

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของ  
ซิลิคอนโดยวิธีกระจกต้นแบบเดียว

Development of Silicon P-N Junction Solar Cells Fabrication  
by One Mask Process



โดย  
นาย วรจักร์ ไชยทัพ  
นาย สมพงษ์ วงศ์ภักดี

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 624461  
วัน,เดือน,ปี..... 18 ส.ค. 2549

.b. 11620399  
.i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของ  
ซิลิคอนโดยวิธีกระจกต้นแบบเดียว

**Development of Silicon P-N Junction Solar Cells Fabrication  
by One Mask Process**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของ  
ซิลิคอน โดยวิธีกระจกต้นแบบเดียว

Development of Silicon P-N Junction Solar Cells Fabrication by One  
Mask Process

จัดทำโดย

นาย วรจักร ไชยทัฬห

รหัส 46015277

นาย สมพงษ์ วงศ์ภักดี

รหัส 46015284



ปริญญานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบแล้วโดยอาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการ เรื่อง การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน โดยวิธีกระจกต้นแบบเดี่ยวต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ คำสั่งใจ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้ ทำให้การทำโครงการชิ้นนี้มีความก้าวหน้าขึ้นมาก ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ดิชมในโครงการนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และขอขอบคุณ ดร.พอพนธ์ สิชฌนุกฤษฏ์ จาก สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง I-V Tester รวมทั้งนักศึกษาปริญญาโทและเพื่อนนักศึกษาปริญญาตรีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในหลายๆด้าน โดยเฉพาะเรื่องคำแนะนำในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ จึงขอถือโอกาสแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

(นาย วรจักร์ ไชยทัฬห)

(นาย สมพงษ์ วงศ์ภักดี)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็นของซิลิคอนโดยวิธีกระจกต้นแบบเดียว

นาย สมพงษ์ วงศ์ภักดี รหัส 46015284

นาย วรจักร ไซยทัฬห รหัส 46015277

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2548

### บทคัดย่อ

เป้าหมายของการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันและอนาคต คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและราคาถูกในงานวิจัยนี้ ได้เสนอการทดลอง และผลการทดลองในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี - เอ็น ของผลึกรูปเดี่ยวซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูก โดยการนำชั้นพอร์ซิลิคอนมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากชั้นพอร์ซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษ สามารถดูดกลืนแสง และลดการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถสร้างขึ้นบนผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนได้โดยง่ายและประหยัดที่สุด ด้วยเทคนิคการกัดข้อมติในสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และน้ำ และอาศัยเทคนิค การเลือกสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่ทำให้ได้กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบง่าย ประหยัด และมีประสิทธิภาพสูง หรือที่เรียกว่า “ ONE MASK PROCESS ” เพราะสามารถลดขั้นตอนการสร้างจากกระบวนการเดิม และยังช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสงของเซลล์ได้

## Development of Silicon P-N Junction Solar Cells

### Fabrication by One Mask Process

Mr. Sompong Wongpakdee ID. 46015284

Mr. Worajak Chaitup ID. 46015277

Assoc. Prof. Dr. Somkiat Supadech Advisor

Educational Year 2005

#### Abstract

Purpose of development solar cells in present and in the further want low cost and high efficiency. This paper presents the experiments and result in development single crystal silicon p-n junction solar cells.

Because of the excellent light trapping and anti-reflection properties of PS layer and can be formed on any silicon surface using a very simple and inexpensive stain etching technique with the mixed solution of hydrofluoric acid, intric acid and water and to report to selective formation of porous silicon by stain etching technique to the effect that easy solar cells fabrication process, low cost and high efficiency or "ONE MASK PROCESS". Because it reduce fabrication process and help to increasing area to accept sunlight

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
Abstract	IV
สารบัญ	VI
บทที่ 1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์	
บทนำ	1
ประวัติและความเป็นมา	2
เซลล์แสงอาทิตย์	4
พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี	6
รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก	10
ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	10
สารกึ่งตัวนำ	11
บทที่ 2 ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	
บทนำ	14
2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุล ขณะที่ไม่มีความดันไบอัส	14
2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	18
2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	21
2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	23
2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง	23
2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)	24
2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	26
2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรสมมูล	31
2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์	33
2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $I_p$	36
2.9.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $I_p$	37
2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $(V_{oc})$	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)	หน้า
2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	38
2.11 การสะท้อนของแสงในตัวกลางต่างชนิดกัน	39
<b>บทที่ 3 การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์</b>	
<b>บทนำ</b>	41
3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	41
3.1.1 Back Surface Fields (BSF)	42
3.1.2 พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)	44
3.2 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์	54
<b>บทที่ 4 การสร้างและการออกแบบเซลล์</b>	
4.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีกระจกต้นแบบเดียว	57
4.1.1 การทำความสะอาดผิวหน้า ( Cleaning )	57
4.1.2 กระบวนการแพร่สารเจือ	58
4.1.3 กระบวนการสร้างชั้นอะลูมิเนียม	59
4.1.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	59
4.1.5 กระบวนการ Etching & Porous Silicon Formation	60
4.2 การออกแบบมาทซ์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	60
<b>บทที่ 5 การทดลอง</b>	
5.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่	68
5.1.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่	68
5.1.2 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิคอน โดยมีการส่องแสงกระตุ้น	69
5.1.3 การศึกษาผลของปัจจัยภายนอกในการสร้างพอร์สซิลิคอน	71
5.2 การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน	74
5.2.1 วัตถุประสงค์	74
5.2.2 การทดลอง	74
5.2.3 ผลการทดลอง	79
5.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	91
5.3.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

## 5.3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

93

ภาคผนวก ก ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

A

ภาคผนวก ข น้ำยาไวแสง

E

ภาคผนวก ค สารเคมีและการใช้สารเคมี

J

ภาคผนวก ง น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม

M

ภาคผนวก จ การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

O

ภาคผนวก ฉ

P

บรรณานุกรม

R



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ	หน้า
รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน	3
รูปที่ 1.2 การทดลองให้แสงตกกระทบขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว	3
รูปที่ 1.3 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์	4
รูปที่ 1.4 พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ	6
รูปที่ 1.5 แหล่งพลังงานต่างๆ ของโลก	7
รูปที่ 1.6 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก	9
รูปที่ 1.7 การหาค่ามุม $\theta$ โดยการพิจารณาเงาของแสง	9
รูปที่ 1.8 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ	10
รูปที่ 1.9 ลักษณะของผลึกซิลิคอนซึ่งถูกเจือด้วยอะตอมโบรอนและฟอสฟอรัส	13
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง	14
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น	15
รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีไบอัส	15
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็นขณะยังไม่เกิดรอยต่อพี-เอ็น	16
รูปที่ 2.5 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นแสดงด้วยแถบพลังงาน	17
รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง	18
รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	19
รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง $V_A$	20
รูปที่ 2.9 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	21
รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	22
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $V_A$	22
รูปที่ 2.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)	หน้า
รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์	25
รูปที่ 2.14 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง	25
รูปที่ 2.15 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดัน ของรอยต่อพี-เอ็นขณะที่ไม่ได้รับแสง และได้รับแสง	26
รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ	27
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ในอุณหภูมิต่ำที่ 300K กับขนาด $E_G$ ของสารกึ่งตัวนำ	30
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง	31
รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	32
รูปที่ 2.20 ลักษณะวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	32
รูปที่ 2.21 ผลของความต้านทานอนุกรม	34
รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานขนาน	35
รูปที่ 2.23 การลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น	35
รูปที่ 2.24 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	36
รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์	38
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง	39
รูปที่ 2.27 การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชั้น และแบบ 3 ชั้น	40
รูปที่ 3.1 ภาพสเก็ตดาวเทียม skylab ที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ไฟฟ้า	41
รูปที่ 3.2 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธี Back Surface Fields (BSF)	41
รูปที่ 3.3 แสดง Collection Probability ของเซลล์ที่มี BSF และ ไม่มี BSF	43
รูปที่ 3.4 Dependence of key solar cell parameters upon the density of p-type dopants as obtained by high-performance experimental device:	44
(a) Without a back surface field.	
(b) With a back surface field.	
รูปที่ 3.5 ภาพจำลอง โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน	45
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	46
รูปที่ 3.7 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และ ตัวอย่างของพอร์สซิลิคอนที่ได้	47

จาก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)	หน้า
รูปที่ 3.8 ภาพเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching	50
รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน(q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์ซิลิคอน	50
รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์ซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุน ต่างๆ	51
รูปที่ 3.11 แสดงแผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ	52
รูปที่ 3.12 แสดงแบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์ซิลิคอน	53
รูปที่ 3.13 แสดงผลกระทบของอะตอมแปลกปลอมเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	56
รูปที่ 4.1 แผ่นผลึกฐานรอง P – type Silicon	57
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของชั้น N <sup>+</sup> ซึ่งถูกสร้างอยู่บนแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอน	58
รูปที่ 4.3 แสดงภาพตัดขวางของชั้นของ Aluminium	59
รูปที่ 4.4 แสดงภาพตัดขวางของชั้นน้ำยาไวแสงที่ได้จากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	59
รูปที่ 4.5 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการ Etching	60
รูปที่ 4.5 ลวดลายโลหะขนาดต่างๆที่ออกแบบบน โปริแกรม Coral Draw	61
รูปที่ 4.7 การออกแบบลวดลายสี่เหลี่ยมจตุรัสและวงกลม	62
รูปที่ 4.8 การออกแบบลวดลายการซ้อน Mask	62
รูปที่ 4.9 การออกแบบลวดลายตัวอักษร	62
รูปที่ 4.10 Mask และ Selective ที่ออกแบบโดย โปริแกรม Coral Draw	63
รูปที่ 4.11 Mask Inverted pyramid Solar cell ที่ออกแบบโดย โปริแกรม Coral Draw	64
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการวางลวดลายโลหะลงบนพื้นที่ ที่ เกิด Etching ทั้งสองเซลล์	65
รูปที่ 4.13 การออกแบบ Mask โดยเซลล์หนึ่ง เป็นการลดชั้นการสะท้อนแสง โดยใช้ชั้นซิลิคอนออกไซด์ และอีกเซลล์หนึ่ง ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงโดยใช้การสร้างพอร์ซิลิคอน	66
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการสะท้อนแสงของ ออกไซด์, แผ่นซิลิคอน และพอร์ซิลิคอน	67
รูปที่ 5.2 (ก)พอร์ซิลิคอนที่สร้างจากกระบวนการการกัดข้อมลึ (ข)การเรียงแสงของพอร์ซิลิคอนที่สร้างจากกระบวนการการกัดข้อมลึ	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)	หน้า
รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่ได้จากการกัดข้อมสีที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง SEM ที่เวลาต่างกัน	70
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบวัคเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่เวลาต่างๆ	71
รูปที่ 5.5 (ก)ชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม (ข) ชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม	73
รูปที่ 5.6 (ก)ชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ไม่ผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ (ข)ชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.125 cc (ค)ชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.25 cc (ง)ชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.5 cc	74
รูปที่ 5.7 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซเซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อน สร้างบนฐานรองเดียวกัน	79
รูปที่ 5.8 การเรียงแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซเซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อน	80
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขัปลีก 20 นาที	81
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขัปลีก 40 นาที	81
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขัปลีก 40 นาที	82
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นพอร์ซเซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขัปลีก 40 นาที	83
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นพอร์ซเซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขัปลีก 40 นาที	83
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์และใช้ชั้นพอร์ซเซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขัปลีก 40 นาที	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>สารบัญรูปภาพ(ต่อ)</b>	<b>หน้า</b>
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์และใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 40 นาที	85
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน แสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 60 นาที	86
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้น ลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้าง จากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 60 นาที	86
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลด สะท้อนแสงและใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่น ฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 60 นาที	87
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลด การสะท้อนแสงและใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่น ฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 60 นาที	88
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอน ได ออกไซด์และใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรอง สภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 60 นาที	89
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น ซิลิคอน ไดออกไซด์และใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจาก แผ่น ฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 60 นาที	89
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นพอร์ส ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรอง 5-6 $\Omega$ -cm แบบกระจก ด้านแบบเดียว	90
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นพอร์ส ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรอง 5-6 $\Omega$ -cm แบบกระจก ด้านแบบเดียว	90
รูปที่ 5.24 (1) กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์สซิลิคอน โดยวิธีการกัด แบบข้อมสิ	92
(2) กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์สซิลิคอน โดยวิธีการกัด แบบข้อมสิโดยการกัดทะลุอะลูมิเนียม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

- (3) กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์ซเซลิคอนโดยวิธีการกัดแบบข้อมสิ โดยการกัดหะลอะลุมิเนียมที่ทำการซินเตอร์ริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	5
ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบขนาดของแหล่งพลังงานต่างๆ บน โลก	8
ตารางที่ 2.1 ค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน	28
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	39
ตารางที่ 3.1 แสดงความหนาแน่นของอะตอมเปลกปลอมใน Metallurgical-Grade Silicon	55
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบเวลาในการเกิดในปัจจุบันในการสร้างที่ต่างกัน	74
ตารางที่ 5.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง และชั้นพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพ ด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลิก 40 นาที	82
ตารางที่ 5.3 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และ ชั้นพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลิก 40 นาที	84
ตารางที่ 5.4 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรอง สภาพด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลิก 60 นาที	85
ตารางที่ 5.5 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง และชั้นพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพ ด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลิก 60 นาที	87
ตารางที่ 5.6 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และ ชั้น พอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพ ด้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลิก 60 นาที	88

## บทที่ 1

### บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานเก่าๆ เริ่มลดลง เช่น ใช้น้ำมันในการผลิตพลังงาน ซึ่งน้ำมันมีปริมาณที่น้อยลงอีกทั้งยังมีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ อาจจะหมดสิ้นได้ในเวลาอีกไม่นาน ใช้น้ำจากเขื่อนกักเก็บน้ำก็เป็นการทำลายธรรมชาติและลดพื้นที่ป่าสมบูรณ์ ใช้น้ำมันก็เป็นการทำลายบรรยากาศ ใช้นิวเคลียสก็เกิดอันตรายจากสารกัมมันตภาพรังสี เป็นต้น ไม่ว่าจะยุคสมัยใดสิ่งมีชีวิตก็ต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีวิต นับตั้งแต่พลังงานในระดับเซลล์และกล้ามเนื้อของสิ่งมีชีวิต ไปจนพลังงานจากสิ่งแวดล้อมที่มนุษย์ที่ชาญฉลาดสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์นานับประการ เช่น พลังงานความร้อนจากหินหรือถ่านไม้ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากซากดึกดำบรรพ์ และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น มนุษย์จะนำพลังงานเหล่านี้มาแปรรูปเป็นพลังงานรูปอื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานกลในรถยนต์ เป็นต้น

เนื่องจากพลังงานที่ใหญ่ที่สุดของระบบสุริยะ ( Solar System ) เป็นพลังงานที่ได้ต้นกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์ซึ่งพลังงานที่ได้จะอยู่ในรูปพลังงานความร้อนและแสงสว่างซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งกับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลก เพราะฉะนั้นการนำเอาพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์จึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

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, ดีต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จทั้งในด้านเทคโนโลยี และเศรษฐกิจ เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษด้วย ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่มนุษย์ได้พยายามประดิษฐ์คิดค้นขึ้น เรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์” หรือ “โซลาร์เซลล์” (Solar Cells)

ปัจจุบันได้มีการศึกษา, วิจัย และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 2 ประการ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

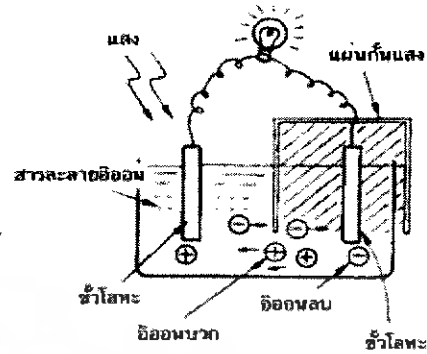
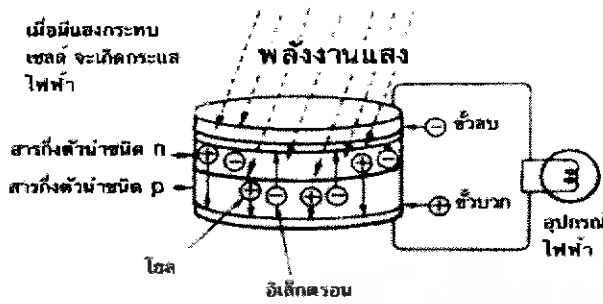
1. การลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์
2. การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับโครงการนี้เป็นการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอนโดยวิธีกระจกต้นแบบเดียวหรือที่เรียกว่า “ ONE MASK PROCESS ” เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์และยังปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการนำชั้นพอร์ซซิลิกอนมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคการกัดข้อมลี้ที่เรียกว่า “ Stain Etching ” การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลอง คือ กระแสขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ), แรงดันขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางอุดมคติ ( $P_0$ ), ค่าความเข้มของกระแสต่อพื้นที่ ( $J_{sc}$ ), กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_m$ ), แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_m$ ), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์จ่ายได้จริง ( $P_m$ ), ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.), ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน ( $\eta$ ), การหาค่าความต้านทานภายใน ( $R_s$ ), ผลของค่าความต้านทานภายในต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ( $R_{ss}$ ) และผลของความเข้มแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์

#### ประวัติและความเป็นมา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ทางวิศวกรรมซึ่งประยุกต์ใช้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงตกกระทบในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า บุคคลแรกที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของ p-n junction ของผลึกซิลิกอน (ดังรูปที่ 1.1) คือนักวิจัยชื่อ Gerald Pearson แห่ง Bell Laboratories ในปีค.ศ.1954 ซึ่งเป็นช่วงหลังจากการค้นพบทรานซิสเตอร์ โดย William Shockley แห่ง Bell Laboratory ในปีค.ศ.1949 ไม่นานนัก โดยในครั้งแรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น

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



รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิกอน      รูปที่ 1.2 การทดลองให้แสงตกกระทบขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว

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

ในปีค.ศ.1883 นาย Fritts อธิบดีวิทยุทำการงานของ 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

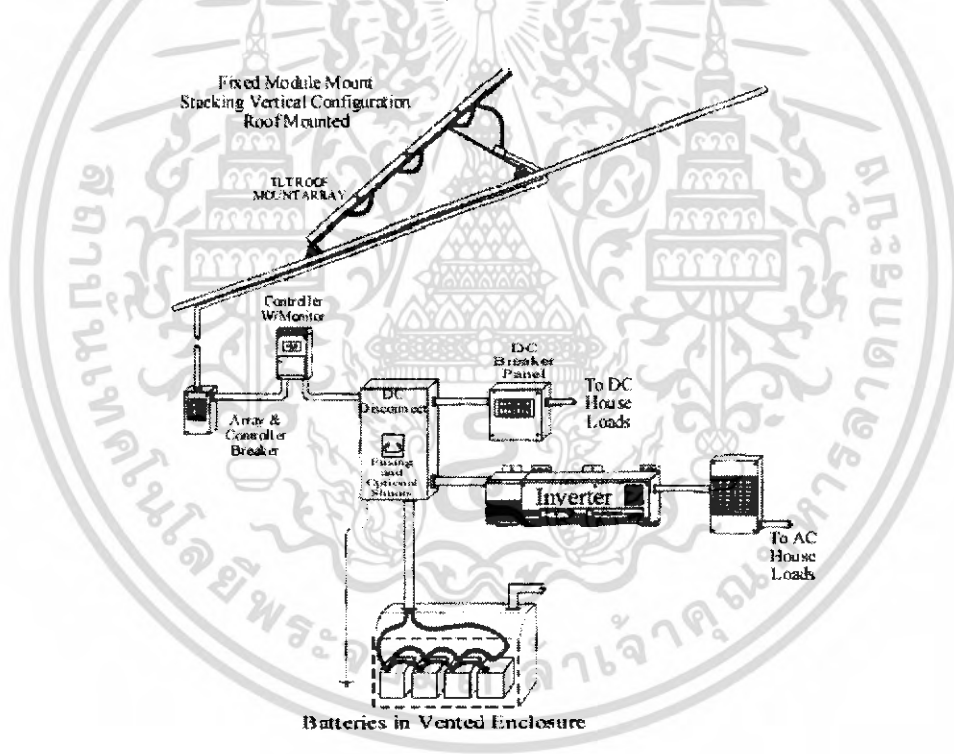
เซลล์แสงอาทิตย์ได้เริ่มเป็นที่สนใจในวงกว้างครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1958 เมื่ออเมริกาได้ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนดาวเทียม “แวนการ์ด หมายเลข 1” เพื่อเป็นตัวจ่ายพลังงานสำหรับการสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีบนพื้นโลก หลักการทำงานก็เช่นเดียวกับระบบบนโลก คือ เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าชาร์จเข้าแบตเตอรี่ แล้วแบตเตอรี่จะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์การสื่อสาร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

ตั้งแต่ปีค.ศ.1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนา และสร้างขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานบนพื้นโลก โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ และการลดค่าต้นทุนในการเอกซเรย์นี้เป็นเอกซเรย์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงขยายวงออกไปอย่างกว้างขวาง จนกระทั่งในปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก ซิลิคอนมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงถึงราว 15-24%

### เซลล์แสงอาทิตย์

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



รูปที่ 1.3 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนเป็นวัสดุที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน โดยแทบจะเรียกได้ว่าเป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมนี้เลยทีเดียว ทรานซิสเตอร์, ICs, LSI และ VLSI ทั้งหลายแทบทั้งหมดสร้างโดยใช้ซิลิคอนนี้

อย่างไรก็ดี จากผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า วัสดุสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีค่าของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ประมาณ 1.5 eV ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.43 eV ดัง

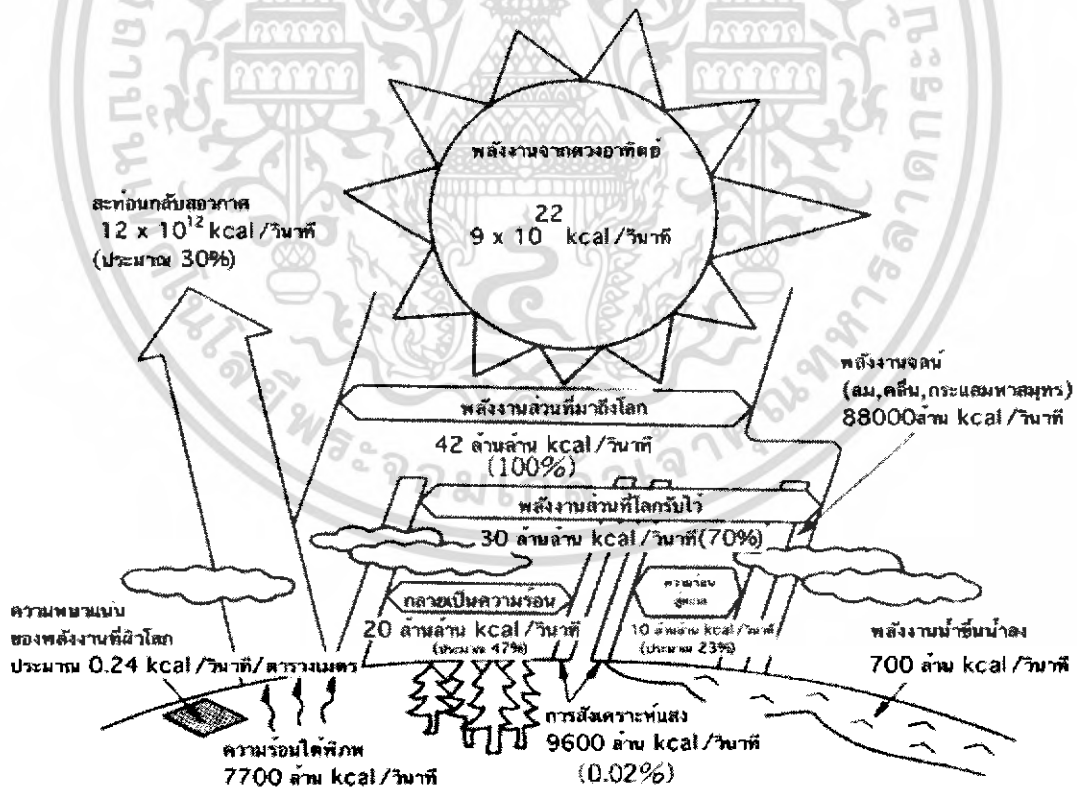
Material	Major material					Experimental diffusion length ( $\mu$ )
	Energy Gap (eV)	Mobility(300k) ( $cm^2 \cdot v^{-1} \cdot s^{-1}$ )		Lifetime(s)		
		$\mu_n$	$\mu_p$	$\tau_n$	$\tau_p$	
Si	1.1	1450	500	400		100
GaAs	1.4	8500	400	50	$110^{-2}$	5
CdS	2.6	340	615	100	$10^{-2}$	$\sim 1$
B	1.5	6000	4000			
Se(HEX)	1.6	2	17			
SsC( $\beta$ )	2.6	1000	10			
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	1.6	15	45			
Ab <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	1.2	15	45			
AlSb	1.6	400	400			
GaP	2.2	>200	150			
CdAs <sub>2</sub>	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			

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในตารางที่ 1.1 และจากการทดลองสร้างก็ปรากฏว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก GaAs ด้วย โครงสร้างที่เหมาะสมจะสามารถให้ประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานได้สูงถึง 30% แต่ทว่า GaAs เป็นสาร กึ่งตัวนำที่มีราคาแพงซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก สารซิลิคอน

**พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี**

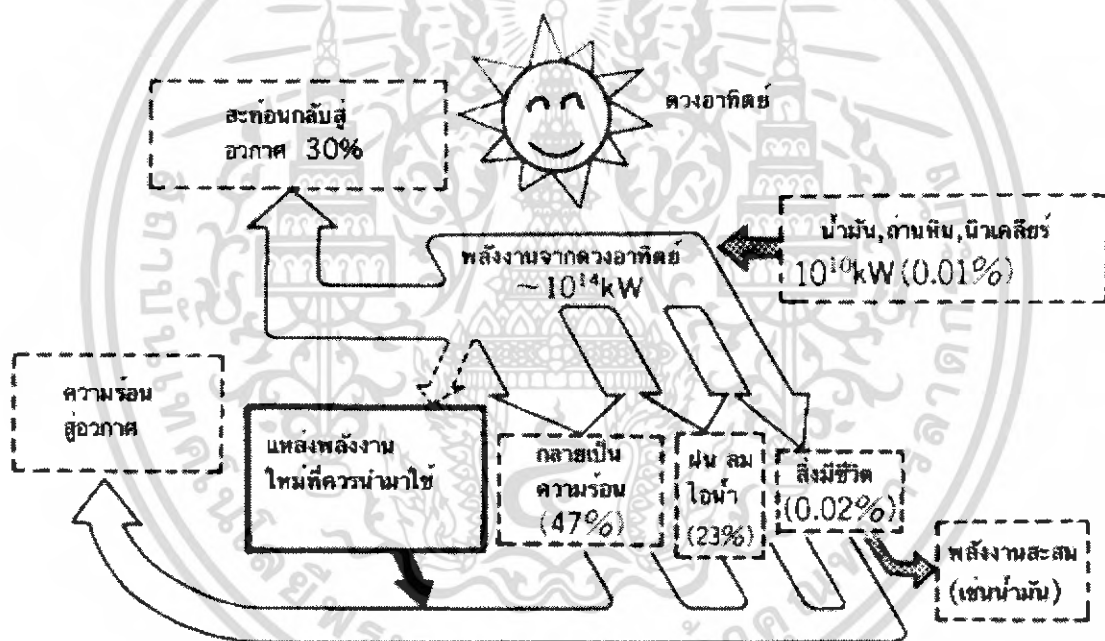
ดวงอาทิตย์อยู่ห่างจากโลกประมาณ 150 ล้านกิโลเมตร ปลดปล่อยพลังงานจากปฏิกิริยา ฟิวชั่นออกสู่อวกาศในระดับ  $9 \times 10^{22}$  kcal/วินาที ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งเป็นพลังงานที่มากมาย มหาศาล พลังงานนี้กระจายไปในอวกาศ และส่วนที่มาถึงโลกนั้นจะมีความเข้มข้นที่บริเวณนอกเขต บรรยากาศของโลกในระดับ 1.38 kW/ตารางเมตร (0.33 kcal/วินาที) คิดเป็นพลังงานที่โลกได้รับได้ เป็น  $42 \times 10^{12}$  kcal/วินาที โดยในนี้ 30% จะสะท้อนกลับออกนอกบรรยากาศโลก ที่เหลือ 70% จะ มาถึงโลก ซึ่งเมื่อเทียบกับพลังงานที่มนุษย์ทั้งโลกใช้ในปี 1988 คือ  $10^{17}$  kcal จะเห็นว่า เทียบเท่ากับ พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาถึงโลกเพียงแค่ว่าประมาณ 40 นาทีเท่านั้น



