

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น

DEVELOPMENT OF FABRICATION PROCESS

SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS



โดย

นายศุภสกล บุญญาญจน์ รหัส 42010353

นายสรวิศ มุ่งการนา รหัส 42010371

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเดช

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....50342

วัน,เดือน,ปี.....13 พ.ค. 2547

Rectangular stamp with fields .b..... and .i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในปีการศึกษา 2545 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการเรื่อง การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิกอน
แบบรอยต่อพี-เอ็น

DEVELOPMENT OF FABRICATION PROCESS
SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS


จัดทำโดย นายสุกสกกล บุญญกาญจน์ รหัส 42010353

นายสรวิศ มุ่งการนา รหัส 42010371

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช



รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ..........อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช)

วันที่..... 3 12 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น

DEVELOPMENT OF FABRICATION PROCESS

SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS

ผู้จัดทำ

นายศุภสกล บุญญากาญจน์ รหัส 42010353

นายสรวิศ มุ่งการนา รหัส 42010371



ลงชื่อ.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเดช)

วันที่..... 3 12 2 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น

นายสุภสกล บุญญาภรณ์

นายสรวิศ มุ่งगरานา

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ในปัจจุบันได้มีความพยายามอย่างสูงในการวิจัย และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ การเพิ่มประสิทธิภาพ และการลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

โครงการนี้นำเสนอถึงการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพมากที่สุด, การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลอง คือ กระแสขณะลัดวงจร (Isc), แรงดันขณะเปิดวงจร (Voc), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางอุดมคติ (P_0), ค่าความเข้มของกระแสต่อพื้นที่ (Jsc), กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m), แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์จ่ายได้จริง (P_m), ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.), ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η), การหาค่าความต้านทานอนุกรมภายใน (R_s), ผลของค่าความต้านทานอนุกรมภายในต่อเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{ss}) และผลของความเข้มแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมทั้งเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back Surface Field (BSF) และการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating: ARC) แบบพอร์ซซิลิคอน (Porous Silicon: PS)

กระบวนการมาตรฐานในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นเซลล์อ้างอิงในการทดลอง คือ วิธีการแพร่สารเจือ (Thermal Diffusion) ให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์ที่หนา 925 อังสตรอม เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีค่าฟิลแฟคเตอร์เท่ากับ 0.6548 และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเท่ากับ 9.1212 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF FABRICATION PROCESS SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS

Mr. Suprasagon Bunyagarn
Mr. Sorawit Moongkarnna
Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech (Advisor)
Academic Year 2002

Abstract

The alternative sources of energy like solar cells are increasingly important nowadays since they can directly convert solar energy into electricity. Two main objectives of developing solar cell technology are to increase efficiency and to reduce the production cost.

This project aims to present the development of fabrication process silicon p-n junction solar cells. It emphasizes the finding of optimum process by using experiments. The basic characteristics in this report are short circuit current (I_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), ideal maximum power (P_o), current density (J_{sc}), maximum power current (I_m), maximum power voltage (V_m), maximum power (P_m), fill factor (F.F.), energy conversion efficiency (η), series resistance (R_s), effect of series resistance and effect of light intensity. It also presents the increasing of energy by using back surface field (BSF) and anti-reflection coating-porous silicon (PS) methods.

