

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน
โดยการพัฒนาโครงสร้างเซลล์

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF SILICON SOLAR CELL BY
STRUCTURAL DEVELOPMENT



โดย

นางสาวศศิภาญณ์ เตชะบรรณะปัญญา

เลขหมู่..... 62156
เลขทะเบียน..... 31 ก.ศ. 2549
วัน,เดือน,ปี.....

b..... 11610659
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน
โดยการพัฒนาโครงสร้างเซลล์
EFFICIENCY IMPROVEMENT OF SILICON SOLAR CELL BY
STRUCTURAL DEVELOPMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน

โดยการพัฒนาโครงสร้างเซลล์

**EFFICIENCY IMPROVEMENT OF SILICON SOLAR CELL BY
STRUCTURAL DEVELOPMENT**

ผู้จัดทำ นางสาวศศิภาญณี เตชะบรรณะปัญญา



โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. สมเกียรติ์ สุภเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน โดยการ
พัฒนาโครงสร้างเซลล์

จัดทำโดย นางสาว ศศิกัญจน์ เตชะบรรณะปัญญา รหัส 44010480




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน
โดยการพัฒนาโครงสร้างเซลล์

นางสาวศศิภาญจน์ เตชะบรรณะปัญญา
รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด และเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด จึงถือว่าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แต่เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีข้อจำกัดในการเปลี่ยนพลังงาน จึงต้องมีศึกษาและวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์

ในโครงงานนี้ เสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีสร้างสนามไฟฟ้าทางด้านหลังของเซลล์ (Back Surface Field) เพื่อลดกระแสอิมิตัว (I_r) เพิ่มกระแสลัดวงจร (I_{sc}) มีการศึกษาเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง และลดการสะท้อนของแสงอาทิตย์โดยการสร้างเป็นหลุมพริระมิด และการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์โดยลดชั้นการสะท้อนแสงโดยการทำพอร์สซิลิกอนแบบการกัดข้อมลีส (Stain Etching) อีกทั้งนำเสนอการออกแบบ Mask Solar cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF SILICON SOLAR CELL BY STRUCTURAL DEVELOPMENT

Miss Sasikan Taechabannapanya

Assoc. Prof. Dr. Somkiat Supadech (Adviser)

2nd Semester , Education Year 2004

Abstract

Solar energy is a clean energy. And it have never been exhausted. Thus solar energy is a good choice. Solar cell is a device can convert solar energy into electrical energy directly. However solar cell have been restricted energy converting. So we need to research on increasing solar cell efficiently.

This project present solar cell efficiency development by created back surface field. It made solar cell was reduced carrier's recombination at the back surface and it can increased short circuit current (I_{sc}) and reduced saturate current(I_s) .So the overall effect can increased efficiency, increasing active area by inverted pyramid etching. And research on anti-reflection coating-porous silicon. Beside designation of solar cell's pattern are present.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อ	i
สารบัญ	iii
สารบัญรูป	iv
สารบัญตาราง	xiii
บทที่ 1 บทนำ	1
ประวัติและความเป็นมา	2
พลังงานแสงอาทิตย์ และเซลล์แสงอาทิตย์	3
สารกึ่งตัวนำ	7
บทที่ 2 ทฤษฎี	11
ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น	11
ปรากฏการณ์รอยต่อพีเอ็น ในภาวะสมดุล	11
รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	14
รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	17
ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	18
พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	21
โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรสมมูล	26
ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์	27
ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	30
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	30
ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	32
การสะท้อนของแสงในตัวกลางต่างชนิดกัน	33
บทที่ 3 เทคโนโลยีและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	35
การสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ	35
การแพร่สารเจือ	39
การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิก	40
การประกอบรวมเป็นแผงเซลล์	42
การปรับปรุงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	44
การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	50
การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	62
บทที่ 4 การสร้างและการออกแบบเซลล์	80
การกัดหลุมพีระมิด	80
การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	81
การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เพิ่มขึ้นลดการสะท้อนแสงชนิดพอร์สซิติคอน	85
การออกแบบ MASK โดย Software คอมพิวเตอร์	89
ออกแบบ Mask โดยโปรแกรม L-Edit	81
การออกแบบ Mask โดยโปรแกรม Coral Draw	87
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	97
การทดลองการกัดหลุมพีระมิด	97
การทดลองการกัดหลุมพีระมิดและกัดพอร์สซิติคอนบนผิวหน้าหลุมพีระมิด	99
การทดลองการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์และการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ	101
เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างต่าง	
การทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี	101
และไม่มี สนาม ไฟฟ้าด้านหลัง (Back Surface Field)	
การทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี	116
โครงสร้างหลุมพีระมิด และ โครงสร้างอื่น	
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	143
ภาคผนวก	144
เอกสารอ้างอิง	

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1.1	เซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของ p-n junction ของผลึกซิลิคอน	2
1.1.2	การทดลองแสงตกกระทบวัตถุจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น	2
1.2.1	Effect of the earth's atmosphere on radiation from the sun	4
1.2.2	Calculation of Air Mass using the shadow of an object of known height	4
1.2.3	ไดอะแกรมระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์	5
1.2.4	ระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์จริง	6
1.3.1	ระดับพลังงานของธาตุ	7
1.3.2	ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	8
1.3.3	การเกิดอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	9
1.3.4	การเกิดอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	10
2.1	ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง	11
2.2	แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น	12
2.3	แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีไบอัส	12
2.4	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น	13
2.5	แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน (a) ขณะสัมผัส (b) ภาวะสมดุลหลังสัมผัสแล้ว	13
2.6	แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง	14
2.7	แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับ แรงดันไบอัสตรง	15
2.8	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับ แรงดันไบอัสตรง V_A	16
2.9	แสดงรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	17
2.10	แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ	17
2.11	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ V_A	18
2.12	แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	19
2.13	ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์	20
2.14	แสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการสงวนสิทธิ์ในบางประการ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

2.15	แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่ได้รับแสง และได้รับแสง	21
2.16	คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ	22
2.17	ความความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุณหภูมิต่ำ 300 K กับขนาด E_g ของสารกึ่งตัวนำ	25
2.18	ตัวอย่างแสดงลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง	25
2.19	โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	26
2.20	ลักษณะวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	27
2.21	ผลของความต้านทานอนุกรม	28
2.22	ผลของความต้านทานขนาน	29
2.23	การลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น	29
2.24	ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	30
2.25	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์	32
2.26	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง	33
2.27	การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชั้น และแบบ 3 ชั้น	34
3.1	ภาพสเกตดาวเทียม skylab ที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	35
3.2	ลำดับขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการเตรียมแร่ซิลิคอน	36
3.3	อุปกรณ์การปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน โดยวิธีไซโคราสกี	37
3.4	ผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน	38
3.5	อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีโซลาร์ไฟนิ่ง	38
3.6	อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีโพลโทโซน	39
3.7	การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสโดยใช้ฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์เป็น แหล่งจ่ายสารเจือ	40
3.8	การระเหยโลหะในสุญญากาศเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์	41
3.9	ประเภทของเส้นลวดนำไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยโลหะในสุญญากาศ	41
3.10	โครงสร้างของโมดูลชนิดหนึ่ง	42
3.11	การประกอบเซลล์เป็น โมดูล	43
3.12	แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว	43
3.13	แสดงตัวอย่างการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว	44
3.14	ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของโพลีซิลิคอน	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

3.16	การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟิซิลิคอน	47
3.17	เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟิซิลิคอน	48
3.18	เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธี Back Surface Fields (BSF)	50
3.19	Collection Probability ของเซลล์ที่มี BSF และไม่มี BSF	51
3.20	Dependence of the key solar cell parameter upon the density of the p-type dopants as obtained by high-performance experimental device:	52
	(a) Without a back surface field	
	(b) With a back surface field	
3.21	ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์ซิลิคอน	52
3.22	ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	53
3.23	การสร้างพอร์ซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และตัวอย่างของพอร์ซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบย้อม	54
3.24	เปรียบเทียบการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching	57
	(a) พอร์ซิลิคอนที่ได้จากการไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง	
	(b) พอร์ซิลิคอนที่ได้จากการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง	
3.25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์ซิลิคอน	57
3.26	แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์ซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ	58
3.27	แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่างๆ	59
3.28	แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์ซิลิคอน	60
3.29	ผลกระทบของอะตอมแปลกปลอมเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	62
3.30	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไป	63
3.31	ลักษณะของแผ่นผลึกรูปเดี่ยว	65
3.32	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพร์พอยท์โพรบ	67
3.33	Identifying flats on a silicon wafer	68
3.34	ความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ โดยวิธี Dry Oxidation	69
3.35	ความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ โดยวิธี Wet Oxidation	70

3.36 นี้คือเครื่องมือการออกซิเดชันแบบ Thermal oxidation
 3.36 นี้คือเครื่องมือการออกซิเดชันแบบ Thermal oxidation
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

3.37	น้ำยาไวแสงชนิดบวก และชนิดลบ	72
3.38	อุปกรณ์ที่ทำให้น้ำยาไวแสงกระจายสม่ำเสมอ (Photoresist spinner)	72
3.39	กระบวนการ Photolithography โดยใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ	73
	(a) growth of SiO ₂ film	
	(b) coating with photoresist	
	(c) mask placed in proximity	
	(d) mask alined and brought into contact	
	(e) photoresist developed	
	(f) oxide etch and photoresist removed	
3.40	ตัวอย่างลวดลายแผ่นโฟโตมาส์กเซลล์แสงอาทิตย์	74
3.11.1	พันธะในอะตอมซิลิกอนระนาบต่างๆของซิลิกอน	76
	(ก) (100)	
	(ข) (110)	
	(ค) (111)	
3.11.2	การกัดซิลิกอนระนาบ (100) ด้วยสารละลายKOH	77
3.11.3	ภาพตัดขวางของเซลล์ที่มีผิวแบบพีระมิด	78
3.11.4	แสดงการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกในซิลิกอนระนาบ(100)	78
4.1.1	ใช้เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์เพื่อการกัดเป็นหลุมพีระมิด	81
4.1.2	กัดซิลิกอนโดยใช้สารละลาย KOH ให้เป็นหลุมพีระมิด	81
4.1.3	ภาพตัดขวางSilicon Substrate ที่ผ่านการกัดหลุมพีระมิดไปสร้างชั้นออกไซด์ เพื่อป้องกันการแพร่	82
4.1.4	ภาพตัดขวางSilicon Substrate ผ่านการแพร่สารเจือโบรอน	82
4.1.5	ก. ภาพตัดขวางSilicon Substrate ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิด 1 st Mask เพื่อเปิดช่องออกไซด์	83
	ข. ภาพตัดขวางSilicon substrate ทำกระบวนการ Fabrication โดยใช้ ฟอสฟอรัสเป็นสารเจือ	83
4.1.6	ภาพตัดขวางSilicon substrate เปิด MASK เพื่อกัด SiO ₂ เป็น Contact Window	83
4.1.7	ภาพตัดขวางSilicon substrate ผ่านกระบวนการ Evaporation	84
4.1.8	ภาพตัดขวางSilicon substrate ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	84

เอกสารนี้เป็นเพื่อเปิด Mask แล้วทำการกัด Al ส่วนที่ไม่ต้องการออก ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

4.3.1	ลวดลายโลหะขนาดต่างๆที่ออกแบบโปรแกรม Corel Draw	89
4.3.2	การออกแบบ ลวดลายสี่เหลี่ยมจัตุรัส และวงกลม	90
4.3.3	การออกแบบลวดลายการซ้อน Mask	90
4.3.4	การออกแบบลวดลายตัวอักษร	90
4.3.5	Mask สำหรับทดลองการกัดหลุมพีระมิดขนาดปากหลุม 35x35 ไมครอน	91
4.3.6	Mask Solar cell ชั้นที่ 1 สำหรับเปิดเป็นหลุมปิรามิด	91
4.3.7	Mask และ Selective ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Corel Draw	92
4.3.8	Mask Inverted Pyramid Solar cell ที่ออกแบบบน โปรแกรม Corel Draw	93
4.3.9	ขนาดลวดลายโลหะ Finger และ Bus bar บน Mask	94
4.3.10	ตัวอย่างการวางลวดลายโลหะลงบนพื้นที่ ที่เกิดจากการetching ทั้งสองเซลล์	95
4.3.11	การออกแบบ Mask โดยเซลล์หนึ่ง เป็นการลดชั้นการสะท้อนของแสง พอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ที่มีชั้นป้องกัน	96
5.1.1	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของพีระมิดขนาดปากหลุม 30 ไมโครเมตรระยะห่าง ระหว่างหลุม 5 ไมโครเมตร ที่มุม 30 องศา	97
5.1.2	ภาพถ่ายลักษณะด้านตัดขวางของพีระมิดที่มีขนาดปากหลุม 30 ไมโครเมตร	97
5.1.3	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของพีระมิดขนาดปากหลุม 35 ไมโครเมตรระยะห่าง ระหว่างหลุม 5 ไมโครเมตร ที่มุม 30 องศา	98
5.1.4	ภาพถ่ายลักษณะด้านตัดขวางของพีระมิดที่มีขนาดปากหลุม 35 ไมโครเมตร	98
5.1.5	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของพีระมิดขนาดปากหลุม 40 ไมโครเมตรระยะห่าง ระหว่างหลุม 5 ไมโครเมตร ที่มุม 30 องศา	98
5.1.6	ภาพถ่ายลักษณะด้านตัดขวางของพีระมิดที่มีขนาดปากหลุม 40 ไมโครเมตร	98
5.1.7	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของพีระมิดขนาดปากหลุม 50 ไมโครเมตรระยะห่าง ระหว่างหลุม 10 ไมโครเมตร ที่มุม 30 องศา	98
5.1.8	ภาพถ่ายลักษณะด้านตัดขวางของพีระมิดที่มีขนาดปากหลุม 50 ไมโครเมตร	98
5.2.1	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมลึที่สร้าง บนพีระมิดความกว้างปากหลุม 30 μ m Gap 5 μ m ที่มุม 30องศา	99
5.2.2	ภาพขยายจากรูปที่ 5.2.1	99
5.2.3	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมลึที่สร้าง บนพีระมิดความกว้างปากหลุม 35 μ m Gap 5 μ m ที่มุม 30องศา	99
5.2.4	ภาพขยายจากรูปที่ 5.2.3	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

5.2.5	ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซเซลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมลที่สร้างบนพีระมิดความกว้างปากหลุม 40 μm Gap 5 μm ที่มุม 30องศา	100
5.2.6	ภาพขยายจากรูปที่ 5.2.5	100
5.2.7	ภาพขยายภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซเซลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมลที่สร้างบนพีระมิดความกว้างปากหลุม 50 μm Gap 10 μm ที่มุม 30องศา	100
5.3.1	การวัดความลึกของสนามไฟฟ้าด้านหลัง	101
5.3.2	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส — แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์	103
5.3.3	กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน — แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์	103
5.3.4	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นลึก 4 ชั่วโมง(72)	105
5.3.5	กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นลึก 4 ชั่วโมง(72)	105
5.3.6	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นลึก 6 ชั่วโมง (73)	107
5.3.7	กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นลึก 6 ชั่วโมง (73)	107
5.3.8	กราฟแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยไม่มีและมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการชั้นลึกที่เวลาต่างๆ	108
5.3.9	กราฟแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยไม่มีและมีBSFที่เวลาชั้นลึกต่างๆ	108
5.3.10	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ (21)	110
5.3.11	กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ (21)	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

5.3.12	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น ลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และ มี-สนามไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นลึก 4 ชั่วโมง (72)	112
5.3.13	กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น ลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และ มี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นลึก 4 ชั่วโมง (22)	112
5.3.14	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลด การสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และ มี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นลึก 6 ชั่วโมง (23)	114
5.3.15	กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น ลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และ มี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นลึก 6 ชั่วโมง (23)	114
5.3.16	กราฟแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยไม่มีและมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการชั้นลึกที่เวลาต่างๆ	115
5.3.17	กราฟแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย ไม่มีและมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการชั้นลึกที่เวลาต่างๆ	115
5.3.18	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด	118
5.3.19	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด	118
5.3.20	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างหลุม พีระมิด พอร์สซิลิกอน	120
5.3.21	กราฟ แสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน	120
5.3.22	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้างหลุมพีระมิดและ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	122
5.3.23	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิดและสนามไฟฟ้าด้านหลัง	122
5.3.24	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอนและ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

5.3.25	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอนและ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	124
5.3.26	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	126
5.3.27	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	126
5.3.28	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และสนามไฟฟ้าด้านหลัง	128
5.3.29	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และสนามไฟฟ้าด้านหลัง	128
5.3.30	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	130
5.3.31	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	130
5.3.32	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน และสนามไฟฟ้าด้านหลัง	132
5.3.33	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน และสนามไฟฟ้าด้านหลัง	132
5.3.34	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 9 มีโครงสร้างหลุมพีระมิดและพอร์สซิลิกอน	134
5.3.35	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 9 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และพอร์สซิลิกอน	134
5.3.36	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 11 มีโครงสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิกอนไดออกไซด์	136
5.3.37	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 11 มีโครงสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิกอนไดออกไซด์	136
5.3.38	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด	138
5.3.39	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด	138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

5.3.40	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างพอร์ซซิลิกอน	140
5.3.41	กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างพอร์ซซิลิกอน	140
5.3.42	กราฟแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ เซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 6 ชนิด	142
5.3.43	กราฟแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของ เซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 6 ชนิด	142



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
1.1 แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆที่นำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.1 แสดงค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน	23
2.2 แสดงตัวอย่างดัชนีหักเห(n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	33
3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ	49
3.2 แสดงจุดเด่น และจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ	49
5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่มีและมีสนามไฟฟ้า ด้านหลังที่ทำการขั้วลึกลับที่เวลาต่างๆ	108
5.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่มีและมีสนามไฟฟ้า ด้านหลังที่ทำการขั้วลึกลับที่เวลาต่างๆ	115
5.3 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด	117
5.4 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และพอร์สซิลิกอน	119
5.5 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และสนามไฟฟ้าด้านหลัง	121
5.6 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน และสนามไฟฟ้าด้านหลัง	123
5.7 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	125
5.8 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้างหลุม พีระมิด พอร์สซิลิกอน และสนามไฟฟ้าด้านหลัง	127
5.9 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	129
5.10 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง	131
5.11 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 9 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน	133
5.12 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 11 มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบ ซิลิกอนไดออกไซด์	135
5.13 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด	137
5.14 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด	139
5.15 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ไม่ว่าจะยุคสมัยใดสิ่งมีชีวิตก็ต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีวิต นับตั้งแต่พลังงานในระดับเซลล์และกล้ามเนื้อของสิ่งมีชีวิต ไปจนพลังงานจากสิ่งแวดล้อมที่มนุษย์ที่ชาญฉลาดสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์นานับประการ เช่น พลังงานความร้อนจากหินหรือถ่านไม้ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากซากดึกดำบรรพ์ และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น มนุษย์จะนำพลังงานเหล่านี้มาแปรรูปเป็นพลังงานรูปอื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานกลในรถยนต์ เป็นต้น

แหล่งกำเนิดพลังงานต่าง ในปัจจุบัน คือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆ เหล่านี้ นับวันจะมีแต่น้อยลงและมีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย ส่วนพลังงานไฟฟ้าจากน้ำที่อยู่ในรูปของเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำแม้จะไม่ทำให้เกิดมลพิษ ก็มีผลทำลายสภาพป่าและลุ่มพื้นที่ป่าสมบูรณ์ ซึ่งเป็นที่อยู่ของสัตว์ป่าต่างๆ มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ในระยะยาว ส่วนพลังงานลมมีข้อจำกัดในแต่ละพื้นที่

ปัจจุบันประเทศไทยมีความสามารถผลิตไฟฟ้าในระดับ 20,000 MWp โดยได้มาจากการผลิตต่างๆ คือ ไฟฟ้าพลังความร้อน (จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง) 80%, ไฟฟ้าพลังน้ำ 10% จะเห็นว่าเราต้องอาศัยการผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ดังกล่าวต้องนำเข้าเกือบทั้งหมด และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ แนวทางแก้ปัญหา คือ การพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานนิวเคลียร์, การพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศตนเอง เช่น ความร้อนใต้พิภพ, พลังงานลม, พลังงานคลื่น, พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อสร้างไฟฟ้ารวมทั้งความร้อน ในกลุ่มพลังงานใหม่เหล่านี้ พลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างเด่นกว่าชนิดอื่น เพราะมีทั่วไป, มีไม่จำกัด, สะอาด, ติดต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จทั้งในด้านเทคโนโลยี และเศรษฐกิจ เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษด้วย ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่มนุษย์ได้พยายามประดิษฐ์คิดค้นขึ้น เรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์” หรือ “โซลาร์เซลล์” (Solar Cells)

ปัจจุบันได้มีการศึกษา, วิจัย และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 2 ประการ คือ

1. การลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์
2. การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับโครงการนี้เป็นการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น โดยมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back Surface Fields (BSF) ซึ่งการทำ BSF จะเข้าไปช่วยเพิ่มกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) จึงมี

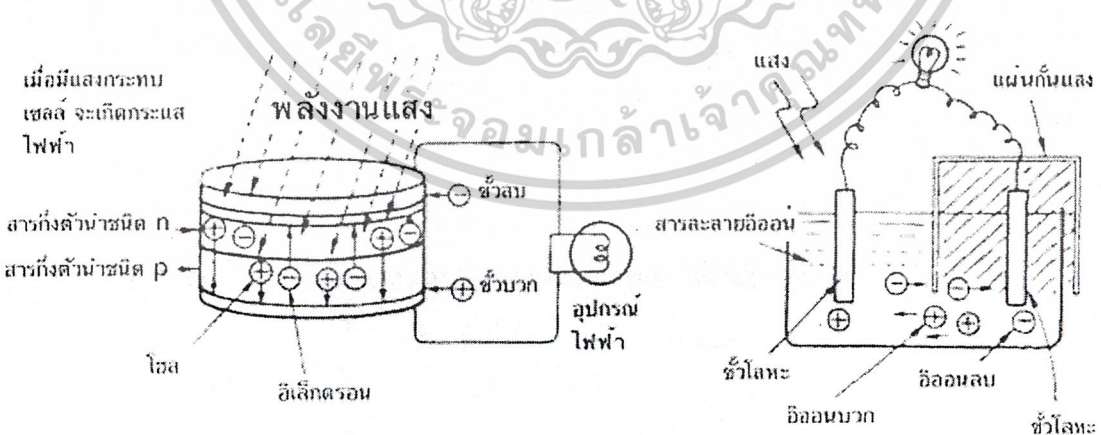
ผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้น โดยการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในโครงการนี้ ได้ทำการ ทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ เซลล์ หลังจากผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพทั้ง 2 วิธีข้างต้น โดยการทดลองนี้อาจจะมีต้นทุน ในการทดลองสูงอยู่บ้าง ในการนำ Primum-Grade Silicon ที่มีราคาสูงมาใช้เป็นวัสดุในการทดลอง แต่ถ้ามองในมุมกลับกัน ยิ่งเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากเท่าไร ก็ หมายถึง ในพื้นที่เซลล์เท่าเดิมเราได้ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น หรือในประสิทธิภาพที่เท่าเดิม เรา สามารถสร้างเซลล์ได้ในพื้นที่ที่ลดลง นั่นก็คือเป็นการลดต้นทุนในการผลิตเซลล์ไปในตัวด้วย

1.1 ประวัติและความเป็นมา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ทางวิศวกรรมซึ่งประยุกต์ใช้คุณสมบัติของ สารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงตกกระทบในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า บุคคลแรกที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของ p-n junction ของผลึกซิลิคอน (ดังรูปที่ 1.1) คือนักวิจัยชื่อ Gerald Pearson แห่ง Bell Laboratories ในปีค.ศ.1954 ซึ่งเป็นช่วงหลังจากการค้นพบ ทรานซิสเตอร์โดย William Shockley แห่ง Bell Laboratory ในปีค.ศ.1949 ไม่นานนัก โดยในครั้ง แรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น

เมื่อย้อนหลังกลับไปศึกษาถึงประวัติศาสตร์การค้นคว้าเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างแสง และวัตถุใน แห่งของไฟฟ้าจะทราบว่า ในปีค.ศ.1839 E.Bequerel นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เป็นคนแรกที่ค้นพบว่า เมื่อ แสงตกกระทบวัตถุจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เขาได้ทำการทดลองดังรูปที่ 1.2 โดยเอาขั้วโลหะสองขั้วจุ่มใน สารละลายไอออน แล้วให้แสงกระทบได้เพียงขั้วเดียว ปรากฏว่า มีกระแสไหลในสายไฟที่ต่อระหว่างขั้วทั้งสอง แสดงให้เห็นถึงการเกิดกระแสไฟฟ้าในวัตถุเมื่อมีแสงตกกระทบ และเขายังได้พบด้วยว่า เมื่อเปลี่ยนสี (ความยาวคลื่น, พลังงาน) ของแสง ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนตามด้วย



รูปที่ 1.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของ p-n junction ของผลึกซิลิคอน

รูปที่ 1.1.2 การทดลองแสงตกกระทบวัตถุจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 นั้นต่ำแต่ประมาณ 1% เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำเอาความรู้นี้ไปใช้ประโยชน์ในการวัดความเข้มของแสงในเครื่องถ่ายภาพเอกสารได้ เป็นต้น

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

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

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

1. 2 พลังงานแสงอาทิตย์ และเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะจำเพาะของแสงอาทิตย์ และการแผ่รังสี

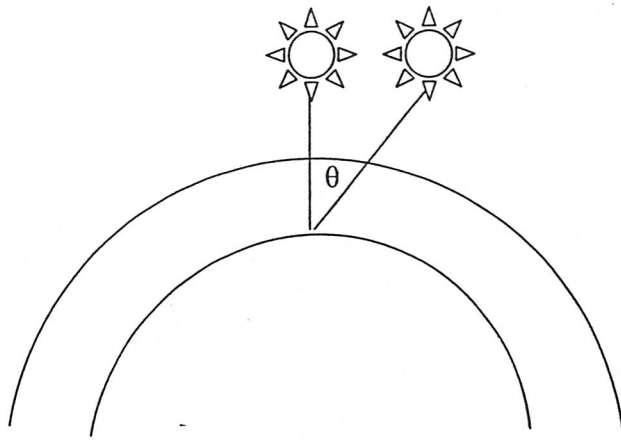
ดวงอาทิตย์ ทรงกลมร้อนประกอบด้วยก๊าซที่ถูกทำให้ร้อน ภายใต้อปฏิกิริยา nuclear fusion ณ จุดศูนย์กลาง ซึ่งอุณหภูมิสูงถึง 20 ล้าน เคลวิน ถึงแม้ว่ารังสีจากดวงอาทิตย์ เดินทางมาถึงพื้นผิวโลกเป็นอัตราส่วนที่สมเหตุสมผลกับเวลาที่พบกว่าจะมีความร้อนสูงมาก แต่ก็เพราะมีชั้นบรรยากาศทำหน้าที่ขั้มซับและกระจายรังสีนี้ออกไป เมื่อเวลาที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง รังสีขนาดมากที่สุดจะส่องมาถึงพื้น โลก เมื่อดวงอาทิตย์ อยู่ตรงกลางศีรษะ และแสงอาทิตย์ จะมีระยะทางเดินน้อย(pathlength) ที่สุดเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศ

ระยะทางเดิน(pathlength)สามารถประมาณได้จาก $1/\cos\theta$ เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุมกับกลางศีรษะ ระยะทางเดิน(pathlength)ถูกอ้างอิงกับ *Air Mass* ที่ซึ่งรังสีดวงอาทิตย์ต้องผ่านถึงพื้นผิวโลก ดังนั้น

$$Air Mass = 1/\cos\theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เมื่อ $\theta = 0$, Air Mass เท่ากับ 1 หรือ AM1, $\theta = 60$ องศา Air Mass เท่ากับ 2 หรือ AM2

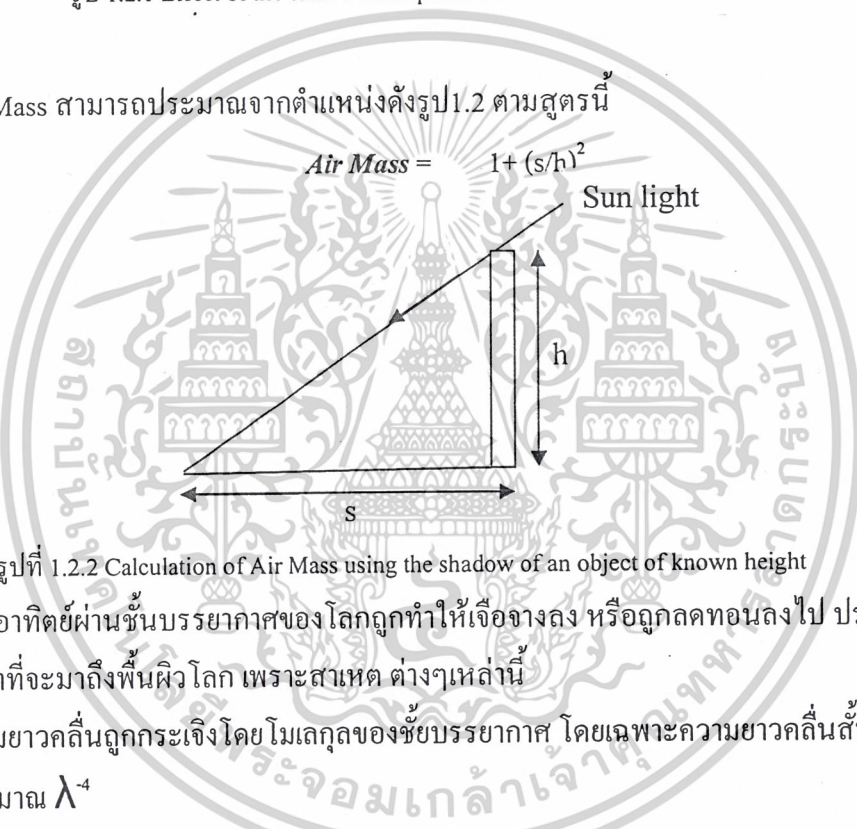
ในกรณีที่มุม θ พังสนธิหักมุมให้คิดแบบแสงเหนือหาและต้องอ้างอิงถึงเงาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1.2.1 Effect of the earth's atmosphere on radiation from the sun

Air Mass สามารถประมาณจากตำแหน่งดังรูป 1.2 ตามสูตรนี้

$$\text{Air Mass} = 1 + (s/h)^2$$



รูปที่ 1.2.2 Calculation of Air Mass using the shadow of an object of known height

แสงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศของโลกถูกทำให้เจือจางลง หรือถูกลดทอนลงไป ประมาณ 30% ด้วยเวลาที่จะมาถึงพื้นผิวโลก เพราะสาเหตุต่างๆ เหล่านี้

1. ความยาวคลื่นถูกกระเจิงโดยโมเลกุลของชั้นบรรยากาศ โดยเฉพาะความยาวคลื่นสั้น ประมาณ λ^{-4}
2. การกระเจิงจะถูกกระเจิงโดยหมอกควันและฝุ่น
3. การซึมซับจะถูกซึมซับโดยก๊าซ ณ ชั้นบรรยากาศ เช่น ออกซิเจน โอโซน ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์

พลังงานแสงอาทิตย์ กับ PHOTOVOLTAICS

Photovoltaic ไม่สามารถแยกออกจากการพัฒนาของกลศาสตร์ควอนตัม เซลล์แสงอาทิตย์ตอบสนองกับแสง หรือ quanta แม้กระทั่งคลื่น สมบัติคู่ของแสงไม่ควรมองข้ามในการออกแบบเซลล์

ตัวแสงอาทิตย์เองที่อยู่ด้านนอกของชั้นบรรยากาศโลก ประมาณ ได้เป็นรังสีของวัตถุดำในอุดมคติ ซึ่งวัตถุดำไม่สามารถอธิบายได้โดย Classical theory ตัวมันเองสามารถตอบสนองสำหรับ

เอกภพ การพัฒนาของกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังการสะท้อนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

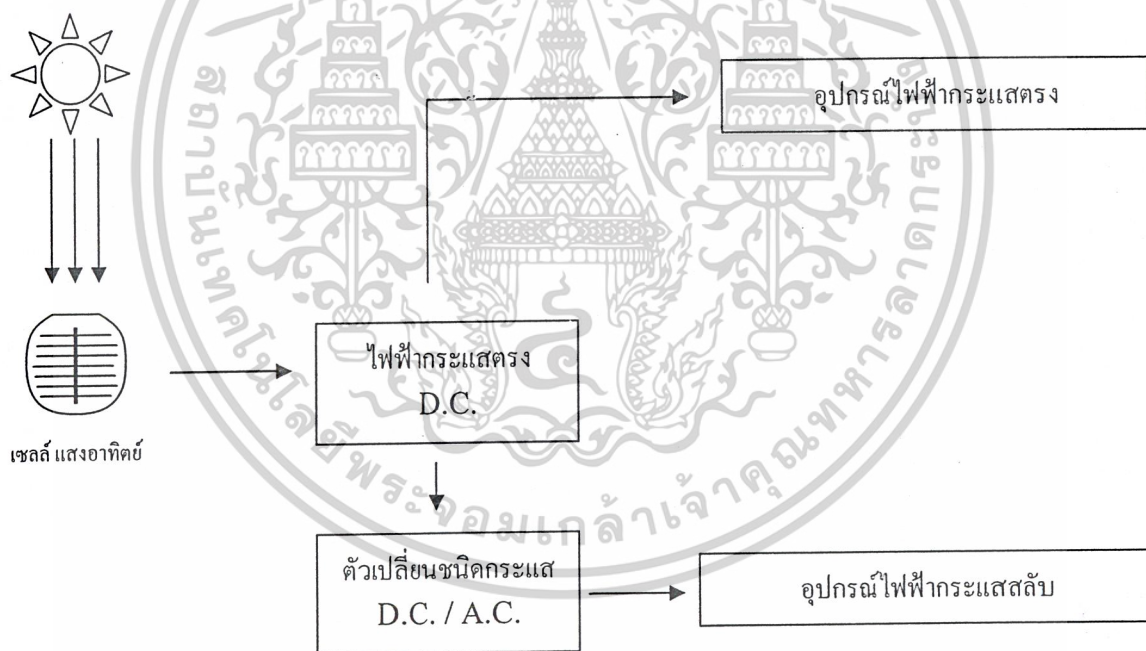
ของแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ โลกปลดปล่อย รังสีด้วยตัวเองคล้ายกับวัตถุดำ แต่ศูนย์กลางมีความยาวคลื่นมากกว่า เพราะอุณหภูมิต่ำกว่า

การซึมซับและการกระเจิงของแสงโดยชั้นบรรยากาศโลกไปลดความเข้มแสงและการกระจายความยาวคลื่น ของแสงที่ถึงพื้นผิวโลก เป็นผลให้ที่อุณหภูมิมบนผิวโลกสูงกว่าดวงจันทร์และความไวของอุณหภูมิมบนผิวโลกที่มีความสัมพันธ์กับพวกก๊าซเรือนกระจก เพราะว่าความหลากหลายของการกระจายความยาวคลื่นบนผิวโลก

การออกแบบของระบบ Photovoltaic ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และความแม่นยำ ของ Insolation Data อย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามการเข้าถึงมากมายที่ถูกพัฒนาสำหรับการประมาณความเป็นไปได้ของระดับ Insolation อยู่บนพื้นฐานของข้อมูลชั่วโมงแสงอาทิตย์ โดยทั่วไป และ ข้อมูลเงามืดของดาวเคราะห์ที่ปกคลุม

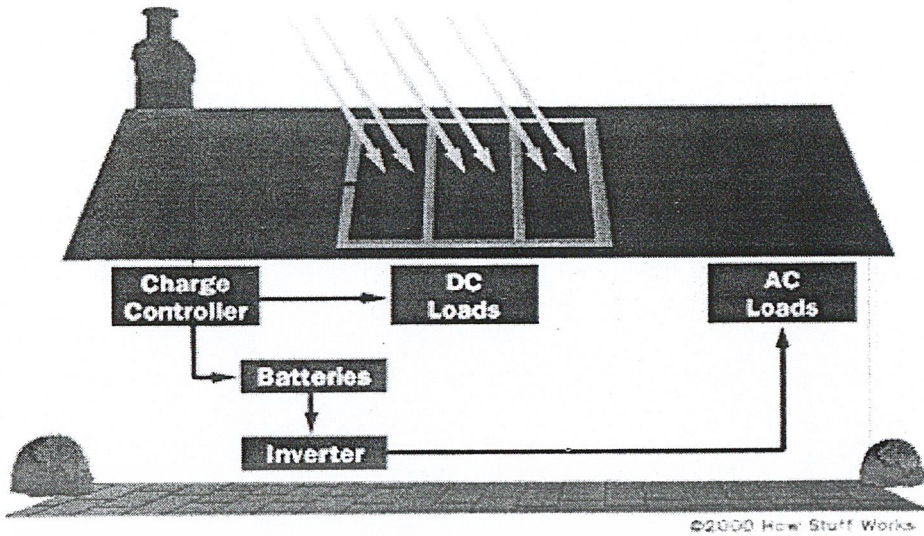
เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ คือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง และได้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 1.2.3 โค้ดระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2.4 ระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์จริง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน เนื่องจาก

1. ซิลิกอนเป็นธาตุที่หาง่าย และมีมากที่สุดบริเวณผิวโลกจึงมีราคาไม่แพง
2. เทคโนโลยีของซิลิกอนเป็นที่เข้าใจ เนื่องจากมีการพัฒนามาเป็นเวลานาน

แต่สารกึ่งที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ สารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างพลังงานประมาณ 1.5 eV ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.43 eV จากการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จาก GaAs ด้วย โครงสร้างที่เหมาะสม สามารถให้ประสิทธิภาพแปรรูปพลังงานได้ถึง 20% แต่ GaAs เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาแพง จึงเป็นข้อเสียเปรียบซิลิกอน

ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

SOLAR CELL MATERIAL CANDIDATES (FROM BYLANDER [13])

Material	Major materials					Experimental diffusion length (μm)
	Energy gap (eV)	Mobility (300 K) (cm ² · V ⁻¹ · 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 ⁻²	5
CdS	2.6	340	615	100	10 ⁻²	~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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สารกึ่งตัวนำ

วัสดุต่างๆในโลกนี้สามารถจัดเป็นหมู่ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็น 3 หมู่คือ

1. วัสดุตัวนำไฟฟ้า (Conductor) ได้แก่วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น
2. วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semi Conductor) ได้แก่วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าฉนวน แต่เลวกว่าตัวนำ เช่น Si, Ge เป็นต้น
3. วัสดุฉนวน (Insulation) ได้แก่วัสดุที่นำไฟฟ้าไม่ดี เช่น แก้ว, ไม้ก้ำ เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

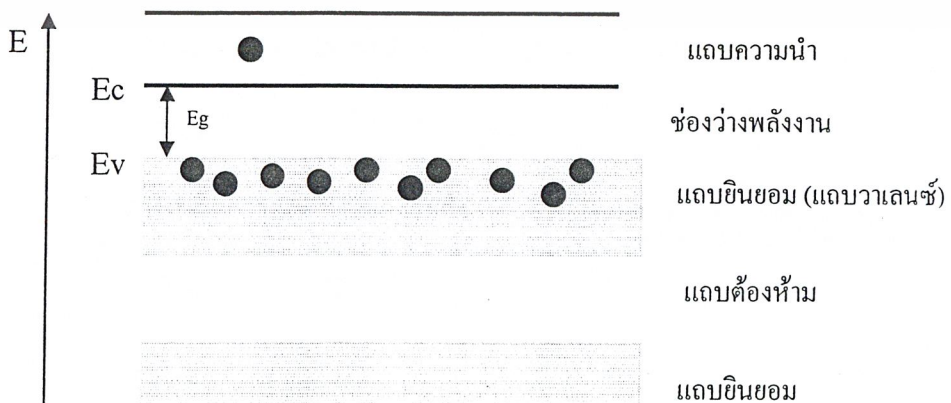
1. สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุแท้ ได้แก่ธาตุหมู่ที่ 4 เช่น ซิลิกอน, เยอรมันเนียม, ดีบุก เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ ได้แก่สารประกอบของธาตุหมู่ 3 และหมู่ 5 เช่น GaAs, GaP และสารประกอบของธาตุหมู่ 2 กับหมู่ 6 เช่น CdS เป็นต้น

โครงสร้างสารกึ่งตัวนำ

เมื่ออะตอมหลายๆอะตอมมาอยู่ใกล้ชิดอะตอมดังกล่าวจะเข้ายึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อรวมตัวกันเป็น โมเลกุล การเกาะเกี่ยวระหว่างธาตุนี้เรียกว่า พันธะ การเกาะเกี่ยวกันของอะตอมของสารกึ่งตัวนำเรียกว่า พันธะโควาเลนต์ โดยอะตอมที่ใกล้ชิดกัน จะใช้อิเล็กตรอนร่วมกันเพื่อให้อะตอมเสถียร และแต่ละอะตอมมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน จำนวน 4 อิเล็กตรอน ดังนั้นอะตอมหนึ่งจะสร้างพันธะโควาเลนต์ กับอะตอมข้างเคียงได้ 4 อะตอม

แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ในผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นสารของแข็ง อะตอมเข้าสร้างพันธะกันและอยู่ใกล้ชิดกันมาก และมีปฏิกริยาภายในต่อกันทำให้เกิดการแตกต่างของระดับพลังงาน (splitting of energy level) เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ระดับพลังงานจำนวนมากที่เกิดขึ้นใหม่จะมีค่าใกล้เคียงกัน จนดูเหมือนว่าเป็นแถบพลังงาน (Energy Band) ขึ้นมา ระดับพลังงานวาเลนซ์ (Valence Level) ซึ่งเป็นระดับพลังงานชั้นนอกสุด ถ้าเกิดเป็นแถบพลังงานเรียกว่าแถบวาเลนซ์ (Valence Band) อิเล็กตรอนในระดับวาเลนซ์ ยังไม่เป็นอิเล็กตรอนอิสระ แต่เมื่อได้รับพลังงานภายนอก มากพอถึงค่าหนึ่งวาเลนซ์อิเล็กตรอนเหล่านี้เป็นอิสระได้ พลังงานนี้เท่ากับ E_g (Energy Gap) หรือช่องว่างพลังงาน ในสารกึ่งตัวนำมีค่าประมาณ 1-3 eV และแต่ละชนิดมีค่าต่างกัน

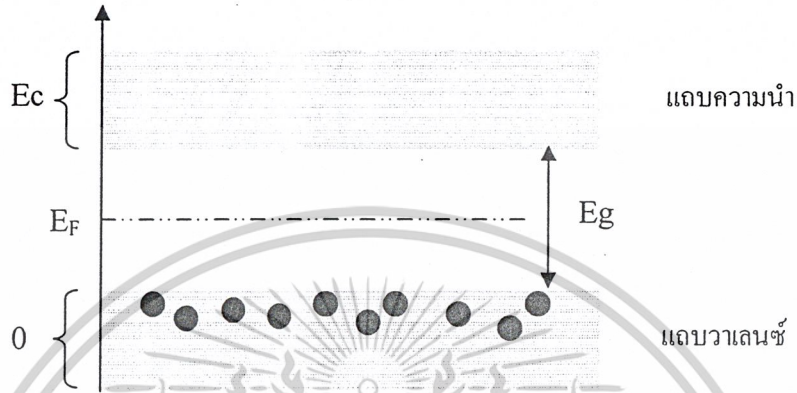


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลนี้และต้องชี้แจงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.3.1 ระดับพลังงานของธาตุ

การนำไฟฟ้า ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำซึ่งไม่ได้ถูกเจือปนด้วยอะตอมของธาตุอื่น (purity atom) จะมีแถบพลังงานดังรูป 1.3.2 ในขณะที่อุณหภูมิต่ำๆ หรือ 0 เคลวิน พลังงานภายนอกในรูปของความร้อนจะไม่มี ดังนั้นวาเลนซ์อิเล็กตรอนยังคงเสถียร ไม่เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ แต่ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน วาเลนซ์อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้มีพลังงานเพิ่มและมีโอกาสเป็นอิสระเข้าไปอยู่ในแถบความนำ และจะทิ้งให้เกิด โฮล (Hole) เป็นประจุบวกทิ้งในแถบวาเลนซ์



รูปที่ 1.3.2 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำเจือปน (Extrinsic Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ หรือเรียกว่า สารกึ่งตัวนำ อินทรินซิก การนำไปใช้งานเพื่อสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้น้อยมาก เนื่องจากสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีสภาพความนำต่ำและมีค่าจำกัด และต้องมีพลังงานภายนอกมากกระตุ้น

ดังนั้นเพื่อเพิ่มสภาพความนำไฟฟ้าให้แก่สารกึ่งตัวนำ จึงมีการเติมอะตอมของธาตุอื่นเข้าไป ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

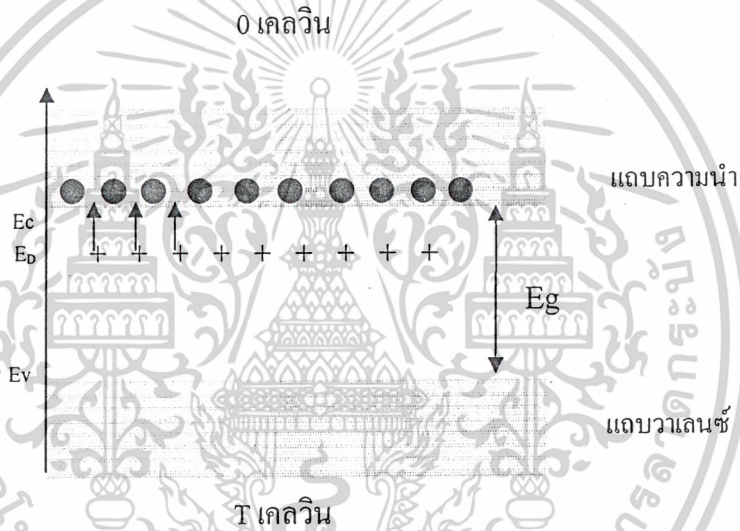
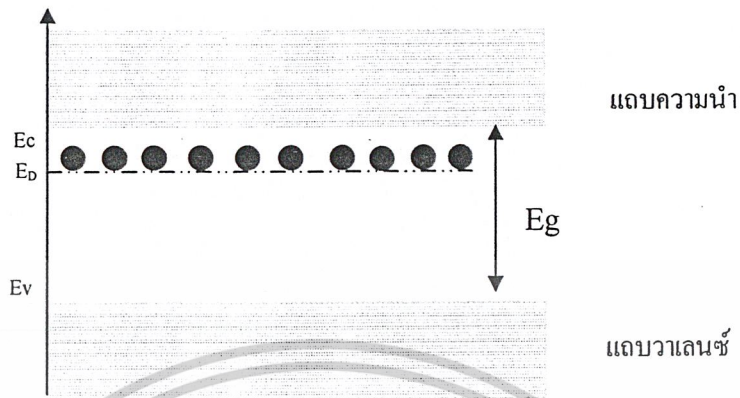
อะตอมธาตุเจือปน

ธาตุที่ใช้เป็นสารเจือ (Impurity) สำหรับเติมลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. อะตอมธาตุเจือปนชนิดเอ็น (N-type Impurity atom)

ได้แก่ธาตุหมู่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส, สารหนู, พลวง เป็นต้น เมื่อเติมธาตุเหล่านี้เข้าไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์แล้วจะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากมาย อะตอมสารเจือชนิดนี้ถูกเรียกว่า อะตอมผู้ให้ (Donor atom) คือธาตุในหมู่ 5 จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว จะมี 4 ตัวที่สร้างพันธะโควาเลนต์กับอะตอมข้างเคียง 4 พันธะ และจะเหลือ 1 วาเลนซ์อิเล็กตรอน ซึ่งไม่มีพันธะใดจับ และมีแรงยึดเหนี่ยวจากนิวเคลียสน้อย จนเกือบเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้อง เพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนนั้นเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อะตอมของฟอสฟอรัสที่สูญเสียอิเล็กตรอน ก็จะกลายเป็นไอออนบวก และอีกทั้งยังมีปรากฏการณ์พันธะแตก เนื่องจากพลังงานความร้อน ก็จะทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และทิ้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวก เกิดขึ้นที่แถบวาเลนซ์ แต่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจากพันธะ แดก มีจำนวนน้อย ดังนั้นปริมาณประจุพาหะอิเล็กตรอนมีมากกว่า โฮล สารกึ่งตัวนำชนิดนี้จึงเสมือนนำไฟฟ้าด้วยประจุพาหะ ชนิดลบ เราจะเรียกสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

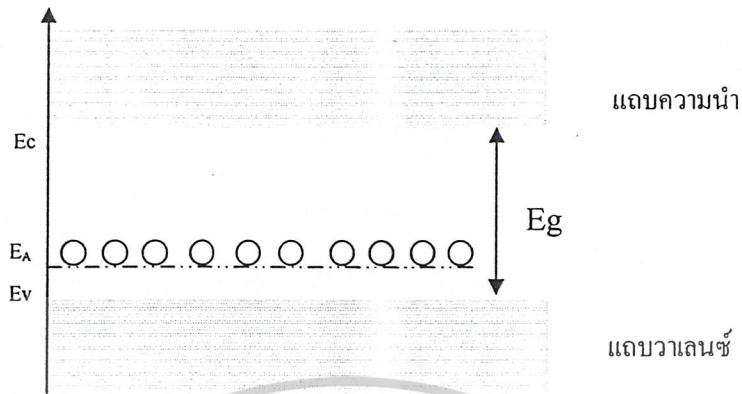


รูปที่ 1.3.3 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

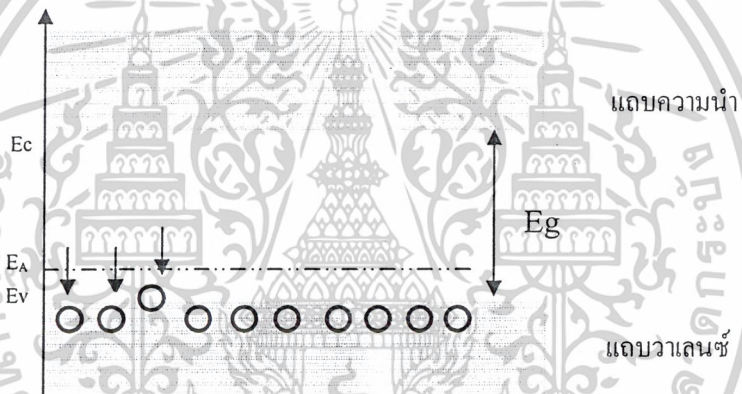
2. อะตอมธาตุเจือปนชนิดพี (P-type Impurity atom)

ได้แก่อะตอมของธาตุหมู่ 3 ได้แก่ โบรอน ,อะลูมิเนียม เป็นต้น เมื่อเติมเหล่านี้เข้าไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์แล้วจะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดพี สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีโฮลเป็นประจุพาหะชนิดบวกจำนวนมากมาย อะตอมสารเจือชนิดนี้ถูกเรียกว่า อะตอมผู้รับ (Acceptor atom) คือธาตุในหมู่ 3 จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว จะมี 3 ตัวที่สร้างพันธะโควาเลนต์กับอะตอมข้างเคียง 3 พันธะ และจะเหลือ 1 พันธะที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนซ์ใกล้ๆ มีโอกาสเข้าไปอยู่ในโฮลนี้ ดังนั้นแต่ละอะตอมของสารเจือผู้รับทำให้เกิดโฮลขึ้นมา ซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวก สามารถนำไฟฟ้าได้ และอะตอมสารเจือชนิดนี้เมื่อได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามาก็จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนและโฮล จำนวนเล็กน้อยก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากพลังงานความร้อนภายนอก ทำให้พันธะแตกออก ดังนั้นปริมาณประจุพาหะโฮล มากกว่า อิเล็กตรอน สารกึ่งตัวนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดนี้จึงเสมือนนำไฟฟ้าด้วยประจุพาหะ ชนิด บวก เราจึงเรียกสารกึ่งตัวชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี



0 เคลวิน



T เคลวิน

รูปที่ 1.3.4 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

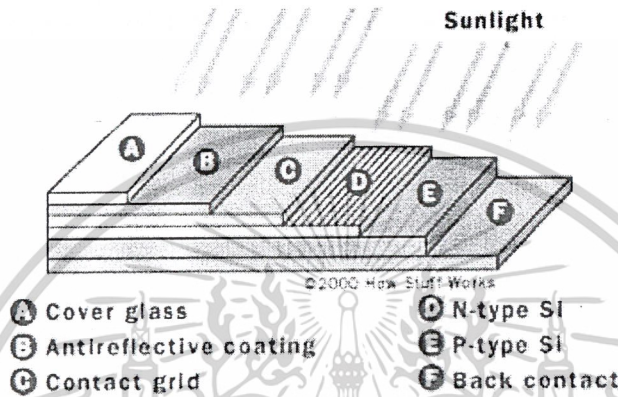
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ทฤษฎีรอยต่อ พี- เอ็น

เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กัน มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ พี-เอ็น คล้ายๆ ไดโอด แต่มีขนาดใหญ่กว่าเพื่อให้มีพื้นที่รับแสงมาก เพื่อมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า



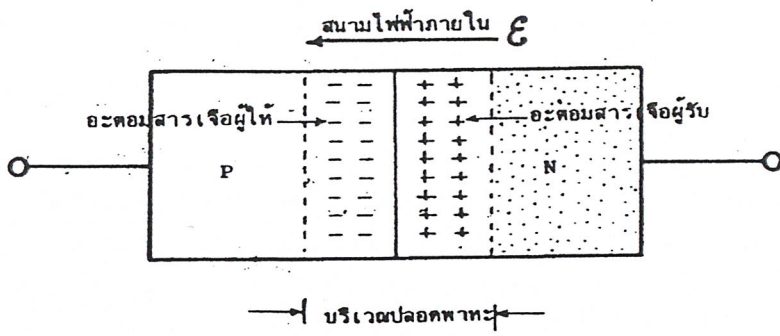
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง

2.1 ปรากฏการณ์รอยต่อพีเอ็น ในภาวะสมดุล

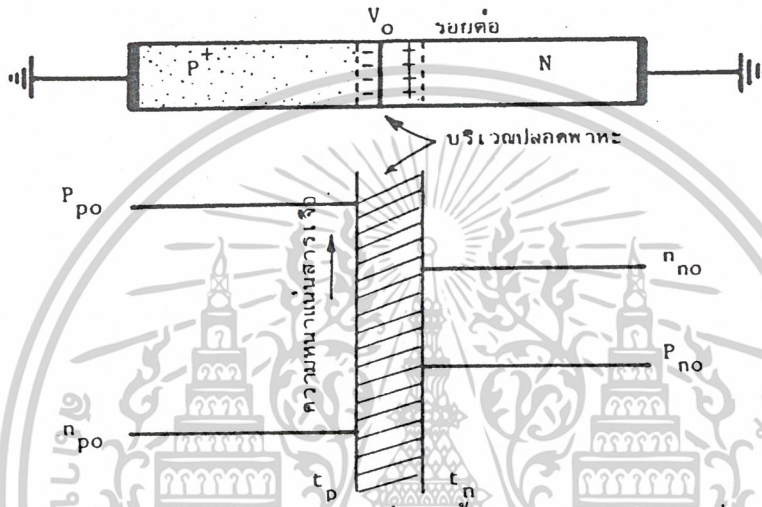
โฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีความหนาแน่นมากกว่า โฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก็จะมากกว่าด้านชนิดพี ด้วยความหนาแน่นที่ต่างกันจึงเกิดการแพร่ประจุพาหะจากทางด้านที่มีความหนาแน่นกว่า ไปยังด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า การแพร่จะแพร่ผ่านรอยต่อพีเอ็น และเกิดการรวมตัว (Recombination) ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล มีผลทำให้อะตอมสารเจือบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อกลายเป็นไอออน และแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมา อะตอมสารเจือชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนและจะแสดงตัวเป็นไอออนบวก และทางด้านพีจะสูญเสียโฮลไป และ ทำให้อะตอมแสดงตัวเป็นไอออนลบ ทำให้เกิดสะสมประจุไฟฟ้าขึ้น บริเวณรอยต่อ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ของประจุพาหะทั้งสองชนิด จนในที่สุดสู่จุดสมดุลที่ไม่เกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

บริเวณที่เป็นไอออนลบ และไอออนบวกทั้ง 2 ฟังเรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) สนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณนี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in Voltage) ซึ่งเป็นแรงดันที่ต้านการเคลื่อนที่ ข้ามรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น



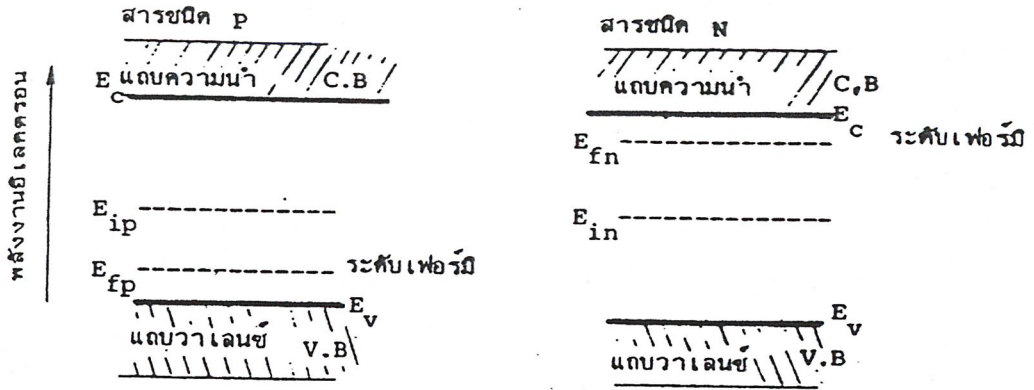
รูปที่ 2.3 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีไบอัส

จากรูปที่ 2.3 การที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็นในบริเวณปลอดพาหะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น เราเรียกว่า “ศักย์สัมผัส” (Contact potential, V_0) หรือแรงดันภายใน” (Built in voltage) ซึ่งเป็นไปตามสมการ 2.1

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

- ซึ่ง V_0 : ศักย์สัมผัส (โวลต์)
- k : ค่าคงที่ โบลต์ซ์มันน์ มีค่า 8.62×10^{-5} eV/เคลวิน
- T : องศาสัมบูรณ์ (เคลวิน)
- q : ประจุอิเล็กตรอน 1.6×10^{-19} คูลอมบ์
- N_A : ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (cm^{-3})
- N_D : ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (cm^{-3})
- n_i : ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})

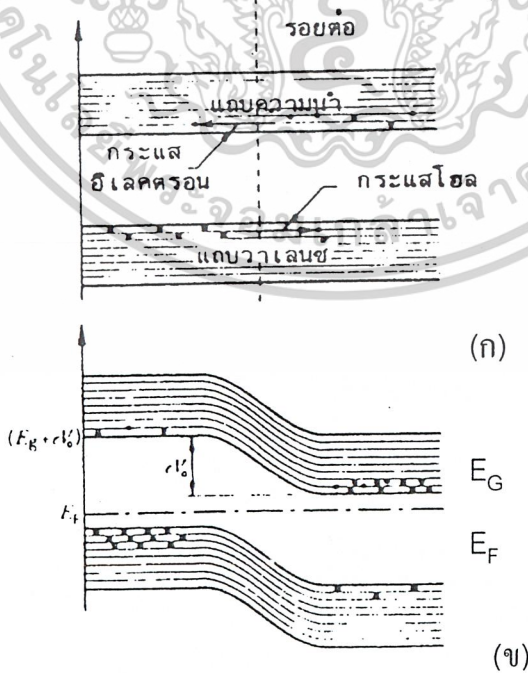
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น

ขณะยังไม่เกิดรอยต่อพี-เอ็น

ในการเขียนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band diagram) เราต้องพิจารณาถึงระดับเฟอร์มีเป็นหลักสำคัญ จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีระดับพลังงาน เฟอร์มี E_f ไม่เท่ากัน แต่ในภาวะสมดุลระดับเฟอร์มีของด้านทั้งสองของรอยต่อจะต้องต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันตลอดผ่านรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมาสัมผัสกันจะเกิดมีการถ่ายเทของพาหะเกิดขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านที่มีระดับ E_f สูงกว่า คือ ด้านเอ็น ไปยังระดับพลังงานที่ว่างในแถบความนำของส่วนพีซึ่งมีระดับ E_f ต่ำกว่า และโฮลจากส่วนพีก็จะไหลเข้ามายังระดับที่ว่างในแถบวาเลนซ์ของส่วนเอ็น ขณะที่มีการถ่ายเทของพาหะข้ามรอยต่อนี้ ระดับเฟอร์มีจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับระดับใหม่ จนกระทั่งในภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มีของด้านเอ็น และด้านพีจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (a) ขณะสัมผัส (b) ภาวะสมดุลหลังสัมผัสแล้ว
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาวะสมดุล ระยะความกว้างของ บริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

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

เมื่อ X_m คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุล (cm.)