รูปที่ 1.4 พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์นั้นมากมายมหาศาลเพียงใด และโลกของเราก็ได้วิวัฒนาการมาภายใต้เงื่อนไขทางพลังงานเช่นนี้ โดยพลังงานที่มาถึงผิวโลกจะเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่ผิวดิน และทะเล ทำให้เกิดลม, ไอน้ำ, ฝน และ วัฏจักรต่างๆ ของโลกทั้งทางกายภาพ และชีวภาพ รวมทั้งทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงของพืช โดยคร่าวๆแล้วใน 70% ที่มาถึงผิวโลก ประมาณ 42% จะกลายเป็นความร้อน ประมาณ 23% จะเป็นพลังงานในการเกิดวัฏจักรของน้ำ (ระเหย, เมฆ, ลม, ฝน) ประมาณ 0.02% เท่านั้นที่ถูกใช้ในการดำเนินชีวิตของพืช และสัตว์ การทับถมของซากสิ่งมีชีวิตเหล่านี้เกิดเป็นน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ก็เป็นการสะสมพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์ไว้ในรูปของพลังงานเคมีในสิ่งเหล่านั้นนั่นเอง นั่นคือ พลังงานที่เราได้จากเชื้อเพลิงเหล่านี้ล้วนมีต้นกำเนิดมาจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งสิ้น ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แหล่งพลังงานต่างๆ ของโลก

ตารางที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของพลังงานของแหล่ง หรือรูปแบบต่างๆ จะเห็นว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ตกถึงโลกมีขนาดมหาศาลเมื่อเทียบกับอย่างอื่น ๆ คือประมาณ 42 ล้านล้าน kcal/วินาที พลังงานลมจะมีลำดับรองลงมา คือ 0.088 ล้านล้าน kcal/วินาที ส่วนพลังงานความร้อนจากใต้พิภพซึ่งเป็นพลังงานจากภายในของโลกเองมีขนาด 0.0077 ล้านล้าน kcal/วินาที โดยสรุปแล้วจะเห็นว่า พลังงานในธรรมชาติบนโลกนั้น แทบทั้งหมดมาจากดวงอาทิตย์ก็ว่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานน้ำ	$4.8 \times 10^8$ kcal/วินาที
พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง	$7.2 \times 10^8$ kcal/วินาที
พลังงานความร้อนใต้พิภพ	$77 \times 10^8$ kcal/วินาที
พลังงานลม	$880 \times 10^8$ kcal/วินาที
พลังงานจากดวงอาทิตย์	$420,000 \times 10^8$ kcal/วินาที

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบขนาดของแหล่งพลังงานต่างๆ บนโลก

พลังงานจากการแผ่รังสีต่อพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของดวงอาทิตย์ นอกบรรยากาศของโลก จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความเข้มของการแผ่รังสีนี้ เราเรียกว่า Solar Constant หรือที่นิยมเรียกกันว่า แบบ Air mass zero เขียนย่อๆ ได้เป็น AM0 ซึ่งในงาน Photovoltaic การแผ่รังสีแบบ AM0 กำหนดว่ามีค่าเท่ากับ  $135.3 \text{ mW/cm}^2$

สำหรับบนพื้นผิวโลก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะสูญเสียไปในชั้นบรรยากาศของโลก เนื่องจากชั้นของก๊าซต่างๆ เช่น  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ , ไอน้ำ,  $\text{CO}_2$  เป็นต้น ดังนั้นความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะลดลง และองค์การนาซ่า (NASA) แห่งสหรัฐอเมริกาได้เป็นผู้กำหนดมาตรฐานของพลังงานที่ได้รับในระดับน้ำทะเล เมื่อแสงอาทิตย์มีทิศทางตั้งฉากกับผิวโลกมีค่า  $100 \text{ mW/cm}^2$  และกำหนดว่าเป็นการแผ่รังสีแบบ Air mass 1 หรือเขียนย่อๆ ได้เป็น AM1 ค่าของพลังงานนี้ถูกนำมาใช้เป็นค่า เปรียบเทียบความสามารถ หรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า

ลักษณะการแผ่รังสีแบบต่างๆ อาจพิจารณาได้ดังนี้คือ

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

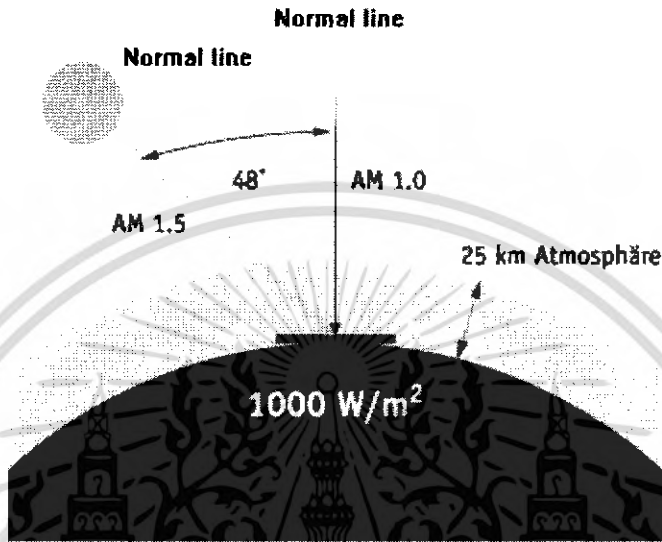
เมื่อ  $\theta$  คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ทำกับทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวโลกบริเวณที่ทำการวัด

ดังนั้น ถ้าดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับโลกเป็นมุม  $60^\circ$  ลักษณะของการแผ่รังสีนี้จะเรียกว่า เป็นแบบ AM2

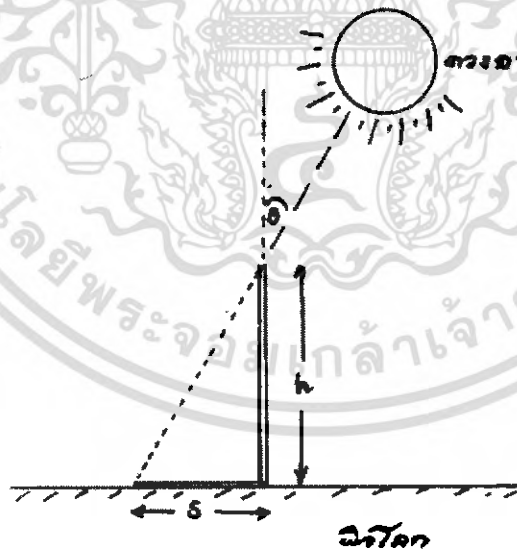
ตัวอย่างการหาลักษณะการแผ่รังสีทำได้ง่ายๆ โดยการพิจารณาเงาของวัตถุที่มีความสูง  $h$  วางอยู่ตั้งฉากกับผิวโลก ดังแสดงในรูปที่ 1.6 และรูปที่ 1.7 ถ้าหากความยาวของเงาที่เกิดขึ้นมีค่า  $s$  ดังนั้น ค่าของ Air mass หาได้โดย

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

**Air Mass**



รูปที่ 1.6 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก



รูปที่ 1.7 การหาค่ามุม  $\theta$  โดยการพิจารณาเงาของแสง

ยิ่งค่าของ Air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง พลังงานแสงอาทิตย์ที่มายังผิวโลกก็จะมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่งคือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM1.5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ลำแสง หรือรังสีของแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นโลก จะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน คือ

1. Direct sunlight หรือ ลำแสง โดยตรง
2. Indirect or Diffused sunlight ลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย

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

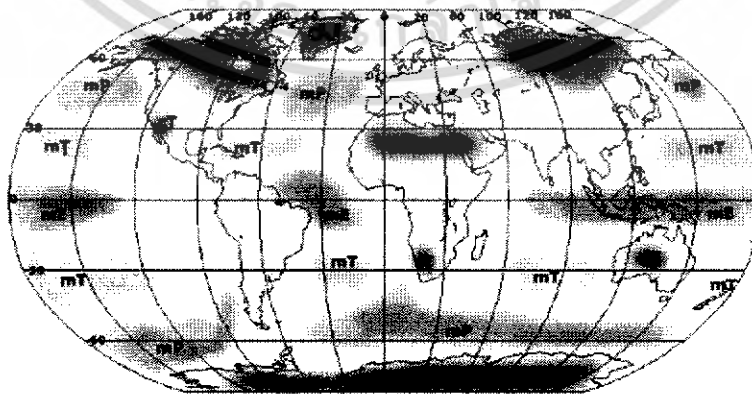
สเปกตรัมของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจายจะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อน และแพร่กระจาย นอกจากนี้แล้ว ลักษณะการแพร่รังสีแบบ Air mass ค่าสูงๆ จะมีผลทำให้ปริมาณของแสงที่ได้รับในส่วนแพร่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

## ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

**Maritime Tropical (mT)** เขตร้อนบริเวณเส้นศูนย์สูตร

**Continental Polar (cP)** เขตหนาวเย็นประมาณลองจิจูดที่ 60

**Maritime Polar (mP)** เขตหนาวเย็นในบริเวณมหาสมุทร



รูปที่ 1.8 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูง หรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากจะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานสูง จากรูปที่ 1.8 แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ พบว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ปานกลางแผ่เป็นบริเวณกว้าง โดยเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 1,300-1,600 กิโลวัตต์/ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยของประเทศต่างๆที่ได้รับพบว่าประเทศไทยได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็นค่ารายวันเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 18.2 เมกะจูล/ตร.เมตร-วัน ซึ่งถือได้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

### สารกึ่งตัวนำ

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งี่สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ดังนั้น ทฤษฎีการทำงาน และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีส่วนเกี่ยวข้องทั้งโดยทางตรง และโดยทางอ้อมกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

วัสดุต่างๆที่มีอยู่ในโลกนี้ อาจพิจารณาจัดแบ่งออกเป็นหมู่ใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้เป็น 3 หมู่ คือ

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

สารกึ่งตัวนำอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

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

ในบรรดาวัสดุไฟฟ้า เช่น ตัวนำ, ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะเห็นได้ว่าสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่น่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ แตกต่างจากตัวนำ และฉนวน คุณสมบัติที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้ชัดก็คือ ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ จะเปลี่ยนแปลงได้โดยง่ายกับอุณหภูมิ หรือแสง จาก ภายนอก และที่สำคัญเมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือปนลงไปแม้เพียงเล็กน้อย ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะมีเฉพาะในสารกึ่งตัวนำ เท่านั้น

ชนิดของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

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

2. สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor) เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

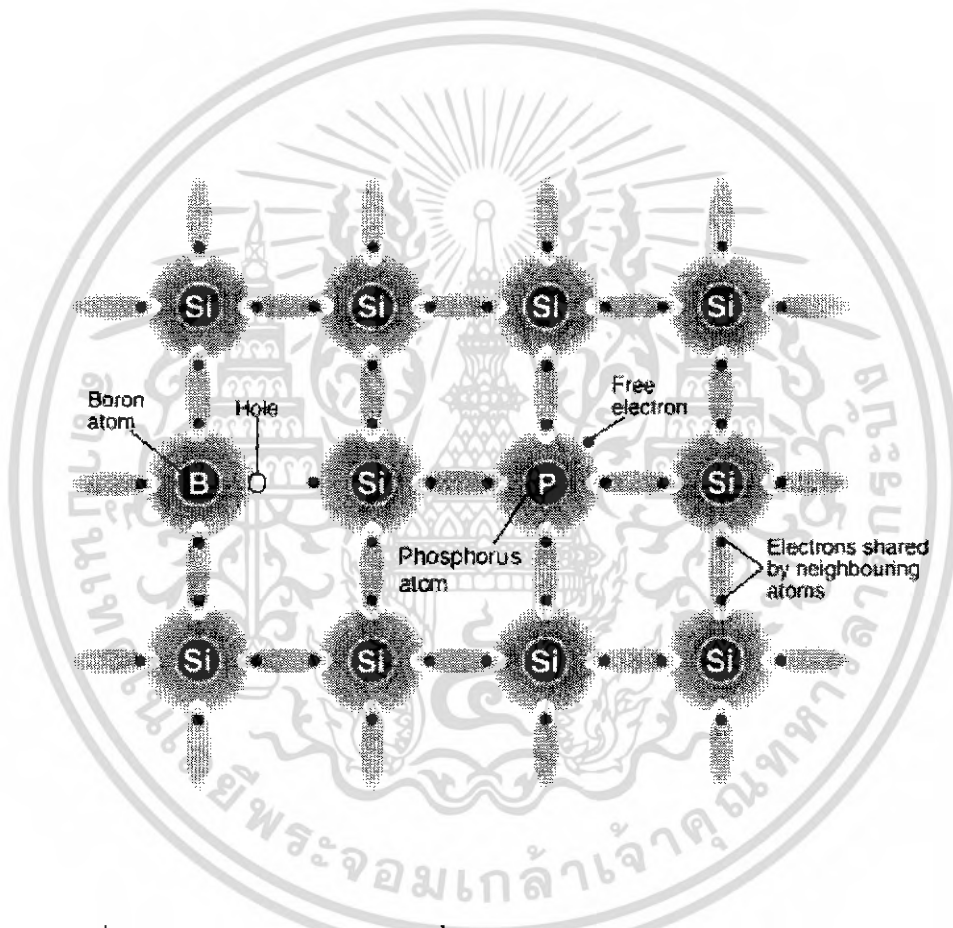
จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮลมีค่าน้อย ซึ่งถ้าคำนวณเป็นค่าความนำไฟฟ้าแล้วจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุตัวนำมาก และในทางปฏิบัติ เพื่อให้สารกึ่งตัวนำสามารถถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จำเป็นที่จะต้องเติมอะตอมสารเจือ ซึ่งผลของอะตอมสารเจือที่เติมจะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นอย่างมากมาย และยังสามารถควบคุมค่า ความนำไฟฟ้าได้อีกด้วยซึ่งเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุอื่นว่าสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor)

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

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

(ข) อะตอมสารเจือชนิดพี (p-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ III เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 1.9 ลักษณะของผลึกซิลิกอนซึ่งถูกเจือด้วยอะตอม โบรอนและฟอสฟอรัส

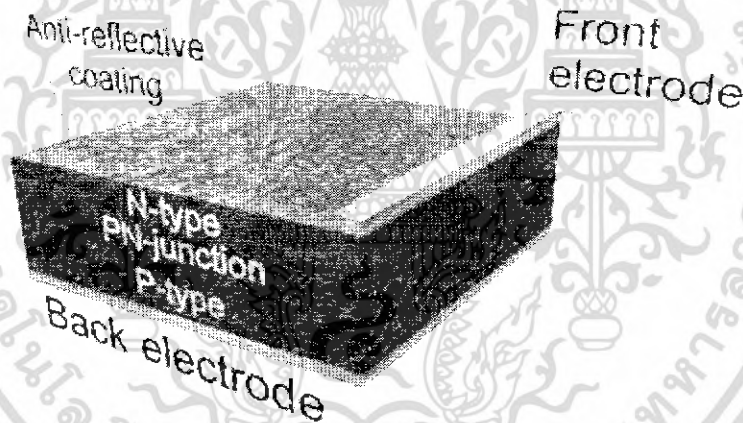
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

#### บทนำ

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

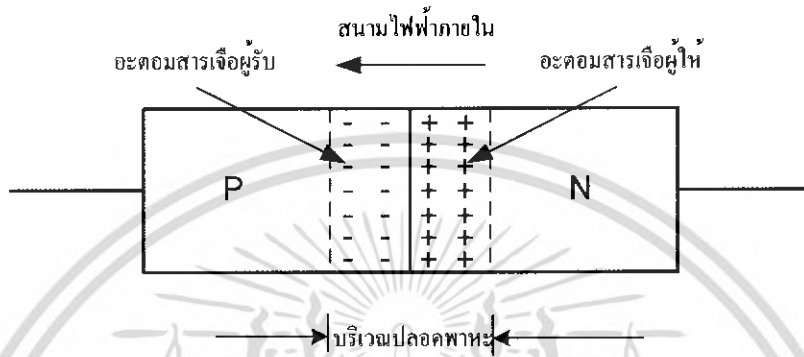


รูปที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้จริง

#### 2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุล ขณะที่ไม่มีความดันไบอัส

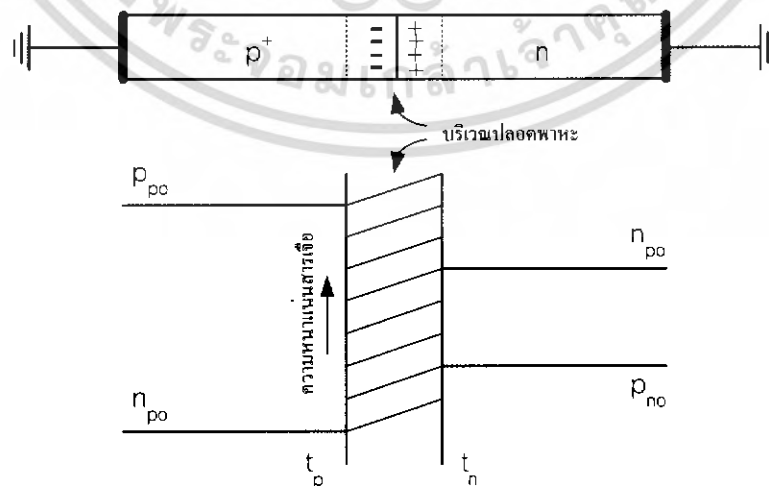
เมื่อรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าด้านทั้งสองของรอยต่อมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของพาหะ กล่าวคือ โฮลทางด้านพีจะมากกว่าโฮลทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านพี จึงเป็นเหตุให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเพื่อให้ด้านทั้งสองของรอยต่อมีพาหะเท่ากัน ดังนั้น พาหะจากด้านซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะแพร่ไปทางด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า คือ โฮลทางด้านพีจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้ามาทางด้านพี การแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้รอยต่อเป็นอันดับแรก ดังนั้น อะตอมสารเจือผู้รับทางด้านพีบริเวณรอยต่อจะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพเป็น อีออน ลบ และอะตอมสารเจือผู้ให้ทางด้านเอ็นบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็นอีออนบวก ประจุไฟฟ้าของอีออนทั้งสองจะเริ่มทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ เรียกว่า สนามไฟฟ้าภายใน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะช่วยต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นจนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีผลพอดีทำให้โฮล และอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ในภาวะนี้จะไม่มีการเสกของพาหะใดๆข้ามรอยต่อเลย เราเรียกภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” ที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นจะเป็นบริเวณที่ไม่มีพาหะอยู่ เนื่องจากพาหะจะถูก อิทธิพลจากสนามไฟฟ้าปิดออกไปจากบริเวณนี้ บริเวณดังกล่าวถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (Depletion region หรือ Space charge region หรือ Transition region)



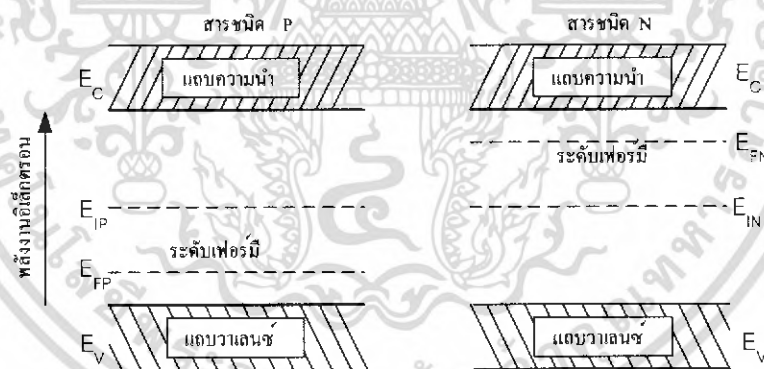
รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีการไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

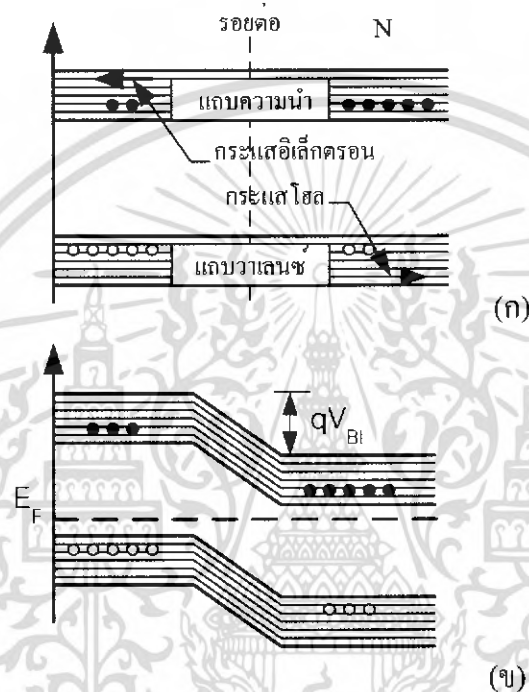
เมื่อ	$V_0$	คือ ศักย์สัมผัส (โวลต์)
	$k$	คือ ค่าคงตัวของโบลต์มันน์มีค่า $= 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K
	$T$	คือ อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K)
	$q$	คือ ประจุอิเล็กตรอน $= 1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมป์
	$N_A$	คือ ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ ( $\text{cm}^{-3}$ )
	$N_D$	คือ ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ ( $\text{cm}^{-3}$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



รูปที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น  
ขณะยังไม่เกิดรอยต่อพี-เอ็น

ในการเขียนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band diagram) เราต้องพิจารณาถึงระดับเฟอร์มีเป็นหลักสำคัญ จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีระดับพลังงาน เฟอร์มี  $E_f$  ไม่เท่ากัน แต่ในภาวะสมดุลระดับเฟอร์มีของด้านทั้งสองของรอยต่อจะต้องต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันตลอดผ่านรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมาสัมผัสกันจะเกิดมีการถ่ายเทพาหะเกิดขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวจนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับ  $E_f$  สูงกว่า คือ ด้านเอ็นไปยังระดับพลังงานที่ว่างในแถบความนำของส่วนพีซึ่งมีระดับ  $E_f$  ต่ำกว่า และโฮลจากส่วนพีก็จะไหลเข้ามายังระดับที่ว่างในแถบวาเลนซ์ของส่วนเอ็น ขณะที่มีการถ่ายเทของพาหะข้ามรอยต่อนี้ ระดับเฟอร์มีจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับระดับใหม่ จนกระทั่งในภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มีของด้านเอ็น และด้านพีจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นแสดงด้วยแถบพลังงาน (ก) ขณะสัมผัส (ข) ภาวะสมดุลหลังสัมผัสแล้ว

ในภาวะสมดุล ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

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

- เมื่อ  $X_m$  คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุล (cm.)
- $\epsilon$  คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำ
- $V_0$  คือ ศักย์สัมผัส (V.)

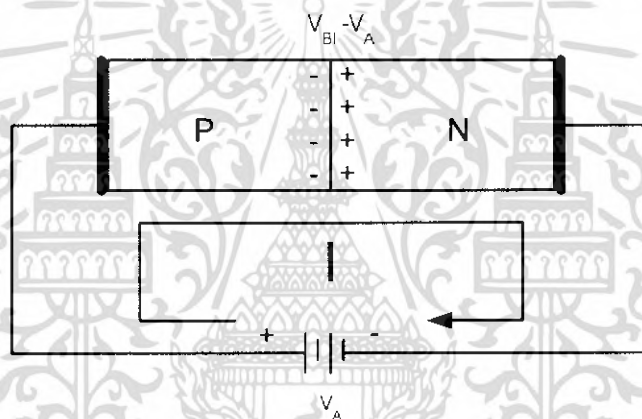
นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacity) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

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

เมื่อ  $C_j$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ( $\text{F/m}^2$ )

## 2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

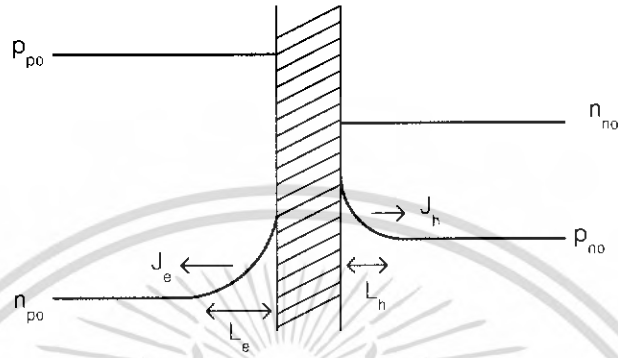
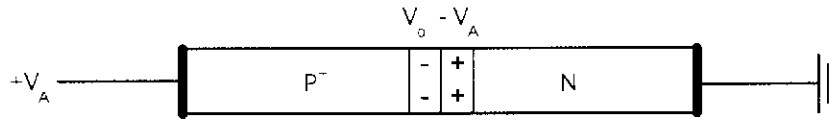
ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง

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

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง โสลจากด้านพีจะถูกฉีดเข้ามาทางด้านเอ็น ดังนั้นปริมาณของโซลทางด้านเอ็นบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อจะเพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกัน เมื่ออิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปทางด้านพี ปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านพีก็จะเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ  
ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

- เมื่อ  $p_{p0}$  คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านพี ในภาวะสมดุล
- $n_{p0}$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านพี ในภาวะสมดุล
- $n_{n0}$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
- $p_{n0}$  คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
- $L_h$  คือ ระยะการแพร่ของโฮล
- $L_e$  คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

การเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะ อธิบายได้ด้วย สมการ “กฎของรอยต่อ” โดย

$$p_n|_{L_n} = p_{n0} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.4)$$

$$n_p|_{L_p} = n_{p0} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $p_n|_{L_n}, n_p|_{L_p}$  คือ ความหนาแน่นของโฮลที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ

และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ ตามลำดับ

เมื่อห่างออกไปจากบริเวณปลอดพาหะ พาหะส่วนน้อยจะมีการลดลง เนื่องจากมีการรวมตัว (Recombination) ของพาหะเกิดขึ้น ทำให้ปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามาลดลงกระทั่งในที่สุด

เมื่อห่างจากขอบของบริเวณปลอดพาหะเป็นระยะ  $L_e$  และ  $L_h$  ความหนาแน่นของพาหะส่วนเอกสารเป็นเอกสารที่สวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติหนาไปไซประโยชน์ดานการค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยจะมีค่าเท่ากับในภาวะสมดุล นั่นคือ พาหะส่วนน้อยมีการรวมตัวของพาหะเกิดขึ้นจนหมดสิ้น โดยระยะ  $L_n$  และ  $L_p$  เรียก ระยะการแพร่ (Diffusion length) ของอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ

เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะส่วนมาก  $n_{no}$  และ  $p_{po}$  มีค่ามากกว่าปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามารอยต่อ ดังนั้นค่าของ  $n_{no}$  และ  $p_{po}$  ที่บริเวณรอยต่อจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะมีการฉีดพาหะเข้ามารอยต่อ เมื่อพิจารณาที่รอยต่อจะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ คือ กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการไดโอด หรือเรียกว่า Shockley diode equation หรือสมการเรกติไฟร์

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

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

และ  $V_A$  คือ แรงดันไบอัสตรงภายนอก

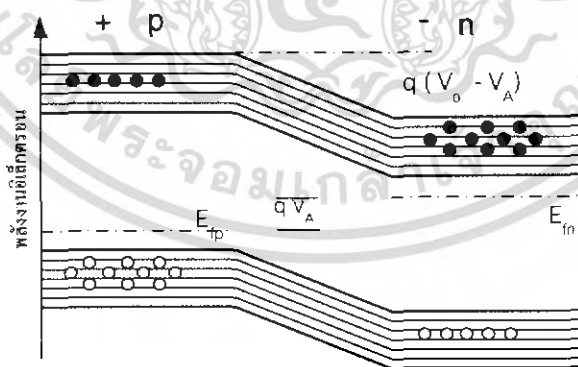
$I_0$  คือ กระแสอิ่มตัว

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น

$D_h$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

$D_e$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

และขณะรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



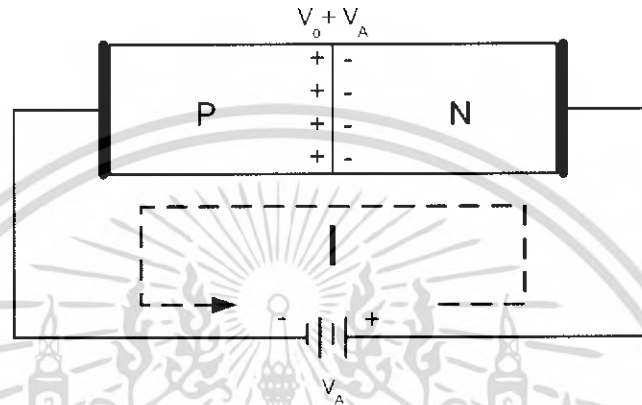
รูปที่ 2.8 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น

ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง  $V_A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

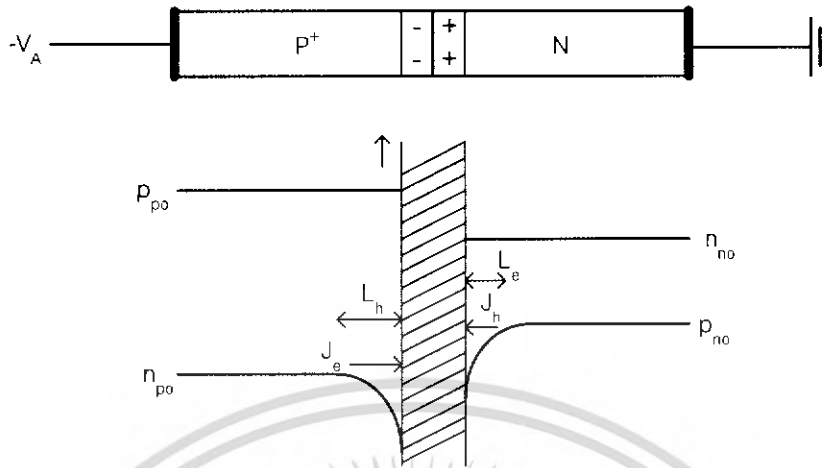
หากให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า  $V_A$  แล้ว แรงดัน  $V_A$  จะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีความสูงชันจากเดิม ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ รอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้ จึงกระทำตัวคล้ายฉนวนซึ่งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีความเพิ่มขึ้น และกว้างกว่าในตอนที่ยังไม่ได้รับการไบอัส