The standard of the fabrication process silicon p-n junction solar cells is Thermal Diffusion. An anti-reflection coating is SiO_2 thickness 925 Å. The solar cells in this project have fill factor (F.F.) 0.6548 and energy conversion efficiency (η) 9.1212 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการ เรื่อง การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น สำเร็จลุล่วงด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้กำลังใจ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้ ทำให้โครงการสำเร็จลงด้วยความสมบูรณ์เรียบร้อย, ขอขอบคุณนายวีระ เฟื่องจันทร์ นักวิจัยประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ เรื่องการออกแบบมาส์ก และใช้เครื่องมือในการตัดมาส์ก, ขอขอบคุณนายโสภณ พรหมชัย นักศึกษาปริญญาโทของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ในเรื่องกระบวนการถ่ายมาส์ก, ขอขอบคุณนายรินทร์ อติวงศ์แสงทอง เจ้าหน้าที่วิจัยประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ในคำแนะนำ และเสียสละเวลาดูแลกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์, ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ดิชมในโครงการนี้, ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน เรื่องคำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ จึงขอถือโอกาสแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายสุภสกล บุญญกาญจน์
นายสรวิศ มุ่งการนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	14
2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมมูลย์ ขณะที่ไม่มีความดันไบอัส	14
2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดัน ไบอัสตรง	18
2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ	21
2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	23
2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง	23
2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)	24
2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	27
2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น และวงจรสมมูล	32
2.7 ผลของความต้านทานอนุกรม และความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์	33
2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_j	36
2.9.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_p	37
2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}	37
2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	39
2.11 การสะท้อนแสงในตัวกลางต่างชนิดกัน	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 เทคโนโลยี และการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	41
3.1 การสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ	42
3.1.1 การเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์	42
3.1.2 การปลูกผลึกรูปเดี่ยว	43
3.1.2.1 วิธีโซคราสกี (Czochralski)	43
3.1.2.2 วิธีโซนรีไฟนิง (Zone refining)	45
3.2 การแพร่สารเชื้อ	47
3.3 การสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก	48
3.4 การประกอบร่วมเป็นแผงเซลล์	50
3.5 การปรับปรุงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	52
3.5.1 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว	52
3.5.2 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกโพลี	54
3.5.3 ซิลิคอนแบบริบบอน	55
3.5.4 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบอะมอร์ฟัส	56
3.6 การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	60
3.6.1 Back Surface Fields (BSF)	60
3.6.2 พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)	63
3.6.2.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน	63
3.6.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน	64
3.6.2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	65
3.6.2.4 กลไกการเกิดพอร์สซิลิคอน	67
3.6.2.4.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิคอน	67
3.6.2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิคอน	68
3.6.2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน	69
3.6.2.6 พฏิกิริยทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	70
3.6.2.7 พฏิกิริยทางแสงของพอร์สซิลิคอน	71
3.6.2.8 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์	73
3.7.1 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	73
3.8 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	76
3.8.1 กรรมวิธีในการ Lapping ผิวหน้าแผ่นซิลิคอน	83
3.8.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	84
3.8.3 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน	84
3.8.4 การทำความสะอาดผิวหน้า	86
3.9 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)	87
3.9.1 Thermal Oxidation	87
3.9.2 Chemical Vapor Deposition Oxidation	88
3.9.3 Spottering	89
3.10 กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)	89
3.11 การออกแบบมาส์คด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	93
3.12 การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า	99
3.13 การเก็บบรรจุ	99
บทที่ 4 การทดลอง	100
4.1 การทดลองการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	100
4.1.1 แบบใช้ SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	100
4.1.2 แบบใช้ Porous Silicon เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	114
4.2 การวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	129
4.3 การศึกษาผลของการ Sintering	132
4.4 การหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์	132
4.5 การศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์	133
4.6 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลอง	134
5.1 ผลการทดลองการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	134
5.1.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 2 (ขั้วลึก 20 นาที่)	140
5.1.2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 3 (ขั้วลึก 20 นาที่)	141
5.1.3 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 5 (ขั้วลึก 30 นาที่)	143
5.1.4 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 6 (ขั้วลึก 30 นาที่)	144
5.1.5 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 7 (ขั้วลึก 40 นาที่)	146
5.1.6 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 8 (ขั้วลึก 40 นาที่)	147
5.1.7 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 4 (ขั้วลึก 50 นาที่)	149
5.1.8 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 9 (ขั้วลึก 50 นาที่)	150
5.2 ผลการทดลองการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	153
5.2.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 15 (ขั้วลึก 55 นาที่)	155
5.2.2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 16 (ขั้วลึก 65 นาที่)	156
5.2.3 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 (ขั้วลึก 65 นาที่)	158
5.3 ผลการทดลองการศึกษาผลของการ Sintering	160
5.3.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 14 (ขั้วลึก 55 นาที่)	161
5.4 ผลการทดลองการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์	162
5.5 ผลการทดลองการศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์	163
5.5.1 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ ค่า Rss ต่างๆ กัน	163
5.5.2 คุณสมบัติกำลังงานนอร์มอลไลต์-ค่าความต้านทานอนุกรม ของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ค่า Rss ต่างๆ กัน	164
5.6 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	165
5.6.1 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ กัน	165
5.6.2 คุณสมบัติกระแสลัดวงจร-ความเข้มแสงของเซลล์ ERC 17 ที่ความเข้มแสงต่างๆ	166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.6.3 คุณสมบัติแรงดันเปิดวงจร-ความเข้มแสงของเซลล์ ERC 17 ที่ความเข้มแสงต่างๆ	166
บทที่ 6 สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง	170
บรรณานุกรม	172
ภาคผนวก	173
ภาคผนวก ก	1. คำคงที่ทางฟิสิกส์ 174
	2. คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300 K) 175
	3. คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์ 176
	4. คุณสมบัติของซิลิคอน 177
ภาคผนวก ข	น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม 178
ภาคผนวก ค	การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (Electroless nickle plating) 179
ภาคผนวก ง	การ Stain Etching 180
	1. เมื่อทดลองกับแผ่นที่ใช้เวลาขัปลึ้ก 20 นาที 181
	2. เมื่อทดลองกับแผ่นที่ใช้เวลาขัปลึ้ก 30 นาที 182
	3. เมื่อทดลองกับแผ่นที่ใช้เวลาขัปลึ้ก 55 นาที 183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	5
1.2	เปรียบเทียบขนาดของแหล่งพลังงานต่างๆ บนโลก	7
1.3	สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ขณะทำการวัดที่ค่า Air Mass 1.5	9
2.1	ค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน	28
2.2	ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	39
3.1	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ	59
3.2	จุดเด่น และจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ	60
3.3	สรุปลักษณะสำคัญๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการ ไบอัสเซลล์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน	66
3.4	ความหนาแน่นของอะตอมเปลกปลอมใน Metallurgical-Grade Silicon	74
3.5	ขนาดและระยะของตำแหน่งต่างๆ บนเซลล์ที่ใช้ในการออกแบบ	94
3.6	พื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบ	99
5.1	คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์จากกระบวนการสร้างครั้งที่ 1	152
5.2	คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์จากกระบวนการสร้างครั้งที่ 2	159
5.3	ค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์	162
5.4	ค่าความต้านทานอนุกรม, พลังงานสูงสุด และค่าพลังงานนอร์มอลไลต์	164
5.5	คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสง 1 Sun. และความเข้มแสง 2 Sun.	168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	เซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน	3
1.2	การทดลองให้แสงตกกระทบขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว	3
1.3	ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์	4
1.4	พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ	6
1.5	แหล่งพลังงานต่างๆ ของโลก	7
1.6	มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก	8
1.7	การหาค่ามุม θ โดยการพิจารณาเงาของแสง	9
1.8	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในแสงอาทิตย์	10