ε คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำ

V_0 คือ ศักย์สัมผัส (V.)

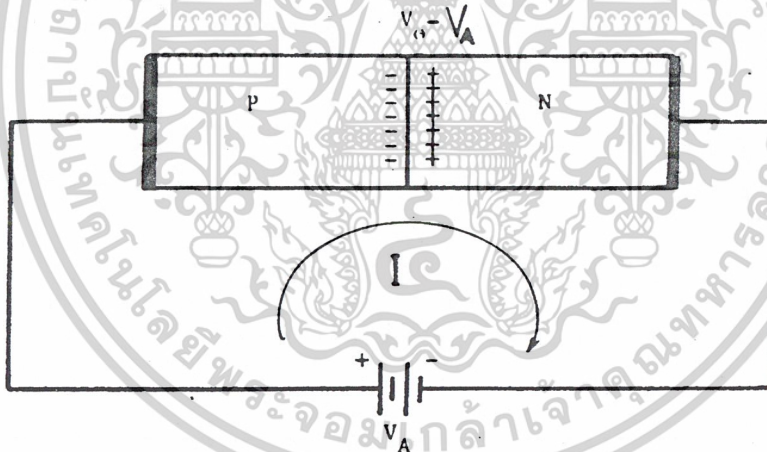
นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับ โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacity) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

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

เมื่อ C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (F/m²)

2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดัน ไบอัสตรง กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.6

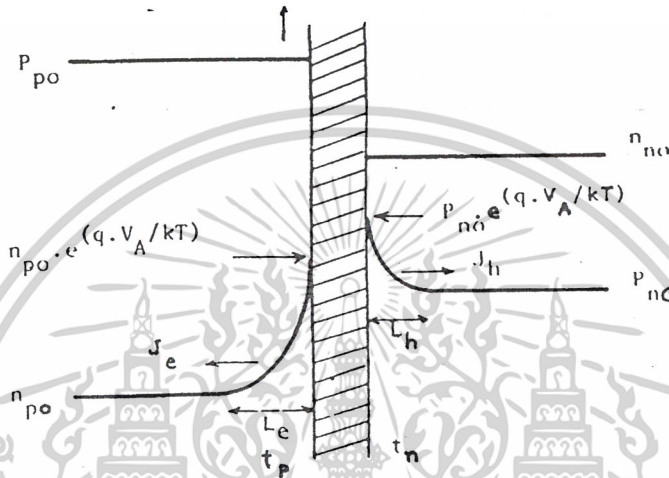
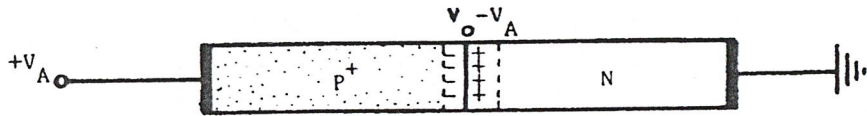


รูปที่ 2.6 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง โหลดจากด้านพีจะถูกฉีดเข้ามาทางด้านเอ็น ดังนั้น ปริมาณของโหลดทางด้านเอ็นบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อจะเพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกัน เมื่ออิเล็กตรอนถูก ฉีดเข้าไปทางด้านพี ปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านพีก็จะเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ

ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

- เมื่อ p_{po} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านพี ในภาวะสมดุล
- n_{po} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านพี ในภาวะสมดุล
- n_{no} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
- p_{no} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
- L_h คือ ระยะการแพร่ของโฮล
- L_e คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

การเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะ อธิบายได้ด้วย สมการ “กฎของรอยต่อ” โดย

$$p_n|_{x_n} = p_{no} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \tag{2.4}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $p_n|_{r_n}, n_p|_{r_p}$ คือ ความหนาแน่นของโฮลที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ ตามลำดับ

เมื่อห่างออกไปจากบริเวณปลอดพาหะ พาหะส่วนน้อยจะมีการลดลง เนื่องจากมีการรวมตัว (Recombination) ของพาหะเกิดขึ้น ทำให้ปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามาลดลงกระทั่งในที่สุด เมื่อห่างจากขอบของบริเวณปลอดพาหะเป็นระยะ L_c และ L_n ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยจะมีค่าเท่ากับในภาวะสมดุล นั่นคือ พาหะส่วนน้อยมีการรวมตัวของพาหะเกิดขึ้นจนหมดสิ้น โดยระยะ L_c และ L_n เรียก ระยะการแพร่ (Diffusion length) ของอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ

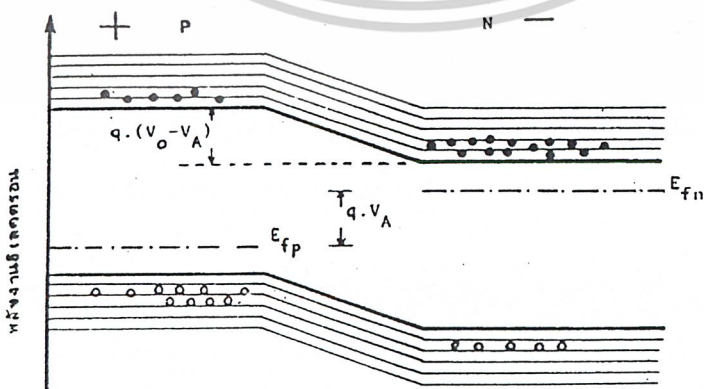
เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะส่วนมาก n_{n0} และ p_{p0} มีค่ามากกว่าปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามารอยต่อ ดังนั้นค่าของ n_{n0} และ p_{p0} ที่บริเวณรอยต่อจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะมีการฉีดพาหะเข้ามารอยต่อ เมื่อพิจารณาที่รอยต่อจะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ คือ กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการไดโอด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

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

$$I_0 = Aqn_i^2 \left(\frac{D_h}{L_h n_n} + \frac{D_e}{L_e p_p} \right) \tag{2.7}$$

- และ V_A คือ แรงดันไบอัสตรงภายนอก
- I_0 คือ กระแสอิ่มตัว
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น
- D_h คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
- D_e คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

และขณะรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน แสดงได้ดังรูป 2.8

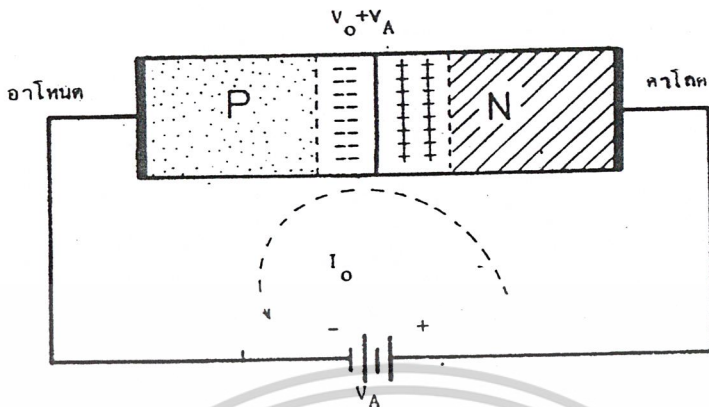


รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น

ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.9



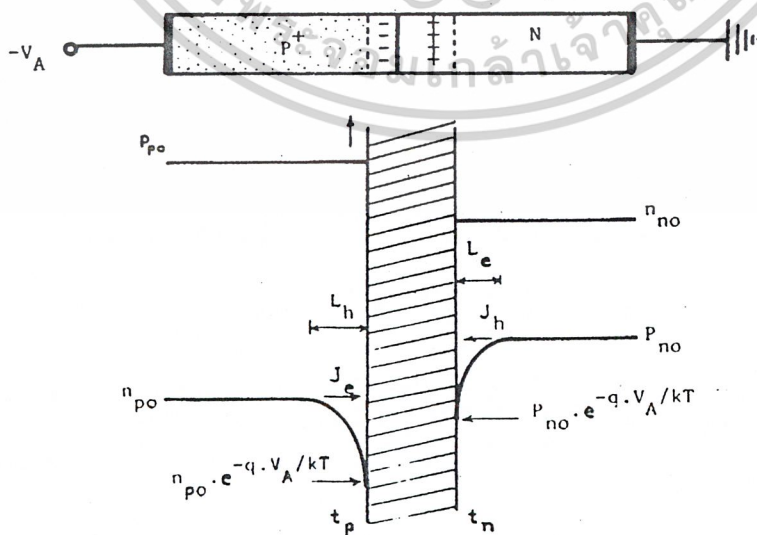
รูปที่ 2.9 แสดงรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

หากให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า V_A แล้ว แรงดัน V_A จะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีค่าสูงขึ้นจากเดิม ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ รอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้ จึงกระทำตัวคล้ายฉนวนซึ่งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น และกว้างกว่าในตอนที่ยังไม่ได้รับการไบอัส

เนื่องจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A จะทำให้พาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆ บริเวณปลอดพาหะจะมีจำนวนลดลงดังรูปที่ 2.10 และสามารถหาความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยได้จากกฎของรอยต่อ คือ

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

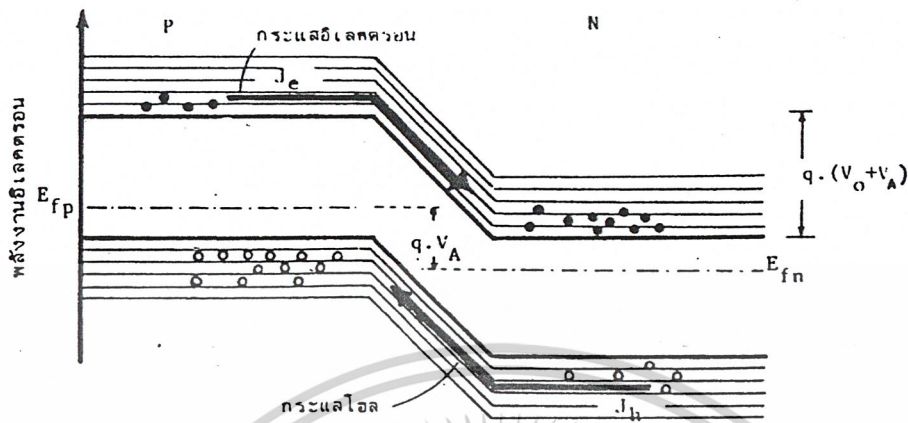
$$n_p \Big|_{x_p} = n_{p0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.10 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดูและใช้เฉพาะที่สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ มีผลให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน qV_A ซึ่งใช้อธิบายว่าเกิดมีกระแสของพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น
ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A

จากสมการไดโอดในหัวข้อที่แล้ว เมื่อแทนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ ได้ว่า

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

เครื่องหมายลบ หมายถึง กระแสย้อนกลับ มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีได้รับไบอัสตรง จะเห็นได้ว่า กระแส I_0 เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งมีค่าน้อยมาก และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้นอกจากอุณหภูมิของรอยต่อ

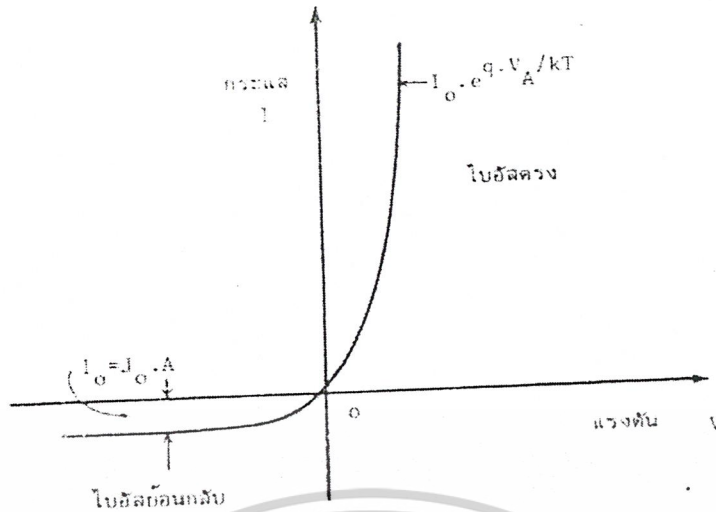
2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งกราฟนี้เราได้มาจากสมการที่ 2.6

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

$$\text{กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark) } I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง เราพิจารณากันว่า ในลำแสงประกอบไปด้วยกลุ่มของโฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu \tag{2.12}$$

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

เมื่อแสงตกกระทบบรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์ให้สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในแถบความนำ (conduction band) ได้ และทิ้งให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่รอยต่อได้รับไบอัสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.13

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง (Photo current)” หรือเขียนย่อๆ ว่า I_p หรือ I_L ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

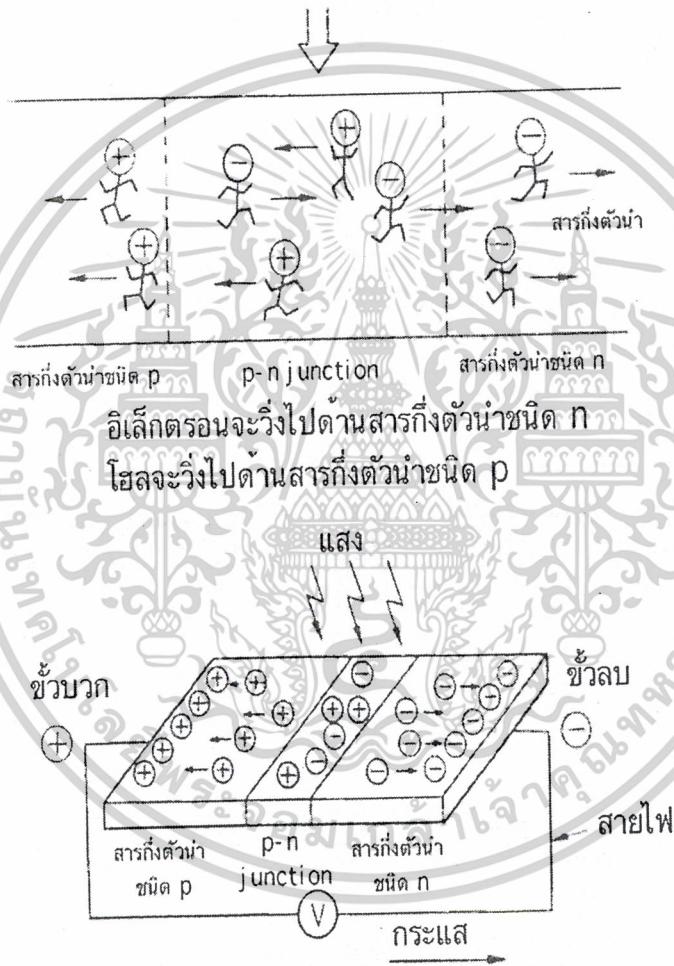
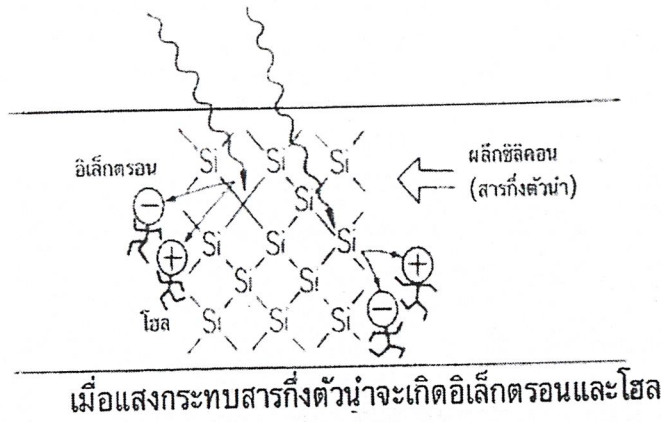
$$\text{กรณีรอยต่อได้รับแสง (illumination)} \quad I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) - I_p \tag{2.13}$$

โดยที่ I_p คือ กระแสเนื่องจากแสง (photo current)

และกระแสเนื่องจากแสงสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.14

$$\tag{2.14}$$

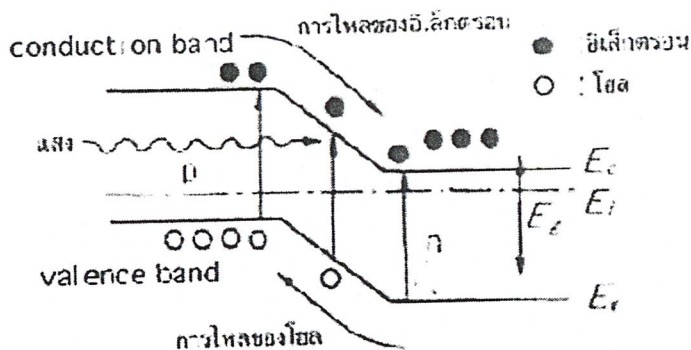
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อต่อขั้วบวกและลบจะมีกระแสไฟฟ้าไหล

รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง

เมื่อ q

คือ ประจุของอิเล็กตรอน

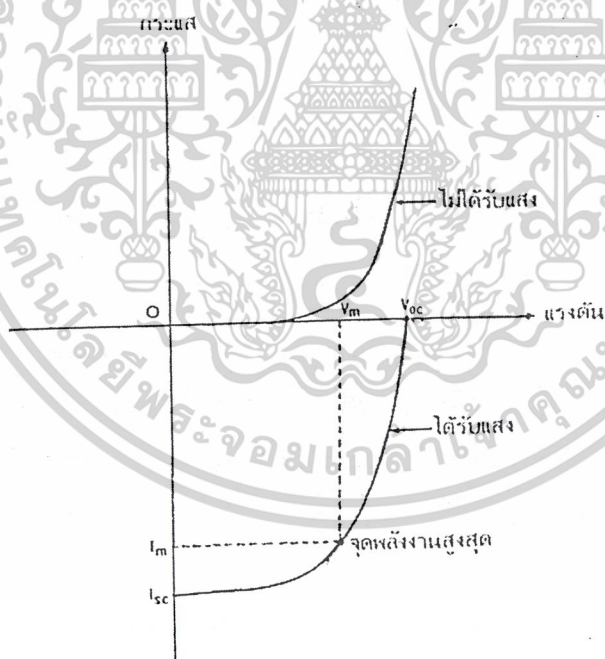
A คือ พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแสง

g_{op} คือ อัตราการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง (Optical Generation Rate)

L_n, L_p คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

ดังนั้นคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแสง และไม่ได้รับแสงสามารถเขียนแสดง

เปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น
ขณะที่ไม่ได้รับแสง และ ได้รับแสง

2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น คุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ และโดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงเป็น พลังงานไฟฟ้า นั่นก็คือ เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งจะต้องให้ทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสงจะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสงไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจร ในภาวะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า I_{sc} ค่าของกระแสลัดวงจรนี้ พิจารณาได้จากสมการที่ 2.13 เมื่อกำหนดให้

ขณะลัดวงจร $V_A = 0$, ดังนั้นสมการที่ 2.13 จะเขียนใหม่ได้ว่า

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

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

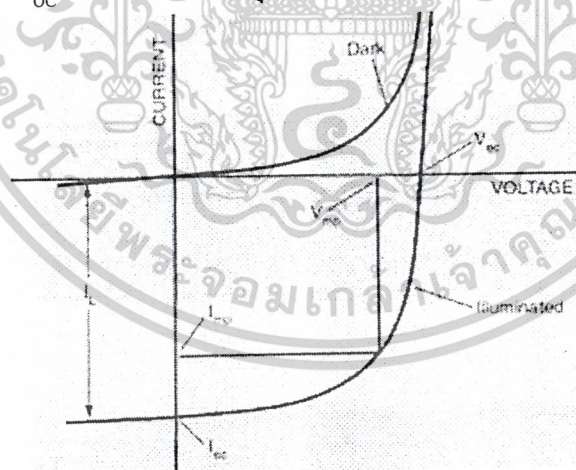
เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร $I = 0$, สมการที่ 2.13 เขียนใหม่ได้ว่า

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

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

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

ค่าของ I_{sc} และ V_{oc} แสดงไว้ในกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิดจะมีขนาดมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง, สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงเพื่อให้เกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล, ระยะความลึกของรอยต่อพี-เอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว, และค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไปกระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ต่ำกว่า 100 mA/cm² ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน จะมีค่าประมาณ 35-40 mA/cm² และในกรณีของแกเลียมอาเซนไนด์ค่า 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 และในกรณีของสารแกเลียมอาเซนไนด์ V_{oc} จะมีค่าราว 0.9 โวลต์

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

เมื่อ α, β เป็นค่าคงที่

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน

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 ดังนั้นแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมาให้แก่โหลดจะมีค่าน้อยกว่าค่า V_{oc} และ I_{sc} โหลดซึ่งนำมาต่อ เมื่อมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของแรงดัน และกระแสที่เซลล์จ่ายออกมามีค่าสูงสุด หรือที่เรียกว่า “ค่ากำลังงานสูงสุด (maximum power)” ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลดได้ เขียนย่อๆได้ว่า P_m ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนอักษรย่อแทนเป็น 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 ถูกนิยามไว้ว่าเป็น อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานสูงสุดที่เซลล์จะจ่ายให้แก่โหลดได้จริงกับค่าของพลังงานสูงสุดในทางอุดมคติที่เซลล์จ่ายได้ นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก เซลล์ที่ใช้งานโดยทั่วไปค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.6-0.8

นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญยิ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนด้วยย่อเป็น η ประสิทธิภาพของเซลล์ ถูกนิยามไว้คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์ นั่นคือ

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

หรือ

$$= \frac{F.F \times I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.21)$$

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

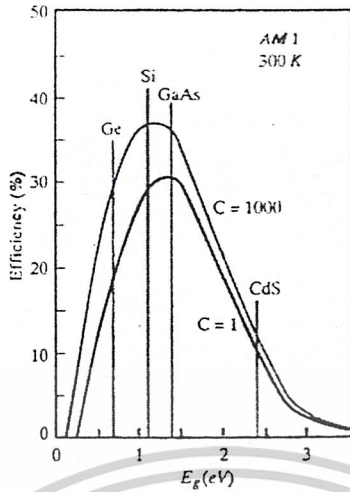
พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เซลล์ได้รับเกิดจากการดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าสูงกว่า E_G ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่า E_G จะไม่มีผลทำให้เกิดกระแสแสง และในโฟตอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงกว่า E_G อาจไม่เกิดกระแส แต่จะกระจายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งหากเป็นกรณีนี้ ประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลง ดังนั้น ขนาดของ 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 ค่านี้นว่า " 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 โดยไม่ต้องเพิ่มพื้นที่ทำให้ระบบนี้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าปกติ

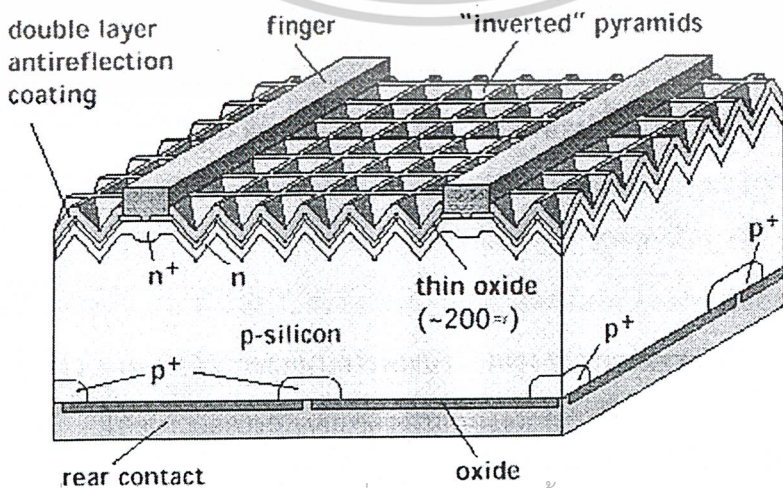
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ 300K กับขนาด E_g ของสารกึ่งตัวนำ

จากกราฟในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าซิลิคอน และแกดเลียมอาเซไนด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาด E_g ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ในอุดมคติในทางทฤษฎี มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน สูงสุด รวบรวม 26% แต่มีปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อเซลล์ เช่น ความต้านทานอนุกรม (series resistance), ความต้านทานขนาน (shunt resistance), การสะท้อนกลับที่ผิว (surface reflection) และอุณหภูมิใช้งาน ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงมาก โดยเซลล์ที่ขายในท้องตลาดมีประสิทธิภาพอยู่ราว 10-15% ปัจจุบันนี้การพัฒนา โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง โดยการลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสะท้อน ทำให้เซลล์ที่ได้มีประสิทธิภาพสูงถึง 30% ตัวอย่างลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แบบประสิทธิภาพสูงดังแสดงในรูปที่ 2.18

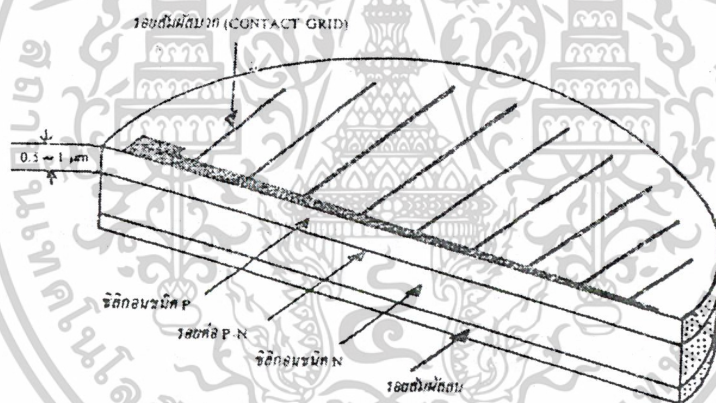


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ที่กล่าวมาทั้งหมดปกติมักสร้างจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน (Silicon Single Crystalline) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพง เพื่อลดราคาของเซลล์จึงนิยมเอาผลึกหลายรูปหรือ (Poly Crystalline) หรืออะมอร์ฟัส (Amorphous) มาสร้างแทนผลึกรูปเดี่ยว ทำให้เซลล์เหล่านี้มีราคาถูก แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์ผลึกรูปเดี่ยว นอกจากนี้ยังมีการสร้างเซลล์แบบฟิล์มบาง (Thin Film) และแบบอื่นๆอีกมากมาย แต่มีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ เซลล์ราคาถูก และประสิทธิภาพสูง เทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น I_{sc} , V_{oc} , P_m , F.F และ η ซึ่งมีค่าสูงๆ อย่างไรก็ดี พารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ก็ถูกจำกัดด้วยแฟลคเตอร์อื่นๆ มากมาย ซึ่งบางแฟลคเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟลคเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรมุม

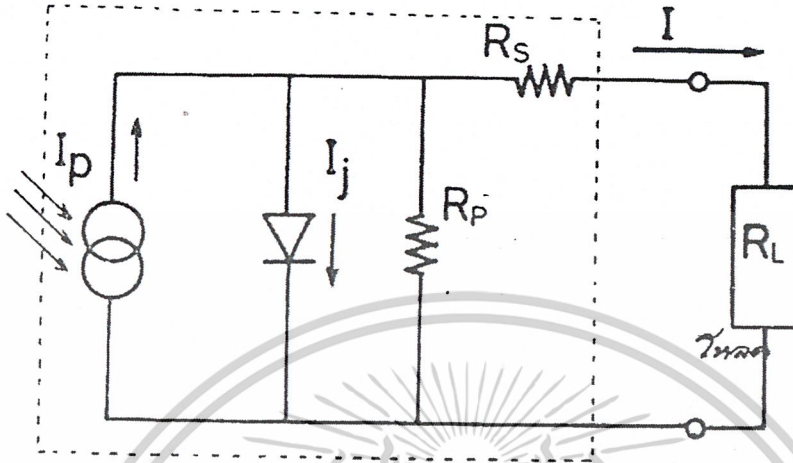


รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 โดยการแพร่สารเจือชนิดพี ลงไปในแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้น ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ ปกติความลึกของรอยต่อนี้จะมีค่าน้อยกว่า $1\mu m$. เพื่อให้พลังงานจากโฟตอนของลำแสงสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อได้สะดวก ชั้นป้องกันการสะท้อนของแสงมีหน้าที่ช่วยลดการสูญเสียแสง และช่วยลดการสะท้อนกลับของแสง จึงมีผลช่วยเพิ่มปริมาณการดูดกลืนแสง รอยสัมผัสทางด้านหน้าของเซลล์มักใช้โลหะอลูมิเนียม เป็นลายนิ้วมือ หรือลายก้างปลา ทำหน้าที่รับกระแสที่ออกมาจากรอยต่อ ส่วนทางด้านล่างของเซลล์จะถูกฉาบด้วยอลูมิเนียมเช่นกัน เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบของเซลล์ อย่างไรก็ตามการนำเซลล์ไปต่อเข้ากับโหลดเป็นอีกสารที่ส่งวนไว้สำหรับกรใช้งาน เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นมานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าร่วมกันหลายๆ เซลล์ นิยมใช้วิธีการบัดกรี ดังนั้น เพื่อให้สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้ จึงนิยมนำไม่วากรินใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ไปทำการชูนิกเกิด เพื่อให้ส่วนที่เป็นขั้ว สัมผัสบวก และขั้วลบของเซลล์สามารถบดกรี ต่อสายร่วมกันได้

จากลักษณะของเซลล์ดังกล่าว เราสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

โดยที่	I_p	คือ กระแสเนื่องจากแสง
	I_j	คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่ม่มีแสง
	I	คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านโหลดในวงจร
	R_L	คือ โหลด
	R_s	คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
	R_p	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะใช้งาน จะเห็นได้ว่า กระแสเนื่องจากแสง (Photo current) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (current source: I_p) ซึ่งจะจ่ายกระแสออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นในทางอุดมคติ I_j ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance: R_s) เกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความต้านทานของบริเวณรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) ระหว่างโลหะกับส่วนพี และส่วนเอ็น และค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใส่ต่อ 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 เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ให้มีจุดเสีย (defect) เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบูรณ์ ดังนั้นค่า R_p จึงไม่สูงเป็นค่าอนันต์ และ ค่า 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

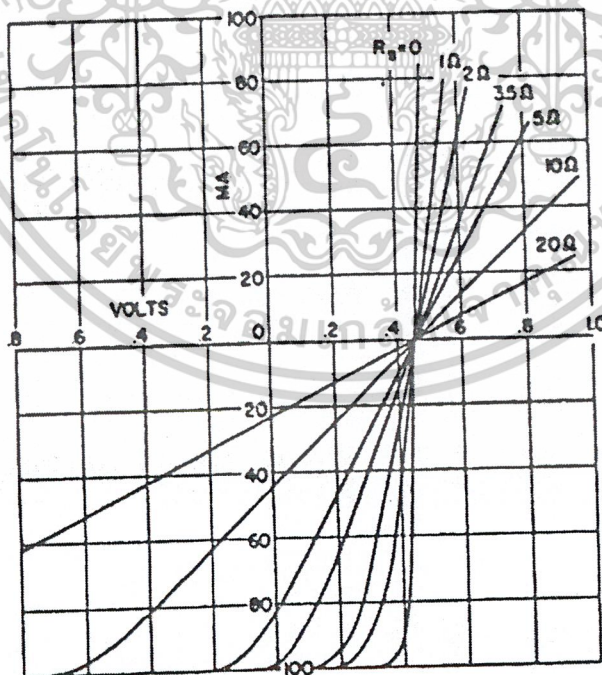
$$I_R = I_P - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

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

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

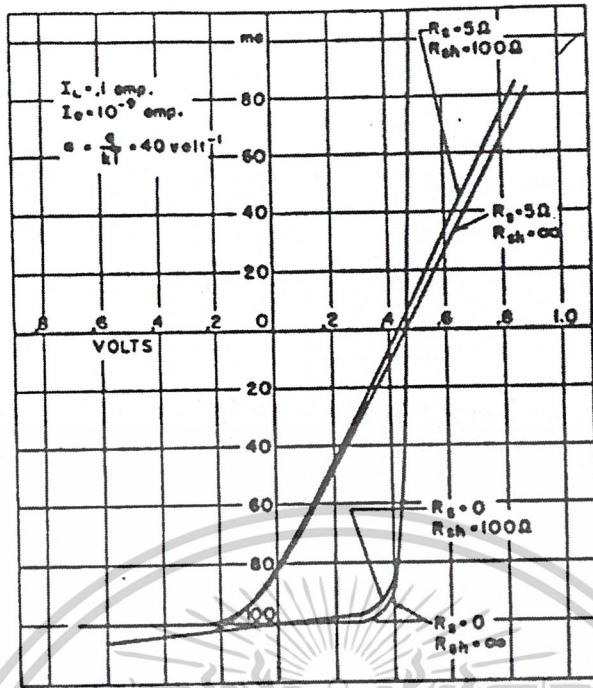
$$I_R = I_L - I_0 \left[e^{\frac{q(V_0 + I_R R_s)}{kT}} - 1 \right] \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 สามารถนำไปเขียนกราฟ เพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังรูปที่ 2.19 จากรูปจะเห็นได้ว่า เซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อย และความชันของกราฟก็ลดลงด้วย เป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์ลดลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรหาทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



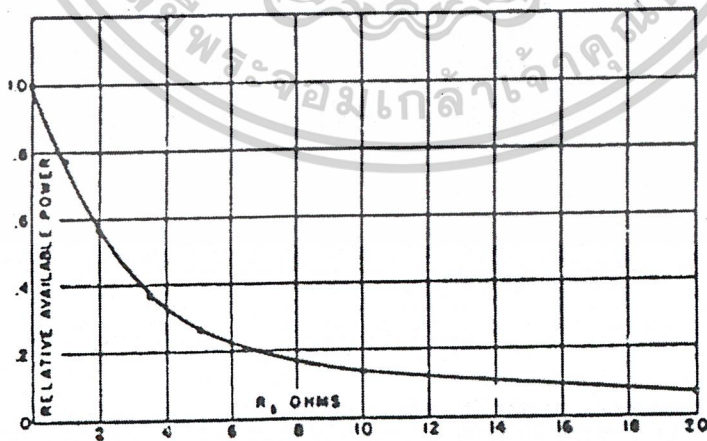
รูปที่ 2.21 แสดงผลของความต้านทานอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงผลของความต้านทานขนาน

อย่างไรก็ดี โดยทั่วไปแล้วจะพบว่า ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งาน ค่าความต้านทานขนาน R_p จะมีค่าสูงพอที่จะไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม R_s จะมีผล และบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อคุณสมบัติของเซลล์ ในการออกแบบลักษณะ โครงสร้าง, การสร้าง จึงต้องพิจารณาผลของค่า R_s อย่างรอบคอบ และพยายามให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ ขณะที่ค่า R_s สูงขึ้น พลังงานสูงสุดซึ่งเซลล์จะสามารถจ่ายได้จะมีค่าลดลงและแสดงได้ดังในรูปที่ 2.23

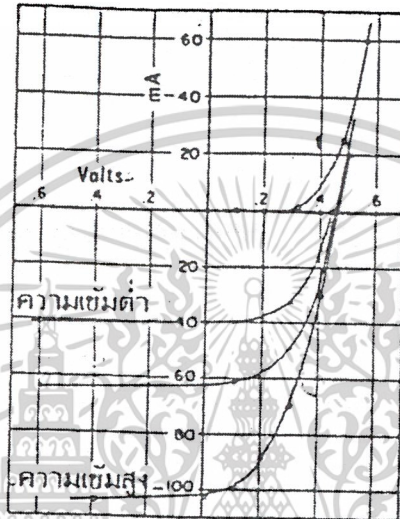


รูปที่ 2.23 แสดงการลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

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



รูปที่ 2.24 แสดงผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริง ๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็จะมีผลต่อกระแส และแรงดันที่ได้จากเซลล์ด้วย เมื่อพิจารณาสมการของกระแส I_R ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L

$$I_R = I_P - I_j \quad (2.23)$$

จะพบว่า กระแส I_R นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องจากแสง I_P และกระแส I_j ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_P และ I_j

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 จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ฐานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มีต่อ I_0 โดยพิจารณาจากสมการของ I_0 ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกกฎหมายให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_0 = Aqn_i^2 \left[\frac{1}{N_A} \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{N_D} \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.24)$$

จากสมการของ I_0 จะพบว่า n_i^2 ของซิลิคอนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

$$n_i^2 = 15 \times 10^{32} T^3 e^{\frac{-1.21}{kT}} \quad (2.25)$$

จากสมการจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างเอ็กโพเนนเชียล เป็นผลให้ I_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย จากผลอันนี้แสดงว่า I_p 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

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.26)$$

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

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

2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})

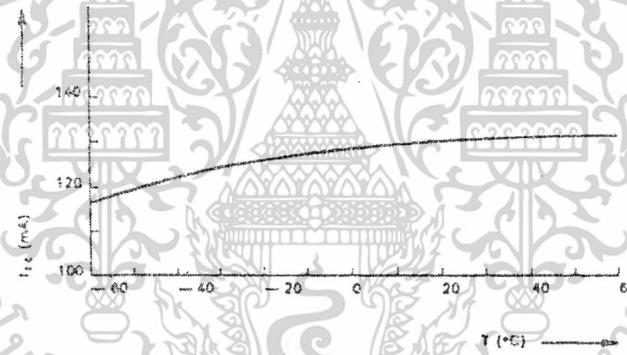
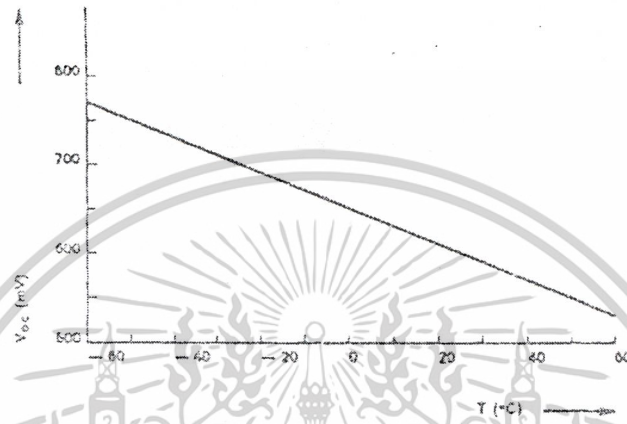
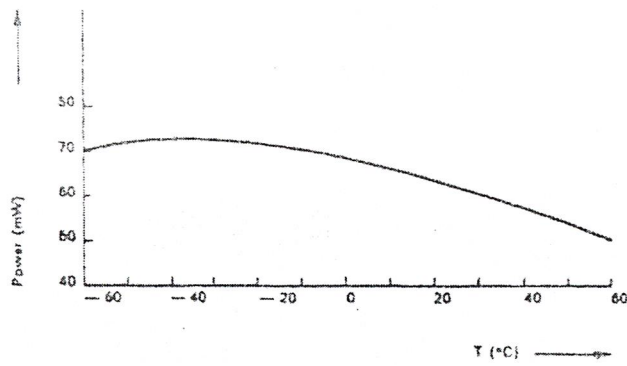
สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (V_{oc}) ตามสมการที่ 2.16

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

จากสมการนี้ค่า $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่า $\frac{k}{q}$ มีค่าต่ำ

มาก, ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} ก็คือ I_0 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้ V_{oc} มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{sc} , V_{oc} , และ P_o ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



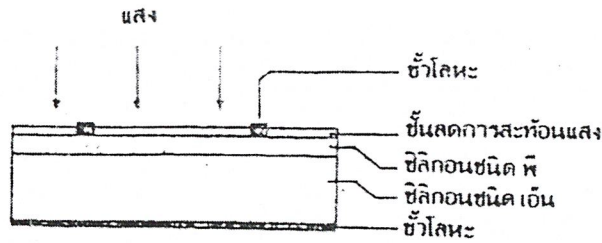
รูปที่ 2.25 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น เนื่องจากแสงที่ส่องมากระทบผิวหน้าเซลล์จะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเอาไว้เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และมีบางส่วนสะท้อนไปจากผิวหน้าของเซลล์ แสงส่วนที่สะท้อนออกไปจากผิวหน้านี้เองที่สูญเสียไปโดยไม่เกิดประโยชน์ เพื่อที่จะนำแสงส่วนนี้มาใช้ประโยชน์อีก จึงควรมีชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของเซลล์ ชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ยอมให้แสงผ่านเข้าไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้ เมื่อแสงสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเซลล์ ชั้นลดการสะท้อนแสงจะทำให้แสงบางส่วนสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์อีก ช่วยให้เซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จึงทำให้เซลล์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย ชั้นลดการสะท้อนแสงจะช่วยให้แสงสะท้อนกลับลงไปยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวหน้าของเซลล์ได้มากน้อยเพียงใด จะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเห และความหนาของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างดัชนีหักเห (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

$$\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.27)$$

โดยที่ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 2 ชนิด

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_2

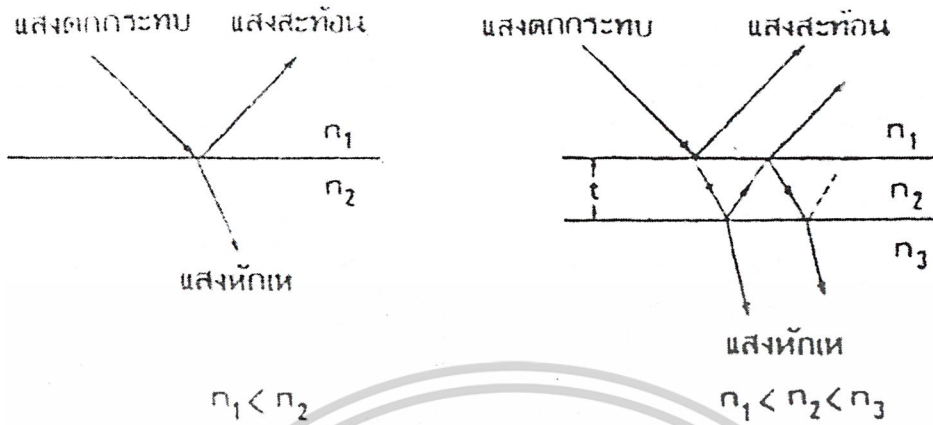
ถ้า $n_1 < n_2$ แสงส่วนใหญ่จะหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 และแสงส่วนน้อยจะสะท้อนออกไปในทางตรงกันข้าม ถ้า $n_1 > n_2$ แล้วแสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับออกไป ดังแสดงในรูปที่

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 แสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับลงมายังผิวหน้าของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลางที่ 3 อีก และแสงส่วนน้อยหักเหเข้าสู่ ตัวกลางที่ 1 ดังรูปที่ 2.27 การสะท้อนกลับนี้เองที่ทำให้ผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.27 แสดงการสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยีและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

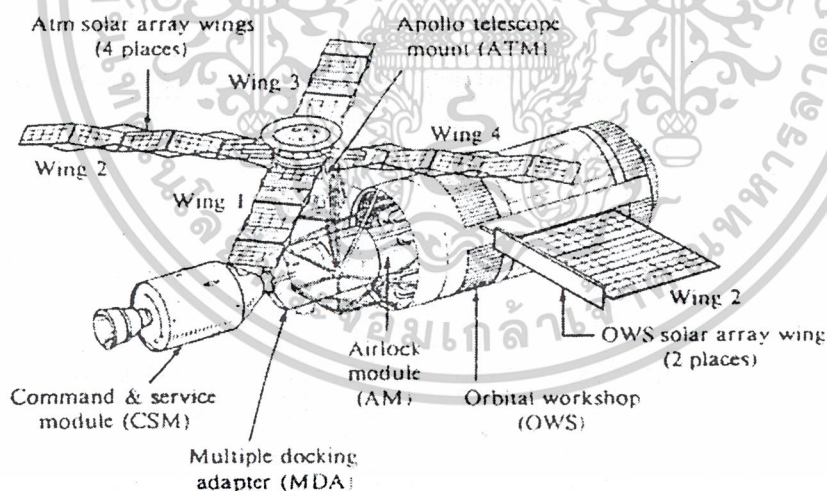
Silicon Solar Cell Technology and Fabrication

บทนำ

ตั้งแต่ปีค.ศ.1953 เป็นต้นมา ก็ได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับยานอวกาศ หรือดาวเทียมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จนกระทั่งถึงปีค.ศ.1973 หลายบริษัทได้ให้ความสนใจที่จะนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลก จึงได้มีการพัฒนาการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดราคาในการผลิตลง ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ในอนาคต

เทคโนโลยีของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

1. การสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ
2. การแพร่สารเจือ
3. การสร้างขั้วไฟฟ้า
4. การต่อสายเก็บบรรจุเซลล์ เพื่อทำเป็น โมดูล หรือแผงเซลล์



รูปที่ 3.1 ภาพสเก็ตดาวเทียม skylab ที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

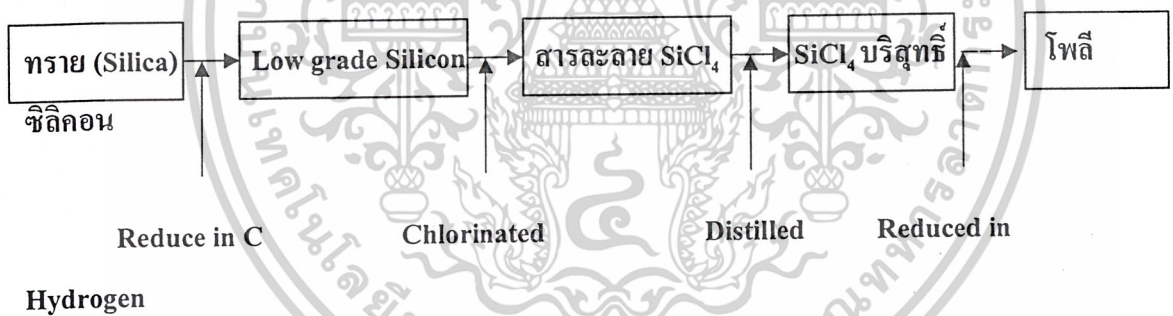
3.1 การสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

3.1.1 การเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์

ธาตุซิลิคอนจะเป็นธาตุที่มีอยู่มากมาย โดยเฉพาะบริเวณเปลือกโลก แต่ก็ไม่ปรากฏในลักษณะของแร่บริสุทธิ์ ส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของสารประกอบ เช่น ซิลิกา (Silica) หรือก็คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ไม่มีบริสุทธิ์ นอกจากนี้แล้วบางส่วนยังอยู่ในรูปของซิลิเกต (Silicate) ซึ่งแร่ดังกล่าวนี้ ก็คือ หินทราย ไม่ว่าจะเป็นชนิดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

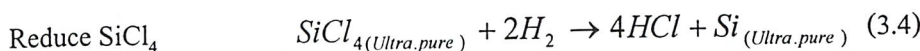
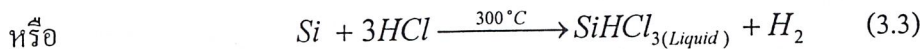
นั่นเอง ในอุตสาหกรรมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำ จากซิลิคอน จะนำทรายชั้นดี (มีสิ่งเจือปนน้อย) มาสกัดเพื่อให้ได้แร่ซิลิคอนที่บริสุทธิ์ แล้วจึงนำไปปลูก (Growth) เพื่อให้ได้ซิลิคอนในรูปของผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline) สำหรับการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดต่างๆต่อไป

ขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ก็คือ การสกัดทรายให้ ได้แร่ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด ทำได้โดยการเผาซิลิกาพร้อมกับคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงในเตาไฟฟ้า ธาตุคาร์บอนจะดึงออกซิเจนออกจากซิลิกา จึงทำให้ได้แร่ซิลิคอน แต่ยังไม่บริสุทธิ์ ซึ่งเรียกว่า “Low grade silicon” หรือบางครั้งก็เรียกว่า “เฟอร์โรซิลิคอน” (Ferro silicon) กระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า “Reduce SiO₂” ดังแสดงในสมการที่3.1 จากนั้นจึงนำเอา Low grade silicon ไปทำการ “คลอรีเนต” (Chlorinated) โดยรวมกับคลอรีน นิยมใช้กรดเกลือ (HCl) เพื่อเป็นตัวทำละลายซิลิคอน จะทำให้ได้สารละลายซิลิคอนเตตระคลอไรด์ (SiCl₄) หรือ ไตรคลอโรไฮเดรน (SiHCl₃) ดังแสดงในสมการที่3.2 หรือสมการที่3.3 ซึ่งในสารละลายนี้จะมีเพียงซิลิคอนเท่านั้นที่ละลายรวมกับคลอรีน สารปะปนอื่นๆจะตกตะกอน และแยกตัวออกไป เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (Ultra pure) จึงมีการกลั่นสารละลายนี้อีกครั้งหนึ่ง จากนั้นจึงนำไปทำการแยกแร่ซิลิคอนออกจากสารละลาย ซึ่งอาจทำได้โดยการทำให้ร้อนจัดในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่3.4 จากปฏิกิริยานี้ในที่สุดจะได้แร่ซิลิคอนที่บริสุทธิ์สูง แต่จะอยู่ในรูปของผลึกโพลีคริสตัล หรือโพลีซิลิคอน (Poly Silicon) ขั้นตอนต่างๆของการเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์แสดงได้ดังรูปที่3.2