เนื่องจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_A$  จะทำให้พาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้น ปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆ บริเวณปลอดพาหะจะมีจำนวนลดลงดังรูปที่ 2.10 และสามารถหาความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยได้จากกฎของรอยต่อ คือ

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

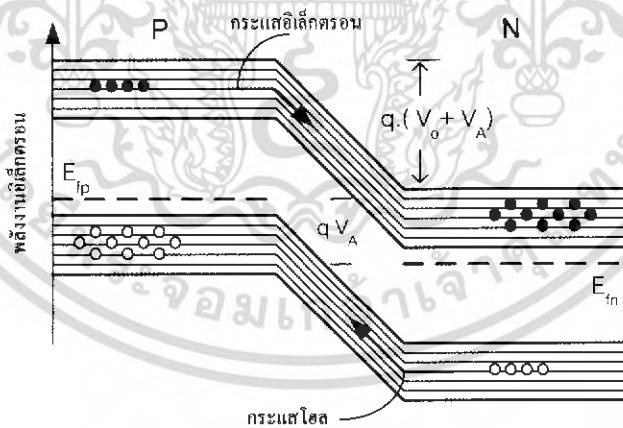
$$n_p|_{r_p} = n_{p0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ  
ขณะ ได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ มีผลให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของ  
รอยต่อแตกต่างกัน  $qV_A$  ซึ่งใช้อธิบายว่าเกิดมีกระแสของพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ดังรูปที่  
2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น  
ขณะ ได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ  $V_A$

จากสมการไดโอดในหัวข้อที่แล้ว เมื่อแทนค่าแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ  $-V_A$  จะได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายลบ หมายถึง กระแสย้อนกลับ มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีได้รับไบอัสตรง จะเห็นได้ว่า กระแส  $I_0$  เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งมีค่าน้อยมาก และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้นอกจากอุณหภูมิของรอยต่อ

## 2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

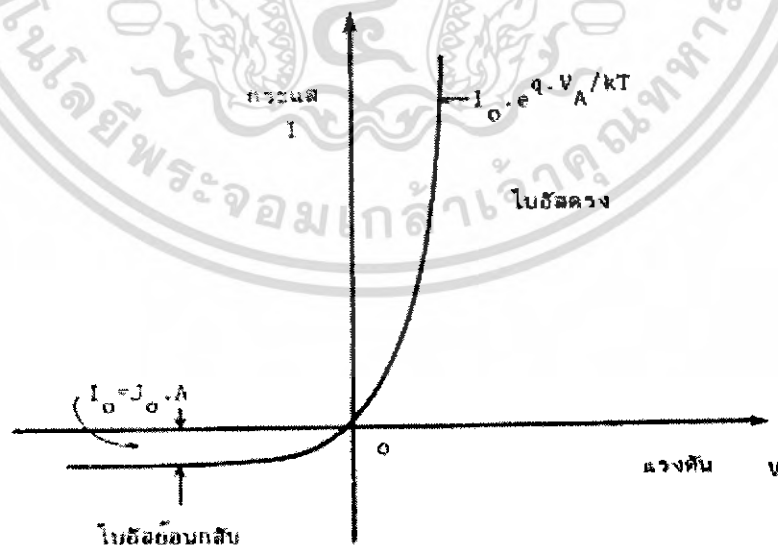
### 2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งกราฟนี้เราได้มาจากสมการที่ 2.6

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark)

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



รูปที่ 2.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)

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

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

เมื่อ  $E_{\text{photon}}$  คือ พลังงานของโฟตอน  
 $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ =  $6.624 \times 10^{-34}$  joule-sec  
 $\nu$  คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์ให้สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในแถบ ความนำ (conduction band) ได้ และทำให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้าน เอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่ยังไม่ได้รับแสงโดยตรง ดัง แสดงในรูปที่ 2.13

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

กรณีรอยต่อได้รับแสง (Illumination)

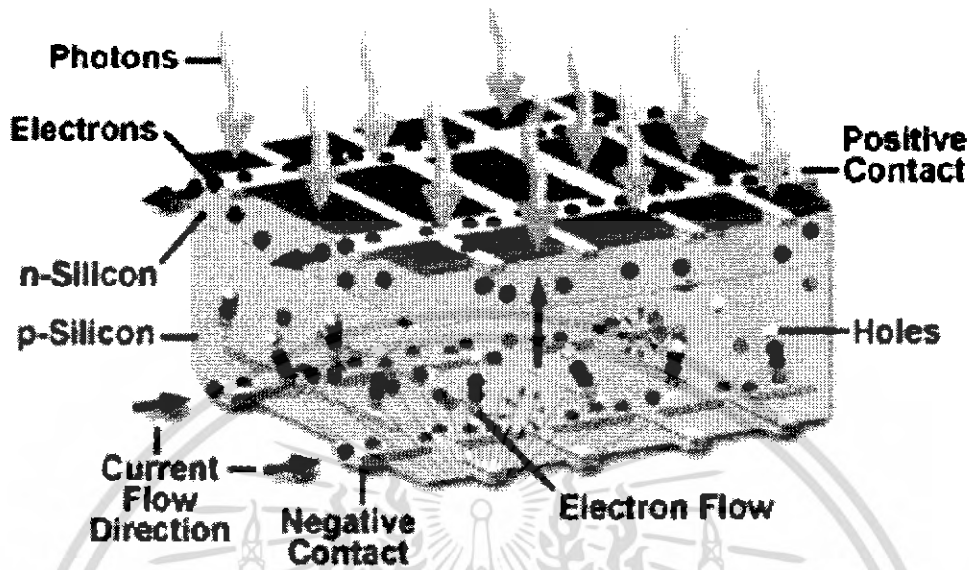
$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right) - I_p \quad (2.13)$$

โดยที่  $I_p$  คือ กระแสเนื่องจากแสง (photo current) และกระแสเนื่องจากแสง สามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.14

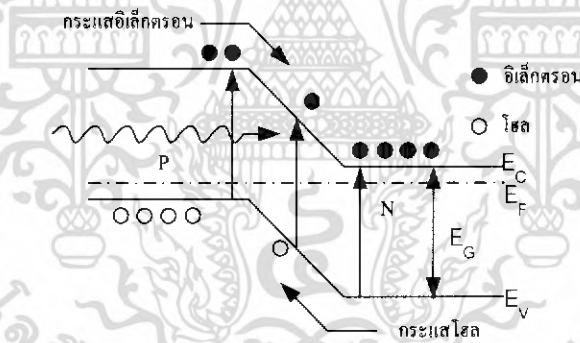
$$I_p = q \cdot A \cdot g_{op} (L_p + L_n) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Electron and Current Flow in Solar Cells



รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์



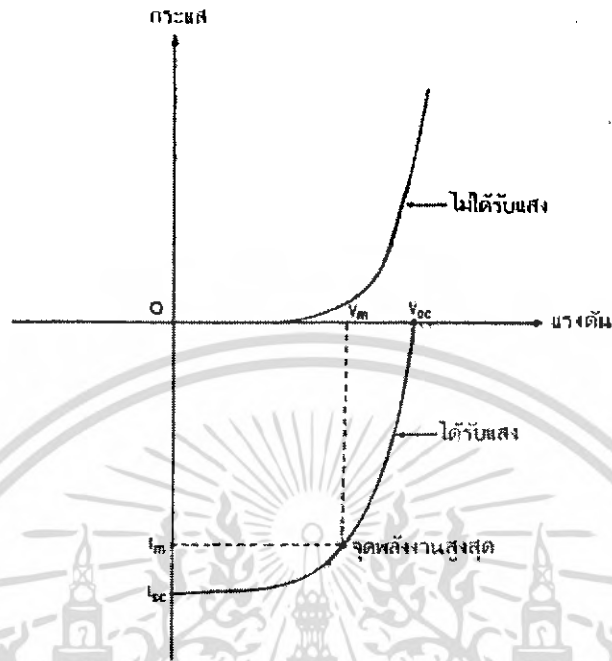
รูปที่ 2.14 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง

- 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น  
ขณะที่ไม่ได้รับแสง และได้รับแสง

## 2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น คุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ และโดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้ เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า นั่นก็คือ เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้ เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งจะต้องให้ทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสงจะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสง ไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจร 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-เอ็นขณะนี้ถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า “แรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage)” เขียนย่อว่า  $V_{oc}$  ค่าของ  $V_{oc}$  นี้หาได้โดยพิจารณาว่า

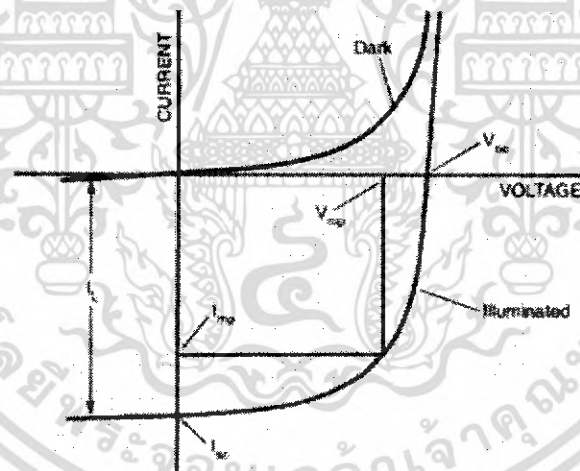
เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร  $I = 0$  , สมการที่ 2.13 เขียนใหม่ได้ว่า

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

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

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

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



รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิดขึ้นจะมีขนาดมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง, สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงเพื่อให้เกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล, ระยะความลึกของรอยต่อพี-เอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว, และค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไป กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน จะมีค่าประมาณ  $35\text{-}40 \text{ mA/cm}^2$  และในกรณีของแกลเลียมอาเซนไนด์ค่า  $I_{sc}$  จะอยู่ราว  $20 \text{ mA/cm}^2$  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  $0.5\text{-}0.6$  โวลต์ และในกรณีของสารแกลเลียมอาเซนไนด์  $V_{oc}$  จะมีค่าราว  $0.9$  โวลต์

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

เมื่อ  $\alpha, \beta$  เป็นค่าคงที่

ตารางที่ 2.1 ค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน

สารกึ่งตัวนำ	$E_g(0\text{K})$	$\alpha(\times 10^4)$	$\beta$	$E_g(300\text{K})$
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 เซลล์จะไม่ใช่ในภาวะลัดวงจร หรือเปิดวงจร ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์จะต้องถูกต่อเข้ากับโหลด (load) ซึ่งมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง ดังนั้นแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมาให้แก่โหลดจะมีค่าน้อยกว่า ค่า  $V_{oc}$  และ  $I_{sc}$  โหลดซึ่งนำมาต่อ เมื่อมีความต้านทานที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของแรงดัน และกระแสที่เซลล์จ่ายออกมามีค่าสูงสุด หรือที่เรียกว่า “ค่ากำลังงานสูงสุด (maximum power)” ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลดได้ เขียนย่อๆ ได้ว่า  $P_m$  ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนอักษรย่อแทนเป็น  $I_m$  และ  $V_m$  ตามลำดับ นั่นคือ

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

และค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ค่าของ  $P_m$ ,  $V_m$ , และ  $I_m$  แสดงได้ดังกราฟคุณสมบัติของเซลล์ในรูปที่ 2.15

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

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

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก เซลล์ที่ใช้งานโดยทั่วไปค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.6-0.8 นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญยิ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนตัวย่อเป็น  $\eta$  ประสิทธิภาพของเซลล์ ถูกนิยามไว้ว่าคือ 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)

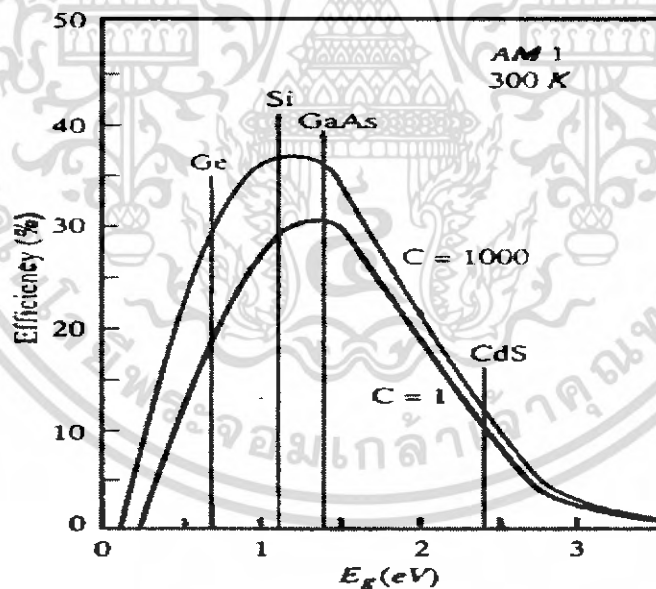
พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เซลล์ได้รับเกิดจากการดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าสูงกว่า  $E_g$  ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่า  $E_g$  จะไม่มีผลทำให้เกิดกระแสแสง และในโฟตอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงกว่า  $E_g$  อาจไม่เกิดกระแส แต่จะกระจายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งหากเป็นกรณีนี้ ประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลง ดังนั้น ขนาดของ  $E_g$  จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์

จากสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16 อาจสรุปได้ว่า  $P_m$  จะขึ้นกับ  $I_{sc}$  และ  $V_{oc}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

นอกจากนี้ยังมีการใช้เลนส์รวมแสงเพื่อเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้น แล้วฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเลนส์ขนาดใหญ่สามารถเพิ่มความเข้มของแสงได้เป็นหลายร้อยเท่า ทำให้เซลล์จ่ายกระแสได้สูง เนื่องจากกระแสแสงแปรกับความเข้มแสงโดยตรง รูปที่ 2.17 แสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ 300K ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ โดยพลังงานแสงตกกระทบบมีค่าเป็น 1 SUN และ 1000 SUN จะเห็นว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ข้อดีของระบบรวมแสง (Concentrating system) ก็คือ การเพิ่มกระแส โดยไม่ต้องเพิ่มพื้นที่ทำให้ระบบนี้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าปกติ

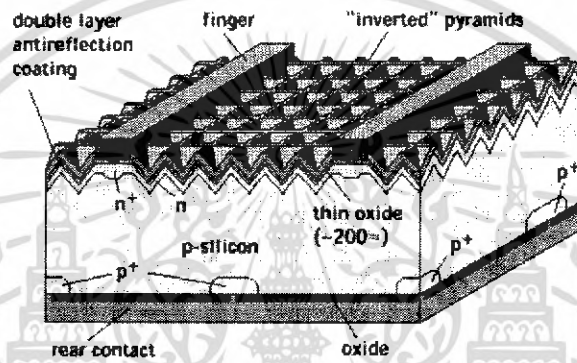


รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ 300K กับขนาด  $E_G$  ของสารกึ่งตัวนำ

จากกราฟในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาด  $E_G$  ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



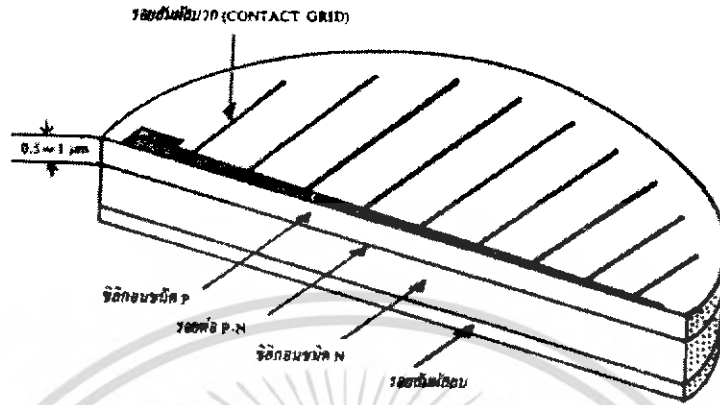
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง

เซลล์ที่กล่าวมาทั้งหมดปกติมักสร้างจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน (Silicon Single Crystalline) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพง เพื่อลดราคาของเซลล์จึงนิยมเอาผลึกหลายรูปหรือ (Poly Crystalline) หรืออะมอร์ฟัส (Amorphous) มาสร้างแทนผลึกรูปเดี่ยว ทำให้เซลล์เหล่านี้มีราคาถูก แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์ผลึกรูปเดี่ยว นอกจากนี้ยังมีการสร้างเซลล์แบบฟิล์มบาง (Thin Film) และแบบอื่นๆ อีกมากมาย แต่มีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ เซลล์ราคาถูกลง และ ประสิทธิภาพสูง เทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_m$ , F.F และ  $\eta$  ซึ่งมีค่าสูงๆ อย่างไรก็ดี พารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ก็ถูกจำกัดด้วยแฟคเตอร์อื่นๆ มากมาย ซึ่งบางแฟคเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟคเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

## 2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรมวมูล

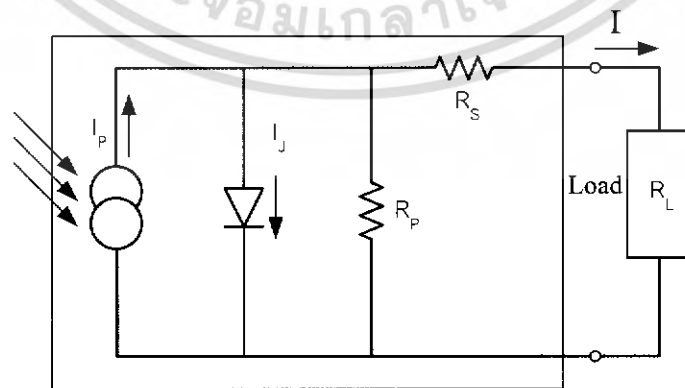
ลักษณะ โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 โดยการแพร่สารเจือชนิดพี ลงไปในแผ่นผลึกชนิดเอ็น จะทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้น ความเอกลักษณะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

ลักษณะของรอยต่อพี-เอ็นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ ปกติความลึกของรอยต่อนี้จะมีค่าน้อยกว่า  $1\mu\text{m}$ . เพื่อให้พลังงานจากโฟตอนของลำแสงสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อได้สะดวก ชั้นป้องกันการสะท้อนของแสงมีหน้าที่ช่วยดูดกลืนแสง และช่วยลดการสะท้อนกลับของแสง จึงมีผลช่วยเพิ่มปริมาณการดูดกลืนแสง รอยสัมผัสทางด้านหน้าของเซลล์มักใช้โลหะอะลูมิเนียม ทำเป็นลายนิ้วมือ หรือลายก้างปลา ทำหน้าที่รับกระแสที่ออกมาจากรอยต่อ ส่วนทางด้านล่างของเซลล์จะถูกฉาบด้วยอะลูมิเนียมเช่นกัน เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบของเซลล์ อย่างไรก็ตาม การนำเซลล์ไปต่อร่วมกันหลายๆ เซลล์ นิยมใช้วิธีการบัดกรี ดังนั้น เพื่อให้สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้ จึงนิยมนำเซลล์ไปทำการชุบนิเกิล เพื่อให้ส่วนที่เป็นขั้วสัมผัสบวก และขั้วลบของเซลล์สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้

จากลักษณะของเซลล์ดังกล่าว เราสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

โดยที่  $I_p$  คือ กระแสเนื่องจากแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_j$	คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่มีการส่องแสง
$I$	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 และค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมด เขียนด้วยย่อได้เป็น  $R_S$  ส่วนค่าความต้านทานขนาน (Parallel resistance หรือ Shunt resistance:  $R_p$ ) เป็นค่าความต้านทานสมมติที่ขนานกับรอยต่อพี-เอ็น ในรอยต่อพี-เอ็นที่สมบูรณ์ หรือในทางอุดมคติ ค่าของ  $R_p$  จะมีค่าเป็นอนันต์ ( $\infty$ ) และค่าของ  $R_S$  จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่มีมีจุดเสีย (defect) เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ โดยเฉพาะรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ย่อมมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏอยู่ จึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่า  $R_p$  จึงไม่สูงเป็นค่าอนันต์ และค่า  $R_S$  ก็มีค่าไม่เป็นศูนย์ ผลของค่า  $R_S$  และ  $R_p$  จะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงได้ในรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22

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

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

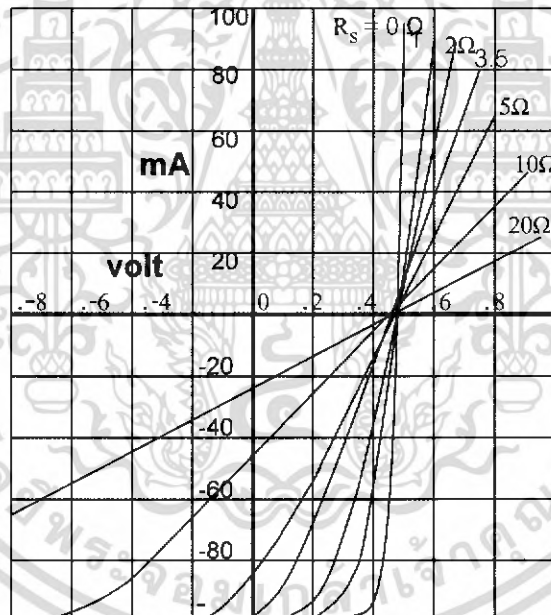
ซึ่งถ้า  $R_S \neq 0$  แล้ว แรงดัน  $V_0$  ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ และแรงดันที่ตกคร่อม  $R_S$  ซึ่งเท่ากับ  $I_R R_S$  ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริงๆ จะมีค่าดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

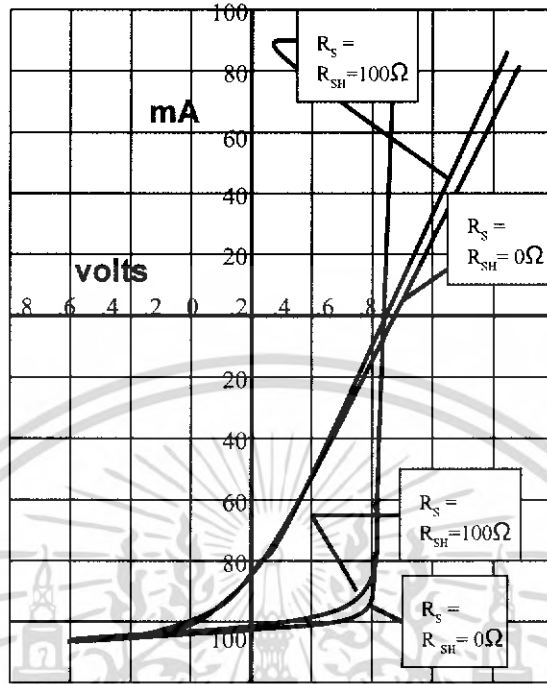
$$I_R = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{q(V_0 + I_R R_S)}{kT}} - 1 \right] \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.22 สามารถนำไปเขียนกราฟ เพื่อแสดงผลของ  $R_S$  ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 2.20 จากรูปจะเห็นได้ว่า เซลล์ที่มีค่า  $R_S$  สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อย และความชันของกราฟก็ลดลงด้วย เป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรรหาทางลดค่า  $R_S$  ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



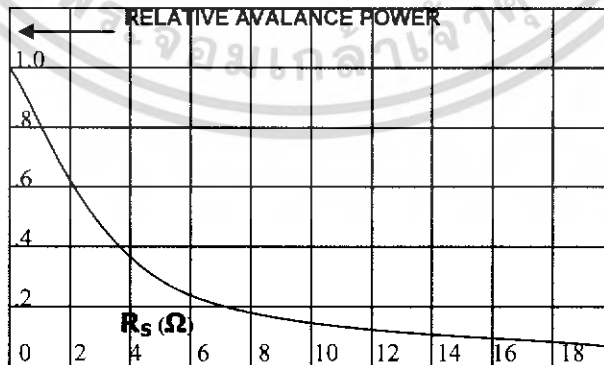
รูปที่ 2.21 ผลของความต้านทานอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานขนาน

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

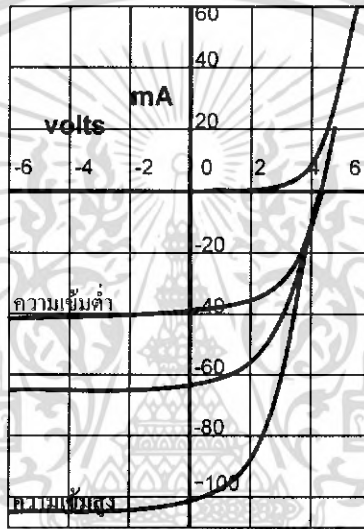


รูปที่ 2.23 การลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงาน จำเป็นต้องมีแสงมากกระตุ้นให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอที่จะเป็นอิสระ และทิ้งให้โฮลเกิดขึ้น ดังนั้น ถ้าหากแสงที่ตกกระทบมีความเข้มสูงมาก หรือก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮลเป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสง มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

## 2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริง ๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากร้อนนี้ก็จะมีผลต่อกระแส และแรงดันที่ได้จากเซลล์ด้วย เมื่อพิจารณาสมการของกระแส  $I_R$  ที่ไหลผ่านมายังโหลด  $R_L$

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

จะพบว่า กระแส  $I_R$  นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องจากแสง  $I_p$  และกระแส  $I_j$  ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ  $I_p$  และ  $I_j$

### 2.9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $I_p$

เมื่อพิจารณาค่าของ  $I_p$  ในสมการที่ 2.11 ซึ่ง  $I_p$  มีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า  $I_0$  จะมีผลต่อกระแส  $I_j$  มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ  $I_0$  โดยพิจารณาจากสมการของ  $I_0$  ดังนี้

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

จากสมการของ  $I_0$  จะพบว่า  $n_i^2$  ของซิลิคอนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

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

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

### 2.9.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $I_p$

เมื่อพิจารณาค่าของกระแส  $I_p$  ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงในสมการที่ 2.14

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

เนื่องจาก  $I_p$  แปรผันตาม  $g_{OP}$  และ  $L$  จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ  $L$  และ  $g_{OP}$

จากสมการ

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

เมื่อ  $D$  คือ สัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร (Diffusion coefficient หรือ Diffusion constant) สำหรับที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้น จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมน้อยมาก จากสมการของ  $L$  จึงเหลืออยู่แต่ค่าอายุของพาหะ,  $\tau$  (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

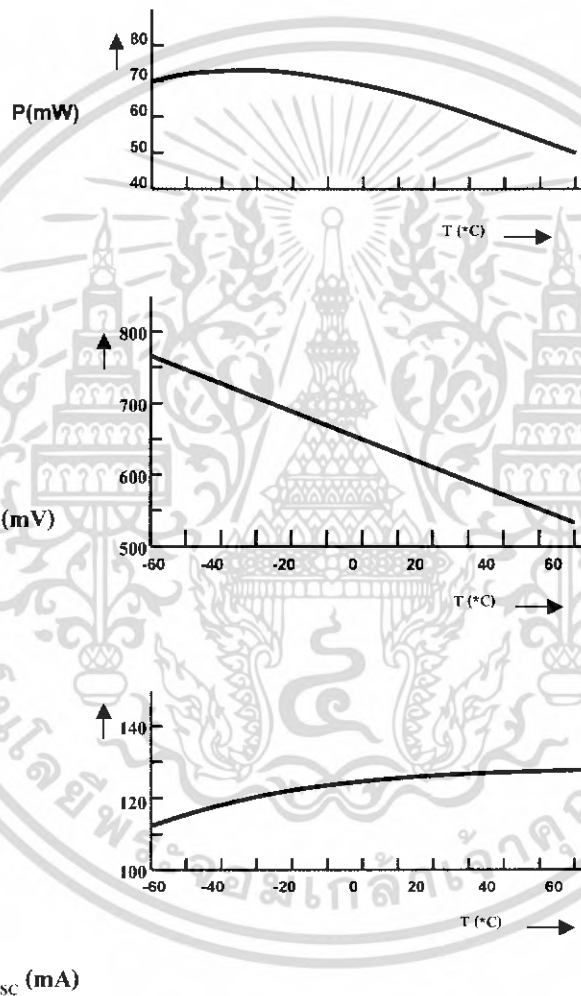
### 2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ ( $V_{oc}$ )

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ตามสมการที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

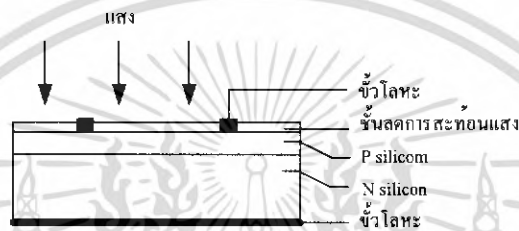


รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์

## 2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น เนื่องจากแสงที่ส่องมากระทบผิวหน้าเซลล์จะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเอาไว้เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และมีบางส่วนสะท้อนไปจากผิวหน้าของเซลล์ แสงส่วนที่สะท้อนออกไปจากผิวนานี้เองที่สูญเสียไปโดยไม่เกิดประโยชน์ เพื่อที่จะนำแสงส่วนนี้มาใช้ประโยชน์อีก จึงควรมีชั้นลดการสะท้อนแสงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นตามการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวหน้าของเซลล์ ชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ยอมให้แสงผ่านเข้าไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้ เมื่อแสงสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเซลล์ ชั้นลดการสะท้อนแสงจะทำให้แสงบางส่วนสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์อีก ช่วยให้เซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จึงทำให้เซลล์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย ชั้นลดการสะท้อนแสงจะช่วยให้แสงสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้มากเพียงใด จะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหและความหนาของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