1.9	แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ	11
1.10	ลักษณะของผลึกซิลิคอนซึ่งถูกเจือด้วยอะตอมโบรอน และฟอสฟอรัส	13
2.1	ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง	14
2.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น	15
2.3	ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีไบอัส	15
2.4	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของด้านพี และด้านเอ็นขณะยังไม่เกิดรอยต่อเอ็น-พี	16
2.5	รอยสัมผัสของสารชนิดพี และชนิดเอ็นแสดงด้วยแถบพลังงาน	17
	(ก) ขณะสัมผัส	
	(ข) ภาวะสมดุลหลังสัมผัสแล้ว	
2.6	รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับการไบอัสตรง	18
2.7	ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	19
2.8	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	20
2.9	รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	21
2.10	ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	22
2.11	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A	22
2.12	ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	23
2.13	ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์	25
2.14	ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขังในลิขสิทธิ์ของเจ้าของ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.15	ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็นขณะที่ ไม่ได้รับแสง และได้รับแสง	26
2.16	คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ	27
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ 300 K กับขนาด E_g ของสารกึ่งตัวนำ	30
2.18	ตัวอย่างแสดงลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง	31
2.19	โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	32
2.20	ลักษณะวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	33
2.21	ผลของความต้านทานอนุกรม	34
2.22	ผลของความต้านทานขนาน	35
2.23	การลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น	35
2.24	ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.25	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์	38
2.26	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง	39
2.27	การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด	40
3.1	ภาพสเกตดาวเทียม skylab ที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	41
3.2	ลำดับขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการเตรียมแร่ซิลิคอน	42
3.3	อุปกรณ์การปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน โดยวิธีโซคราสกี	44
3.4	ผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน	45
3.5	อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีโซคราสกี	45
3.6	อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีโพลทโซน	46
3.7	การแพร่สารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้ฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ	47
3.8	การระเหยโลหะในสุญญากาศเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์	48
3.9	ประเภทของเส้นลวดนำไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยโลหะในสุญญากาศ	49
3.10	แผ่นผลึกแบบ Polycrystal ที่ผ่านการต่อสายแล้วในระบบ โรงงานอุตสาหกรรม	50
3.11	โครงสร้างของโมดูลชนิดหนึ่ง	51
3.12	การประกอบเซลล์เป็น โมดูล	51
3.13	แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ตัวอย่างการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว	53
3.15 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของโพลีซิลิคอน	54
3.16 การดึงแผ่นซิลิคอนแบบรีบบอน	56
3.17 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน	56
3.18 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส	57
3.19 เครื่องคิดเลขที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	58
3.20 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธี Back Surface Fields (BSF)	61
3.21 Collection Probability ของเซลล์ที่มี BSF และ ไม่มี BSF	61
3.22 Dependence of the key solar cell parameter upon the density of the p-type dopants as obtained by high-performance experimental device:	62
(a) Without a back surface field	
(b) With a back surface field	
3.23 ภาพจำลอง โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน	63
3.24 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	64
3.25 ลักษณะการไปอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ	66
3.26 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน	67
3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน	69
3.28 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ	70
3.29 แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่างๆ	71
3.30 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิคอน	72
3.31 ผลกระทบของอะตอมแปลกปลอมเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	75
3.32 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไป	77
3.33 กระบวนการมาตรฐานกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์	79
3.34 ลักษณะของแผ่นผลึกรูปเดี่ยว	82
3.35 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.36	Identifying flats on a silicon wafer	86
3.37	เครื่องมือการออกซิเดชันแบบ Thermal oxidation	88
3.38	น้ำยาไวแสงชนิดบวก และชนิดลบ	90
3.39	อุปกรณ์ที่ทำให้น้ำยาไวแสงกระจายสม่ำเสมอ (Photoresist spinner)	90
3.40	กระบวนการ Photolithography โดยใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ	91
	(a) growth of SiO ₂ film	
	(b) coating with photoresist	
	(c) mask placed in proximity	
	(d) mask alined and brought into contact	
	(e) photoresist developed	
	(f) oxide etch and photoresist removed	
3.41	ตัวอย่างลวดลายแผ่นโฟโตมาส์กเซลล์แสงอาทิตย์	92
3.42	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ L-Edit ที่ใช้ในการออกแบบ	93
3.43	Layout Area ที่ใช้ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์	94
3.44	Layout Area มาส์กต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบ	95
3.45	รูปมาส์ก และเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง	96
3.46	การ overlap ของมาส์กที่ 2, 3 และส่วนที่อาจเกิดการลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์	97
3.47	รูปแบบการปรับซ็อนมาส์ก (Mask Pattern Alignment)	98
3.48	รูปแบบการปรับซ็อนมาส์ก (Mask Pattern Alignment) ในกระบวนการสร้าง	98
3.49	การเก็บบรรจุเซลล์แสงอาทิตย์	99
4.1	ตัวต้านทานปรับค่าได้	130
4.2	เครื่องวัดความสว่างของแสง (Phocell Illuminator SPI 71)	130
4.3	ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM)	131
4.4	เครื่องกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลอง	131
4.5	วงจรการวัดคุณสมบัติของเซลล์ขณะได้รับแสง	132
5.1	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 2	134
5.2	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 3	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.3	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 5	135
5.4	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 6	135
5.5	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 7	136
5.6	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 8	136
5.7	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 4	137
5.8	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 9	137
5.9	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่เวลาขั้วลึกลับ 20 นาที	138
5.10	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่เวลาขั้วลึกลับ 30 นาที	139
5.11	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่เวลาขั้วลึกลับ 50 นาที	139
5.12	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 2	140
5.13	คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 2	141
5.14	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 3	142
5.15	คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 3	142
5.16	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 5	143
5.17	คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 5	144
5.18	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 6	145
5.19	คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 6	145
5.20	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 7	146
5.21	คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 7	147
5.22	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 8	148
5.23	คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 8	148
5.24	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 4	149
5.25	คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 4	150
5.26	คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 9	151
5.27	คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 9	151
5.28	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 14	153
5.29	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 15	153
5.30	เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 16	154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.31 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17	154
5.32 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 15	155
5.33 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 15	156
5.34 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 16	157
5.35 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 16	157
5.36 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 17	158
5.37 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 17	159
5.38 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 14	161
5.39 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 14	162
5.40 คุณสมบัติของกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ค่า Rss ต่างๆ กัน	163
5.41 คุณสมบัติกำลังงานนอร์มอลไลต์-ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ERC 17 ที่ค่า Rss ต่างกัน	164
5.42 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ กัน	165
5.43 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	166
5.44 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อแรงดันขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	166
5.45 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสง 1 Sun. และความเข้มแสง 2 Sun.	167
5.46 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสง 1 Sun. และความเข้มแสง 2 Sun.	168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

