้มข้นด้วยการ Pre-deposition ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 30 นาที แล้วนำไปแช่บล็อก ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 40 นาที แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกให้หมด แล้วนำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมโดยแผ่นที่นำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมส่วนหนึ่งจะถูกแบ่งไปทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อีกส่วนไม่ต้องทำการ Sintering

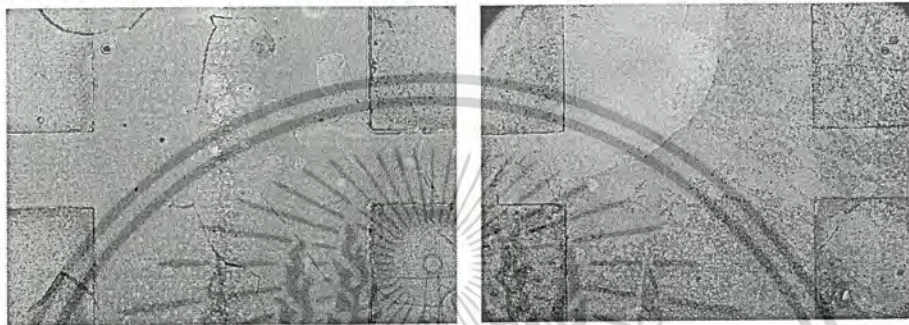
เตรียมแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น ระนาบ (111) ที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.5 โอห์มเซนติเมตร ผิวด้าน ทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกให้หมด แล้วนำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมและทองคำที่ผิวด้วยเครื่อง Evaporator สร้างชั้นป้องกันการเกิดพอร์ซจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 ในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์ซด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ของเซลล์แสงอาทิตย์มาทำการฉายแสงเช่นกัน โดยแผ่นที่นำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมส่วนหนึ่งจะถูกแบ่งไปทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อีกส่วนไม่ต้องทำการ Sintering

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

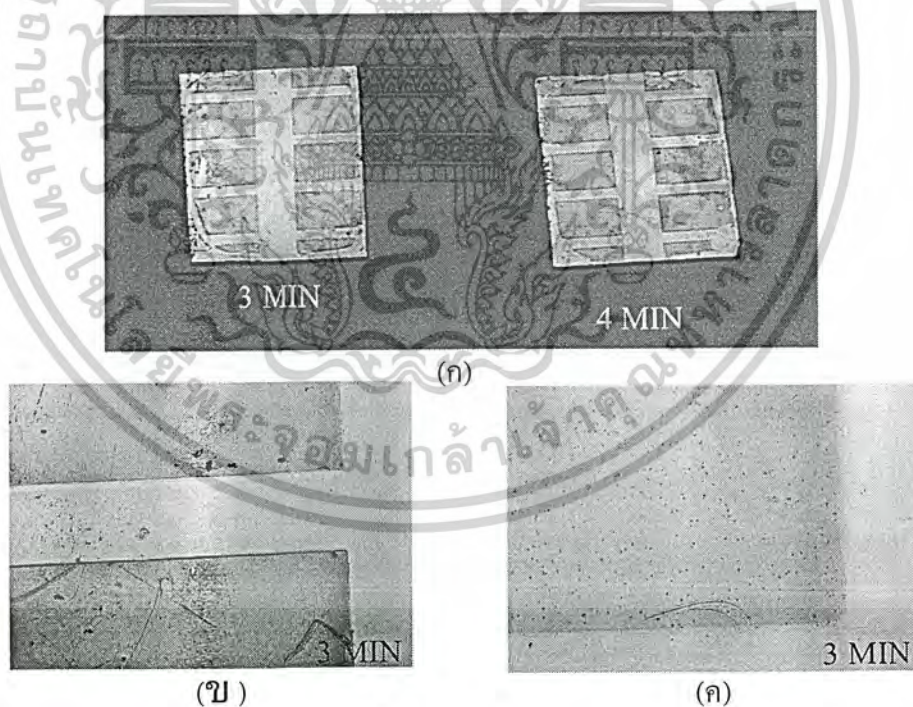
ทดลองจุ่มแผ่นซิลิกอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายแล้วสังเกตผล

7.5.3.1 ผลการทดลองที่ 1

จากผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนด้วย น้ำยาไวแสงชนิดบวบบนแผ่นซิติคอนชนิดพี ค่าสภาพความต้านทาน 10.5 โอห์มเซนติเมตร ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมันวาว โดยการจุ่มแผ่นซิติคอนลงในสารละลายภายใต้แสงจากหลอด Halogen พบว่าเริ่มเกิดพอร์สที่เวลาประมาณ 2 นาที และพอร์สจะกระจายทั่วบริเวณที่กำหนดที่เวลาประมาณ 3 นาที หลังจากจุ่มแผ่นซิติคอนลงในสารละลายประมาณ 2.5 นาที ชั้นป้องกันการกัดจะเริ่มแตกและหลุดออกเป็นชิ้นๆ ดังรูป



รูปที่ 7.41 ภาพชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่เริ่มแตก (ภาพซ้ายมือ) และหลุดออกเป็นชิ้นๆ (ภาพขวามือ)



รูปที่ 7.42 รูป ก. ภาพพอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอน ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์สด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวบ Az เบอร์ 1818 กัดพอร์สภายใต้แสงจากหลอด Halogen เป็นตัวกระตุ้น

รูป ข. ภาพขยาย 20 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 3 นาที

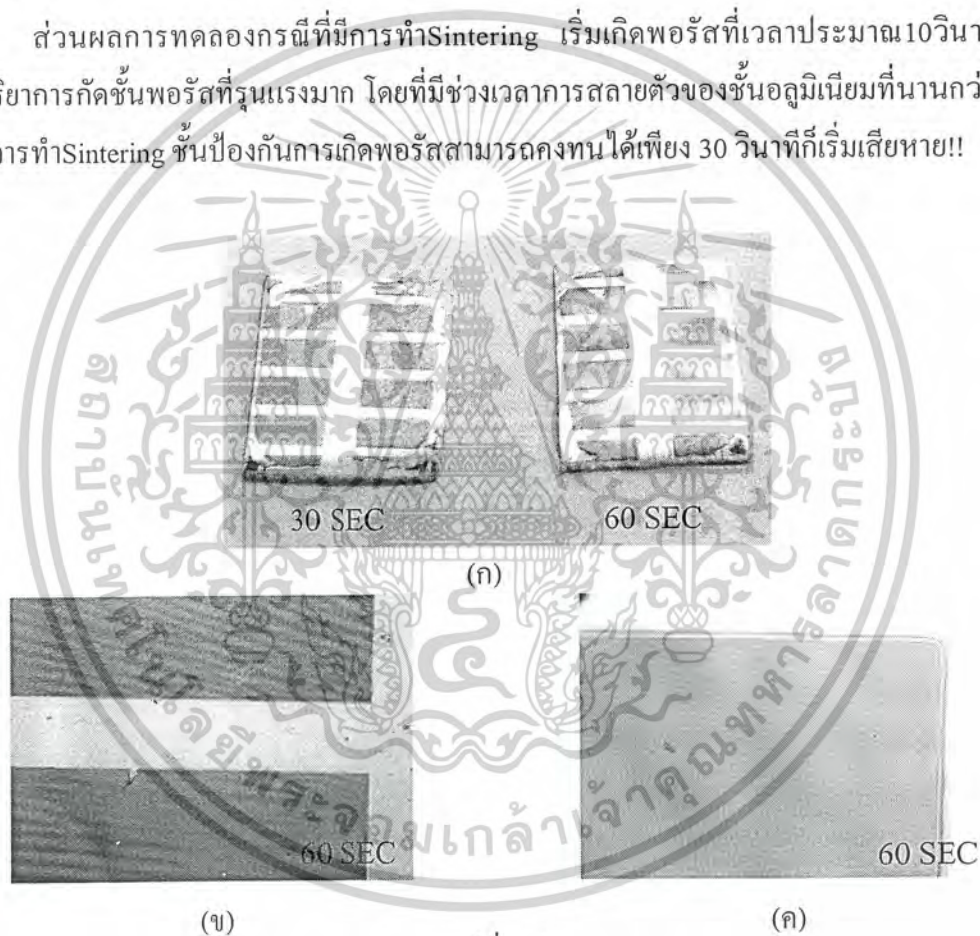
รูป ค. ภาพขยาย 160 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวบนแผ่นซิติคอนชนิดพี มีผิวเรียบมันและมีการเจือด้วยฟอสฟอรัสเข้าไปอย่างเข้มข้นแล้วนำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมและไม่ต้องทำการSintering ลงในสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม ภายใต้แสงห้อง พบว่าเริ่มเกิดพอร์สที่เวลาประมาณ10วินาทีพร้อมกับการสลายตัวของชั้นอลูมิเนียมและพอร์สจะกระจายทั่วบริเวณที่กำหนดทันที!! โดยที่ชั้นป้องกันการเกิดพอร์สยังคงทนได้เกินกว่า 1 นาที ซึ่งพอร์สที่ได้ยังคงมีคุณสมบัติเหมือนกับกรณีที่ไม่มีการสร้างชั้นป้องกันการเกิดพอร์สในการทดลองหัวข้อ

7.4.2.3

ส่วนผลการทดลองกรณีที่มีการทำSintering เริ่มเกิดพอร์สที่เวลาประมาณ10วินาที เกิดปฏิกิริยาการกัดชั้นพอร์สที่รุนแรงมาก โดยที่มีช่วงเวลาการสลายตัวของชั้นอลูมิเนียมที่นานกว่ากรณีที่ไม่มีการทำSintering ชั้นป้องกันการเกิดพอร์สสามารถคงทนได้เพียง 30 วินาทีก็เริ่มเสียหาย!!



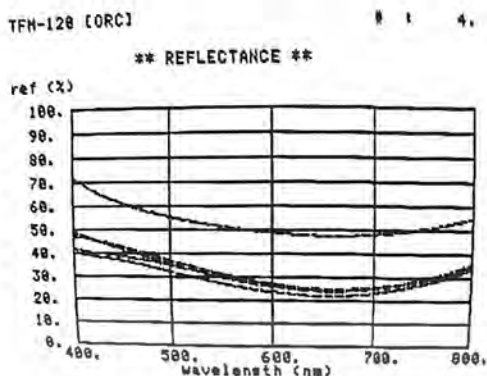
รูปที่ 7.43

รูป ก. ภาพพอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซิติคอนผิวเรียบมีอลูมิเนียมเคลือบที่ผิวหน้า ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์สด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบว Az เบอร์ 1818

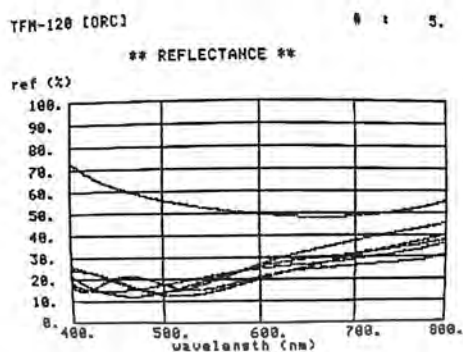
รูป ข. ภาพขยาย 20 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 60 วินาที

รูป ค. ภาพขยาย 160 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 60 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 60 SEC



(ข) 60 SEC

รูปที่ 7.44 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของซิลิคอนที่ถูกรังด้วย UV ซิลิคอนผิวเรียบมีอนุภาคนิวเคลียสเคลือบที่ผิวหน้า ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์ด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก

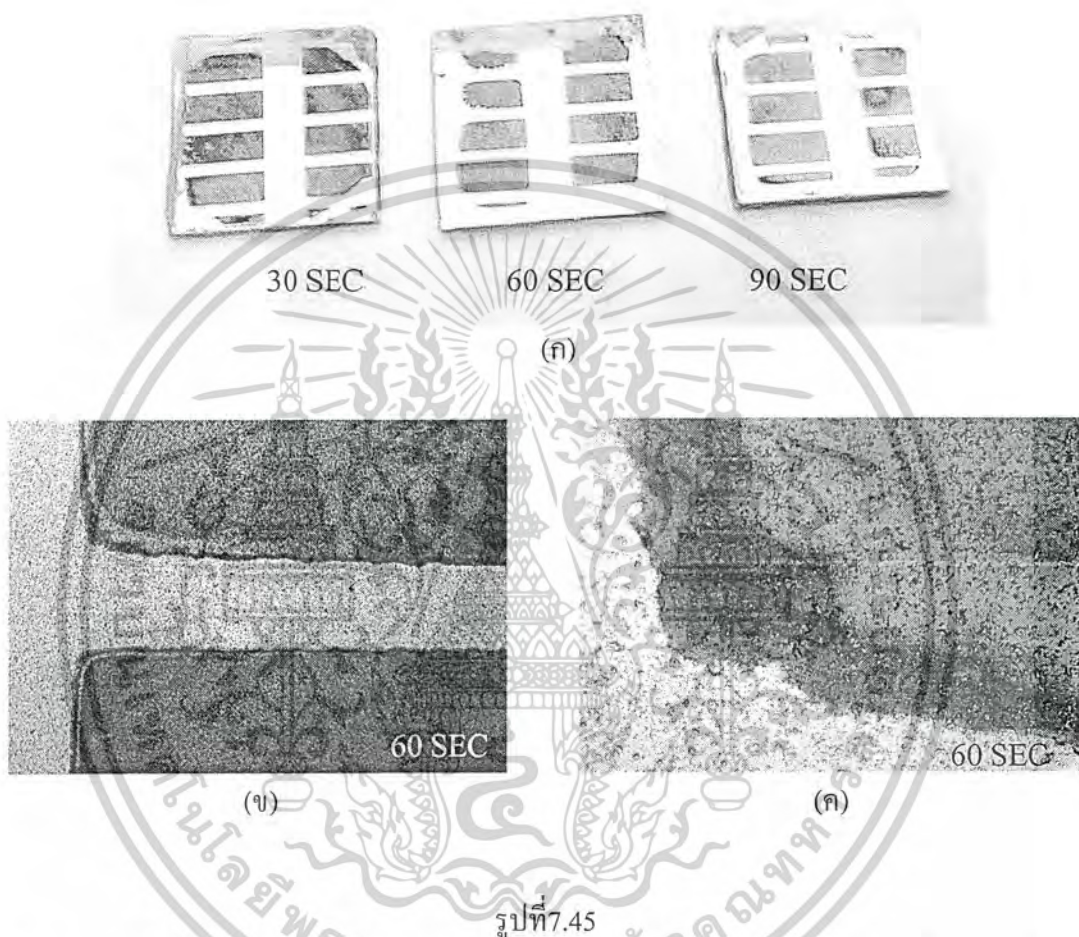
รูป ก. ไม่ต้องทำการSintering ก่อนการกัดพอร์ 60 วินาที

รูป ข. ทำการSintering ก่อนการกัดพอร์ด้วยเวลา 60 วินาที

จากผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซิลิคอนด้วย น้ำยาไวแสงชนิดบวกบน แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น มีผิวด้านหยวนนำไปการเคลือบชั้นอนุภาคนิวเคลียสและไม่ต้องทำการSintering ลงใน สารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม ภายใต้แสงห้อง พบว่าเริ่มเกิดพอร์ที่เวลาประมาณ 10วินาที พร้อมกับการสลายตัวของชั้นอนุภาคนิวเคลียสและพอร์จะกระจายทั่วบริเวณที่กำหนดเกือบจะทันที!! โดยที่ ชั้นป้องกันการเกิดพอร์ยังคงทนได้เกินกว่า 1.5 นาที ซึ่งพอร์ที่ได้ยังคงมีคุณสมบัติเหมือนกับกรณี ที่ไม่มีการสร้างชั้นป้องกันการเกิดในการทดลองหัวข้อ 7.4.2.3

ส่วนผลการทดลองกรณีที่มีการทำSintering เริ่มเกิดพอร์ที่เวลาประมาณ 10วินาที เกิด ปฏิกิริยาการกัดชั้นพอร์ที่รุนแรงมาก ทำให้มีการเปลี่ยนสีสันของพอร์ที่รวดเร็วกว่ากรณีที่ไม่มีการ ทำSintering โดยที่ชั้นป้องกันการเกิดพอร์ยังคงทนได้เกินกว่า 1.5 นาทีเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.45

รูป ก. ภาพพอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซิลิคอนผิวหยาบที่มีลูมิเนียมเคลือบที่ผิวหน้า ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์สด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

รูป ข. ภาพขยาย 20 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 60 วินาที

รูป ค. ภาพขยาย 160 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 60 วินาที ซึ่งจะเห็นการเว้นระยะระหว่างซิลิคอนที่มีลูมิเนียมเคลือบที่ผิวหน้ากับพอร์สซิลิคอนอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 7.46

รูป ก. ภาพพอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซิลิคอนผิวหยาบที่มีอนุภาคน้ำยาเคลือบที่ผิวหน้าแล้วทำการ Sintering ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์สด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เมอร์ 1818

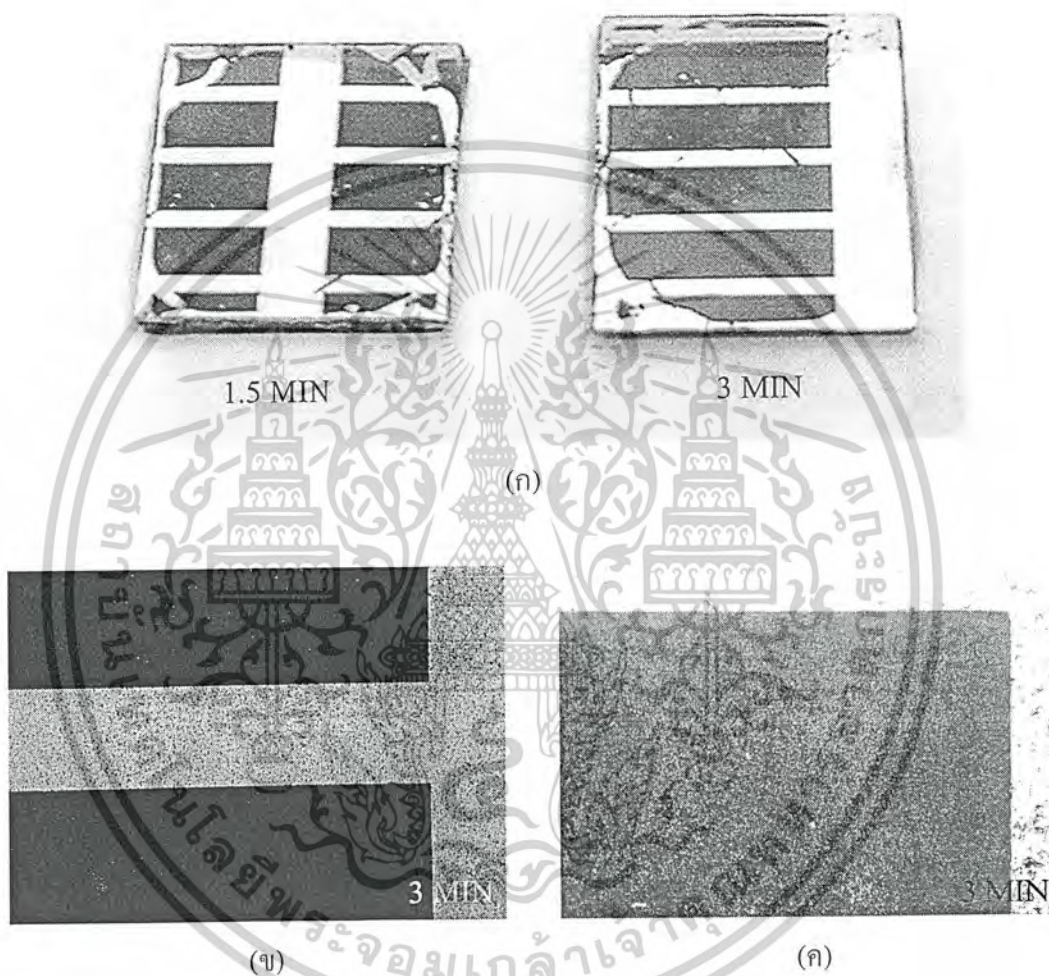
รูป ข. ภาพขยาย 20 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 60 วินาที