สาร	ดัชนีหักเห (n)
SiO <sub>2</sub>	1.5
SiO	1.9
SnO <sub>2</sub>	2.1
ZnS	2.3
TiO <sub>2</sub>	2.6

### 2.11 การสะท้อนของแสงในตัวกลางต่างชนิดกัน

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 2 ชนิด จะมีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับและส่วนหนึ่งหักเหผ่านตัวกลาง สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ (Coefficient of reflection:  $\rho$ ) หาได้ดังนี้

$$\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

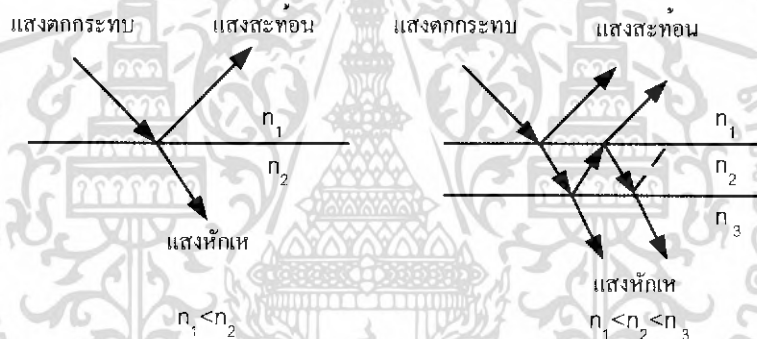
โดยที่  $n_1$  และ  $n_2$  เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 2 ชนิด

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 แสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับลงมายังผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 อีก และแสงส่วนน้อยหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ดังรูปที่ 2.27 การสะท้อนกลับนี้เอง ที่ทำให้ผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.27 การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด

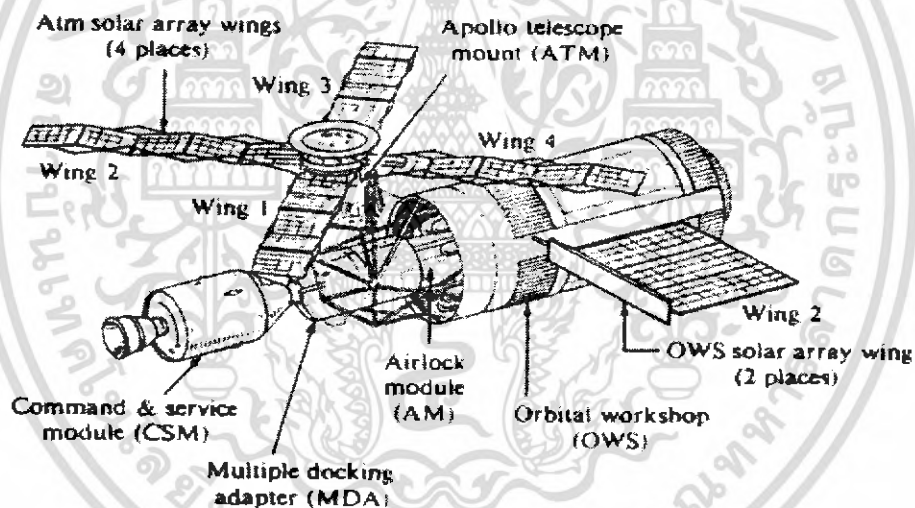
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์

##### บทนำ

ตั้งแต่ปีค.ศ.1953 เป็นต้นมา ก็ได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับยานอวกาศ หรือดาวเทียมต่างๆดังแสดงในรูปที่3.1 จนกระทั่งถึงปีค.ศ.1973 หลายบริษัทได้ให้ความสนใจที่จะนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลก จึงได้มีการพัฒนาการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดราคาในการผลิตลง ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ในอนาคต



รูปที่ 3.1 ภาพสเก็ตดาวเทียม skylab ที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

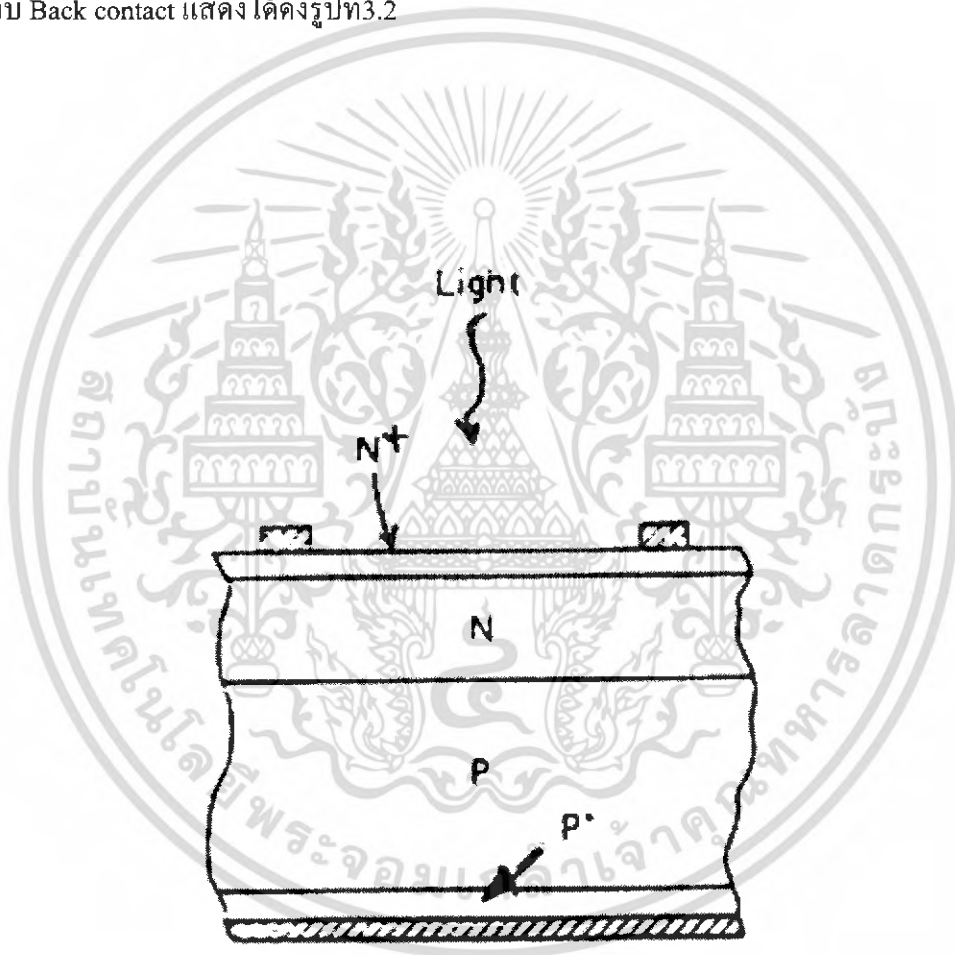
#### 3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

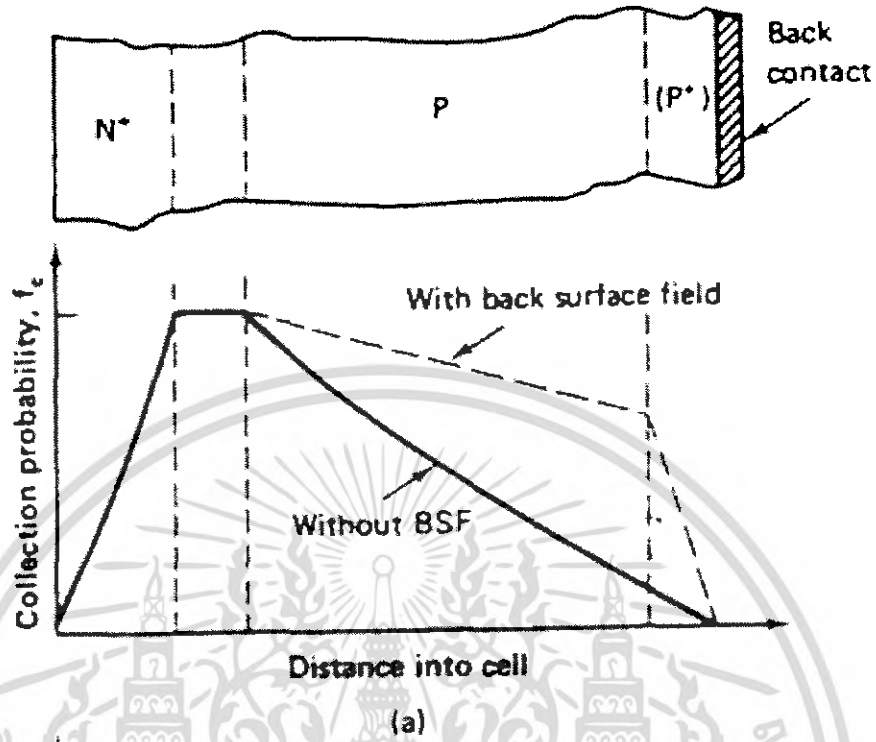
### 3.1.1 Back Surface Fields (BSF)

Back surface fields เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีดังกล่าวนี้ในปัจจุบันนี้ได้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมาตรฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพสูงในหลายแห่ง เนื่องจากกระบวนการสร้าง Back surface fields ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้อย่างมากอีกด้วย การทำ Back surface fields (BSF) สามารถทำได้โดยการทำ High dope ชนิดเดียวกับกับฐานรองในบริเวณด้านข้างของแผ่น Substrate ใกล้กับ Back contact แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธี Back Surface Fileds (BSF)

การทำ Back surface fields (BSF) จะมีผลช่วยเพิ่มกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) และแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) เนื่องจากการ Back surface fields (BSF) จะเข้าไปช่วยเพิ่มค่าของ Collection เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดง Collection Probability ของเซลล์ที่มี BSF และ ไม่มี BSF  
 Probability ( $f_c$ ) โดยค่าของ Collection Probability จะหมายถึง พาหะส่วนน้อยที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงจะมีโอกาสเปลี่ยนเป็นกระแสตรงจกร ( $I_{sc}$ ) ได้เท่าใด และจากการเพิ่มขึ้นของค่า Collection Probability นี้จะมีผลทำให้ค่าของกระแสตรงจกร ( $I_{sc}$ ) เพิ่มขึ้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.3

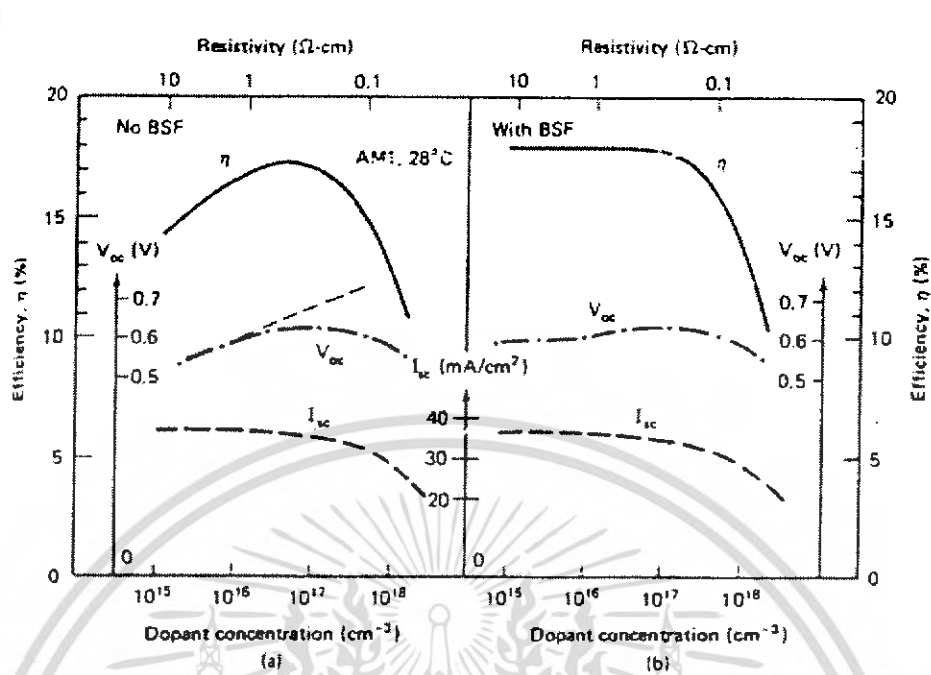
หมายเหตุ จากความหมายเบื้องต้นของ Collection Probability จะ ได้สมการ คือ

$$f_c = \frac{J_{sc}}{J_{DIS}} \tag{3.1}$$

หรือ  $f_c = e^{-\frac{x}{L_c}}$  (3.2)

- |       |           |     |   |
|-------|-----------|-----|---|
| เมื่อ | $J_{sc}$  | คือ | การแสลต์ตรงจกร ( $I_{sc}$ )                 |
|       | $J_{DIS}$ | คือ | กระแสที่เกิดขึ้น                            |
|       | $x$       | คือ | ระยะทางจากขอบของ Depletion region ไปยังขั้ว |
|       | $L_c$     | คือ | ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน                    |

ซึ่งจากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าค่า  $f_c$  เมื่อมี Back surface fields (BSF) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากแต่  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 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.

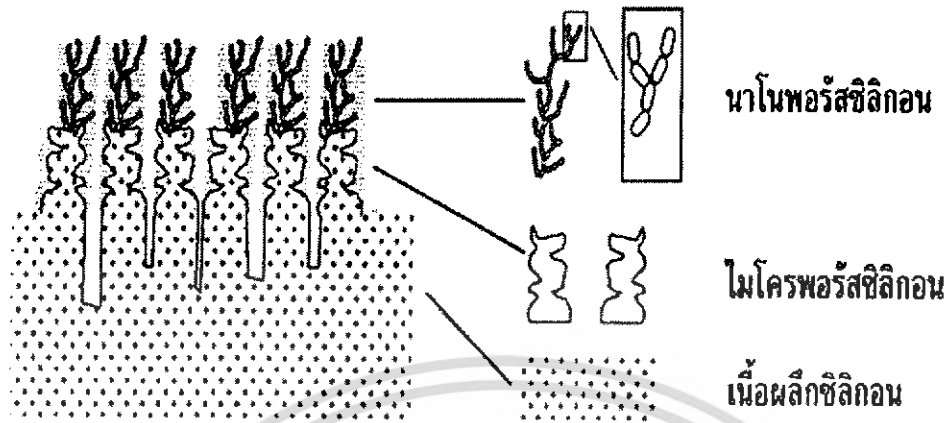
ก่อนเมื่อไม่มี Back surface fields (BSF) ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ 3.2 จะพบว่า  $f_c$  จะถูกลดทอนด้วย เทอมเอ็กโพเนนเชียลแต่ Back surface fields (BSF) ช่วยทำให้การลดทอนของ  $f_c$  ลดลงจึงมีผลทำให้  $f_c$  มีค่าเพิ่มขึ้น

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญคือ กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ), แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) ภายหลังการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธี Back surface field (BSF) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

### 3.1.2 พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)

#### 3.1.2.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอน คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิคอนเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรอยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงภาพจำลอง โครงสร้างของชั้นพอร์ซิลิกอน

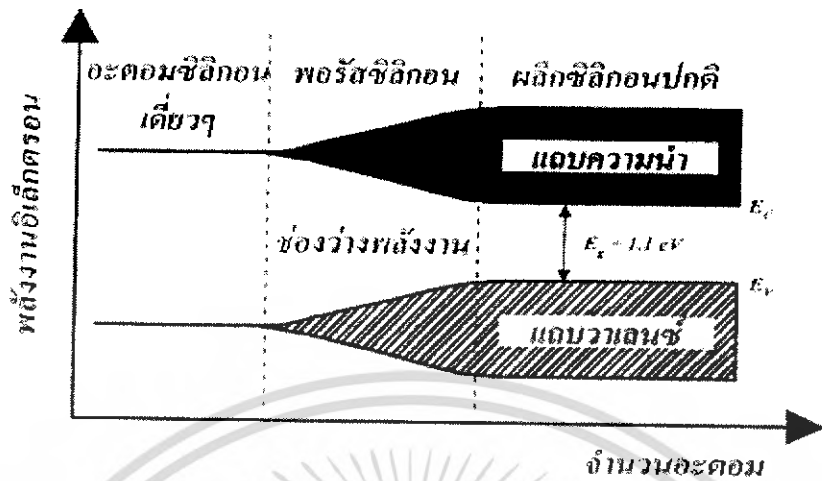
จากภาพจะเห็นได้ว่าชั้นของพอร์ซิลิกอนจะประกอบด้วย

1. โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์ซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์ซิลิกอนที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่ติดกับเนื้อของผลึกซิลิกอน
2. โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์ซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์ซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 10 นาโนเมตรลงไป

โครงสร้างของชั้นพอร์ซิลิกอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching)

### 3.6.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์ซิลิกอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้การแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ จะมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนของช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 3.6 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร อันจะมีผลทำให้ลักษณะ โครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์สซิลิกอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน ( $E_{ps}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้าง นาโนเมตรของพอร์สซิลิกอน

### 3.1.2.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิกอน

ในกระบวนการสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกซิลิกอนที่มีขนาดโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites) และสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้นั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน

#### เทคนิคในการสร้างแบบต่างๆ

1. เทคนิคในการสร้างแบบ Microwave plasma decomposition ของก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{SiH}_4$ )
2. เทคนิควิธีการสร้างแบบ Laser breakdown ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{SiH}_4$ )
3. เทคนิคการสร้างแบบ High-frequency spark discharge
4. การสร้างพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

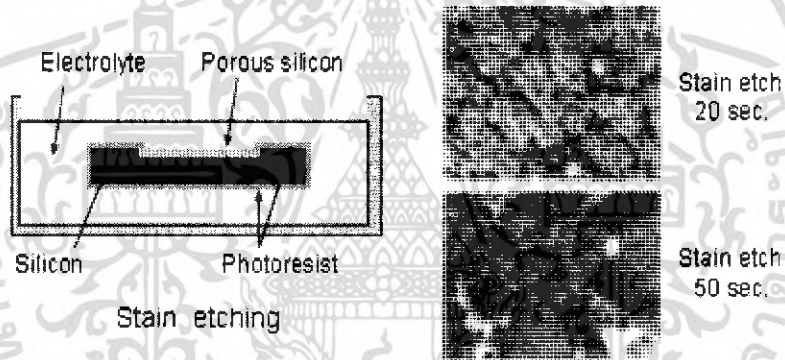
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการ Stain etching

ในการทดลองนี้ได้ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน ด้วยวิธี Stain Etching เนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างชั้นพอร์สซิลิคอนก็มีราคาไม่แพงอีกด้วย ซึ่งการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีนี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching

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



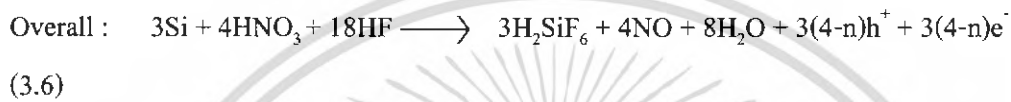
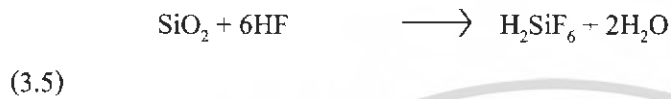
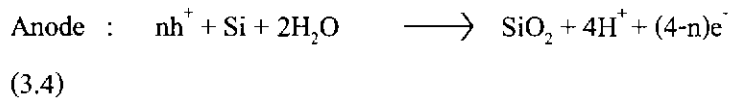
รูปที่ 3.7 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และ ตัวอย่างของพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี่

### 1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี

จุดสำคัญของการกัดแบบข้อมสี่(Stain etching) ก็คือ การทำให้เกิดประจุโฮลเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF)ทำปฏิกิริยากับ กรดไนตริก(Nitric :  $\text{HNO}_3$ )เพื่อให้เกิดประจุโฮล ดังสมการที่ 3.3 หลังจากนั้นประจุโฮลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation reaction)ได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 3.4 ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เองสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ดังสมการที่ 3.5 ซึ่งการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์และการถูกกัดออกของซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยาเหมือนอย่างกรณีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี(Anodication) ดังนั้นลักษณะโครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ(Non-uniform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อม



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีสันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีสันจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมครอน ถึงประมาณ 1.5 ไมครอน เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าในกระบวนการกัดแบบข้อมสี มีความจำเป็นอย่างยั้งที่จะต้องมีการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกร่วมกับกรดไนตริกสักครู่ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยากัดในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพาะฟักตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้ในกระบวนการกัดนั่นเอง เรียกว่า "การบ่มสารละลาย (Incubation)"

## 2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากวิธี Stain etching

1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ โดยที่อัตราการเกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น

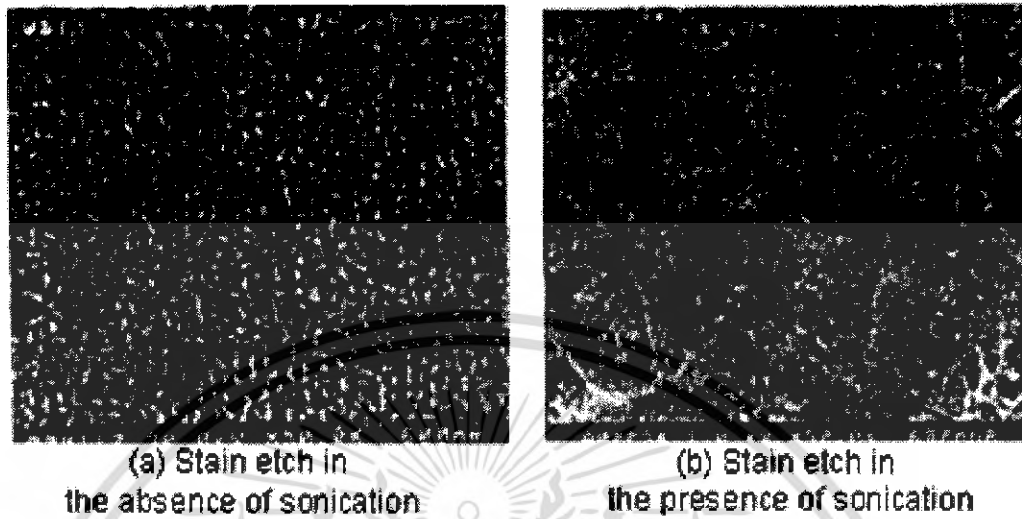
2. ชนิดของสารเจือและค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ซ มีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดของชั้นพอร์ซซิลิคอนซึ่งทำให้มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำ "Incubation" โดยตรง โดยที่ผลึกซิลิคอนชนิดพี จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 30 วินาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.004 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาในการบ่มสารละลาย 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 (polycrystalline), แผ่นซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous) และชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเยอรมันเนียม ( $Si_xGe_x$ ) ที่สร้างจากกระบวนการEpitaxi เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสีกายได้ปัจจัยภายนอกเดียวกัน พบว่า จากการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต(UV) พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยวแผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติPhotoluminescence(PL) แต่ พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบAmorphousกลับไม่แสดงคุณสมบัติPhotoluminescence(PL) ส่วนกรณีชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเยอรมันเนียม ( $Si_xGe_x$ ) ที่สร้างจากกระบวนการEpitaxi พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของเยอรมันเนียม(Ge)จะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิดPhotoluminescence(PL)ลดลงในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้กัดและการเปลี่ยนแปลงทางพีสิคส์ของกระบวนการทำปฏิกิริยาล้วนมีผลกระทบต่อ โครงสร้างและลักษณะของพอร์สซิลิคอนที่จะเกิดขึ้น เช่น การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลาย เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่หยาบกว่าการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย ดังรูปที่ 3.8



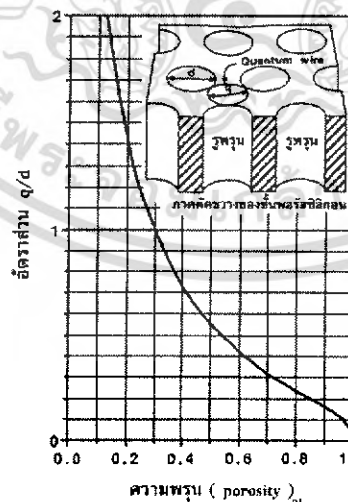
รูปที่ 3.8 ภาพเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching

รูป (a) พอร์สซิติคอนที่ได้จากการไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

รูป (b) พอร์สซิติคอนที่ได้จากการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

#### 3.1.2.4 ความพรุนของพอร์สซิติคอน

พอร์สซิติคอนนั้นก็คือ ผลึกซิติคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิติคอนที่เหลือน และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึก

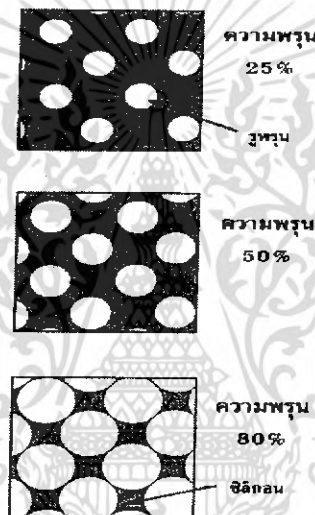


รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิติคอน( $q$ ) กับขนาดของรูพรุน ( $d$ ) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิติคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์ซซิลิกอนแสดงในรูปที่ 3.9

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์ซซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้พอร์ซซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างพอร์ซซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

### 3.1.2.5 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

วิธีการที่จะศึกษาถึงขนาด หรือลักษณะของช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state ให้ได้ผลดีที่สุด ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เพราะว่าการดูดกลืนแสงก็ดี หรือการเปล่งแสงก็ดี เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานใดๆ มีการดูดกลืนแสง แล้วคายแสงออกมา เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานซึ่งค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมานั่นเอง

#### โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

การเปล่งแสงในลักษณะโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการกระตุ้นพาหะอิเล็กตรอนด้วยวิธีการส่องแสง (excitation by light) จนพาหะอิเล็กตรอนมีพลังงานมากเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบความนำได้ แต่เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนเหล่านี้มีความไม่เสถียรในสถานะใหม่นี้ ดังนั้นจึงต้องตกกลับมาอยู่ในสถานะเดิม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง ซึ่งค่าพลังงานที่ปล่อยออกมานี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องกระโดดมารวมตัวกับโฮล โดยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (E) กับความยาวคลื่นของแสง ( $\lambda$ ) เป็นดังนี้คือ

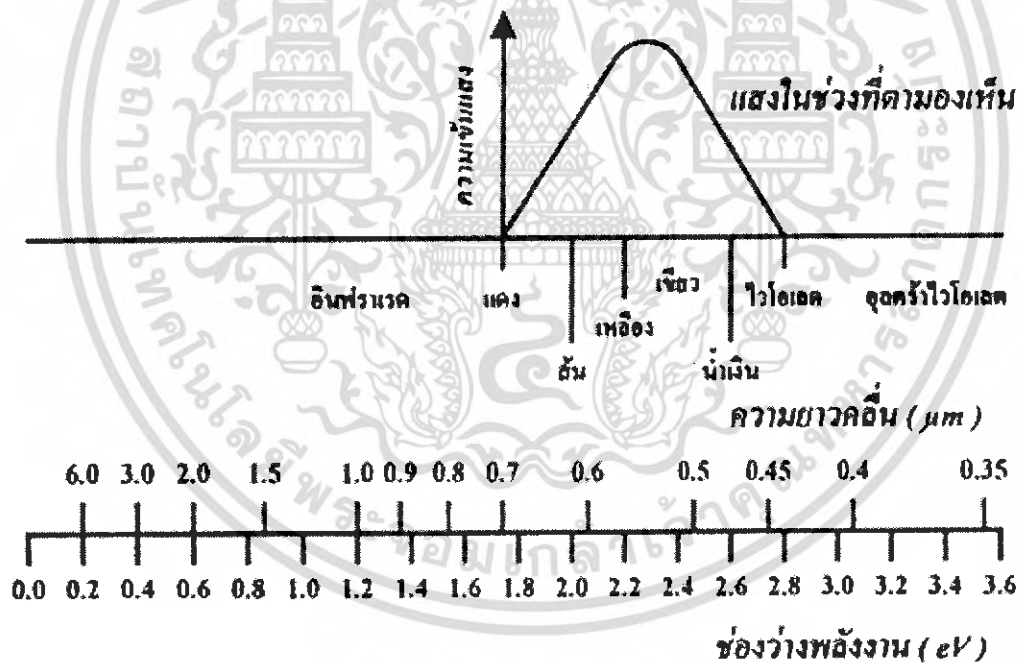
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.7)$$

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

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

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{1240}{E} (\text{eV}) \quad (3.8)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า การที่แสงที่เปล่งออกมาจะมีความยาวคลื่นหรือสีต่างๆ ได้นั้น ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่คายออกมานั้นเอง โดยสีของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงแผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ

### 3.1.2.6 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

#### กลไกในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอน

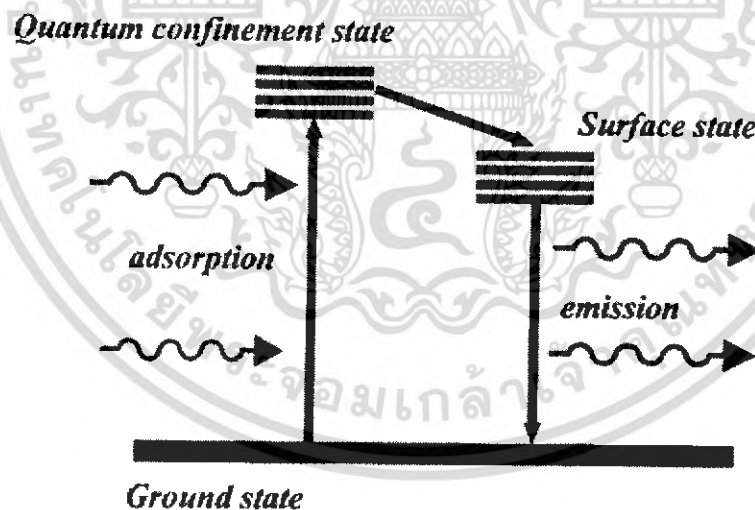
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะโครงสร้าง และส่วนประกอบของพอร์สซิลิกอน หลายๆกลุ่มวิจัยทั่วโลกเชื่อกันว่าคุณสมบัติของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน คือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect ขึ้น ภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิกอน ทำให้ขนาดช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิกอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิกอน

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สซิลิกอน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั่นเอง

จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้เอง ทำให้เราสามารถทำการอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescent state model) ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงแบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิกอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดยสถานะแรกนั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ quantum confinement effect หรือ quantum effect ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิกอนถูกกระตุ้นให้อยู่ที่ระดับพลังงานสูงๆ แล้วมันก็จะคายพลังงานออกมาเป็นแสง ซึ่งนี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โนพอร์สซิลิคอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลของการที่ช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานในนาโนพอร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เองอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

### 3.2 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

#### 3.2.1 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เมื่อพิจารณาด้านต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว ที่ประกอบเป็นแผงเซลล์พื้นที่ 1-2 m<sup>2</sup> จะพบว่า

35% ของต้นทุน อยู่ที่การเตรียมแผ่นซิลิคอนที่จะนำมาผลิต (ready for cell production)

30% ของต้นทุน อยู่ที่กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (making a solar cell)

30% ของต้นทุน อยู่ที่การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์เข้าเป็นแผง

เมื่อพิจารณาด้านต้นทุนการเตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ สำหรับเป็นวัสดุเริ่มต้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จะพบว่า

30% ของต้นทุน อยู่ที่การเตรียมวัสดุ (poly-Si)

35% ของต้นทุน อยู่ที่การปลูกผลึก (Crystal growth)

30% ของต้นทุน อยู่ที่การตัดผลึกให้เป็นแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเกือบครึ่งหนึ่งต้องเสียเนื้อซิลิคอนไปกับผงซิลิคอนที่ถูกเลีย

5% ของต้นทุน อยู่ที่การ etching, polishing, cleaning etc.