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

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

ปัจจุบันได้มีการศึกษา, วิจัย และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 2 ประการ คือ

1. การลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์
2. การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงการนี้นำเสนอถึงการพัฒนาระบบการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพมากที่สุด, การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลอง คือ กระแสลักษณะลัดวงจร (I_{sc}), แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางอุดมคติ (P_0), ค่าความเข้มของกระแสต่อพื้นที่ (J_{sc}), กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m), แรงดันที่ทำให้เกิด

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์จ่ายได้จริง (P_m), ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.), ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η), การหาค่าความต้านทานภายใน (R_s), ผลของค่าความต้านทานภายในต่อเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{ss}) และผลของความเข้มแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมทั้งเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back Surface Field (BSF) และการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating: ARC) แบบพอร์ซซิลิคอน (Porous Silicon: PS)

การทดลองนี้อาจจะมีต้นทุนในการทดลองสูงอยู่บ้าง ในการนำ Primum-Grade Silicon ที่มีราคาสูงมาใช้เป็นวัสดุในการทดลอง แต่ถ้ามองในมุมมองกลับกัน ยิ่งเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากเท่าไร ก็หมายถึง ในพื้นที่เซลล์เท่าเดิมเราจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น หรือในประสิทธิภาพที่เท่าเดิม เราสามารถสร้างเซลล์ได้ในพื้นที่ที่ลดลง นั่นก็คือเป็นการลดต้นทุนในการผลิตเซลล์ไปในตัวด้วย

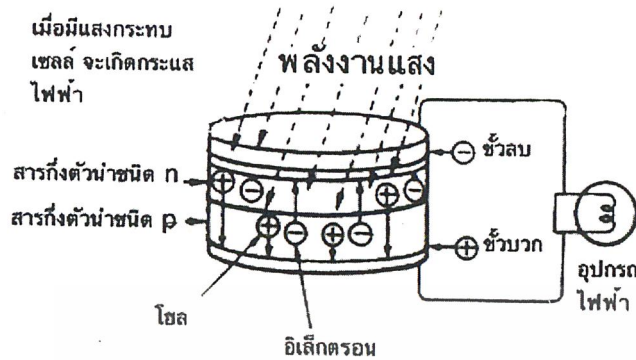
ประวัติและความเป็นมา

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

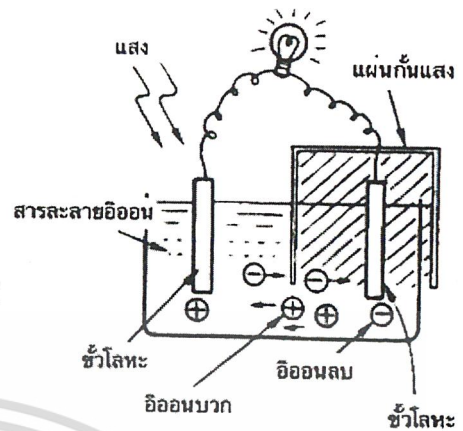
เมื่อย้อนหลังกลับไปศึกษาถึงประวัติศาสตร์การค้นคว้าเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างแสง และวัตถุในแง่ของไฟฟ้าจะทราบว่า ในปีค.ศ.1839 E.Bequerel นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เป็นคนแรกที่ค้นพบว่า เมื่อแสงตกกระทบวัตถุจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เขาได้ทำการทดลองดังรูปที่ 1.2 โดยเอาขั้วโลหะสองขั้วจุ่มในสารละลายไอออน แล้วให้แสงกระทบได้เพียงขั้วเดียว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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีแสงกระทบ
เซลล์ จะเกิดกระแส
ไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 1.2 การทดลองให้แสงตกกระทบ
ขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว

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

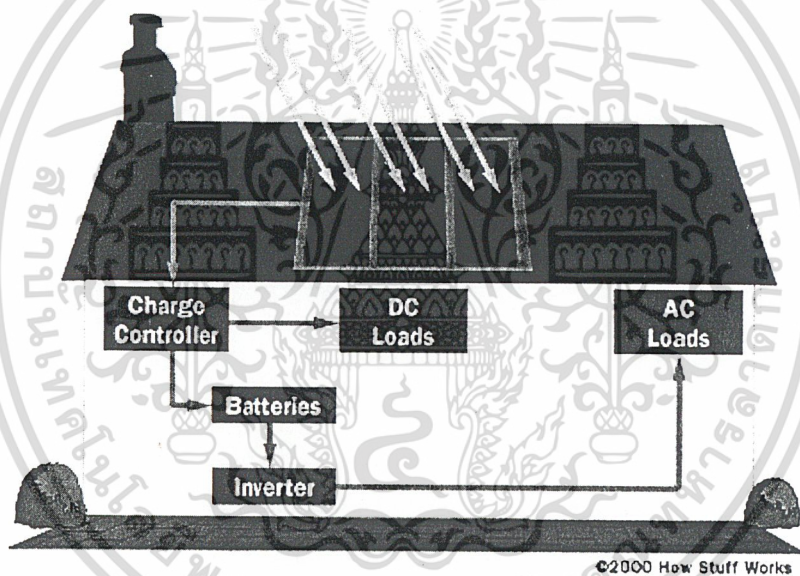
เซลล์แสงอาทิตย์ได้เริ่มเป็นที่สนใจในวงกว้างครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1958 เมื่ออเมริกาได้ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนดาวเทียม “แวนการ์ด หมายเลข 1” เพื่อเป็นตัวจ่ายพลังงานสำหรับการสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีบนพื้นโลก หลักการทำงานก็เช่นเดียวกับระบบบนโลก คือ เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าชาร์จเข้าแบตเตอรี่ แล้วแบตเตอรี่จะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์การสื่อสาร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

ตั้งแต่ปีค.ศ.1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนา และสร้างขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานบนพื้นโลก โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ และการลดค่าต้นทุนในการสร้าง

การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงขยายวงออกไปอย่างกว้างขวาง จนกระทั่งในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก ซิลิคอนมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงถึงราว 15-24%

เซลล์แสงอาทิตย์

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



รูปที่ 1.3 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

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

ซิลิคอนเป็นวัสดุที่ใช่มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน โดยแทบจะเรียกได้ว่า เป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมนี้เลยทีเดียว ทรานซิสเตอร์, ICs, LSI และ VLSI ทั้งหมดแทบทั้งหมดสร้างโดยใช้ซิลิคอนนี้เอง นั่นก็คือ การจะนำซิลิคอนมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในแง่ของวัสดุคือมันมีอยู่แล้วในปริมาณที่มากพอที่จะใช้เพื่อการผลิตเท่านั้นไม่ใช่ปริมาณที่น้อยพอที่จะใช้เพื่อการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้เอง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

SOLAR CELL MATERIAL CANDIDATES (FROM BYLANDER [13])

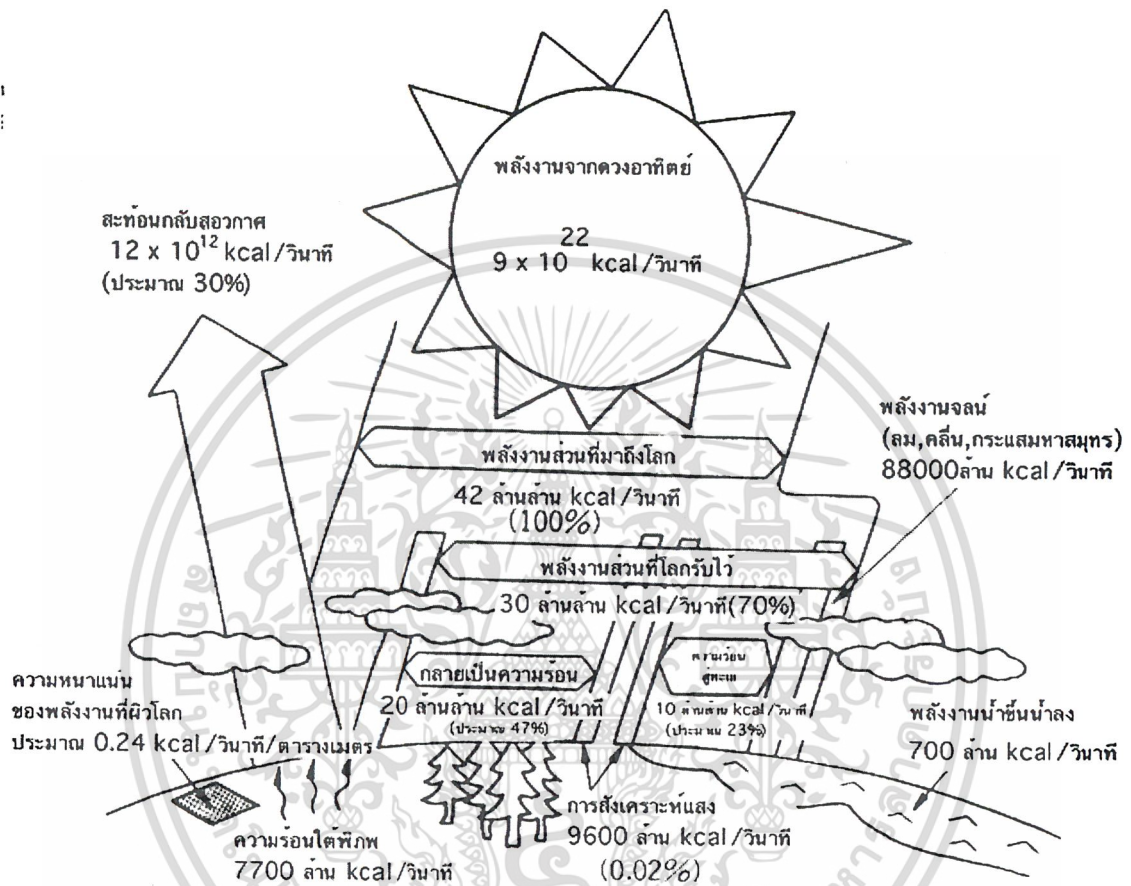
Material	Major materials					Experimental diffusion length (μ)
	Energy gap (eV)	Mobility (300 K) ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)		Lifetime (s)		
		μ_n	μ_p	τ_n	τ_p	
Si	1.1	1450	500	400		100
GaAs	1.4	8500	400	50	110^{-2}	5
CdS	2.6	340	615	100	10^{-2}	~ 1
B	1.5	6000	4000			
Se (Hex)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