รูป ค. ภาพขยาย 160 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 60 วินาที

จากผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนด้วย น้ำยาไวแสงชนิดบวกบนแผ่นซิลิคอนชนิดอื่น มีพิวด้านหยาบนำไปการเคลือบชั้นทองคำและไม่ต้องทำการ Sintering ลงในสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม ภายใต้แสงห้อง พบว่าเริ่มเกิดพอร์สที่เวลาประมาณ 1 นาที แทนที่ชั้นทองคำที่ค่อยๆสลายตัว (สังเกตว่าชั้นทองคำไม่ละลายทันทีเหมือนชั้นอนุภาคน้ำยาเคลือบ) ซึ่งจะเกิดพอร์สเต็มพื้นที่เมื่อจุ่มลงในสารละลายประมาณ 1.5 นาที โดยที่ชั้นป้องกันการเกิดพอร์สยังคงทนได้เกินกว่า 3 นาที ซึ่งพอร์สที่ได้มีลักษณะเป็นหลุมบ่อลึกลงในเนื้อซิลิคอนมีสีโทนดำเข้ม

ส่วนผลการทดลองกรณีที่มีการทำ Sintering เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ทำการ Sintering พบว่า การกัดทะลุชั้นทองคำจะช้ากว่ามากทำให้ใช้เวลาในการเกิดพอร์สจนเต็มพื้นที่ช้ากว่า โดยเกิดพอร์สเต็มพื้นที่เมื่อจุ่มลงในสารละลายประมาณ 2.5 นาที โดยที่ชั้นป้องกันการเกิดพอร์สยังคงทนได้เกินกว่า 3 นาที ซึ่งพอร์สที่ได้มีลักษณะเป็นหลุมบ่อลึกลงในเนื้อซิลิคอนมีสีโทนดำเข้มเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



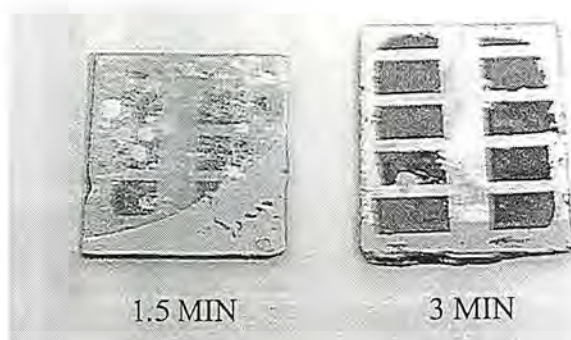
รูปที่ 7.47

รูป ก. ภาพพอร์สที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนฉลิกอนผิวหยาบที่มีทองคำเคลือบที่ผิวหน้า ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์สด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

รูป ข. ภาพขยาย 20 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 3 นาที

รูป ค. ภาพขยาย 160 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 7.48

รูป ก. ภาพครัสต์ที่เกิดเฉพาะในพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สบนซีลิกอนผิวหยาบที่มีทองคำเคลือบที่ผิวหน้าทำการ Sintering ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์สด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

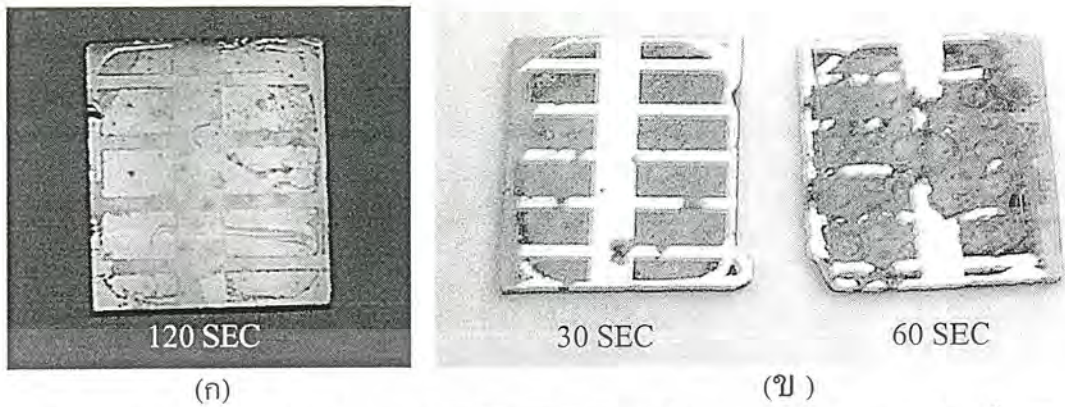
รูป ข. ภาพขยาย 160 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 1.5 นาที

รูป ค. ภาพขยาย 160 เท่า ของตัวอย่างที่ใช้เวลากัด 3 นาที

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกรณีที่มีการ Sintering กับ ไม่มีการ Sintering พบว่า กรณีที่ไม่มีการ Sintering ชั้นป้องกันการเกิดพอร์สจะมีความคงทนกว่ากรณีที่มีการ Sintering และเมื่อเปรียบเทียบกรณีที่สร้างชั้นป้องกันการเกิดพอร์สบนพื้นผิวเรียบมันกับพื้นผิวด้านขรุขระ พบว่า กรณีสร้างชั้นป้องกันการเกิดพอร์สบนพื้นผิวด้านขรุขระชั้นป้องกันการเกิดพอร์สจะมีความคงทนกว่ากรณีสร้างชั้นป้องกันการเกิดพอร์สบนพื้นผิวเรียบมันมาก

ซึ่งชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่ถูกสร้างขึ้นในการทดลองครั้งนี้สามารถทนต่อสารละลายได้สูงสุดประมาณ 3 นาทีเท่านั้น ก่อนที่จะเริ่มหลุดลอกออก ซึ่งความทนทานของชั้นป้องกันการเกิดพอร์สต่อสารละลายว่าสามารถทนทานได้เท่าใดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ คุณภาพของน้ำยาไวแสง ความหนาของชั้นฟิล์ม การยึดเกาะระหว่างชั้นฟิล์มกับแผ่นซีลิกอน ลักษณะพื้นผิวของแผ่นซีลิกอน ลักษณะของพอร์สที่เกิด ความหนาของโลหะที่จะกัดพอร์สผ่านลงไป ความรุนแรงของปฏิกิริยาการเกิดชั้นพอร์ส ความรุนแรงของสารละลายที่มีต่อชั้นฟิล์ม และกระบวนการที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซีลิกอน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.49 ภาพความเสียหายในการเลือกพื้นที่สร้างพอร์ส ซึ่งป้องกันการเกิดพอร์สด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก Az เบอร์ 1818 ซึ่งมีสาเหตุต่างกัน

รูป ก. ภาพความเสียหายที่เกิดจากการยึดเกาะระหว่างชั้นฟิล์มกับแผ่นซิลิคอนไม่ดี

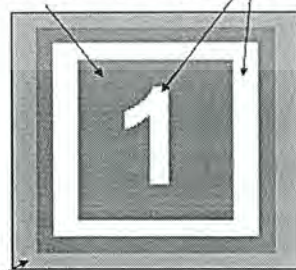
รูป ข. ภาพความเสียหายที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดชั้นพอร์สที่รุนแรง(กัดชั้นพอร์สลงในชั้นอลูมิเนียมที่ผ่านการSinteringลงบนแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีการเจือฟอสฟอรัสอย่างเข้มข้น)

7.5.2.2 การทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยการใช้ความต่างของช่วงเวลาการเกิดพอร์ส

เตรียมแผ่นซิลิคอนชนิดพี ระบาย (111) ค่าสภาพความต้านทาน 1.36 มิลลิโอห์มเซนติเมตร ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมันวาว ผ่านการเจือด้วยฟอสฟอรัสเข้าไปอย่างเข้มข้น ในบริเวณที่ต้องการกัดพอร์สด้วยการPre-deposition ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 30 นาที แล้วนำไปจับลึ้ก ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 40 นาที แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ออกให้หมดยกเว้นบริเวณขอบแผ่น ดังรูป

พื้นที่ซิลิคอนชนิดพี พื้นที่เจือฟอสฟอรัส



พื้นที่ซิลิคอน ไดออกไซด์

รูปที่ 7.50 ภาพการเตรียมแผ่นสำหรับการทดลอง

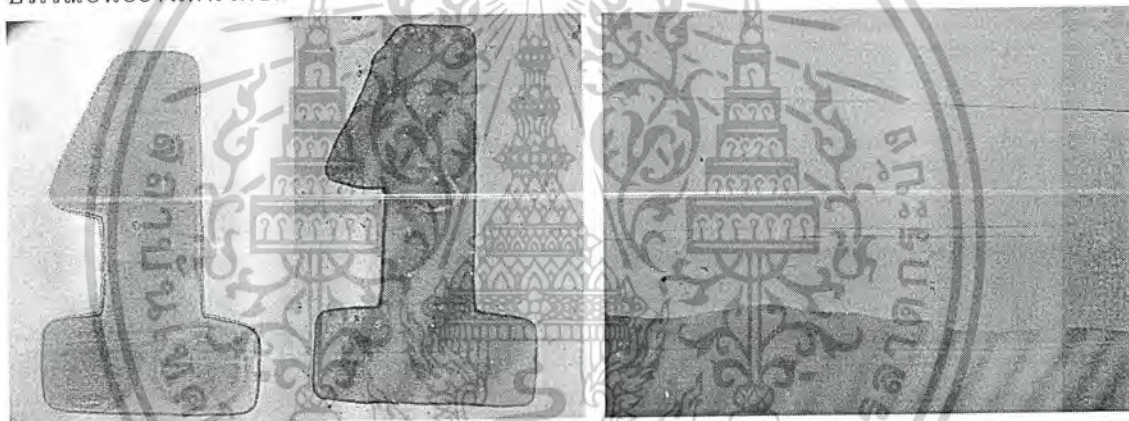
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำD₁ ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วมเพื่อชะลอปฏิกิริยา โดยที่ใช้เวลาในการจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลายในช่วงที่พื้นที่ที่ถูกเจือสารฟอสฟอรัสอย่างเข้มข้นเกิดพอร์สได้เต็มที่แต่พื้นที่บริเวณฐานรองชนิดพียงไม่เกิด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านมา(ประมาณ10ถึง30วินาที) แล้วสังเกตผล

7.5.3.2 ผลการทดลองที่2

ผลทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายเป็นเวลา 20 วินาที พบว่าเกิดพอร์สเต็มพื้นที่ที่ถูกเจือสารฟอสฟอรัสอย่างเข้มข้น พอร์สที่เกิดมีสีสนดใสและมีขอบเขตชัดเจนแยกจากบริเวณอื่นอย่างเห็นได้ชัด



(ก)

(ข)

รูปที่7.51 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยการใช้ความต่างของช่วงเวลาการเกิดพอร์ส
รูป ก. ภาพการเกิดพอร์สในพื้นที่ๆผ่านการเจือด้วยฟอสฟอรัสเข้าไปอย่างเข้มข้น ซึ่งมีซิลิคอนชนิดพียงซึ่งเป็นฐานรอง

รูป ข. ภาพการเกิดพอร์สในพื้นที่ๆผ่านการเจือด้วยฟอสฟอรัสเข้าไปอย่างเข้มข้น ซึ่งมีซิลิคอนชนิดพียงซึ่งเป็นฐานรอง มีซิลิคอนไดออกไซด์หนา1000 Å และ5000 Å เป็นขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 การศึกษาปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) ของพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากการกัดย้อมสี

7.6.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตการเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้น

7.6.2 การทดลอง

เตรียมแผ่นซิติคอนที่สร้างพอร์สบนผิวหน้าแล้วจากการทดลองที่ผ่านมา นำมารับรังสีอัลตราไวโอเลต(UV) ซึ่งแหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตจะใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตกับหลอด Blacklight มาทำการทดลองเป็นซึ่งแหล่งกำเนิดรังสี แล้วสังเกตผล

7.6.3 ผลการทดลอง

พอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นสามารถเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต(UV) ทั้งจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตและหลอดBlacklight โดยแสงที่เปล่งที่ออกมาจะมีความเข้มมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลต ที่พอร์สซิติคอนได้รับ ซึ่งหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตจะให้รังสีอัลตราไวโอเลตที่ความเข้มขึ้นกว่าหลอดBlacklightมาก แสงที่เปล่งออกมาส่วนมากเป็นแสงโทนสีแดงและส้ม ส่วนแสงโทนสีม่วงจะพบในปริมาณน้อยและเท่าที่พบแทรกตัวเป็นจุดๆอยู่ในพอร์สซิติคอนบางแผ่นเท่านั้น ซึ่งจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนภายใต้หลอดรังสี อัลตราไวโอเลต



รูปที่ 7.52 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สที่สร้างจากการกัดย้อมสี

รูปซ้ายมือ ภาพถ่ายการเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สภายใต้หลอดรังสีUV

รูปขวามือ ภาพถ่ายการเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สภายใต้หลอดรังสีBlacklight

ข้อควรระวัง!! รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นอันตรายโดยตรงต่อกระจกตาและผิวหนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.7 การศึกษาผลกระทบจากการSinteringภายหลังการสร้างพอร์สซิลิโคน

7.7.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลกระทบจากการSinteringภายหลังการสร้างพอร์สซิลิโคน

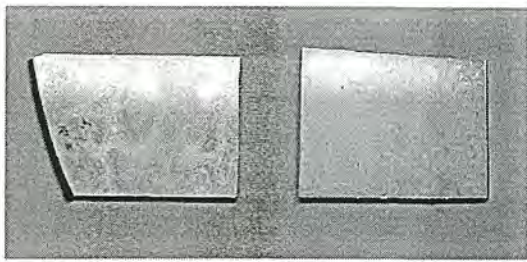
7.7.2 การทดลอง

นำแผ่นซิลิโคนที่ได้สร้างพอร์สไว้แล้วจากการทดลองหัวข้อที่ 7.1 (แผ่นซิลิโคนชนิดเอ็น ระบาย(111) ค่าสภาพความต้านทาน0.05โอห์มเซนติเมตร ซึ่งมีผิวหน้าขรุขระ และแผ่นซิลิโคนชนิดพี ระบาย(111) ค่าสภาพความต้านทาน10.5โอห์มเซนติเมตร ซึ่งมีผิวหน้าเรียบมันวาว) จุ่มลงในสารละลายสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำDi ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นเวลา 20 นาที ได้พอร์สซิลิโคนที่มีคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์เปล่งแสงสีแดง ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต) มาผ่านขบวนการSintering ที่อุณหภูมิ475 องศาเซลเซียส เป็นเวลา10 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 1000 cc/min

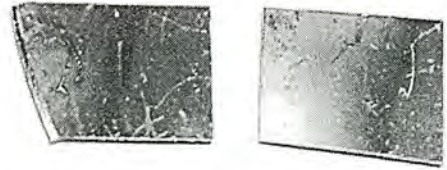
สังเกตผลหลังจากการSintering

7.7.3 ผลการทดลอง

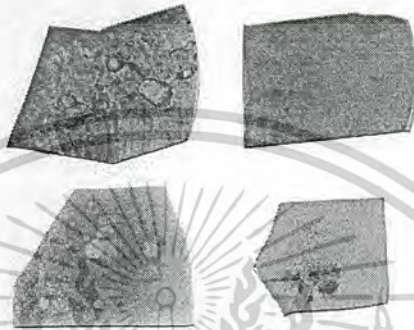
จากผลการทดลอง พบว่าพอร์สซิลิโคนที่ผ่านขบวนการSintering ที่อุณหภูมิ475 องศาเซลเซียส เป็นเวลา10 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 1000 cc/min จะมีสีส้มที่ชัดเจนกว่าเดิมและมีผิวหน้าขุ่นเป็นฝ้าไม่สดใสซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจน และเมื่อทำการทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์อีกครั้งปรากฏว่า พอร์สซิลิโคนที่ผ่านขบวนการSinteringสูญเสียความสามารถในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7.53

รูป ก. ภาพถ่ายพอร์สซิติคอนที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบมันก่อนทำการ Sintering

รูป ข. ภาพถ่ายพอร์สซิติคอนที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบมันหลังทำการ Sintering

รูป ค. ภาพถ่ายพอร์สซิติคอนที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนผิวขรุขระก่อนทำการ Sintering (แผ่นซ้ายมือ)

และพอร์สซิติคอนที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนผิวขรุขระหลังทำการ Sintering (แผ่นซ้ายมือ)

ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิติคอนที่ผ่านขบวนการ Sintering ยังคงมีค่าที่ใกล้เคียงกับตอนก่อนทำการ Sintering

TFH-120 [ORC]

1 7.

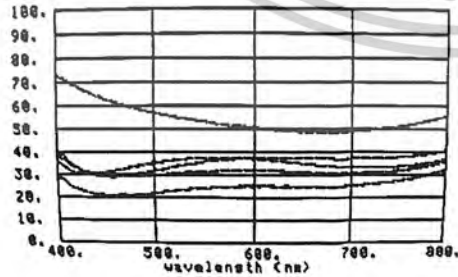
TFH-120 [ORC]

1 5.