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

โดยทั่วไปเทคโนโลยีมาตรฐานในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอน สามารถแบ่งได้เป็น

1. กระบวนการ Reduction SiO<sub>2</sub> ให้เป็น Metallurgical-Grade Silicon (MG-Si)

2. กระบวนการทำ MG-Si ให้บริสุทธิ์ขึ้นเป็น Semiconductor-Grade Silicon (SeG-Si)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ ไม่ว่าจะในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การนำ SoG-Si ไปปลูกผลึก และตัดเป็นแผ่นเวเฟอร์
4. กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์
6. การบรรจุเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้งาน

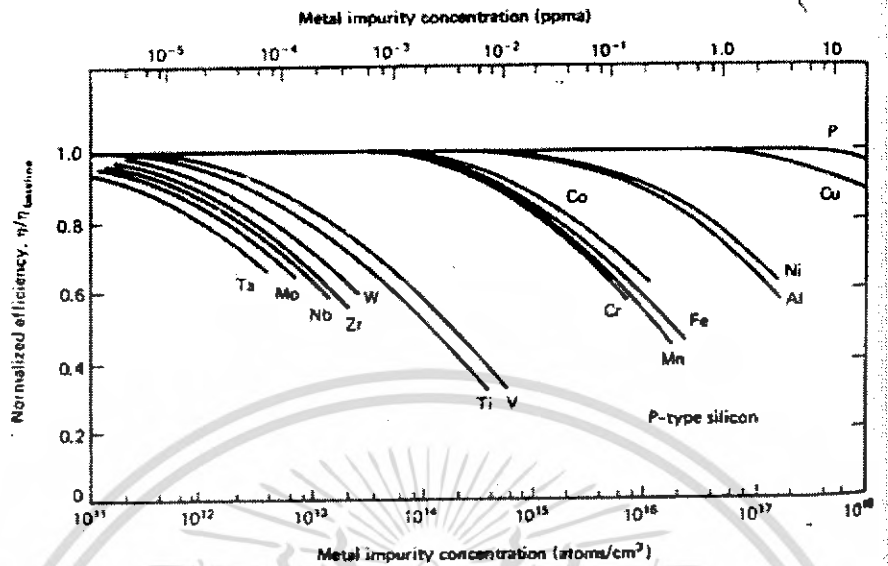
การสร้าง Solar-Grade Silicon (SoG-Si) สามารถทำได้โดยการใช้ MG-Si มาเป็นวัตถุดิบในการปลูกผลึกซิลิคอน ซึ่งซิลิคอนที่อยู่ในรูปของ MG-Si นี้จะมีความบริสุทธิ์ที่ประมาณ 99 % และยังมีอะตอมแปลกปลอมของสารอื่นดังแสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงความหนาแน่นของอะตอมแปลกปลอม  
ใน 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

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าอะตอมแปลกปลอมที่มีมาก ได้แก่ เหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) อย่างไรก็ตามการที่ซิลิคอนที่นำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์มีอะตอมอื่นปะปนอยู่ ย่อมมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์อยู่บ้าง แต่ก็นับว่าน้อยมาก ดังแสดงได้จากรูปกราฟที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงผลกระทบของอะตอมแปลกปลอมเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

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) สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้มากที่สุด

การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากการเลือกวัสดุที่ใช้ให้มีราคาต่ำแล้ว กระบวนการที่นำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีส่วนช่วยลดต้นทุนไม่น้อยทีเดียว ดังนั้น ในปัจจุบันจึงมีความพยายามในการวิจัยและพัฒนาเพื่อหากระบวนการมาตรฐาน ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด เช่น การลดกระบวนการที่มีต้นทุนสูงลง โดยหากระบวนการที่มีต้นทุนต่ำกว่าแล้วได้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันเข้ามาทดแทน

## บทที่ 4

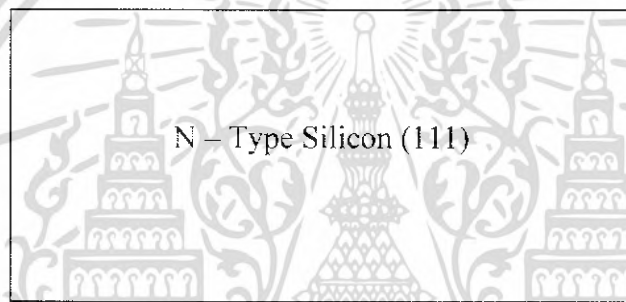
### การสร้างและการออกแบบเซลล์

ในบทนี้จะได้อธิบายถึงขั้นตอนในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีกระจกชั้นแบบเดียวซึ่งเป็นการลดขั้นตอนในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีให้เหลือเพียง 1 ครั้ง จากเดิมที่ใช้ถึง 3 ครั้ง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้

#### 4.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีกระจกชั้นแบบเดียว

ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

##### 4.1.1 การทำความสะอาดผิวหน้า ( Cleaning )



รูปที่ 4.1 แผ่นผลึกฐานรอง N-type Silicon

##### 1. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

- จุ่มในสารละลายของ Sulfuric ( $H_2SO_4$ ) : Hydrogen Peroxide ( $H_2O_2$ ) 30 % = 1 : 3 ที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$

ใน bath I 5 นาที

-จุ่มในสารละลายของ Sulfuric ( $H_2SO_4$ ) : Hydrogen Peroxide ( $H_2O_2$ ) 30 % = 1 : 3 ที่ อุณหภูมิ  $120^\circ C$

ใน bath II 5 นาที

-Rinse ด้วย DI 10 นาที จนสะอาด

-เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

##### 2. กำจัดฝุ่น

-Ultrasonic DI 5 นาที

-จุ่มในน้ำ DI แก้ว 1 จนสะอาด

-เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

##### 3. กำจัดไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที

-Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที

-จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด

-เป่าแห้งด้วยก๊าซ - จุ่มในสารละลายของ

หมายเหตุ : ตะกร้า Trichloroethylene ต้องแห้งสนิท

#### 4. กำจัดเศษโลหะ

-ต้มในกรด Nitric ( $\text{HNO}_3$ ) 2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที

-จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว

-ต้มในน้ำ DI 2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที

-จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด

-เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$

-จุ่มในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid :  $\text{HF}$  5%) 10–20 วินาที

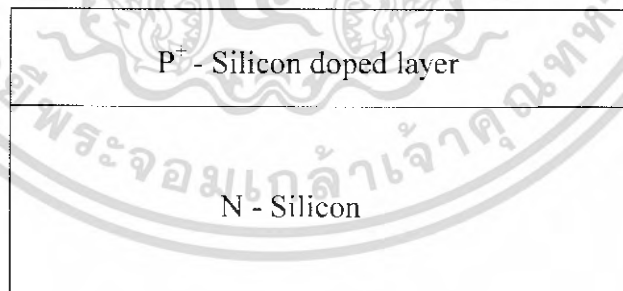
-จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด

-เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$

#### 4.1.2 กระบวนการแพร่สารเจือ ( P-plus Diffusion )

- Pre deposition ที่ อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส โดย ฟอสฟอรัส

- Drive in



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของชั้น P<sup>+</sup> ซึ่งถูกสร้างอยู่บนแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอน

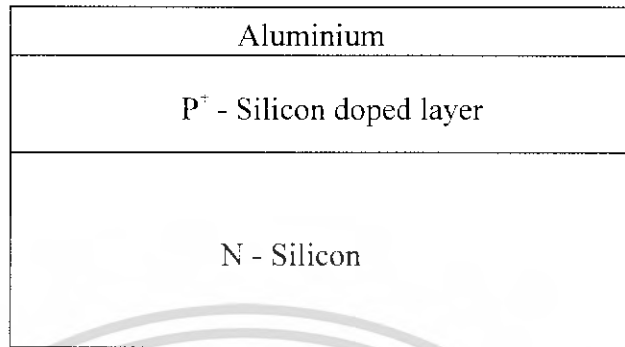
#### 4.1.3 กระบวนการสร้างชั้นอะลูมิเนียม (Aluminium Evaporation )

ทำการสร้างชั้นอะลูมิเนียมเคลือบผิวด้านบนของแผ่นผลึก เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า

โดยใช้เทคนิคการระเหยสารในสุญญากาศ ( Vacuum Evaporation ) ความดันภายใน Chamber =

$1 \times 10^{-6}$  Torr

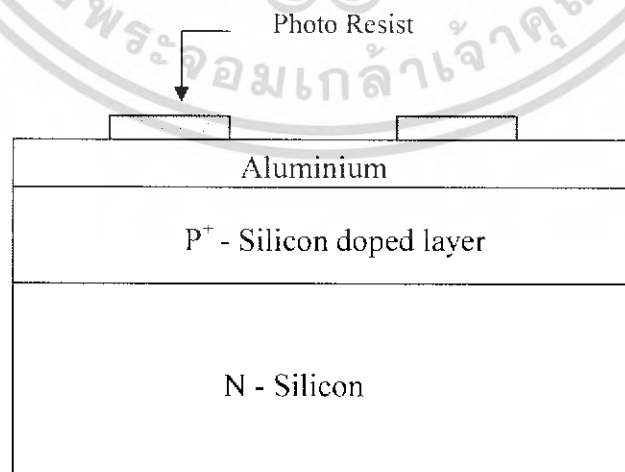
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงภาพตัดขวางของชั้นของ Aluminium

#### 4.1.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

- อบที่ 90 องศาเซลเซียส 30 นาที
- นำแผ่นซิลิคอนวางลงบนเครื่อง Spiner ใช้เครื่องสุญญากาศดูดอากาศยึดแผ่นซิลิคอนไว้ที่หัว Spiner
- หยคน้ำยาไวแสง S1818 ลงบนแผ่นชิ้นงาน ให้ทั่ว
- ทำการSpin 500 rpm 5 วินาที และ 4000 rpm 40 วินาที
- Pre-Bake แผ่นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสง Ultraviolet ผ่านMask ลงบน แผ่นซิลิคอน ที่มีน้ำยาไวแสงเคลือบ
- ทำDevelopment
- Postbake ในเตาอบที่อุณหภูมิ 90°C อบทิ้งไว้ 30 นาทีเพื่อ Fix Pattern

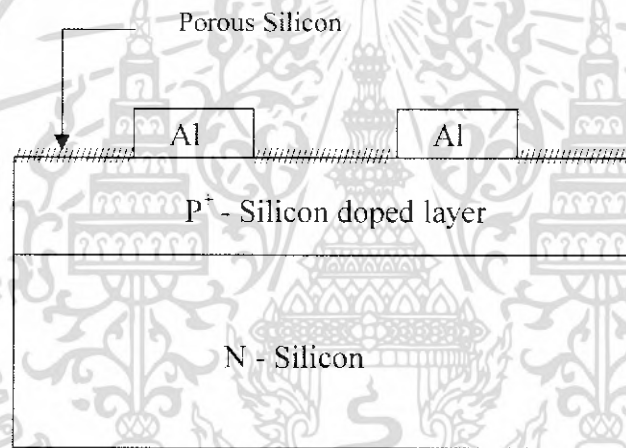


รูปที่ 4.4 แสดงภาพตัดขวางของชั้นน้ำยาไวแสงที่ได้จากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 กระบวนการ Etching & Porous Silicon Formation

โดยวิธีการกัดย้อมสีในการทดลองนี้ทำได้โดยจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารละลายผสมของ HF (47 wt.%) HNO<sub>3</sub> (60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ ใช้เวลาเพาะบ่มสารละลาย 30 นาที และใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี

- ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- ล้าง S1818 ออกโดยจุ่มใน Acetone แล้วล้างด้วยน้ำ DI
- ล้างน้ำ DI นาที 2-3 ครั้ง
- ต้มในน้ำ DI 30 นาที 1-2 ครั้ง
- ล้างน้ำ DI 10 นาที 2-3 ครั้ง แล้วเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 4.5 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการEtching

#### 4.2 การออกแบบマスク โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

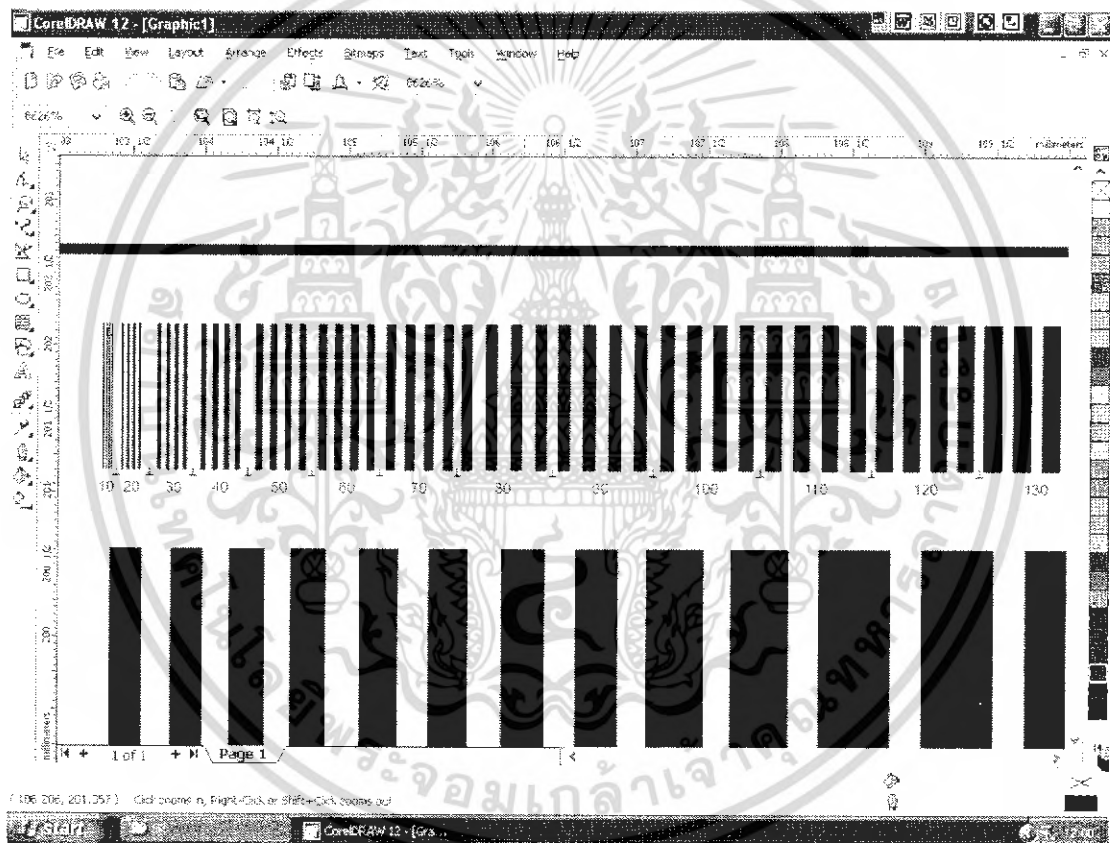
ปัจจุบันกระบวนการออกแบบและสร้างกระจกมาส์กได้มีการพัฒนาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ทำให้มีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดเวลาในการออกแบบและการสร้างได้มาก โดยในที่นี้ใช้โปรแกรม Corel Draw

มาส์กของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้ออกแบบมาสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผิวหน้าเป็นหลุมปิรามิด และหลุมปิรามิดที่เป็นพอร์สซิลิคอน โดย 1<sup>st</sup> Mask : สำหรับการกัดผิวหน้าให้เป็นหลุมปิรามิด 2<sup>nd</sup> Mask : เป็นการเปิดช่องเพื่อแพร่สารเจือชนิดเอ็น และ 3<sup>rd</sup> Mask : เป็นการเปิด contact window และ 4<sup>th</sup> Mask สำหรับการกัดลวดลายอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การออกแบบ Mask โดยโปรแกรม Coral Draw

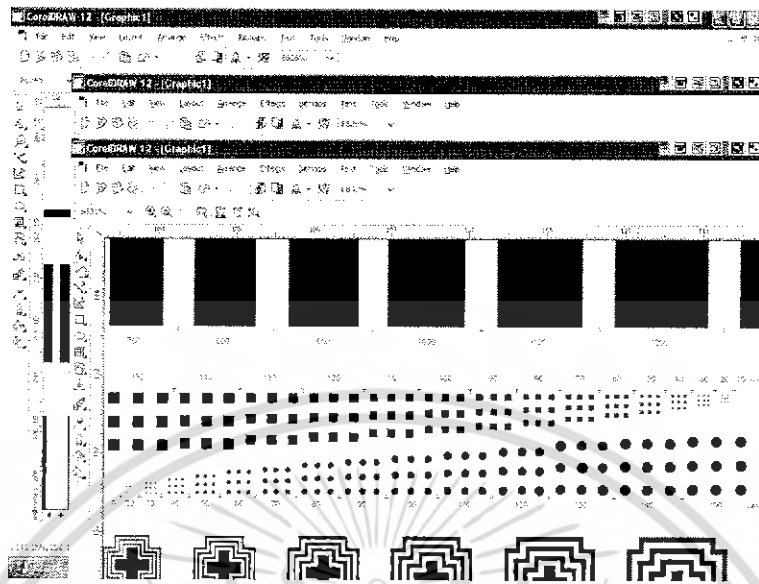
การออกแบบ Mask โดยใช้โปรแกรม Coral Draw สามารถออกแบบลวดลายโลหะให้มีขนาดเล็กถึง  $30\ \mu\text{m}$  ได้ แล้วเมื่อนำไฟล์นี้ไปยิงฟิล์ม สามารถแยกรายละเอียดของลวดลายขนาด  $30\ \mu\text{m}$  ได้ชัดเจน ซึ่งอันที่จริงขนาดลวดลายโลหะที่เป็น Finger ที่ต้องการอยู่ในระดับ  $100\text{-}200\ \mu\text{m}$  และ Bus bar ที่ต้องการอยู่ในระดับ  $1\text{-}2\ \text{mm}$  ดังนั้นการออกแบบด้วยโปรแกรมนี้จึงไม่เกิดปัญหาด้านขนาดของลวดลายโลหะ



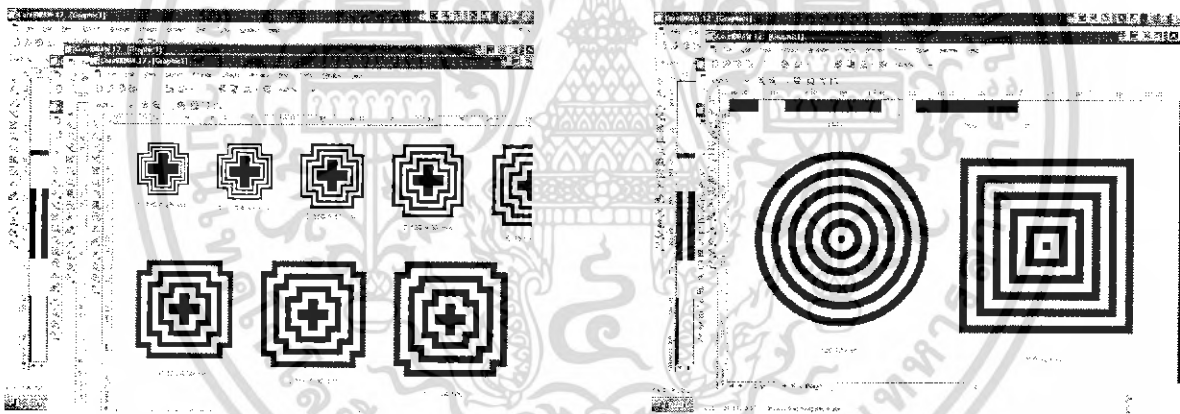
รูปที่ 4.5 ลวดลายโลหะขนาดต่างๆที่ออกแบบบน โปรแกรม Coral Draw

และสำหรับลวดลายที่เล็กลงก็สามารถออกแบบได้ถึงในระดับ  $30\ \mu\text{m}$  แล้วไม่เกิดปัญหาในการยิงฟิล์ม เช่นกัน

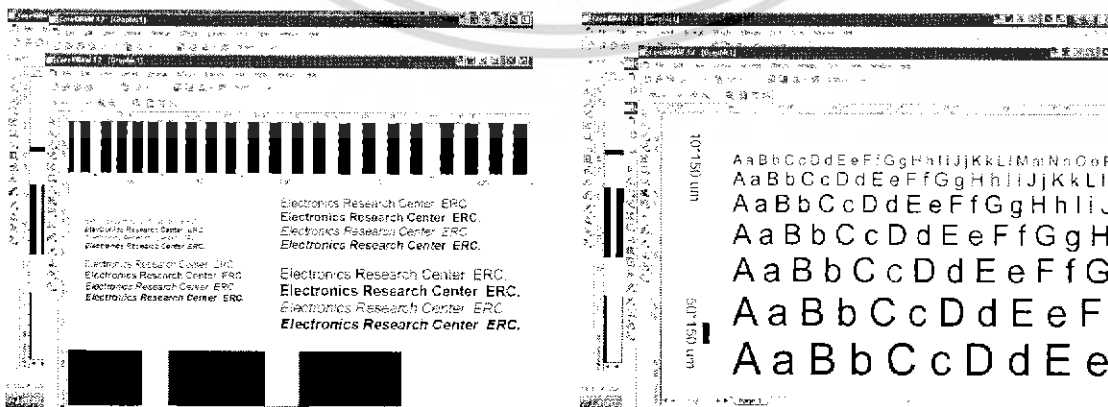
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การออกแบบลวดลายสีเหลี่ยมจตุรัสและวงกลม

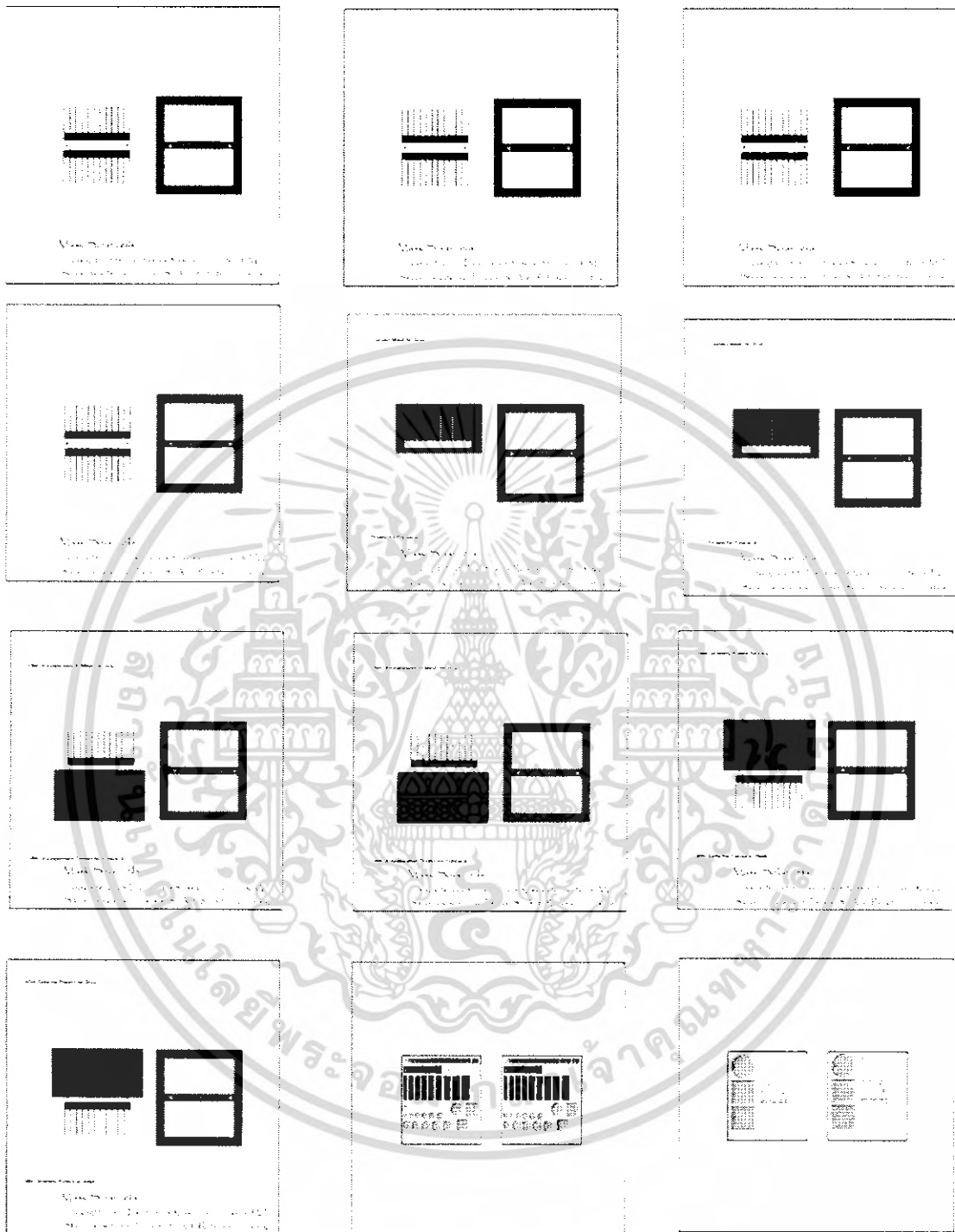


รูปที่ 4.8 การออกแบบลวดลายการซ้อน Mask



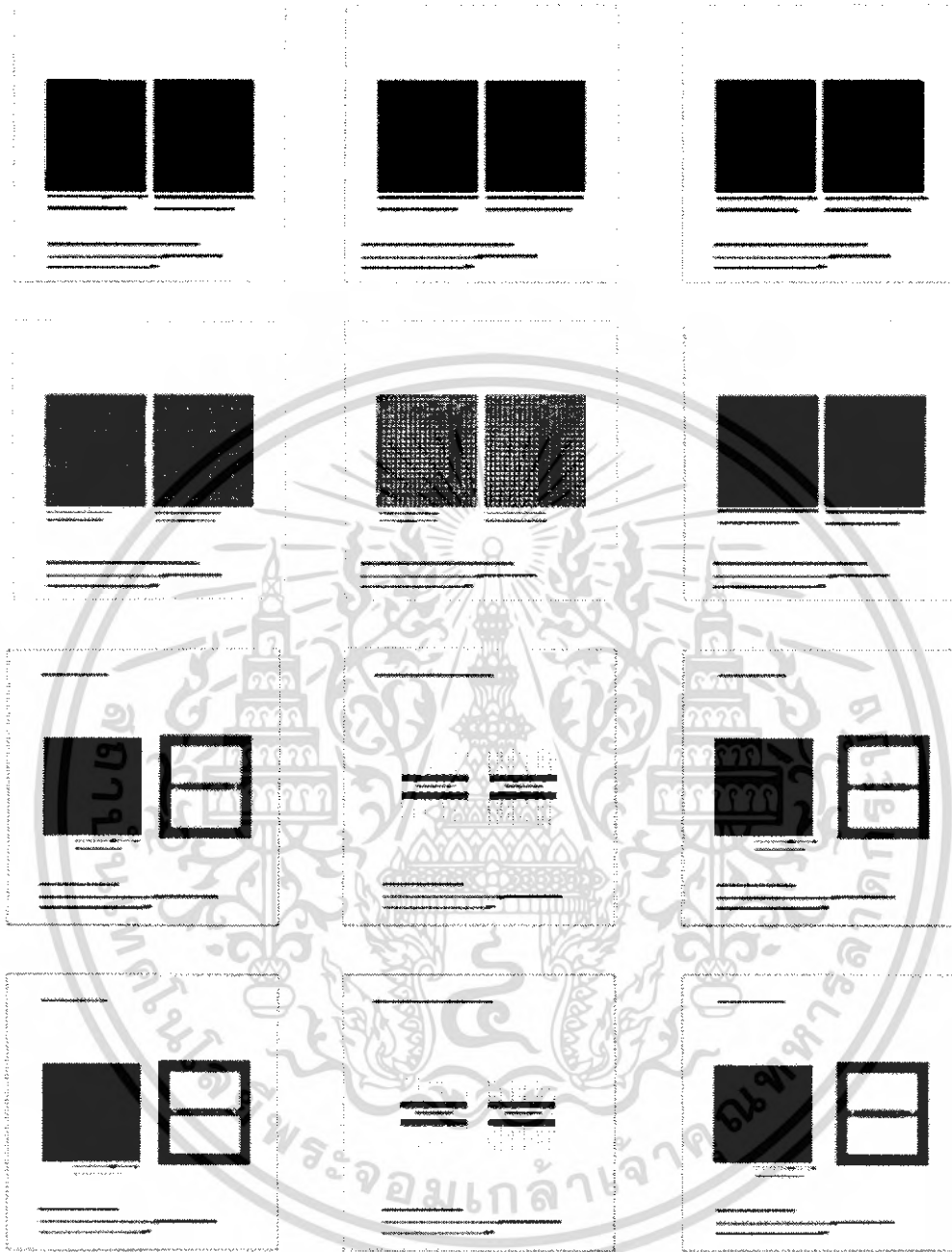
รูปที่ 4.9 การออกแบบลวดลายตัวอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