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

พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี

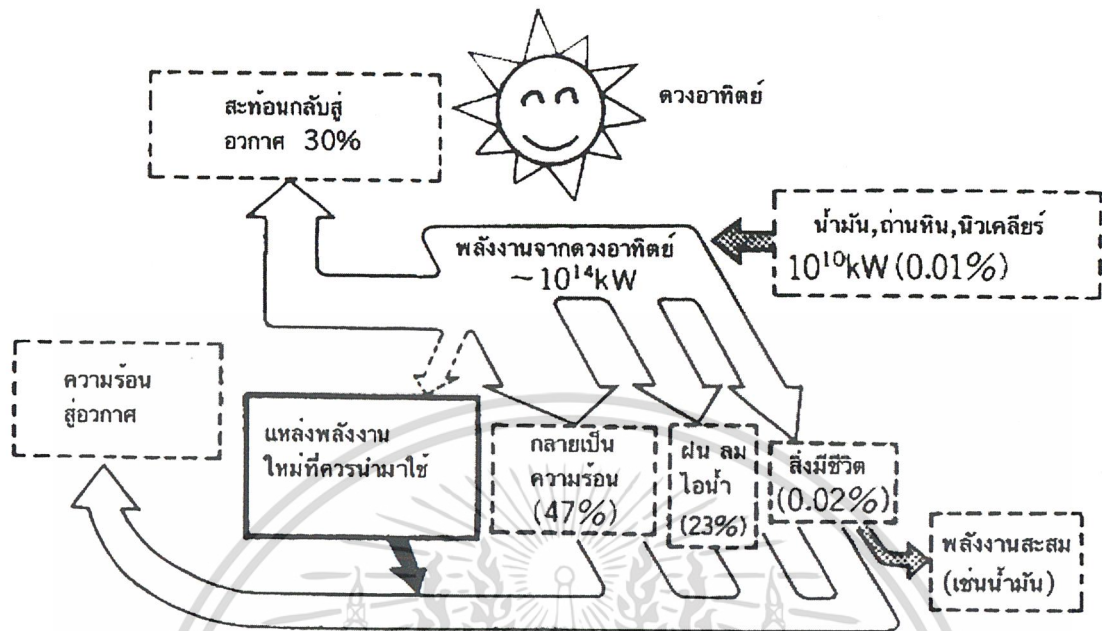
ดวงอาทิตย์อยู่ห่างจากโลกประมาณ 150 ล้านกิโลเมตร ปล่อยพลังงานจากปฏิกิริยาฟิวชั่นออกสู่ภายนอกในระดับ 9×10^{22} kcal/วินาที ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งเป็นพลังงานที่มากมายมหาศาล พลังงานนี้กระจายไปในอวกาศ และส่วนที่มาถึงโลกนั้นจะมีความเข้มข้นที่บริเวณนอกเขตบรรยากาศของโลกในระดับ 1.38 kW/ตารางเมตร (0.33 kcal/วินาที) คิดเป็นพลังงานที่โลกได้รับได้ไม่มากนักแต่ๆ พลังนี้ อีกทั้งยังมีเหตุผลที่แสงอาทิตย์และต้องอย่างองงเงเงของเยื่อส่วที่ทุกที่ที่มีกั รัศมีใบใช้

เป็น 42×10^{12} kcal/วินาที โดยในนี้ 30% จะสะท้อนกลับออกนอกบรรยากาศโลก ที่เหลือ 70% จะมาถึงโลก ซึ่งเมื่อเทียบกับพลังงานที่มนุษย์ทั้งโลกใช้ในปี 1988 คือ 10^{17} kcal จะเห็นว่า เทียบเท่ากับพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาถึงโลกเพียงแค่ประมาณ 40 นาทีเท่านั้น



รูปที่ 1.4 พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ

จะเห็นว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์นั้นมากมายมหาศาลเพียงใด และโลกของเราก็ได้วิวัฒนาการมาได้เงื่อนไขทางพลังงานเช่นนี้ โดยพลังงานที่มาถึงผิวโลกจะเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่ผิวดิน และทะเล ทำให้เกิดลม, ใอน้ำ, ฝน และวัฏจักรต่างๆ ของโลกทั้งทางกายภาพและชีวภาพ รวมทั้งทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงของพืช โดยคร่าวๆแล้วใน 70% ที่มาถึงผิวโลกประมาณ 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 จะเห็นว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ตกถึง โลกมีขนาดมหาศาลเมื่อเทียบกับอย่างอื่น ๆ คือประมาณ 42 ล้านล้าน kcal/วินาที พลังงานลมจะมีลำดับรองลงมา คือ 0.088 ล้านล้าน kcal/วินาที ส่วนพลังงานความร้อนจากใต้พิภพซึ่งเป็นพลังงานจากภายในของโลกเองมีขนาด 0.0077 ล้านล้าน kcal/วินาที โดยสรุปแล้วจะเห็นว่า พลังงานในธรรมชาติบน โลกนั้น แทบทั้งหมดมาจากดวงอาทิตย์ก็ว่าได้

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบขนาดของแหล่งพลังงานต่างๆ บนโลก