** REFLECTANCE **

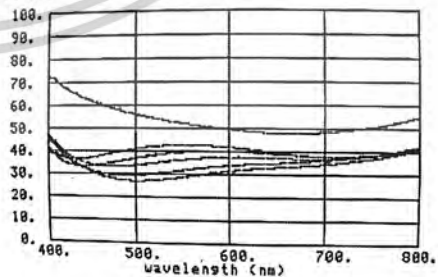
** REFLECTANCE **

ref (%)



(ก)

ref (%)



(ข)

รูปที่ 7.54 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของพอร์สซิติคอน

รูป ก. พอร์สซิติคอนที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบมันก่อนทำการ Sintering

รูป ข. พอร์สซิติคอนที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนผิวเรียบมันหลังทำการ Sintering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.8 สรุปการทดลองการสร้างพอร์ซเซิลิกอนและรูปแบบพอร์ซเซิลิกอนที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์

ขบวนการสร้างพอร์ซเซิลิกอนที่เหมาะสมกับการสร้างพอร์ซเซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์ ควรจะเป็นขบวนการสร้างพอร์ซที่ใช้เวลาในการสร้างน้อยที่สุด มีความง่ายและถูกที่สุด สามารถเลือกพื้นที่ที่จะให้เกิดหรือไม่ให้เกิดก็ได้

ลักษณะของพอร์ซเซิลิกอน เป็นพอร์สมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่น 400นาโนเมตรถึง800นาโนเมตรต่ำและมีลักษณะที่เป็นเอกรูปเดียวกัน(Uniformity) มากที่สุด ลักษณะรูปร่างของพอร์ซที่ไม่ลึกลงในเนื้อซิลิกอนมากเกินไปจนทำลายโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองมีขบวนการสร้างพอร์ซเซิลิกอนที่น่าสนใจในการนำมาสร้างพอร์ซเซิลิกอนสำหรับเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่

-การกัดพอร์ซในสารละลายที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องและกระตุ้นการเกิดด้วยแสงจากหลอดHalogen เพื่อให้การเกิดชั้นพอร์ซเร็วขึ้นและมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่น400นาโนเมตรถึง800นาโนเมตรที่ต่ำ

-การกัดพอร์ซในสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมทำปฏิกิริยา เพื่อลดความรุนแรงของปฏิกิริยาการเกิดให้เบาลง และให้ได้พอร์ซที่มีลักษณะเป็นเอกรูปเดียวกัน(Uniformity) มากที่สุด

-การนำแผ่นซิลิกอนไปเจือสารอย่างเข้มข้นก่อนการนำไปสร้างชั้นพอร์ซเซิลิกอน

-การนำแผ่นซิลิกอนไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมและไม่ต้องการ Sintering ก่อนการกัดพอร์ซ

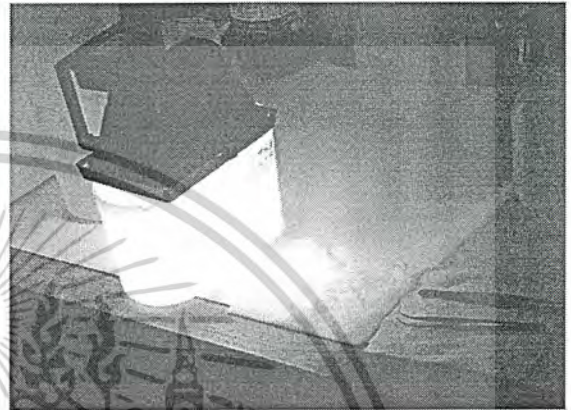
-การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซเซิลิกอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์ซที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

-การสร้างชั้นพอร์ซเซิลิกอนภายหลังการ Sintering เพื่อรักษาคุณสมบัติการเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ และเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับชั้นพอร์ซในภายหลัง

เนื่องจากในขบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีการเจือสารอย่างเข้มข้นและนำแผ่นซิลิกอนไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมอยู่แล้ว ซึ่งลักษณะดังกล่าว ถ้านำไปสร้างพอร์ซ จะเกิดพอร์ซอย่างรวดเร็วมากซึ่งเป็นผลดีต่อการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซเซิลิกอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์ซด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 ดังนั้นจึงควรสร้างชั้นพอร์ซหลังจากการเคลือบชั้นอลูมิเนียม ส่วนการที่จะเลือกทำการกัดพอร์ซในสารละลายที่มีการกระตุ้นการเกิดด้วยแสงจากหลอด Halogen หรือจะกัดพอร์ซในสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมทำปฏิกิริยา และการเลือกระหว่างการกัดพอร์ซก่อนหรือหลังการ Sintering นั้นต้องแยกพิจารณาผลดีและผลเสียเป็นประเด็นๆ ไป เพื่อให้ได้ชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่เหมาะสมจะเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

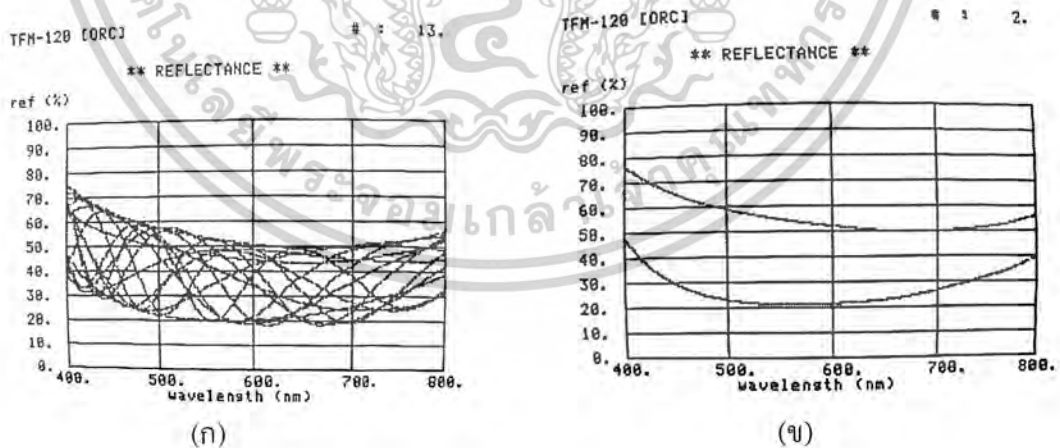
บทที่ 8

การทดลองประยุกต์พอร์สซิลิคอนสำหรับเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

8.1 การออกแบบกระบวนการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อให้เห็นผลของการใช้พอร์สซิลิคอนสำหรับเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชัดเจนขึ้น เราจะทำการสร้างแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงต่างกันสองประเภทเพื่อใช้เปรียบเทียบกัน คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง กับ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิคอนซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยจะสร้างให้ชั้นลดการสะท้อนทั้งสองแบบมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรถึง 800 นาโนเมตรที่ใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่จะทำได้

จากการทดลองวัดค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างกัน ตั้งแต่ 500 Å จนถึง 6500 Å พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 1000 Å มีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของพอร์สที่จะนำมาสร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงมากที่สุดดังรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะสร้างขึ้น

กราฟ ก. ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 500 Å จนถึง 6500 Å

กราฟ ข. ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 1000 Å
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในบทที่ 7 เราจะเลือกทำทั้งกรณีที่ทำการกัดพอร์สก่อนการ Sintering และกรณีที่ทำการกัดพอร์สหลังการ Sintering เพื่อใช้เปรียบเทียบกัน โดยจะกำหนดปัจจัยที่เหลือในการสร้างชั้นพอร์สให้เหมือนกันดังนี้

ในการสร้างพอร์สซิลิคอนจะใช้วิธีการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไฮดรอกไซด์ของ Az เบอร์ 1818 ทำการกัดพอร์สผ่านชั้นอลูมิเนียมที่เคลือบบนแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่ผ่านการเจือด้วยฟอสฟอรัสอย่างเข้มข้น ซึ่งจะจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ Di ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ ดังนั้นจึงต้องใช้ช่วงเวลาการจุ่มที่เท่ากันคือไม่เกิน 30 วินาทีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไฮดรอกไซด์เสียหาย ซึ่งลักษณะการเตรียมแผ่นสำหรับกัดพอร์สดังกล่าวจะเป็นดังรูปที่ 8.1

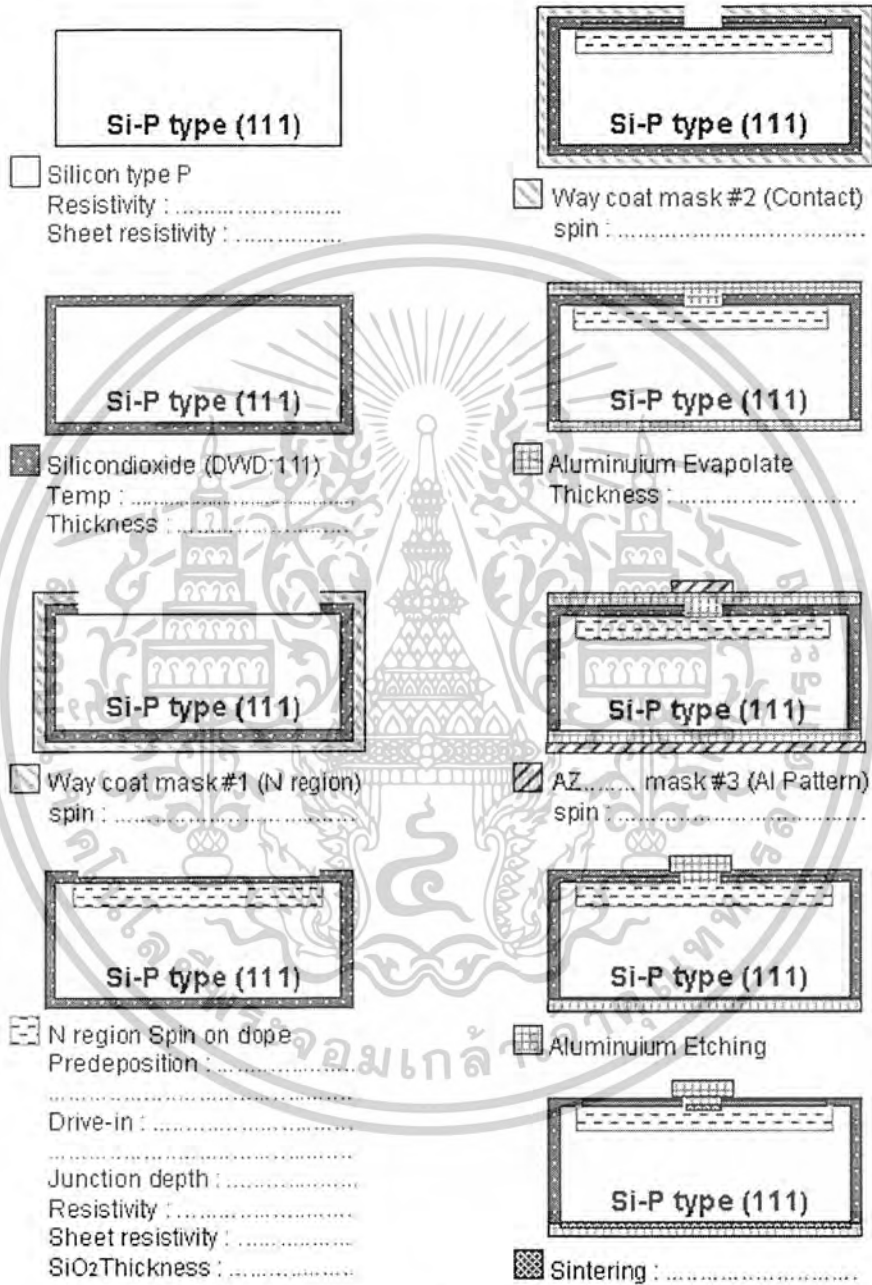


รูปที่ 8.2 ลักษณะการเตรียมแผ่นสำหรับกัดพอร์ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 การออกแบบกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

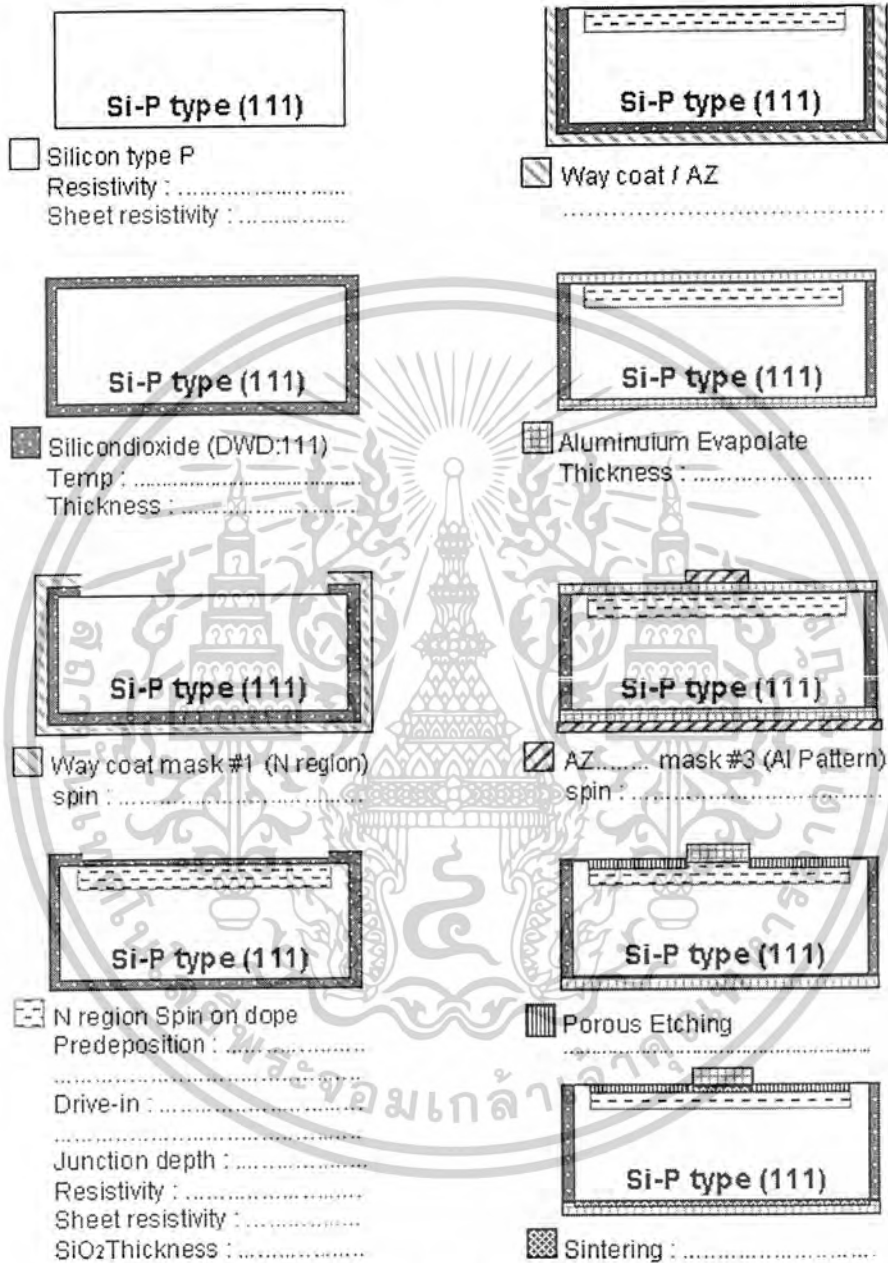
Solar cells No.1



รูปที่ 8.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

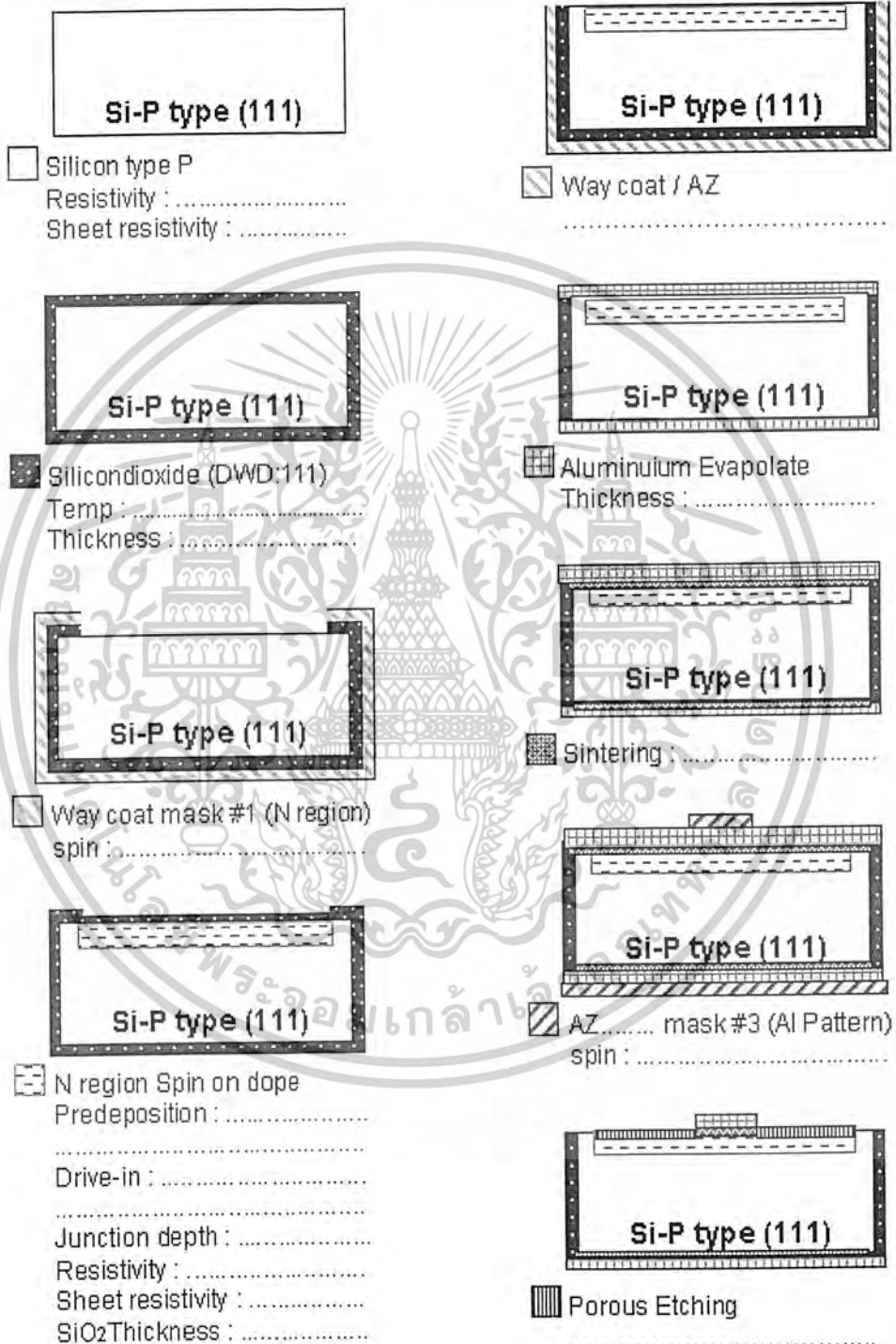
Solar cells No.2



รูปที่ 8.4 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ส ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง แบบกั๊ดพอร์สก่อนการ Sintering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solar cells No.3



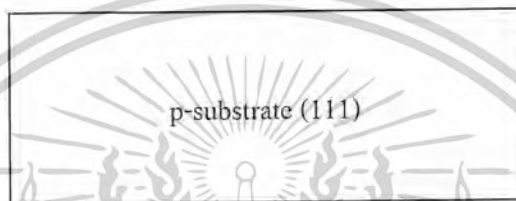
รูปที่ 8.5 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ส

ผลิตภัณฑ์เป็นขั้นตอนการสะท้อนแสง แบบกึ่งพอร์สหลังการ Sintering เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

8.3.1 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (SiO₂ Anti-Reflection Coating)

1. **Initial wafer** แผ่นผลึกเริ่มต้นที่เป็นฐานรอง (substrate) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ผลึกซิลิคอนชนิดพี ที่มีระนาบหรือ Orientation (111), ความหนาของแผ่น 400 μm ., สภาพต้านทานประมาณ 0.06 $\Omega\text{-cm}$.