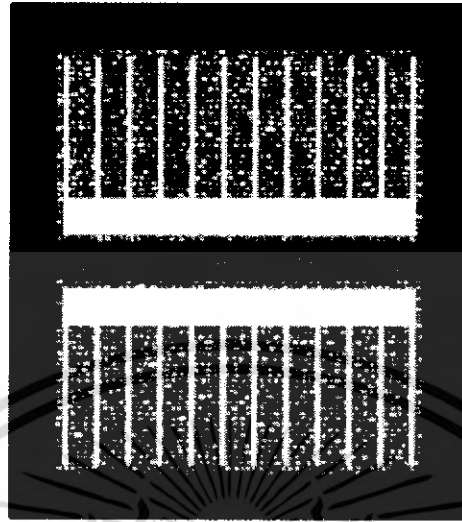
รูปที่ 4.10 Mask และ Selective ที่ออกแบบโดย โปรแกรม Coral Draw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 Mask Inverted pyramid Solar cell ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Coral Draw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

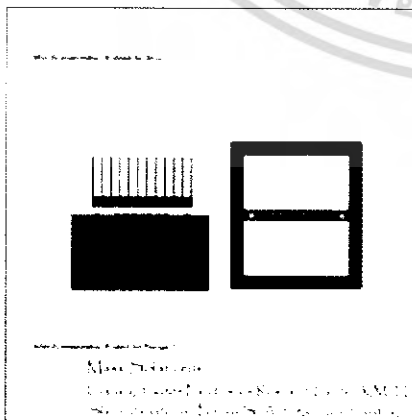


รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการวางสวดลายโลหะบนพื้นที่ ที่ เกิด Etching ทั้งสองเซลล์

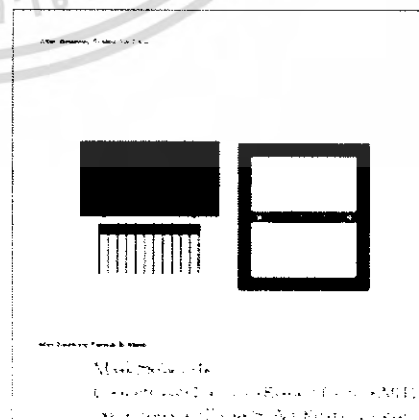


(a)

(b)

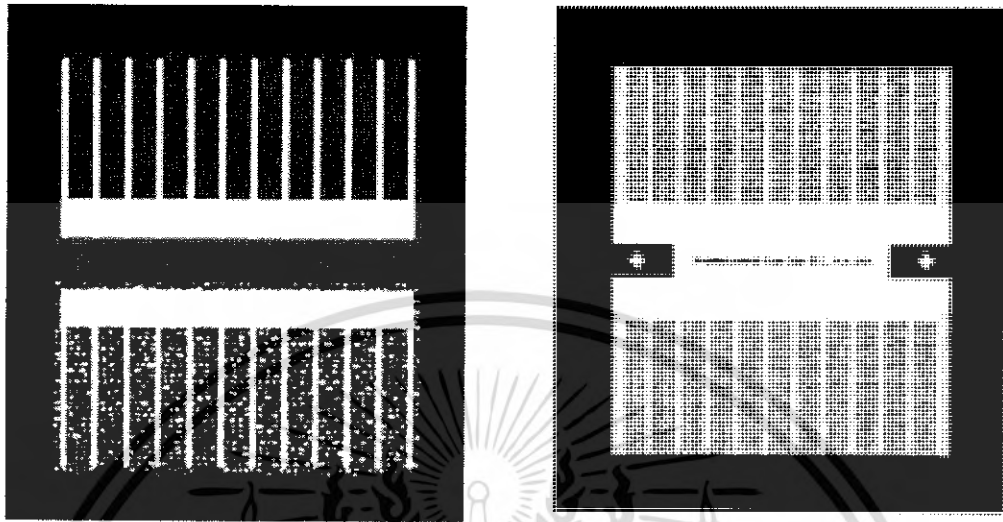


(c)



(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การออกแบบ Mask โดยเซลล์หนึ่ง เป็นการลดชั้นการสะท้อนแสงโดยใช้ชั้นซิลิกอน ออกไซด์ และอีกเซลล์หนึ่งใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงโดยใช้การสร้างพอร์ซิลิกอน (a) 1<sup>st</sup> Mask สำหรับการกัดหลุมปิรามิด (b) 2<sup>nd</sup> Mask สำหรับเปิดช่องลวดลายบนชั้นSiO<sub>2</sub> (c) 3<sup>rd</sup> Mask สำหรับวางลวดลายโลหะลงบนชั้น (d) 4<sup>th</sup> Mask สำหรับวางลวดลายโลหะลงบนชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์ซิลิกอน (e) ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ 2 เซลล์ บนซิลิกอนชั้นสเตรตซ์ขึ้นเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบผลของชั้นลดการสะท้อนของแสงที่ต่างกัน (f) ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีผิวหน้าเป็นหลุมปิรามิด

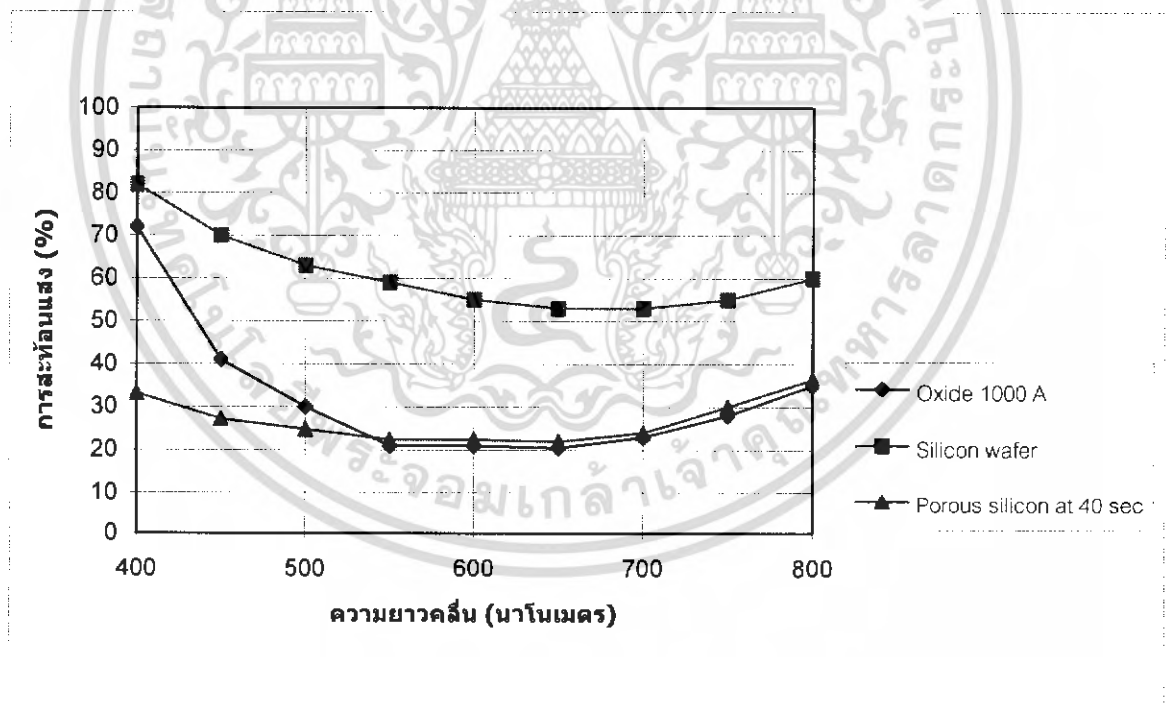
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลอง

เซลล์แสงอาทิตย์จะมีโครงสร้างที่เป็นชั้นรอยต่อ P-N และมีชั้นลดการสะท้อนแสงด้านบน เพื่อช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จากแนวคิดคุณสมบัติของพอร์ซิลิคอนที่มีการสะท้อนแสงใกล้เคียงกับชั้นลดการสะท้อนที่เป็นชั้นออกไซด์ แต่พอร์ซิลิคอนนั้นสามารถสร้างได้ง่ายและถูกกว่า จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สร้างเป็น เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกลง และสามารถสร้างโดย one mask solar cells ได้

เพื่อให้ได้ลักษณะของพอร์ซิลิคอนที่เหมาะสมจะนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพอร์ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรถึง 800 นาโนเมตรต่ำและมีลักษณะที่เป็นเอกรูปเดียวกัน(Uniformity) มากที่สุด



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการสะท้อนแสงของ ออกไซด์, แผ่นซิลิคอน และพอร์ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

### 5.1.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

#### 5.1.1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตกระบวนการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล
2. เพื่อศึกษาและสังเกตกลไกการเกิดพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

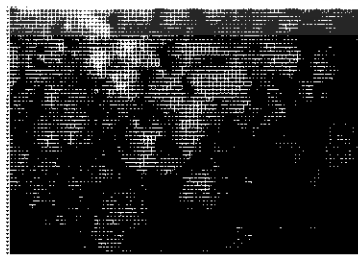
#### 5.1.1.2 การทดลอง

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

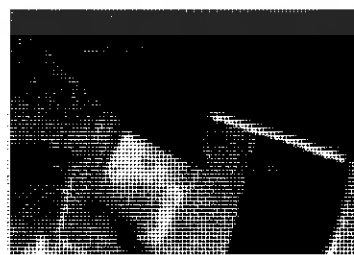
ในช่วงนี้ก็ด้วยการตัดแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างรอยต่อ P-N แล้วขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกให้หมด หลังจากผสมสารละลายได้ประมาณ 30 นาทีแล้วก็นำแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้จุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 1 นาที, ล้างน้ำ DI และทำไปทดสอบการเรืองแสงด้วยหลอด UV แล้วสังเกตผล

#### 5.1.1.3 ผลการทดลอง

เมื่อจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลาย หลังจากนั้นประมาณ 7 วินาทีจะปรากฏเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กมากจากผิวแผ่นซิลิคอน ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีมากขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนสีของแผ่นซิลิคอน ฟองก๊าซบางส่วนที่เกาะที่ผิวของแผ่นซิลิคอนจะรวมตัวกันใหญ่ขึ้นเมื่อนำแผ่นซิลิคอนไปล้างในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้ง จะเห็นอย่างชัดเจนว่าสีต้นของแผ่นผลึกเปลี่ยนไป การเกิดของสีและลวดลายบนแผ่นผลึกเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบลักษณะเป็นจุดกลมและมีหลากหลายสี สันฐานของพอร์สซิลิคอนมีความโปร่งแสงและมีฟองอากาศเม็ดเล็กๆกระจายอยู่ในคล้ายกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยจากการทดสอบการเรืองแสงจะเห็นว่าแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการสร้างชั้นพอร์สแล้วเมื่ออยู่ใต้แสง UV จะมีการเรืองแสงออกมาเป็นสีส้มแดง แสดงว่าแผ่นซิลิคอนนี้มีชั้นพอร์สซิลิคอนเกิดขึ้นจริง



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 (ก)พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากกระบวนการการกัดข้อมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) การเรืองแสงของพอร์สซีลิกอนที่สร้างจากกระบวนการการกัดข้อมล

### 5.1.2 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์สซีลิกอนโดยมีการส่องแสงกระตุ้น

#### 5.1.2.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของเวลาในการกัดพอร์สซีลิกอนด้วยวิธีการกัดข้อมลโดยมีการส่องแสงช่วยกระตุ้น
2. เพื่อศึกษาและสังเกตการสะท้อนแสงของพอร์สซีลิกอนที่สร้างขึ้นจากปัจจัยทางเวลาที่ต่างกันโดยมีการส่องแสงช่วยกระตุ้น

#### 5.1.2.2 การทดลอง

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

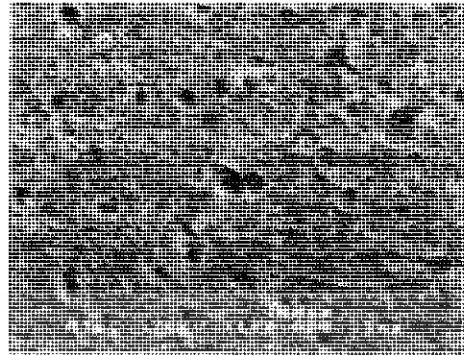
นำแผ่นซีลิกอนที่ทำการสร้างรอยต่อ P-N แล้วมาทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐานและลอกชั้นซีลิกอนไดออกไซด์ออกหมดแล้วจุ่มลงในสารละลายด้วยเวลาที่ต่างกัน คือ 20 วินาที, 40 วินาที, 1.10 นาที, 1.30 นาที, 2 นาที, 2.30 นาที โดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซีลิกอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux แล้วสังเกตผลและนำแผ่นซีลิกอนที่ทำการสร้างมาทำการวัดการเรืองแสงและวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง

#### 5.1.2.3 ผลการทดลอง

ในการทดลองมีการสังเกตว่าในช่วงเวลาเริ่มเกิดพอร์สซีลิกอนจะเร็วกว่าในกรณีที่ไม่มีการใช้แสงกระตุ้น โดยจะเริ่มมีการเกิดฟองขึ้นที่เวลา 5 วินาที หลังจากการทดลองสร้างชั้นพอร์สซีลิกอนที่เวลาต่าง ๆ โดยมีการส่องแสงกระตุ้นแล้วนำแผ่นซีลิกอนที่สร้างขึ้นพอร์สแล้วมาทดลองวัดการเรืองแสงและวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงโดยทำการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั่วแผ่นแผ่นละ 5 จุด นำค่าที่ได้มาเฉลี่ยและนำมาเขียนบนกราฟเดียวกัน ดังรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการสร้างพอร์สซีลิกอนเพิ่มขึ้นจะทำให้กราฟเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ได้มีค่าต่ำลง โดยช่วงเวลาหลังจาก 40 วินาทีไปแล้วจะมีค่าใกล้เคียงกันจนถึงช่วงเวลา 2.20 นาทีกราฟจะมีค่าสูงขึ้นซึ่งอาจเป็นเพราะเมื่อทำการสร้างชั้นพอร์สหนาขึ้นทำให้แท่งพอร์สที่เกิดขึ้นก่อนโดนกัดออกไปบ้างทำให้กราฟมีค่าสูงขึ้น โดยแผ่นซีลิกอนทุกแผ่นจะมีการเรืองแสงเป็นสีส้มแดง



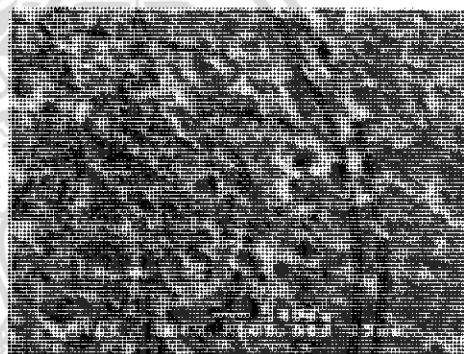
15 วินาที



30 วินาที



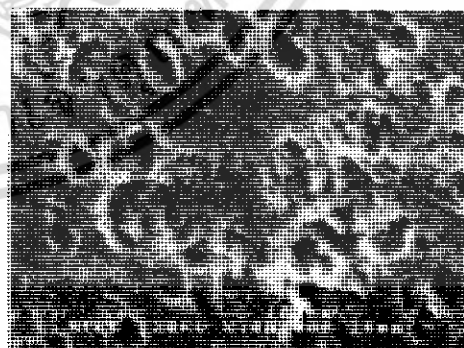
40 วินาที



60 วินาที



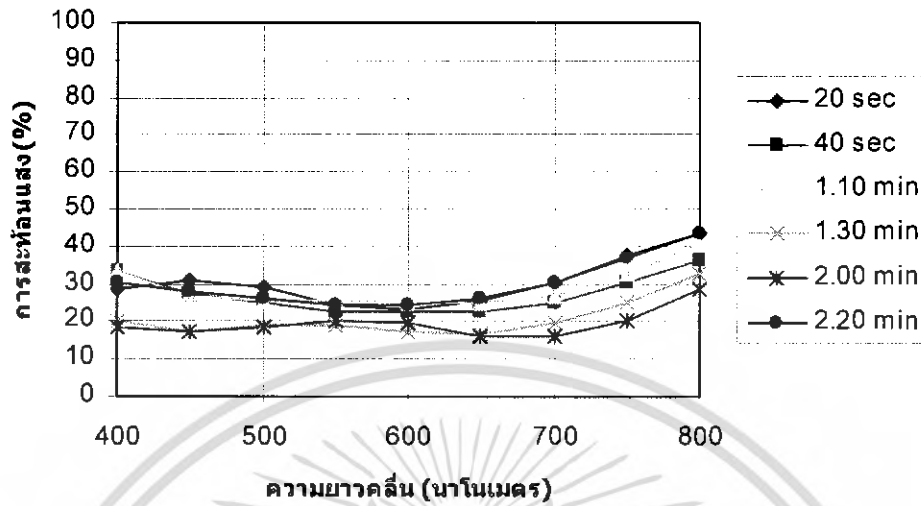
90 วินาที



180 วินาที

รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้จากการกักข้อมสีที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง SEM ที่เวลาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่เวลาต่าง ๆ

### 5.1.3 การศึกษาผลของปัจจัยภายนอกในการสร้างพอร์สซิลิคอน

#### 5.1.3.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของคลื่นในระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอน
2. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของอัตราส่วนสารละลาย

#### 5.1.3.2 การทดลอง

##### 5.1.3.2.1 การทดลองผลของคลื่นในระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอน

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

ทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมเป็นเวลา 40 วินาที โดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วยแล้วสังเกตผลที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำ DI นำมาวัดการเรืองแสงและทำการเปรียบเทียบชั้นพอร์สที่ได้ระหว่างการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมและการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม

##### 5.1.3.2.2 การทดลองผลของอัตราส่วนสารละลาย

เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้า

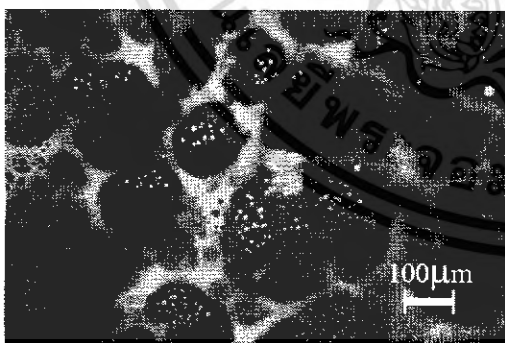
กันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ทำการหยดเอทานอลแอลกอฮอล์ จำนวน 5, 10, 20 หยดต่อสารละลาย 90 ลูกบาศก์เซนติเมตร

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำกรสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วมาทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐานและลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกหมดแล้วจุ่มลงในสารละลาย เป็นเวลา 40 วินาที โดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์ซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วย แล้วสังเกตผล จากนั้นนำไปทดสอบการเรืองแสงและทำการเปรียบเทียบชั้นพอร์ซิลิคอนที่ได้ระหว่างการสร้างพอร์ซิลิคอน โดยมีการหยดเอทานอลแอลกอฮอล์ในสารละลายและการสร้างพอร์ซิลิคอนโดยไม่มีการหยดเอทานอลแอลกอฮอล์ในสารละลาย

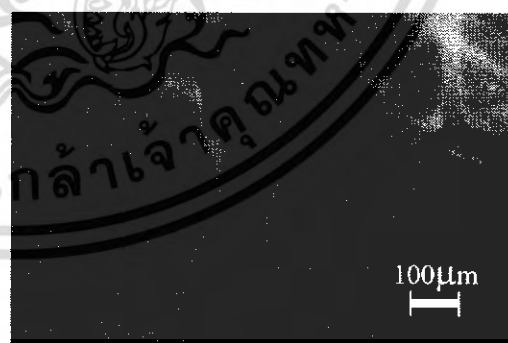
### 5.1.3.3 ผลการทดลอง

#### 5.1.3.3.1 ผลการทดลองผลของคลื่นในระหว่างการกัดพอร์ซิลิคอน

จากการสังเกตการณ์สร้างพอร์ซิลิคอนจะได้ว่าในขณะที่สร้างพอร์ซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม เวลาในการเริ่มเกิดฟองจะช้ากว่าการสร้างพอร์ซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม คือจะเริ่มเกิดฟองที่เวลา 12 วินาที แต่ขนาดของฟองจะมีขนาดเล็กกว่าและน้อยกว่า เมื่อทำการสร้างเสร็จนำมาล้างด้วยน้ำ DI แล้วสังเกตได้ว่าชั้นพอร์ซิลิคอนที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวเป็นเอกรูปเล็กว่าการสร้างด้วยสารละลายที่ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม โดยผลของการเรืองแสงเห็นได้ว่าการเรียงตัวที่สม่ำเสมอมากกว่าการสร้างโดยไม่มีอัลตราโซนิกเข้าร่วม



(ก)



(ข)

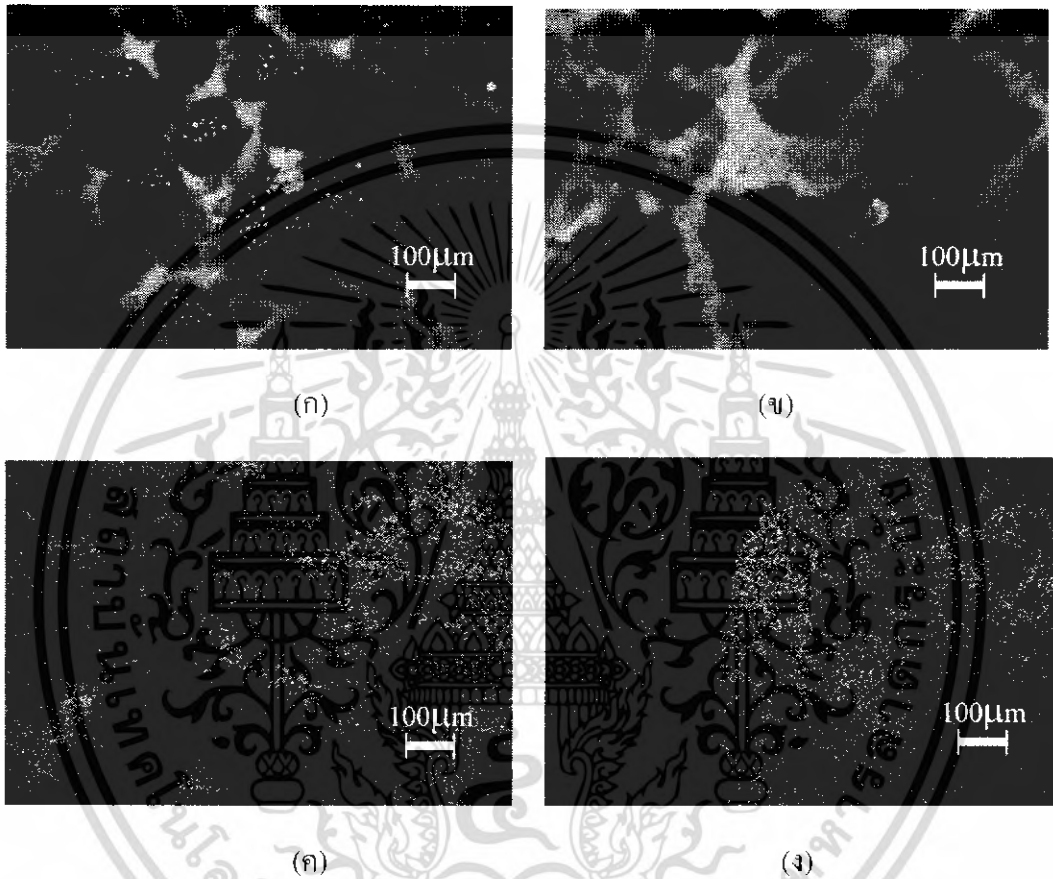
รูปที่ 5.5 (ก) ชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม

(ข) ชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3.3.2 ผลการทดลองผลของอัตราส่วนสารละลาย

จากการสังเกตการสร้างพอร์สซิลิคอนจะได้ว่าในขณะที่สร้างพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่มีการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ เวลาในการเริ่มเกิดฟองจะเร็วกว่าการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ ก็จะเริ่มเกิดฟองที่เวลา 5 วินาทีสำหรับการผสมเอ



ทานอลแอลกอฮอล์ 0.125 cc ต่อสารละลาย 90 cc , 3 วินาทีสำหรับการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.25 cc ต่อสารละลาย 90 cc และเกือบทันทีสำหรับการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.5 cc ต่อสารละลาย 90 cc และขนาดของฟองจะมีขนาดเล็กกว่า เมื่อทำการสร้างเสร็จจะสังเกตว่ามีการเรียงตัวเป็นเอกรูปดีกว่าสารละลายที่ไม่มีการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์และมีการเรียงแสงที่สม่ำเสมอมากกว่า

- รูปที่ 5.6 (ก) ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ไม่ผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์  
 (ข) ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.125 cc  
 (ค) ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.25 cc  
 (ง) ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.5 cc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบเวลาในการเกิดในปัจจัยในการสร้างที่ต่างกัน

วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน	เวลาที่เริ่มเกิดฟอง	ความสม่ำเสมอ
สารละลายไม่มีการส่องแสง	7 วินาที	ไม่ดี
สารละลายมีการส่องแสง	5 วินาที	ไม่ดี
สารละลายมีการส่องแสงและอัลตราโซนิก	12 วินาที	ดี
สารละลายมีการส่องแสงและผสมแอลกอฮอล์ 5 หยด	5 วินาที	ดี
สารละลายมีการส่องแสงและผสมแอลกอฮอล์ 10 หยด	3 วินาที	ดี
สารละลายมีการส่องแสงและผสมแอลกอฮอล์ 20 หยด	เกือบทันที	ดี

## 5.2 การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน

### 5.2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน เพื่อศึกษาผลที่ได้จากการใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนบนเซลล์แสงอาทิตย์

### 5.2.2 การทดลอง

ในการทดลองเริ่มแรกนี้จะทำการทดลองหาค่าเวลาในการ Drive In ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความลึกของรอยต่อพีเอ็นที่เหมาะสม โดยจะทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง ต่างๆกัน โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. เปรียบเทียบระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสงกับมีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
2. เปรียบเทียบระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นลดการสะท้อนแสงกับมีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
3. เปรียบเทียบระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์กับมีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

โดยจะทำการทดลองโดยใช้เวลาขับลึกที่เวลา 20 นาที , 40 นาที , และ 60 นาที โดยในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทำการเปรียบเทียบทั้งสามเงื่อนไขนั้นจะสร้างบนฐานรองเดียวกัน โดยในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะเซลล์แบบที่มีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงและเซลล์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในครั้งเดียวกัน โดยจะทำการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

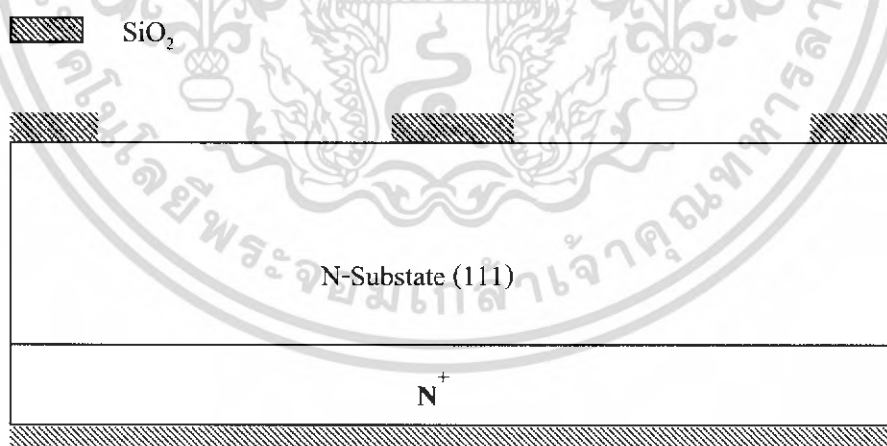
- นำแผ่นซิลิคอนชนิด N ระบาย (111) ความต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm มาทำความสะอาดด้วยกระบวนการมาตรฐาน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก

- ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบ Dry – Wet -Dry เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้าฉากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (Diffusion mask of impurity atoms) ในขั้นตอนของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในส่วนของคว้านสนามให้ทางด้านหลัง (Back Surface Fields; BSF) ใช้อุณหภูมิ 1,050°C, อุณหภูมิ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 8000Å

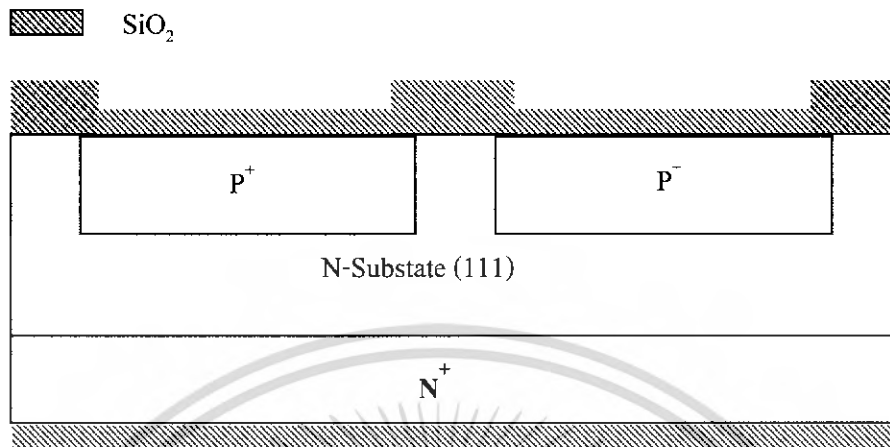
- ทำการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออกเพื่อทำการได้ปัสสาวะเจือชนิดเอ็นอย่างเข้มข้นด้วยอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส โดยจะทำการจับลิทโดยใช้เวลา 9 ชั่วโมง ได้ความลึกของชั้น BSF ประมาณ 5 ไมโครเมตร ก็จะได้อะไหล่ที่มีชั้น BSF เพื่อที่จะนำไปสร้างเซลล์ต่อไป

- ทำการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าออก

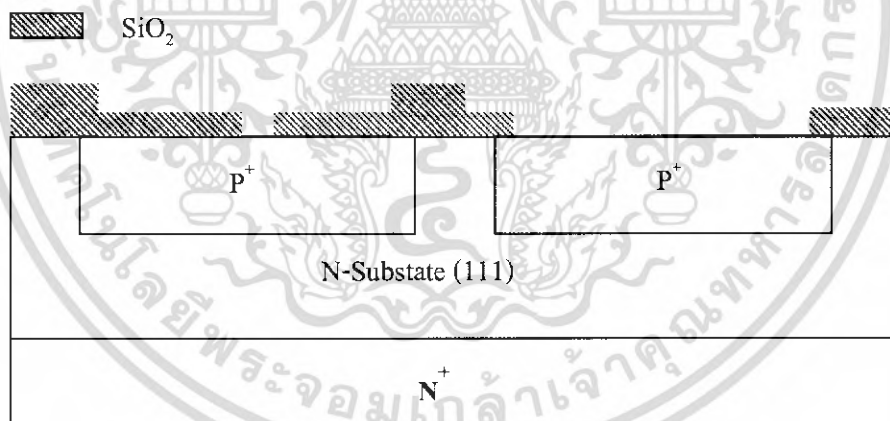
- ทำการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออก และทำการลอกน้ำยาไวแสงออก



- ทำการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เข้มข้น (P<sup>+</sup>) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของโบรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี



- ทำการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 2 เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ในบริเวณที่จะสร้างขั้วต่อโลหะ โดยในฝั่งที่จะสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนจะทำการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกทั้งหมด

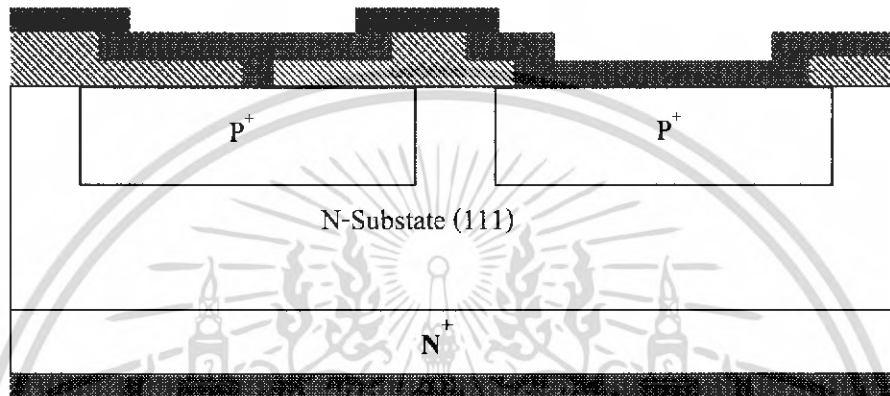


- ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยกระบวนการ Evaporation โดยจะได้ชั้นอลูมิเนียมมีความหนา  $1 \mu\text{m}$  ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 SiO<sub>2</sub>

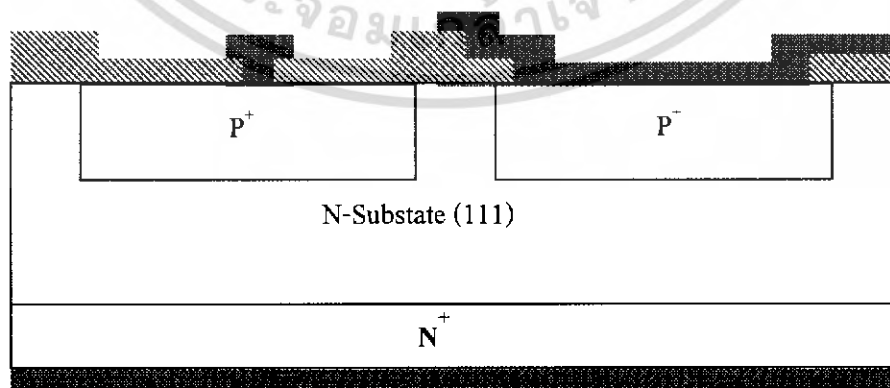
 Al



- ทำการเปิดชั้นของอลูมิเนียมด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 3 เพื่อลอกชั้นอลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก ให้เหลือแต่บริเวณขั้วต่ออลูมิเนียม และอลูมิเนียมในส่วนของเซลล์ที่จะสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นสตกการสะท้อน

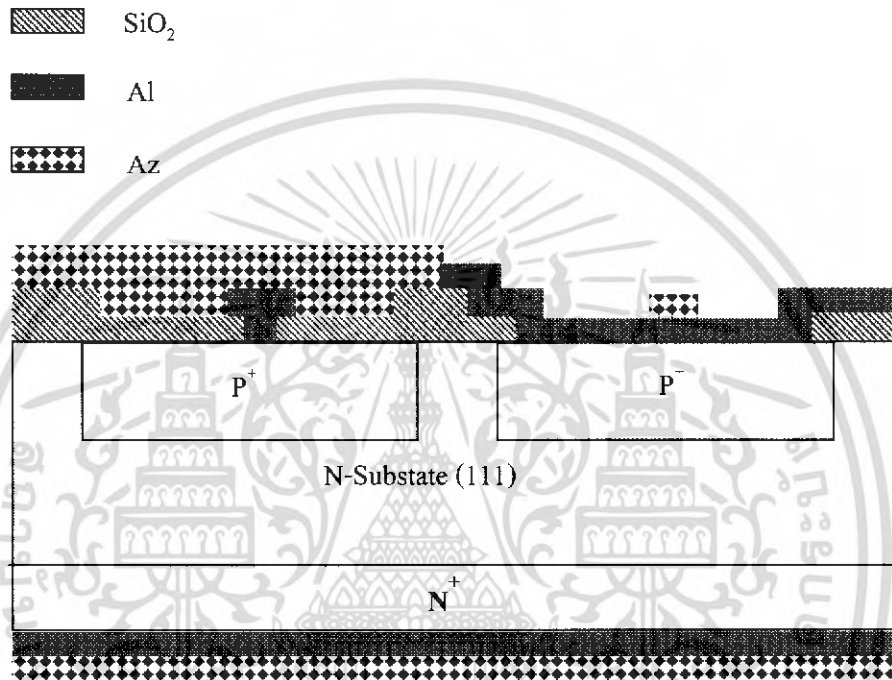
 SiO<sub>2</sub>

 Al



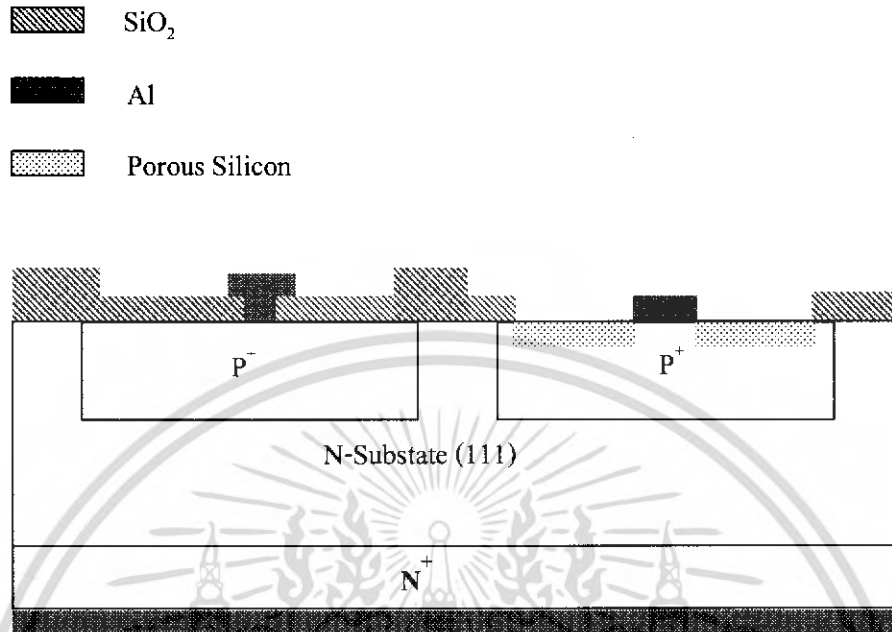
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการสร้างชั้นป้องกันด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az 1818 เพื่อทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนในบริเวณที่ต้องการ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 4 โดยในส่วนของเซลล์ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนจะทำการสร้างชั้นป้องกันปิดไว้ทั้งหมด



- ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนในบริเวณที่ต้องการ โดยสารละลายจะทำการกัดทะลุชั้นอลูมิเนียมไปถึงชั้นของซิลิคอนจนเป็นพอร์สซิลิคอน ก็จะได้เซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน และแบบที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนอยู่บนฐานรอง
- เดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



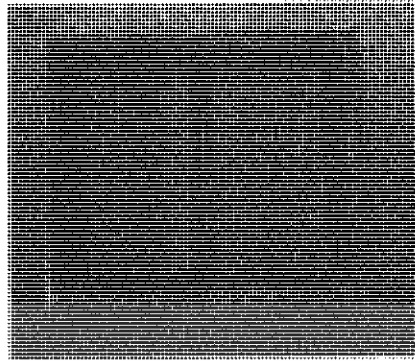
### 5.2.3 ผลการทดลอง

- นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้มาทดลองการเรืองแสงภายใต้แสง Black Light จะพบว่า มีเฉพาะเซลล์ส่วนที่ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงเท่านั้นที่สามารถเรืองแสงได้ โดยจะมีการเรืองแสงเห็นเป็นสีส้มออกมาซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นได้เกิดพอร์สซิลิคอนจริง



รูปที่ 5.7 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนและซิลิคอน ไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อน สร้างบนฐานรองเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



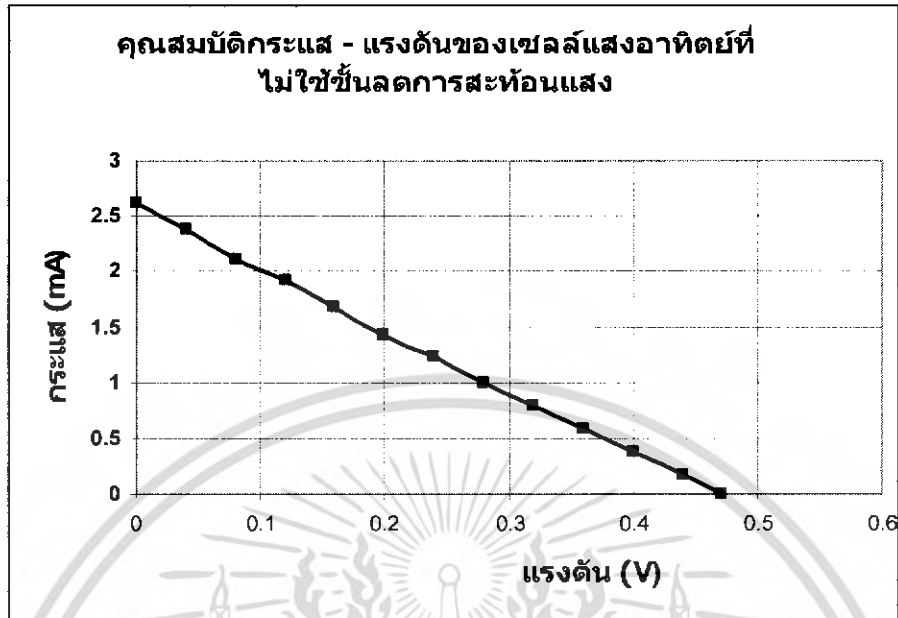
รูปที่ 5.8 การเรืองแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซซิติกอนเป็นชั้นลดการสะท้อน

นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปวัดคุณสมบัติต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบได้ดังนี้  
คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้นมีชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพ  
ต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาชั้บลิ๊ก 20 นาที

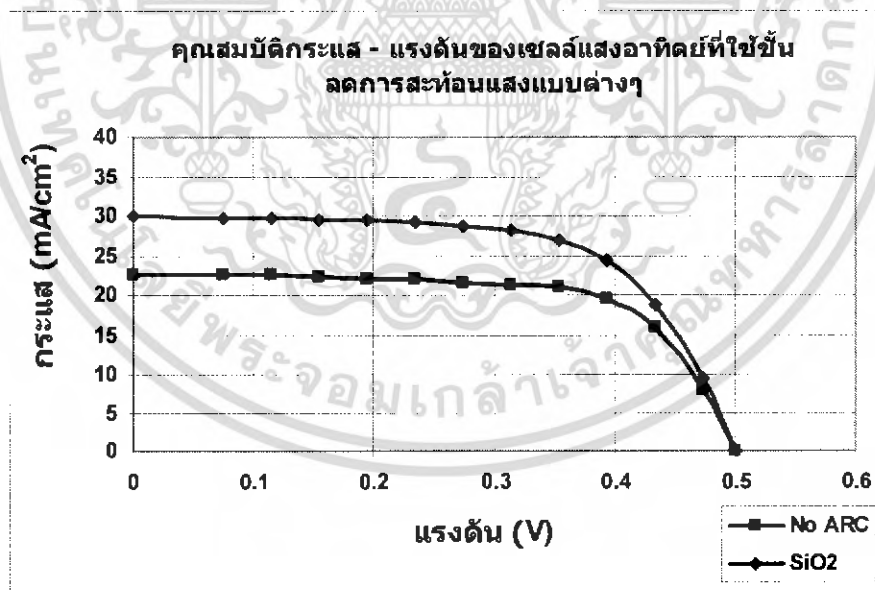
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	=	2.622 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	=	0.471 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ ( $P_o$ )	=	1.234 mW
ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ )	=	2.595 mA/cm <sup>2</sup>
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_m$ )	=	1.24 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_m$ )	=	0.24 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด ( $P_m$ )	=	0.27 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.241
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน ( $\eta$ )	=	0.295 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm <sup>2</sup>
อุณหภูมิ (Temp.)	=	28.268°c
โครงสร้างอื่น		

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิติกอนหนาประมาณ 1000 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



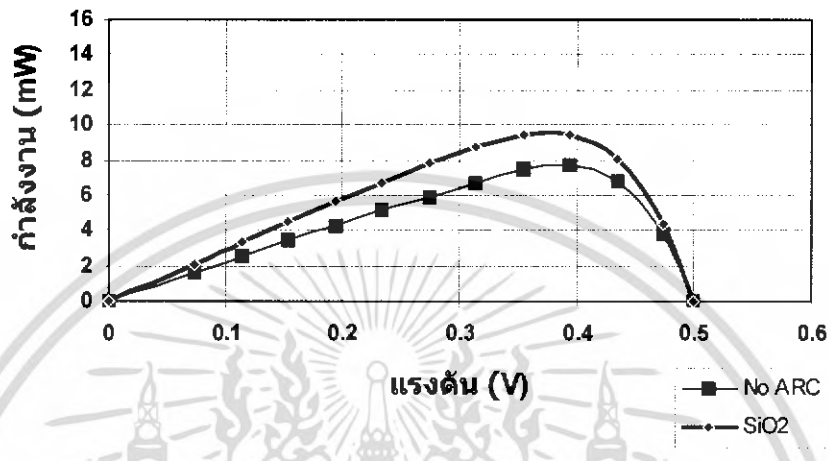
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลึกลับ 20 นาที



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลึกลับ 40 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกำลังงาน - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้  
ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบต่างๆ

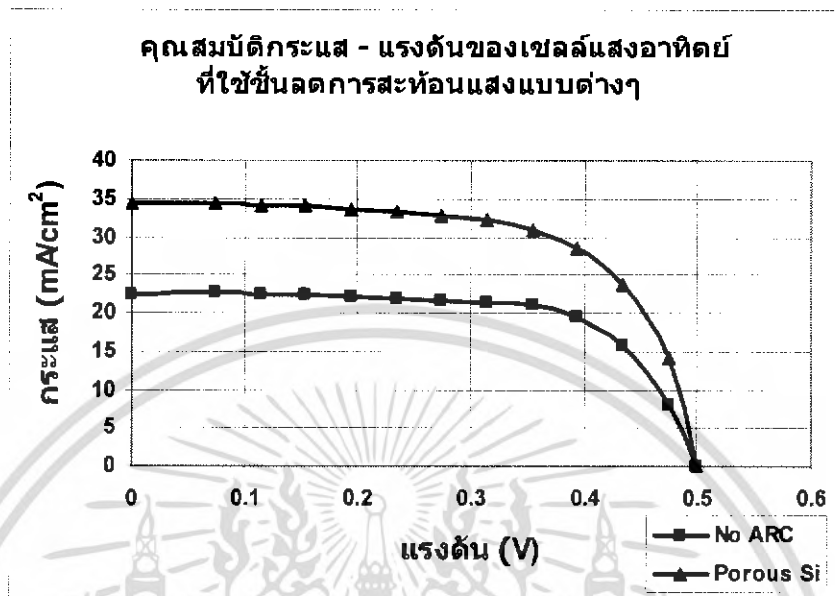


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่  
ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน  
แสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลึก 40 นาที

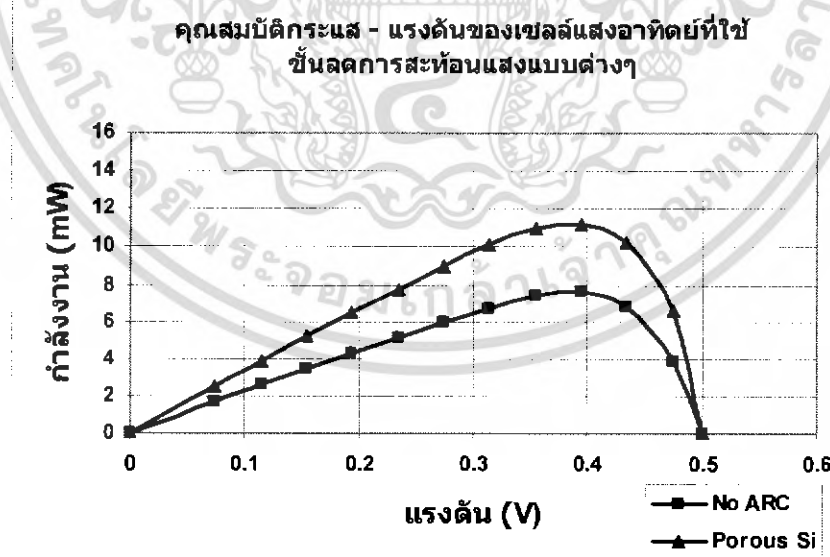
ตารางที่ 5.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและ  
ชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน  
5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลึก 40 นาที

ARC	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	$P_o$ (mW)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$I_m$ (mA)	$V_m$ (V)	$P_m$ (mW)	F.F.	Eff. (%)
No ARC	22.53	0.50	11.27	22.53	19.47	0.39	7.67	0.68	7.67
Porous Si	34.46	0.50	17.23	34.46	28.41	0.39	11.19	0.65	11.19
% การ เปลี่ยนแปลง	+52.95	0	+52.88	+52.95	+45.91	0	+45.89	-4.41	+45.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



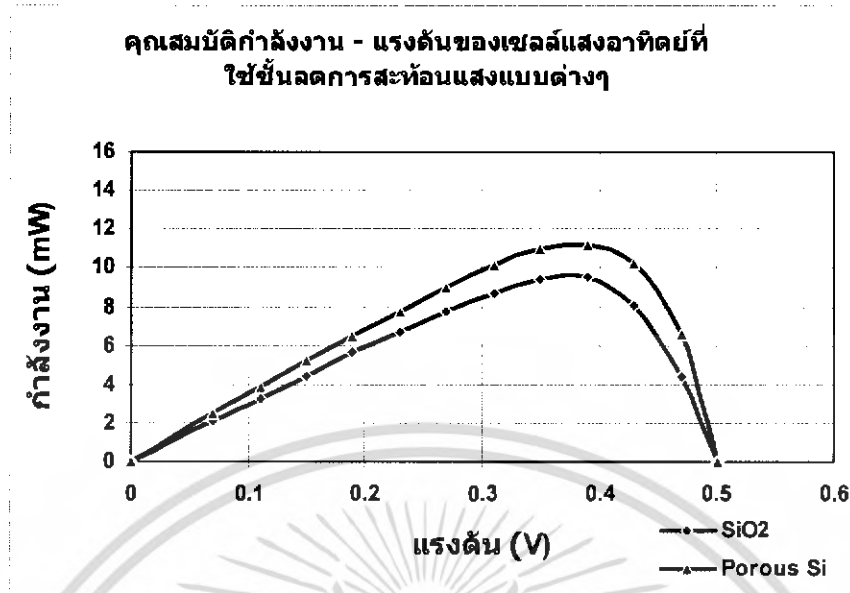
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน  $5-6 \Omega\text{-cm}$  ที่เวลาขั้วลึกลับ 40 นาที



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน  $5-6 \Omega\text{-cm}$  ที่เวลาขั้วลึกลับ 40 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



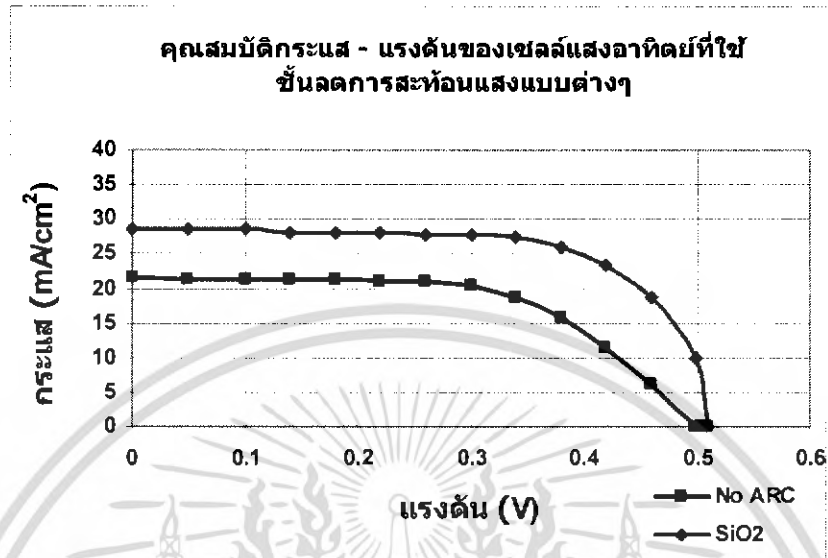


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และใช้ชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขัปลีก 40 นาที

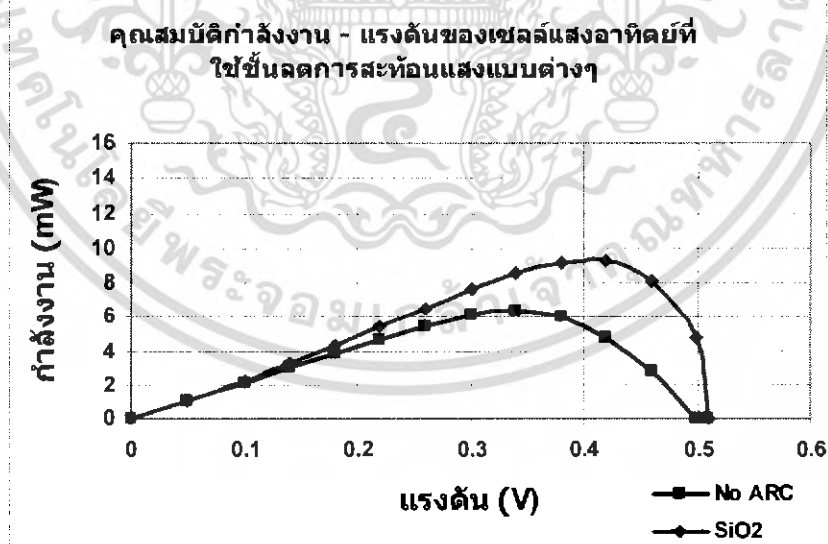
ตารางที่ 5.4 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขัปลีก 60 นาที

ARC	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	$P_o$ (mW)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$I_m$ (mA)	$V_m$ (V)	$P_m$ (mW)	F.F.	Eff. (%)
No ARC	21.48	0.51	10.95	21.48	18.78	0.34	6.39	0.58	6.39
SiO <sub>2</sub>	28.75	0.50	14.40	28.75	23.48	0.39	9.29	0.65	9.29
% การเปลี่ยนแปลง	+33.85	-1.96	+31.50	+33.81	+25.03	+14.70	+45.38	+12.04	+45.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไร้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลึกลับ 60 นาที

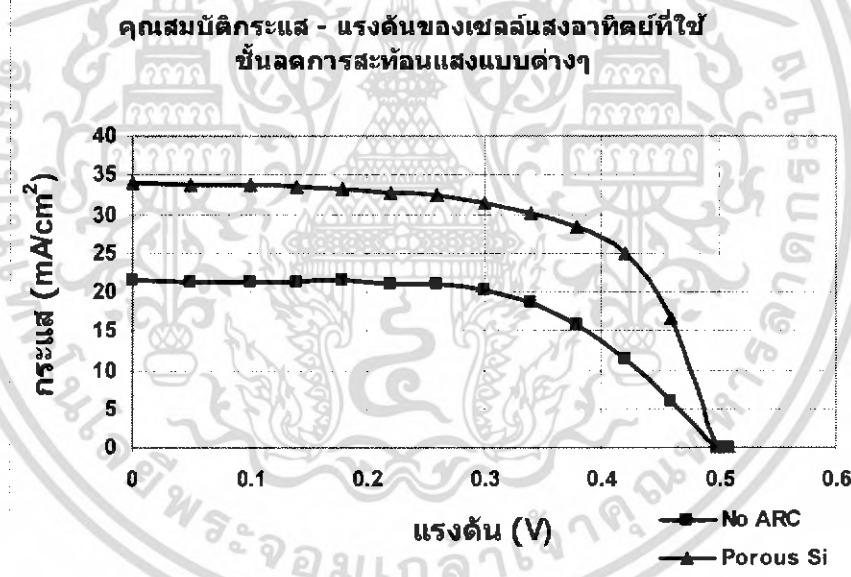


รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไร้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลึกลับ 60 นาที

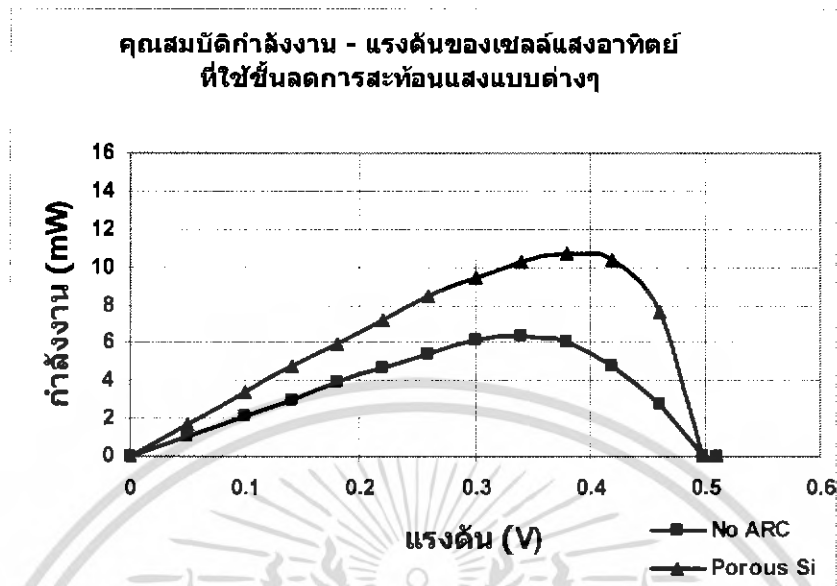
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและชั้นพอร์ซซิลิกอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้บลิ้ก 60 นาที