รูปที่ 3.2 แสดงลำดับขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการเตรียมแร่ซิลิคอน

สมการเคมีของการเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่ขั้นตอนต่างๆอาจสรุปได้ดังนี้



3.1.2 การปลูกผลึกรูปเดี่ยว

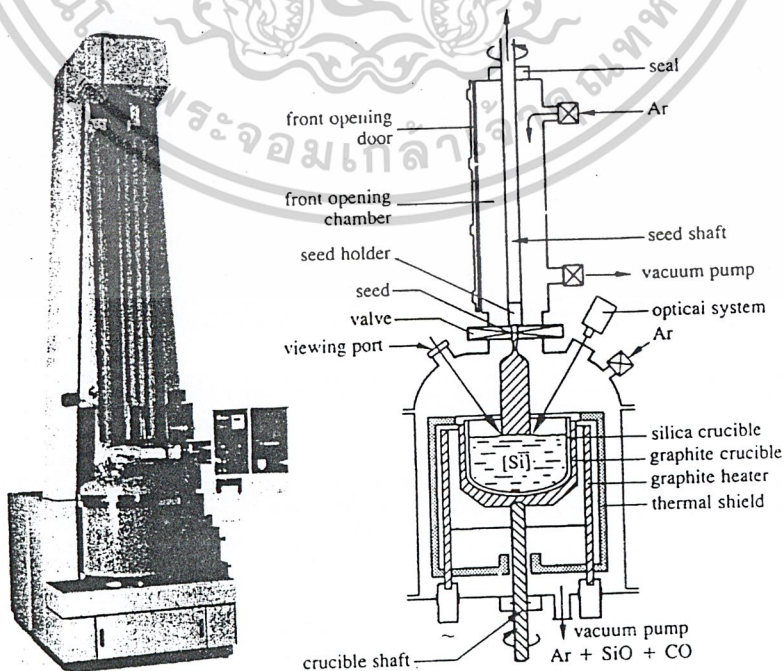
แร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ที่เตรียมได้ มักจะถูกนำไปหลอมละลาย และทำให้เป็นแท่งทรงกระบอก ซึ่งแท่งผลึกนี้จะมีคุณสมบัติเป็นผลึกหลายรูปหรือโพลีคริสตัล ก่อนที่จะนำไปใช้สร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จะต้องนำไปทำให้เป็นผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ ซึ่งกระบวนการที่ทำให้ได้ผลึกรูปเดี่ยว ถูกไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า “การปลูกผลึก (Crystal growth)” จำเป็นต้องใช้ชิ้นผลึกชิ้นเล็กๆเป็นส่วนเริ่มต้นเพื่อการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ และเรียกชิ้นผลึกนี้ว่า “เมล็ดผลึก (Crystal seed)” ผลึกที่ได้จะมีคุณลักษณะเหมือนกับเมล็ดผลึกทุกประการ การปลูกผลึกรูปเดี่ยวสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมกัน ได้แก่ วิธี โซคราสกี (Czochralski), วิธี โซนรีไฟนิ่ง (Zone refining) และวิธี โฟลตติ้งโซน (Floating zone) โดยในที่นี้เราจะพูดถึงวิธีการที่นิยมทำกันมากที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งนั่นคือ วิธี โซคราสกี (Czochralski) และวิธี โซนรีไฟนิ่ง (Zone refining)

3.1.2.1 วิธีโซคราสกี (Czochralski)

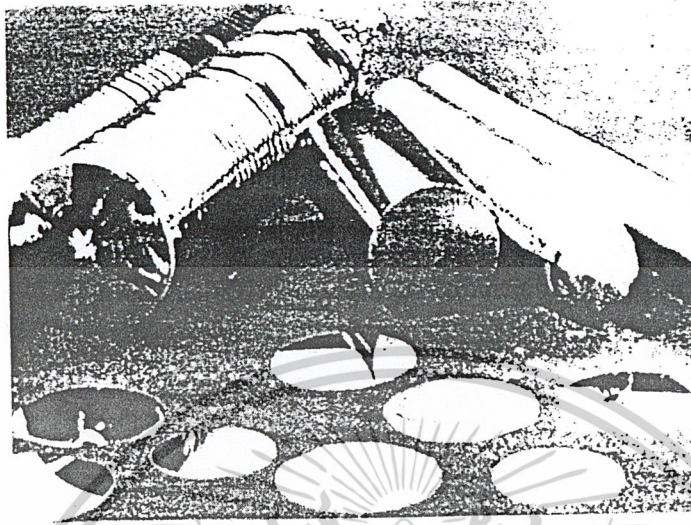
วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า “วิธีดึง” (Pulling method) โดยลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ แสดงดังในรูปที่ 3.3 เริ่มจากการนำเอาแร่บริสุทธิ์ที่สกัดได้ มาใส่ลงในเบ้าหลอมที่อยู่ในเตาชนิดพิเศษ เพื่อหลอมให้เป็นของเหลว เบ้าหลอมมักเป็นซิลิกา หรือที่เรียกว่า ควอตซ์ ภายในเตานี้ถูกควบคุมให้เป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เพื่อป้องกันการเกิดSiO₂ ต้องควบคุมไม่ให้มีสิ่งแปลกปลอมหรือสารเจือปนอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง ระบบกำเนิดความร้อนของเตามักเป็นขดลวด เหนี่ยวนำความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Induction Heating Coil) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเบ้าหลอม ซิลิกาถูกทำให้ร้อน 1,420 °C แร่ซิลิคอนจะหลอมเป็นของเหลว จากนั้นการปลูกผลึกก็เริ่มขึ้นด้วยการหย่อนเมล็ดผลึกให้ปลายด้านหนึ่งแตะกับผิวหน้าของสารละลาย

ปลายของเมล็ดผลึกด้านบนนี้จะหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับของเหลวในเบ้าหลอม เมล็ดผลึกจะถูกดึงขึ้นอย่างช้าๆ และในเวลาเดียวกันจะหมุนรอบตัวเองไปด้วย ของเหลวในเบ้าหลอมจะติดกับเมล็ดผลึกขึ้นมา และเย็นตัวลงมีสภาพกลายเป็นผลึกที่มีระนาบเหมือนกับเมล็ดผลึก แท่งผลึกเป็นรูปทรงกระบอกดัด โดยมีขนาดต่างๆ กัน ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการหมุน และอัตราการดึงเมล็ดผลึก รวมทั้งขนาดของเมล็ดผลึกด้วย และตามปกติจะมีการเติมสารเจืออย่างใดอย่างหนึ่งลงไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (a) การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น (b) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำหัวข้อนี้ไปใช้สำหรับการปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนโดยวิธีโซคราสกี ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์การปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนโดยวิธีโซคราสกี

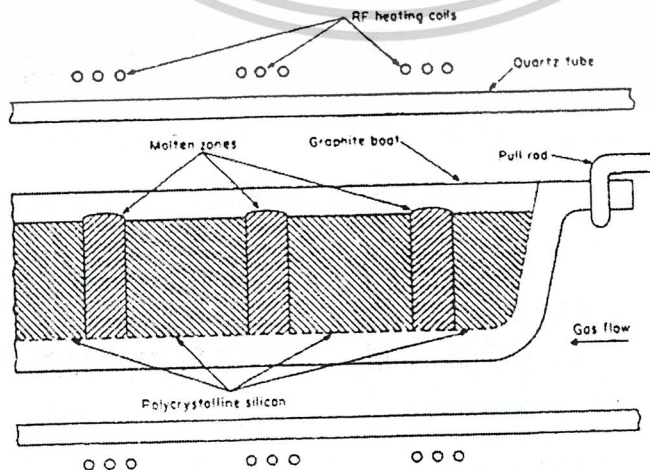
ในกระบวนการสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำนี้ เป็นกระบวนการที่ยุ่งยากซับซ้อน และมีต้นทุนการผลิตที่สูงมาก เหมาะสำหรับการทำในรูปแบบอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ดังนั้นกระบวนการนี้จึงมิได้ทำเองในสถาบัน แต่เป็นการจัดซื้อจากโรงงานอุตสาหกรรมแทน



รูปที่ 3.4 แสดงผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน

3.1.2.2 วิธีโซนรีไฟนิ่ง (Zone refining)

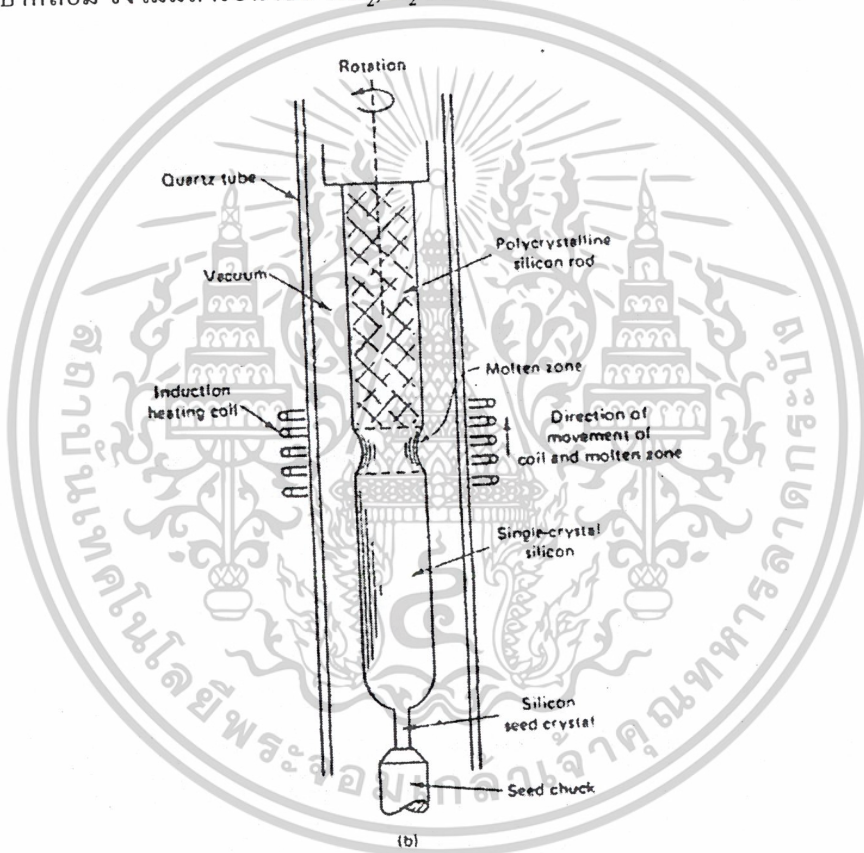
เป็นวิธีการสร้างผลึกรูปเดี่ยว โดยมีอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.5 หลักการของวิธีโซนรีไฟนิ่งก็คือ การทำให้แท่งผลึกหลายรูปของสารกึ่งตัวนำ ถูกหลอมละลายเป็นของเหลวเฉพาะในบางส่วน โดยส่วนที่ถูกความร้อนจะหลอมเป็นของเหลว และจะยังสามารถอยู่ได้ระหว่างส่วนสองส่วนซึ่งเป็นของแข็ง เมื่อเลื่อนตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำหรือเลื่อนแท่งผลึกหลายรูป บริเวณหลอมละลายในแท่งผลึกก็จะเปลี่ยนไป ส่วนที่เคยหลอมเหลวก็จะแข็งตัว และกลายเป็นผลึกรูปเดี่ยวขึ้นมา ทั้งนี้โดยที่ส่วนปลายด้านหน้าของแท่งผลึกจะต้องมีเมล็ดผลึกติดอยู่ด้วยส่วนตั้งซึ่งไม่บริสุทธิ์จะถูกปิดออกมาไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งผลึก เมื่อตัดปลายทั้งสองด้านนี้ทิ้ง จะทำให้ได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวที่บริสุทธิ์มาก และสมบูรณ์ยิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในวงเพื่อการศึกษาและเพื่อประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีโซนรีไฟนิ่ง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีโซนรีฟไนซิงค์ ใช้สำหรับในกรณีที่ต้องการผลึกรูปเดี่ยวที่มีความบริสุทธิ์มาก หรือเมื่อต้องการที่จะได้ปด้วยสารเจือก็ก็สามารถทำได้เช่นกัน ทั้งนี้โดยการจัดให้แท่งผลึกหลายรูปที่เติมสารเจือชนิดพี หรือชนิดเอ็นลงไปในแก้ว ในที่สุดจะได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวที่ถูกเจือด้วยสารเจือ เรียกวิธีการนี้ว่า โฟลทโซน (Float Zone) ดังแสดงไว้ในรูปที่3.6 แต่วิธีการดังกล่าวนี้มีข้อจำกัด ก็คือขนาดของแท่งผลึกที่สร้างได้จะมีขนาดไม่ใหญ่นัก คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่กี่เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากแรงตึงผิวมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้แท่งผลึกทรงตัวอยู่ได้

ข้อดีสำหรับการปลูกผลึกด้วยวิธีโฟลทโซน ก็คือ ผลึกรูปเดี่ยวที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจาก Electronic-Grade Silicon (EGS) หรือแท่งผลึกหลายรูป (Polycrystalline) ไม่ต้องสัมผัสกับบรรยากาศ จึงไม่มีสารอื่น เช่น SiO_2 , O_2 จากเบ้าหลอมเจือปนในแท่งผลึกรูปเดี่ยว

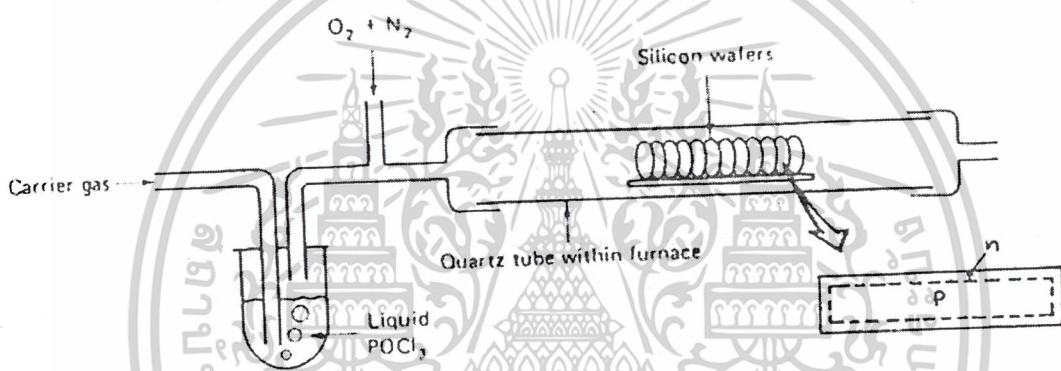


รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีโฟลทโซน

3.2 การแพร่สารเจือ

การแพร่สารเจือ เป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยรอยต่อพี-เอ็นนี้จะอยู่ลึกจากผิวหน้าลงไปประมาณ 0.1-0.5 ไมครอน การแพร่สารเจือส่วนมากจะใช้การแพร่ซึมฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูงราว 800-1000°C ลงในฐานรองชนิดพีที่มีโบรอนแพร่ซึมอยู่ก่อนแล้วทั่วทั้งแผ่นผลึก ตั้งแต่กระบวนการ การปลูกผลึก วิธีการแพร่ซึมฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะใช้ฟอสฟอรัสออกไซด์ (POCl₃) เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ (Impurities source) ดังรูปที่3.9 เนื่องจากฟอสฟอรัสออกไซด์จะระเหยง่ายและสามารถแพร่ซึมลงไปในเนื้อซิลิคอนเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนโรดมีลักษณะเป็นของเหลวระเหยง่าย จึง ต้องนำไปใส่ไว้ในหม้อแก้ว (Bubble) ที่มีการซีลอย่างดี จากนั้นจึงใช้ก๊าซเฉื่อยพวกไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหย POCl_3 พร้อมกับป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าไปในการแพร่สารที่มีแผ่นซิลิคอนวางอยู่ที่อุณหภูมิสูงราว $800-1000^\circ\text{C}$ จะเกิดขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์บางๆ ปกคลุมทั่วทั้งแผ่นผลึก พร้อมกันนั้นฟอสฟอรัสก็จะแพร่ซึมผ่านชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงไปไนซิลิคอน การแพร่ซึมใช้เวลาราว 20 นาที ก็จะได้ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นบางๆ หนาราว 0.1-0.3 ไมครอน จากนั้นใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กัดชั้นออกไซด์ออกทั้งหมด ก็จะได้แผ่นซิลิคอนที่มีรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้นทั้งด้านหน้า และด้านหลัง ซึ่งรอยต่อที่ด้านหลังนี้จะถูกกำจัดให้หมดไปโดยการเคลือบอลูมิเนียม ซึ่งเป็นสารเจือปนชนิดพี ด้วยกระบวนการระเหยสารในสุญญากาศ แล้วจึงนำไปทำการแพร่ซึมอลูมิเนียมให้ทะลุผ่านชั้นฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ $700-800^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้ P^+ บางๆเกิดขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นเซลล์



รูปที่ 3.7 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้ฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ

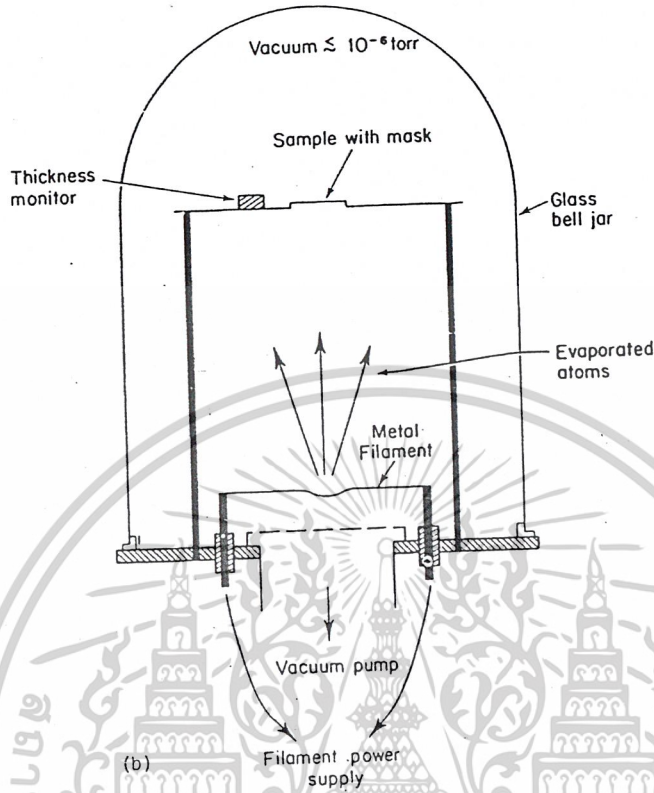
3.3 การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิก

เป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับต่อสายเพื่อนำไปใช้งาน โลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องบัดกรีได้ เพื่อความสะดวกในการต่อเซลล์หลายๆเซลล์เข้าด้วยกัน โลหะที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ เงิน, นิกเกิล, ทองแดง, ไททาเนียม ฯลฯ

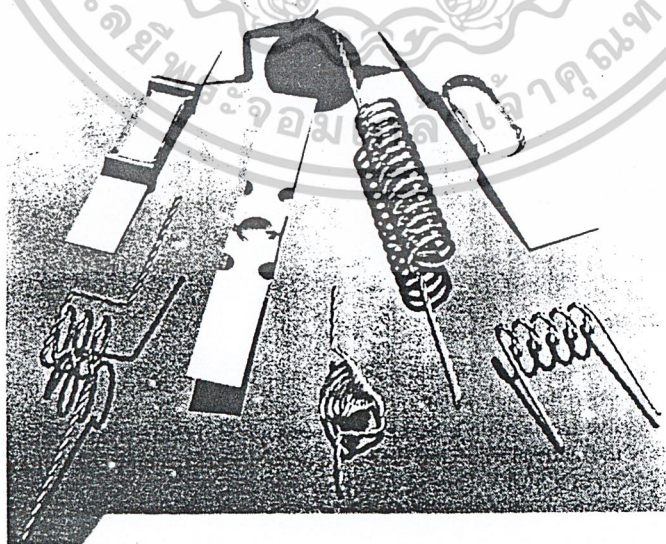
การสร้างขั้วไฟฟ้าจะใช้วิธีระเหยสารในสุญญากาศ ที่เรียกว่า Evaporation ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ขั้วไฟฟ้าที่สร้างด้วยวิธีนี้จะประกอบด้วยขั้วโลหะ 3 ชั้น จากชั้นในสุด คือ เงิน, พาราเดียม และไททาเนียมจะอยู่ชั้นนอกสุด โลหะทั้ง 3 ชนิด แต่ละชนิดจะถูกทำให้ระเหยในสุญญากาศ ผ่านช่องโฟโตมาร์ค ซึ่งทำเป็นลวดลายตาข่าย (grid pattern) ไปเกาะติดอยู่ที่ผิวของซิลิคอนตามลำดับ ส่วนด้านหลังจะติดที่บัพทั้งหมด จากนั้นจึงนำไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ $500-600^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 5-30 นาที เพื่อให้โลหะติดแน่นกับซิลิคอน และทำให้ความต้านทานที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าลดลง

หลังจากสร้างขั้วโลหะแล้วจะใช้กระบวนการ Evaporation ระเหยสารพวกออกไซด์ไปเคลือบป้องกันผิวด้านหน้าของเซลล์ซึ่งโลหะที่ใช้แสดงในรูปที่ 3.9 หรืออาจจะใช้กระบวนการสร้างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapour Deposition) สร้างชั้นออกไซด์บางๆ ของ SiO , SiO_2 , TiO_2 หรือ Ta_2O_5 ลงบนผิวหน้าของเซลล์ เพื่อใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และชั้นป้องกันผิวหน้า ซึ่งจะทำให้เซลล์มี ประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 3.8 การระเหยโลหะในสุญญากาศ เพื่อสร้างชั้นไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.9 แสดงประเภทของเส้นลวดนำไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยโลหะในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี Evaporation นั้นทำให้ราคาในการผลิตเซลล์สูงมาก เซลล์ที่สร้างด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในงานทางด้านอวกาศ ซึ่งต้องการความทนทาน และมีความไว้วางใจที่สูงกว่าเซลล์ที่ใช้บนพื้นโลก เมื่อมีการพัฒนากระบวนการผลิต เพื่อลดต้นทุนในการผลิตลง การสร้างขั้วไฟฟ้าจึงได้เปลี่ยนมาใช้วิธีการซิลสกรีนโลหะและการชุบด้วยไฟฟ้าแทน

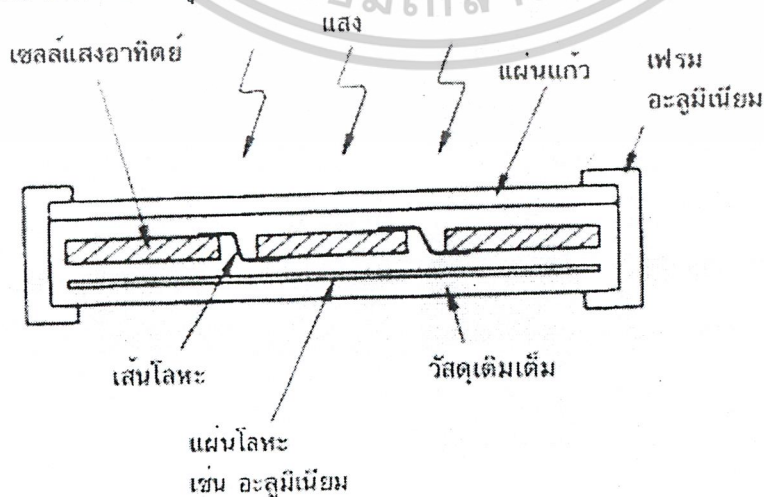
การซิลสกรีนด้วยโลหะจะใช้โลหะเหลวพวกเงิน หรือนิกเกิล สกรีนผ่านคั้นแบบลวดลายลงบนแผ่นซิลิคอน ส่วนด้านหลังจะสกรีนที่บัพทั้งหมดแล้วจึงนำไปทำการแอนนีส เพื่อให้อโลหะติดแน่นเป็นเนื้อเดียวกับซิลิคอน หลังจากการแอนนีสแล้ว บางบริษัทจะนำเซลล์ไปทำการชุบตะกั่วเพื่อให้ขั้วไฟฟ้ามีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และไม่เกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย วิธีการชุบตะกั่ว หรือจะเรียกว่า อาบตะกั่ว ก็คงได้โดยจะเริ่มจากการนำเซลล์ที่ผ่านการแอนนีสแล้ว ไปจุ่มลงในอ่างตะกั่วที่มีตะกั่วหลอมเหลวอยู่ ตะกั่วจะเกาะติดเฉพาะส่วนที่เป็นลวดลายโลหะทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เซลล์ที่ผ่านการชุบตะกั่วมาแล้วจะช่วยให้การต่อเซลล์เข้าด้วยกันสะดวกยิ่งขึ้น

3.4 การประกอบเป็นแผงเซลล์

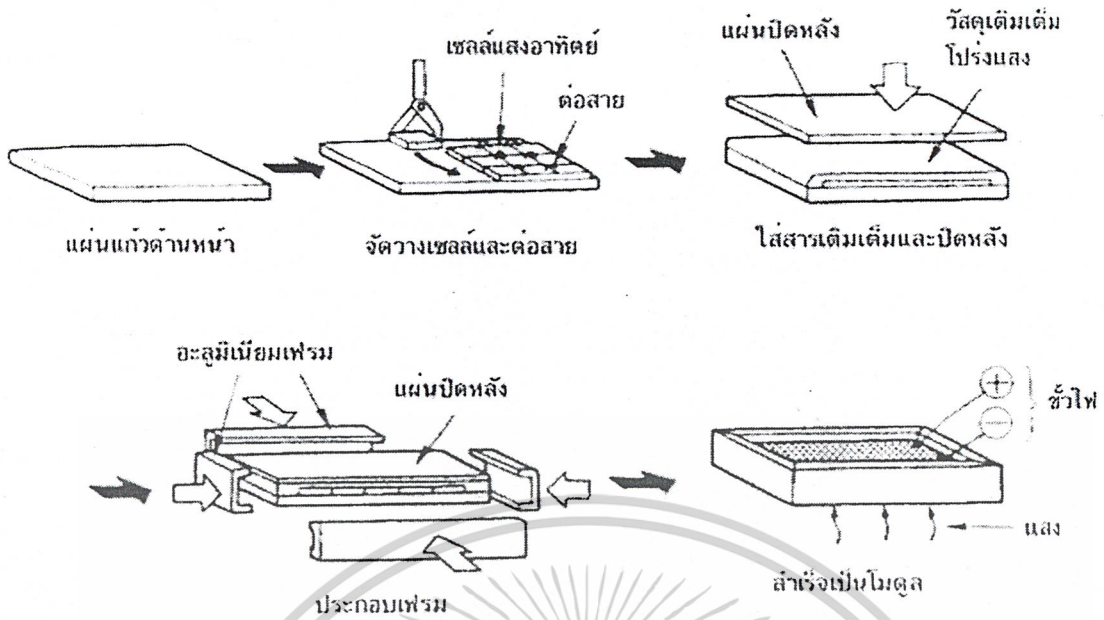
แผงเซลล์ หรือ โมดูล (Modules) หรืออาร์เรย์ (Arrays) เกิดจากการนำเซลล์มาต่อรวมกันเป็นแผงเซลล์ แล้วเก็บบรรจุด้วยการซีลเป็นอย่างดี เพื่อกันความชื้น และสารเคมีที่อาจจะทำให้เซลล์เสียหายได้

การต่อเซลล์แต่ละเซลล์เข้าด้วยกันในแบบอนุกรม จะใช้แผ่นฟอยล์ของโลหะบางๆ เป็นตัวเชื่อม เพื่อให้มีการยึดหยุ่นได้บ้างเล็กน้อย หลังจากนั้นเซลล์เหล่านี้จะถูกนำไปวางบนแผ่นฉนวนฐานรอง ซึ่งอาจจะทำมาจากแก้ว หรืออีพ็อกซีก็ได้ แล้วจึงใช้แผ่นกระจกใสปิดผิวหน้าด้านบนอีกครั้ง ระหว่างกระจกใสด้านหน้า และแผ่นฐานรอง จะใส่สารพวกซิลิโคนซึ่งเป็นสารที่แสงผ่านได้ดี และมีการยึดหยุ่นได้ เพื่อป้องกันไม่ให้เซลล์เสียหายจากการกระทบกับของแข็ง ยังเป็นตัวช่วยป้องกันความชื้น และสารเคมีได้อีกด้วย การเก็บบรรจุที่สมบูรณ์จะช่วยทำให้เซลล์มีอายุการใช้งานนานถึง 20 ปี หรือมากกว่านั้นได้

สำหรับการตรวจสอบแผงเซลล์จะใช้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ AM1 หรือ 100 mw/cm^2 ซึ่งในโรงงานทั่วๆ ไป จะใช้เครื่องผลิตแสงอาทิตย์เทียม ที่เรียกว่า Solar simulator เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ผลิตขึ้นมา



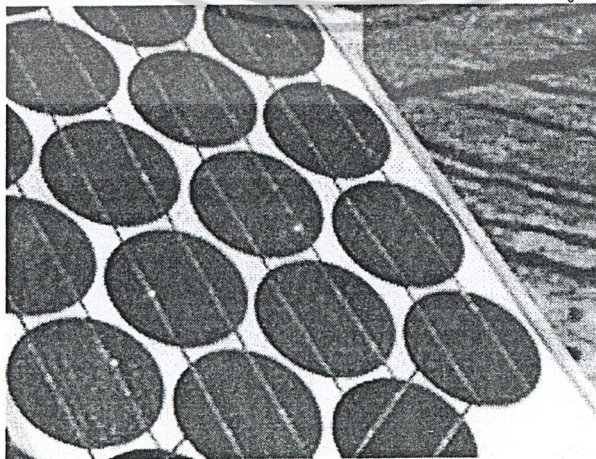
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.10 แสดง โครงสร้างของ โมดูลชนิดหนึ่ง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงการประกอบเซลล์เป็น โมดูล

รูปที่ 3.10 เป็นโมดูลที่แพร่หลายในปัจจุบัน เรียกว่าแบบ super strate โดยรูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการสร้าง ด้านที่รับแสงจะใช้วัสดุโปร่งใส เช่น แผ่นแก้ว ซึ่งจะเป็นตัวโครงสร้างทางกลของโมดูลด้วย เมื่อจัดวางเซลล์ทางไฟฟ้าแล้ว ก็จะอัดที่ว่างด้วยวัสดุเติมเต็มโปร่งใส เช่น PVB (polyvinyl butylol) หรือ EVA (ethylene vinyl acetate) จากนั้นก็จะปิดด้านหลัง และหุ้มโมดูลทั้งหมดด้วยเฟรมอะลูมิเนียม ประสิทธิภาพของโมดูลที่มีขายในท้องตลาดปัจจุบัน ที่มีขนาดประมาณ 40cm x 120cm คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนผลึกเดี่ยว 10-14% แบบ โพลีซิลิคอน 8-12% และแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน 6-9 %

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบผลึกรูปเดี่ยวนี้ จะมีต้นทุนในการผลิตสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพของเซลล์สูงตามไปด้วย ต้องใช้เวลาอีกมาก เพื่อพัฒนาหาทางนำเซลล์แบบอื่นมาใช้ และระยะเวลาในการใช้งานจะต้องไม่ต่ำกว่า 25 ปีด้วย ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เซลล์แบบผลึกรูปเดี่ยวสามารถใช้ได้



รูปที่ 3.12 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

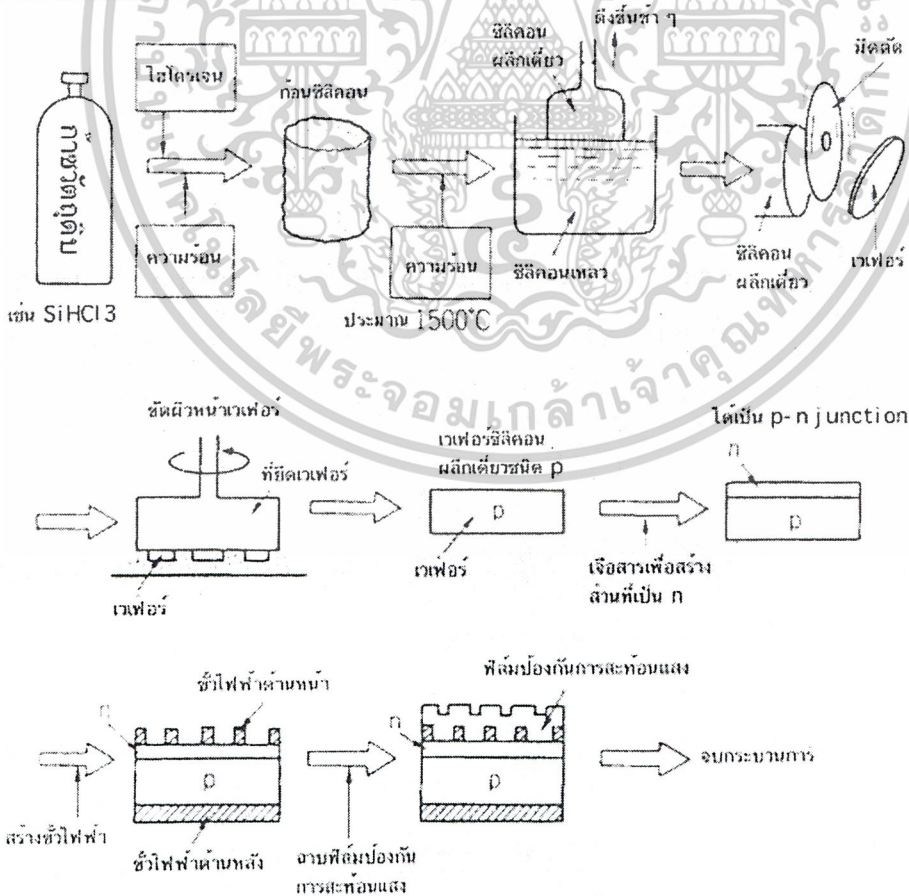
3.5 การปรับปรุงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบ่งได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ คือ แบบผลึก และแบบอะมอร์ฟัส ซึ่งการสร้างของแต่ละชนิดจะต่างกัน

3.5.1 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว

ขออธิบายจากกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว เริ่มจากการนำเอาซิลิคอน ซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.999%) ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว) จากต้นผลึก (seed crystal) ด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึก คุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

ต่อไปก็จะนำแท่งผลึกเดี่ยวนี้ไปตัดเป็นแผ่นๆ เรียกว่า เวเฟอร์ หนาประมาณ 300 ไมโครเมตร และขัดความเรียบของผิว จากนั้นก็จะนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น p-n junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการ diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ก็จะเป็นขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า เพื่อนำกระแสไฟ่ออกใช้ และขั้นสุดท้ายก็จะเป็นการเคลือบฟิล์มผิวหน้า เพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อยที่สุด รูปที่ 3.13 เป็นตัวอย่างของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว



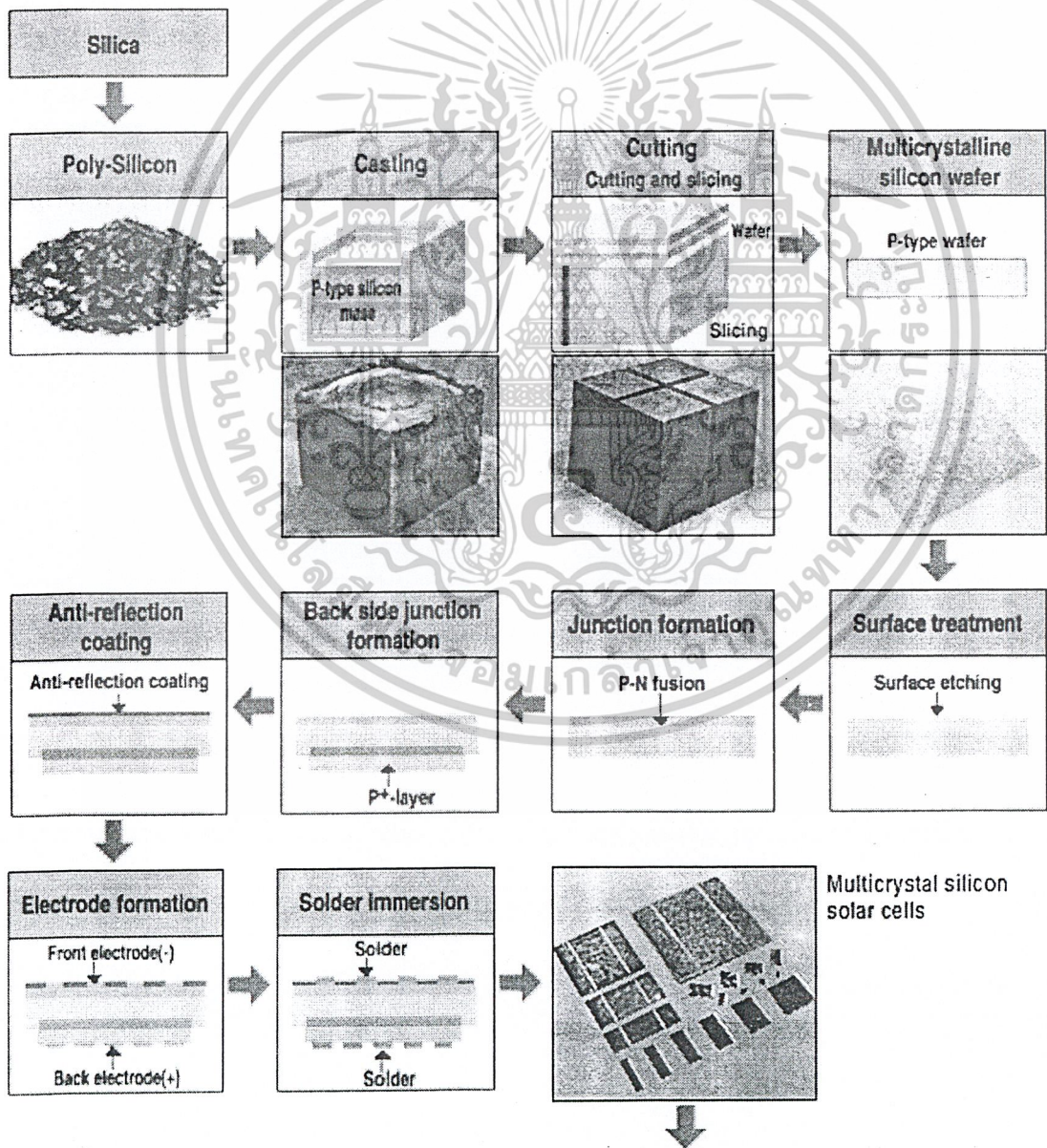
รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตเซลล์ แสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่าการสร้างแผ่นผลึกด้วยวิธีของโซคราลสกี เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ราคาต้นทุนในการผลิตเซลล์สูงกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ยังไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นผลึกที่มีคุณภาพสูงเช่นนี้ จึงได้มีการนำเอาผลึกแบบ Polycrystal หรือที่เรียกว่า ผลึกหลายรูป มาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถสร้างได้มีประสิทธิภาพสูงสุดถึง 17% แต่เมื่อนำไปสร้างในระบบอุตสาหกรรมจะมีประสิทธิภาพราว 12%

3.5.2 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกโพลี

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยว ซิลิคอน แบบผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอน ก็คือ ก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ (ขนาดระดับ ไมโครเมตร-มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน รูปที่3.14 แสดงขั้นตอนการผลิตของโพลีซิลิคอน



รูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนการผลิตของโพลีซิลิคอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านบนของรูปแสดงการผลิตแบบ cast โดยจะเทซิลิคอนที่หลอมละลายเข้าไปใน crucible แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ ซึ่งก็จะได้ก้อน ingot ของโพลีซิลิคอนที่มีรูปร่างตาม crucible ที่ใช้

หลังจากนั้น การนำไปทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะคล้ายกับกรรมวิธีของแบบผลึกเดี่ยว คือ นำไปตัดเป็นเวเฟอร์หนาขนาด 300-400 ไมโครเมตร แล้วก็ทำ p-n junction ต่อไป

ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แบบ Polycrystal ก็คือ รูปร่างของแผ่นเซลล์ซึ่งสามารถทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมได้ ทำให้สามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบแผ่นกลมถึง 25% เนื่องจากมีช่องว่างบนแผงเซลล์น้อยกว่าแบบแผ่นกลมนั่นเอง

3.5.3 ซิลิคอนแบบริบบอน

เทคโนโลยีของการสร้างแผ่นผลึกทั้งแบบผลึกรูปเดี่ยวที่เป็นแผ่นกลม และแบบผลึกหลายรูปที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมนั้นยังคงเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองวัสดุอยู่ เนื่องจากต้องมีการตัดแผ่นผลึกทำให้ต้องเสียเนื้อของซิลิคอนไปส่วนหนึ่ง จึงได้มีการปรับปรุงเทคนิคต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแผ่นซิลิคอนให้เป็นแผ่นบาง และยาวที่เรียกว่า ริบบอน (Ribbon) ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ทำให้ไม่ต้องเสียเนื้อซิลิคอนในการตัดให้เป็นแผ่นบางๆ เทคนิคในการสร้างแผ่นผลึกแบบริบบอนมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีอีเอฟจี และเคนคริติก

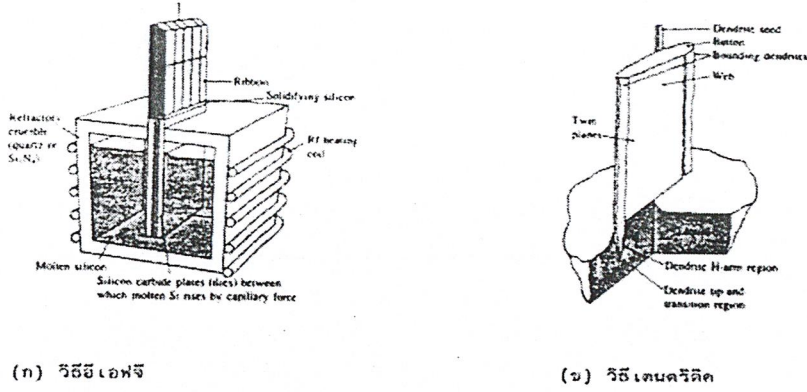
อีเอฟจี (EFG) ย่อมาจาก Edge-defined film-fed growth เป็นวิธีการสร้างแผ่นผลึกที่คล้ายกับวิธีของโซคราลสกี ที่ต้องใช้เมล็ดผลึกไปหล่อ และดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องเล็กๆบางๆที่ทำด้วยแกรไฟท์ เพื่อให้ซิลิคอนฟอร์มตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมยาวตามที่ต้องการ แผ่นผลึกที่ผลิตด้วยวิธีนี้ จะมีความหนา 150-300 ไมครอน มีความกว้างตั้งแต่ 5-10 เซนติเมตร ใช้อัตราการดึงราว 5 เซนติเมตรต่อนาที

ข้อเสียของริบบอนแบบอีเอฟจีนี้ ก็คือ มีโครงสร้างของผลึกที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับวิธีของโซคราลสกี และการที่ซิลิคอนต้องถูกหลอมเหลวอยู่ภายในเบ้าหลอม แล้วยังต้องมีการดึงผ่านช่องแคบๆของแกรไฟท์อีก วิธีการเช่นนี้ทำให้แผ่นผลึกที่ได้มีความไม่สมบูรณ์สูง เนื่องจากสิ่งแปลกปลอม และสารเจือปนต่างๆจากเบ้าหลอม และแผ่นแกรไฟท์สามารถเข้าไปในเนื้อซิลิคอนได้ง่าย วิธีการที่สามารถจะลดความไม่บริสุทธิ์ของแผ่นผลึกแบบริบบอนได้ก็คือ วิธีการแบบเคนคริติก

การดึงแผ่นผลึกริบบอนแบบเคนคริติก จะใช้เมล็ดผลึกไปหล่อ และดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องที่มีอยู่เฉพาะตรงขอบทั้ง 2 ด้าน เพื่อให้ซิลิคอนฟอร์มตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมในแบบริบบอน แผ่นผลึกที่สร้างด้วยวิธีนี้ จะมีความบริสุทธิ์สูงใกล้เคียงกับวิธีของโซคราลสกี เมื่อนำไปสร้างเซลล์ จะได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอีเอฟจี

ราคาจำหน่ายของเซลล์แบบริบบอนยังคงใกล้เคียงกับแบบแผ่นกลม เนื่องจากปริมาณการผลิตยังต่ำอยู่นั่นเอง และเป็นที่คาดหวังกกันว่าเซลล์แบบริบบอนนี้ จะสามารถสร้างให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ ทั้งยังสามารถจะลดต้นทุนการผลิตลงได้อีก เมื่อได้มีการปรับปรุงเทคนิคต่างๆให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



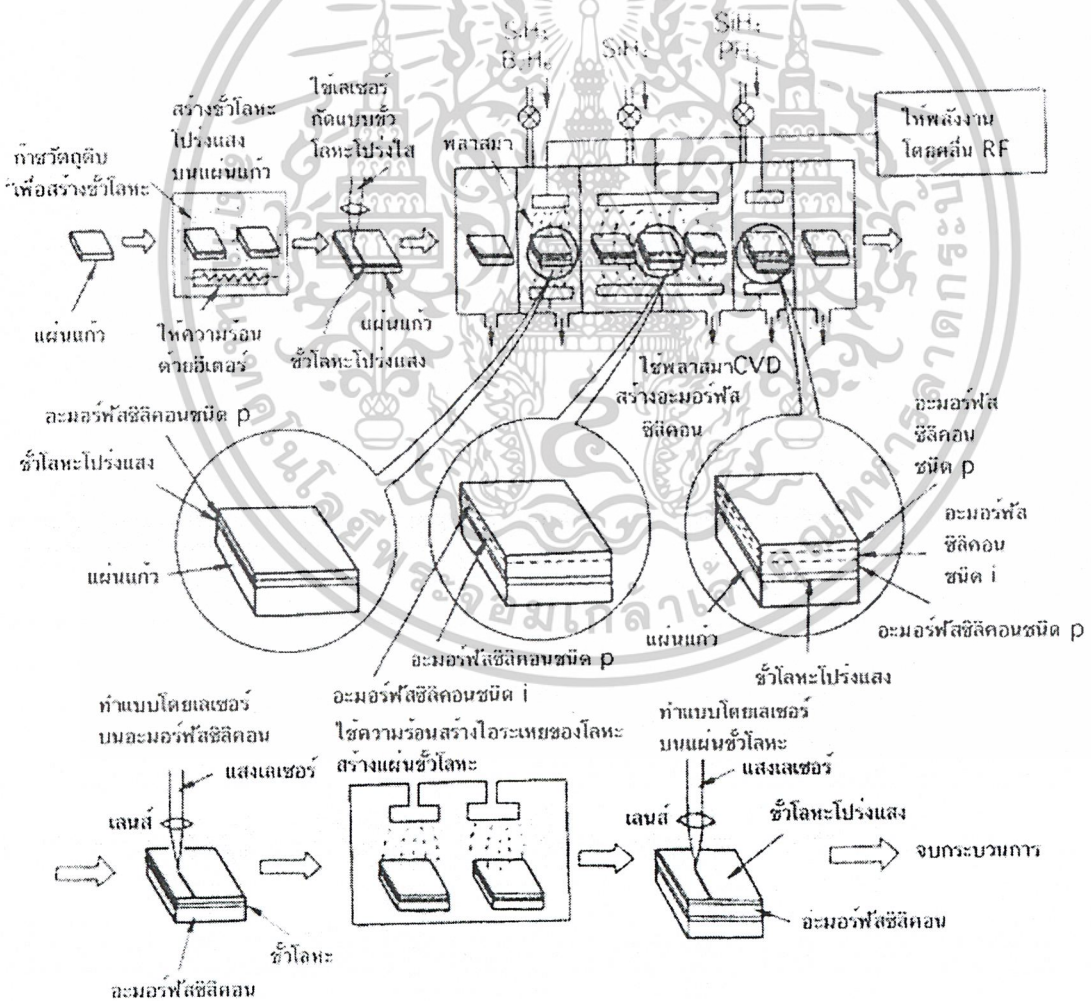
(ก) วิธีเอพิจ

(ข) วิธีเทนคริลิค

รูปที่ 3.16 การดึงแผ่นซิลิคอนแบบริบบอน

3.5.4 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบอะมอร์ฟิส

เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟิส มีวิธีการผลิตที่ต่างจากแบบผลึกโดยสิ้นเชิง โดยจะเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางไม่ใช่เวเฟอร์ รูปที่3.16 แสดงให้เห็นขั้นตอนการผลิต



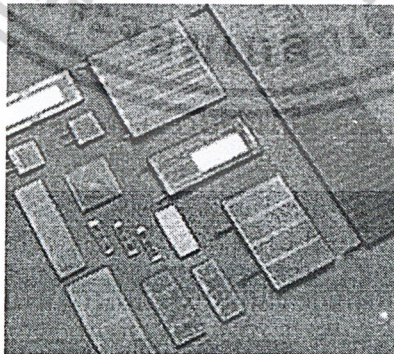
รูปที่ 3.16 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟิสซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะสร้างแผ่นฟิล์มบางของซิลิคอน บนแผ่นฐานรอง โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งจะมีระบบนำก๊าซที่มีซิลิคอนติดอยู่ เช่น ก๊าซไซเรน (SiH_4) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศ และตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีกระแสความร้อน เช่น โดยใช้พลาสมาเพื่อส่งพลังงานให้ซิลิคอนแยกตัวออกจากก๊าซ เข้าไปจับตัวกันบนแผ่นฐานรอง โดยส่วนใหญ่จะเป็นแก้ว, สเตนเลส หรือพลาสติก ซึ่งได้ทำให้การเคลือบชั้นตัวนำโปร่งแสงไว้ก่อน โดยมีอุณหภูมิบนแผ่นฐานรองประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ซิลิคอนจะทับถมสะสมบนแผ่นเกิดเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในขั้นตอนนี้หากเราใส่ก๊าซที่มี boron เช่น B_2H_6 เข้าไปด้วย เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด p และถ้าหากใส่ก๊าซที่มี phosphate เช่น PH_3 เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด n ซึ่งจะเห็นได้ว่า ด้วยวิธีนี้เราสามารถควบคุมการไหลของก๊าซ เพื่อสร้างให้เกิดชั้นของ pin อะมอร์ฟัสซิลิคอนขึ้นได้อย่างค่อนข้างง่ายเลย หลังจากได้โครงสร้าง pin แล้ว เราจะสร้างส่วนของขั้วไฟฟ้าให้เสร็จเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

จุดเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส ก็คือ

1. พลังงานที่จำเป็นในการผลิตน้อยกว่า (แบบผลิตต้องใช้อุณหภูมิสูงระดับ 1000-1500 องศาเซลเซียส ส่วนแบบอะมอร์ฟัสใช้แค่ระดับ 300 องศาเซลเซียส)
 2. ขั้นตอนในการผลิตไม่ซับซ้อน (สร้างฟิล์มไปพร้อมกับการสร้าง pin junction ได้เลย)
 3. เนื่องจากอัตราการดูดแสงของอะมอร์ฟัสซิลิคอนสูงกว่าผลึกมาก จึงสามารถลดความหนาของฟิล์มเป็นระดับ 1 ไมโครเมตรได้ ในขณะที่แบบผลิตต้องทำอย่างน้อยหนาประมาณ 300 ไมโครเมตร ซึ่งทั้งนี้ก็เพื่อความแข็งแรงทางกลของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย นั่นก็คือ อะมอร์ฟัสซิลิคอนสามารถประหยัดปริมาณของซิลิคอนได้มากกว่า
 4. เนื่องจากปฏิกิริยาเป็นแบบก๊าซ จึงสามารถสร้างแผ่นที่มีขนาดพื้นที่ใหญ่ๆ ได้ง่ายกว่า
- จากรูปที่ 3.16 จะเห็นว่า อาจจะใช้เลเซอร์ช่วยในการตัดวงจรเพื่อสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะของวงจรรวมได้ด้วย



รูปที่ 3.17 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส

นอกจากนี้เซลล์แบบนี้ยังมีอายุการใช้งานที่สั้นมากราว 1 ปี เมื่อนำไปใช้กับแสงแดด ปัญหาการเสื่อมลงของเซลล์แบบอะมอร์ฟัสนี้ยังเป็นปัญหาหลักที่ยังต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแก้ไข

เอกันต่อไปอีกเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันเซลล์แบบอะมอร์ฟิซขนาด เล็กๆ ได้มีการผลิตออกมาใช้ร่วมกับนาฟิกา และ เครื่องคิดเลข เป็นจำนวนมาก เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ภายในนาฟิกา และเครื่องคิดเลข ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยมาก เซลล์แบบอะมอร์ฟิซซึ่งมีราคาถูก และมีประสิทธิภาพไม่เกิน 5% ก็ พอเพียงแล้วสำหรับการใช้งานประเภทนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ จะเห็นว่า มีบางประเภท ที่ทำจาก สาร กึ่งตัวนำแบบสารประกอบซึ่งไม่ใช่ซิลิคอน

ตารางที่ 3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ

ประเภทของเซลล์ แสงอาทิตย์	สารกึ่งตัวนำที่เป็น วัตถุดิบ	ประสิทธิภาพ ของเซลล์	ประสิทธิภาพของ โมดูล
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกเดี่ยว	15-24 %	10-14 %
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกโพลี	10-17 %	9-12 %
ซิลิคอน-อะมอร์ฟิซ	Amorphous Silicon Amorphous SiC Amorphous SiGe	8-13 %	6-9 %
สารกึ่งตัวนำ 2 ธาตุ	GaAs/InP CdS/CdTe	18-30 % (GaAs) 10-15 %	NA
สารกึ่งตัวนำ 3 ธาตุ	CdS/CuInSe ₂	10-15 %	NA

หมายเหตุ NA หมายถึง not applicable or not available

ตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ จะเห็นว่าซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด ตามมาก็คือ ซิลิคอนแบบผลึกโพลี และแบบอะมอร์ฟิซ

ตารางที่ 3.2 แสดงจุดเด่น และจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

ตระกูล	ประสิทธิ ภาพ (%)	พลังงาน ในการผลิต	ราคา	วัตถุดิบ	ความเชื่อถือ	สิ่งแวดล้อม
ซิลิคอนผลึก เดี่ยว	15-24	Bad	Bad	Good	Very Good	Very Good
โพลีซิลิคอน	10-17	Good	Good	Good	Good	Very Good
อะมอร์ฟิซ ซิลิคอน	8-13	Very Good	<u>Very Good</u>	Very Good	<u>Good</u>	Very Good
GaAs	18-30	Bad	Very Bad	Bad	Very Good	Bad
CdS/ CdTe	10-15	Good	Good	Bad	Good	Bad
CdS/CuInSe ₂	10-15	NA	NA	Bad	Good	Bad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

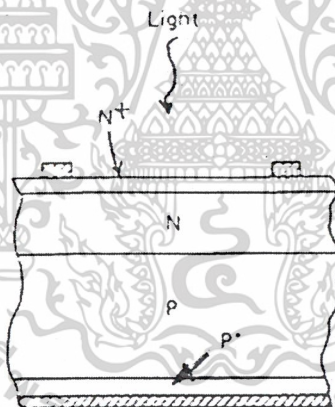
หมายเหตุ NA หมายถึง not applicable or not available

3.6 การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

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

3.6.1 Back Surface Fields (BSF)

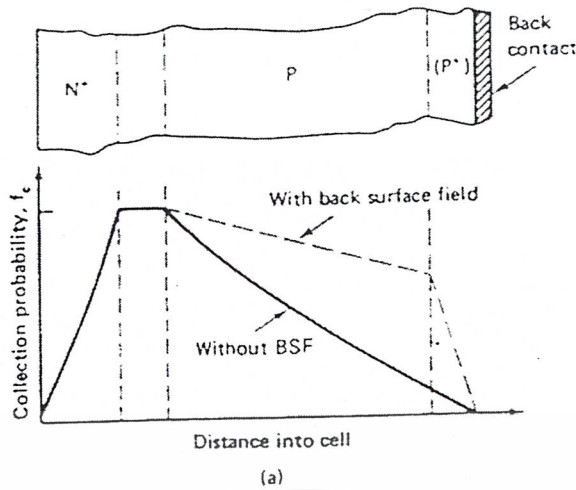
Back surface fields เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีดังกล่าวนี้ในปัจจุบันนี้ได้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมาตรฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพสูงในหลายแห่ง เนื่องจากกระบวนการสร้าง Back surface fields ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้อย่างมากอีกด้วย การทำ Back surface fields (BSF) สามารถทำได้โดยการทำ High dope ชนิดเดียวกับฐานรองในบริเวณด้านล่างของแผ่น Substrate ใกล้กับ Back contact แสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธี Back Surface Fileds (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 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดง Collection Probability ของเซลล์ที่มี BSF และ ไม่มี BSF

หมายเหตุ จากความหมายเบื้องต้นของ Collection Probability จะได้ว่าสมการ คือ

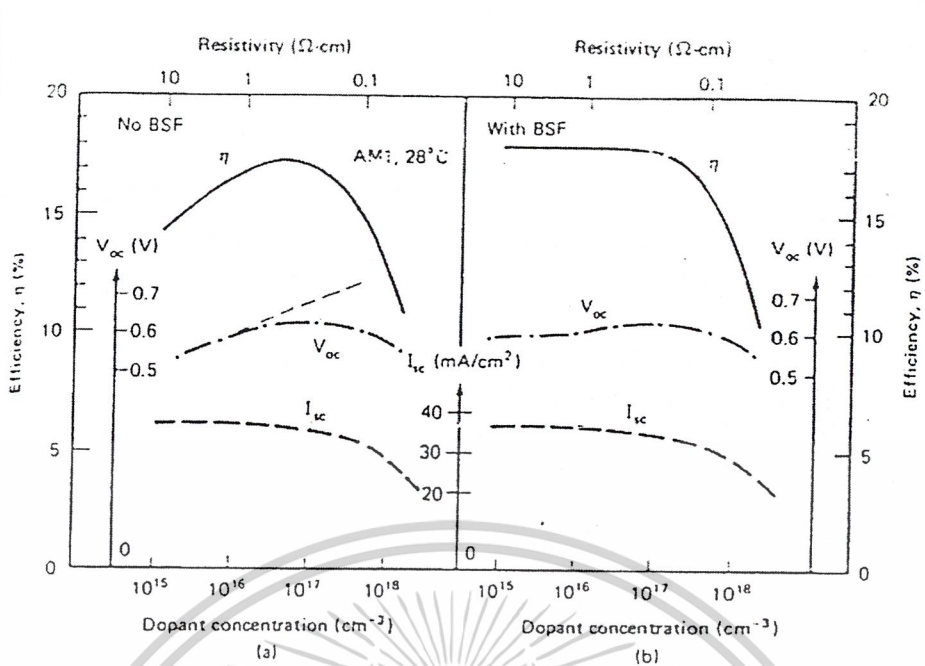
$$f_c = \frac{J_{SC}}{J_{DIS}} \tag{3.5}$$

หรือ $f_c = e^{-\frac{x}{L_c}} \tag{3.6}$

- เมื่อ J_{SC} คือ การแสตต์ดวงจร (I_{sc})
- J_{DIS} คือ กระแสที่เกิดขึ้น
- x คือ ระยะทางจากขอบของ Depletion region ไปยังขั้ว
- L_c คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

ซึ่งจากรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าค่า f_c เมื่อมี Back surface fields (BSF) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากแต่ก่อนเมื่อไม่มี Back surface fields (BSF) ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ 3.6 จะพบว่า f_c จะถูกลดทอนด้วยเทอมเอ็กโพเนนเชียลแต่ Back surface fields (BSF) ช่วยทำให้การลดทอนของ f_c ลดลงจึงมีผลทำให้ f_c มีค่าเพิ่มขึ้น

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญคือ กระแสเสตต์ดวงจร (I_{sc}), แรงดันเปิดดวงจร (V_{oc}) และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ภายหลังการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back surface field (BSF) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.20



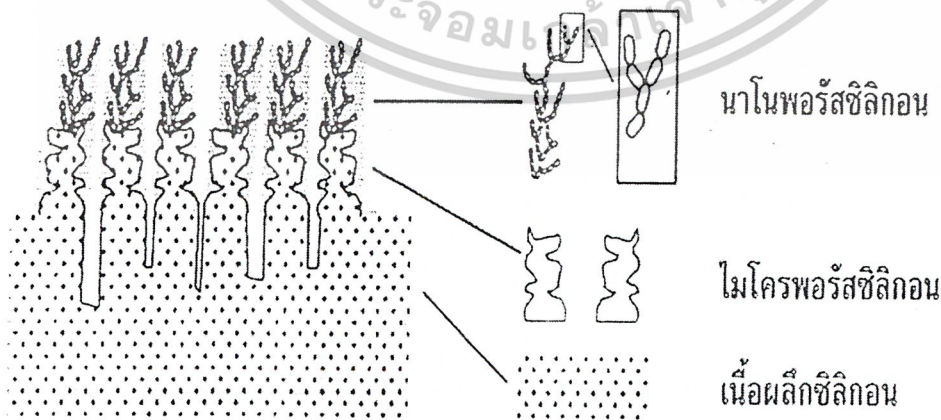
รูปที่ 3.20 Dependence of key solar cell parameters upon the density of p-type dopants as obtained by high-performance experimental device:

- (a) Without a back surface field.
- (b) With a back surface field.