2. **Wafer cleaning** เป็นการทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก แบ่งเป็นการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- Ultrasonic ใน DI เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มในกรดไนตริก (HNO₃) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มใน Trichloroethylene (C₂HCl₃) เวลา 10 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH₃COCH₃) เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Slice Etching

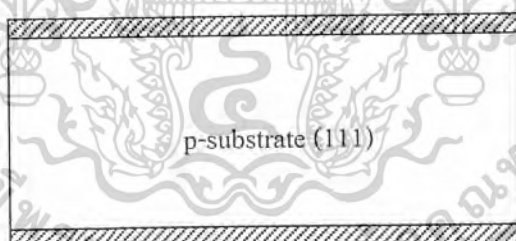
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

3. **First Oxidation** เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นครั้งแรก ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้าฉากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (Diffusion mask of impurity atoms) ในขั้นตอนของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในส่วนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้อุณหภูมิเตา $1,050^\circ C$, อุณหภูมิน้ำ $90^\circ C$

Oxidation

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

▨ SiO_2





4. **Photo etching for n-region** เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือ โฟโต้เอตซิงค์ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เรียกว่า N-region mask

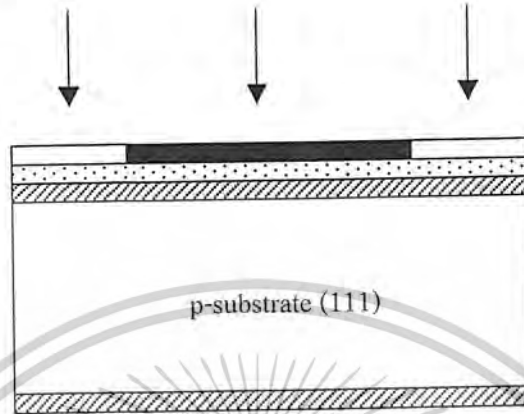
Photolithography Mask1 (n-region)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ $120^\circ C$ เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (wet coat) Spin 5,000 rpm.
- อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ เวลา 30 นาที (Pre bake)

Alignment Expose



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

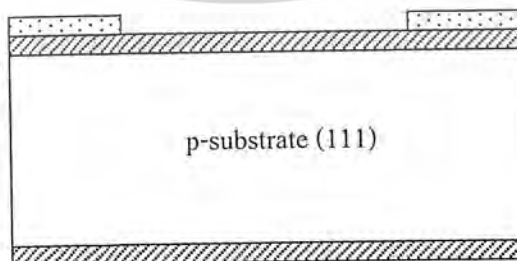
-  SiO₂
-  Way coat



• Develop ฟิล์์ม โดย

- จุ่มใน Xylene (C₈H₄(CH₃)₂) แก้วที่ 1 เวลา 90 วินาที
- จุ่มใน Xylene (C₈H₄(CH₃)₂) แก้วที่ 2 เวลา 90 วินาที
- จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที
- จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที
- จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 3 เวลา 30 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

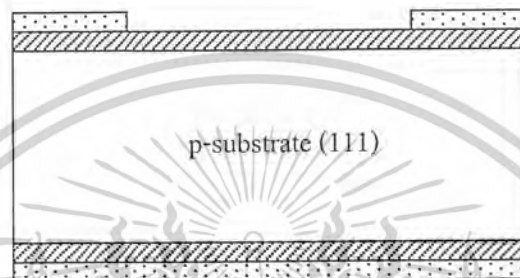
-  SiO₂
-  Way coat



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 30 นาที

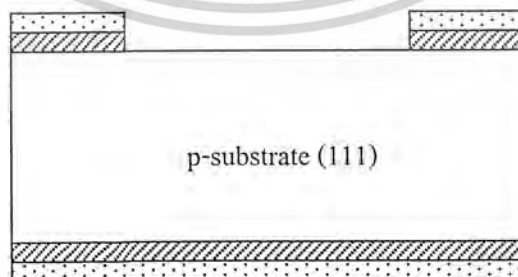
- ▨ SiO₂
- ⋯ Way coat



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer (HF47%:NH₄F)
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

- ▨ SiO₂
- ⋯ Way coat

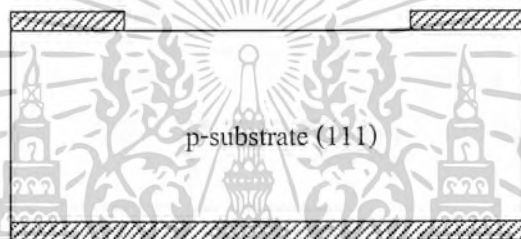


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

▨ SiO_2



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene (C_2HCl_3) เวลา 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH_3COCH_3) เวลา 3 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 5% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

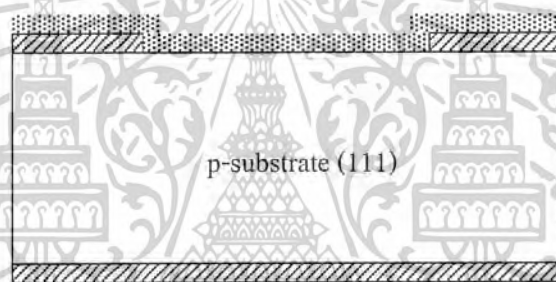
5. **N-region Diffusion** เป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เข้มข้น (n^+) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี ให้ได้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณ $1 \mu\text{m}$.

กระบวนการ Pre-deposition

- หยดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส Spin on substrate ที่ $3,000 \text{ rpm}$. เวลา 20 วินาที
- Hot bake ที่ 150°C เวลา 10 นาที


 SiO_2


 สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

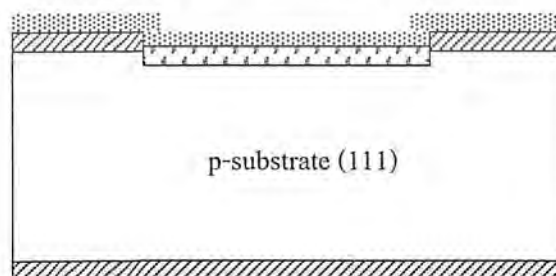


- Phosphorus pre-deposition ที่ $1,050^\circ\text{C}$, N_2 $1,000 \text{ cc./min}$. เวลา 30 นาที

 SiO_2

 สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส



 n^+ region

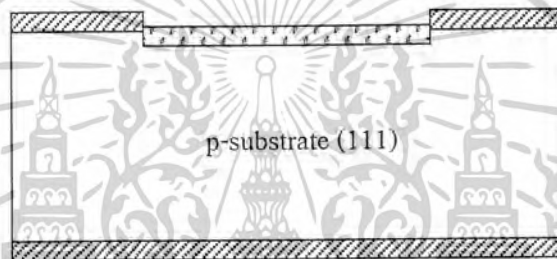


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Slice Etching




- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 5% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

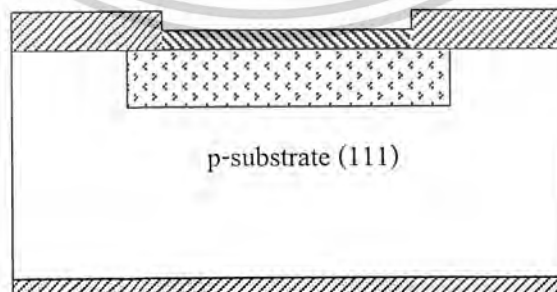
-  SiO_2
-  n^+ region



กระบวนการ Drive-in

- Phosphorus drive-in ที่ $1,050^\circ C$, O_2 $1,200^\circ C$ cc./min. (Dry) เป็นเวลา 40 นาที (Dry 40 min.) ได้ออกไซด์หนาประมาณ 1,000 Å

-  SiO_2 1,000 Å (SiO_2 Anti-Reflection Coating)
-  SiO_2
-  n^+ region




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


6. **Photo etching for contact** เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณที่เป็นส่วนขั้วสัมผัส (contact) ของรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้ โฟโตมาสก์ชิ้นที่ 2 เรียกว่า Contact Mask

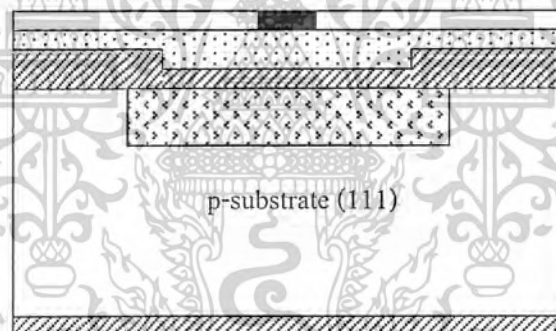
Photolithography Mask2 (Contact)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat) Spin 5.000 rpm.
- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 30 นาที (Pre bake)
- Alignment Expose

 SiO₂




 Way coat

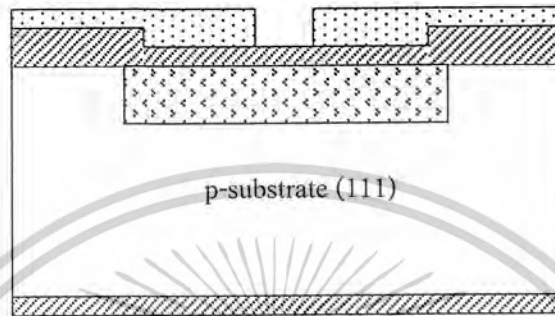
 n⁺ region






- Develop ฟิล์ม โดย
 - จุ่มใน Xylene (C₆H₄(CH₃)₂) แก้วที่ 1 เวลา 90 วินาที
 - จุ่มใน Xylene (C₆H₄(CH₃)₂) แก้วที่ 2 เวลา 90 วินาที
 - จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 3 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

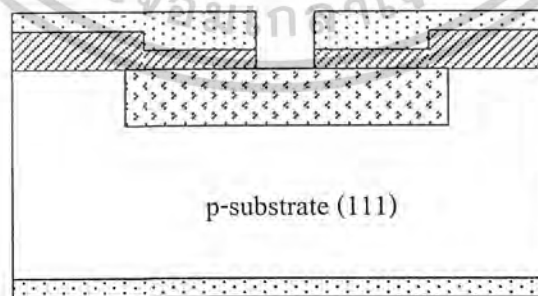
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  SiO₂
-  Way coat
-  n⁺ region



- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 10 นาที (Post bake)
- การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)
- จุ่มในสารละลาย Buffer (HF47%: NH₄F)
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)



-  SiO₂
-  Way coat
-  n⁺ region

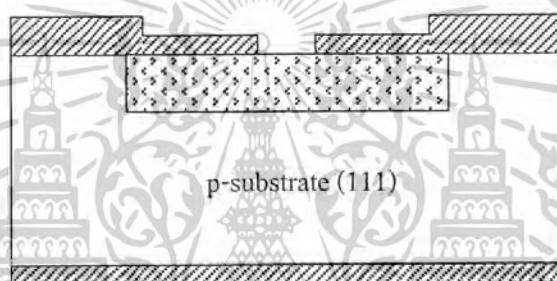


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน N_2

-  SiO_2
 n⁺ region



การทำความสะอาดผิวหน้า

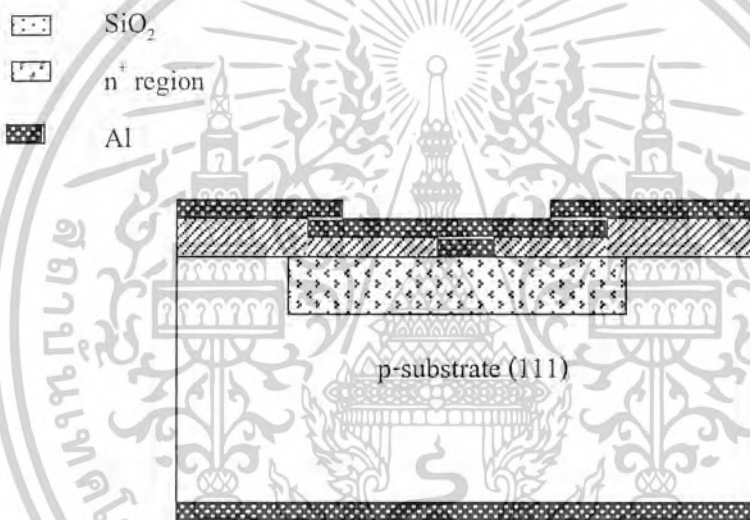
- ต้มใน Trichloroethylene (C_2HCl_3) เวลา 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH_3COCH_3) เวลา 3 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

หมายเหตุ ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกจะยังคงมีอยู่ เพราะซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าจะบางกว่าที่ด้านหลัง ดังนั้น เวลาทำการสกัดชั้นออกไซด์จะดูว่าออกไซด์ที่ด้านหน้าหมดก็พอ เพื่อป้องกันการสกัดออกไซด์ที่ด้านข้างของขั้วสัมผัส (Side etching) ส่วนออกไซด์ที่ด้านหลังจะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az) ทาเป็นตัวป้องกันที่ด้านบนแล้วจึงทำการสกัดออกไซด์ที่ด้านหลังออกก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศ

7. **Metallization** เป็นการสร้างชั้นของโลหะ (อะลูมิเนียม) ขึ้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ ปกติชั้นของโลหะนี้ได้แก่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีความหนา 1 μm . เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่บางกรณีอาจใช้ อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของซิลิคอนราว 2% เพื่อป้องกันการเกิด Al Spike ที่ขั้วสัมผัส

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

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







หมายเหตุ ทำการเคลือบอะลูมิเนียมทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นผลึก

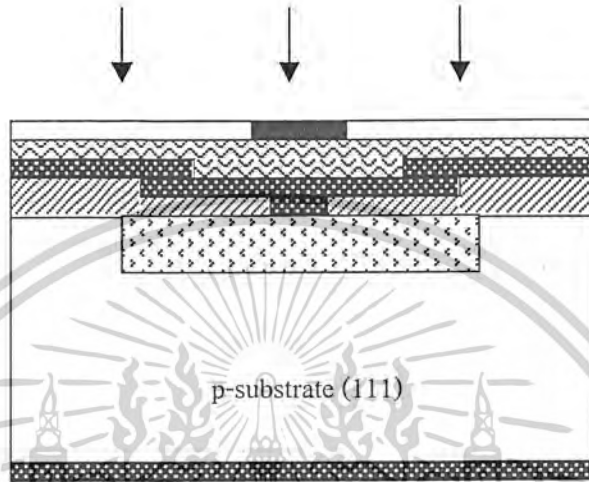
8. **Photo etching for Metallization** เป็นการสกัดชั้นของอะลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน ให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ชั้นที่ 3 และเรียกว่า Metal Mask

กระบวนการ Photolithography Mask3 (Metal Mask)





- อบแผ่นไว้ความชื้นที่ 120°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำไวแสงชนิดบวก (Az) Spin 5,000 rpm. เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที (Pre bake)
- Alignment Expose

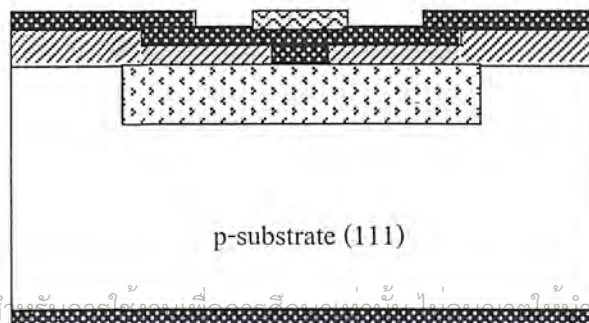
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az







- Develop ฟิล์ม โดย
 - จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

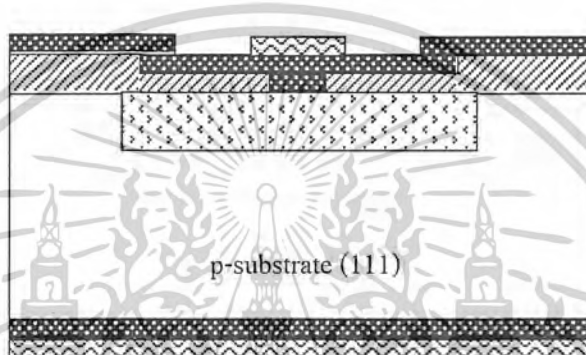
-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในหน่วยงานที่เอกสารนี้เป็นของหน่วยงานนี้ ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที

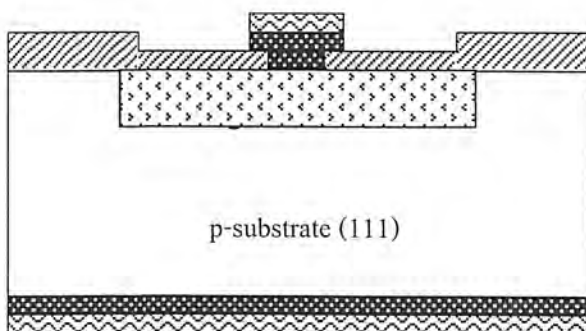
-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az

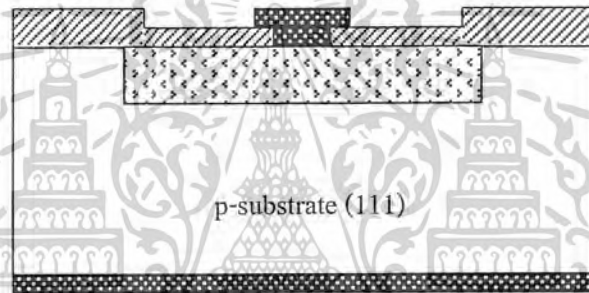


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงใน Acetone (CH_3COCH_3) แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone (CH_3COCH_3) แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

- ▨ SiO_2
- ▨ n^+ region
- ▨ Al



กระบวนการ Sintering

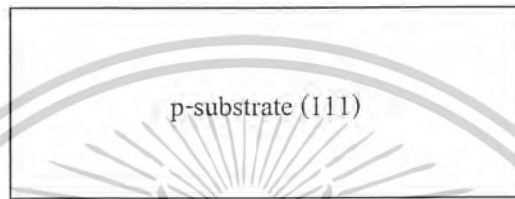
ทำการ Sintering เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่าง โลหะ และสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นอัลลอย (Al-Si Alloy) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) ที่ดี และเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

- Sintering ที่อุณหภูมิ 500°C , N_2 1,000 cc./min. เวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3.2 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (Po-Si Anti-Reflection Coating) แบบกึ่งพอร์ซิลิคอนหลังกระบวนการ Sintering

1. **Initial wafer** แผ่นผลึกเริ่มต้นที่เป็นฐานรอง (substrate) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ พอร์ซิลิคอนชนิดพี ที่มีระนาบหรือ Orientation (111), ความหนาของแผ่น 400 μm ., สภาพต้านทานประมาณ 0.06 $\Omega\text{-cm}$.