ARC	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	$P_r$ (mW)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$I_m$ (mA)	$V_m$ (V)	$P_m$ (mW)	F.F.	Eff. (%)
No ARC	21.48	0.51	10.95	21.48	18.78	0.34	6.39	0.58	6.39
Porous Si	33.95	0.49	16.94	33.95	28.25	0.38	10.74	0.63	10.74
% การเปลี่ยนแปลง	+58.05	-3.92	+54.70	+58.02	+50.43	+11.76	+68.08	+8.62	+68.08



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นพอร์ซซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้บลิ้ก 60 นาที



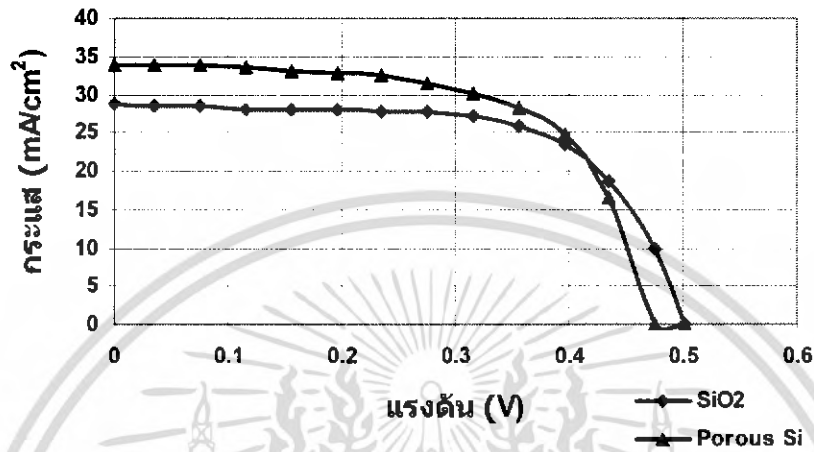
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงและใช้ชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 60 นาที

ตารางที่ 5.6 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์และชั้นพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6 $\Omega$ -cm ที่เวลาขับลึก 60 นาที

ARC	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	$P_i$ (mW)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$I_m$ (mA)	$V_m$ (V)	$P_m$ (mW)	F.F.	Eff. (%)
SiO <sub>2</sub>	28.75	0.50	14.40	28.75	23.48	0.39	9.29	0.65	9.29
Porous Si	33.95	0.49	16.94	33.95	28.25	0.38	10.74	0.63	10.74
% การเปลี่ยนแปลง	+18.09	-2.00	+17.64	+18.09	+20.32	-2.56	+15.61	-3.07	+15.61

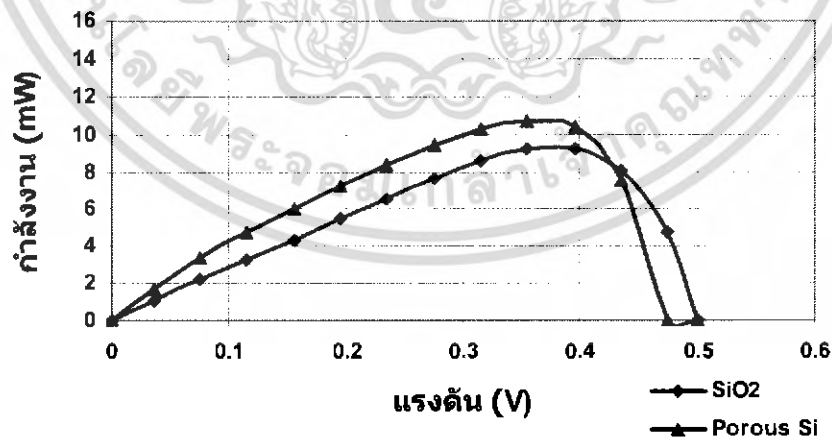
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้  
ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบต่างๆ



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลึก 60 นาที

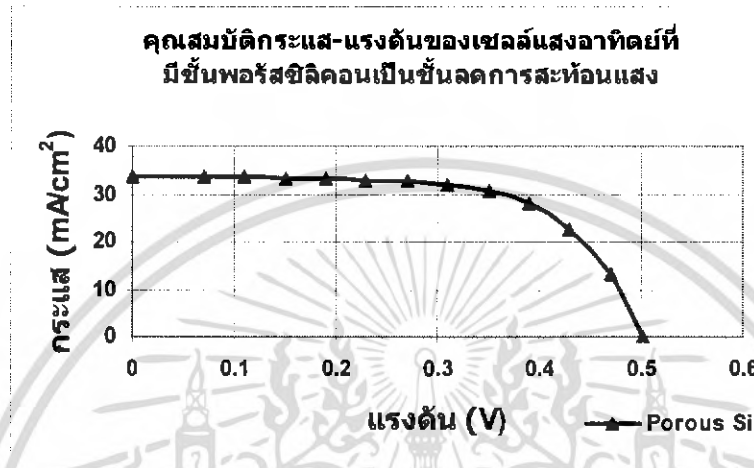
คุณสมบัติกำลังงาน - แรงดันของเซลล์  
แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบต่างๆ



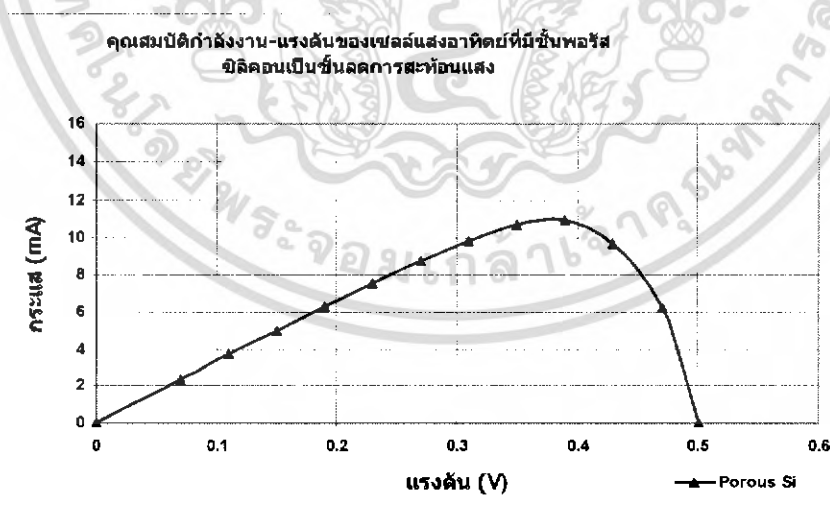
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่เวลาขั้วลึก 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจะนำเอาเวลา Drive in ที่ดีที่สุดไปทำเซลล์แสงอาทิตย์แบบใช้กระจกชั้นแบบเดียว



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรอง 5-6 $\Omega$ -cm แบบกระจกชั้นแบบเดียว



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรอง 5-6 $\Omega$ -cm แบบกระจกชั้นแบบเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากแผ่น  
ฐานรองสภาพต้านทาน 5-6  $\Omega$ -cm ที่ทำเวลาขับลึก 40 นาที โดยสร้างเซลล์แบบกระจกชั้นแบบเดียว

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	=	33.74621 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	=	0.501 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ ( $P_o$ )	=	16.906 mW
ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ )	=	67.492 mA/cm <sup>2</sup>
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_m$ )	=	28.035 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_m$ )	=	0.39 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด ( $P_m$ )	=	10.933 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.645
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน ( $\eta$ )	=	10.933 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm <sup>2</sup>
อุณหภูมิ (Temp.)	=	27.681 °c
โครงสร้างอื่น		

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นพอร์ซซิลิคอนหนาประมาณ 150 นาโนเมตร

### 5.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.3.1 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมลิ

1) ช่วงเวลาการเกิดพอร์ซซิลิคอนแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลาคือ

ช่วงเวลาที่ 1 ยังไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ไม่มีฟองก๊าซเกิดขึ้น

ช่วงเวลาที่ 2 เริ่มเกิดฟองก๊าซขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่น จากฟองขนาดเล็กๆรวมตัวกัน

เป็นฟองขนาดใหญ่ สามารถทำให้แผ่นลอยขึ้นมาได้ มีการเปลี่ยนสีสนที่ผิวหน้าของแผ่น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว

ช่วงเวลาที่ 3 ยังคงมองเห็นฟองก๊าซเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาแต่ปฏิกิริยาการเกิดเป็นไปอย่างช้า

กว่าเมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่ 2 ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและเกิดขึ้นช้ากว่าช่วงเวลาที่ 2



รูปที่ 5.24 (1) กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์ซเซิลิคอน โดยวิธีการกัดแบบข้อมสี่ (2) กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์ซเซิลิคอน โดยวิธีการกัดแบบข้อมสี่ โดยการกัดทะลุอะลูมิเนียม (3) กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์ซเซิลิคอน โดยวิธีการกัดแบบข้อมสี่ โดยการกัดทะลุอะลูมิเนียมที่ทำการซินเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) สามารถสร้างพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการกัดข้อมสได้
- 3) แสงจะช่วยให้เวลาการเกิดของพอร์สซิลิกอนเร็วขึ้น
- 4) Ultra sonic จะช่วยให้ Uniform ของพอร์สซิลิกอนดีขึ้นแต่เวลาการเกิดของพอร์สซิลิกอนจะช้าลง
- 5) การผสมเอทานอลแอลกอฮอล์จะช่วยทำให้ Uniform ของพอร์สซิลิกอนดีขึ้น
- 6) จากรูป SEM จะพบว่าเวลาในการเกิดพอร์สซิลิกอนที่มากขึ้นผิวหน้าของซิลิกอนจะเกิดรูพรุนมากขึ้นนั่นคือความพรุนของพอร์สซิลิกอนมากขึ้นนั่นเอง

### 5.3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

- 1) ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงได้
- 2) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้กระแสลัดวงจรสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิกอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
- 3) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้กำลังงานสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิกอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
- 4) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิลิกอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
- 5) สามารถประยุกต์กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงให้สามารถทำได้โดยใช้ Mask เดียว

ชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมสด้วยสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก สามารถสร้างได้ง่ายและประหยัดที่สุด ชั้นพอร์สนี้มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งชั้นดูดกลืนแสงและเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ดี เมื่อนำมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนจะทำให้กระบวนการสร้างเซลล์ทำได้ง่าย รวดเร็ว ไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบธรรมดาทั่วไปที่ใช้ชั้น  $\text{SiO}_2$  เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ยิ่งไปกว่านั้นเซลล์แบบพอร์สซิลิกอน ยังสามารถให้กระแสแสง กำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้สูงกว่าเซลล์แบบ  $\text{SiO}_2$  ผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าค่าความลึกของรอยต่อจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งค่าความลึกของรอยต่อที่เหมาะสมที่สุดจากงานวิจัยนี้คือจะได้รับการขับลึก(Drive in) ที่เวลา 40 นาที และยังพบว่าพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น 45.89% และเมื่อเทียบกับซิลิกอน ไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 18.16% แสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้สูงที่จะนำชั้นของพอร์สซิลิกอน มาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แทนชั้นของ  $\text{SiO}_2$  เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### 1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (rest mass of an electron)	$m_e$	$9.109 \times 10^{-31}$ kg
มวลนิ่งของโปรตอน (rest mass of proton)	$m_p$	$1.672 \times 10^{-27}$ kg
มวลนิ่งของนิวตรอน (rest mass of neutron)	$m_n$	$1.675 \times 10^{-27}$ kg
ประจุอิเล็กตรอน (electron charge)	$q$	$1.602 \times 10^{-19}$ C.
อัตราส่วนระหว่างประจุ กับมวลนิ่งของอิเล็กตรอน	$q/m_e$	$1.76 \times 10^{11}$ C/kg.
ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$ J-sec
	$\hbar = h/2\pi$	$4.136 \times 10^{-15}$ eV-sec
ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)	$k$	$1.31 \times 10^{-23}$ J/K
		$8.617 \times 10^{-5}$ eV/K
เลขคงที่อะโวกาโด (Avagadro's number)	$N_0$	$6.023 \times 10^{26}$ (k mol) <sup>-1</sup>
ความเร็วแสงในสุญญากาศ (speed of light in space)	$C$	$2.998 \times 10^8$ m/sec
อัตราส่วนมวลโปรตอนและอิเล็กตรอน	$m_p/m_e$	1836
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ (Permittivity of free space)	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{12}$
		$c^2/N.m^2(F/m)$
ค่าเปอร์มีอะบิลิตีในสุญญากาศ (Permeability of free space)	$\mu_0$	$1.257 \times 10^{-6}$
		T.m/A(H/m)
ค่ารัศมีของบอห์ร์ (Bohr radius)	$a_0$	$5.292 \times 10^{-11}$ m
ค่าคงที่ของริดเบิร์ก (Rydberg constant)	$R$	$1.097 \times 10^7$ m <sup>-1</sup>
ค่าคงที่ของสเตฟาน (Stagan's constant)	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$ w/m <sup>2</sup>
ค่าบอห์ร์แมกนีตอน (Bohr mahneton)	$\mu_B$	$9.273 \times 10^{-24}$ J/T
ค่าคงที่อิเล็กตรอน โวลต์ ( 1 electron – volts)	eV	$1.602 \times 10^{-19}$ J
ค่าพลังงานจูล (1 Joule)	J	$6.242 \times 10^{18}$ eV
ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)	K	<sup>0</sup> C+273.15 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300 K)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. คุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์

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

### 4. คุณสมบัติของซิลิกอน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อน	1.57	W/cm-°C
การขยายตัว เนื่องจากความร้อน	$2.6 \times 10^{-6}$	(°C) <sup>-1</sup>
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	Å
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	$0.98 \times 10^{12}$	cm <sup>2</sup> /dym
ความร้อนในการละลาย	1000	J/G
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิคอนบริสุทธิ์	$1.45 \times 10^{10}$	cm <sup>-3</sup>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข จะกล่าวถึง ข้อมูลของน้ำยาไวแสงและน้ำยาจึ้นลวดลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการทราบคุณสมบัติของน้ำยาไวแสงก่อนใช้งาน จะทำให้สามารถใช้งานน้ำยาไวแสงได้อย่างถูกต้อง

### **AZ P1350 Series Photoresist**

**For Photo Mask and Optical Disk Manufacturing**

**High Adhesion**

**For g – line Exposure**

#### **1. Description**

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

#### **2. Features**

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

#### **3. Storage Condition**

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

#### **4. Handling Precaution / First Aid**

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

#### **3) First Aid**

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

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

If inhaled : Move into fresh air.

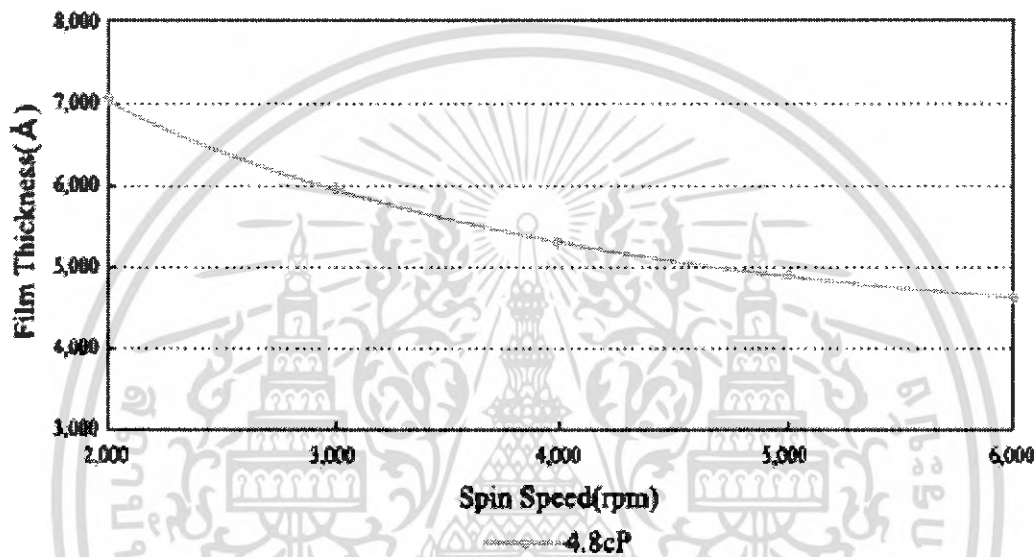
#### **5. Specifications**

Solid Content (wt%)     16.2 ± 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

## Spin Curve



รูปที่ ข. 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการสปินเนอร์กับความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง มอร์ AZ1350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MICROPOSIT

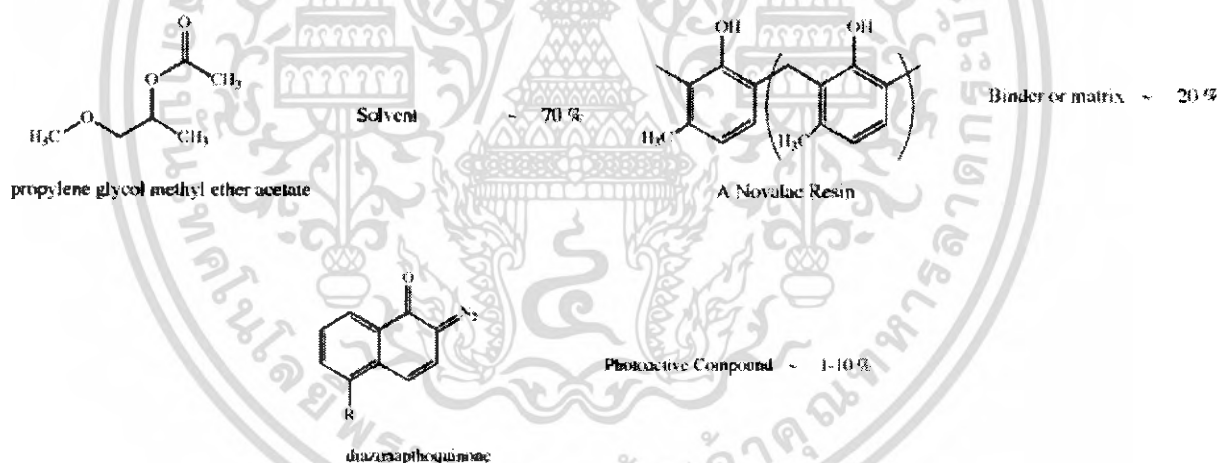
## S1818 Series Photoresist

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

### FEATURES

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

### Component Photoresist



Components without CAS numbers are Trade Secret

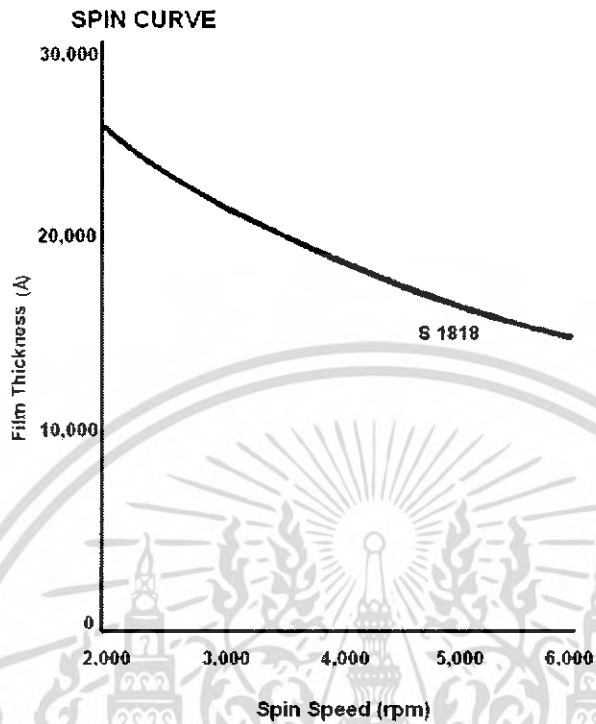
Component Name	CAS# / Codes	Concentration
Electronic grade propylene glycol monomethyl ether acetate	108-65-6	65.00 - 75.00
Mixed cresol novolak resin		20.00 - 30.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



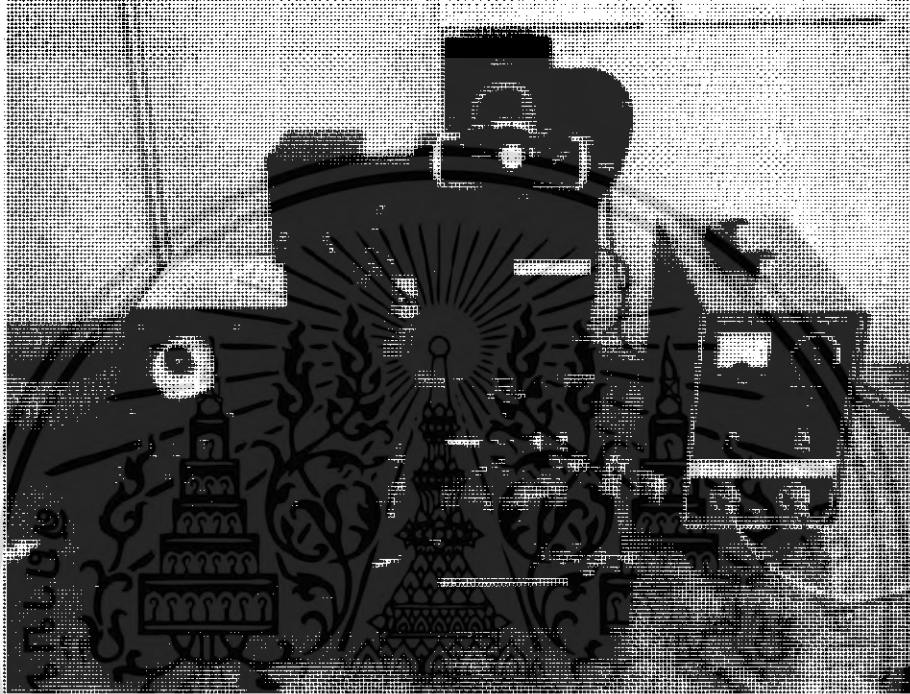
รูปที่ ก. 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการสปินเนอร์กับความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง เบอร์ S 1818

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 1 Alignment expose

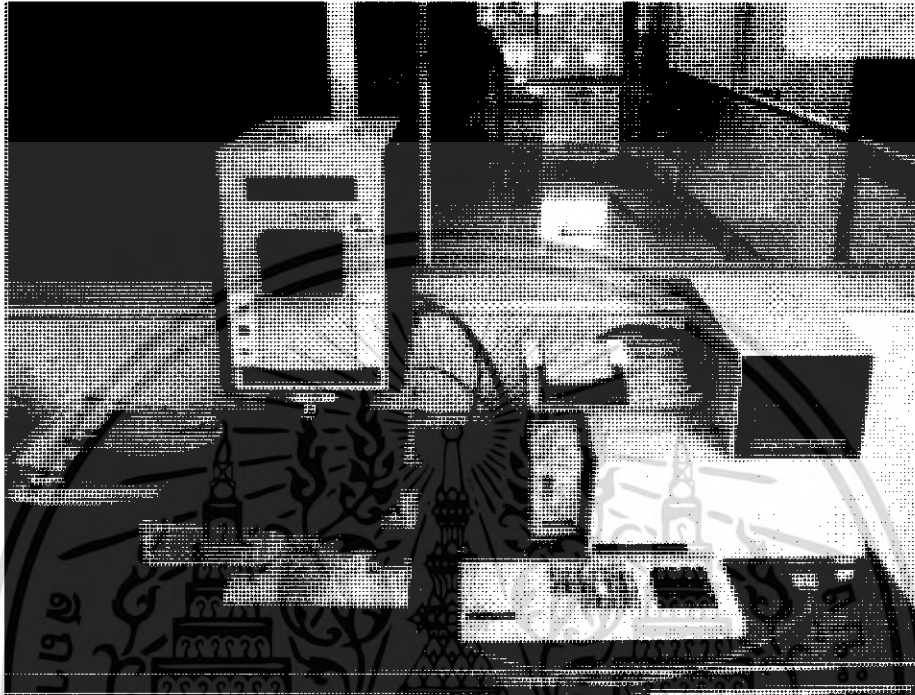


#### 2. Four point probe resistivity testing



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. Automatic thin film measurement

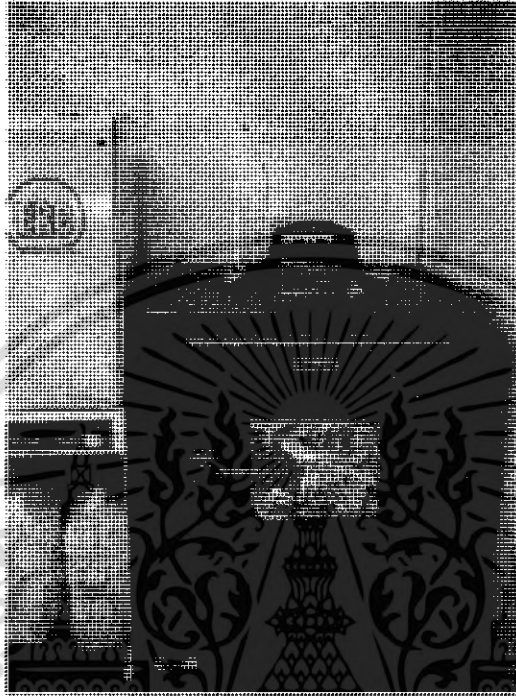


### 4. Spinner

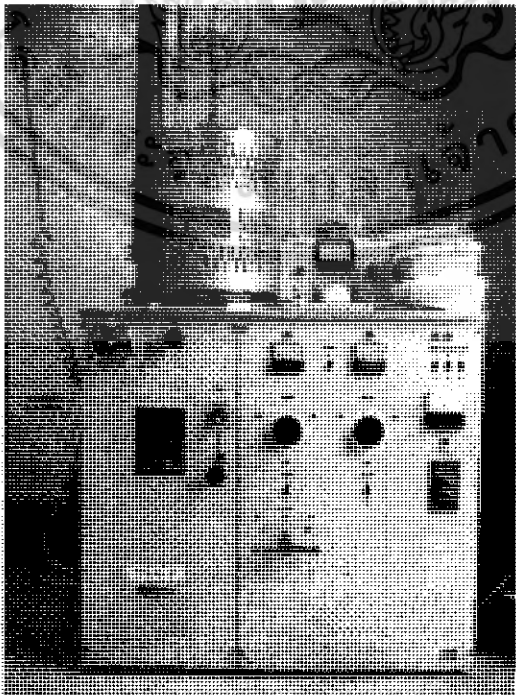


เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุขั้นสูง สถาบันวิจัยและพัฒนา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตู้อบไล่ความชื้น



6. Evaporator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. เตา Oxidation และ Sintering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม

#### 1.1 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์

หรือที่เรียกว่า น้ำยาบัฟเฟอร์ (buffer solution)

น้ำยาบัฟเฟอร์ใช้สำหรับการกัดซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับแพร์สารเจือ หรือเพื่อทำรอยสัมผัส (contact) ให้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ น้ำยาที่ใช้กันมีอัตราในการกัดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้ตามความจำเป็นของงาน

#### น้ำยาบัฟเฟอร์ 1

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 %	1	ส่วน
แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH <sub>4</sub> F)	6	ส่วน

ผสมกันโดยปริมาตร มีอัตราการกัด (etching rate) ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

#### น้ำยาบัฟเฟอร์ 2

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 %	1	ส่วน
แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH <sub>4</sub> F)	10	ส่วน

ผสมกันโดยปริมาตร มีอัตราการกัดประมาณ 600 อังสตรอมต่อนาที (10 อังสตรอมต่อวินาที)

#### 1.2 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียม

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียมใช้สำหรับการกัดอะลูมิเนียมเพื่อทำสวดลาย ขั้วโลหะบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ มีส่วนผสมของสารเคมีโดยปริมาตร ดังนี้

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

#### 1.3 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดพอร์ซิลิคอน แบบ Stain etching

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- Ultrasonic ใน DI เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )

### การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มใน Trichloroethylene ( $\text{C}_2\text{HCl}_3$ ) เวลา 10 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )

### การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ( $\text{HF}$ ) 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )

## ภาคผนวก ฉ

### ประวัติทีมงาน



#### รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ สุขเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

**ปัจจุบัน :** รองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ และนักวิจัยอาวุโสประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

#### ประสบการณ์ :

2526 – 2533 หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

2533 – 2537 คณะบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### รางวัลผลงานวิจัย :

โครงการวิจัยดีเด่น ปี 2526 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
“การออกแบบ สร้าง และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์”

โครงการวิจัยดีเด่น ปี 2539 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
“การสร้างฟิล์มบางเพชร สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”

#### ผลงานการเขียน :

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### นาย สมพงษ์ วงศ์ภักดี

ปัจจุบัน : นักศึกษาชั้นปีที่ 3 หลักสูตรต่อเนื่อง ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา : ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคนิคเลย, เลย  
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรอนิกส์-สื่อสาร, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล  
วิทยาเขตขอนแก่น, ขอนแก่น



### นาย วรจักร ไชยทัพบ

ปัจจุบัน : นักศึกษาชั้นปีที่ 3 หลักสูตรต่อเนื่อง ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา : ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น,  
ขอนแก่น  
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรอนิกส์-สื่อสาร, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล  
วิทยาเขตขอนแก่น, ขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้