3.6.2 พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)

3.6.2.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอน คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิคอนเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรอยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

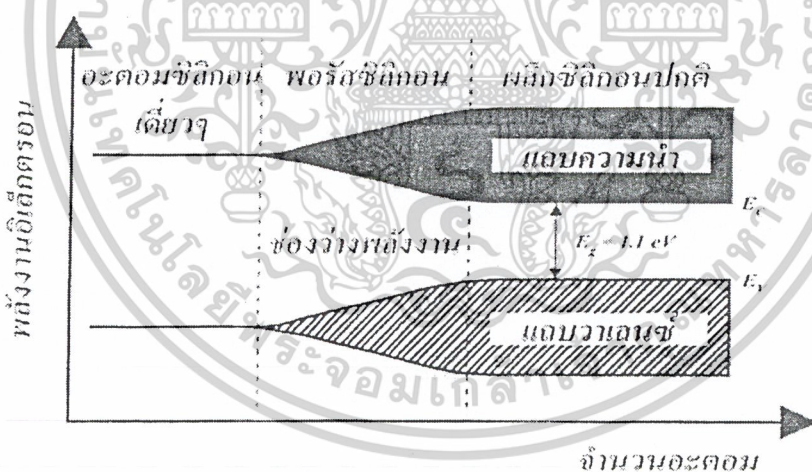
จากภาพจะเห็นได้ว่าชั้นของพอร์ส ซิลิคอนจะประกอบด้วย

1. โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่ติดกับเนื้อของผลึกซิลิคอน
2. โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 10 นาโนเมตรลงไป

โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching)

3.6.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิคอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้การแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ จะมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิคอนเดิม



รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 3.22 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้น พอร์สซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสา แคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ พอร์สซิลิคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง ซึ่งความกว้างของช่อง พลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับ โครงสร้าง นาโนเมตรของพอร์สซิลิคอน

3.6.2.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน

ในกระบวนการสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกซิลิคอนที่มีขนาดโครงสร้างอยู่ในระดับนาโน เมตร (nanocrystallites) และสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้นั้นมี อยู่หลายวิธีด้วยกัน

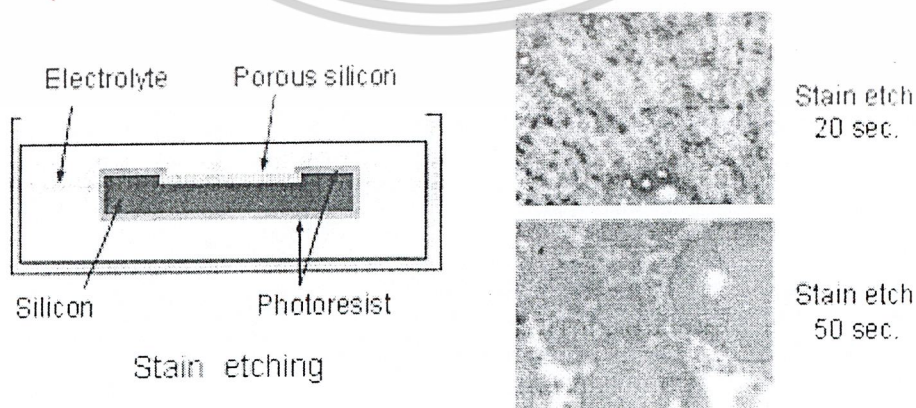
เทคนิคในการสร้างแบบต่างๆ

1. เทคนิคในการสร้างแบบ Microwave plasma decompositionของก๊าซไซเรน (SiH_4)
2. เทคนิควิธีการสร้างแบบ Laser breakdown ก๊าซไซเรน (SiH_4)
3. เทคนิคการสร้างแบบ High-frequency spark discharge
4. การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี
5. การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการ Stain etching

ในการทดลองนี้ได้ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน ด้วยวิธี Stain Etching เนื่องจากมี กระบวนการสร้างที่ค่อนข้างง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างชั้นพอร์ส ซิลิคอนก็มีราคาไม่แพงอีกด้วย ซึ่งการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีนี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching

การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching หรือ การกัดแบบข้อมสี่ เริ่มมีการนำมาใช้ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เทคนิคที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารประกอบของ ไฮโดรฟลูออริก ซึ่งมีจะประกอบด้วย สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF), กรดไนตริก(Nitric) และน้ำ เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้การกระตุ้นด้วยแสงสว่างในขณะที่ทำ การกัดด้วยปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยการทำปฏิกิริยาด้วย



รูปที่ 3.23 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และ

ตัวอย่างของพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ล่วงหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี

จุดสำคัญของการกัดแบบข้อมสี(Stain etching) ก็คือ การทำให้เกิดประจุโพลเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF)ทำปฏิกิริยากับ กรดไนตริก(Nitric : HNO_3)เพื่อให้เกิดประจุโพล ดังสมการที่ 5.12 หลังจากนั้นประจุโพลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation reaction)ได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 5.13 ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เองสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ดังสมการที่ 5.14 ซึ่งการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์และการถูกกัดออกของซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยาเหมือนอย่างกรณีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี(Anodication) ดังนั้นลักษณะโครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ(Non-uniform)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อม



(6.12)



(6.13)



(6.14)



(6.15)

ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีสันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีสันจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมครอน ถึงประมาณ 1.5 ไมครอน เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าในกระบวนการกัดแบบข้อมสี มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกพร้อมกับกรดไนตริกสักครู่ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยาการกัดในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพาะฟักตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้ในกระบวนการกัดนั่นเอง เรียกว่า "การบ่มสารละลาย (Incubation)"

2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธี Stain etching

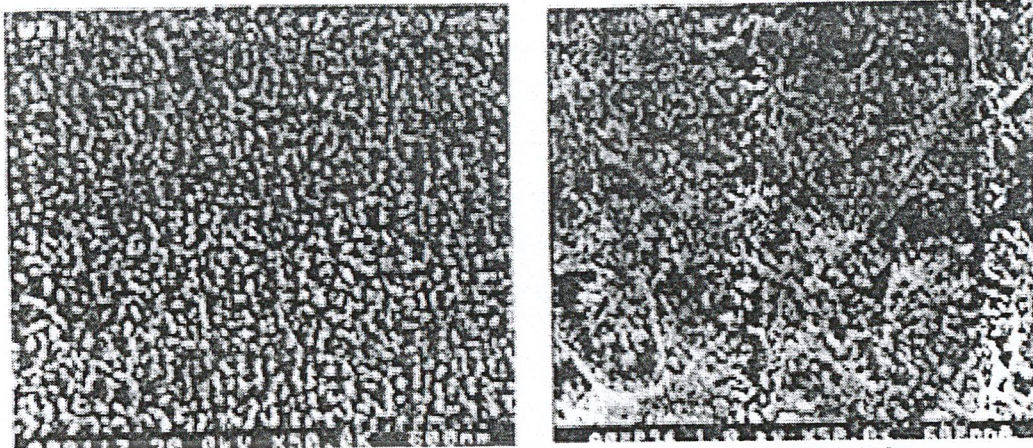
1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ โดยที่อัตราการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ HF:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น
 ไม่วาทกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชนิดของสารเจือและค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ส มีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดของชั้นพอร์สซิลิคอนซึ่งทำให้มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำ "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. สภาพของผลึกซิลิคอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน มีการทดลองกับแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline), แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป (poly crystalline), แผ่นซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous) และชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($Si_{1-x}Ge_x$) ที่สร้างจากกระบวนการ Epitaxi เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสีกายใต้ปัจจัยภายนอกเดียวกัน พบว่า จากการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติ Photoluminescence (PL) แต่ พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Amorphous กลับไม่แสดงคุณสมบัติ Photoluminescence (PL) ส่วนกรณีชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($Si_{1-x}Ge_x$) ที่สร้างจากกระบวนการ Epitaxi พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของเจอร์เมเนียม (Ge_x) จะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิด Photoluminescence (PL) ลดลงในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้กัดและการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของกระบวนการทำปฏิกิริยาดังนี้มีผลกระทบต่อโครงสร้างและลักษณะของพอร์สซิลิคอนที่จะเกิดขึ้น เช่น การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลาย เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่หยาบกว่าการสร้างชั้นพอร์สโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย ดังรูปที่ 3.24



(a) Stain etch in the absence of sonication

(b) Stain etch in the presence of sonication

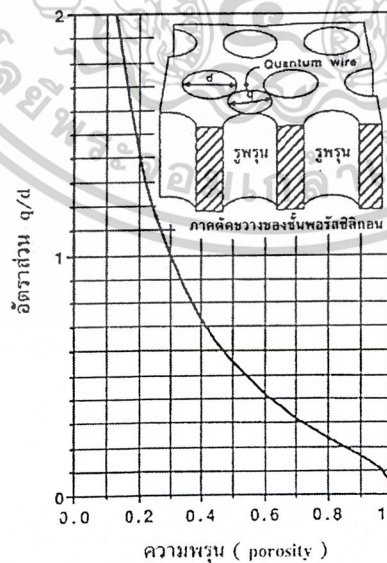
รูปที่ 3.24 ภาพเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching

รูป (a) พอร์สซิลิคอนที่ได้จากการไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

รูป (b) พอร์สซิลิคอนที่ได้จากการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

3.6.2.4 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน

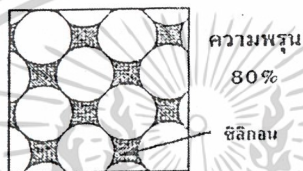
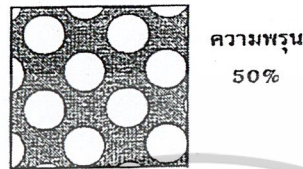
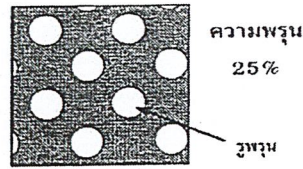
พอร์สซิลิคอนนั้นก็คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอนที่เหลื่อ และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน(q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.25 จะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของ เนื้อผลึกซิลิกอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผล ต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กลงๆ หรือขนาดของรูพรุน มีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้พอร์สซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

3.6.2.5 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

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

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

การเปล่งแสงในลักษณะโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการกระตุ้นพาหะอิเล็กตรอนด้วยวิธีการส่องแสง (excitation by light) จนพาหะอิเล็กตรอนมีพลังงานมากเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบความนำได้ แต่เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนเหล่านี้มีความไม่เสถียรในสถานะใหม่นี้ ดังนั้นจึงต้องตกกลับมาอยู่ในสถานะเดิม โดยจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง ซึ่งค่าพลังงานที่ปล่อยออกมานี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องกระโดดมารวมตัวกับโฮล โดยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (E) กับความยาวคลื่นของแสง (λ) เป็นดังนี้คือ

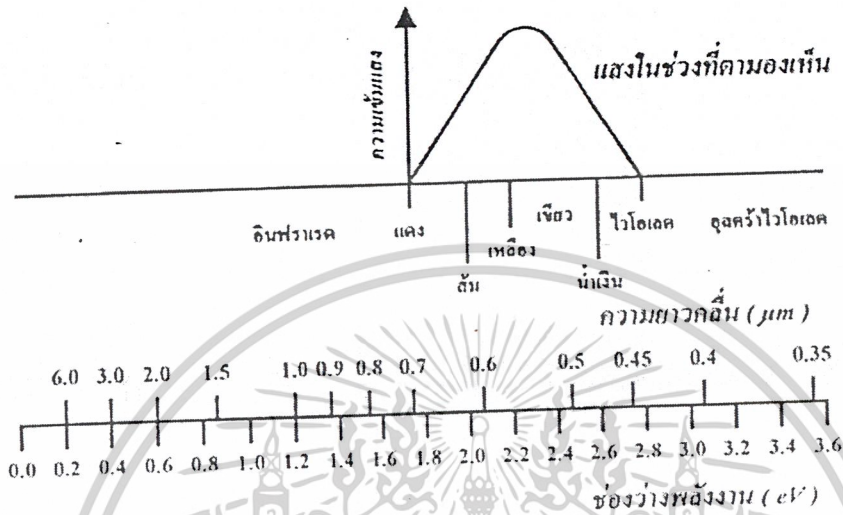
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.10)$$

โดยที่ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์ = 4.14×10^{-15} eV.s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เป็นความลับ 3×10^8 m/s นั้น ไม่นอญูตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda(nm) = \frac{1240}{E} (eV) \tag{3.11}$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า การที่แสงที่เปล่งออกมาจะมีความยาวยาวคลื่นหรือสีต่างๆ ได้นั้น ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่คายออกมานั่นเอง โดยสีของของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปแบบที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แสดงแผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ

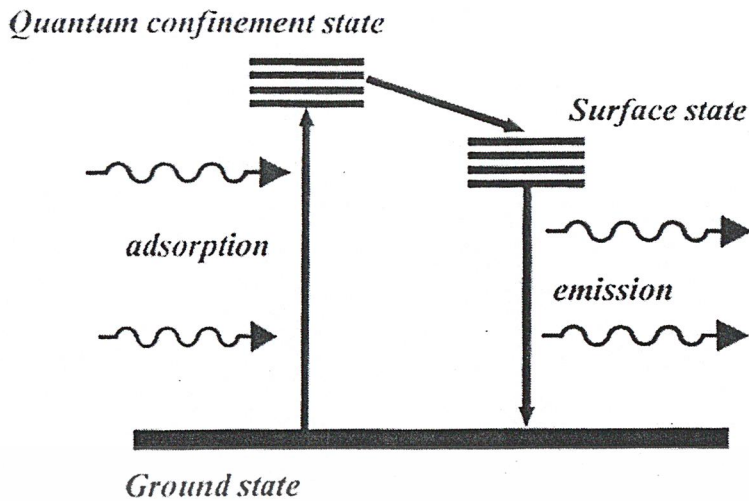
3.6.2.6 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

กลไกในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอน

จากลักษณะโครงสร้าง และส่วนประกอบของพอร์สซิลิคอน หลายๆกลุ่มวิจัยทั่วโลกเชื่อกันว่าคุณสมบัติของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน คือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect ขึ้น ภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอน ทำให้ขนาดช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิคอน
 2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั่นเอง
- จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้เอง ทำให้เราสามารถทำการอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescent state model) ดังแสดงในรูปแบบที่ 3.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 แสดงแบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในโพร์สซิลิคอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดยสถานะแรกนั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนโพร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ quantum confinement effect หรือ quantum effect ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนโพร์สซิลิคอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนโพร์สซิลิคอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จะมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลของการที่ช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานในนาโนโพร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เองอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

3.7 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

3.7.1 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เมื่อพิจารณาด้านต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว ที่ประกอบเป็นแผงเซลล์พื้นที่ 1-2 m² จะพบว่า

35% ของต้นทุน อยู่ที่การเตรียมแผ่นซิลิคอนที่จะนำมาผลิต (ready for cell production)

30% ของต้นทุน อยู่ที่กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (making a solar cell)

30% ของต้นทุน อยู่ที่การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์เข้าเป็นแผง

เมื่อพิจารณาด้านต้นทุนการเตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ สำหรับเป็นวัสดุเริ่มต้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จะพบว่า

เอกสารนี้เป็น 30% ของต้นทุน อยู่ที่การเตรียมวัสดุ (poly-Si) ซาเท่านั้น ไม่นอญูตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

35% ของต้นทุน อยู่ที่การปลูกผลึก (Crystal growth)

30% ของต้นทุน อยู่ที่การตัดผลึกให้เป็นแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเกือบครึ่งหนึ่งต้องเสียเนื้อซิลิคอนไปกับผงซิลิคอนที่ถูกล้าง

5% ของต้นทุน อยู่ที่การ etching, polishing, cleaning etc.

จะเห็นได้ว่า 2 ใน 3 ของต้นทุนการผลิตเกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุ (Si) และเทคโนโลยีในการสร้าง ซึ่งต้นทุนในการผลิตในส่วนนี้มีต้นทุนที่สูงมาก ดังนั้น เพื่อที่จะลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ที่การเตรียมซิลิคอนให้บริสุทธิ์ เราจึงเลือกหาวัสดุในการผลิตเซลล์แบบอื่น ที่มีราคาต่ำ และสามารถนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์โดยที่ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้ไม่ต่ำจนเกินไป เราเรียกวัดคุณั้นว่า Solar-Grade Silicon (SoG-Si)

โดยทั่วไปเทคโนโลยีมาตรฐานในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอน สามารถแบ่งได้เป็น

1. กระบวนการ Reduction SiO_2 ให้เป็น Metallurgical-Grade Silicon (MG-Si)
2. กระบวนการทำ MG-Si ให้บริสุทธิ์ขึ้นเป็น Semiconductor-Grade Silicon (SeG-Si)
3. การนำ SeG-Si ไปปลูกผลึกและตัดเป็นแผ่นเวเฟอร์
4. กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์
6. การบรรจุเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้งาน

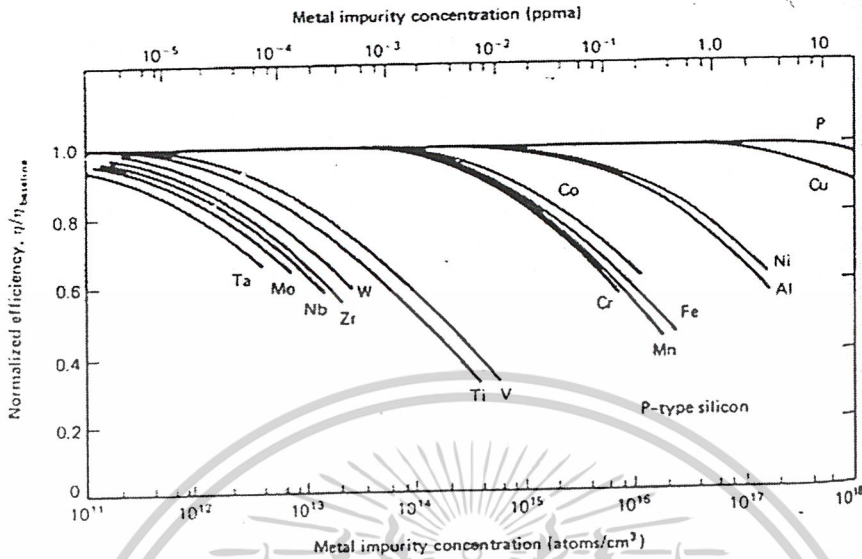
การสร้าง Solar-Grade Silicon (SoG-Si) สามารถทำได้โดยการใช้ MG-Si มาเป็นวัตถุดิบในการปลูกผลึกซิลิคอน ซึ่งซิลิคอนที่อยู่ในรูปของ MG-Si นี้จะมีความบริสุทธิ์ที่ประมาณ 99 % และยังมีอะตอมแปลกปลอมของสารอื่นดังแสดงได้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงความหนาแน่นของอะตอมแปลกปลอมใน Metallurgical-Grade Silicon

Impurity	Concentration range (parts per million, atomic)
Al	1500-4000
B	40-80
Cr	50-200
Fe	2000-3000
Mn	70-100
Ni	30-90
P	20-50
Ti	160-250
V	80-200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าอะตอม แพลกปลอมที่มีมาก ได้แก่ เหล็ก (Fe) และ อลูมิเนียม (Al) อย่างไรก็ตามการที่ซิลิคอนที่นำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์มีอะตอมอื่นปะปนอยู่ย่อมมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์อยู่บ้าง แต่นับว่าน้อยมาก ดังแสดงได้จากกราฟที่ 3.29



รูปที่ 3.29 แสดงผลกระทบของอะตอมแพลกปลอมเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

จากกราฟเราจะสังเกตเห็นได้ว่าอะตอมเจือปนของธาตุ (Ta, Mo, Nb, Zr, W) แม้จะมีความหนาแน่นของอะตอมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ก็สามารถทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงเป็นอย่างมาก แต่อะตอมเจือปนที่ได้แสดงในตารางที่ 3.4 เมื่อดูจากกราฟจะพบว่าอะตอมเหล่านั้น แม้จะมีอยู่บ้างในซิลิคอนก็ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงน้อยมาก แต่จากการใช้ Metallurgical-Grade Silicon (MG-Si) มาเป็นวัตถุดิบในการสร้าง Solar-Grade Silicon (SoG-Si) สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้มากทีเดียว

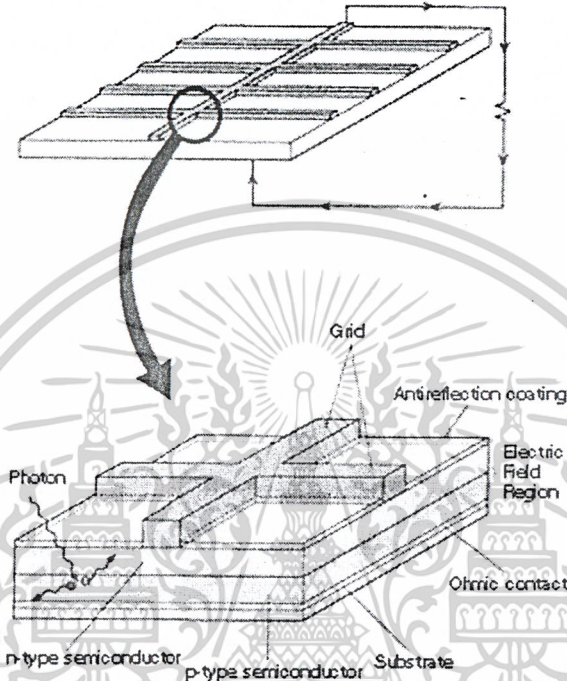
การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากการเลือกวัสดุที่ใช้ให้มีราคาต่ำแล้ว กระบวนการที่นำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีส่วนช่วยลดต้นทุนไม่น้อยทีเดียว ดังนั้น ในปัจจุบันจึงมีความพยายามในการวิจัย และพัฒนาเพื่อหากระบวนการมาตรฐาน ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด เช่น การลดกระบวนการที่มีต้นทุนสูงลง โดยหากระบวนการที่มีต้นทุนต่ำกว่าแล้วได้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันเข้ามาทดแทน

3.8 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้รับการพัฒนา และใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดนั้นเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบ ทั้งที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยว (single crystal) และผลึกหลายรูป (polycrystal) และปัจจุบันนี้ได้มีการค้นคว้าเป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) แต่ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานยังไม่สูงมากนัก

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสามารถในการแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ถ้าหากต่อให้ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครบวงจรแล้วก็ยอมที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหล ได้ เพื่อที่จะให้กระแสที่ไหลนั้นมีปริมาณมากพอที่จะใช้งานได้นั้น พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นจะต้องมีขนาดใหญ่ และรับแสงได้มากที่สุด จากที่กล่าวไปข้างแล้วจะเห็นได้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์นั้น ทางหนึ่งที่ได้รับการพัฒนา ก็คือ การทำให้แสงที่ตกกระทบนั้นสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด หรือทำให้มีการสะท้อนของแสงน้อยที่สุด จึงมีการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงที่เรียกกันว่า “ชั้นลดการสะท้อน” โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไปสามารถแสดง ได้ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.302 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไป

(Anti-reflection) ชั้นลดการสะท้อนนี้ ทำโดยใช้สารโปร่งแสงชนิดต่างๆ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นต้น การใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน เป็นกระบวนการที่ประหยัดที่สุดที่ได้โดยสะดวก จึงใช้กันกว้างขวาง เพื่อให้รอยต่อได้รับพลังงานมากที่สุด รอยตอดังกล่าวจึงจำเป็นต้องอยู่ใกล้ผิวหน้ามากที่สุดและในทางปฏิบัติแล้วมักจะสร้างรอยต่อให้ลึกน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ($1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}$ เมตร หรือ = 1 ในล้านเมตร)

แผ่นผลึกซิลิคอนที่สามารถจะสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดั่งนั้น ทัวไปแล้วจะต้องมีพิถกความต้านทานที่ต่ำกว่า 1 โอห์ม-ซม. และมีความหนาอยู่ในช่วง 200-400 ไมครอน ผิวของแผ่นผลึกโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอยู่บนชนิดพี หรือสารกึ่งตัวนำชนิดพีอยู่บนชนิดเอ็นก็ได้ แล้วแต่แผ่นผลึกเริ่มต้น เพราะผลึกที่ทำจำหน่ายจากโรงงานนั้น มีเพียงชนิดเอ็นหรือชนิดพี ผู้สร้างจะต้องสร้างชั้นที่เหลือเอาเอง เพราะคุณสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำของซิลิคอนบริสุทธิ์ จะมีความนำไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย การเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่นๆ ลงไปแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ความนำไฟฟ้าเปลี่ยนไปได้มาก และเช่นเดียวกัน การที่จะทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือเป็นชนิดพีนั้น ก็แล้วแต่ว่าสารเจือที่เติมลงไปนั้นเป็นอะไร ในทางปฏิบัติแล้วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าสารเจือชนิดเอ็น มาจากกรูว์เติมอะตอมของธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 5 เช่น ฟอสฟอรัส, ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารหนู และพลวง เป็นต้น ส่วนสารกึ่งตัวนำ ชนิดพินัน ได้มาจากการเติมอะตอมของธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 เช่น โบรอน, แกลเลียม, อินเดียม และอะลูมิเนียม เป็นต้น การเติมอะตอมสารเจือ หรือการแพร่สารเจือ นั้น จะต้องทำที่อุณหภูมิสูง และถ้าหากไม่มีสารบางอย่างเคลือบ สารเจือก็จะแพร่เข้าไปในทุกส่วนของซิลิคอน การควบคุมไม่ให้อะตอมของสารเจือแพร่เข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการนั้น ทำได้โดยการสร้างชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์กั้นเอาไว้ ซึ่งการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ จะเรียกว่า การออกซิเดชัน ชั้นแรกสุดซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกสร้างขึ้นมารอบคลุมแผ่นผลึกซิลิคอนทั้งแผ่นก่อน จากนั้นโดยกระบวนการพิเศษ ที่เรียกว่า โฟโตลิโธกราฟี ซึ่งใช้สารไวแสงเคลือบ และถ่ายแบบลวดลาย แล้วทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ซึ่งเรียกว่า เปิดช่องออกไซด์ หรือ window ทำให้สารเจือแพร่เข้าไปตามช่องที่เปิดไว้ สารเจือที่เข้าไปก็จะทำให้เกิดรอยต่อขึ้น ประจุพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงก็จะวิ่งเข้าหาขั้วโลหะ ถ้าหากขั้วโลหะถูกสร้างไว้ห่างไกลมาก ประจุที่เกิดขึ้นเหล่านี้ บางครั้งอาจจะเดินทางไปถึงขั้วโลหะก็จะเกิดการรวมตัวและหายไป เมื่อเป็นเช่นนี้ เพื่อเป็นการรวบรวมให้ได้กระแสมากที่สุด จึงนิยมสร้างขั้วโลหะให้เป็นแถบเล็กๆ ทั่วไปบน ผิวหน้า เพราะถ้าหากเป็นแถบใหญ่ๆ แล้ว แม้จะรวบรวมกระแสได้ดี แต่ก็จะไปบังแสงทำให้กระแสที่เกิดขึ้น ไม่มีปริมาณมากพอ หลังจากที่แพร่สารเจือและจับลึกแล้ว ก็จะเปิดช่องของซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำลวดลายขั้วโลหะ (contact grid) ทางด้านหน้า ส่วนทางด้านหลังก็จะใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบไว้ทิ้งไป ทำการเคลือบอะลูมิเนียมทั้งด้านหน้า และด้านหลังด้วยวิธีการระเหยสารในสุญญากาศ เมื่อผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแล้ว ก็จะได้ลวดลายอะลูมิเนียมขั้วสัมผัส ตามที่ออกแบบไว้แต่แรก เพื่อให้อะลูมิเนียมที่สร้างขึ้น มีการสัมผัสกับซิลิคอนในลักษณะอัลลอยด์ จึงต้องนำเข้าเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 500°C ในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น 10 นาที เรียกว่า การแอนนีส (anneal) เนื่องจากขั้วสัมผัสซึ่งเป็นโลหะอะลูมิเนียมนั้น แม้จะนำไฟฟ้าได้แต่ก็ไม่สามารถจะใช้ตะกั่วในการบัดกรีเพื่อต่อสายออกมาใช้งานได้ จึงต้องมีการสร้างชั้นของนิเกิลเคลือบไปบนชั้นอะลูมิเนียมด้วยขบวนการเคมี และไม่ใช้ไฟฟ้า (เรียกว่า electroless plating) เซลล์ที่สร้างได้นับว่าเสร็จสมบูรณ์ แต่ในการใช้งานนั้นอาจจะไม่สะดวกนัก หลังจากนั้นจึงมีการเก็บบรรจุในลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวๆ หรือเป็นแผงเซลล์ก็ได้ เซลล์แสงอาทิตย์นั้นปกติแล้ว ต่อ 1 เซลล์จะมีแรงดันประมาณ 0.5 โวลต์ ส่วนกระแสก็จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของเซลล์ การต่อเซลล์เป็นแผงนั้นก็จะมีทั้งการต่อขนาน หรืออนุกรม ก็ได้แล้วแต่จะต้องการกระแส หรือแรงดันขนาดไหน

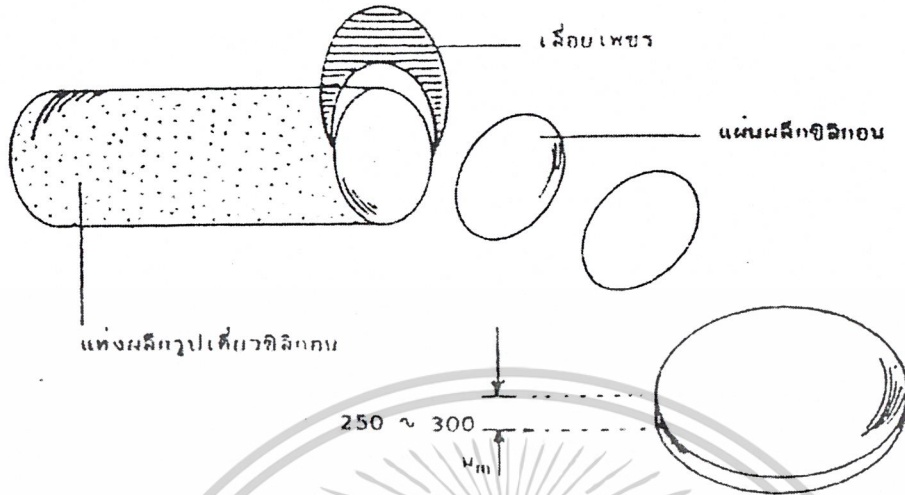
เทคโนโลยีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

การเตรียมแผ่นผลึก

เมื่อได้แท่งผลึกรูปเดี่ยว ซึ่งเรียกว่า อินกอต (ingot) แล้ว นำแท่งผลึกรูปเดี่ยวไปตัดเป็นแผ่นผลึกบางๆ (crystal wafer) ด้วยใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษ (inside diameter) ดังแสดงในรูปที่ 3.34 ใบเลื่อยดังกล่าวนี้จะมีลักษณะเป็นวงแหวน และมีความคมอยู่ในวงชั้นใน โดยที่ใบเลื่อยจะถูกฉาบไว้ด้วยผงเพชร (diamond powder) ในการตัดผลึกจะต้องตัดให้ถูกระนาบ หรือแนวผลึก เพื่อให้มี

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

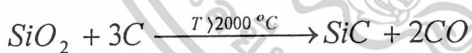
ความคมพอที่จะตัดเนื้อซิลิกอนซึ่งแข็งมากได้ เมื่อตัดเสร็จแล้วจะปรากฏรอยคมของเลื่อยขึ้นที่ผิวทั้งสองด้านของแผ่นผลึก ซึ่งรอยนี้จะกำจัดให้หมดไปโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี ($\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{CH}_3\text{COOH}$) แล้วจึงนำแผ่นผลึกที่ได้นี้ไปทำความสะอาดและขัด (Lapping) ด้วยผงขัด



รูปที่ 3.31 ลักษณะของแผ่นผลึกรูปเดี่ยว ซึ่งพร้อมที่จะนำไปสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

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

1. ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นผงที่ใช้ขัดเพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกเรียบ ซึ่งพบโดย Edward G. Acheson ในปี 1891 ผงขัดชนิดนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างทราย (SiO_2) กับคาร์บอน (C) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 2000°C ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้า และได้ผงขัดที่มีคุณภาพไม่ดีไม่สามารถนำมาใช้ในการขัดได้ ปฏิกิริยาดังกล่าวมีสมการเคมีดังนี้



ในระหว่างที่ทรายและถ่าน (C) ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยากันในเตาไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูง จะใส่ จีเลื่อยเข้าไปเพื่อให้ส่วนผสมเกิดรูขึ้น และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นสามารถผ่านออกไปได้ จะได้ SiC

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

สำหรับผงขัด SiC ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมี 4 เกรดด้วยกัน ดังนี้คือ

1. เกรด 600 ผงขัดเกรดนี้จะหยาบ คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $28 \mu\text{m}$.
2. เกรด 1000 เม็ดผงขัดจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $16 \mu\text{m}$.
3. เกรด 2000 เป็นผงขัดที่ค่อนข้างละเอียด คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $7.9 \mu\text{m}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4000 เป็นผงขัด SiC ที่มีค่าละเอียดมากที่สุด คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง $3 \mu\text{m}$ ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.8.1 กรรมวิธีในการ 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

3.8.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดจนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ คุณสมบัติของแผ่นผลึกก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอันหนึ่ง กล่าวคือ จะต้องเป็นแผ่นผลึกรูปเดียว ซึ่งมีวิธีการปลูกผลึกดังกล่าวมาแล้ว ชนิดของสารเจือในแผ่นผลึก ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ความหนาของแผ่นผลึก และระนาบของแผ่นผลึก ในการวัดคุณสมบัติดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้ คือ

3.8.3 การวัดค่าพิถีความต้านทาน

นอกจากระนาบ และขนาดของแผ่นเวเฟอร์ที่ถูกกำหนดขึ้นมา ตั้งแต่กระบวนการผลิตแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำแล้ว ค่าพิถีความต้านทาน (Resistivity; ρ) ก็เช่นเดียวกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการเติมสารเจือ (Doping) จากโรงงาน ค่านี้เราต้องรู้ก่อนที่จะเริ่มกระบวนการสร้างขั้นอื่นๆ ต่อไป โดยทำการวัดจากอุปกรณ์ที่เรียกว่า "Four points probe" ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และสามารถวัดบนแผ่นผลึกได้เลย

อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลม และอาจมีสปริงช่วย ทำให้ปลายของเข็มถูกกด และสามารถสัมผัสกับระนาบผิวด้านหน้าที่ขจัดมันของชั้นสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้งสี่อยู่ห่างกันเป็นระยะ S เท่าๆ กัน ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไป $S = 0.5 - 1$ มิลลิเมตร

แสดงในรูปที่ 3.32 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสที่เข้าที่

เอกสารนี้แสดงในรูปที่ 3.32 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสที่เข้าที่

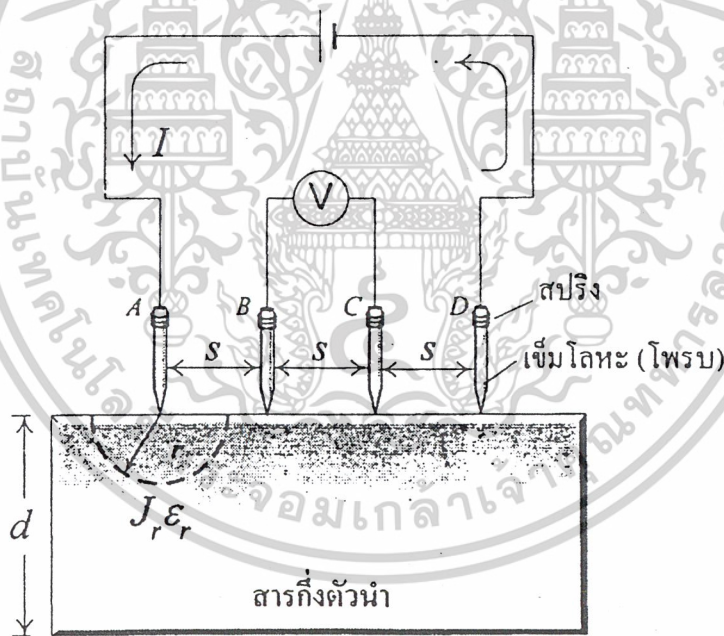
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข็มด้านนอกสุด คือ เข็ม A และ D ทำให้มี กระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารถึงตัวนำไปยัง เข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสาร และถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสที่ I และ แรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ในปัจจุบันเครื่อง Four points probe นี้ได้ ทำเป็นเครื่องวัดที่มีการแสดงผลเป็นระบบตัวเลข ซึ่งแค่ใส่แผ่นเวเฟอร์เข้าไป แล้วกดปุ่มก็สามารถ ทราบค่าสภาพต้านทานได้ทันที เนื่องจากสภาพความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นที่ถูกแพร่สารเจือด้วย แต่เนื่องจากชั้นที่ถูกแพร่สารเจือ นั้นมี ขนาดบางมากๆ ราว 1-3 ไมโครเมตร จึงไม่สะดวกที่จะนำไปใช้เพื่อคำนวณ และหาพารามิเตอร์ อื่นๆ ต่อ จึงนิยมที่จะบอก ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในอีกรูปแบบหนึ่งคือ “สภาพต้านทานแผ่น” (Sheet resistivity; ρ_s) มีหน่วยเป็น โอห์ม/□ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นที่ถูกแพร่สารเจือ สำหรับเครื่อง Four points probe ก็มีโหมดให้เลือกโดยถ้าจะวัดแบบ Resistivity ธรรมดาที่ใช้โหมด SLICE ถ้าต้องการวัด Sheet resistivity ก็ใช้โหมด SHEET โดย

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

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

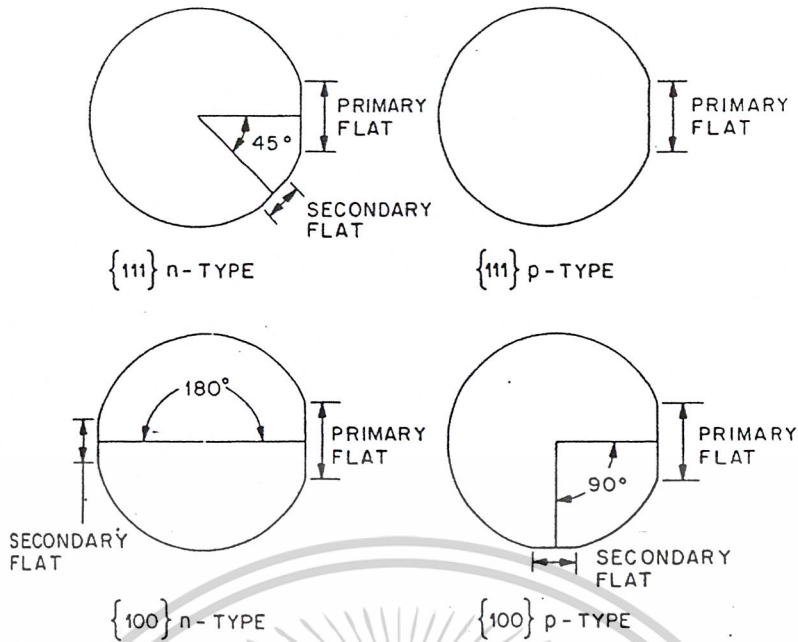
$$\rho_s = R_s \times \text{thickness}$$



รูปที่ 3.32 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ

ระนาบแต่ละแบบก็เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในแต่ละแบบ การเลือกระนาบของแผ่น ผลึกซิลิคอนให้เหมาะสมกับประเภทของการเคลื่อนที่ของประจุพาหะนั้น จะทำให้การเคลื่อนที่ของประจุพาหะ เป็นไปอย่างสะดวกให้ประสิทธิภาพสูงสุด และจะให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์อีกด้วย จะเห็น ดังแสดงในรูปที่ 3.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 Identifying flats on a silicon wafer.