2. **Wafer cleaning** เป็นการทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก แบ่งเป็นการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

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

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Slice Etching

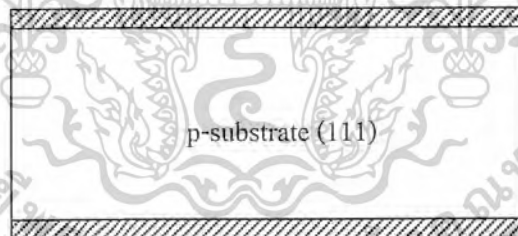
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 10% เวลา 10 วินาที
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
3. **First Oxidation** เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นครั้งแรก ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้าฉากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (Diffusion mask of impurity atoms) ในขั้นตอนของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในส่วนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้อุณหภูมิเตา $1,050^\circ C$, อุณหภูมิน้ำ $90^\circ C$

Oxidation

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



SiO_2





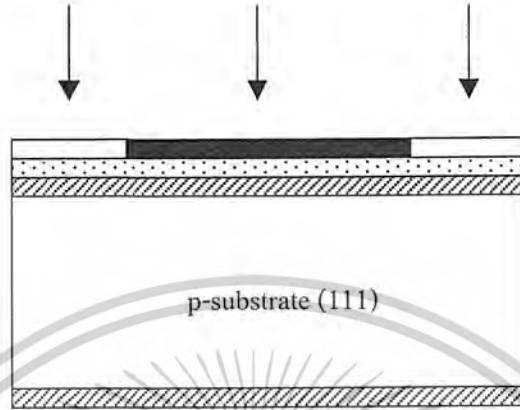
4. **Photo etching for n-region** เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือโฟโต้เอตซิงค์ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เรียกว่า N-region mask

Photolithography Mask1 (n-region)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ $120^\circ C$ เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) Spin 5,000 rpm.
- อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ เวลา 30 นาที (Pre bake)
- Alignment Expose



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

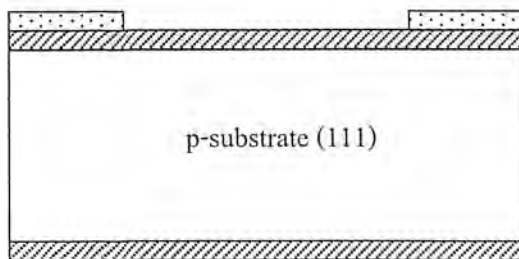
-  SiO₂
-  Way coat



• Develop ฟิล์์ม โดย

- จุ่มใน Xylene (C₆H₄(CH₃)₂) แก้วที่ 1 เวลา 90 วินาที
- จุ่มใน Xylene (C₆H₄(CH₃)₂) แก้วที่ 2 เวลา 90 วินาที
- จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที
- จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที
- จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 3 เวลา 30 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

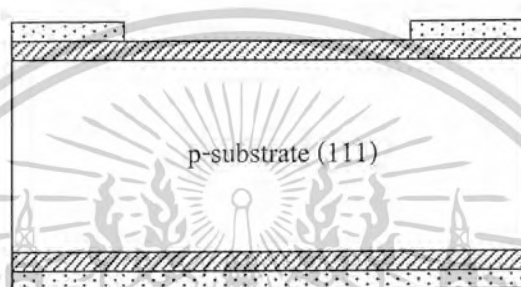
-  SiO₂
-  Way coat



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 30 นาที

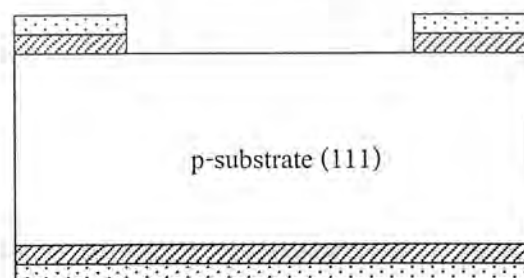
- ▨ SiO₂
- ▤ Way coat



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer (HF47%:NH₄F)
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

- ▨ SiO₂
- ▤ Way coat



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

▨ SiO_2



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene (C_2HCl_3) เวลา 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH_3COCH_3) เวลา 3 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 5% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

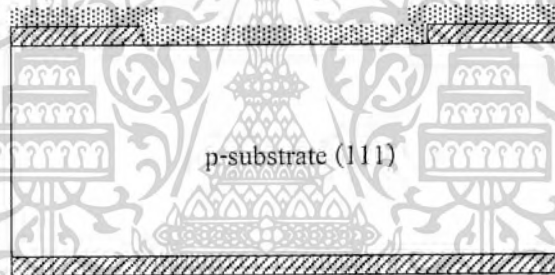
5. **N-region Diffusion** เป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เข้มข้น (n^+) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี ให้ได้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณ 1 μm .

กระบวนการ Pre-deposition

- หยดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส Spin on substrate ที่ 3,000 rpm. เวลา 20 วินาที
- Hot bake ที่ 150°C เวลา 10 นาที

▨ SiO₂

▤ สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

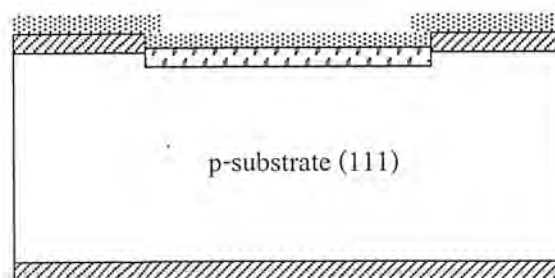


- Phosphorus pre-deposition ที่ 1,050°C, N₂ 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที

▨ SiO₂

▤ สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

▥ n⁺ region

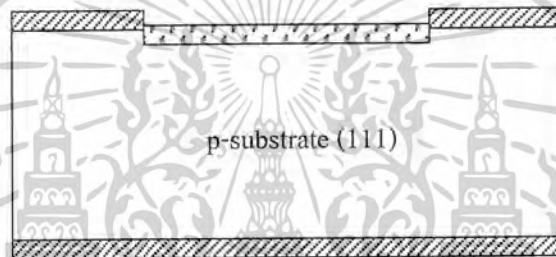


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 5% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

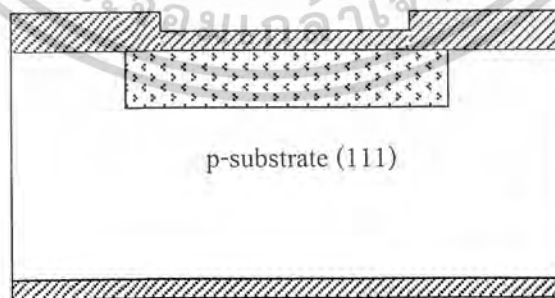
- ▨ SiO_2
- ▩ n^+ region



กระบวนการ Drive-in

- Phosphorus drive-in ที่ $1,050^\circ C$, O_2 $1,200^\circ C$ cc./min. (Dry) เป็นเวลา 40 นาที (Dry 40 min.) ได้ออกไซด์หนาประมาณ 1,000 Å

- ▨ SiO_2
- ▩ n^+ region




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

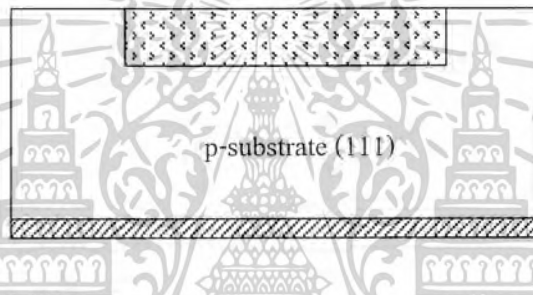
6. **SiO₂ etching for Aluminum coating** เป็นการลอกชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้าออกทั้งหมดเพื่อเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

ใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer (HF47%: NH₄F)
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

 SiO₂

 n⁺ region



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene (C₂HCl₃) เวลา 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH₃COCH₃) เวลา 3 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

หมายเหตุ ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกจะยังคงมีอยู่ เพราะซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าจะบางกว่าที่ด้านหลัง ดังนั้น เวลาทำการสกัดชั้นออกไซด์จะดูว่าออกไซด์ที่ด้านหน้าหมดก็พอ เพื่อป้องกันการสกัดออกไซด์ที่ด้านข้างของขั้วสัมผัส (Side etching) ส่วนออกไซด์ที่ด้านหลังจะใช้ไนยาไวแสงชนิดบวก (Az) ทาเป็นตัวป้องกันที่ด้านบนแล้วจึงทำการสกัดออกไซด์ที่ด้านหลังออกก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศ


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. **Metallization** เป็นการสร้างชั้นของโลหะ (อะลูมิเนียม) ขึ้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ ปกติชั้นของโลหะนี้ได้แก่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีความหนา 1 μm . เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

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

 SiO₂

 n⁺ region

 Al







- ทำการเคลือบอะลูมิเนียมทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นผลึก

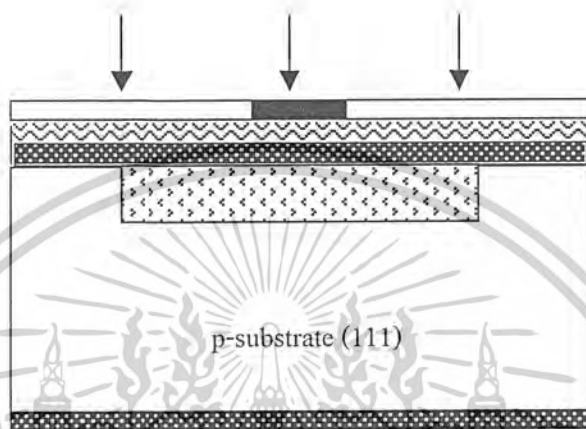
8. **Photo etching for Metallization** เป็นการสกัดชั้นของอะลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน ให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ชั้นที่ 3 และเรียกว่า Metal Mask

กระบวนการ Photolithography Mask3 (Metal Mask)




- อบแผ่นไต่ความชื้นที่ 120°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำไวแสงชนิดบวก (Az 1818) Spin 2,000 rpm. เวลา 25 วินาที
- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที (Pre bake)
- Alignment Expose 15 นาที

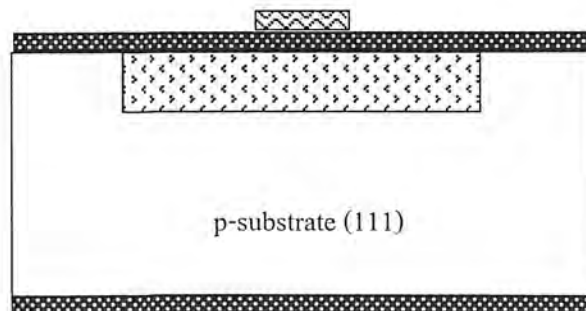
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



- Develop ฟิล์ม โดย
 - จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

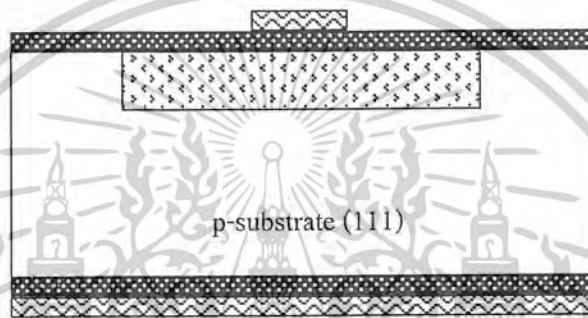
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที

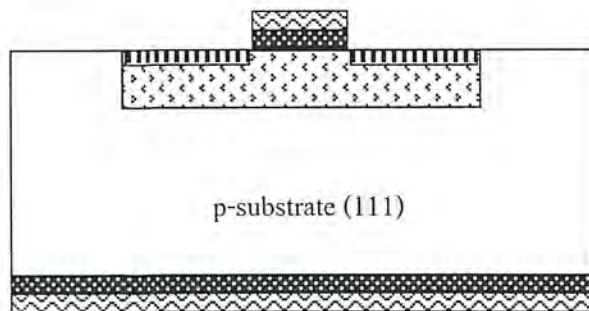
- ▨ SiO₂
- ▧ n⁺ region
- ▩ Al
- Az



การกัดพอร์ซซิลิคอน (Po-Si Etching)

- จุ่มในสารละลายสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำDi ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นเวลา 30 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

- ▨▨▨ Po-Si (Po-Si Anti-Reflection Coating)
- ▧ n⁺ region
- ▩ Al
- Az



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

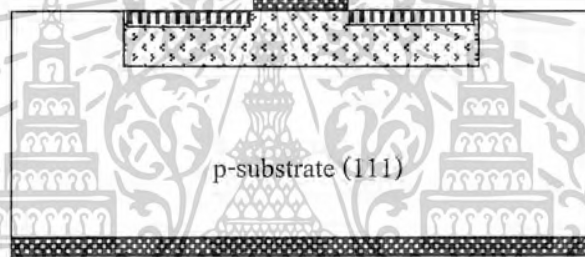
กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงใน Acetone (CH_3COCH_3) แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone (CH_3COCH_3) แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

▣ Po-Si

▤ n^+ region

▥ Al



กระบวนการ Sintering

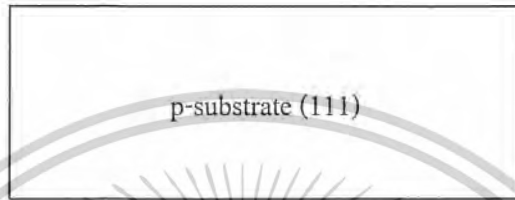
ทำการ Sintering เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นอัลลอย (Al-Si Alloy) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) ที่ดี และเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

- Sintering ที่อุณหภูมิ 500°C , N_2 1,000 cc./min. เวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3.2 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (Po-Si Anti-Reflection Coating) แบบกั๊ดพอร์สหลังกระบวนการ Sintering

1. **Initial wafer** แผ่นผลึกเริ่มต้นที่เป็นฐานรอง (substrate) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ผลึกซิลิคอนชนิดพี ที่มีระนาบหรือ Orientation (111), ความหนาของแผ่น 400 μm ., สภาพต้านทานประมาณ 0.06 $\Omega\text{-cm}$.



2. **Wafer cleaning** เป็นการทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก แบ่งเป็นการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- Ultrasonic ใน DI เวลา 2 นาที
 - จุ่มในน้ำ DI
 - ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เวลา 10 นาที
 - จุ่มในน้ำ DI
 - ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
 - ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
 - จุ่มใน DI
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน
- ต้มใน Trichloroethylene (C_2HCl_3) เวลา 10 นาที
 - Ultrasonic ใน Acetone (CH_3COCH_3) เวลา 5 นาที
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 10% เวลา 10 วินาที
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
3. **First Oxidation** เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นครั้งแรก ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (Diffusion mask of impurity atoms) ในขั้นตอนของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในส่วนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้อุณหภูมิเตา 1,050°C, อุณหภูมิน้ำ 90°C

Oxidation

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

 SiO_2




4. **Photo etching for n-region** เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโวลิตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือโฟโต้เอตซิงค์ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เรียกว่า N-region mask

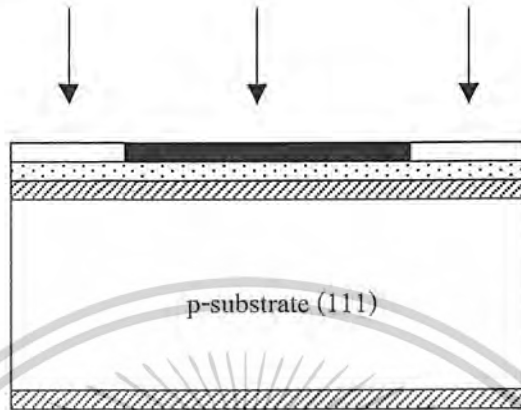
Photolithography Mask1 (n-region)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) Spin 5,000 rpm.
- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 30 นาที (Pre bake)
- Alignment Expose

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 SiO₂

 Way coat



• Develop ฟิล์์ม โดย

จุ่มใน Xylene (C₆H₄(CH₃)₂) แก้วที่ 1 เวลา 90 วินาที

จุ่มใน Xylene (C₆H₄(CH₃)₂) แก้วที่ 2 เวลา 90 วินาที

จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที

จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที


จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 3 เวลา 30 วินาที

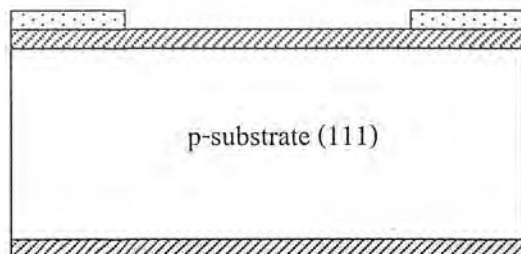
จุ่มใน DI แก้วที่ 1

จุ่มใน DI แก้วที่ 2

เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

 SiO₂

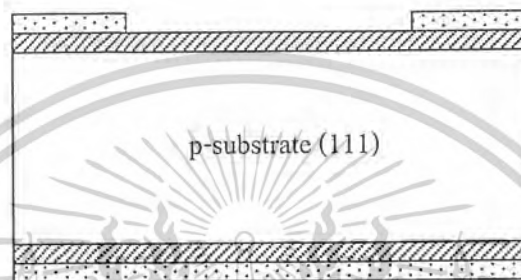
 Way coat



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 95°C เวลา 30 นาที

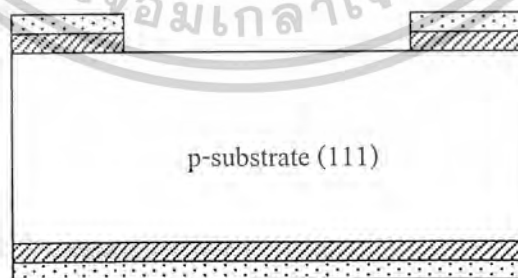
- ▨ SiO₂
- ▤ Way coat



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer (HF47%:NH₄F)
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

- ▨ SiO₂
- ▤ Way coat

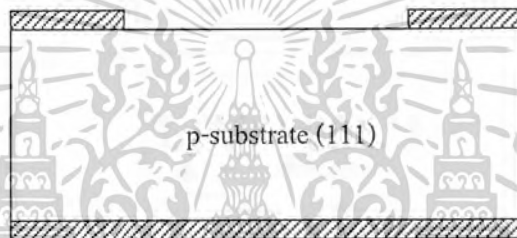


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

▨ SiO_2



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene (C_2HCl_3) เวลา 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH_3COCH_3) เวลา 3 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 5% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. **N-region Diffusion** เป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เข้มข้น (n^+) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี ให้ได้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณ 1 μm .

กระบวนการ Pre-deposition

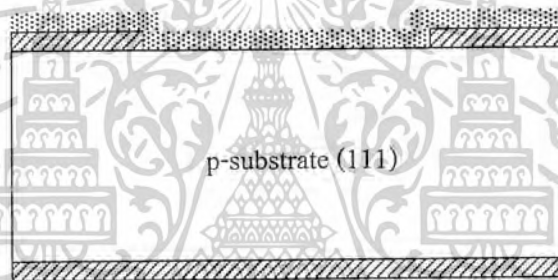
- หยดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส Spin on substrate ที่ 3,000 rpm.