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

พลังงานจากการแผ่รังสีต่อพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของดวงอาทิตย์ นอกบรรยากาศของโลกจะ
เอกสารนี้เป็น เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความเข้มของการแผ่รังสีนี้ เราเรียกว่า Solar Constant หรือที่นิยมเรียกกันว่า แบบ Air
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mass zero เขียนย่อๆได้เป็น AM0 ซึ่งในงาน Photovoltaic การแผ่รังสีแบบ AM0 กำหนดว่ามีค่าเท่ากับ 135.3 mW/cm^2

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

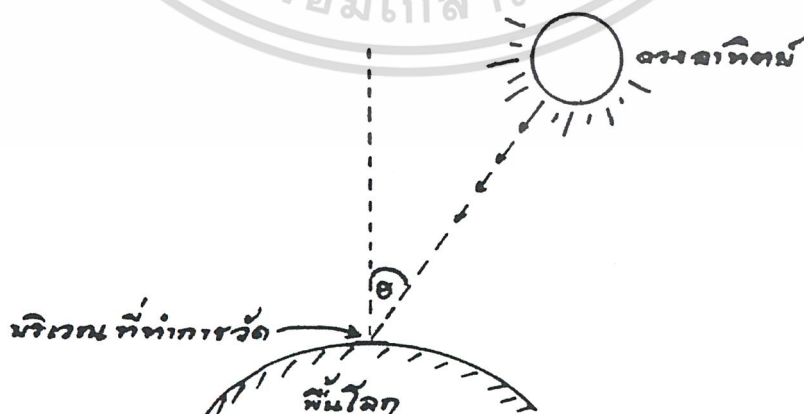
ลักษณะการแผ่รังสีแบบต่างๆ อาจพิจารณาได้ดังนี้คือ

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

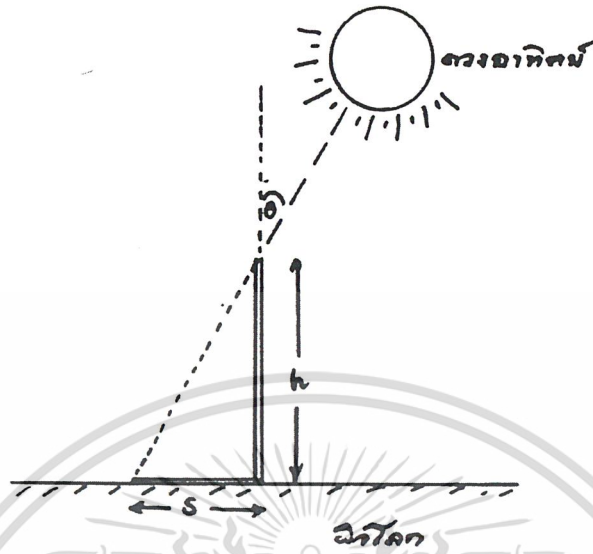
เมื่อ θ คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ทำกับทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวโลกบริเวณที่ทำกรวัด ดังนั้น ถ้าดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับโลกเป็นมุม 60° ลักษณะของการแผ่รังสีนี้จะเรียกว่าเป็นแบบ AM2

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 1.6 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลกที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.7 การหาค่ามุม θ โดยการพิจารณาเงาของแสง

ยิ่งค่าของ Air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่น ๆ ไม่เปลี่ยนแปลง พลังงานแสงอาทิตย์ที่มายังผิวโลกก็จะยิ่งมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่งคือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM1.5 ซึ่งสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ในลักษณะนี้มีค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.3 ซึ่งค่าพลังงานรวมทั้งหมดมีค่า 83.2 mW/cm^2 และกราฟแสดงความหนาแน่นของพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวคลื่นค่าต่างๆ ในแสงอาทิตย์ แสดงได้ดังรูปที่ 1.8

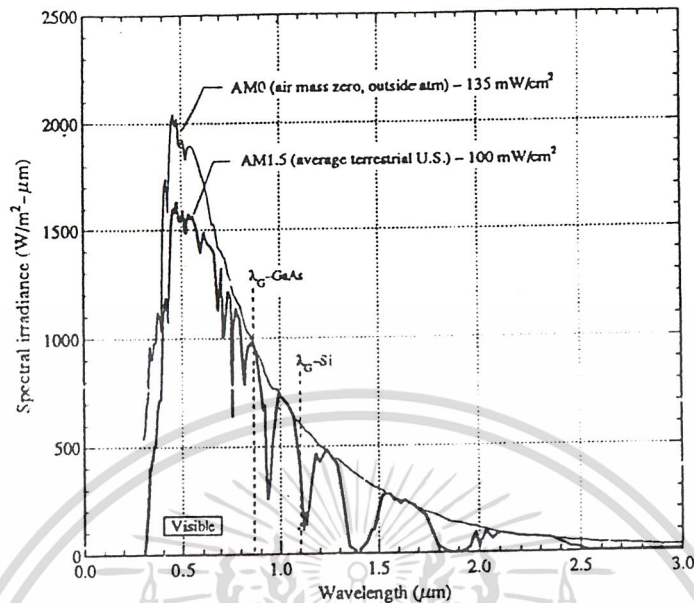
ตารางที่ 1.3 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ขณะทำการวัดที่ค่า Air Mass 1.5