3.8.4 การทำความสะอาดผิวหน้า

1. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

เริ่มจากการนำแผ่นเวเฟอร์ไปล้างกับน้ำปอดประจุ (Deionized water: DI) ด้วยเครื่อง Ultrasonic ซึ่งเป็นเครื่องสั่นอนุภาคของน้ำด้วยคลื่นเสียง เพื่อกำจัดสารพวกไขมันเป็นเวลา 2 นาที หรือจะเพิ่มสารเคมีจำพวก Alcohol, Acetone, Trichloethylene, 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 ก๊าซไนโตรเจนจะทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิคอน ได้ยากกว่าอากาศธรรมดา

2. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

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

3. การ Slice etching

ถึงแม้แผ่นเวเฟอร์จะสะอาดจากสิ่งเจือปนแล้ว แต่แผ่นเวเฟอร์เองจะมีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมาก แต่เพื่อความเที่ยงตรงในกระบวนการสร้างจึงต้องกำจัดชั้นออกไซด์ต่างๆ นี้ออกไป โดยจุ่มลงในสารละลาย HF 5% 10

วินาที แล้วจุ่มในน้ำ DI. อีก 2 บีกเกอร์ และเป่าแห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

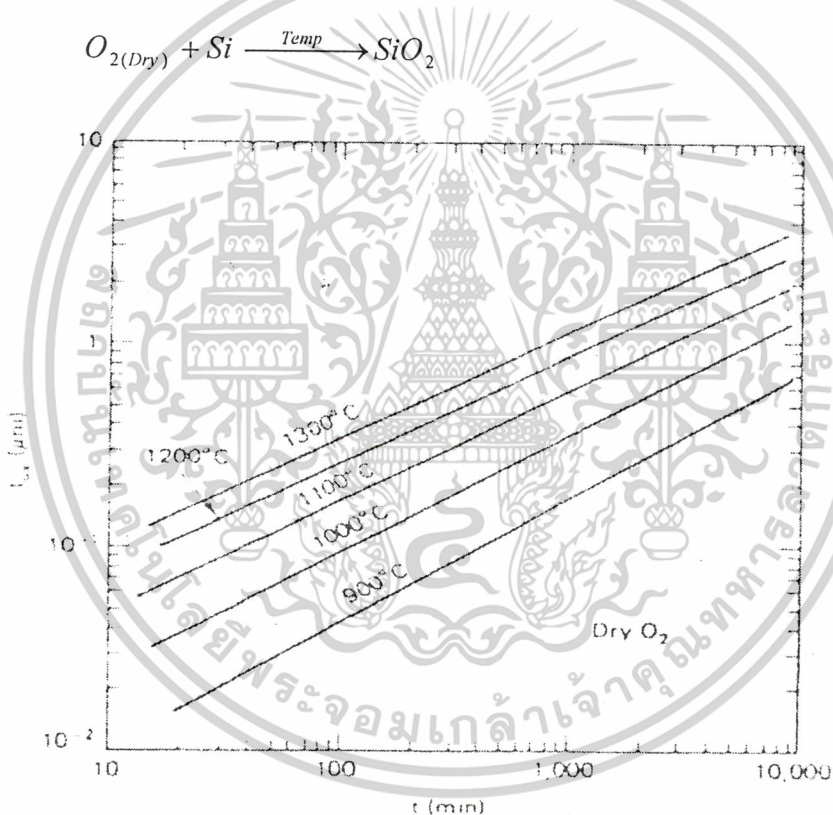
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

เป็นการสร้างชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นบนผิวของแผ่นซิลิคอน เพื่อใช้ป้องกันไม่ให้อากาศเจือปนเข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการขณะที่ทำการแพร่สารเจือ เพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น กระบวนการออกซิเดชันที่นิยมทำกันมี 3 วิธี คือ

3.9.1 Thermal Oxidation เป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่ง Thermal Oxidation ยังแบ่งออกได้อีกเป็น 2 วิธี คือ

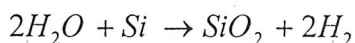
1. Dry Oxidation อุปกรณ์ที่ใช้แสดงได้ดังรูปที่ 3.37 โดยการนำแผ่นผลึกเข้าไปวางในท่อควอตซ์ที่อุณหภูมิ 800-1,200°C และมีก๊าซออกซิเจนไหลผ่านด้วย ซิลิคอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ปกคลุมผิวของแผ่นผลึก ขั้นตอนนี้แสดงได้ดังสมการ



รูปที่ 3.34 ความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ โดยวิธี Dry Oxidation

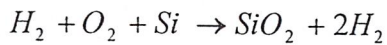
2. Wet Oxidation กรรมวิธีเหมือน Dry Oxidation แต่เพิ่มความชื้นจากน้ำเข้าไปเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น ซึ่งทำได้ 3 วิธี

(ก) Stream System เป็นการเพิ่มไอน้ำเข้าไปในกระบวนการ โดยคัมน์น้ำให้ได้อุณหภูมิประมาณ 90°C จะได้ไอน้ำแล้วปล่อยให้ผ่านท่อควอตซ์ในขณะที่ออกซิเดชัน ดังรูปที่ 3.38 ขั้นตอนนี้แสดงได้ดังสมการ



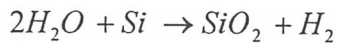
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) Torch System (Burn Hydrogen) ใช้ การปล่อยก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนเข้ารวมตัวกัน(สันดาป) แล้วจึงไปทำปฏิกิริยากับผิวแผ่นซิลิคอน แสดงได้ดังสมการ

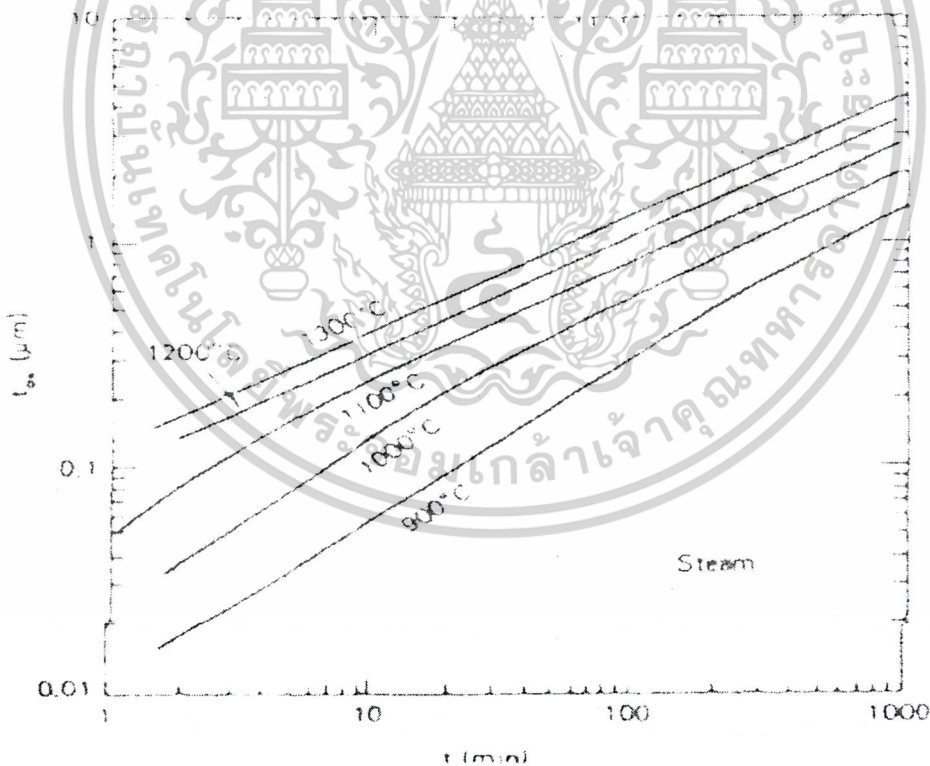


วิธีนี้ต้องควบคุมปริมาณก๊าซไฮโดรเจนให้ดี ถ้ามากเกินไปอาจเกิดการระเบิดได้

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



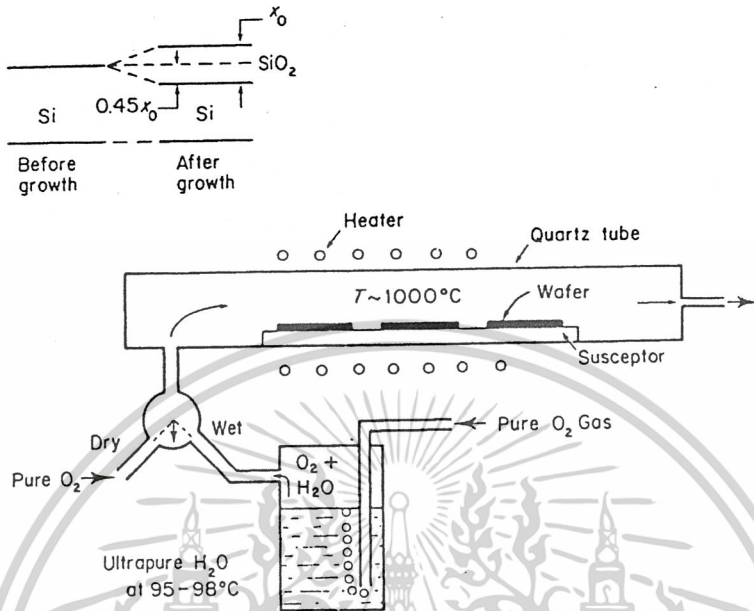
อัตราการเกิดชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการ Thermal Oxidation ในช่วงแรกจะแปรผันตรงกับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้น อัตราการเกิดจะช้าลงโดยจะแปรผันตรงกับรากที่สองของเวลาแทน และโดยเฉลี่ยในความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น 54% จะเกิดขึ้นเหนือระดับผิวของแผ่นซิลิคอน ส่วนอีก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



รูปที่ 3.35 ความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ โดยวิธี Wet Oxidation

กระบวนการ Wet Oxidation จะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ได้หนากว่าวิธี Dry Oxidation เมื่อใช้เวลาเท่ากัน เพราะโมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นแอกทีฟออกซิเจนกับก๊าซไฮโดรเจน ทำให้อะตอมซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่คุณภาพที่ได้จาก Wet Oxidation จะดีน้อยกว่า คือ จะเกิดไม่ทั่วกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างในชั้นออกไซด์มากกว่าวิธี Dry Oxidation ซึ่งจะกระทบต่อกระบวนการสร้างในขั้นต่อไปด้วย เช่น ยากในการควบคุมความลึกในการแพร่สารเจือ ฯลฯ จึงมักใช้การออกซิเดชันแบบ Dry Oxidation ในขั้นส่วนที่สำคัญ เช่น เกท ในการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ และใช้สร้างแบบสลับชั้น Wet-Dry ในขั้นส่วนอื่นๆ



รูปที่ 3.36 เครื่องมือการออกซิเดชัน แบบ Thermal Oxidation

3.9.2 Chemical Vapor Deposition Oxidation (CVD) เป็นกรรมวิธีการสร้างชั้นออกไซด์ด้วยสารเคมี แสดงได้ดังสมการ



หรือ



กรรมวิธีนี้ สารตั้งต้นที่ใช้หายาก มีราคาแพง และยังเป็นก๊าซที่อันตรายอีกด้วย

3.9.3 Spottering

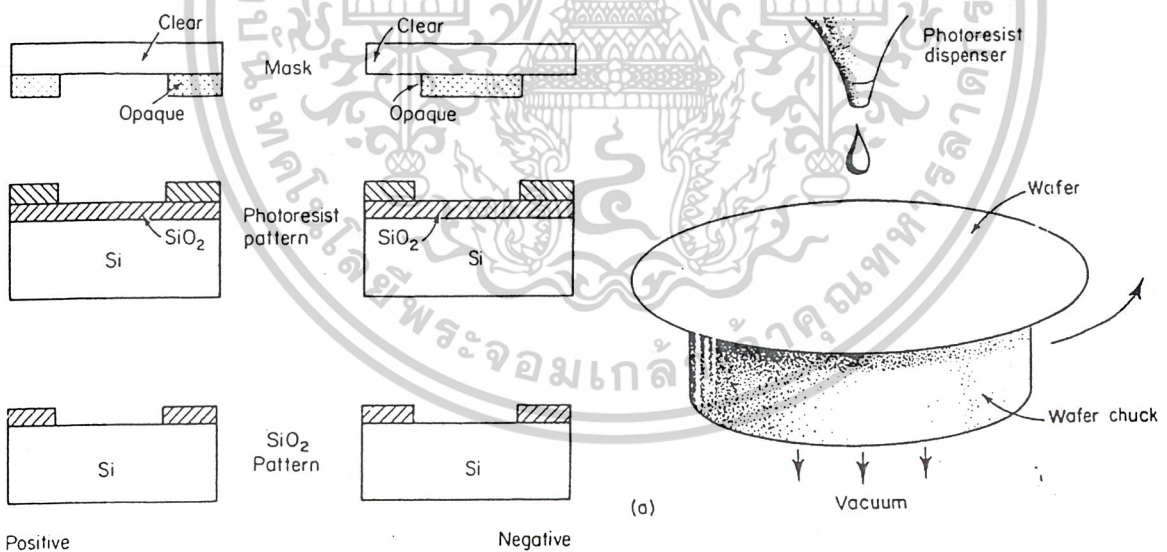
เป็นการนำแผ่น SiO₂ มาติดไว้ทางขั้วไฟฟ้าแคโทดซึ่งเป็นเป้า (Target) ส่วนด้านแอนโนดติดแผ่นซิลิคอนที่ต้องการให้เกิดชั้นออกไซด์ แล้วผ่านสนามไฟฟ้าประมาณ 100,000 โวลท์ ขณะเดียวกันก็ปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar) หรือ ก๊าซไนโตรเจน (N₂) เข้าไปในระบบ สนามไฟฟ้าแรงสูงจะทำให้ก๊าซแตกตัวเป็น Ar⁺ หรือ N⁺ แล้ววิ่งเข้าชนเป้า SiO₂ เป้า SiO₂ ที่ถูกชนจะกร่อนลงแล้วตกมารวมตัวกับแผ่นซิลิคอนด้านแอนโนดเกิดเป็นชั้น SiO₂ ขึ้น

3.10 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

เมื่อเราได้ชั้นออกไซด์เรียบร้อยแล้ว ขั้นต่อไปก็เป็นการสกัดหรือเปิดช่องของชั้นออกไซด์ออกในบริเวณที่เราต้องการให้สารเจือแพร่ลงไป กระบวนการนี้นับเป็นหัวใจของกระบวนการสร้างเลยก็ว่าได้ ขั้นตอนนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “โฟโตเอตชิง (Photo-etching)” ซึ่งกรรมวิธีต่างๆมีดังต่อไปนี้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มจากการอบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นหยดน้ำยาไวแสง (Photoresist) ซึ่งมีทั้งชนิดลบ (Way coat) หรือชนิดบวก (AZ) ลงบนชั้นออกไซด์ ปั่นด้วย High speed spinner เพื่อให้ น้ำยากระจาย เป็นฟิล์มบางและสม่ำเสมอทั่วแผ่น อบแผ่นอีกครั้ง (อบฟิล์ม) แล้วจึงนำไปฉายแสง โดยมีโฟโตมาสก์บัง อยู่อีกชั้นหนึ่ง ถ้าเป็นการฉายแสงตั้งแต่มาสก์ที่ 2 ขึ้นไป การปรับให้ตรงกับมาสก์ชั้นก่อนๆ เป็นเรื่องที่สำคัญมาก ต้องมีการปรับมาสก์ (Alignment) ผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งต้องใช้การฝึกฝนพอสมควร ขั้นตอนต่อมาคือ การนำไปล้าง (Development) ด้วยสารเคมีต่างๆ ซึ่งถ้า น้ำยาไวแสงเป็นชนิดลบ ส่วนของ น้ำยาไวแสงที่โดนแสงจะยึดติดกับผิวออกไซด์เมื่อนำไปล้าง แต่ถ้า น้ำยาไวแสงเป็นชนิดบวก ส่วนของ น้ำยาไวแสงที่ไม่โดนแสงจะยึดติดกับผิวออกไซด์เมื่อนำไปล้าง ดังนั้น การจะเลือกชนิดของน้ำยาไวแสง ที่ใช้งาน ก็ควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของงานที่นำไปใช้ด้วย

เคลือบฟิล์มด้านหลังของแผ่นเพื่อป้องกันชั้นออกไซด์ด้านหลังถูกทำลาย และไม่ให้มีการทำปฏิกิริยากับสารอื่น อบฟิล์ม แล้วนำไปสกัดชั้นออกไซด์ออก (Oxide etching) ด้วยสารละลาย Buffer จำพวก HF (กรดกัดแก้ว) หรือ H_3PO_4 ออกไซด์ส่วนที่ถูกฟิล์มยึดเกาะเอาไว้จะไม่ถูกกัดออกไป ส่วนที่เหลือก็จะถูกกัดออกไปโดยอัตราส่วนการกัดชั้นออกไซด์ (Oxide rate) มีค่าประมาณ 0.1 ไมโครเมตรต่อ นาที ภาชนะที่ใช้ต้องทำจาก “เทฟลอน” ซึ่งทนต่อสารละลายพวกนี้ เมื่อชั้นออกไซด์ถูกกัดจนเป็นที่ต้องการแล้ว ก็ต้องลอกฟิล์มออก โดยนำไปต้มกับกรด H_2SO_4 และต้มต่อในน้ำ DI เป็นขั้นตอน สุดท้ายขั้นตอนทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.39 และตัวอย่างมาสก์แสดงดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.37 น้ำยาไวแสงชนิดบวก และชนิดลบ

รูปที่ 3.38 อุปกรณ์ที่ทำให้น้ำยาไวแสงกระจาย
สม่ำเสมอ (Photoresist spinner)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 การกัดซิลิกอนแบบแอนไอโซโทรปิก

3.11.1. ปฏิบัติการกัดซิลิกอน

สารเคมีที่ใช้กัดซิลิกอนได้มีมากมาย แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยด่างผสมกับน้ำ อาทิเช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดอามีน (Ethylenediamine), ไฮดราซีน (Hydrazine), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), และที่เป็นการกัดด้วยวิธีการพลาสมา ซึ่งใช้ ก๊าซ CF_4 , SF_6 , CL_2 และก๊าซฮาโล-หรือฟลูออโรคาร์บอนอื่นๆ ตัวกัดเหล่านี้มีทั้งที่มีคุณสมบัติไอโซโทรปิก (isotropic etching) หรือแอนไอโซโทรปิก (anisotropic etching) อัตราการกัดอาจจะขึ้นกับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิสารละลาย ตัวกัดเหล่านี้ต่างกันได้ไม่เท่ากันดังนั้นการเลือกป้องกันการกัดที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นด้วยเช่นกัน

สารละลายที่สำคัญที่มีรายงานกันส่วนมากคือ สารละลาย Ethylenediamine ผสม Pyrocatechol ในน้ำ Deionization หรือใช้ชื่อย่อว่า EDP ซึ่งมีข้อดีหลายประการ

1. เป็นตัวกัดประเภทแอนไอโซโทรปิก
2. เป็นตัวกัดที่มีการเลือกพื้นที่การกัด (selective etching) เค้นชัดที่สุด
3. อัตราการกัดขึ้นกับความเข้มข้น ซึ่งอัตราการกัดเกือบเท่ากับ 0 ถ้าความเข้มข้นของสารเจือปนสูง

อีกชนิดคือ สารละลาย KOH ที่ผสม Isopropyl alcohol ซึ่งเป็นตัวกัดที่ขึ้นอยู่กับทิศทางและระนาบและมีความแตกต่างของอัตราการกัดระนาบ (100) ต่อระนาบ (111) สูงที่สุด และเกิด undercutting ได้ชั้นออกไซด์ต่ำที่สุด แต่ก็มีจุดด้อย เนื่องจาก KOH นั้นกัดซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยอัตราที่สูง จึงทำให้การกัดด้วย KOH ต้องอาศัยหน้ากากป้องกันแบบอื่นเช่น Si_3N_4

และสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) กรดไนตริก (Nitric acid) กรดอะซิติก (Acetic acid) หรือเรียกว่า HNA ซึ่งเป็นสารละลายประเภทไอโซโทรปิก อัตราการกัดมีความแปรผันเป็นอย่างมากและยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือ อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันจะให้อัตราการกัดที่เปลี่ยนแปลงมาก หน้ากากสำหรับกรด HNA นั้น SiO_2 หรือ Si_3N_4 ไม่สามารถป้องกันการกัดได้ในระยะยาว

กลไกการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกในสารละลาย KOH

สำหรับกลไกการกัดแบบ แอนไอโซโทรปิกในสารละลาย KOH เชื่อว่ามีกลไกดังต่อไปนี้

1. อนุมูลไฮดรอกซิลจะเข้าจับแขนว่าง (dangling bond) ของซิลิกอน สำหรับแขนยื่นของซิลิกอนในระนาบ(100) มีสองแขน ในขณะที่ซิลิกอนระนาบ(111) มีเพียงแขนเดียว ขั้นตอนนี้ใช้พลังงาน ไอออนไนเซชันเพียง 0.35 อิเล็กตรอน โวลต์ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็ว

2. พันธะซิลิกอนหลัก(back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ(100) และเท่ากับ 3 ระนาบ(111) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น $Si(OH)_2$ หรือ $SiOH^+$ (เรียกอนุมูลซิลิกอนไฮดรอกไซด์) ปฏิปักษ์นี้ทำให้พลังงานแก่ผลึกต่างกัน อัตราส่วนการกัดของระนาบต่างๆจะ

เอตารนบ้นนอกร่างหลังการไหลสารละลายการกัดในโพรงการกัดจะเท่ากัน เมื่ออยู่ใต้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เท่ากันที่อุณหภูมิใกล้กับจุดเดือดอัตราการระเหย (110) : (100) : (111) เท่ากับ 160 : 100 : 1 และที่อุณหภูมิต่ำ จะเป็น 50 : 30 : 1

3. ซิลิกอนไดออกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย

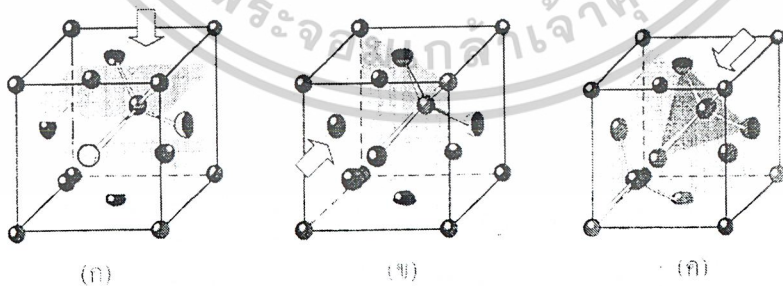
4. กรด Orthosilic acid แยกตัวรวมกับน้ำ เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน

3.11.2. โครงสร้างอะตอมซิลิกอน

ในระนาบต่างๆของซิลิกอนจะมีจำนวนพันธะที่ถูกตัดออกไปก่อนหน้า(เหลือเป็นแขนยื่น) จำนวนพันธะที่กำลังถูกกัด และจำนวนพันธะที่จะถูกดึงออกสู่สารละลายเป็นขั้นต่อไปไม่เท่ากัน กล่าวคือ

1. ระนาบ(100) อะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่จะดึงอะตอมออกจากผิวหน้าต้องทำลายพันธะถึงสองพันธะ
2. ระนาบ (111) ที่ผิวหน้ามีอะตอม 3 ตัว และหนึ่งอะตอมจะถูกกัดไปก่อนหน้านี้ จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด
3. ระนาบ(110) ที่ผิวหน้ามีอะตอม 3 ตัว และหนึ่งอะตอมอยู่ใต้ผิวหน้า และหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า แม้ว่าจะมีสองอะตอมที่มีพันธะร่วมกับอะตอมที่อยู่ตรงกลางที่ผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่อยู่ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดออกไปพร้อมกัน ระนาบ(110)จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงน้อยกว่าระนาบที่(100) หรือ (111)

รูปที่ 1 เป็นจำนวนพันธะในแต่ละระนาบของซิลิกอน ซึ่งแบ่งความใกล้เคียงจากสารละลายสามระดับ อะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า อะตอมที่กำลังจะถูกกัด และอะตอมที่จะถูกกัดเป็นอันดับต่อไป



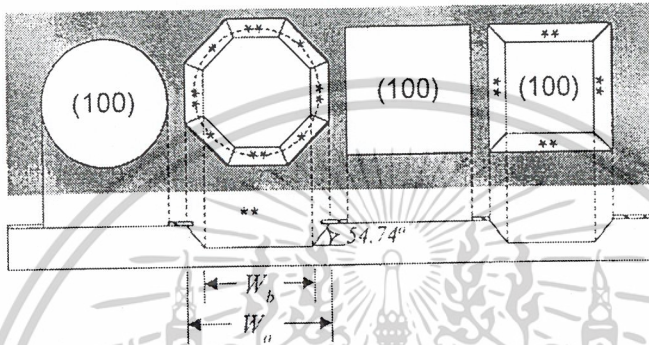
รูปที่ 3.11. 1 พันธะในอะตอมซิลิกอนระนาบต่างๆของซิลิกอน (ก) (100), (ข) (110), (ค) (111)
(ลูกศรหมายถึงทิศทางการเข้าไปกัดของสารละลายแอนไอโซโทรปิก)

เนื่องจากการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกนั้นจะเป็นปรากฏการณ์เลือกกัด ดังนั้นร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นรูปเรขาคณิตที่แน่นอน ในตารางที่ 1 เป็นความสัมพันธ์ของมุมระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกนั้นจะเป็นปรากฏการเลือกกัด ดังนั้นร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นรูปเรขาคณิตที่แน่นอน ในตารางที่ 1 เป็นความสัมพันธ์ของมุมระหว่างระนาบ {HKL} และระนาบ {hkl} ซึ่งเป็นตารางที่ตรวจสอบได้ว่า ระนาบที่เหลือจากการควรรเป็นระนาบใด

การวางบริเวณเลือกกัดเมื่อเปรียบเทียบทิศทางหนึ่งๆเป็นสิ่งกำหนดรูปร่างเลขาคณิตของหลุมที่เกิดจากการกัด

* = (100)
** = (111)

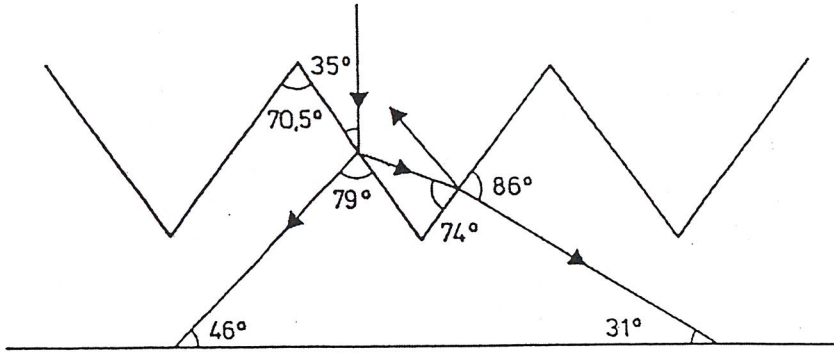


รูปที่ 3.11.2 การกัดซึลิกอนระนาบ (100) ด้วยสารละลายKOH

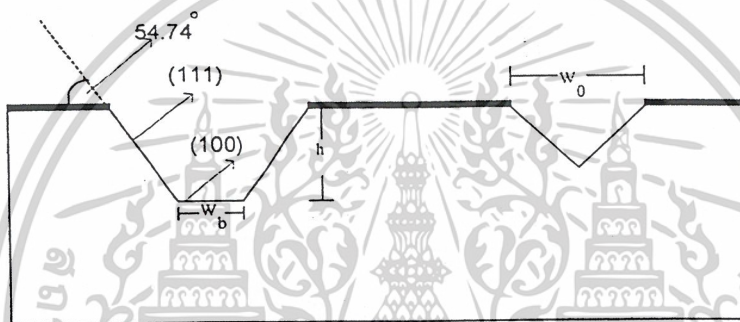
หลุมที่เกิดขึ้นจากการกัดเมื่อเปิดช่องเลือกกัดบนระนาบผลึกที่ไม่เหมือนกัน จะมีความแตกต่างกัน แต่ผนังที่เกิดขึ้นก็คือระนาบที่มีอัตราการเกิดช้าสุด สำหรับแผ่นซึลิกอนระนาบ (100) ถ้าเปิดช่องเลือกกัดเป็นวงกลม หลุมที่เกิดจะประกอบด้วยผนังแปดด้าน ผนังสี่เหลี่ยมด้านเอียงทำมุม 54.74 องศา ขนานกับพื้นระนาบ(100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทาง <110> จากตารางที่ 1 พบว่าระนาบนั้นคือระนาบ (111) และยังมีระนาบ (100) ร่วมประกอบผนังดังรูปที่ 3 จะได้ผนังสี่ด้านเป็นระนาบ (100) และ ระนาบ(111) จะพบว่าถ้าปากหลุมเปิดกว้างเท่ากับ W_0 และทำการกัดจนได้ความลึกเท่ากับ h จะได้ขนาดของความกว้างกันหลุม W_b ดังนี้

$$W_0 = W_b + 2h/\tan(54.74^\circ) \cong W_b + \sqrt{2} \times h ; h = tR \quad (1)$$

เมื่อ R เป็นอัตราการกัดในแนวตั้ง และ t เป็นเวลาในการกัด



รูปที่ 3.11.3 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผิวแบบพีระมิด



รูปที่ 3.11.4 แสดงการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกในซิลิคอนระนาบ(100)

ถ้าด้านบริเวณเล็อกกัดไม่ขนานกับทิศทาง $\langle 110 \rangle$ หรือ แผ่นผลึกเริ่มต้นไม่ใช่ระนาบ (100) โดยแท้จริง ข้อจำกัดในการออกแบบอาจจะมีปัญหาหลายปัจจัย ต่อไปนี้

1. ขนาดของก้นหลุมหรือปากหลุมจะต่างจากที่คำนวณ
2. รูปทรงจะผิดแปลกไปจากเดิมดังรูป 5 ดังต่อไปนี้
3. ผนังทั้งสี่ด้านจะไม่ปรากฏว่าเป็นระนาบ (111) อย่างแท้จริงการปรากฏระนาบต่างๆ

เสริมขึ้นมาจะทำให้ผนังไม่เรียบ

การควบคุมคุณภาพงานของการกัดควรคำนึงถึงเงื่อนไขต่างๆดังต่อไปนี้

1. แผ่นผลึกเริ่มต้นควรไร้จุดเสียในระดับอะตอม การเลื่อนของระนาบทำให้เกิดรูพรุนซึ่งตรวจพบโดยการกัดตรวจสอบด้วยสารละลายแอนไอโซโทรปิก
2. แผ่นผลึกเริ่มต้นควรถูกต้องตามดัชนีบ่งบอกควรมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 องศา
3. ผิวเริ่มต้นควรเป็นผิวเรียบแบบแบบกระจก เนื่องจากผิวขรุขระจะประกอบด้วยระนาบที่หลากหลาย และเป็นผลให้ผิวที่กัดเกิดความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สารละลายควรจะกระจายความเข้มข้นอย่างทั่วถึง สามารถเพิ่ม โดยการกวน หรือโดยการพ่นสารเคมีผ่านปั๊ม และควรรักษาความเข้มข้นของสารละลายให้คงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้างและการออกแบบเซลล์

ตัดซิลิกอนเวเฟอร์

- เตรียมซิลิกอนเวเฟอร์วางบนกระดาษสะอาด เช่น Filter Paper
- ใช้ปากกาหัวเพชรตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ โดยกรีดลงบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ครั้งเดียวหรือน้อยครั้งที่สุดไปทางเดียว ควรระมัดระวังไม่ให้หัวเพชรไปกระทบกับวัตถุอื่น เช่น ฟันโต๊ะ
- ทำการ Break แผ่นตามรอยที่กรีดไว้

การทำความสะอาดผิวหน้า

4.2.1 นำแผ่นซิลิกอนไปต้มในกรด HNO_3 ในบีกเกอร์ เพื่อกำจัดเศษโลหะ โดยจะแบ่งต้มเป็น 2 บีกเกอร์ บีกเกอร์ละ 5 นาที เพื่อความสะดวก จากนั้นล้างน้ำ DI.

4.2.2 นำแผ่นซิลิกอนไปต้มในน้ำ DI. อีก 2 บีกเกอร์เช่นกัน บีกเกอร์ละ 5 นาที เพื่อกำจัดกรดล้างด้วยน้ำ DI. อีกครั้ง แล้วนำไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่ต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนก็เพราะ ก๊าซไนโตรเจนจะทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิกอนได้ยากกว่าอากาศธรรมดา

4.2.3 แผ่นซิลิกอนไปต้มใน Trichloroethylene เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสารจำพวกไขมัน

4.2.4 ล้าง Trichloroethylene ออกจากแผ่นซิลิกอนด้วย Acetone ด้วยเครื่อง Ultrasonic ซึ่งเป็นเครื่องสั่นอนุภาคของน้ำด้วยคลื่นเสียงเป็นเวลา 5 นาที

4.2.5 ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (Deionized water: DI) 2 ครั้ง แล้วนำไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

4.2.6 การ Slice etching

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

การกัดหลุมปิรามิดบนซิลิกอนระนาบ (100)

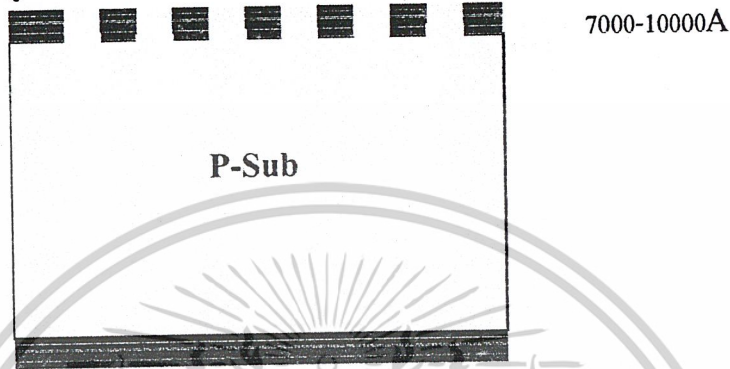
- นำแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดตามขั้นตอน ไปสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ให้ได้ความหนาประมาณ 7000-10000 อังสตรอม เพื่อเป็น Isolation Mask
- ทำเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี และ etching ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดช่องชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ส่วนที่ต้องการให้เกิดหลุมปิรามิด
- เตรียมสารละลาย KOH (KOH + น้ำ DI) เข้มข้น 4 โมลาร์
- ทำการอุ่นสารละลาย KOH ให้มีอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส และมีการกวน

สารละลายใช้ความเร็วรอบประมาณ 100 รอบ ต่อวินาที ประมาณ 60 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเปิดช่องชั้นออกไซด์ใส่ลงในสารละลายทิ้งไว้ตามเวลาที่ทฤษฎีได้กล่าวไว้ เพื่อให้ได้ก้อนหลุมเป็นยอดแหลม

- นำออกมาล้างน้ำ DI และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูว่าก้อนหลุมเป็นยอดแหลม และถ้าหากยังสามารถกัดต่อได้ หลังจากพบว่าก้อนหลุมเป็นยอดแหลม ก็นำไปล้างในน้ำ DI เด็ด 4 ครั้ง และล้างน้ำ DI อุณหภูมิห้องอีกครั้งหนึ่ง เพื่อกำจัด KOH

- หลังจากนั้นก็เข้าสู่กระบวนการการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป



รูปที่ 4.1.1 ใช้เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์เพื่อกัดหลุมปิรามิด



รูปที่ 4.1.2 กัดซิลิกอนโดยใช้สารละลาย KOH เป็นหลุมปิรามิด

4.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

4.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

ทำการออกซิเดชันด้วยความร้อน

โดยในการสร้างเซลล์นี้สร้างชั้นซิลิกอนออกไซด์ใช้อัตราส่วน

Dry : Wet : Dry = 1.5 : 1.5 : 1 ชั่วโมง

1. Dry Oxidation

Condition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิภายใน 1,050 องศาเซลเซียส

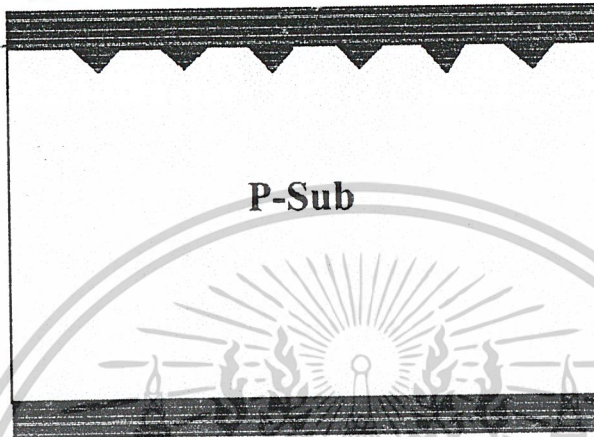
Flow Oxygen Gas 1,200 cm³ / min

2. Wet Oxidation

Condition

อุณหภูมิภายใน 1,050 องศาเซลเซียส

Flow Oxygen Gas 1,000 cm³ / min

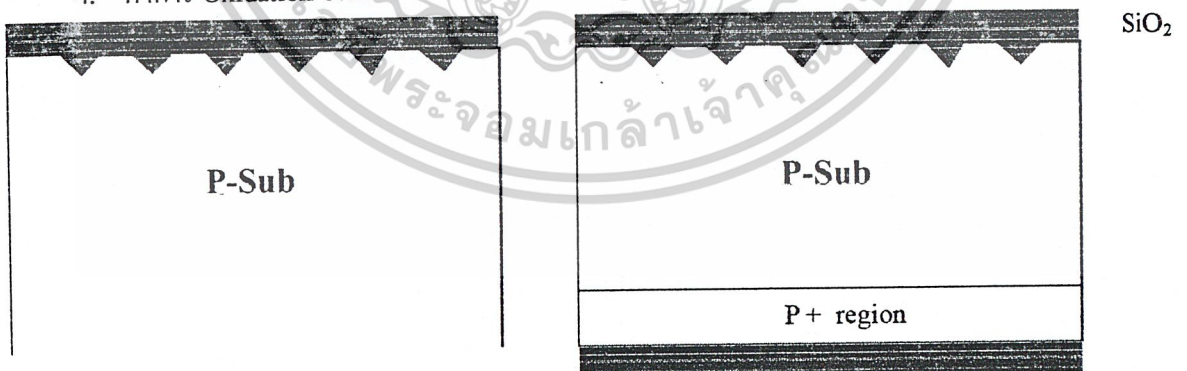


รูปที่ 4.1.3 ภาพตัดขวาง Silicon ผ่านการกัดหลุมปิรามิด นำไปสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

4.1.4 P-plus (P⁺) Fabrication

เพื่อเป็นการสร้าง Back Surface Field ให้กับเซลล์

1. กัด SiO₂ ที่ผิวด้านล่างออก โดยใช้สารละลาย HF (For Oxidation)
2. Pre deposition ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส โดยอะตอมสารเจือโบรอน
3. กัด Boron Glass ที่ผิวหน้าออก
4. ทำการ Oxidation อีกครั้ง



รูปที่ 4.1.4 ภาพตัดขวาง Silicon Substrate ผ่านกระบวนการ Fabrication โดยใช้โบรอนเป็นสารเจือ

4.1.5 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

1. เปิด Mask 1

- อบที่ 90 องศาเซลเซียส 30 นาที

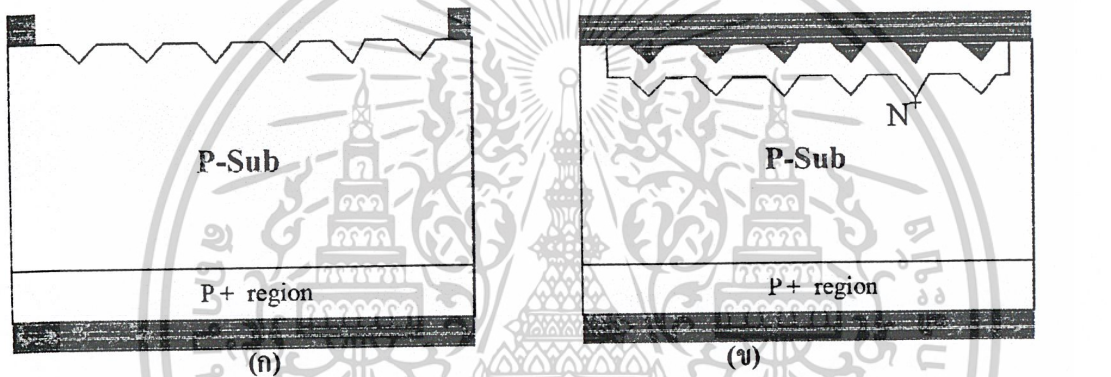
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำแผ่นซิลิกอนวางลงบนเครื่อง Spinor ใช้เครื่องสุญญากาศดูดอากาศยึดแผ่นซิลิกอนไว้ที่หัว Spinor

- หยคน้ำยาไวแสง AZ 1350 ลงบนแผ่นซิลิกอน ให้ทั่ว
- ทำการSpin 500 rpm 5 วินาที และ 3000 rpm 40 วินาที
- Pre-Bake แผ่นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง Ultraviolet ผ่านMask ลงบน แผ่นซิลิกอน ที่มีน้ำยาไวแสงเคลือบ
- ทำDevelopment
- อบทิ้งไว้ 30 นาทีเพื่อFix Pattern

2. Buffer for Oxidation

นำSilicon substrate ลงในสารละลาย Buffer for Oxidation เพื่อกัดชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าในส่วนที่ไม่มีฟิล์มกันออกไป



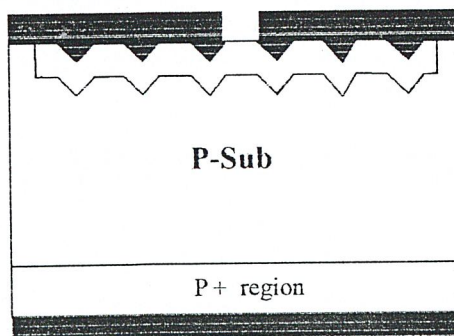
รูปที่ 4.1.5 ก. ภาพตัดขวางSilicon Substrate ทำกระบวนการโฟโวลติโกราฟีเปิด 1stMask เพื่อเปิดช่องออกไซด์
ข. ภาพตัดขวางSilicon substrate ทำกระบวนการ Fabrication โดยใช้ ฟอสฟอรัสเป็นสารเจือ

4.1.6 N-plus (N⁺) Fabrication

- ทำการ Slice SiO₂ โดย HF Buffer For Oxidation
- Pre deposition ที่ อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส โดย ฟอสฟอรัส
- Drive In

4.1.7 Photolithography

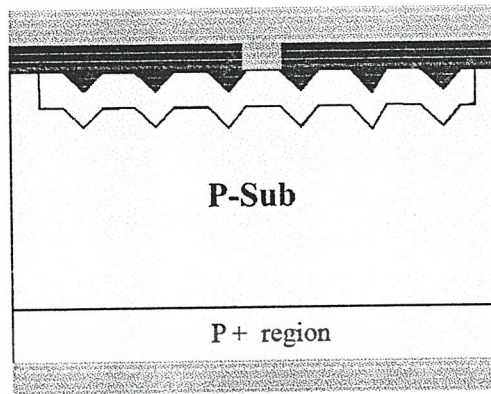
เปิด Mask contact window



รูปที่ 4.1.6 ภาพตัดขวางSilicon substrate เปิดMask เพื่อกัด SiO₂ เป็นcontact window ดังรูป
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.8 Evaporation เพื่อสร้าง Al Electrode

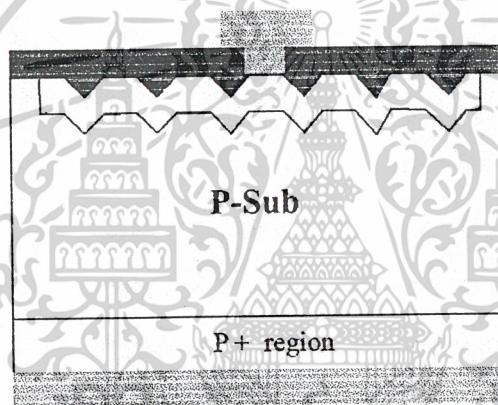
ความดันภายใน Chamber = 1×10^{-6} Torr



รูปที่ 4.1.7 ภาพตัดขวาง Silicon substrate ผ่านกระบวนการ Evaporation

4.1.9 Photolithography

เปิด Mask ลวดลาย Grid



รูปที่ 4.1.8 ภาพตัดขวาง Silicon substrate ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิด Mask แล้วทำการกัด Al ส่วนที่ไม่ต้องการออก

4.1.10 Sintering

ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

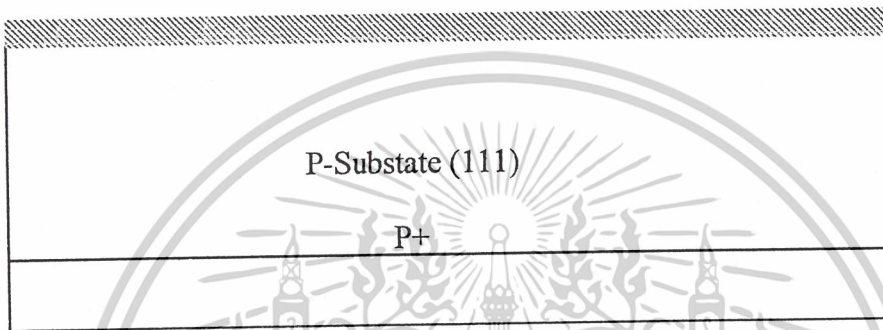
Flow Nitrogen Gas $1000 \text{ cm}^3/\text{min}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เพิ่มชั้นลดการสะท้อนแสงชนิดพอร์สซิลิคอน

- ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบ Dry - Wet - Dry เพื่อใช้ป้องกันการแพร่สารเจือด้านหน้า ใช้อุณหภูมิเตา $1,050^{\circ}\text{C}$, อุณหภูมิน้ำ 90°C โดยความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $8,000 \text{ \AA}$
- ทำการแพร่สารเจือด้านหลัง (Backsurface filed) ด้วยสารเจือชนิดพี โดยใช้เวลาต่างกัน คือ 4 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง และอีกเซลล์หนึ่งจะไม่มีทำการแพร่สารเจือด้านหลัง

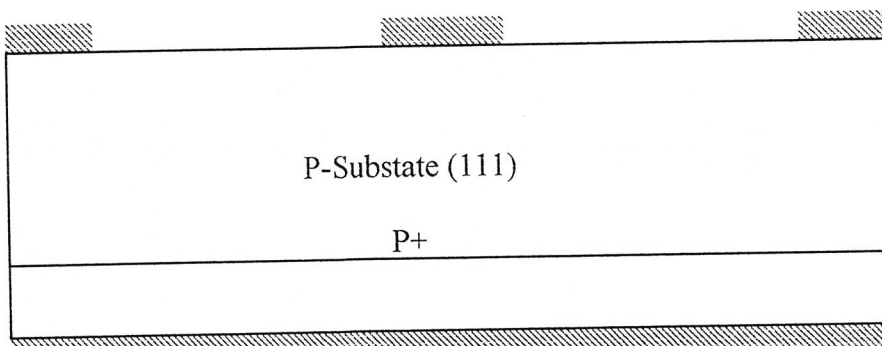
 SiO_2



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

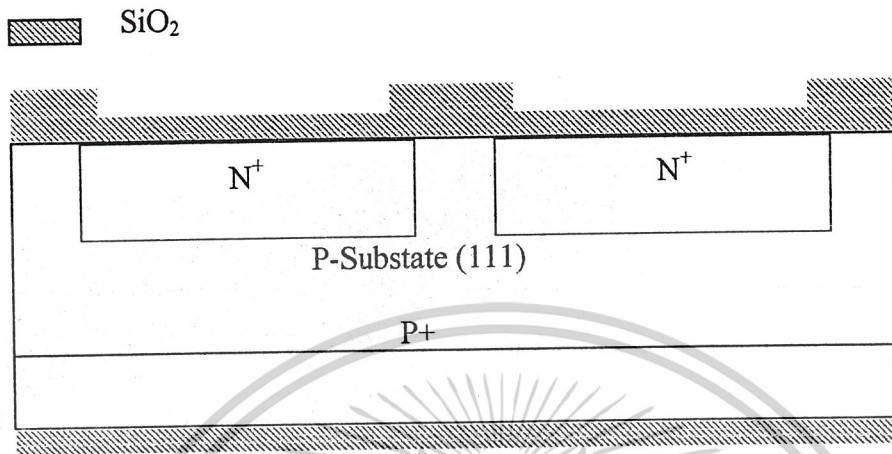
- ทำการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโวลิตโรกราฟี (Photolithography) โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออก และทำการลอกน้ำยาไวแสงออก

 SiO_2

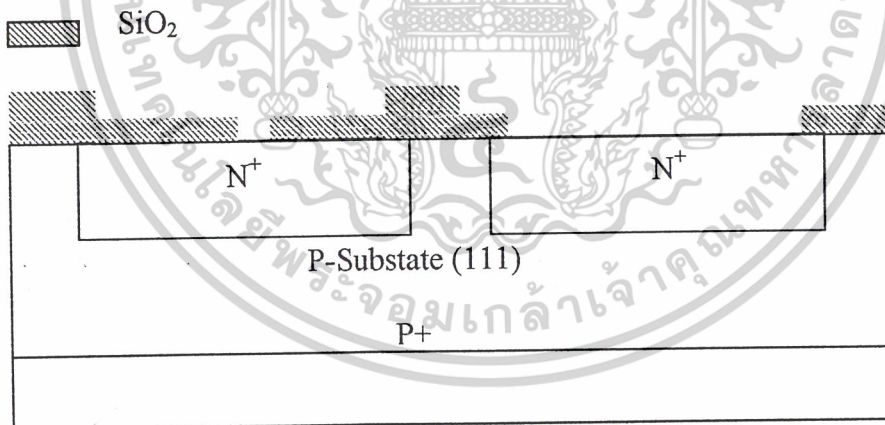


เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนวิชาหริบการใชงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เข้มข้น (N^+) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี

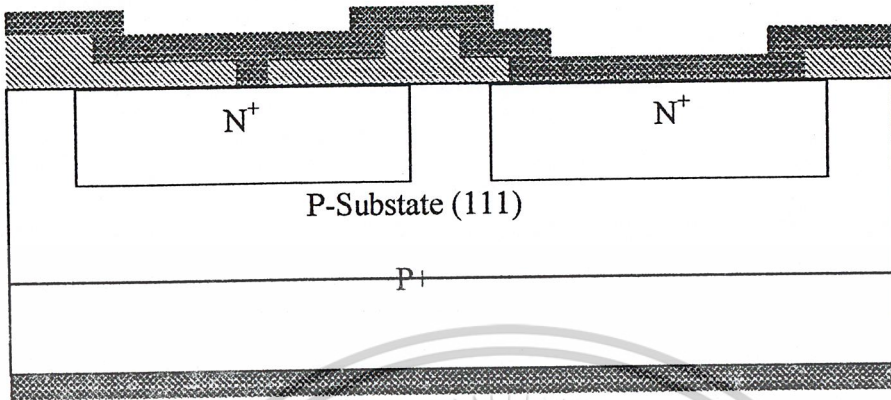


- ทำการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 2 เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ในบริเวณที่จะสร้างขั้วต่อโลหะ โดยในฝั่งที่จะสร้างชั้นพอร์ตซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนจะทำการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกทั้งหมด

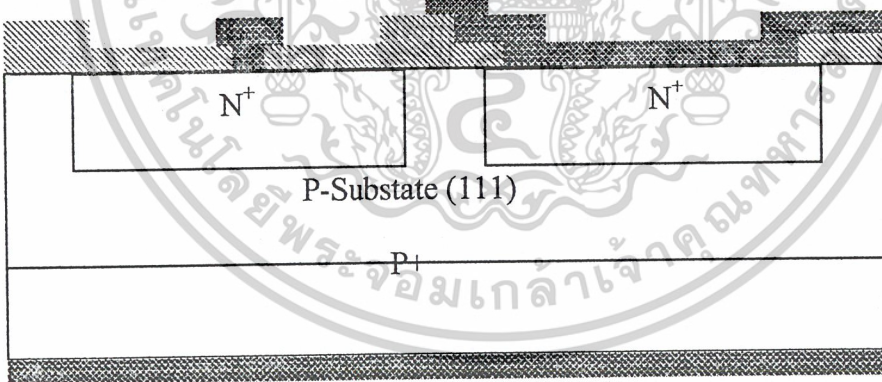


- ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยกระบวนการ Evaporation โดยจะได้ชั้นอลูมิเนียมมีความหนา $1 \mu m$ ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

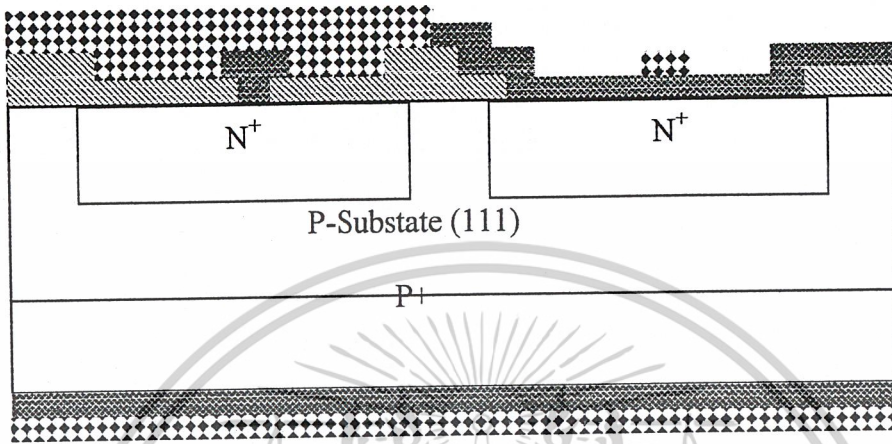
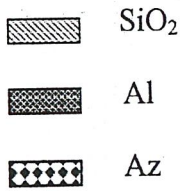


- ทำการเปิดชั้นของอลูมิเนียมด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 3 เพื่อลอกชั้นอลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก ให้เหลือแต่บริเวณขั้วต่ออลูมิเนียม และอลูมิเนียมในส่วนของเซลล์ที่จะสร้างชั้นพอร์ซเซลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน

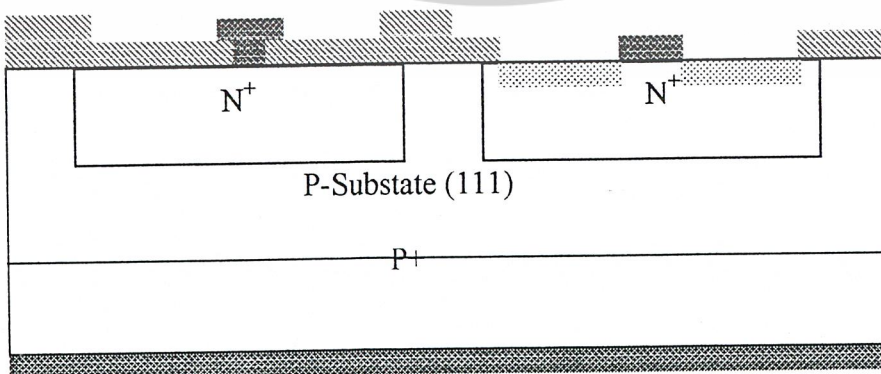
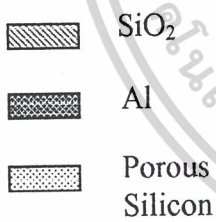


- ทำการสร้างชั้นป้องกันด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az 1818 เพื่อทำการสร้างชั้นพอร์ซเซลิคอนในบริเวณที่ต้องการ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 4 โดยในส่วนของเซลล์ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนจะทำการสร้างชั้นป้องกันปิดไว้ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- ทำการสร้างพอร์ซิติคอนในบริเวณที่ต้องการ โดยสารละลายจะทำกัดทะลุชั้น
อลูมิเนียมไปถึงชั้นของซิลิคอนจนเป็นพอร์ซิติคอน ก็จะได้เซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีชั้นซิลิคอน
ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน และแบบที่มีชั้นพอร์ซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนอยู่บน
ฐานรองเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

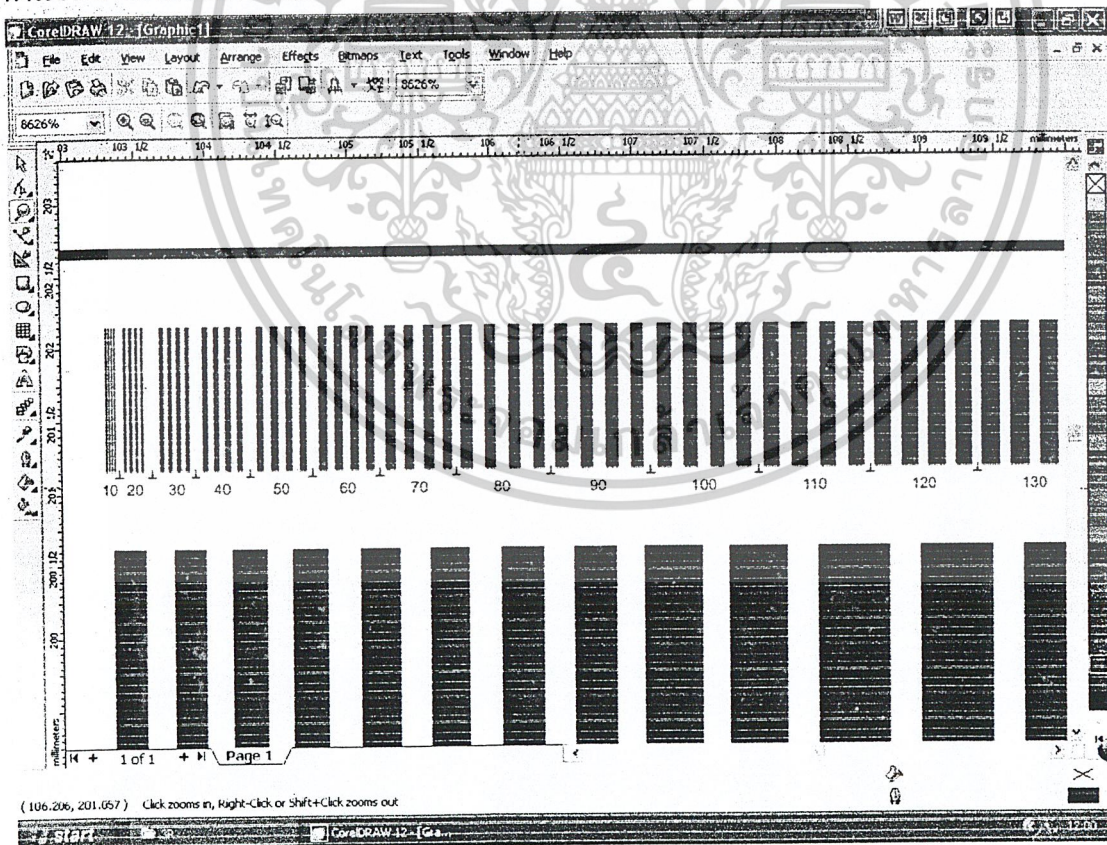
4.3 การออกแบบマスク โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ปัจจุบันกระบวนการออกแบบและสร้างกระจกมาสก์ได้มีการพัฒนาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ทำให้มีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดเวลาในการออกแบบและการสร้างได้มาก โดยในที่นี้ใช้โปรแกรม Corel Draw

マスクของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้ออกแบบมาสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผิวหน้าเป็นหลุมปิรามิด และหลุมปิรามิดที่เป็นพอร์ซเซิลิกอนโดย 1st Mask : สำหรับการกัดผิวหน้าให้เป็นหลุมปิรามิด 2nd Mask : เป็นการเปิดช่องเพื่อแพร่สารเจือชนิดเอ็น และ 3rd Mask : เป็นการเปิด contact window และ 4th Mask สำหรับการกัดลวดลายอะลูมิเนียม

การออกแบบ Mask โดยใช้โปรแกรม Coral Draw

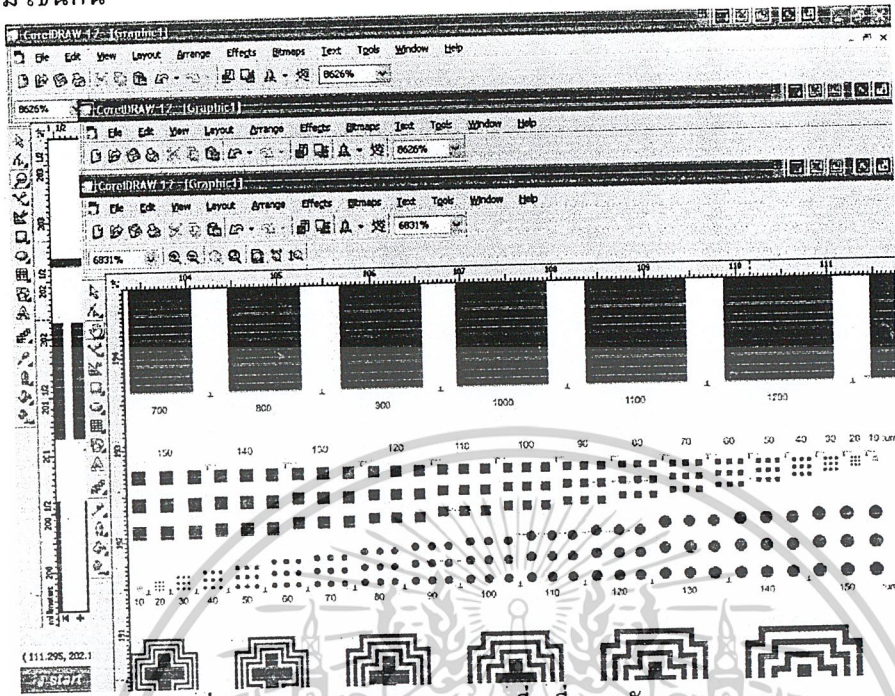
การออกแบบ Mask โดยใช้โปรแกรม Coral Draw สามารถออกแบบลวดลายโลหะให้มีขนาดเล็กถึง 30 μm ได้ แล้วเมื่อนำไฟล์นี้ไปยิงฟิล์ม สามารถแยกรายละเอียดของลวดลายขนาด 30 μm ได้ชัดเจน ซึ่งอันที่จริงขนาดลวดลายโลหะที่เป็น Finger ที่ต้องการอยู่ในระดับ 100-200 μm และ Bus bar ที่ต้องการอยู่ในระดับ 1-2 mm ดังนั้นการออกแบบด้วยโปรแกรมนี้จึงไม่เกิดปัญหาคำนวณขนาดของลวดลายโลหะ