เวลา 20 วินาที

- Hot bake ที่ 150°C เวลา 10 นาที

▨ SiO_2

▤ สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

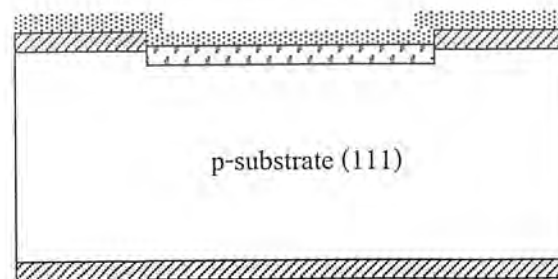


- Phosphorus pre-deposition ที่ 1,050°C, N_2 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที

▨ SiO_2

▤ สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

▥ n^+ region

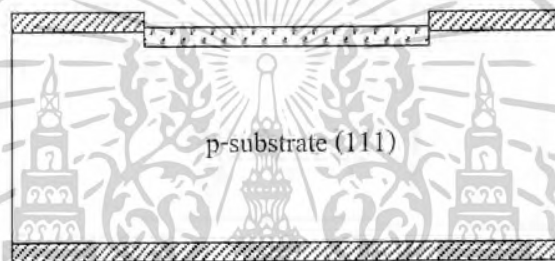


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 5% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

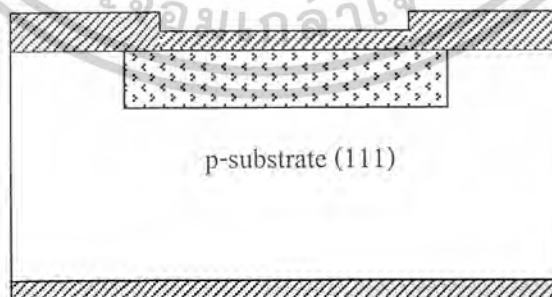
- ▨ SiO_2
- ▤ n^+ region



กระบวนการ Drive-in

- Phosphorus drive-in ที่ $1,050^\circ C$, O_2 $1,200^\circ C$ cc./min. (Dry) เป็นเวลา 40 นาที (Dry 40 min.) ได้ออกไซด์หนาประมาณ 1,000 Å

- ▨ SiO_2
- ▤ n^+ region




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

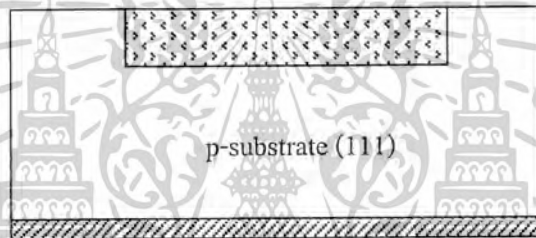
6. **SiO₂ etching for Aluminum coating** เป็นการลอกชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้าออกทั้งหมดเพื่อเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

ใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer (HF47%: NH₄F)
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

 SiO₂

 n⁺ region



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene (C₂HCl₃) เวลา 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH₃COCH₃) เวลา 3 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

หมายเหตุ ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกจะยังคงมีอยู่ เพราะซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าจะบางกว่าที่ด้านหลัง ดังนั้น เวลาทำการสกัดชั้นออกไซด์จะดูว่าออกไซด์ที่ด้านหน้าหมดก็พอ เพื่อป้องกันการสกัดออกไซด์ที่ด้านข้างของขั้วสัมผัส (Side etching) ส่วนออกไซด์ที่ด้านหลังจะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az) ทาเป็นตัวป้องกันที่ด้านบนแล้วจึงทำการสกัดออกไซด์ที่ด้านหลังออกก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. **Metallization** เป็นการสร้างชั้นของโลหะ (อะลูมิเนียม) ขึ้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ ปกติชั้นของโลหะนี้ได้แก่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีความหนา 1 μm . เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

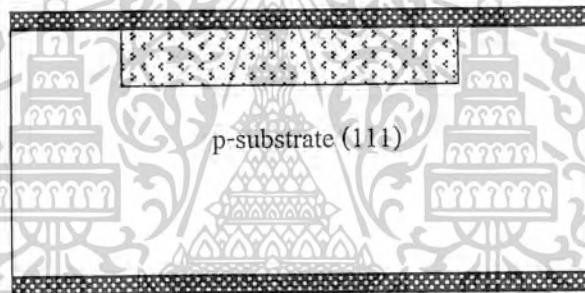
- ทำการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน

2×10^{-6} Torr.

 SiO₂

 n⁺ region

 Al



- ทำการเคลือบอะลูมิเนียมทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นผลึก

กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นอัลลอย (Al-Si Alloy) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) ที่ดี และเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์





- Sintering ที่อุณหภูมิ 500°C ,N₂ 1,000 cc./min. เวลา 10 นาที

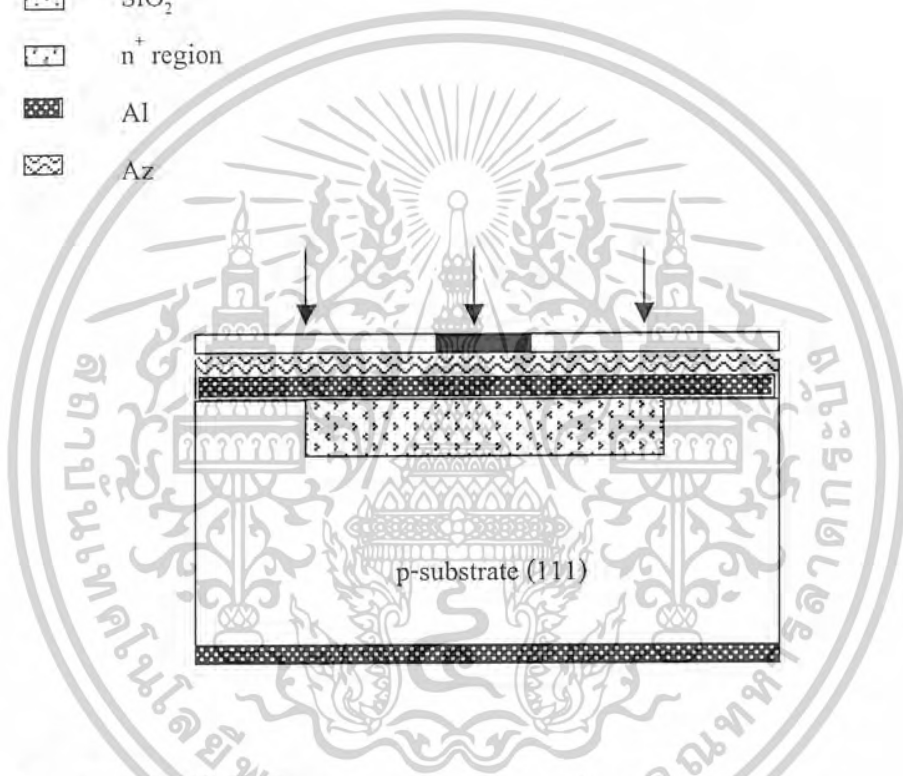
8. **Photo etching for Metallization** เป็นการสกัดชั้นของอะลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน ให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ชั้นที่ 3 และเรียกว่า Metal Mask

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ Photolithography Mask3 (Metal Mask)




- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำไวแสงชนิดบวก (Az 1818) Spin 2,000 rpm. เวลา 25 วินาที
- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที (Pre bake)
- Alignment Expose 15 นาที

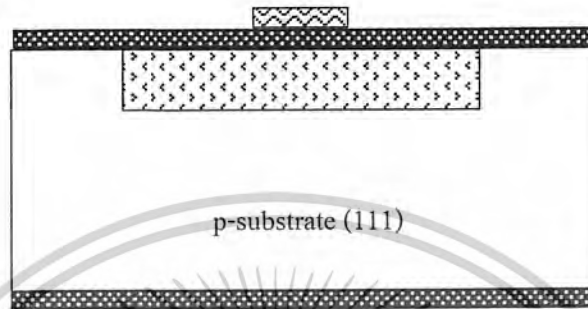
-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az







- Develop ฟิล์ม โดย
 - จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

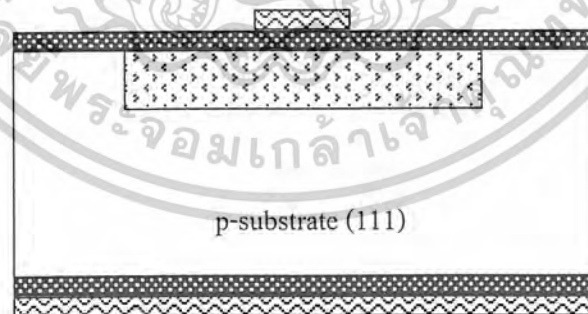
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  n⁺ region
-  Al
-  Az



- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 85°C เวลา 20 นาที

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดพอร์สซิลิคอน (Po-Si Etching)

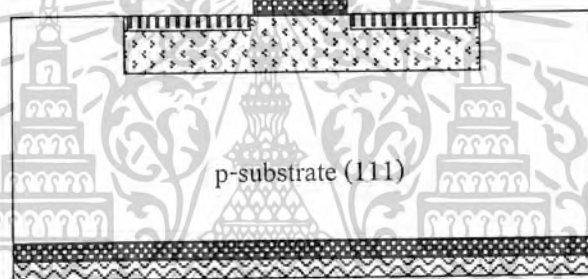
- จุ่มในสารละลายสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นเวลา 30 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

▨ Po-Si (Po-Si Anti-Reflection Coating)

▨ n^+ region

▨ Al

▨ Az



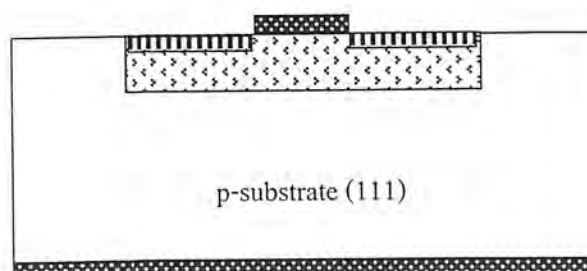
กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงใน Acetone (CH_3COCH_3) แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone (CH_3COCH_3) แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

▨ Po-Si

▨ n^+ region

▨ Al



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4 การวัดและทดสอบ

8.4.1 การวัดและทดสอบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

จากกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เราได้เซลล์ออกมา 3 เซลล์ดังนี้

Cell#1 คือเซลล์ที่สร้าง โดยกระบวนการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC.) ได้คุณสมบัติดังต่อไปนี้

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ Cell#1

ความลึกของรอยต่อ	=	2 μm
ความหนาของแผ่นเวเฟอร์	=	400 μm
Sheet resistivity ในสารชนิด P	=	6 Ω/sq
Sheet resistivity ในสารชนิด N	=	6 Ω/sq
ความต้านทานอนุกรม	=	7.133 Ω
ความเข้มแสง	=	125,000 lx .
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	30 mA .
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.502 V .
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	15.06 mW .
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm^2 .
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	16.276 mA/cm^2
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	15.5 mA .
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.34 V .
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.27 mW .
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.3
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	3.436%
อุณหภูมิ (Temp.)	=	27°C
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 1,000 \AA		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cell#2 คือเซลล์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนที่สร้างก่อนการ sintering ชั้นอนุเมเนียม เป็นชั้น antireflection โดยได้คุณสมบัติดังต่อไปนี้

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ Cell#2

ความลึกของรอยต่อ	=	2 μm
ความหนาของแผ่นเวเฟอร์	=	400 μm
Sheet resistivity ในสารชนิด P	=	6 Ω/sq
Sheet resistivity ในสารชนิด N	=	6 Ω/sq
ความต้านทานอนุกรม	=	6.477 Ω
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	44 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.557 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	24.508 mW.
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm^2
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	23.87 mA./ cm^2
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	37.5 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.36V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	13.5mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.55
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	8.803%
อุณหภูมิ (Temp.)	=	27°C
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นพอร์สซิลิคอน โดยวิธี Stain etching เวลา 20 วินาที		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

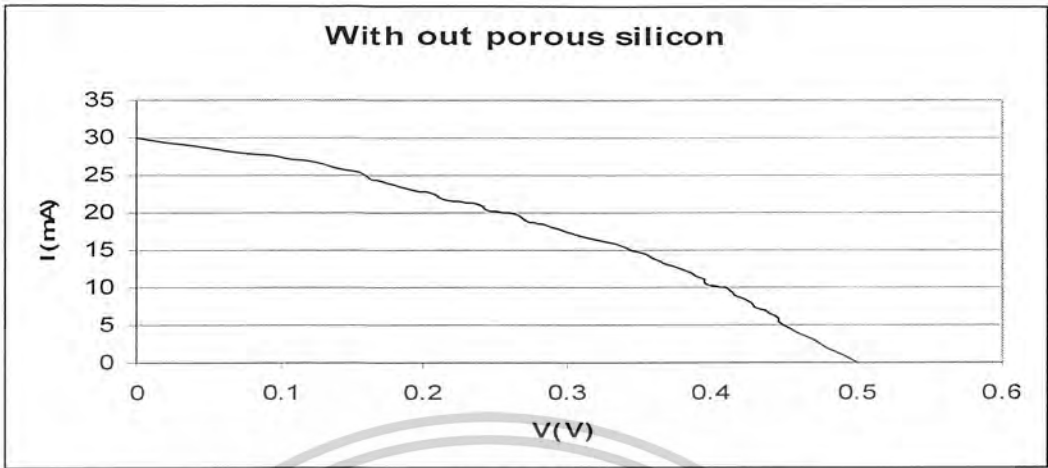
Cell#3 คือเซลล์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนที่สร้างหลังการ sintering ชั้นอะลูมิเนียม เป็นชั้น antireflection โดยได้คุณสมบัติดังต่อไปนี้

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ Cell#3

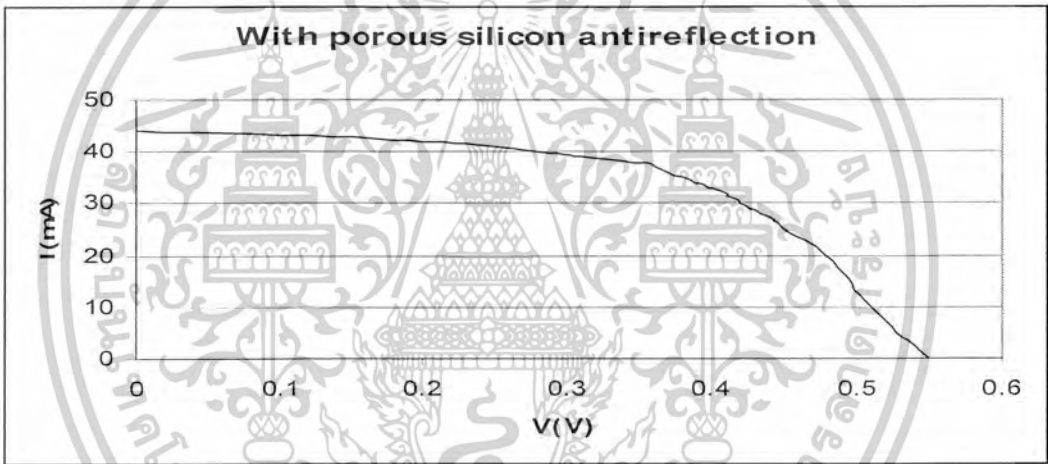
ความลึกของรอยต่อ	=	2 μm
ความหนาของแผ่นเวเฟอร์	=	400 μm
Sheet resistivity ในสารชนิด P	=	6 Ω/sq
Sheet resistivity ในสารชนิด N	=	6 Ω/sq
ความต้านทานอนุกรม	=	7.2 Ω
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	42mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.54 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	22.68 mW.
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm^2 .
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	22.786 mA/cm^2
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	30.5 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.392V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	11.596 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.527
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	5.74%
อุณหภูมิ (Temp.)	=	27°C

ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นพอร์สซิลิคอนโดยวิธี Stain etching เวลา 20 วินาที

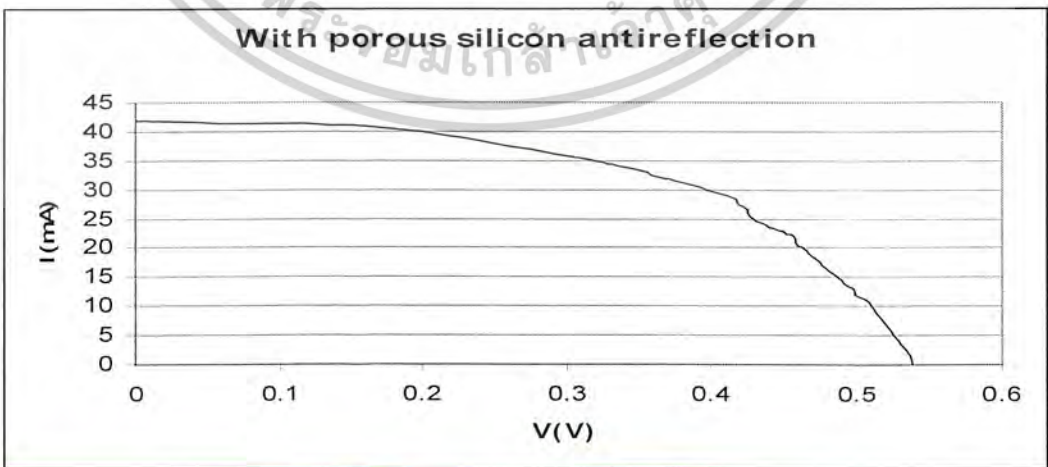
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.6 คุณสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแสงของเซลล์ Cell#1
ที่ Air mass 1.5 Pin = 83.2mW/cm²



รูปที่ 8.7 คุณสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแสงของเซลล์ Cell#2
ที่ Air mass 1.5 Pin = 83.2 mW/cm²



รูปที่ 8.8 คุณสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแสงของเซลล์ Cell#3
ที่ Air mass 1.5 Pin = 83,2 mW/cm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4.2 สรุปและเปรียบเทียบค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

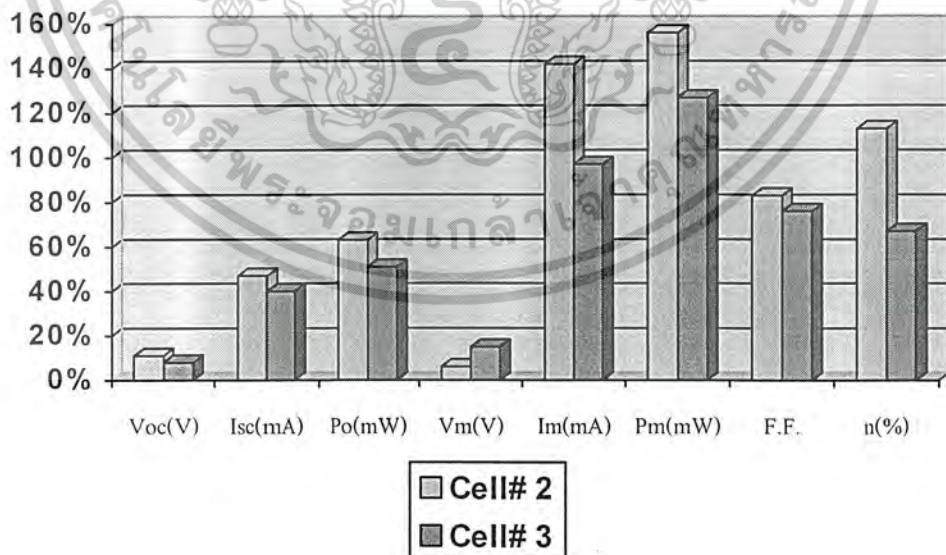
ทำการวัดค่าที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงเท่ากับ 125000 Lx. ที่ Air mass 1.5, Pin = 83.2 mW/cm²

Cell	Voc(V)	Isc(mA)	Po(mW)	Vm(V)	Im(mA)	Pm(mW)	F.F.	η(%)
Cell#1	0.502	30	15.06	0.34	15.5	5.27	0.3	3.436
Cell#2	0.557	44	24.508	0.36	37.5	13.5	0.55	7.324
Cell#3	0.54	42	22.68	0.392	30.5	11.956	0.527	5.740

ตารางที่ 8.1 ผลการทดลอง

Cell	Voc(V)	Isc(mA)	Po(mW)	Vm(V)	Im(mA)	Pm(mW)	F.F.	η(%)
Cell#2	11 %	47 %	63 %	6 %	142 %	156 %	83 %	113 %
Cell#3	8 %	40 %	51 %	15 %	97 %	127 %	76 %	67 %