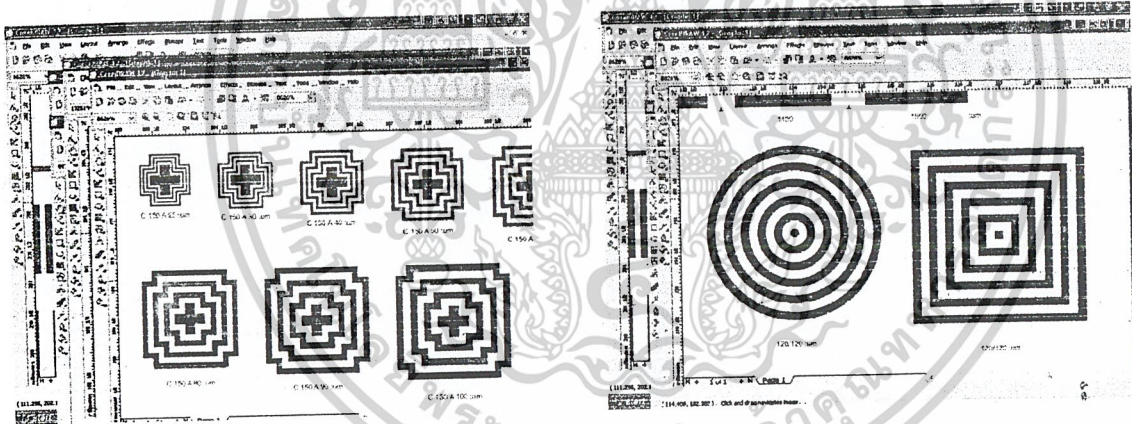
รูปที่ 4.3.1 ลวดลายโลหะขนาดต่างๆที่ออกแบบบน โปรแกรม Coral Draw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

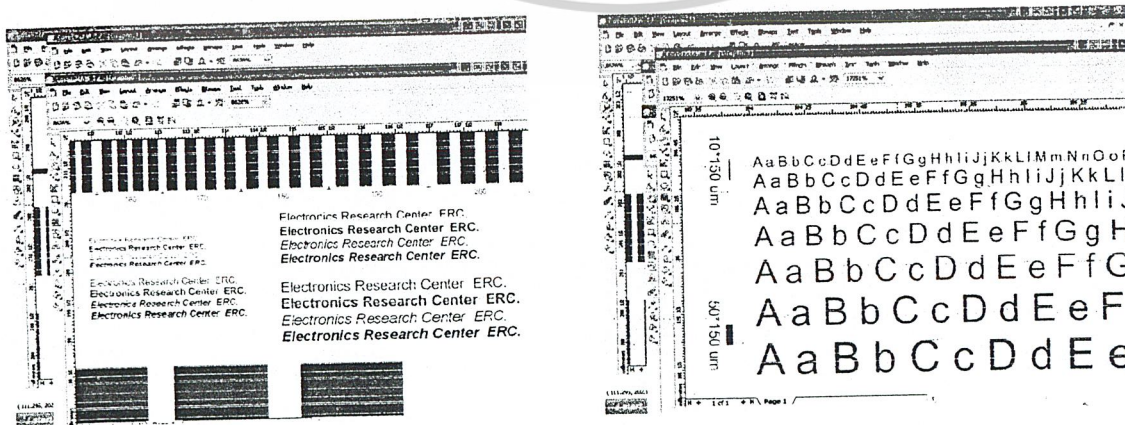
และสำหรับลวดลายสี่เหลี่ยมก็สามารถออกแบบได้ถึงในระดับ 30 μm แล้วไม่เกิดปัญหาในการยิงฟิล์มเช่นกัน



รูปที่ 4.3.2 การออกแบบ ลวดลายสี่เหลี่ยมจตุรัส และวงกลม

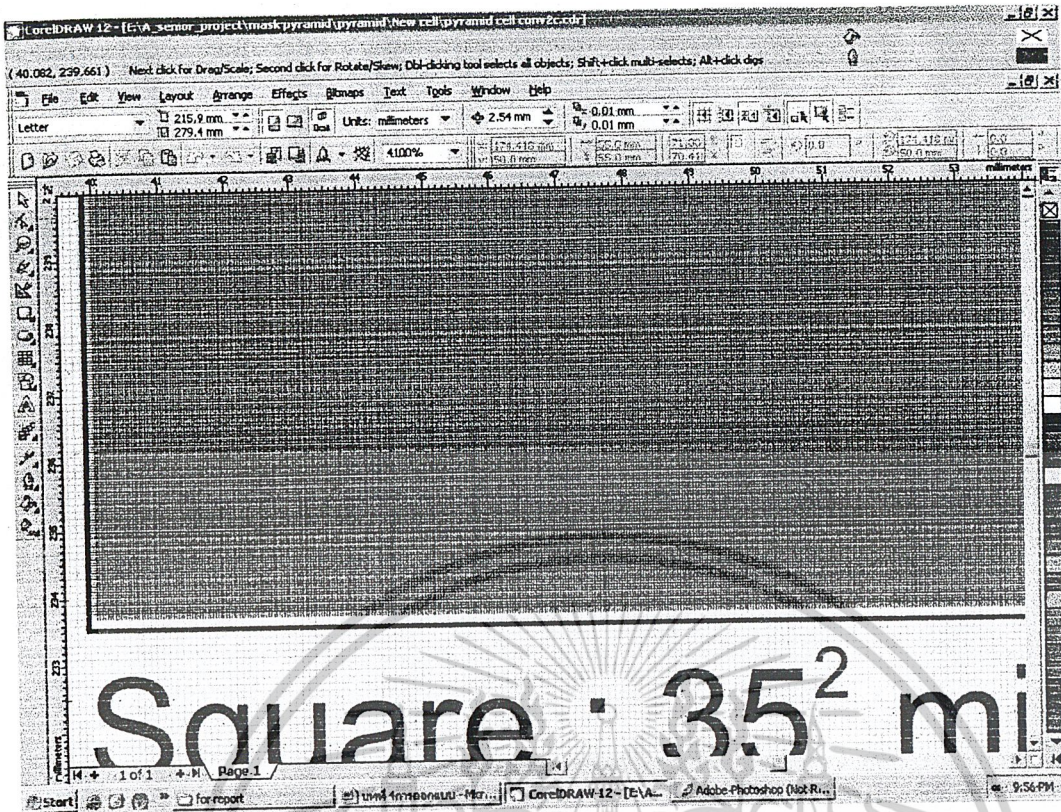


รูปที่ 4.3.3 การออกแบบลวดลายการซ้อน Mask

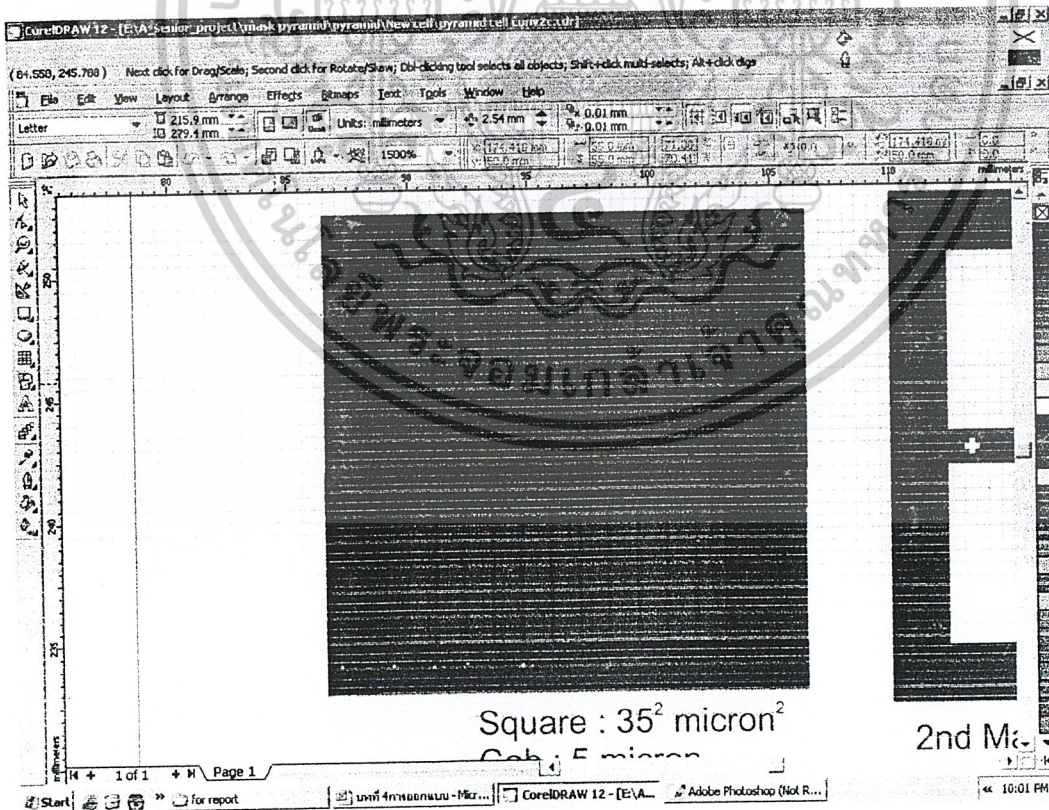


รูปที่ 4.3.4 การออกแบบลวดลายตัวอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

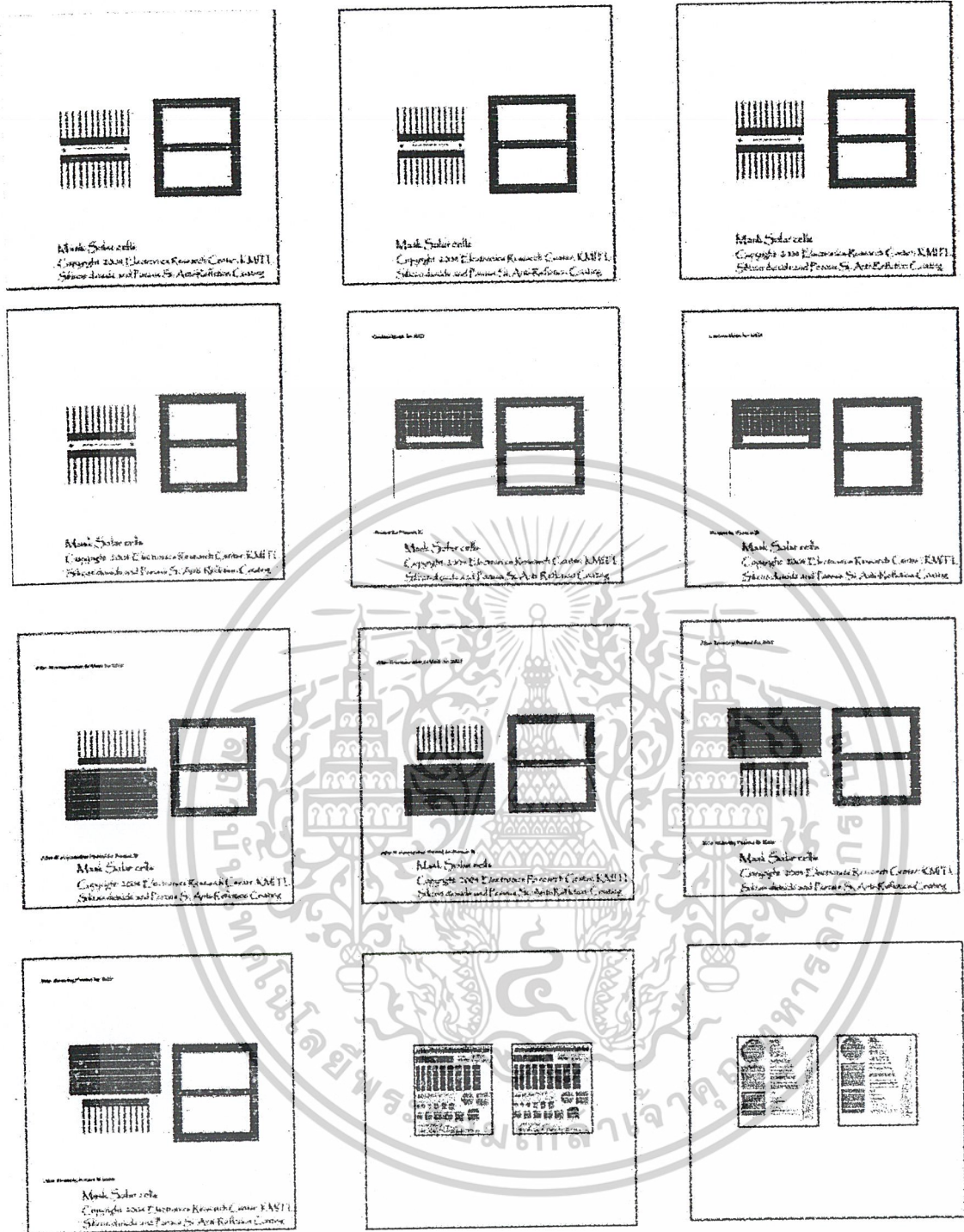


รูปที่ 4.3.5 Mask สำหรับทดลองการกัดหลุมปิรามิด ขนาดปากหลุม 35X35 ไมโครเมตร.



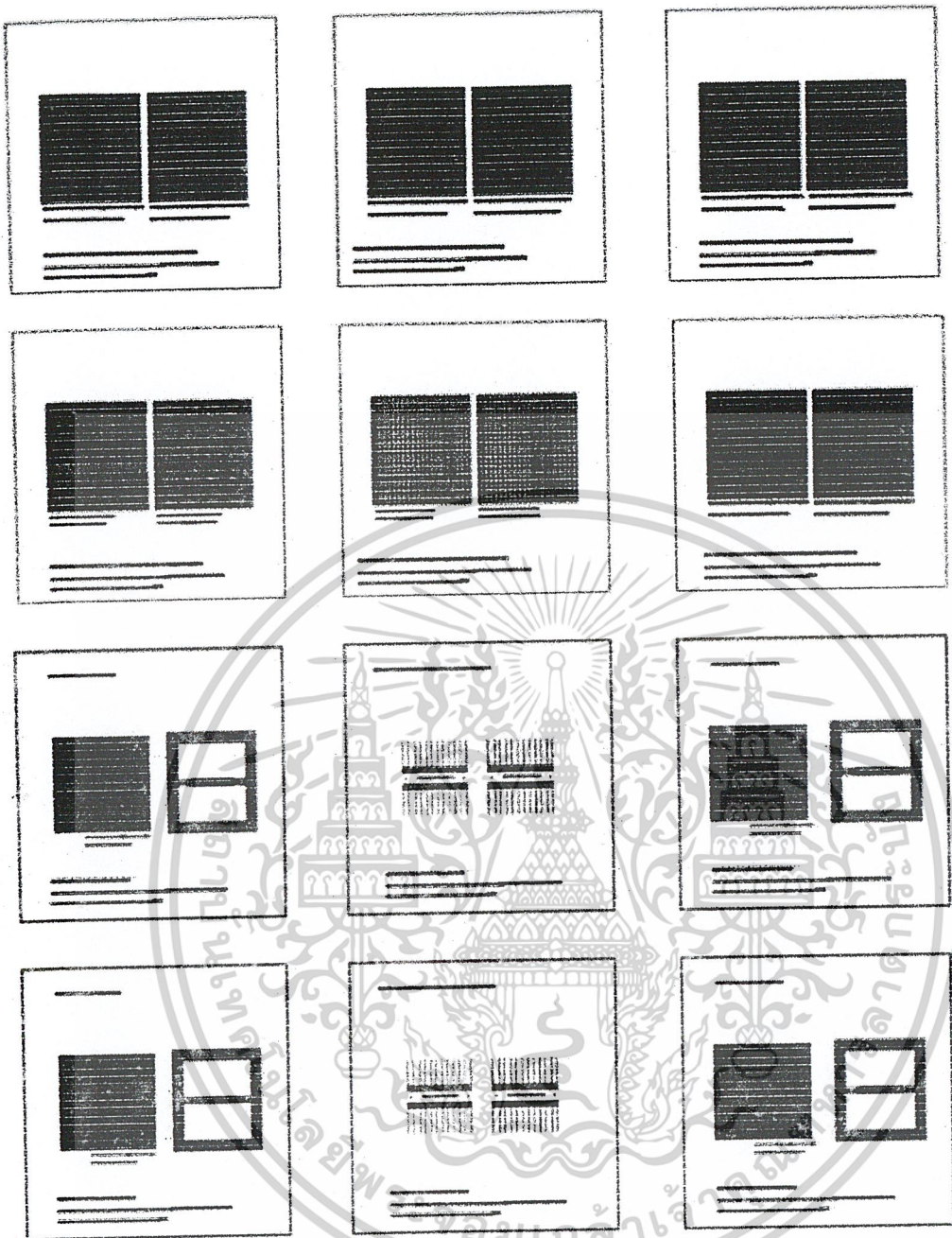
รูปที่ 4.3.6 Mask Solar cell ชั้นที่ 1 สำหรับเปิดเป็นหลุมปิรามิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3.7 Mask และ Selective ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Coral Draw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

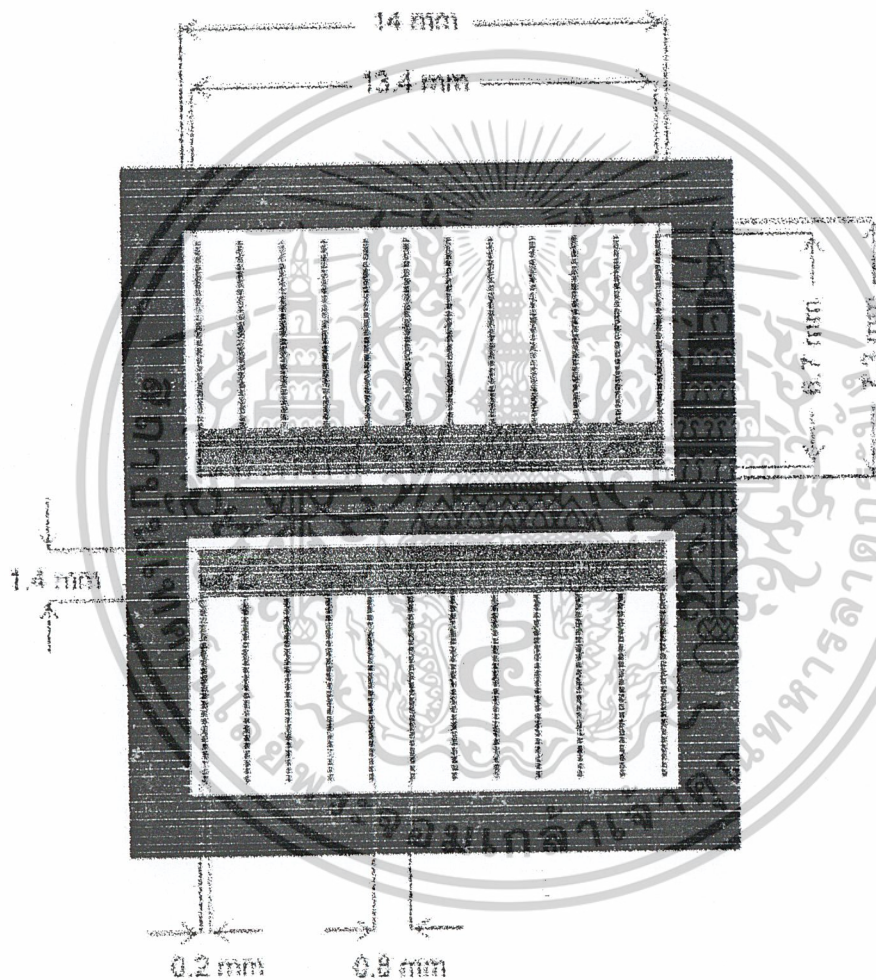


รูปที่ 4.3.8 Mask Inverted pyramid Solar cell ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Coral Draw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

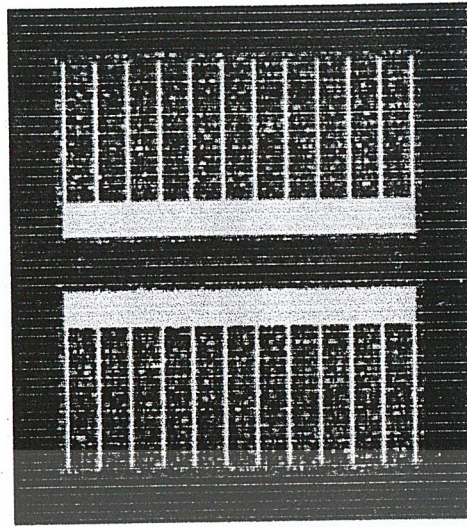
ตารางที่ 4.2.3 ขนาดและระยะของลวดลายโลหะบนMASK ในการออกแบบโดยโปรแกรม Coral Draw

ตำแหน่ง	ขนาด (mm.)
ขนาด Finger ของขั้วโลหะ (Contact)	0.2 mm.
ขนาด Busbar ของขั้วโลหะ (Contact)	1.4 mm.
ขนาด Busbar ของลวดลายขั้วโลหะ (metal)	1.7 mm.
ระยะระหว่าง Finger ลวดลายขั้วโลหะ (Metal)	0.8 mm.

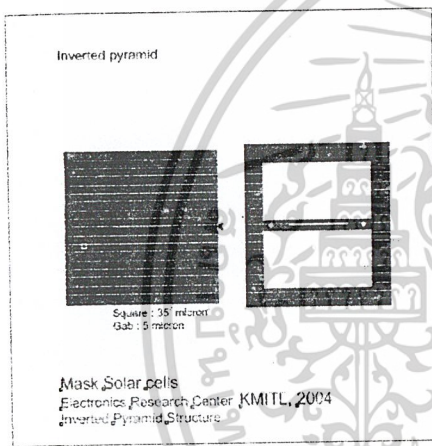


รูปที่ 4.3.9 ขนาดลวดลายโลหะ Finger และ Busbar บนMask

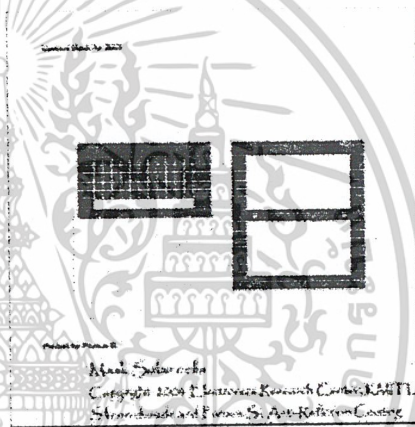
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



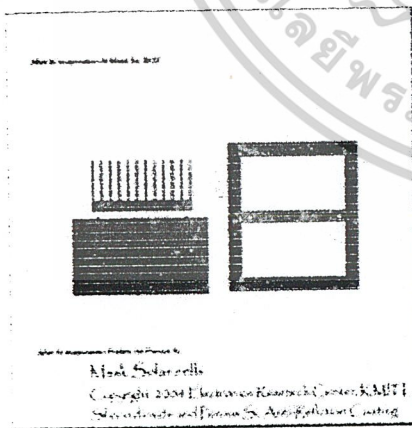
รูปที่ 4.3.10 ตัวอย่างการวางลวดสายโลหะลงบนพื้นที่ ที่เกิด etching ทั้งสองเซลล์



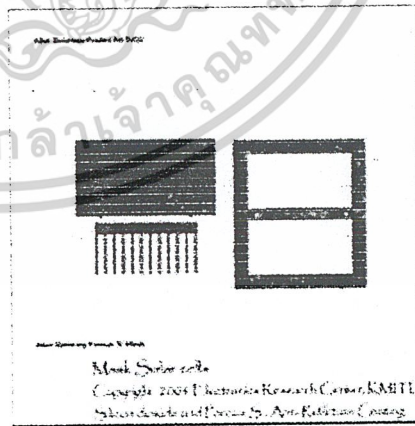
(a)



(b)

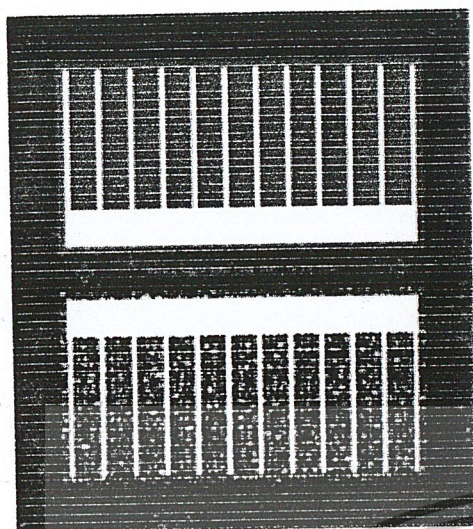


(c)

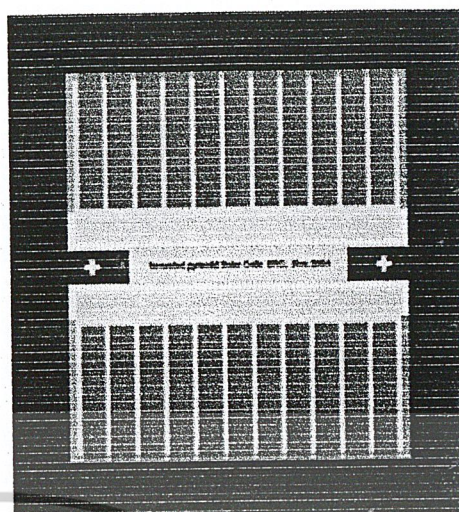


(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e)



(f)

รูปที่ 4.3.11 การออกแบบ Mask โดยเซลล์หนึ่ง เป็นการลดชั้นการสะท้อนแสงโดยใช้ชั้นซิลิกอนออกไซด์ และอีกเซลล์หนึ่งใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงโดยใช้การสร้างพอร์ซิลิกอน

(a) 1st Mask สำหรับการกัดหลุมปิรามิด (b) 2nd Mask สำหรับเปิดช่องลวดลายบนชั้น SiO₂ (c) 3rd Mask สำหรับวางลวดลายโลหะลงบนชั้น (d) 4th Mask สำหรับวางลวดลายโลหะลงบนชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์ซิลิกอน (e) ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ 2 เซลล์ บนซิลิกอนซึบสเตรคชันเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบผลของชั้นลดการสะท้อนของแสงที่ต่างกัน (f) ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีผิวหน้าเป็นหลุมปิรามิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การทดลองการกัดหลุมพีระมิด

5.1.1 การทดลองกัดแบบแอนไอโซโทรปิกโดยใช้สารละลาย KOH เข้มข้น 4 โมลาร์บนผิวหน้าซิลิกอนระนาบ (100)

- Condition

- สารละลาย KOH เข้มข้น 4 โมลาร์
- อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
- กวนด้วยแท่งแม่เหล็ก ความเร็วรอบ 100 rpm

ขณะกัดมีอัตราการกัด $1 \mu\text{m} / \text{min}$

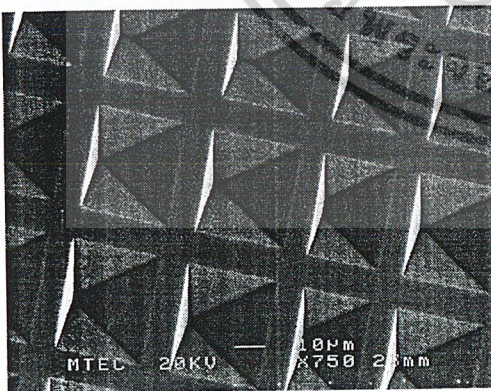
- ออกแบบมาร์คสำหรับการทดลองกัดให้มีความกว้างปากหลุม

- 30 μm มี Gap 5 μm
- 35 μm มี Gap 5 μm
- 50 μm มี Gap 5 μm
- 60 μm มี Gap 10 μm
- 80 μm มี Gap 10 μm

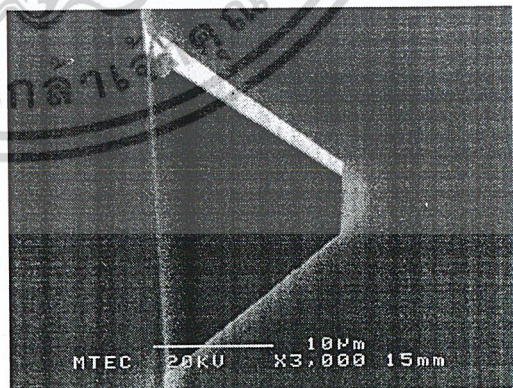
- ทดลองกัดโดยมีอัตราการกัดประมาณ $1 \mu\text{m} / \text{min}$

5.1.2 ผลการทดลอง

ภาพผลการทดลอง ถ่ายด้วยเครื่อง SEM ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



รูปที่ 5.1.1

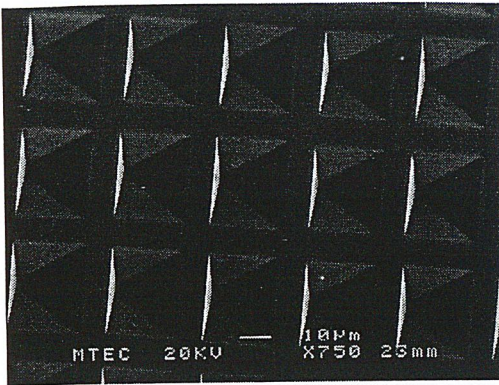


รูปที่ 5.1.2

รูปที่ 5.1.1 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของพีระมิดขนาดปากหลุม 30 ไมโครเมตรระยะห่างระหว่างหลุม 5 ไมโครเมตร ที่มุม 30 องศา

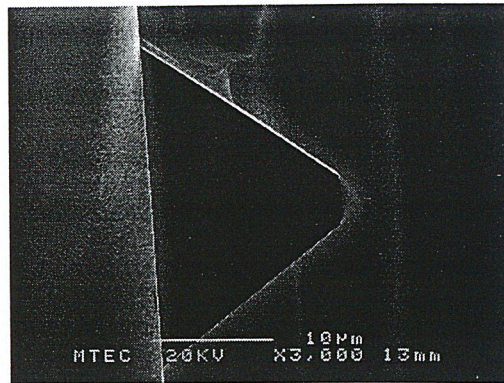
รูปที่ 5.1.2 ภาพถ่ายลักษณะด้านตัดขวางของพีระมิดที่มีขนาดปากหลุม 30 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



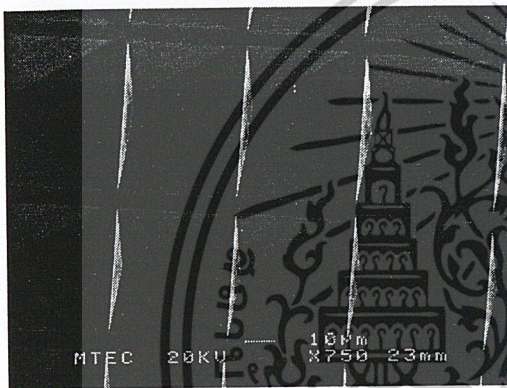
รูปที่ 5.1.3

รูปที่ 5.1.3 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของฟิโระมิตขนาดปากหลุม 35 ไมโครเมตรระยะห่างระหว่างหลุม 5 ไมโครเมตร ที่มุม 30 องศา



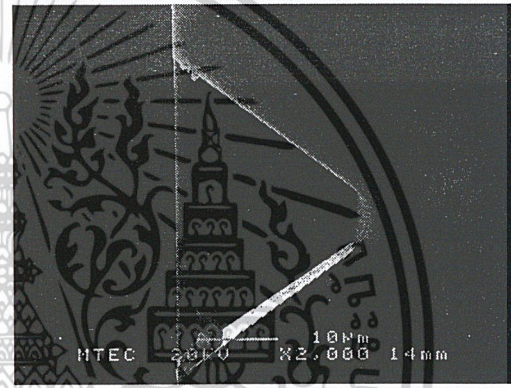
รูปที่ 5.1.4

รูปที่ 5.1.4 ภาพถ่ายลักษณะด้านตัดขวางของฟิโระมิตที่มีขนาดปากหลุม 35 ไมโครเมตร



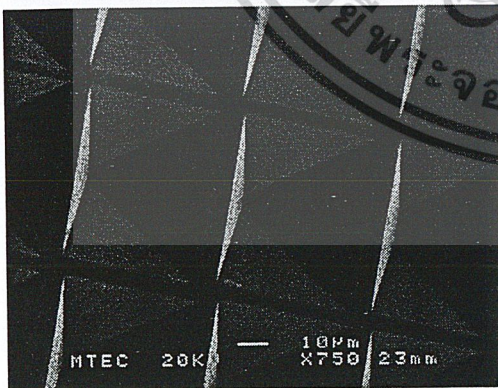
รูปที่ 5.1.5

รูปที่ 5.1.5 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของฟิโระมิตขนาดปากหลุม 40 ไมโครเมตรระยะห่างระหว่างหลุม 5 ไมโครเมตร ที่มุม 30 องศา



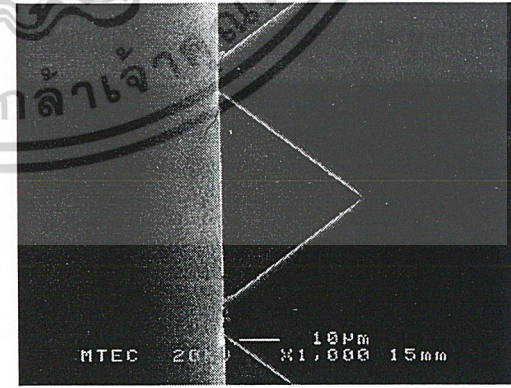
รูปที่ 5.1.6

รูปที่ 5.1.6 ภาพถ่ายลักษณะด้านตัดขวางของฟิโระมิตที่มีขนาดปากหลุม 40 ไมโครเมตร



รูปที่ 5.1.7

รูปที่ 5.1.7 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของฟิโระมิตขนาดปากหลุม 50 ไมโครเมตรระยะห่างระหว่างหลุม 10 ไมโครเมตร ที่มุม 30 องศา



รูปที่ 5.1.8

รูปที่ 5.1.8 ภาพถ่ายลักษณะด้านตัดขวางของฟิโระมิตที่มีขนาดปากหลุม 50 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

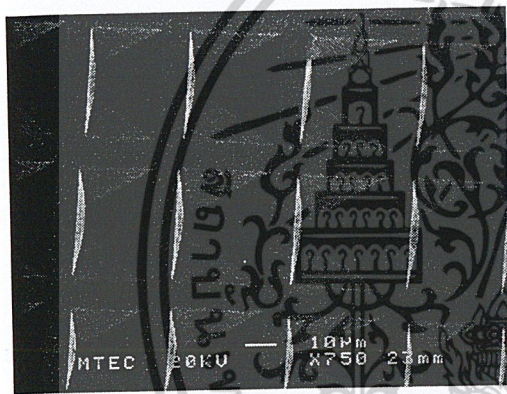
5.2 การทดลองการกัดหลุมพีระมิดและกัดพอร์ซซิติกอนบนผิวหน้าหลุมพีระมิด

5.2.1 การทดลองการกัดหลุมพีระมิดและกัดพอร์ซซิติกอนบนผิวหน้าหลุมพีระมิด

- กัดซิติกอนแบบแอนไอโซโทรปิกโดยใช้สารละลาย KOH เข้มข้น 4 โมลาร์ บนผิวหน้าซิติกอนระนาบ (100)
- เพิ่มการกัดพอร์ซแบบข้อมสี่บนผิวหน้าหลังจากการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก
- โดยใช้สารละลาย HF 47% : NH_3 60% : DI Water อัตราส่วน 1:3:5
- เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที

5.2.2 ผลการทดลอง

ภาพผลการทดลอง ถ่ายด้วยเครื่อง SEM ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



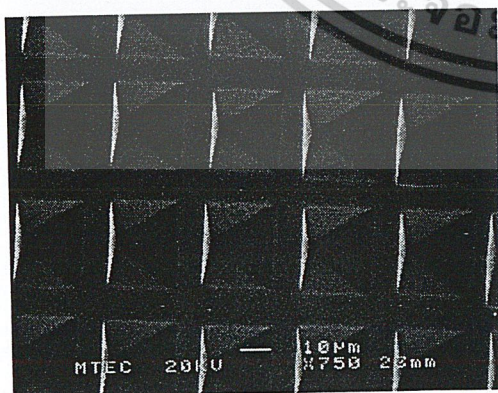
รูปที่ 5.2.1



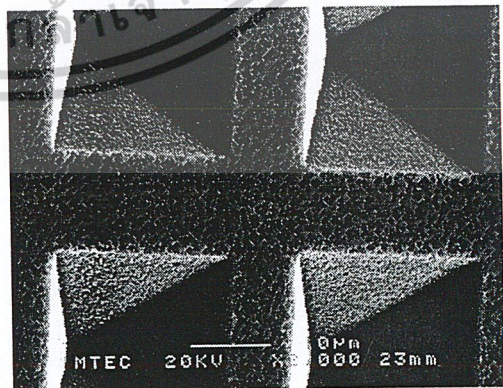
รูปที่ 5.2.2

รูปที่ 5.2.1 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซซิติกอนที่ได้จากการกัดข้อมสี่ที่สร้างบนพีระมิดความกว้างปากหลุม $30\mu\text{m}$ Gap $5\mu\text{m}$ ที่มุม 30 องศา

รูปที่ 5.2.2 ภาพขยายจากรูปที่ 5.2.1



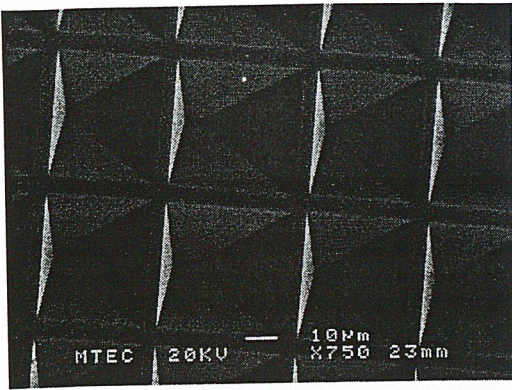
รูปที่ 5.2.3



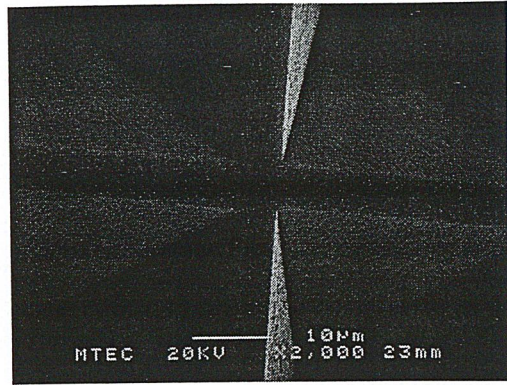
รูปที่ 5.2.4

รูปที่ 5.2.3 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซซิติกอนที่ได้จากการกัดข้อมสี่ที่สร้างบนพีระมิดความกว้างปากหลุม $35\mu\text{m}$ Gap $5\mu\text{m}$ ที่มุม 30 องศา

เอกสารรูปที่ 5.2.4 ภาพขยายจากรูปที่ 5.2.3 เป็นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.5



รูปที่ 5.2.6

รูปที่ 5.2.5 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมสี่ที่สร้างบนพีระมิดความกว้างปาก

หลุม 40 μm Gap 5 μm ที่มุม 30 องศา

รูปที่ 5.2.6 ภาพขยายจากรูปที่ 5.2.5



รูปที่ 5.2.7 ภาพขยายภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมสี่ที่สร้างบนพีระมิดความกว้างปากหลุม 50 μm Gap 10 μm ที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดลองการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์และการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างต่างๆ

5.3.1 การทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มี

สนามไฟฟ้าด้านหลัง(Back Surface Field)

สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง

สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลังและทำการขับเคลื่อน(Drive-in)

4 ชั่วโมง

สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นสนามไฟฟ้าด้านหลังและทำการขับเคลื่อน 6 ชั่วโมง

ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด

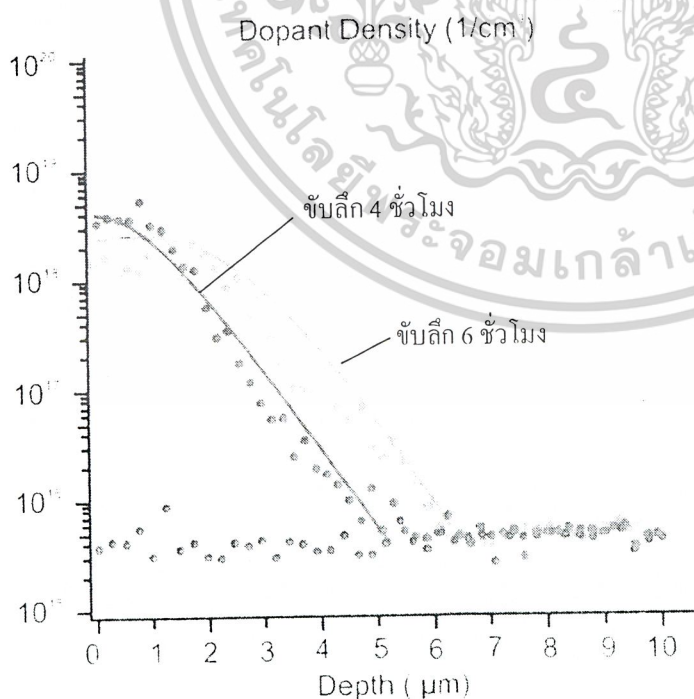
5.3.2 ผลการทดลอง

5.3.2.1 ผลการวัดความลึกของสนามไฟฟ้าด้านหลัง

ทำการพรีเด็ป โพลีท(Pre-deposit) 30 นาที, ขับลิท 4, 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส

ได้ความลึกสนามไฟฟ้าประมาณ 4 ไมโครเมตร ที่เวลา 4 ชม.

ได้ความลึกสนามไฟฟ้าประมาณ 5.5 ไมโครเมตร ที่เวลา 6 ชม.



รูปที่ 5.3.1 การวัดความลึกของสนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

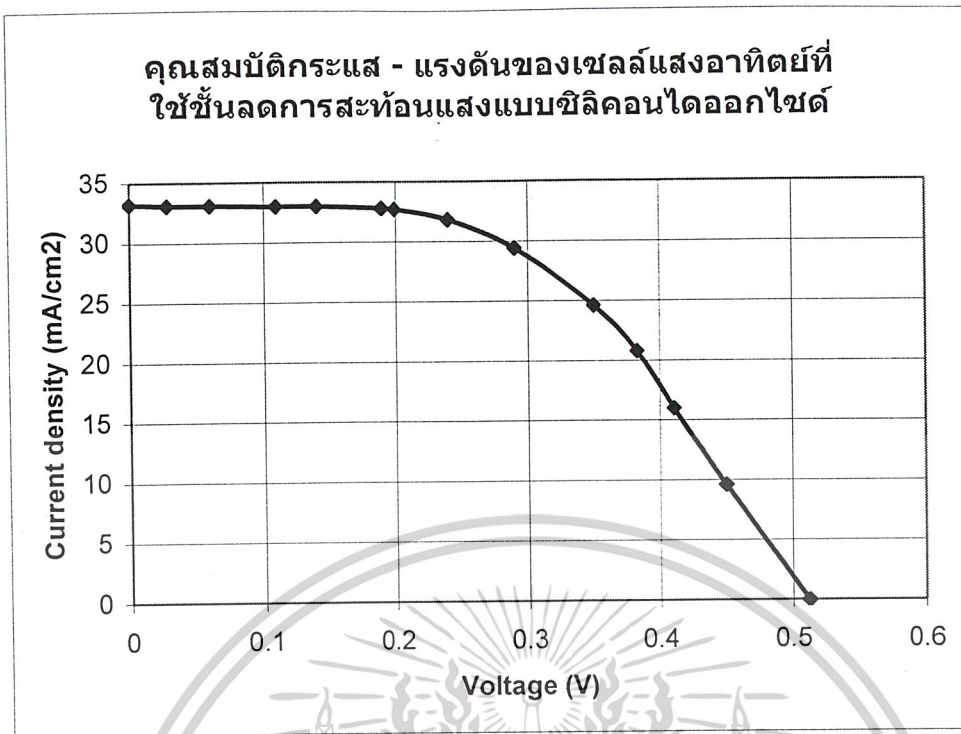
5.3.2.2 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งมีสภาพต้านทาน (Resistivity)แผ่นเริ่มต้นที่ 3-5 Ω -cm

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ (71)

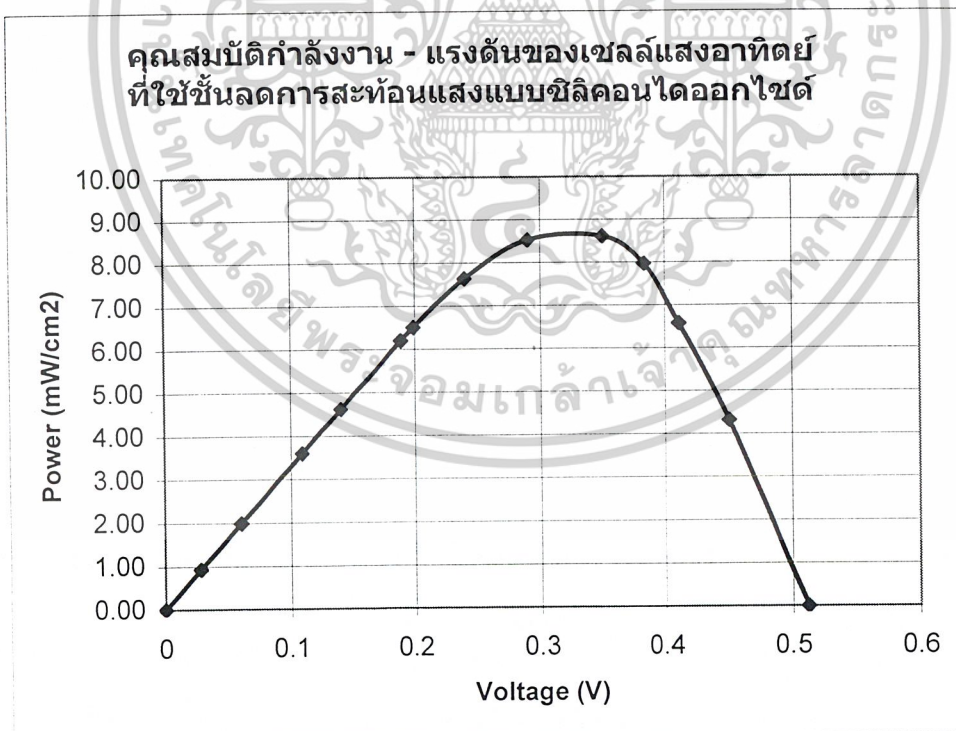
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	16.6 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.512 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	8.5 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	33.2 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	12.3 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.35 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.31 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.51
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	10.36 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่น		

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.2 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.3 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

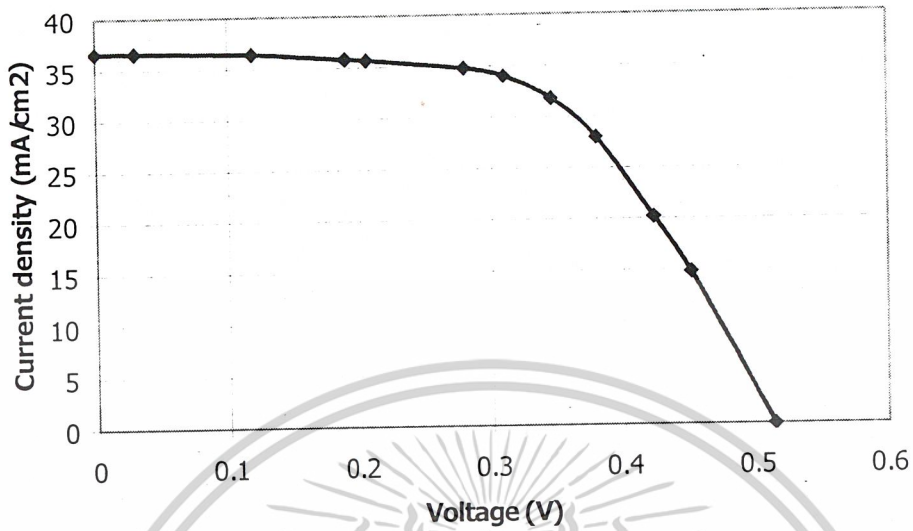
คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี
สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลึกลับ 4 ชั่วโมง(72)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	18.3 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.514 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	9.41 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	36.6 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	15.9 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.346 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.5 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.58
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	13.22 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่น		

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม

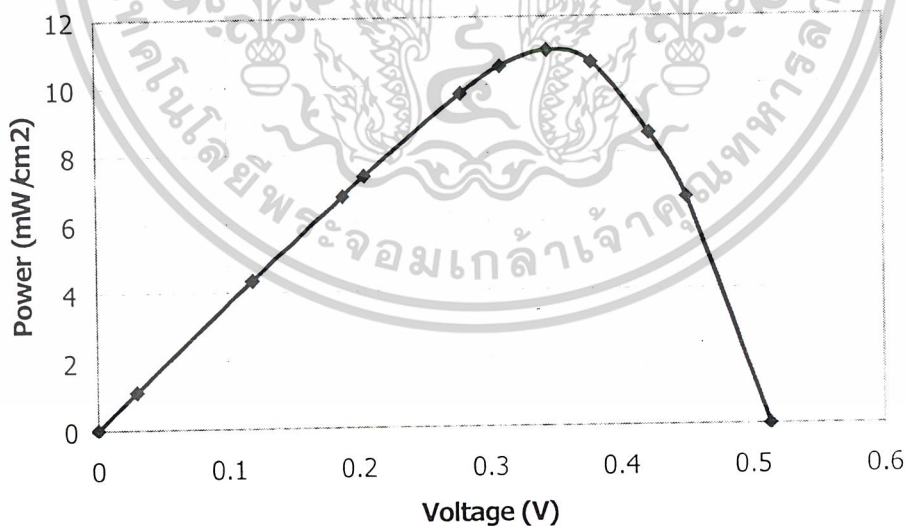
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.4 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลิก 4 ชั่วโมง(72)

คุณสมบัติกำลังงาน - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.5 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลิก 4 ชั่วโมง(72)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

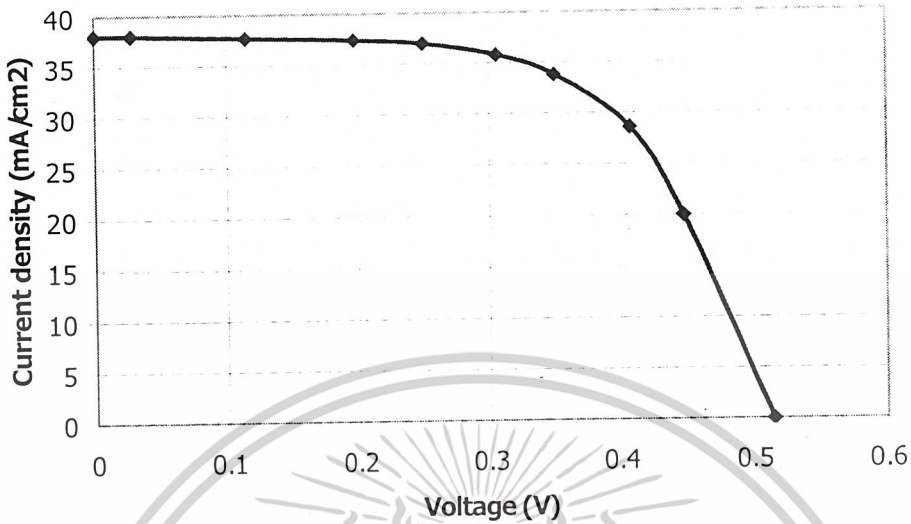
คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี
สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลึกลง 6 ชั่วโมง (73)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	19 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.515 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	9.79 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	38 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	16.9 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.35 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.92 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.61
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	14.23 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่น		

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม
สนามไฟฟ้าด้านหลัง

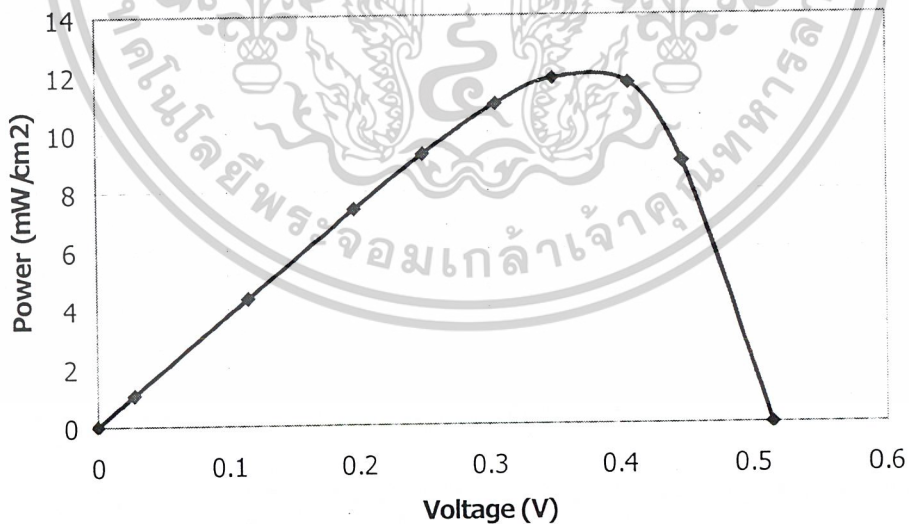
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คุณสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่
ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์**



รูปที่ 5.3.6 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลึกลับ 6 ชั่วโมง (73)

**คุณสมบัติกำลังงาน - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่
ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์**

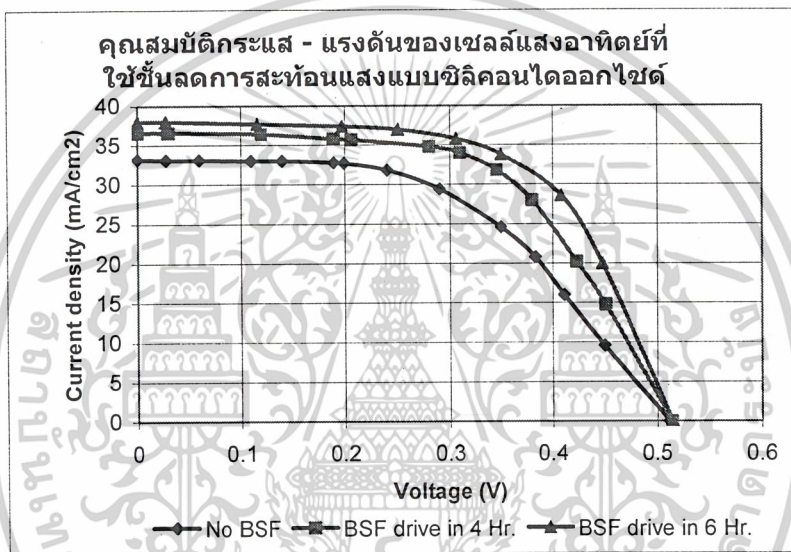


รูปที่ 5.3.7 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลึกลับ 6 ชั่วโมง (73)

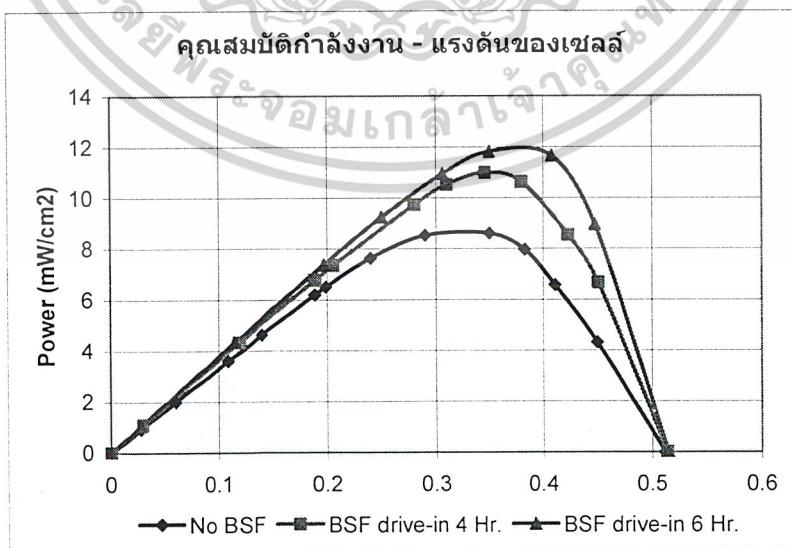
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่มีและมีส่วนไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการขั้วลิกที่เวลาต่างๆ

ชนิดเซลล์	Isc (mA)	Voc (V)	Po (mW)	Jsc (mA/cm ²)	Im (mA)	Vm (V)	Pm (mW)	F.F.	Eff. (%)
ไม่มีBSF	16.6	0.512	8.5	33.2	12.3	0.35	4.31	0.51	10.36
ขั้วลิก 4 ชั่วโมง	18.3	0.514	9.41	36.6	15.9	0.346	5.5	0.58	13.22
ขั้วลิก 6 ชั่วโมง	19	0.515	9.79	38	16.9	0.35	5.92	0.61	14.23
% การเปลี่ยนแปลง	+14.46	+0.59	+15.18	+14.46	+37.4	+1.16	+37.35	+19.6	+37.36



รูปที่ 5.3.8 กราฟแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่มีและมีส่วนไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการขั้วลิกที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 5.3.9 กราฟแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่มีและมีส่วนไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการขั้วลิกที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

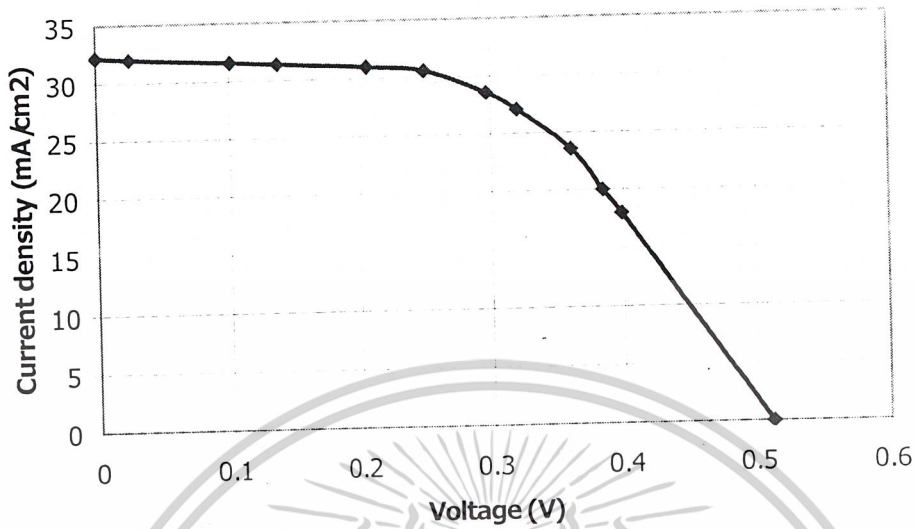
5.3.2.3 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งมี สภาพต้านทาน แผ่นเริ่มต้นที่ 6-12 Ω -cm

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ (21)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	16.1 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.512 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	8.24 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	32.2 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	13.6 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.32 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.43 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.52
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	10.24 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่น		

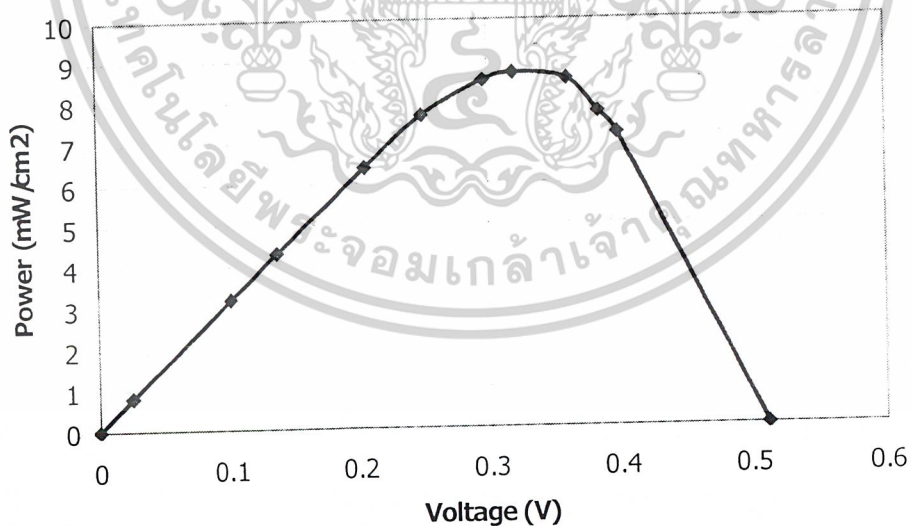
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม

คุณสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.10 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ (21)

คุณสมบัติกำลังงาน - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.11 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ (21)

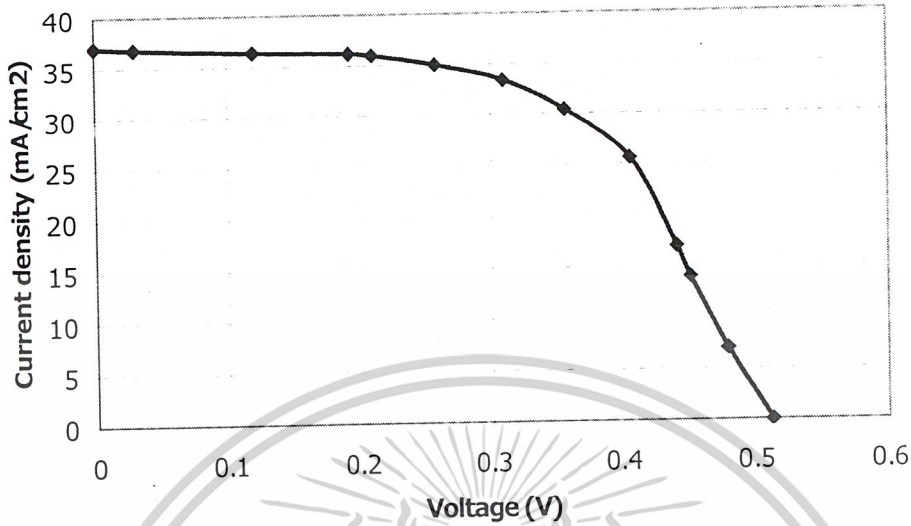
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ สนามไฟฟ้า
ด้านหลังที่ขั้วลึกลับ ที่ 4 ชั่วโมง (22)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	18.5 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.513 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	9.49 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	37 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	15.2 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.357 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.43 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.57
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	13.05 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่น		
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม		
สนามไฟฟ้าด้านหลัง		

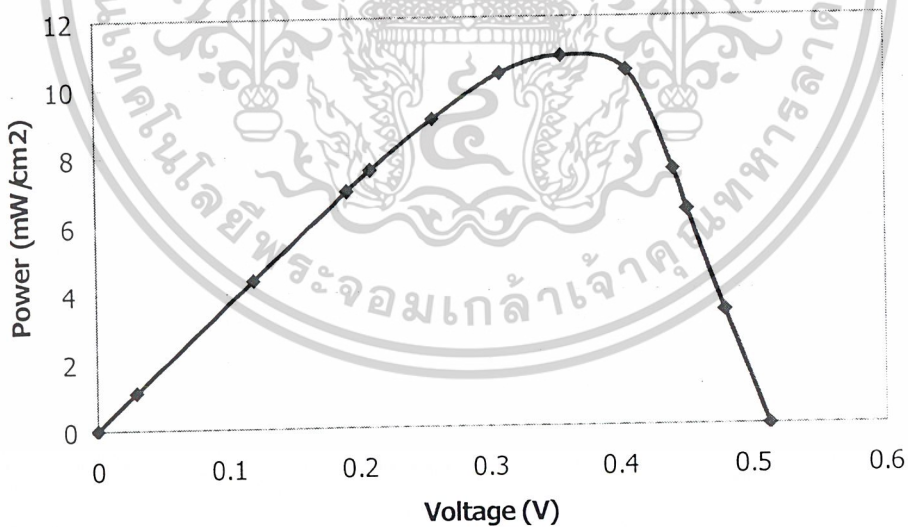
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.12 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลึกลับ 4 ชั่วโมง (72)

คุณสมบัติกำลังงาน - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.13 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลึกลับ 4 ชั่วโมง (22)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

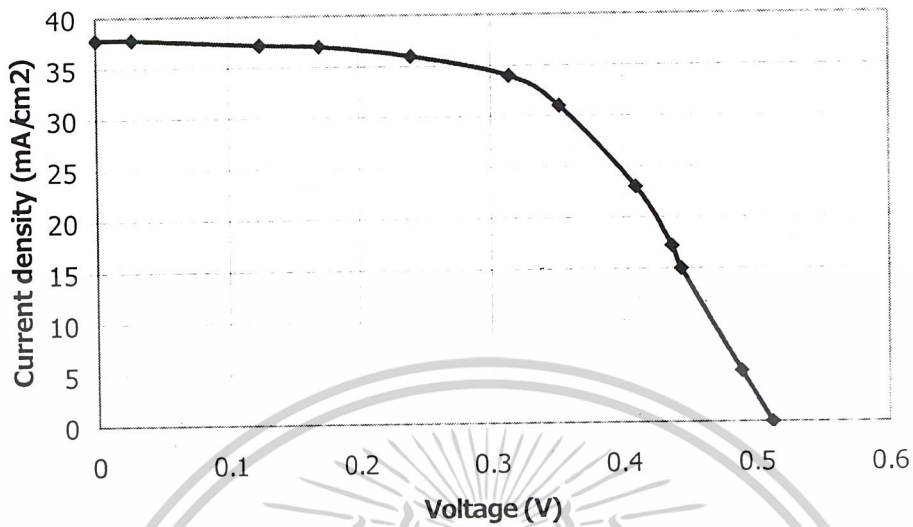
คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ สนามไฟฟ้า
ด้านหลังที่ขั้วลึก ที่ 6 ชั่วโมง (23)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	18.9 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.512 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	9.68 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	37.8 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	15.5 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.352 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.46 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.56
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	13.125 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่น		

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม
สนามไฟฟ้าด้านหลัง

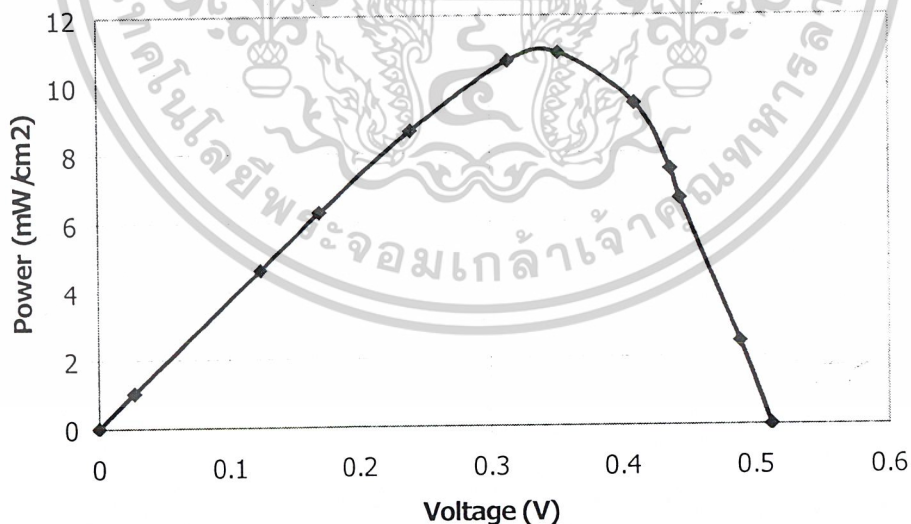
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.14 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลิก 6 ชั่วโมง (23)

คุณสมบัติกำลังงาน - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์

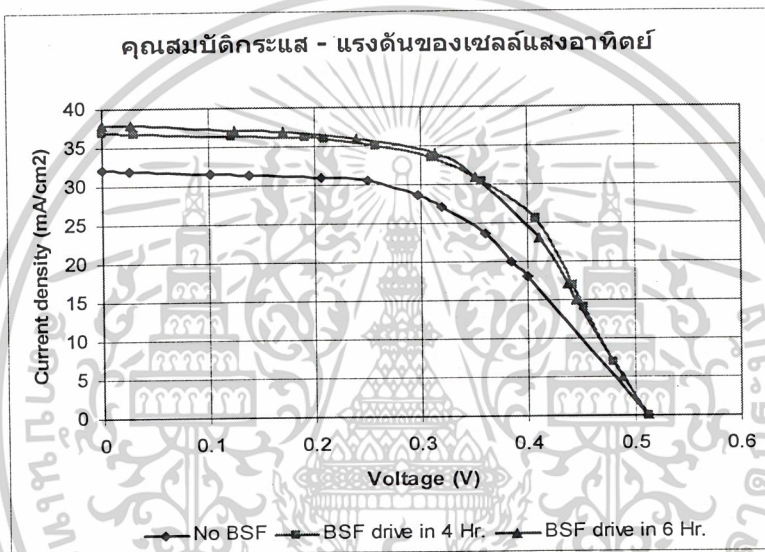


รูปที่ 5.3.15 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงานและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์และมี สนามไฟฟ้าด้านหลัง ขั้วลิก 6 ชั่วโมง (23)

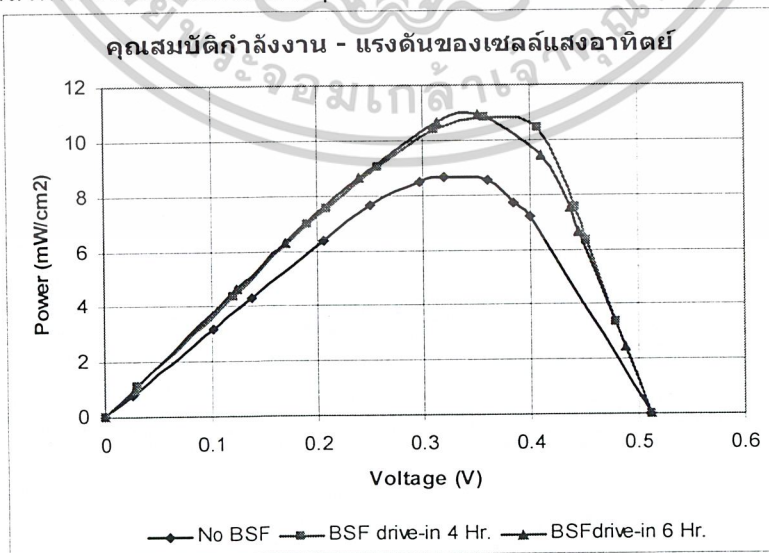
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่มีและมีส่วนนำไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการขับลึกลงที่เวลาต่างๆ

ชนิดเซลล์	Isc (mA)	Voc (V)	Po (mW)	Jsc (mA/cm ²)	Im (mA)	Vm (V)	Pm (mW)	F.F.	Eff. (%)
ไม่มีBSF	16.1	0.512	8.24	32.2	13.6	0.32	4.43	0.52	10.24
ขับลึกลง 4 ชั่วโมง	18.5	0.513	9.49	37	15.2	0.357	5.43	0.57	13.05
ขับลึกลง 6 ชั่วโมง	18.9	0.512	9.68	37.8	15.5	0.352	5.46	0.56	13.125
% การเปลี่ยนแปลง	+17.39	+0.2	+17.48	+17.39	+13.97	+11.56	+23.25	+9.6	+28.17



รูปที่ 5.3.16 กราฟแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่มีและมีส่วนนำไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการขับลึกลงที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 5.3.17 กราฟแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่มีและมีส่วนนำไฟฟ้าด้านหลังที่ทำการขับลึกลงที่เวลาต่างๆ

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 การทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และโครงสร้างอื่น

ทำการประยุกต์สร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกโดยใช้สารละลาย KOH เข้มข้น 4 โมลาร์บนผิวหน้าซิลิกอนระนาบ (100) บนเซลล์แสงอาทิตย์ และโครงสร้างอื่นๆ

ซึ่งมีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ 6 ชนิดดังนี้

1. เซลล์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง SiO₂ เพียงอย่างเดียว
2. เซลล์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นพอร์ตซิลิกอน
3. เซลล์มีโครงสร้างผิวหน้าเป็นหลุมพีระมิด
4. เซลล์มีโครงสร้างผิวหน้าเป็นหลุมพีระมิดและพอร์ต
5. เซลล์มีโครงสร้างผิวหน้าเป็นหลุมพีระมิดและมี BSF
6. เซลล์มีโครงสร้างผิวหน้าเป็นหลุมพีระมิดและพอร์ต และมี BSF

5.3.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และโครงสร้างอื่น

ตารางที่ 5.3 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	Eff (%)
2/py	0.435	20	0	0.432	0	0.75	0	0	0.576	8.061
		26.67	1	0.426	0.426		1.333	0.568		
			2	0.424	0.848		2.667	1.131		
			4	0.417	1.668		5.333	2.224		
			5	0.412	2.06		6.667	2.747		
			7	0.401	2.807		9.333	3.743		
			8	0.395	3.16		10.667	4.213		
			10	0.384	3.84		13.333	5.120		
			11	0.374	4.114		14.667	5.485		
			12	0.364	4.368		16.000	5.824		
			15	0.33	4.95		20.000	6.600		
			15.5	0.321	4.9755		20.667	6.634		
			16	0.308	4.928		21.333	6.571		
			17	0.278	4.726		22.667	6.301		
			18	0.238	4.284		24.000	5.712		
			19	0.189	3.591		25.333	4.788		
			20	0.02	0.4		26.667	0.533		

ความเข้มแสง = 125,000 lx.

กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}) = 20 mA

แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) = 0.435 V

พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0) = 8.7 mW

ความเข้มกระแส (J_{sc}) = 26.67 mA/cm²

กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m) = 15.5 mA

แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m) = 0.321 V

กำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m) = 4.9755 mW

ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.) = 0.576

ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η) = 8.061 %

พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area) = 0.75 cm²

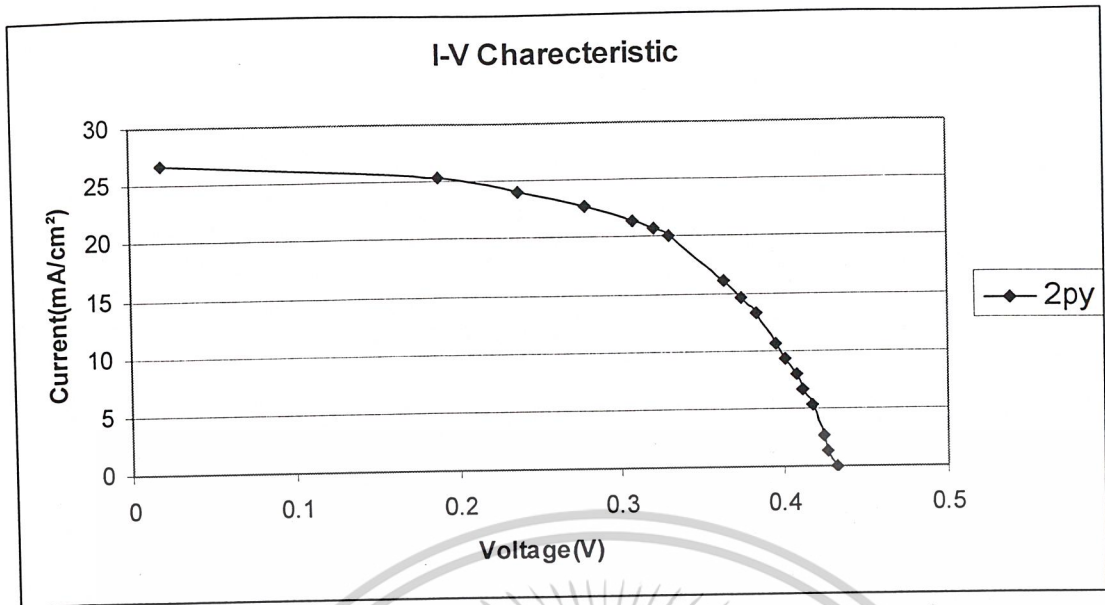
อุณหภูมิ ($T_{cmp.}$) = 20 °c

โครงสร้างอื่นๆ

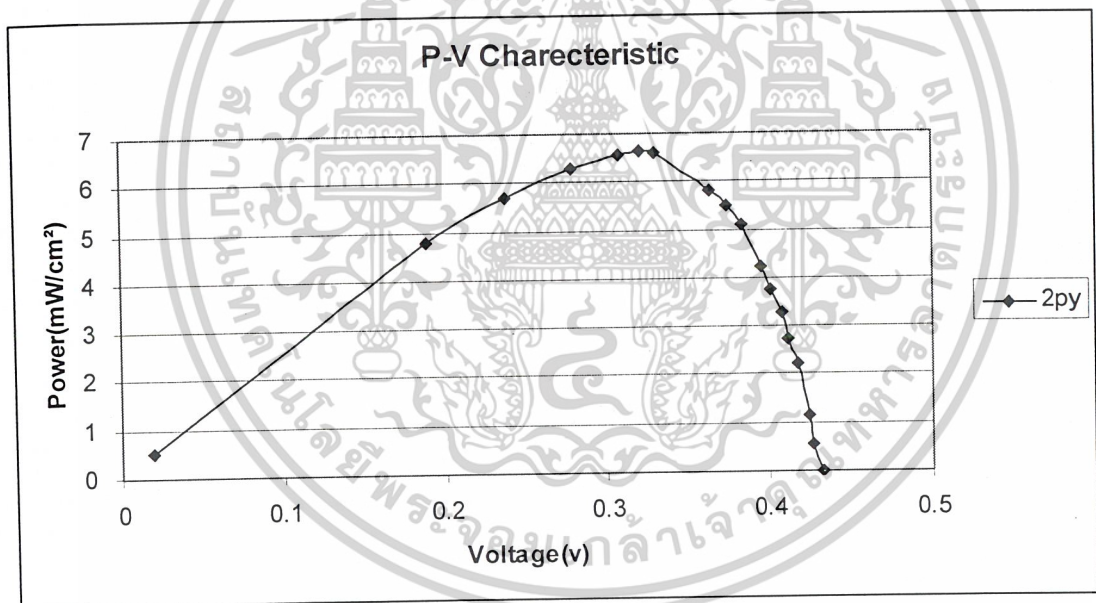
โครงสร้างหลุมพีระมิด

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.18 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด



รูปที่ 5.3.19 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

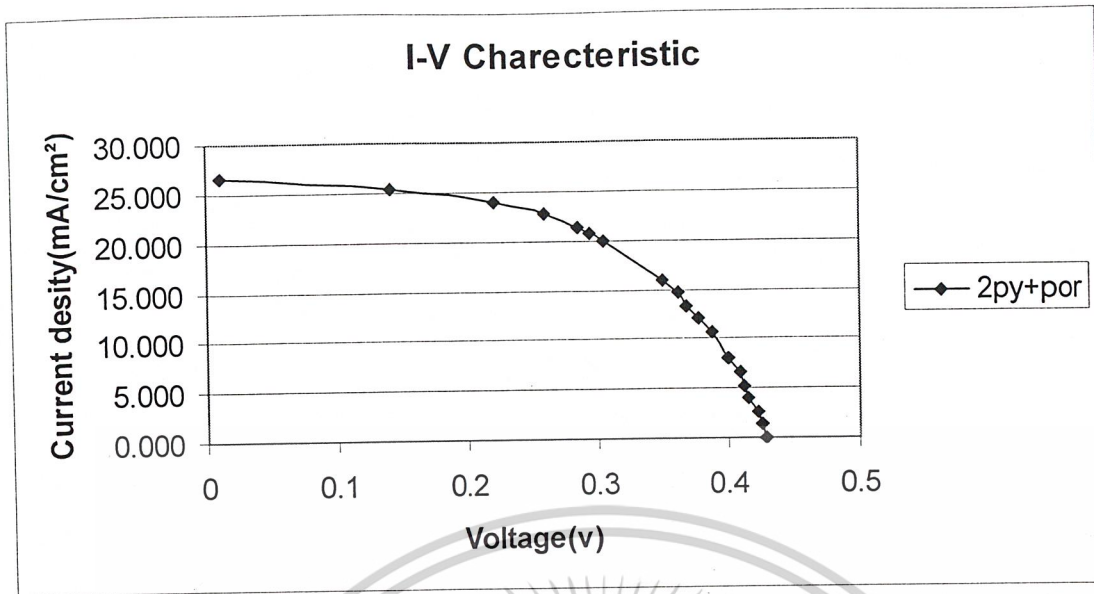
ตารางที่ 5.4 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และพอร์สซิลิกอน

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	EFF (%)
2/pypr	0.444	20	0	0.429	0		0.000	0.000	0.515	7.408
			1	0.426	0.426		1.333	0.568		
			2	0.423	0.846		2.667	1.128		
			3	0.415	1.245		4.000	1.660		
			4	0.413	1.652		5.333	2.203		
			5	0.409	2.045		6.667	2.727		
			6	0.4	2.4		8.000	3.200		
			8	0.388	3.104		10.667	4.139		
			9	0.377	3.393		12.000	4.524		
			10	0.369	3.69		13.333	4.920		
			11	0.362	3.982		14.667	5.309		
			12	0.35	4.2		16.000	5.600		
			15	0.305	4.575		20.000	6.100		
			15.5	0.295	4.5725		20.667	6.097		
			16	0.285	4.56		21.333	6.080		
			17	0.26	4.42		22.667	5.893		
			18	0.22	3.96		24.000	5.280		
			19	0.14	2.66		25.333	3.547		
			20	0.01	0.2		26.667	0.267		

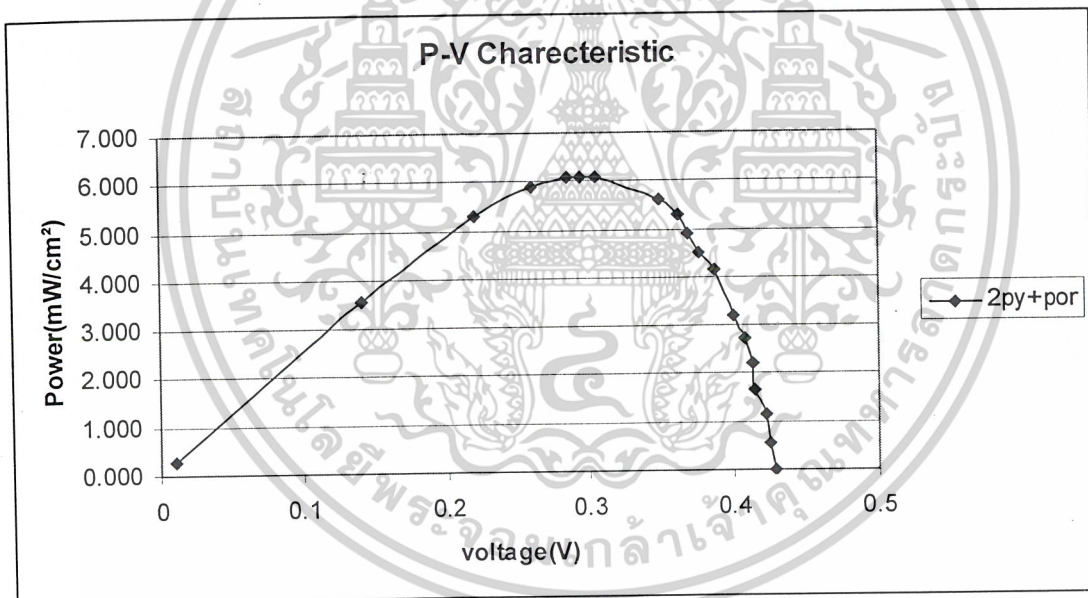
ความเข้มแสง	=	125.000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I _{sc})	=	20 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V _{oc})	=	0.444 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P _o)	=	8.88 mW
ความเข้มกระแส (J _{sc})	=	26.67 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I _m)	=	15.5 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V _m)	=	0.295 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P _m)	=	4.5725 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.515
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	7.408 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.75 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		

โครงสร้างหลุมพีระมิด และ ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.20 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด+พอร์สซิลิกอน



รูปที่ 5.3.21 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด+พอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้างหลุมพีระมิดและสนามไฟฟ้าด้านหลัง

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	Eff (%)
3/py	0.423	26	0	0.37	0	0.7	0.000	0.000	0.398	7.594
			1	0.366	0.366		1.429	0.523		
			4	0.353	1.412		5.714	2.017		
			5	0.349	1.745		7.143	2.493		
			7	0.337	2.359		10.000	3.370		
			8	0.33	2.64		11.429	3.771		
			9	0.325	2.925		12.857	4.179		
			13	0.298	3.874		18.571	5.534		
			14	0.286	4.004		20.000	5.720		
			15	0.276	4.14		21.429	5.914		
			16	0.266	4.256		22.857	6.080		
			17	0.256	4.352		24.286	6.217		
			17.5	0.25	4.375		25.000	6.250		
			18	0.24	4.32		25.714	6.171		
			19	0.225	4.275		27.143	6.107		
			20	0.21	4.2		28.571	6.000		
			22	0.161	3.542		31.429	5.060		
			23	0.123	2.829		32.857	4.041		
			25	0.02	0.5		35.714	0.714		

ความเข้มแสง = 125,000 lx.

กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}) = 26 mA

แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) = 0.423 V

พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0) = 10.998 mW

ความเข้มกระแส (J_{sc}) = 37.14 mA/cm²

กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m) = 17.5 mA

แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m) = 0.25 V

ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m) = 4.375 mW

ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.) = 0.398

ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η) = 7.6 %

พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area) = 0.70 cm²

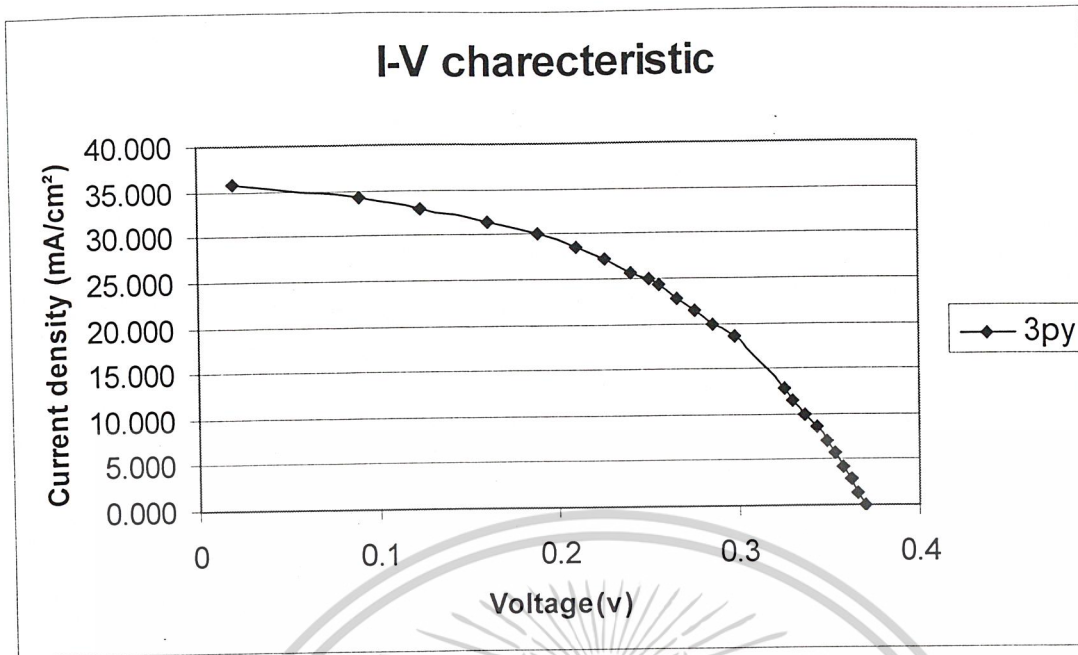
อุณหภูมิ (Temp.) = 20 °c

โครงสร้างอื่นๆ

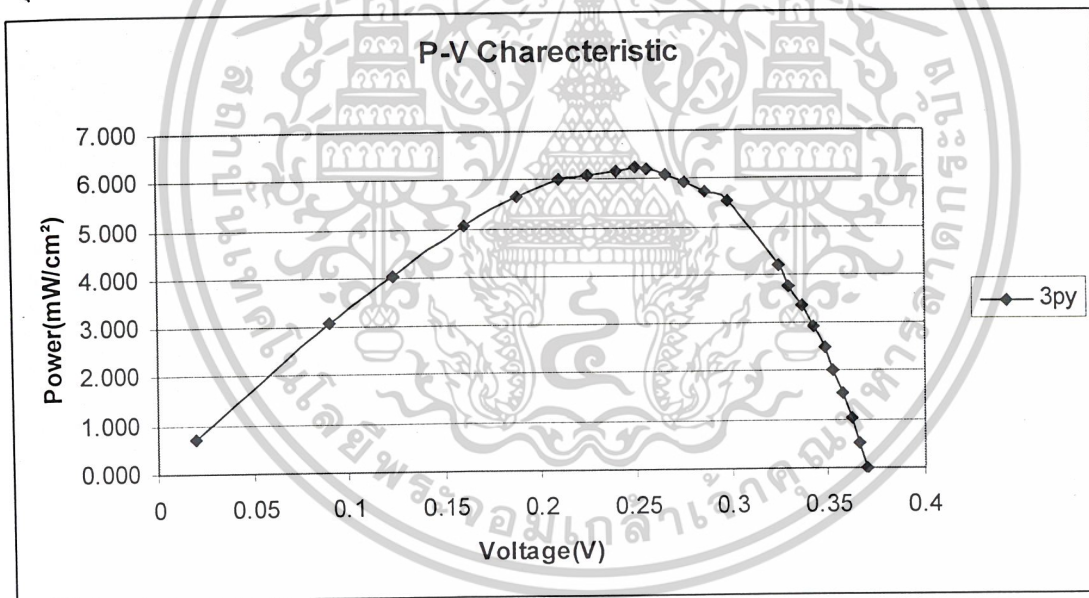
โครงสร้างหลุมพีระมิด

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ หนาประมาณ 1000 อังสตรอม และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.22 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้างหลุมพีระมิดและ สนามไฟฟ้าด้านหลัง



รูปที่ 5.3.23 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้างหลุมพีระมิดและสนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้างหลุมพีระมิดพอร์ซซลิคอนและ สนามไฟฟ้าด้านหลัง

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	Eff (%)
3 py/pr	0.423	18	0	0.4	0	0.7	0.000	0.000	0.546	7.217
			1	0.397	0.397		1.429	0.567		
			2	0.393	0.786		2.857	1.123		
			3	0.389	1.167		4.286	1.667		
			4	0.383	1.532		5.714	2.189		
			5	0.379	1.895		7.143	2.707		
			6	0.371	2.226		8.571	3.180		
			7	0.365	2.555		10.000	3.650		
			8	0.358	2.864		11.429	4.091		
			9	0.351	3.159		12.857	4.513		
			10	0.344	3.44		14.286	4.914		
			14	0.297	4.158		20.000	5.940		
			15	0.273	4.095		21.429	5.850		
			16	0.239	3.824		22.857	5.463		
			17	0.181	3.077		24.286	4.396		
			18	0.02	0.36		25.714	0.514		

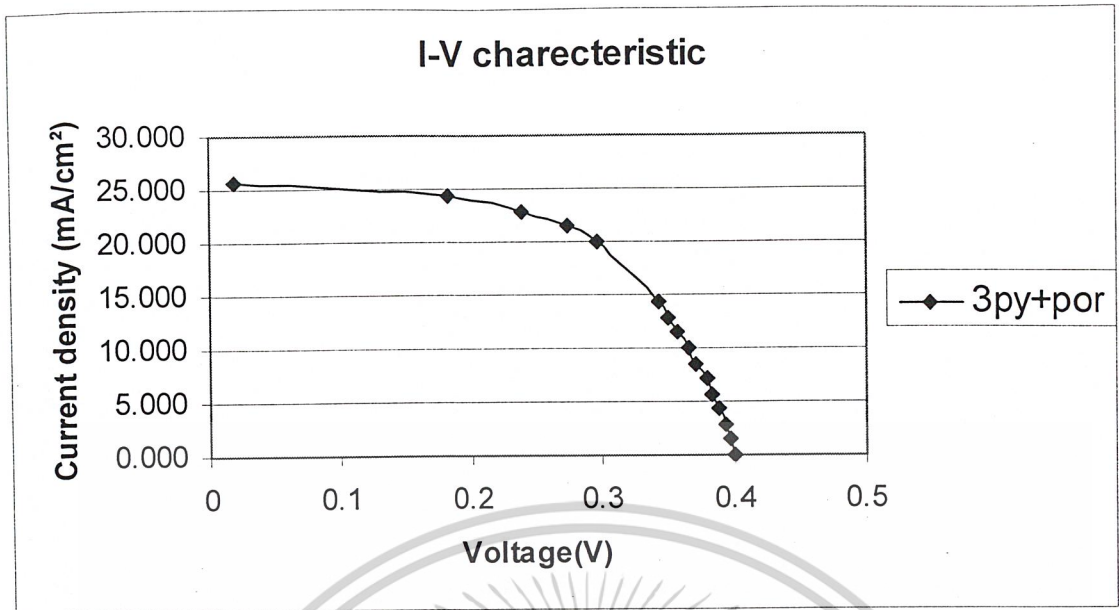
ความเข้มแสง	=	125.000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I _{sc})	=	18 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V _{oc})	=	0.423 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P _o)	=	7.614 mW
ความเข้มกระแส (J _{sc})	=	25.714 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I _m)	=	14 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V _m)	=	0.297 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P _m)	=	4.158 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.546
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	7.217 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.70 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		

โครงสร้างหลุมพีระมิด

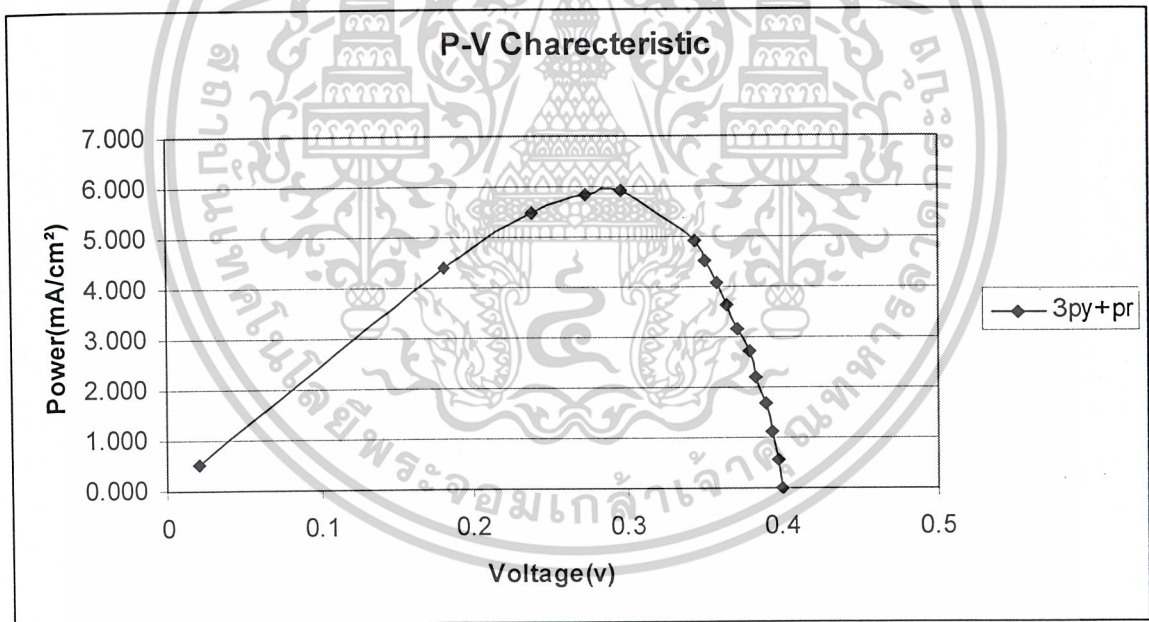
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นพอร์ซซลิคอน

สนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.24 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอนและ สนามไฟฟ้าด้านหลัง



รูปที่ 5.3.25 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอนและ สนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	EFF (%)
5 / py	0.433	18	0	0.431	0	0.7	0.000	0.000	0.584	7.988
			1	0.423	0.423		1.429	0.604		
			3	0.414	1.242		4.286	1.774		
			4	0.407	1.628		5.714	2.326		
			5	0.403	2.015		7.143	2.879		
			6	0.396	2.376		8.571	3.394		
			7	0.39	2.73		10.000	3.900		
			8	0.383	3.064		11.429	4.377		
			9	0.377	3.393		12.857	4.847		
			10	0.368	3.68		14.286	5.257		
			11	0.36	3.96		15.714	5.657		
			14	0.325	4.55		20.000	6.500		
			14.75	0.312	4.602		21.071	6.574		
			15	0.305	4.575		21.429	6.536		
			16	0.28	4.48		22.857	6.400		
			17	0.225	3.825		24.286	5.464		
			17.5	0.02	0.35		25.000	0.500		

ความเข้มแสง = 125,000 lx.

กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}) = 18 mA

แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) = 0.433 V

พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0) = 7.794 mW

ความเข้มกระแส (J_{sc}) = 25.714 mA/cm²

กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m) = 14.75 mA

แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m) = 0.312 V

ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m) = 4.602 mW

ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.) = 0.584

ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η) = 7.988 %

พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area) = 0.70 cm²

อุณหภูมิ ($T_{cmp.}$) = 20 °c

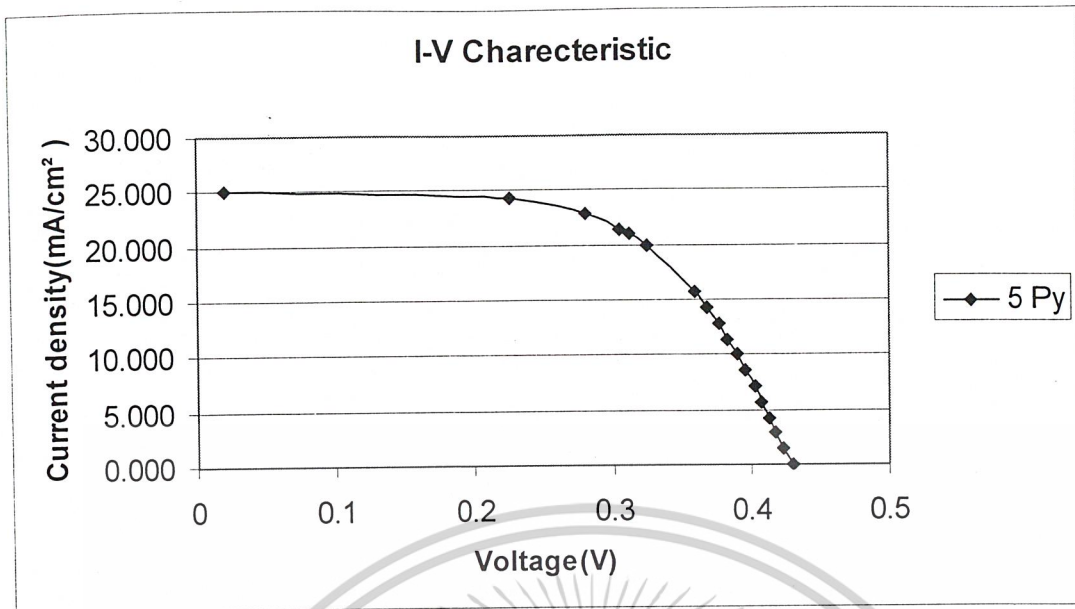
โครงสร้างอื่นๆ

โครงสร้างหลุมพีระมิด

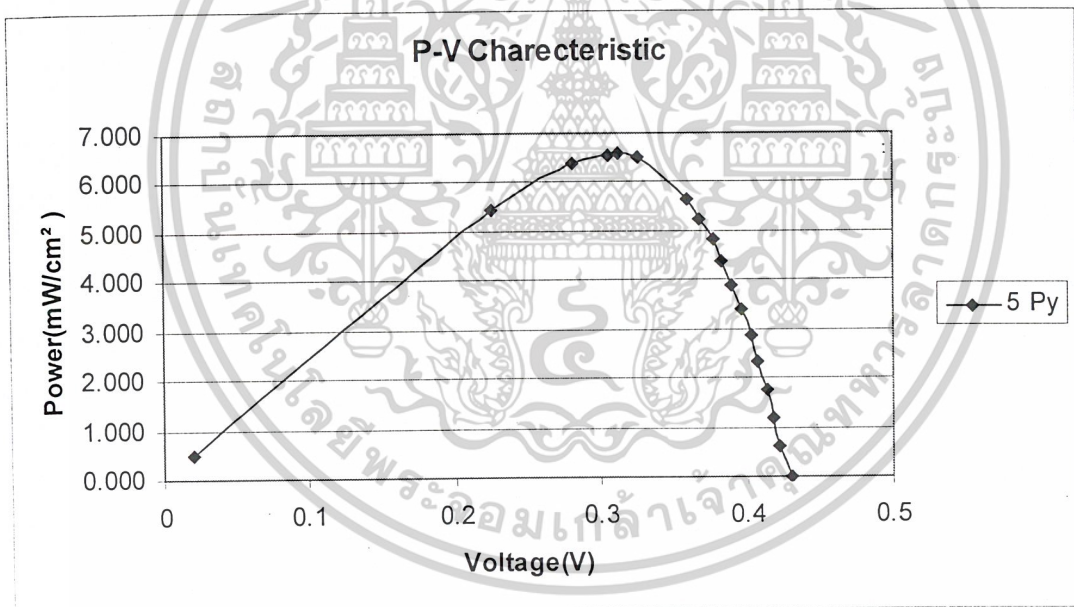
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม

สนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.26 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง



รูปที่ 5.3.27 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน และสนามไฟฟ้าด้านหลัง

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	Eff (%)
5 / pypir	0.436	18	0	0.436	0	0.74	0.000	0.000	0.631	8.133
			1	0.43	0.43		1.351	0.581		
			2	0.425	0.85		2.703	1.149		
			3	0.42	1.26		4.054	1.703		
			4	0.416	1.664		5.405	2.249		
			5	0.41	2.05		6.757	2.770		
			6	0.405	2.43		8.108	3.284		
			7	0.4	2.8		9.459	3.784		
			8	0.395	3.16		10.811	4.270		
			9	0.39	3.51		12.162	4.743		
			10	0.38	3.8		13.514	5.135		
			11	0.373	4.103		14.865	5.545		
			14	0.34	4.76		18.919	6.432		
			15	0.327	4.905		20.270	6.628		
			15.75	0.3145	4.9534		21.284	6.694		
			16	0.303	4.848		21.622	6.551		
			17	0.23	3.91		22.973	5.284		
			18	0.023	0.414		24.324	0.559		

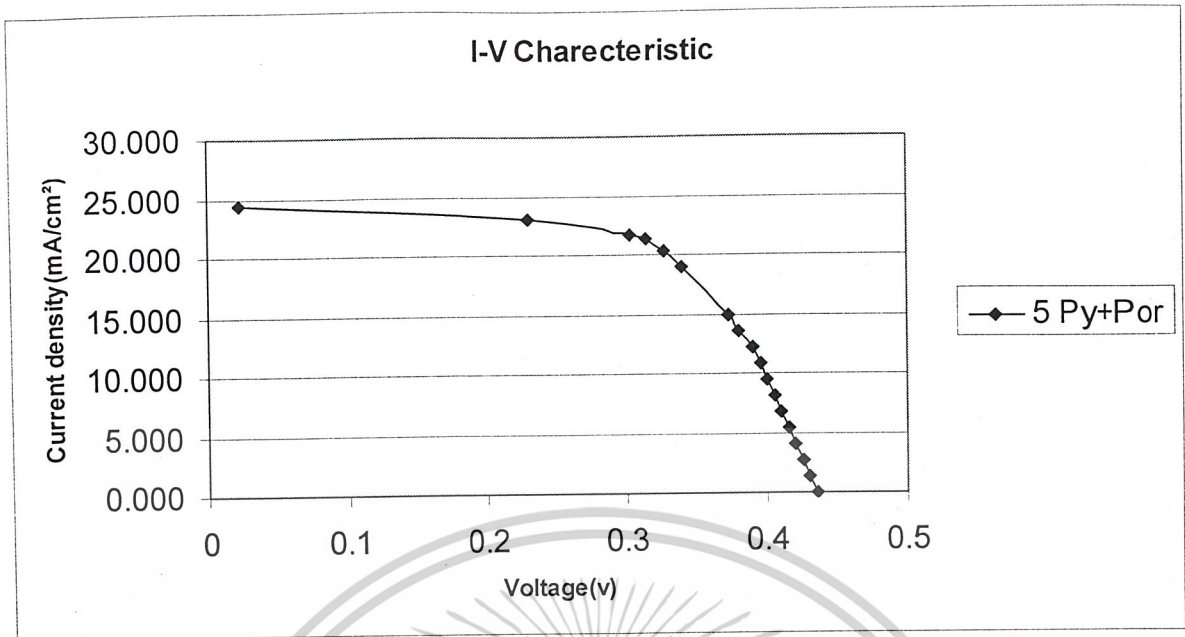
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	18 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.436 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_m)	=	7.848 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	25.714 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	15.75 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.3145 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.9534 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.631
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	8.133 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.74 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		

โครงสร้างหลุมพีระมิด

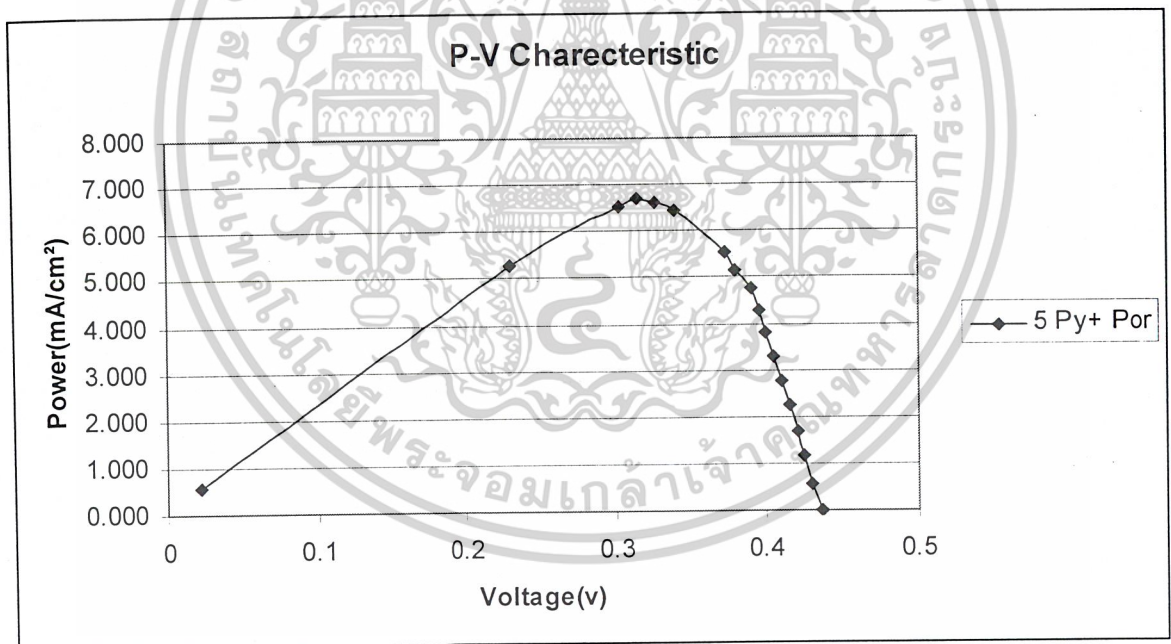
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นพอร์สซิลิกอน

สนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.28 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และสนามไฟฟ้าด้านหลัง



รูปที่ 5.3.29 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 5 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และสนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด และ สวมไฟฟ้าด้านหลัง

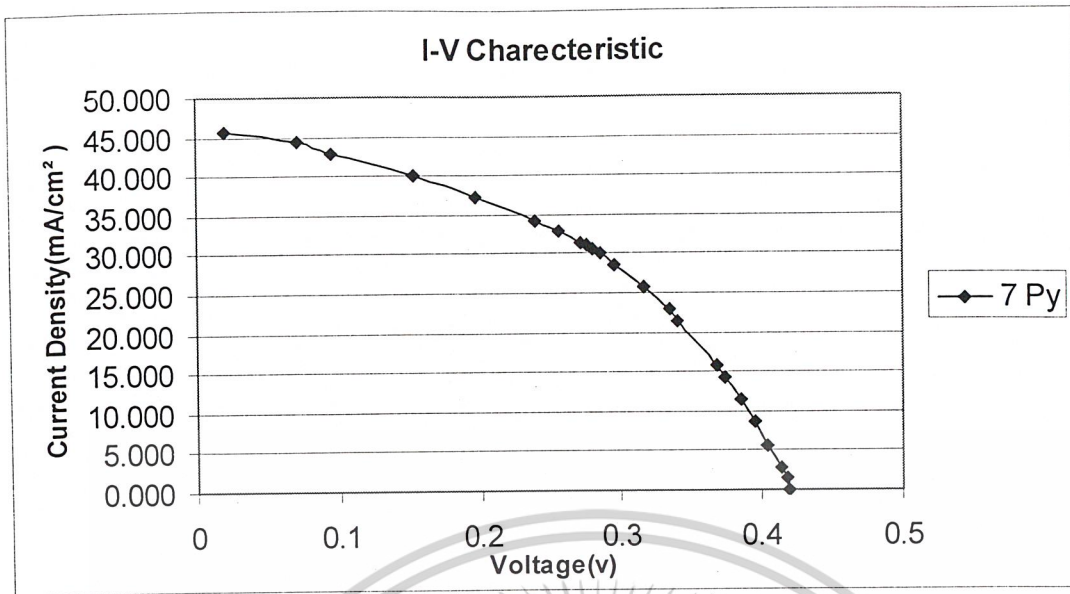
	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	Eff (%)
7/py	0.46	32	0	0.42	0	0.7	0.000	0.000	0.408	10.420
			1	0.418	0.418		1.429	0.597		
			2	0.414	0.828		2.857	1.183		
			4	0.404	1.616		5.714	2.309		
			6	0.395	2.37		8.571	3.386		
			8	0.385	3.08		11.429	4.400		
			10	0.374	3.74		14.286	5.343		
			11	0.368	4.048		15.714	5.783		
			15	0.34	5.1		21.429	7.286		
			18	0.317	5.706		25.714	8.151		
			20	0.295	5.9		28.571	8.429		
			21	0.285	5.985		30.000	8.550		
			21.5	0.279	5.9985		30.714	8.569		
			21.75	0.276	6.003		31.071	8.576		
			22	0.271	5.962		31.429	8.517		
			24	0.239	5.736		34.286	8.194		
			26	0.197	5.122		37.143	7.317		
			28	0.152	4.256		40.000	6.080		
			30	0.095	2.85		42.857	4.071		
			32	0.02	0.64		45.714	0.914		