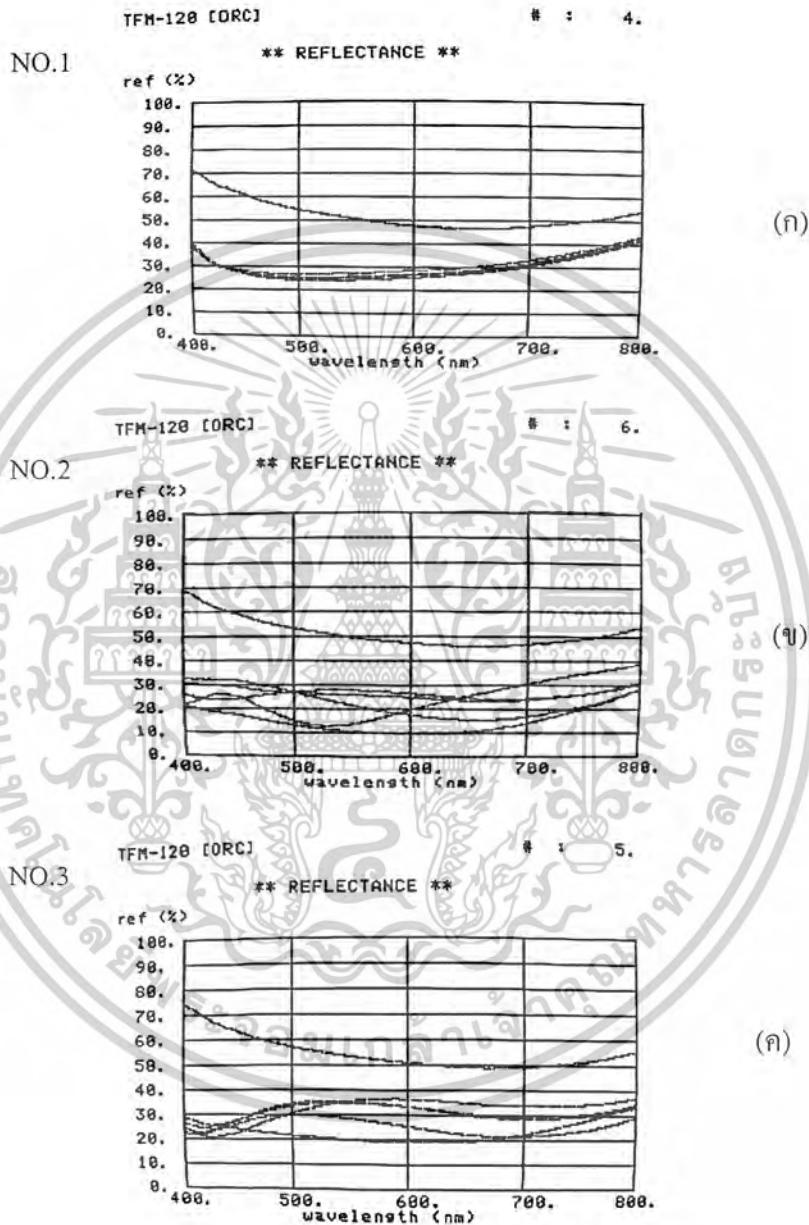
ตารางที่ 8.2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนซึ่งสูงขึ้นจากเซลล์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน(Cell#1)



รูปที่ 8.9 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงซึ่งสูงขึ้นจากเซลล์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง(Cell#1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4.3 การวัดและทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น

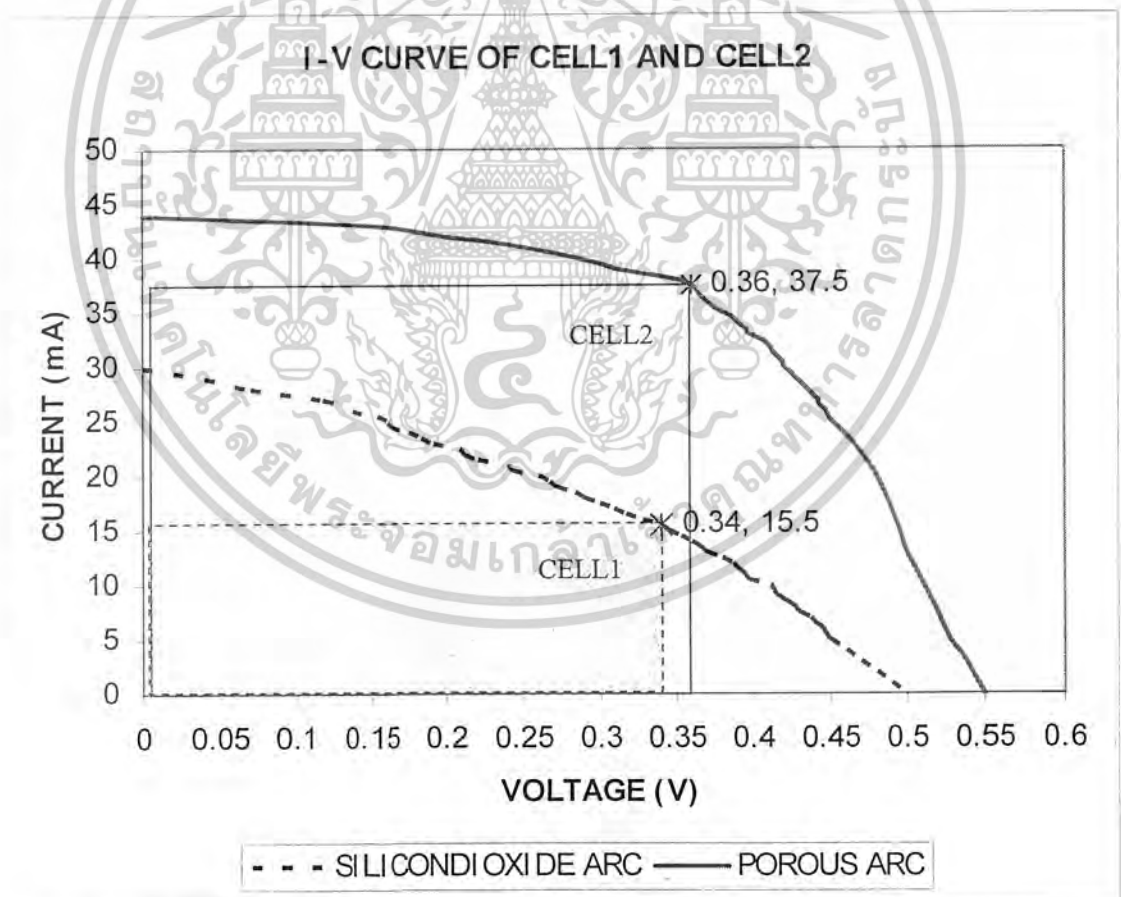


รูปที่ 8.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้
 กราฟ ก. ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงกรณีที่ทำซิลิคอน ไดออกไซด์ที่มีความหนา 1000 Å (Cell#1)
 กราฟ ข. ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของกรณีที่ทำการกัดพอร์สก่อนการ Sintering (Cell#2)
 กราฟ ค. ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของกรณีที่ทำการกัดพอร์สหลังการ Sintering (Cell#3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.5 รูปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองนำพอร์ซซิติกอนไปสร้างเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการใหม่ที่นำเสนอ จะเห็นได้ชัดเจนว่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้พอร์ซซิติกอนเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนนั้นสูงขึ้นจากเซลล์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนอย่างเห็นได้ชัด และยังเป็นวิธีการลดขั้นตอนการสร้างที่ซับซ้อน ทำให้กระบวนการสร้างมีความง่ายและประหยัดมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก อีกทั้งยังสามารถลดการสูญเสียพื้นที่และเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้ถึง 67-113% โดยที่กระแสลัดวงจรจะเพิ่มขึ้นถึง 40-47%, ค่าฟิลแฟกเตอร์เพิ่มขึ้นถึง 76-83% และค่ากำลังสูงสุดจะเพิ่มขึ้นถึง 127-156% เมื่อเทียบกับกระบวนการสร้างแบบเก่าที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งกำลังงานที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณกระแสแสงที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 8.11 เปรียบเทียบคุณสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแสงของเซลล์ Cell#1 และ Cell#2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

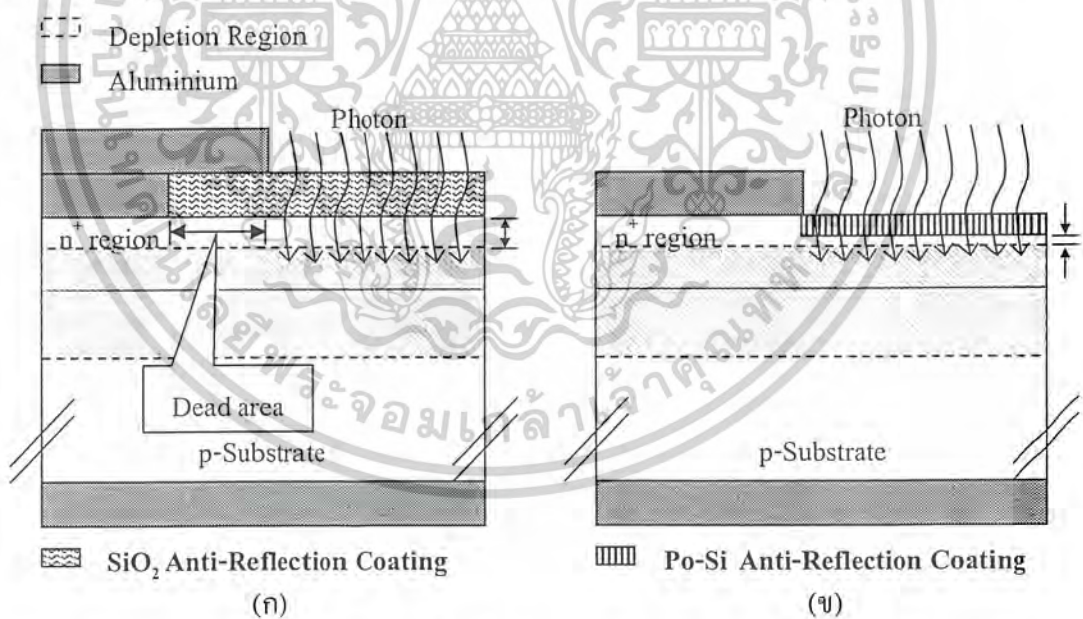
การเพิ่มขึ้นของกระแสแสงอาจอธิบายได้จากเหตุผลหลักๆ 4 ประการคือ

1. ชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์มีการสะท้อนแสงที่น้อยลง เนื่องจากพอร์ซซิลิคอนที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่ช่วยลดการสะท้อนแสงได้ดีขึ้น ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงได้รับปริมาณ โฟตอนเพิ่มมากขึ้น

2. เซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืนแสงได้มากขึ้น เพราะพอร์ซซิลิคอนที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ เนื่องจากมีขนาดของช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับการดูดกลืนแสงในช่วงที่มีผลกับเซลล์แสงอาทิตย์(ประมาณ 1.5 อิเล็กตรอน โวลต์สำหรับความยาวคลื่นในช่วง 400-1000 นาโนเมตร) ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืน โฟตอน ได้ดียิ่งขึ้นจึงส่งผลให้มีปริมาณ โฟโตรีโอดีตรอนเพิ่มมากขึ้น

3. เซลล์แสงอาทิตย์มีพื้นที่ไวแสง(Active area) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างแบบใหม่ ของเซลล์ที่สามารถลดพื้นที่ตาย (Dead area or Inactive area) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

4. ผลจากโครงสร้างแบบใหม่ของเซลล์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้บริเวณปลอดพาหะอยู่ใกล้กับชั้นลดการสะท้อนแสงมากขึ้น โฟตอนจึงผ่านสิ่งกีดขวางน้อยลงทำให้มีปริมาณ โฟตอนส่งผ่านเข้าถึงชั้นบริเวณปลอดพาหะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 8.12 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่สามารถลดการสูญเสียพื้นที่และพลังงาน

รูป ก. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเก่าที่มีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงทำให้สูญเสียพื้นที่รับแสง

รูป ข. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงทำให้มีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.6 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่

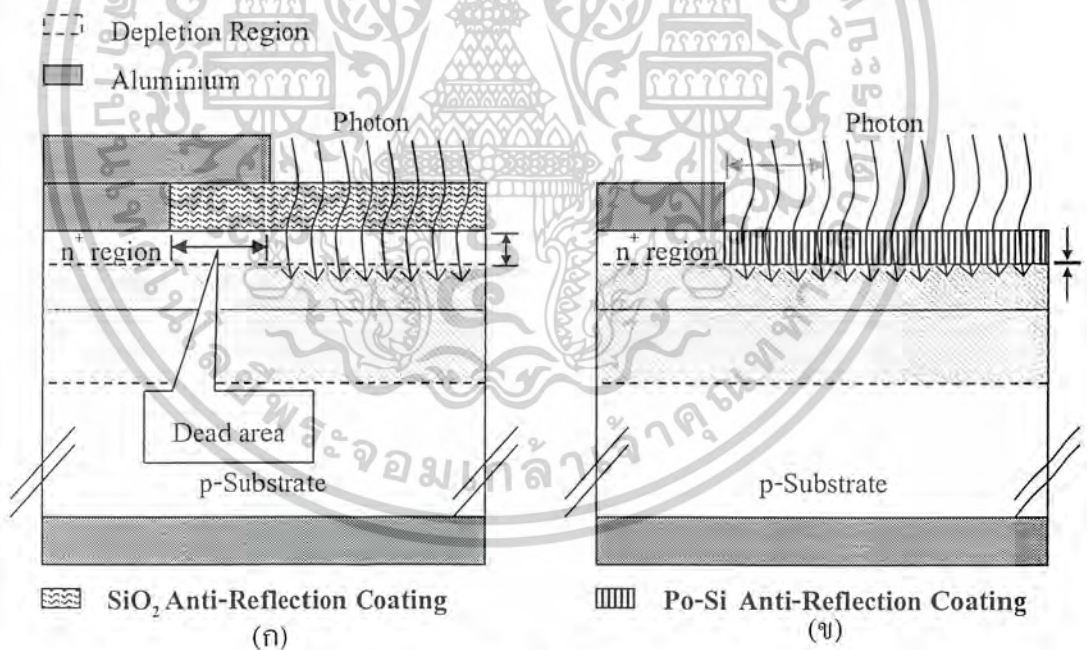
เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่เป็นที่ใช้พอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนซึ่งสร้างด้วยกระบวนการใหม่นี้ ยังมีแนวทางการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นได้อีก โดย

-ลดการสะท้อนแสงของชั้นลดการสะท้อนแสง โดยที่การลดการสะท้อนแสงเราทำได้จากการลดการสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซซิลิคอน

-เพิ่มพื้นที่รับแสง การเพิ่มพื้นที่รับแสงสามารถกระทำได้จากการลดพื้นที่ขั้วโลหะด้านรับแสงให้เหมาะสมมากขึ้น จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีพื้นที่ไวแสง(Active area) เพิ่มมากขึ้น

-เพิ่มการส่งผ่านแสงให้มากยิ่งขึ้น การเพิ่มการส่งผ่านแสงสามารถกระทำได้จากการสร้างให้เซลล์แสงอาทิตย์มีชั้นของเขตปลอดพาหะอยู่ใกล้ชิดกับชั้นป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์มากที่สุด มีสิ่งกีดขวางแสงที่จะส่องเข้าสู่เขตปลอดพาหะน้อยที่สุดและชั้นสิ่งกีดขวางแสงเหล่านั้นต้องสร้างให้มีการส่งผ่านแสงได้มากที่สุด

ซึ่งการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่ในลักษณะดังกล่าวจะไม่ทำให้ต้นทุนและขั้นตอนกระบวนการสร้างเพิ่มขึ้น แต่กลับจะให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 8.13 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่ให้สามารถลดการสะท้อนแสงเพิ่มพื้นที่รับแสงและเพิ่มการส่งผ่านแสงให้มากยิ่งขึ้น

รูป ก. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเก่าที่มีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงทำให้สูญเสียพื้นที่รับแสง

รูป ข. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ที่สามารถพัฒนาให้การสะท้อนแสงน้อยลง

สามารถเพิ่มพื้นที่รับแสงและเพิ่มการส่งผ่านแสงให้มากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300 K)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คุณสมบัติของซิลิคอน

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	g/cm ⁻³
ความหนาแน่น	2.328	cm ⁻³
ความหนาแน่นอะตอม	2.96 x 10 ²²	
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3 x 10 ⁻⁴	eV/°C
จุดหลอมเหลว	1417	°C
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว ระบาย 100	580	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร ระบาย 100	1260	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิว ระบาย 100	400	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสาร ระบาย 100	230	cm ² /V.s
ดัชนีหักเห	3420	
การนำความร้อน	1.57	W/cm-°C
การขยายตัว เนื่องจากความร้อน	2.6 x 10 ⁻⁶	(°C) ⁻¹
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	Å
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98 x 10 ¹²	cm ² /dym
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิคอนบริสุทธิ์	1.45 x 10 ¹⁰	cm ⁻³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์

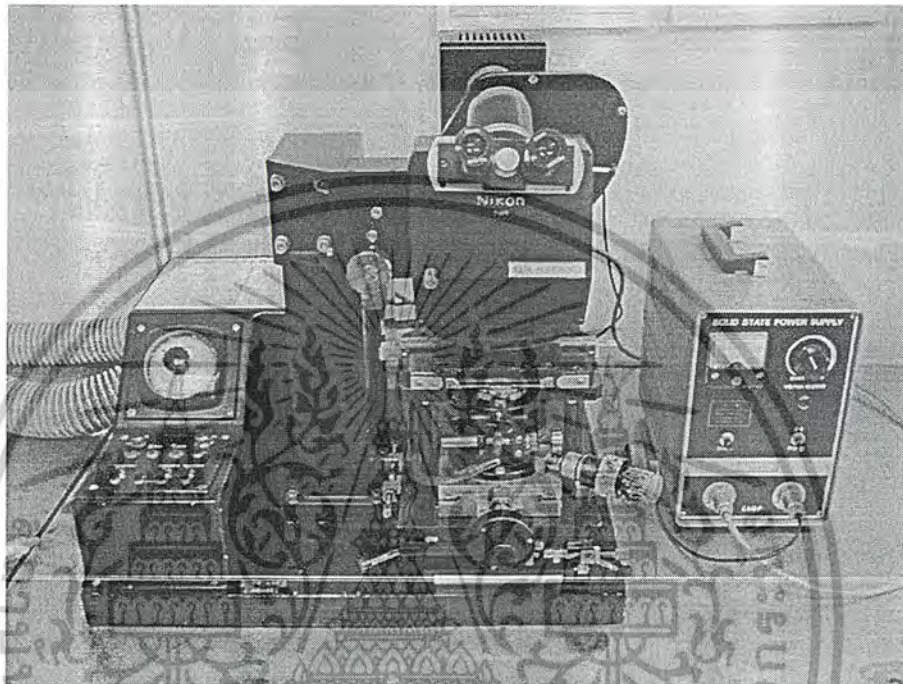
ชื่อ	ขนาด	หน่วย
น้ำหนักอะตอม	60.08	g/cm^{-3}
ความหนาแน่นอะตอม	$2.310 \cdot 10^{-22}$	cm^{-3}
ความต้านทาน (ที่ 300 K)	>1016	$\Omega\text{-cm}$
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	3.9	
จุดหลอมเหลว	1700	$^{\circ}\text{C}$
ความร้อนจำเพาะ	1.0	$\text{J/g}^{\circ}\text{C}$
การนำความร้อน	0.014	$\text{W/cm}^{\circ}\text{C}$
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	$0.5 \cdot 10^{-6}$	$(^{\circ}\text{C})^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Alignment expose