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	32 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.46 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_m)	=	14.72 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	45.714 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	21.75 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.276 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	6.003 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.408
ค่าประสิทธิภาพของการแปลงพลังงาน (η)	=	10.42 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.70 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		

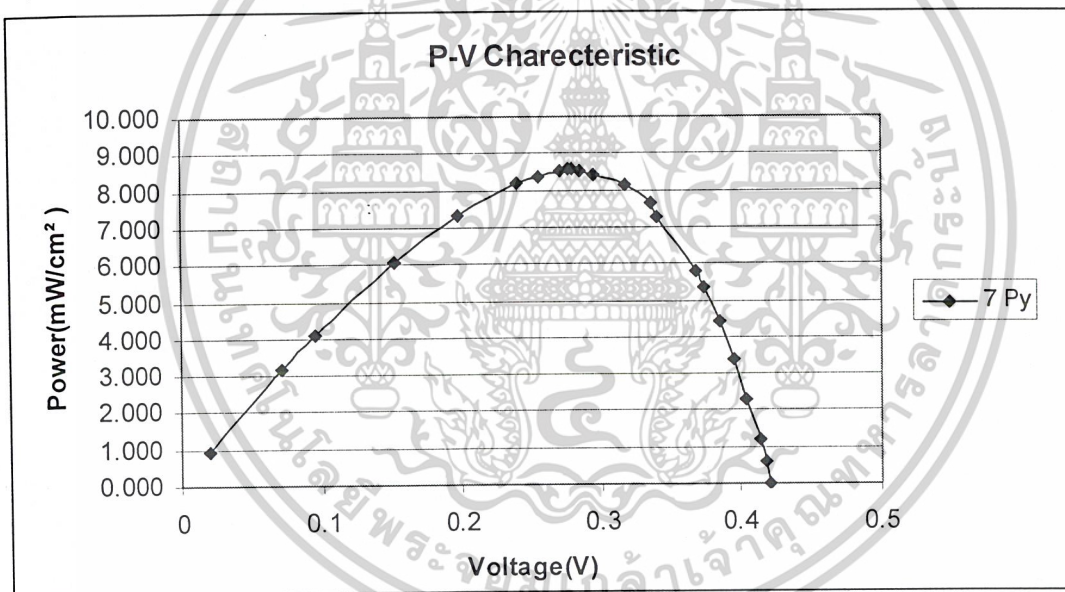
โครงสร้างหลุมพีระมิด ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิกอน ไดออกไซด์หนาประมาณ 1000

อังสตรอมและสวมไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.30 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง



รูปที่ 5.3.31 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และ สนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

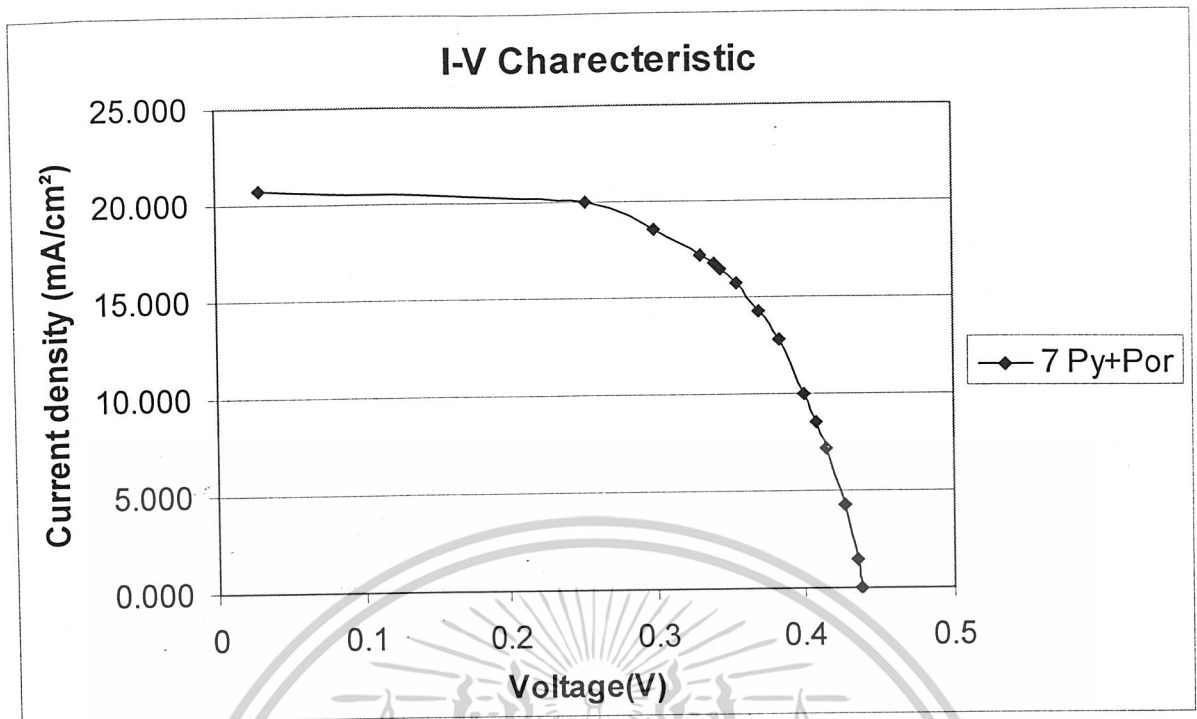
ตารางที่ 5.10 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน และ สวมไฟฟ้าด้านหลัง

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	EFF (%)
7/pypr	0.444	16	0	0.437	0	0.7	0.000	0.000	0.561	6.914
			1	0.435	0.435		1.429	0.621		
			3	0.426	1.278		4.286	1.826		
			5	0.415	2.075		7.143	2.964		
			6	0.407	2.442		8.571	3.489		
			7	0.4	2.8		10.000	4.000		
			9	0.383	3.447		12.857	4.924		
			10	0.37	3.7		14.286	5.286		
			11	0.355	3.905		15.714	5.579		
			11.5	0.344	3.956		16.429	5.651		
			11.75	0.34	4		16.786	5.690		
			12	0.33	3.96		17.143	5.657		
			13	0.299	3.887		18.571	5.553		
			14	0.253	3.542		20.000	5.060		
			14.5	0.03	0.435		20.714	0.621		

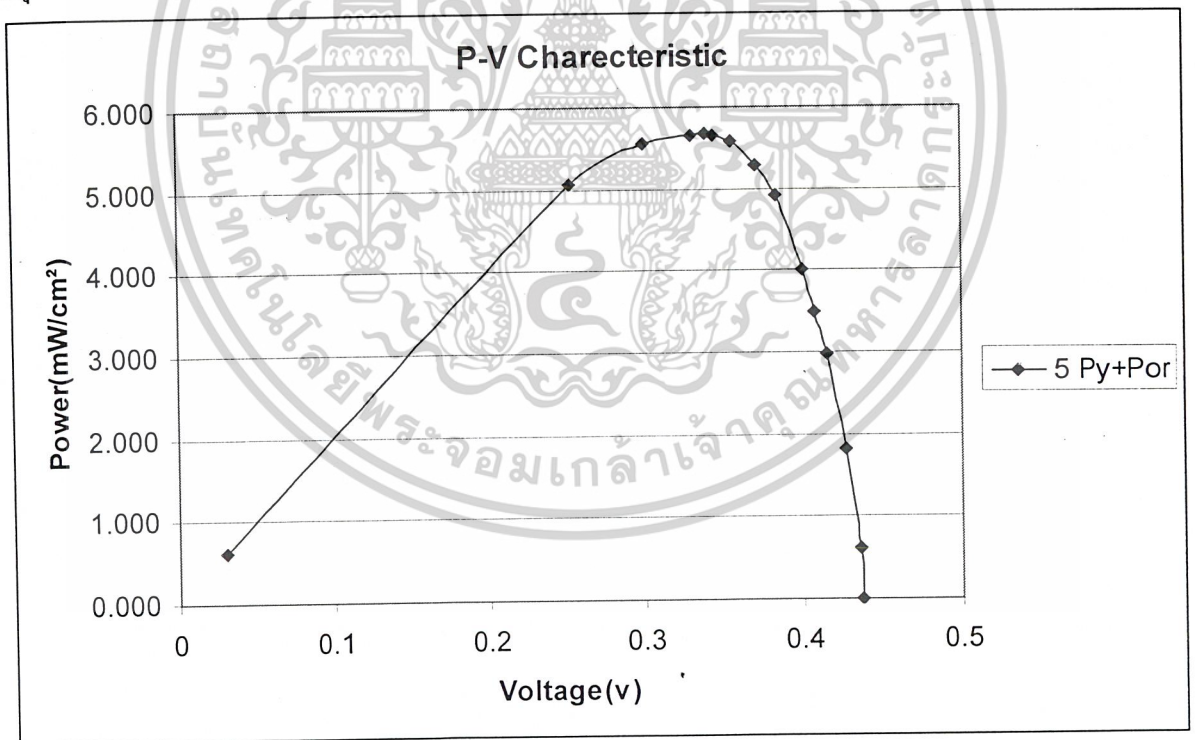
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	16 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.444 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_m)	=	7.104 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	22.86 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	11.75 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.34 V
กำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.561
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	6.914 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.70 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		

โครงสร้างหลุมพีระมิด

ชั้นคลการสะท้อนแสงเป็นพอร์สซิลิกอน และ สวมไฟฟ้าด้านหลัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.32 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน และสนามไฟฟ้าด้านหลัง



รูปที่ 5.3.33 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 7 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน และสนามไฟฟ้าด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 9 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด พอร์สซิลิกอน

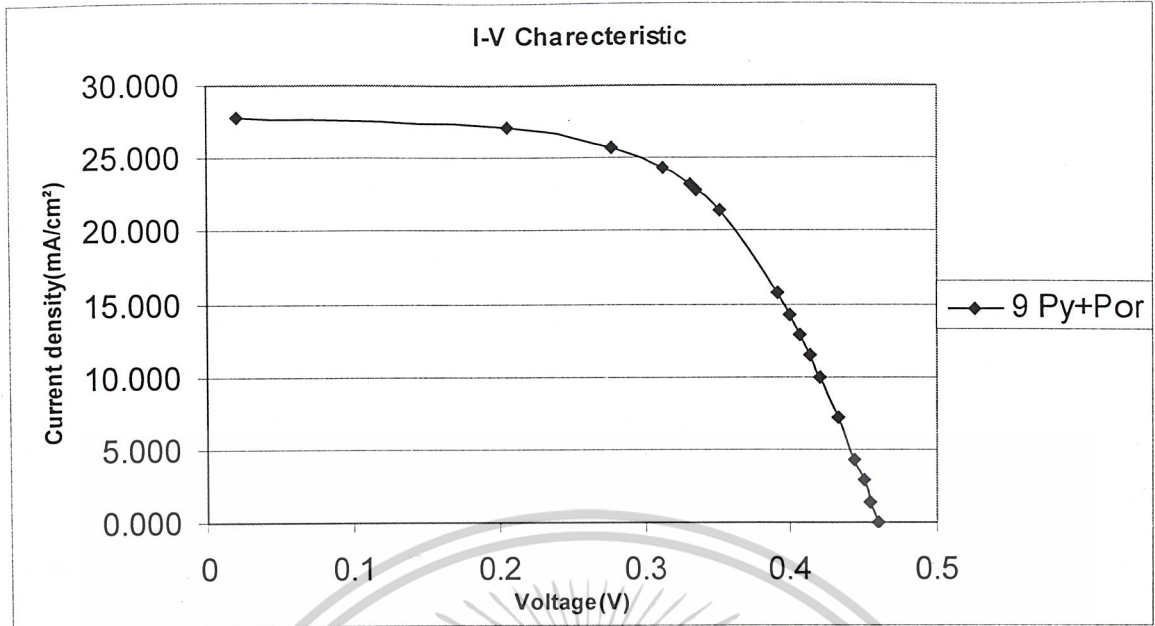
	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F	Eff (%)
9/pypr	0.494	20	0	0.46	0	0.7	0.000	0.000	0.544	9.336
			1	0.455	0.455		1.429	0.650		
			3	0.444	1.332		4.286	1.903		
			5	0.433	2.165		7.143	3.093		
			7	0.42	2.94		10.000	4.200		
			8	0.414	3.312		11.429	4.731		
			9	0.407	3.663		12.857	5.233		
			10	0.4	4		14.286	5.714		
			11	0.392	4.312		15.714	6.160		
			15	0.352	5.28		21.429	7.543		
			16	0.336	5.376		22.857	7.680		
			16.25	0.331	5.37875		23.214	7.684		
			17	0.313	5.321		24.286	7.601		
			18	0.277	4.986		25.714	7.123		
			19	0.205	3.895		27.143	5.564		
			19.5	0.02	0.39		27.857	0.557		

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	20 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.494 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	9.88 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	28.57 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	16.25 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.331 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.38 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.544
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	9.336 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.70 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		

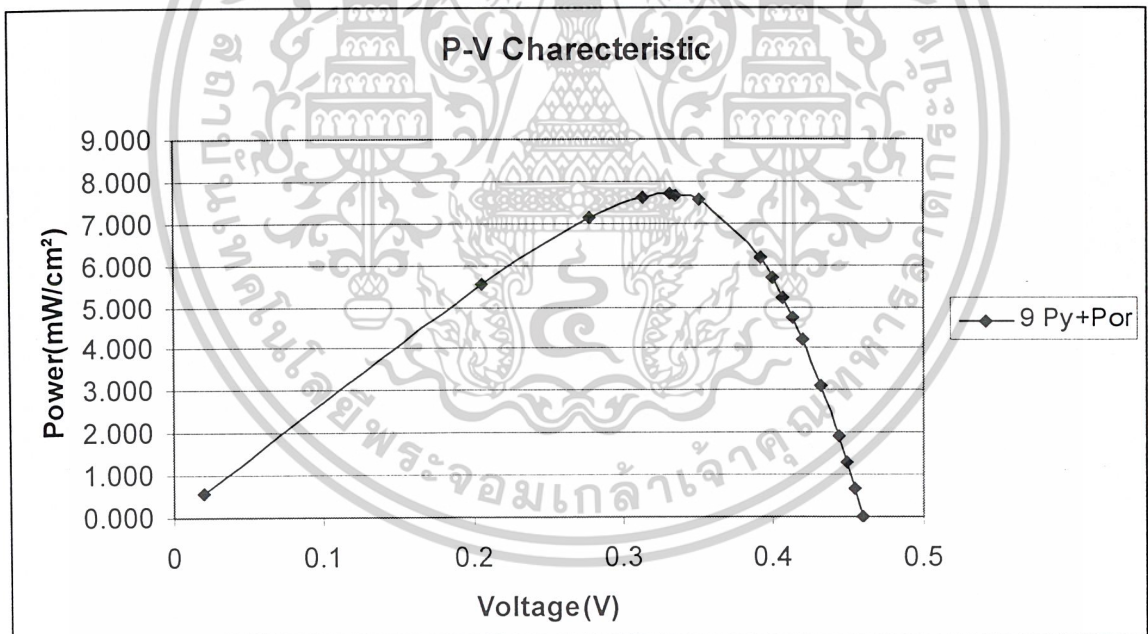
โครงสร้างหลุมพีระมิด

ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.34 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 9 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิดและพอร์ซซิลิคอน



รูปที่ 5.3.35 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 9 มีโครงสร้าง หลุมพีระมิด และพอร์ซซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

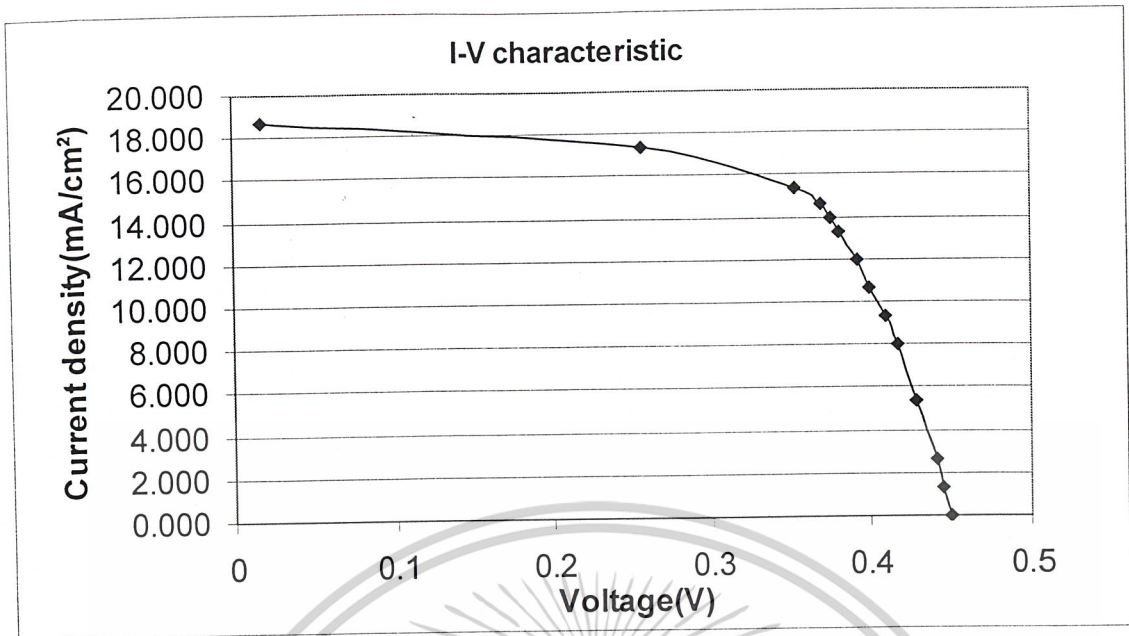
ตารางที่ 5.12 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 11 มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิกอนไดออกไซด์

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F.	Eff (%)
11/nor	0.481	14	0	0.45	0	0.75	0.000	0.000	0.603	6.577
			1	0.445	0.445		1.333	0.593		
			2	0.441	0.882		2.667	1.176		
			4	0.429	1.716		5.333	2.288		
			6	0.417	2.502		8.000	3.336		
			7	0.409	2.863		9.333	3.817		
			8	0.4	3.2		10.667	4.267		
			9	0.392	3.528		12.000	4.704		
			10	0.381	3.81		13.333	5.080		
			10.5	0.375	3.9375		14.000	5.250		
			11	0.369	4.059		14.667	5.412		
			11.5	0.353	4.0595		15.333	5.413		
			13	0.256	3.328		17.333	4.437		
			14	0.018	0.252		18.667	0.336		

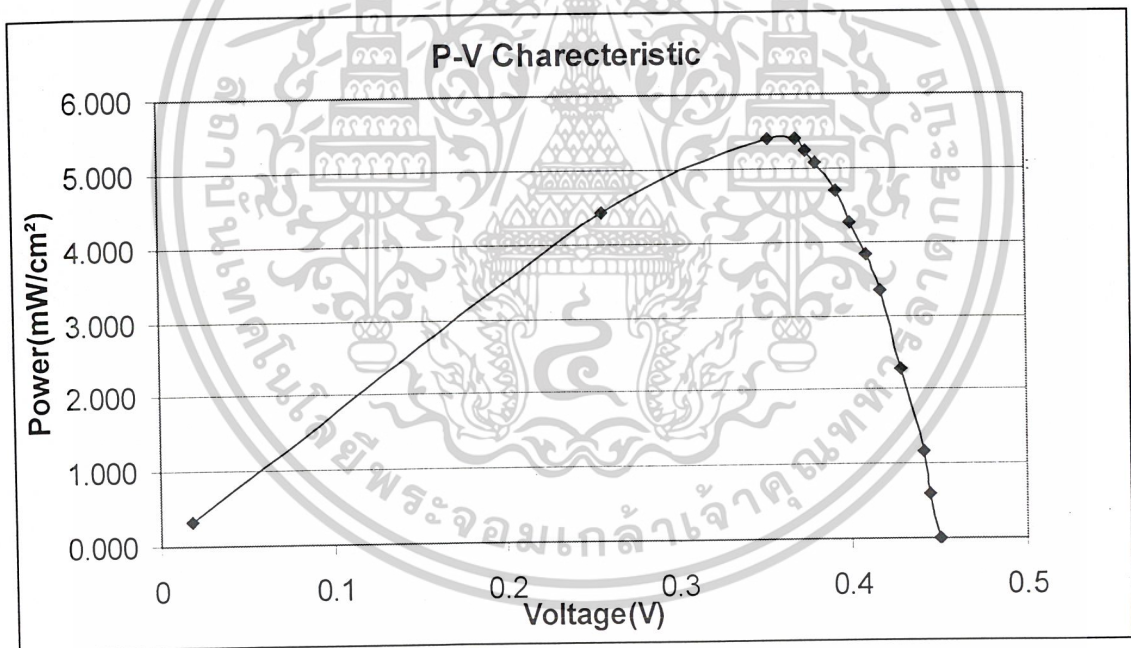
ความเข้มแสง	=	125.000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I _{sc})	=	14 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V _{oc})	=	0.481 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P ₀)	=	6.734 mW
ความเข้มกระแส (J _{sc})	=	18.667 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I _m)	=	11.5 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V _m)	=	0.353 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P _m)	=	4.0595 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.603
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	6.577 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.75 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		

ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.36 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 11 มีโครงสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิกอน ไดออกไซด์



รูปที่ 5.3.37 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 11 มีโครงสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิกอน ไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

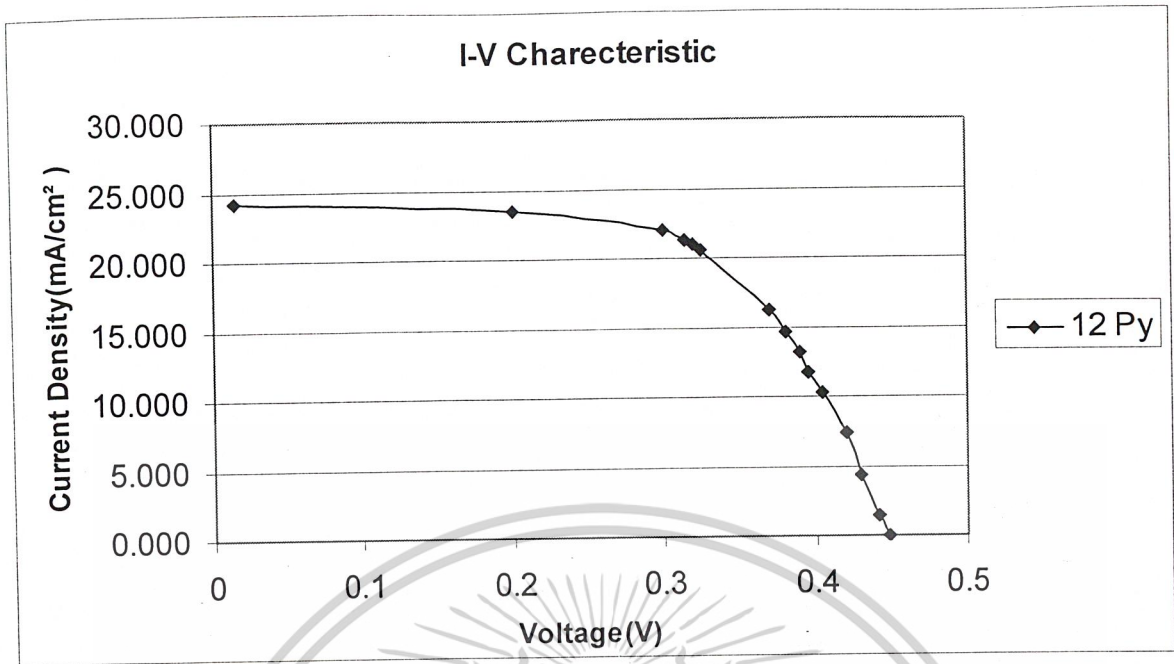
ตารางที่ 5.13 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด

	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F.	EFF (%)
12/py	0.495	17	0	0.448	0	0.68	0.000	0.000	0.542	8.148
			1	0.442	0.442		1.471	0.650		
			3	0.43	1.29		4.412	1.897		
			5	0.42	2.1		7.353	3.088		
			7	0.405	2.835		10.294	4.169		
			8	0.395	3.16		11.765	4.647		
			9	0.39	3.51		13.235	5.162		
			10	0.38	3.8		14.706	5.588		
			11	0.37	4.07		16.176	5.985		
			14	0.325	4.55		20.588	6.691		
			14.25	0.32	4.56		20.956	6.706		
			14.5	0.314	4.553		21.324	6.696		
			15	0.3	4.5		22.059	6.618		
			16	0.2	3.2		23.529	4.706		
			16.5	0.015	0.2475		24.265	0.364		

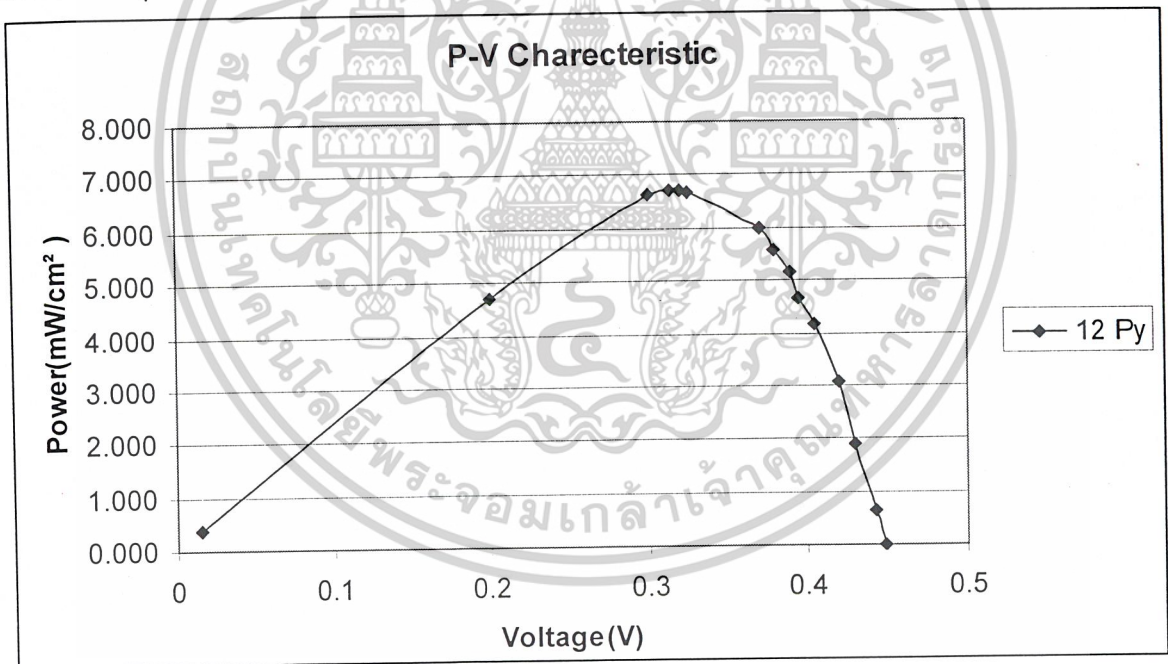
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	17 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.495 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	8.415 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	25.00 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	14.25 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.32 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.56 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.542
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	8.148 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.68 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		

โครงสร้างหลุมพีระมิด

ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.38 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด



รูปที่ 5.3.39 กราฟ แสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างหลุมพีระมิด

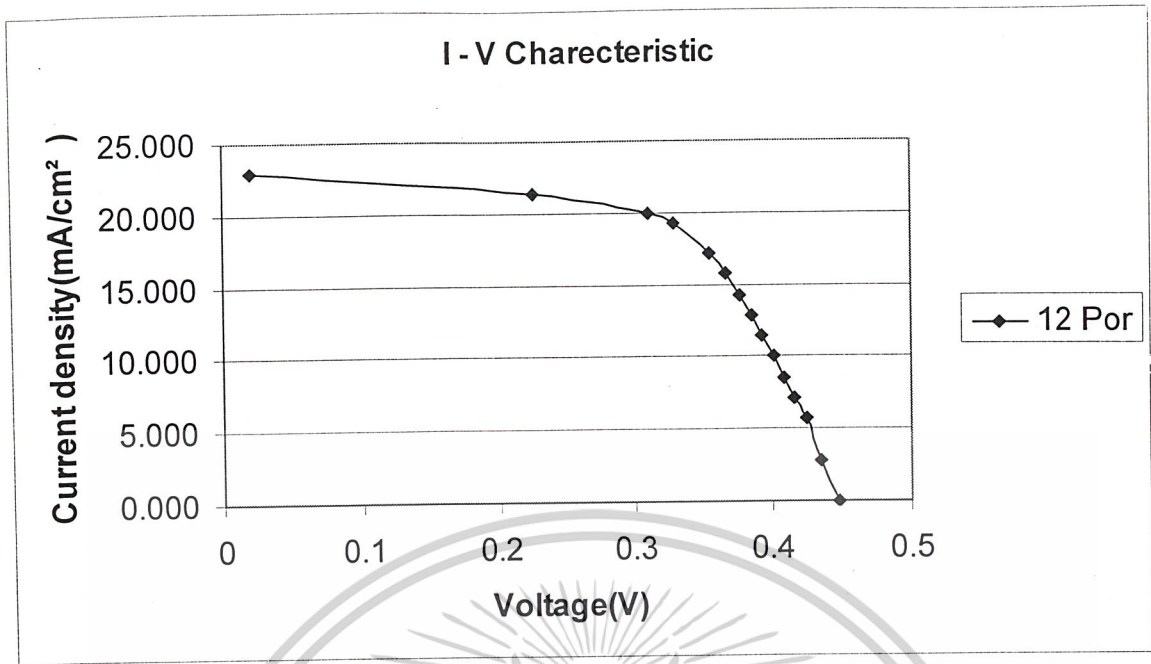
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5. 14 เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 12 มีโครงสร้างพอร์สซิลิกอน

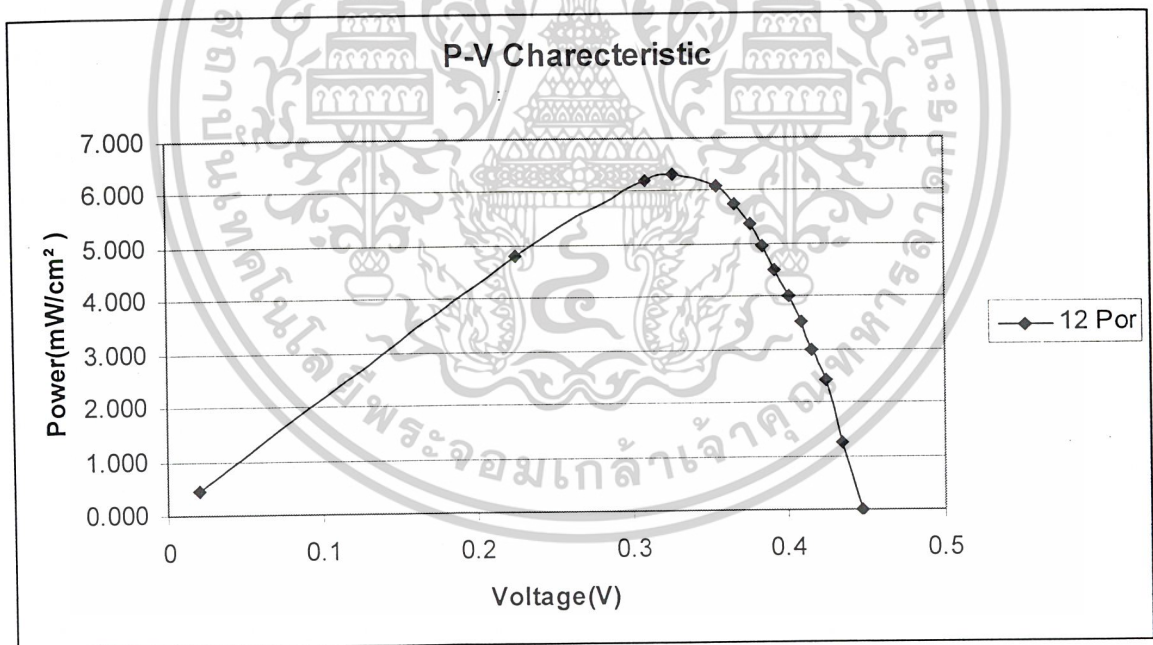
	Voc (v)	Isc (mA)	I (mA)	V (v)	P (mW)	พื้นที่รับแสง (cm ²)	J (mA/cm ²)	W (mW/cm ²)	F.F.	Eff (%)
12/pr	0.494	16	0	0.448	0	0.7	0.000	0.000	0.560	7.686
			2	0.435	0.87		2.857	1.243		
			4	0.424	1.696		5.714	2.423		
			5	0.416	2.08		7.143	2.971		
			6	0.409	2.454		8.571	3.506		
			7	0.401	2.807		10.000	4.010		
			8	0.393	3.144		11.429	4.491		
			9	0.385	3.465		12.857	4.950		
			10	0.377	3.77		14.286	5.386		
			11	0.367	4.037		15.714	5.767		
			12	0.355	4.26		17.143	6.086		
			13.5	0.328	4.428		19.286	6.326		
			14	0.31	4.34		20.000	6.200		
			15	0.225	3.375		21.429	4.821		
			16	0.02	0.32		22.857	0.457		

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	16 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.494 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	7.904 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	22.857 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	13.5mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.328 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.428 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.560
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน ()	=	7.686 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.70cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
โครงสร้างอื่นๆ		
ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นพอร์สซิลิกอน		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.40 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างพอร์สซิลิกอน



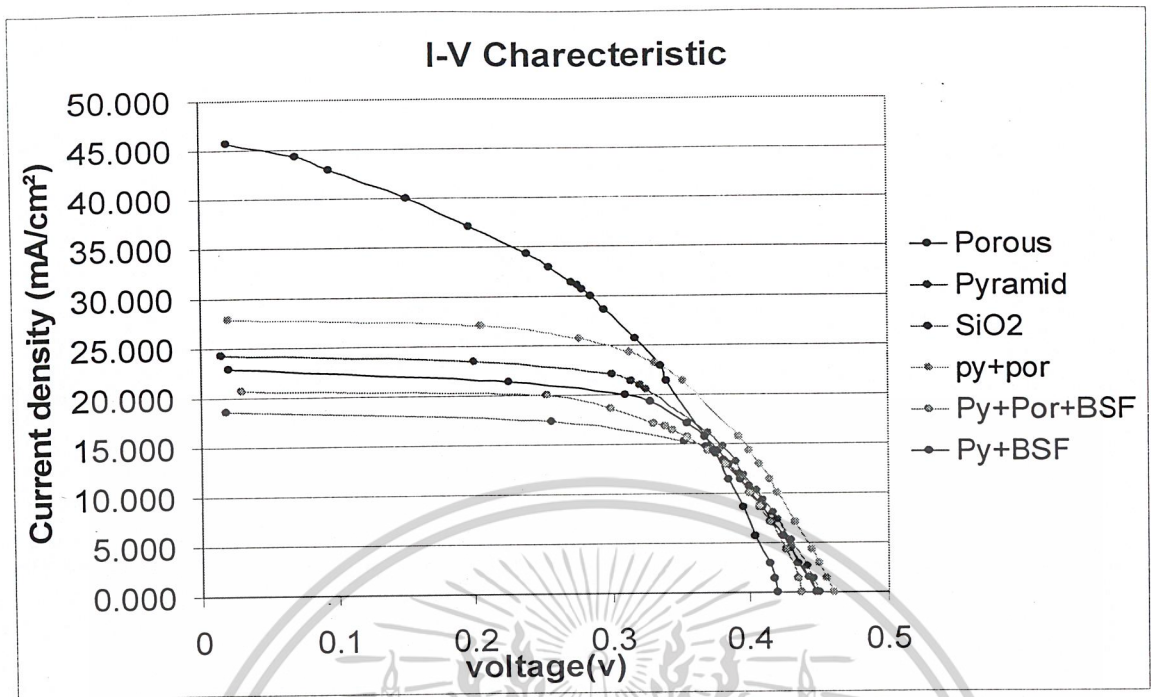
รูปที่ 5.3.41 กราฟแสดงแสดงคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 มีโครงสร้างพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

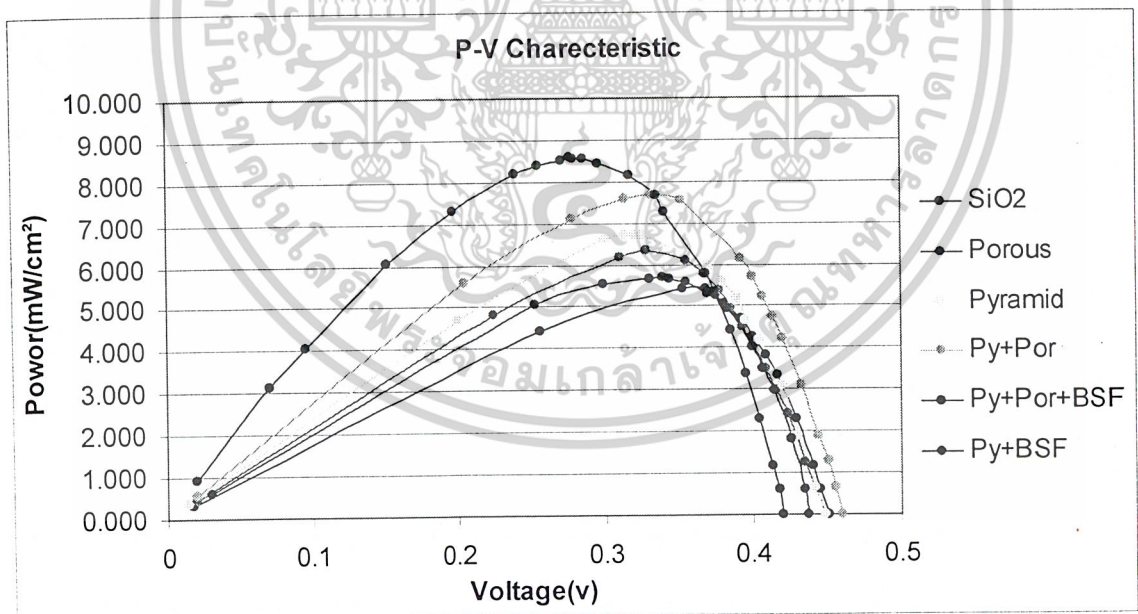
ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด

ชนิดเซลล์	Isc (mA)	Voc (v)	Po (mW)	Jsc (mA/cm ²)	Im (mA)	Vm (v)	Pm (mW)	F.F	Eff (%)
(11)SiO ₂	14	0.48	6.72	18.67	11.5	0.35	4.05	0.603	6.5
(12pr)Porous	16	0.49	7.84	22.86	13.5	0.33	4.43	0.56	7.6
(12py)SiO ₂ + Pyramid	17	0.495	8.42	24.63	14.25	0.32	4.56	0.542	8.15
(9pp)Pyramid+ Porous	20	0.494	9.88	28.57	16.25	0.331	5.38	0.544	9.34
(7py)SiO ₂ Pyramid +BSF	32	0.46	14.72	45.71	21.75	0.28	6.01	0.408	10.42
(7pp)Pyramid +Porous +BSF	16	0.44	7.04	22.85	11.75	0.34	4	5.61	6.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 6 ชนิด



รูปที่ 5.3.43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 6 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 การสร้างโครงสร้างหลุมพีรามิด และการสร้างพอร์สซิลิกอนบนผิวหน้าหลุมพีระมิด

- การสร้างโครงสร้างหลุมพีระมิดบนซิลิกอนระนาบ (100) สามารถประยุกต์สร้างพอร์สซิลิกอนบนผิวหน้านี้ได้

6.1.2 การเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี และ ไม่มีชั้น สนามไฟฟ้าด้านหลัง

- การสร้างชั้น สนามไฟฟ้าด้านหลังจะทำให้เซลล์มีกระแสลัดวงจรสูงขึ้น และเป็นผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

- การทำการ ขับลิก นานขึ้นก็จะทำให้เซลล์มีกระแสลัดวงจรสูงมากขึ้นอีก และประสิทธิภาพก็จะสูงขึ้นเช่นกัน

6.1.3 การเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างหลุมพีระมิด กับโครงสร้างอื่นๆ

- การสร้าง โครงสร้างหลุมพีระมิดบนผิวหน้าทำให้เซลล์มีกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น มากกว่าเซลล์ที่มีเฉพาะชั้นลดการสะท้อนของแสงแบบซิลิกอนไดออกไซด์

- การสร้าง โครงสร้างหลุมพีระมิดและมีพอร์สซิลิกอนทำให้เซลล์มีกระแสลัดวงจรมากกว่าเซลล์ที่มีเฉพาะ โครงสร้างหลุมพีระมิด

- การสร้าง โครงสร้างหลุมพีระมิด มีพอร์สซิลิกอน และ เพิ่มสนามไฟฟ้าด้านหลัง ทำให้เซลล์มีกระแสลัดวงจรมากกว่าเซลล์ที่มีเฉพาะ โครงสร้างหลุมพีระมิดและ มีพอร์สซิลิกอน

6.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

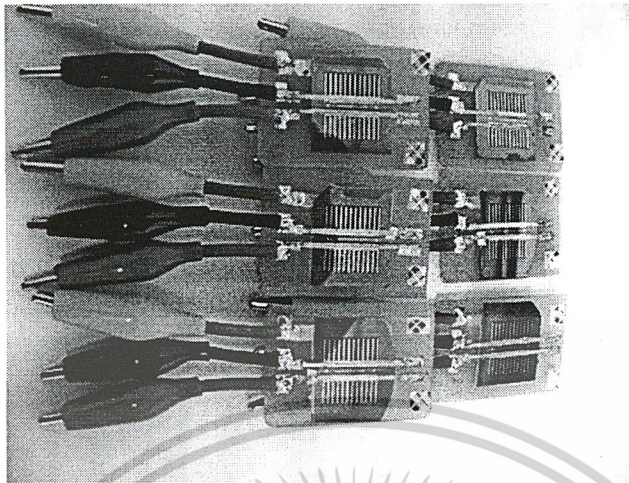
- โครงสร้างหลุมพีรามิดจะทำให้เกิดฟิลแฟกเตอร์(F.F.) ลดลง เนื่องจาก ฟิลแฟกเตอร์ ขึ้นอยู่กับ ความต้านทานอนุกรม สิ่งที่ทำให้เกิด ได้คือ โครงสร้างหลุมพีรามิดจะทำให้เกิดความยาว (L) ของรอยต่อพีเอ็น มากขึ้น และเพราะเป็น โครงสร้างหลุมพีรามิดอาจจะทำให้เกิดความไม่ สม่ำเสมอของสารเจือชนิด เอ็น เมื่อทำการแพร่เข้าไป

- การสร้างชั้นพอร์สบน โครงสร้างที่มีทั้ง สนามไฟฟ้าด้านหลังและ หลุมพีรามิดซึ่งมี ประสิทธิภาพไม่ดีนัก อาจเป็นเพราะกระบวนการสร้างชั้นพอร์สต้องมีการเคลือบน้ำยา ไวแสงเพื่อ ป้องกันลวดลายโลหะ(grid) แต่น้ำยาไวแสงนี้ค้างอยู่ที่ก้นหลุมและทำการล้างน้ำยาไวแสง (Develop) ออกยาก จึงทำให้เกิดพอร์สเฉพาะปากหลุม ที่พื้นที่ในหลุมและก้นหลุมจึงไม่มีชั้น ลดการสะท้อนของแสงซึ่งเป็นความผิดพลาดในกระบวนการสร้าง

- เหตุผลอื่นๆที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ไม่ดีอาจจะเพราะมีความต้านทานจากกาวเงิน

เอกที่ล้มฝั่งระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียมด้านหลังเซลล์เพื่อนำไปใช้งาน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



รูปที่ (ก).1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่หลังจากการเชื่อมต่อ(Bonding) เพื่อนำเอาไปทดสอบคุณสมบัติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Color Chart for Thermally Grown SiO₂

Color Chart Table for thermally grown silicon dioxide films observed perpendicularly under daylight fluorescent lighting. Copyright 1964 by International Business Machines Corporation; reprinted from Volume V INTRODUCTION TO MICROELECTRONIC FABRICATION

Film Thickness (μm)	Color and Comments
0.05	Tan
0.07	Brown
0.10	Dark violet to red violet
0.12	Royal Blue
0.15	Light blue to metallic blue
0.17	Metallic to very light yellow green
0.20	Light gold to yellow; slightly metallic
0.22	Gold with slight yellow orange
0.25	Orange to melon
0.27	Red violet
0.30	Blue to violet blue
0.31	Blue
0.32	Blue to blue green
0.34	Light green
0.35	Green to yellow green
0.36	Yellow green
0.37	Green yellow
0.39	Yellow
0.41	Light orange
0.42	Carnation pink
0.44	Violet red
0.46	Red violet
0.47	Violet
0.48	Blue violet
0.49	Blue
0.50	Blue green
0.52	Green (broad)
0.54	Yellow green
0.56	Green yellow
0.57	Yellow to "yellowish" (not yellow but is in the position where yellow is to be expected; at times appears to be light creamy gray or metallic)

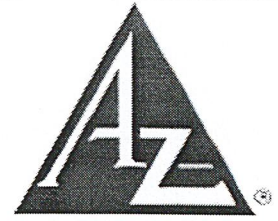
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.58	Light orange or yellow to pink borderline
0.60	Carnation pink
0.63	Violet red
0.68	Bluish" (not blue but borderline between violet and blue green; appears more like a mixture between violet red and blue green and looks grayish)
0.72	Blue green to green (quite broad)
0.77	"Yellowish"
0.80	Orange (rather broad for orange)
0.82	Salmon
0.85	Dull, light red violet
0.86	Violet
0.87	Blue violet
0.89	Blue
0.92	Blue green
0.95	Dull yellow green
0.97	Yellow to "yellowish"
0.99	Orange
1.00	Carnation pink
1.02	Violet red
1.05	Red violet
1.06	Violet
1.07	Blue violet
1.10	Green
1.11	Yellow green
1.12	Green
1.18	Violet
1.19	Red Violet
1.21	Violet red
1.24	Carnation pink to salmon
1.25	Orange
1.28	Yellowish"
1.32	Sky blue to green blue
1.40	Orange
1.45	Violet
1.46	Blue violet
1.50	Blue
1.54	Dull yellow green

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AZ 5214 E

**Image Reversal
Photoresist**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้



GENERAL INFORMATION

This special photoresist is intended for lift-off-techniques which call for a negative wall profile. Although they are positive photoresists (and may even be used in that way) comprised of a novolak resin and naphthoquinone diazide as photoactive compound (PAC) they are capable of image reversal (IR) resulting in a negative pattern of the mask. In fact AZ 5214E is almost exclusively used in the IR-mode.

The image reversal capability is obtained by a special crosslinking agent in the resist formulation which becomes active at temperatures above 110°C and - what is even more important - only in exposed areas of the resist. The crosslinking agent together with exposed PAC leads to an almost insoluble (in developer) and no longer light sensitive substance, while the unexposed areas still behave like a normal unexposed positive photoresist. After a flood exposure (no mask required) this areas are dissolved in standard developer for positive photoresist, the crosslinked areas remain. The overall result is a negative image of the mask pattern.

As everybody knows a positive photoresist profile has a positive slope of 75 - 85° depending on the process conditions and the performance of the exposure equipment (only submicron-resists get close to 90°). This is mainly due to the absorption of the PAC which attenuates the light when penetrating through the resist layer (so called bulk effect). The result is a higher dissolution rate at the top and a lower rate at the bottom of the resist. When AZ 5214E is processed in the IR-mode this is reversed as higher exposed areas will be crosslinked to a higher degree than those with lower dose, dissolution rates accordingly. The final result will be a negative wall profile ideally suited for lift-off.

The most critical parameter of the IR-process is reversal-bake temperature, once optimised it must be kept constant within $\pm 1^\circ\text{C}$ to maintain a consistent process. This temperature also has to be optimised individually. In any case it will fall within the range from 115 to 125°C. If IR-temperature is chosen too high (>130°C) the resist will thermally crosslink also in the unexposed areas, giving no pattern. To find out the suitable temperature following procedure is suggested:

Coat and prebake a few substrates with resist. Without exposing them to UV-light subject them to different reversal-bake temperatures, i.e. 115°, 120°, 125° and 130°C. Now apply a flood exposure of > 200mJ/cm² and afterwards immerse them into a standard developer make up, i.e. AZ 351B, 1:4 diluted, or AZ 726 MIF for 1 minute. From a part of the substrates the resist will be removed, another part (those exposed to a too high temperature) will remain with the resist thermally crosslinked on it. Optimum RB-temperature now is 5° to 10°C below the temperature where crosslinking starts.

The flood exposure is absolutely uncritical as long as sufficient energy is applied to make the unexposed areas soluble. 200 mJ/cm² is a good choice, but 150 - 500 mJ/cm² will have no major influence on the performance.

Finally it should be noted that the imagewise exposure energy is lower than with normal positive processes, generally only half of that. So a good rule of thumb is: compared to a standard positive resist process, imagewise exposure dose should be half of that, flood exposure energy double of that for AZ 5214E IR-processing.

Once understanding and being familiar with this IR-procedure it is quite simple to set up a different process for lift-off. A T-shaped profile can be achieved by the following process sequence:

The prebaked AZ 5214E photoresist is flood exposed (no mask) with a small amount of UV energy, just to generate some exposed PAC at the surface. Now the reversal-bake is performed to partially crosslink this top areas. By this treatment a top layer with a lowered dissolution rate compared to the bulk material is generated. After this the resist is treated like a normal positive photoresist (imagewise exposure and development) to generate a positive image! Due to the lower dissolution rate in the top layer a T-shaped profile with overhanging lips will be the result.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHYSICAL and CHEMICAL PROPERTIES

	AZ 5214E
Solids content [%]	28.3
Viscosity [cSt at 25°C]	24.0
Absorptivity [l/g*cm] at 377nm	0.76
Solvent	methoxy-propyl acetate (PGMEA)
Max. water content [%]	0.50
Spectral sensitivity	310 - 420 nm
Coating characteristic	striation free
Filtration [µm absolute]	0.1

FILM THICKNESS [µm] as FUNCTION of SPIN SPEED (characteristically)

spin speed [rpm]	2000	3000	4000	5000	6000
AZ 5214E	1.98	1.62	1.40	1.25	1.14

PROCESSING GUIDELINES

Dilution and edge bead removal	AZ EBR Solvent
Prebake	110°C, 50", hotplate
Exposure	broadband and monochromatic h- and i-line
Reversal bake	120°C, 2 min., hotplate (most critical step)
Flood exposure	> 200 mJ/cm ² (uncritical)
Development	AZ 351B, 1:4 (tank, spray) or AZ 726 (puddle)
Postbake	120°C, 50s hotplate (optional)
Removal	AZ 100 Remover, conc.

HANDLING ADVISES

Consult the **Material Safety Data Sheets** provided by us or your local agent!

This AZ Photoresists are made up with our patented safer solvent PGMEA. They are **flammable liquids** and should be kept away from oxidants, sparks and open flames.

Protect from light and heat and store in sealed original containers between 0°C and 25°C, exceeding this range to -5°C or +30°C for 24 hours does not adversely affect the properties.

Shelf life is limited and depends on the resist series. The **expiration date** is printed on the label of every bottle below the batch number and coded as **[year/month/day]**.

AZ Photoresists are compatible with most commercially available wafer processing equipment. **Recommended materials** include PTFE, stainless steel and high-density poly-ethylene and -propylene.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The information contained herein is, to the best of our knowledge, true and accurate, but all recommendations are made without guarantee because the conditions of use are beyond our control. There is no implied warranty of merchantability or fitness for purpose of the product or products described here. In submitting this information, no liability is assumed or license or other rights expressed or implied given with respect to any existing or pending patent, patent application, or trademarks. The observance of all regulations and patents is the responsibility of the user.

AZ, the AZ logo, BARLi, Aquatar and Kallista are registered trademarks of Clariant AG.

Clariant GmbH Business Unit Electronic Materials Rheingaustrasse 190 D-65203 Wiesbaden Germany Tel. +49 (611) 962-6867 Fax +49 (611) 962-9207	Clariant Corporation Business Unit Electronic Materials 70 Meister Avenue Somerville, NJ 08876-1252 USA Tel. +1 (908) 429-3500 Fax +1 (908) 429-3631	Clariant (Japan) K.K. Business Unit Electronic Materials 9F Bunkyo Green Court Center 2-28-8 Honkomagome Bunkyo-Ku Tokyo 113, Japan Tel. +81 (3) 5977-7973 Fax +81 (3) 5977-7894	Clariant Industries Ltd. Business Unit Electronic Materials 84-7, Chungdam-dong, Kangnam-ku Seoul Republic of Korea Tel. +82 (2) 510-8000/8442 Fax +82 (2) 514-5918
---	--	--	---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Clariant

บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช : “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [2] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช : “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [3] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช : “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
- [4] Adolf Goetzberger : “*Crystalline Silicon Solar Cells*”, John Wiley & Sons Ltd., 1998
- [5] Hans Joachim Moller : “*Semiconductors for Solar Cell's*”, Artech House, Inc., 1993
- [6] MATIN A.GREEN : “*SOLAR CELLS Operating Principles, Technology and System Application*”, Prentice-Hall, Inc., 1982
- [7] Glenn O. Mallory, *Electroless Plating: Fundamentals And Applications*, American Electroplaters and Surface Finishers Society, 1990
- [8] ศรีเมษ รัตนชัย: “เทคนิคการกัดก้านด้วยซิลิกอนเพื่อเป็นตัวจับอัตราเร่ง” , วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [9] “เทคโนโลยีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์”, ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์