2. Four point probe resistivity testing

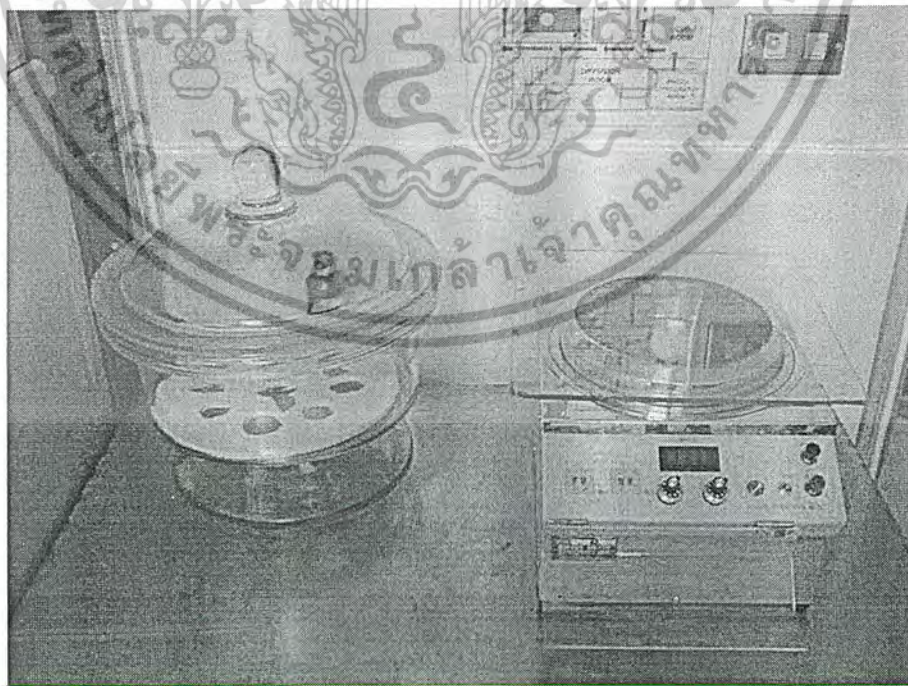


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Automatic thin film measurement

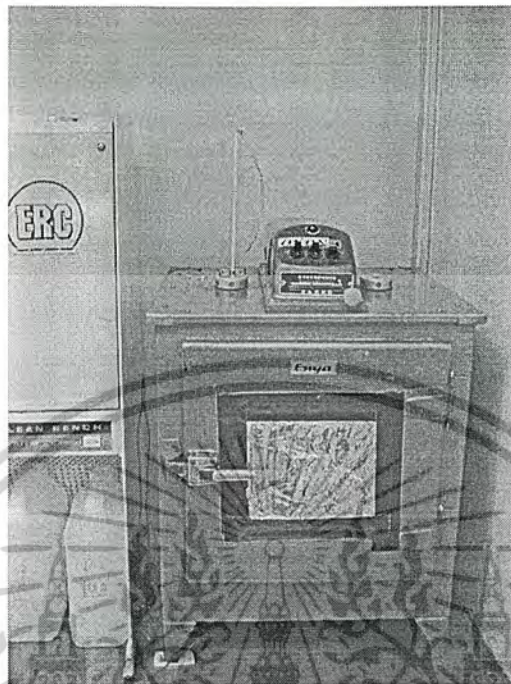


4. Spinner

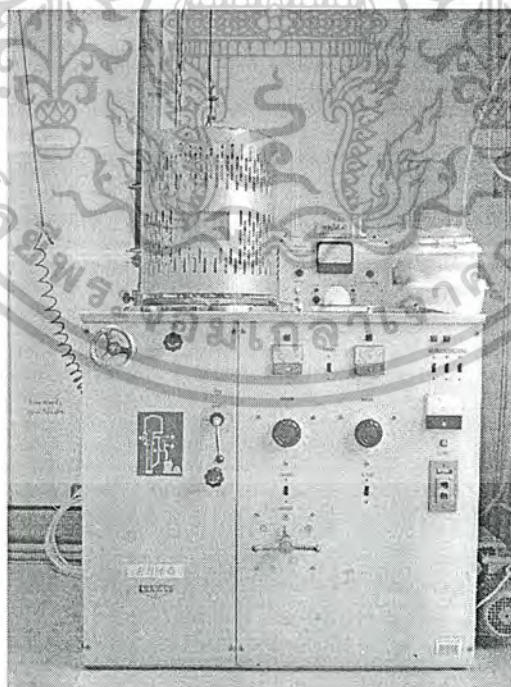


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตู้อบไล่ความชื้น

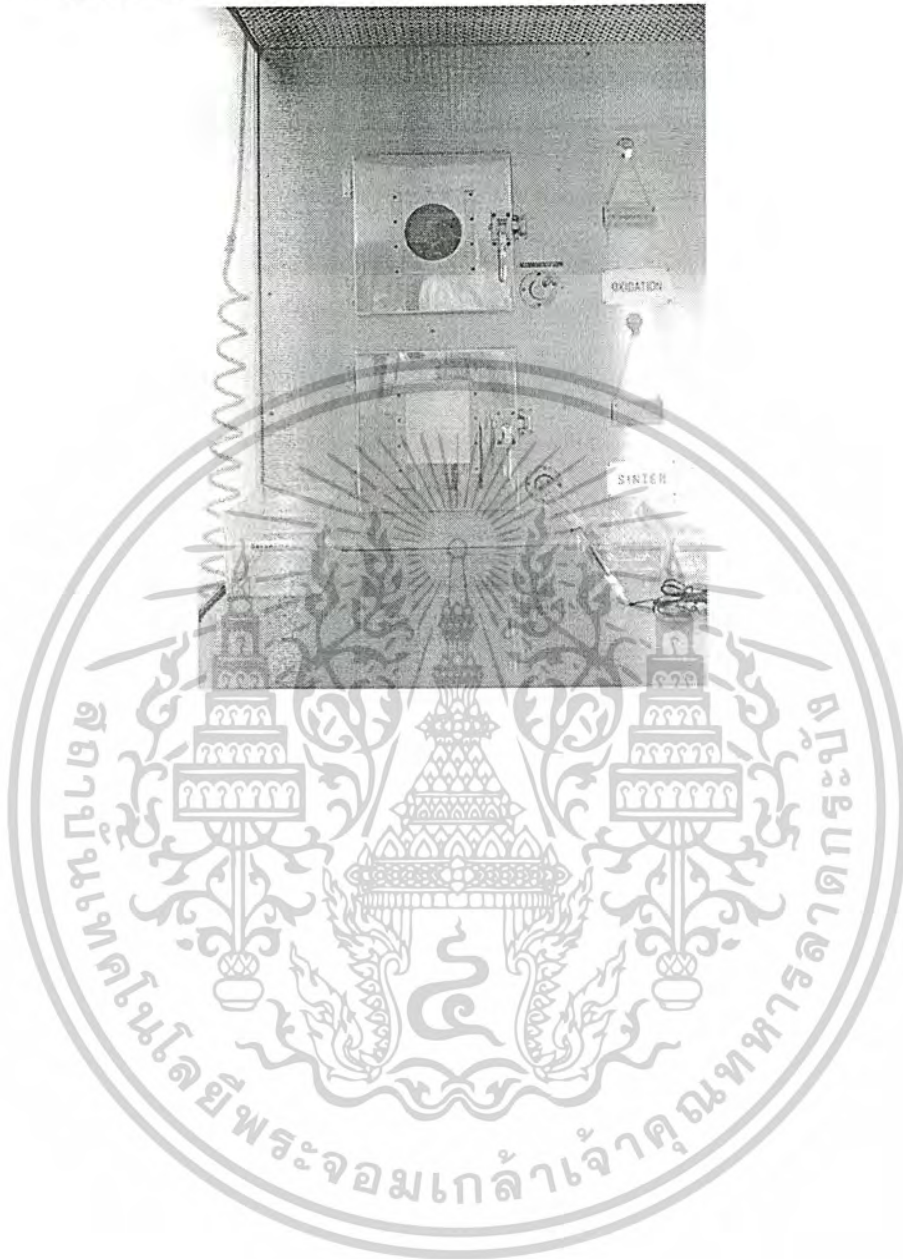


6. Evaporator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เตา Oxidation และ Sintering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม

1.1 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์

หรือที่เรียกว่า น้ำยาบัฟเฟอร์ (buffer solution)

น้ำยาบัฟเฟอร์ใช้สำหรับการกัดซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับแพร่งสารเจือ หรือเพื่อทำรอยสัมผัส (contact) ให้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ น้ำยาที่ใช้นั้นมีอัตราในการกัดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้ตามความจำเป็นของงาน

น้ำยาบัฟเฟอร์ 1

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 % 1 ส่วน

แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) 6 ส่วน

ผสมกันโดยปริมาตร มีอัตราการกัด (etching rate) ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

น้ำยาบัฟเฟอร์ 2

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 % 1 ส่วน

แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) 10 ส่วน

ผสมกันโดยปริมาตร มีอัตราการกัดประมาณ 600 อังสตรอมต่อนาที (10 อังสตรอมต่อวินาที)

1.2 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียม

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียมใช้สำหรับการกัดอะลูมิเนียมเพื่อทำลวดลายขั้วโลหะบน อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ มีส่วนผสมของสารเคมีโดยปริมาตร ดังนี้

กรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) 80 ส่วน

กรดไนตริก (HNO₃) 5 ส่วน

กรดอะซิติก (CH₃COOH) 5 ส่วน

น้ำบริสุทธิ์ (deionized water; DI water) 10 ส่วน

1.3 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดพอร์ซซิลิคอน แบบ Stain etching

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 % 1 ส่วน

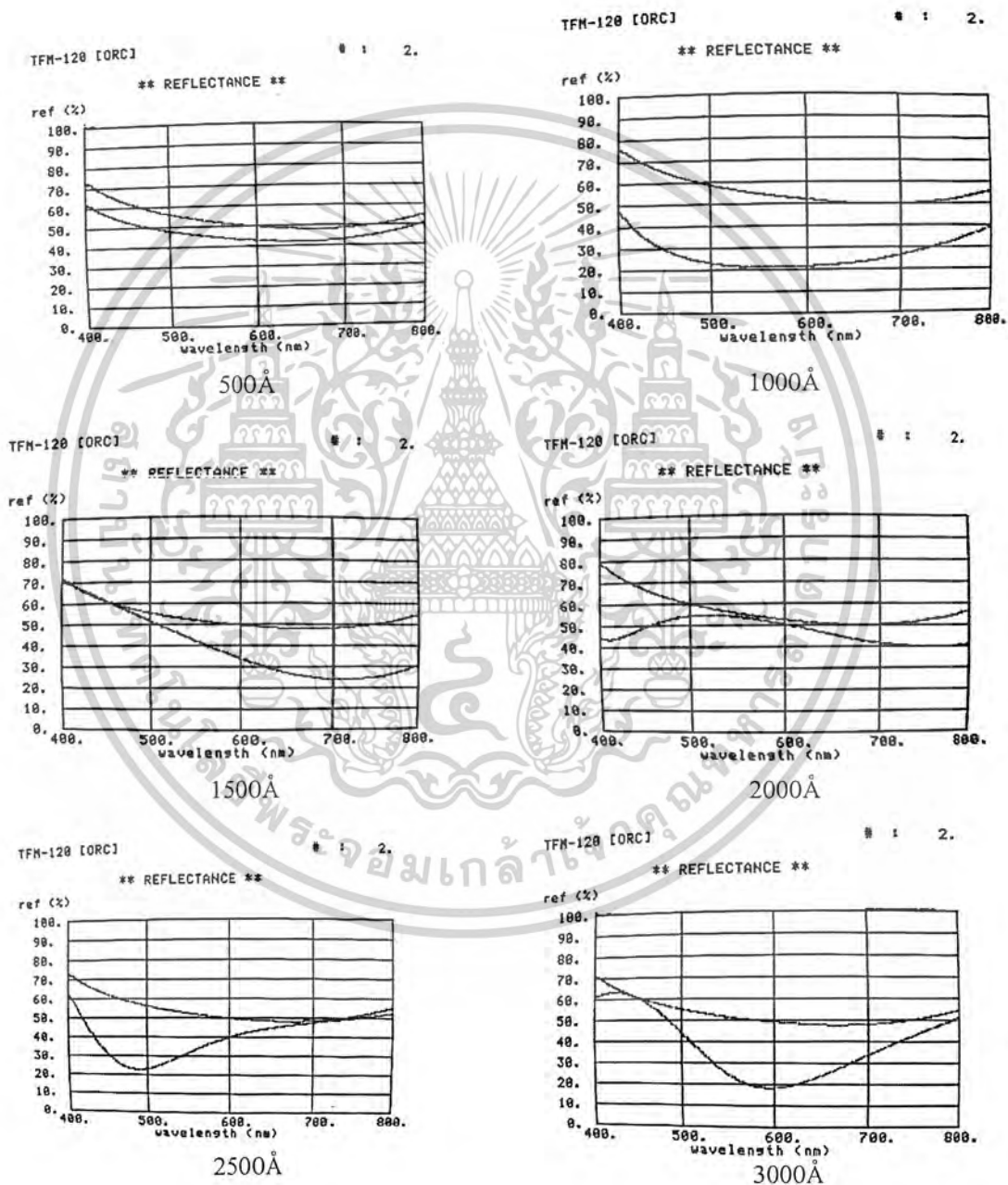
กรดไนตริก (HNO₃) 3 ส่วน

น้ำบริสุทธิ์ (deionized water; DI water) 5 ส่วน

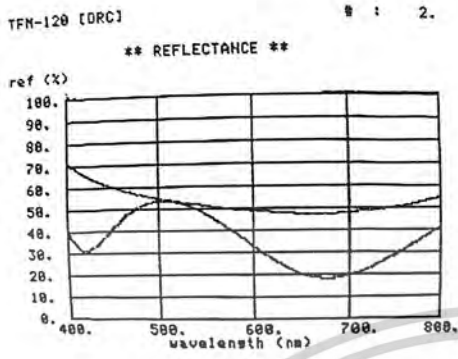
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

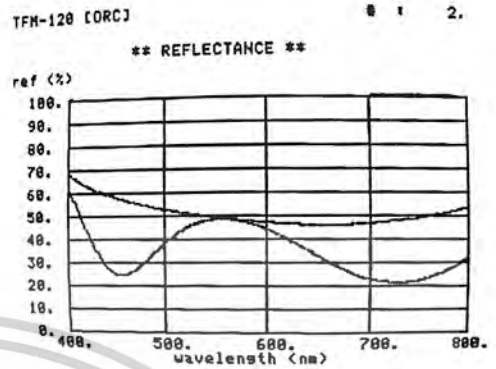
ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของซิลิคอนไดออกไซด์ ที่มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 500Å จนถึง 6500Å



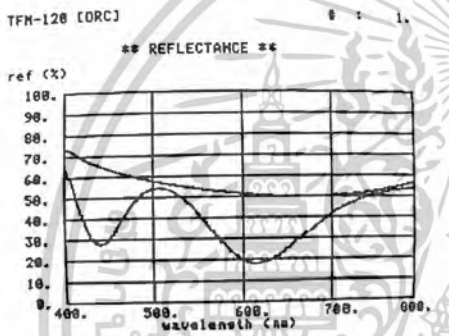
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



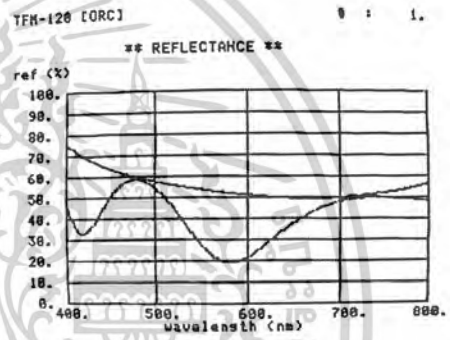
3500Å



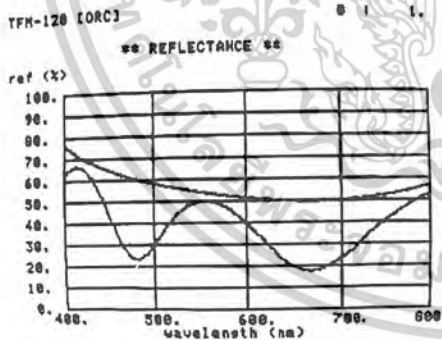
4000Å



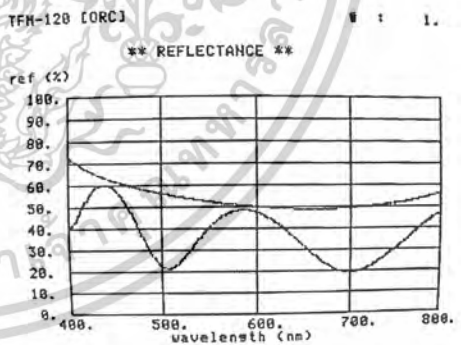
4500Å



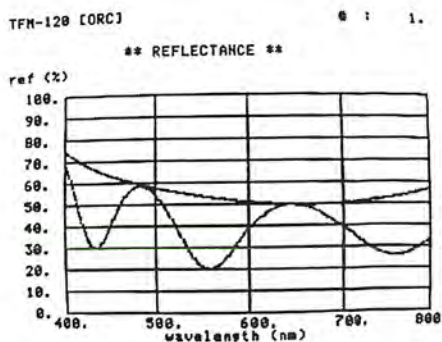
5000Å



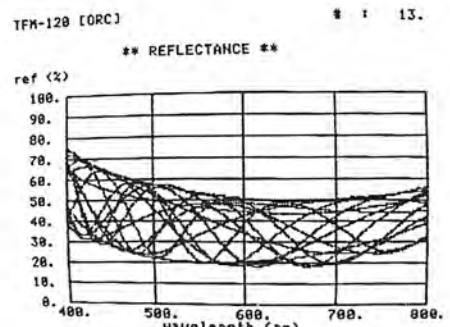
5500Å



6000Å



6500Å



6500Å - 500 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
ประวัติทีมงาน



รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ สุภเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปัจจุบัน : รองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ และนักวิจัยอาวุโสประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา : วศ.บ. โทคมนาคม (เกียรตินิยม), สจล., M.Eng., D.Eng. (Electronics), Tokai University Tokyo, Japan., Cert. In “Semiconductor Processes” OKI Electric Company. Japan, Cert. In “Integrated Circuits Manufacturing” NEC. Japan.

ประสบการณ์ :

2526 – 2533 หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

2533 – 2537 คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รางวัลผลงานวิจัย :

โครงการวิจัยดีเด่น ปี 2526 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
“การออกแบบ สร้าง และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์”

โครงการวิจัยดีเด่น ปี 2539 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
“การสร้างฟิล์มบางเพชร สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”

ผลงานการเขียน :

ตำราเรียน “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์” และ “เซมิคอนดักเตอร์เทคโนโลยี”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นายมนัสชัย ไชยนอก

ปัจจุบัน : นักศึกษาชั้นปีที่3 หลักสูตรต่อเนื่อง ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา : ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ , วิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี, กรุงเทพมหานคร



นายมน มีรักษ์

ปัจจุบัน : นักศึกษาชั้นปีที่3 หลักสูตรต่อเนื่อง ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา : ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ , วิทยาลัยเทคนิคอ่างทอง, อ่างทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้