SOLAR SPECTRUM—AIR MASS 1.5*

Wave-length (μm)	W/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$)	Wave-length (μm)	W/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$)	Wave-length (μm)	W/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$)	Wave-length (μm)	W/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$)	Wave-length (μm)	W/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$)
0.295	0	0.595	1262.61	0.870	843.02	1.276	344.11	2.388	31.93
0.305	1.32	0.605	1261.79	0.875	835.10	1.285	345.69	2.415	28.10
0.316	20.96	0.615	1255.43	0.8875	817.12	1.314	284.24	2.453	24.96
0.325	113.46	0.625	1240.19	0.900	807.83	1.335	175.28	2.494	15.82
0.335	182.23	0.635	1243.79	0.9075	793.87	1.384	2.42	2.537	2.59
0.345	234.43	0.645	1233.96	0.915	778.97	1.432	30.06		
0.355	286.01	0.655	1183.32	0.925	217.12	1.457	67.14		
0.365	365.88	0.665	1225.40	0.930	163.72	1.472	59.89		
0.375	386.80	0.675	1219.08	0.940	249.12	1.542	240.85		
0.385	381.78	0.685	1200.72	0.950	231.30	1.572	226.14		
0.395	492.18	0.695	1181.24	0.955	255.61	1.599	220.46		
0.405	751.72	0.6983	973.53	0.965	279.69	1.608	211.76		
0.415	822.45	0.700	1173.31	0.975	529.64	1.626	211.26		
0.425	842.26	0.710	1152.70	0.985	496.64	1.644	201.85		
0.435	890.55	0.720	1133.83	1.018	585.03	1.650	199.68		
0.445	1077.07	0.7277	974.30	1.082	486.20	1.676	130.50		
0.455	1162.43	0.730	1110.93	1.094	448.74	1.732	161.59		
0.465	1180.61	0.740	1086.44	1.098	486.72	1.782	136.65		
0.475	1212.72	0.750	1070.44	1.101	500.57	1.862	2.01		
0.485	1180.43	0.7621	733.08	1.128	100.86	1.955	39.43		
0.495	1253.83	0.770	1036.01	1.131	116.87	2.008	72.58		
0.505	1242.25	0.780	1018.42	1.137	108.68	2.014	80.01		
0.515	1211.01	0.790	1002.58	1.144	155.44	2.057	72.57		
0.525	1244.87	0.800	988.11	1.147	139.19	2.124	70.29		
0.535	1299.51	0.8059	860.25	1.178	374.29	2.156	64.76		
0.545	1273.47	0.825	932.74	1.189	383.37	2.201	68.29		
0.555	1276.14	0.830	923.87	1.193	424.85	2.266	62.52		
0.565	1277.74	0.835	914.95	1.222	382.57	2.320	57.03		
0.575	1292.51	0.8465	407.11	1.236	383.81	2.338	53.57		
0.585	1284.55	0.860	857.46	1.264	323.68	2.356	50.01		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ Total energy content = 832 W/m² ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ Source: Ref. 1.5



รูปที่ 1.8 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในแสงอาทิตย์

รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ถ้าแสง หรือรังสีของแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นโลก จะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน คือ

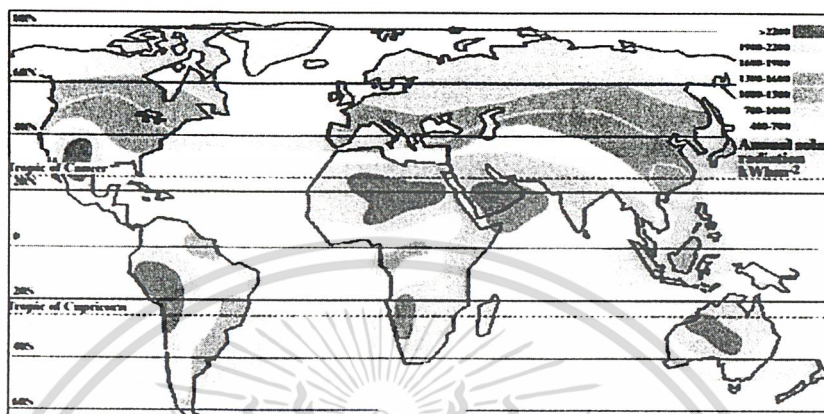
1. Direct sunlight หรือ ถ้าแสงโดยตรง
2. Indirect or Diffused sunlight ถ้าแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย

ถ้าแสงอาทิตย์โดยตรง หรือ Direct sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และถ้าแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย หรือ Diffused sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลก ประมาณกันว่า แม้แต่ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ถ้าแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10-20% ของรังสีทั้งหมดที่ได้รับ ยิ่งในวันที่มีเมฆหมอกปกคลุมมากๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายนี้จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

สเปกตรัมของแสงที่ได้รับ โดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจายจะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อน และแพร่กระจาย นอกจากนี้แล้ว ลักษณะการแพร่รังสีแบบ Air mass ค่าสูงๆ จะมีผลทำให้ปริมาณของแสงที่ได้รับในส่วนแพร่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย



รูปที่ 1.9 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูง หรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากจะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานสูง จากรูปที่ 1.9 แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ พบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ปานกลางแต่เป็นบริเวณกว้าง โดยเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 1,300-1,600 กิโลวัตต์/ ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยของประเทศต่างๆที่ได้รับพบว่า ประเทศไทยได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็นค่ารายวันเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 18.2 เมกะจูล/ตร.เมตร-วัน ซึ่งถือได้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

สารกึ่งตัวนำ

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ดังนั้น ทฤษฎีการทำงาน และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีส่วนเกี่ยวข้องทั้งโดยทางตรง และโดยทางอ้อมกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

วัสดุต่างๆที่มีอยู่ในโลกนี้ อาจพิจารณาจัดแบ่งออกเป็นหมู่ใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้เป็น 3 หมู่ คือ

1. วัสดุตัวนำ (Conductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากสถาบัน
ไม่ว่าการันตีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุตบแต่งและต้องอยู่เบื้องหลังของเนื้อหาที่กล่าวถึงทั้งหมดที่ปรากฏในเอกสาร

2. วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าฉนวนแต่เลวกว่าตัวนำ

นำ เช่น Si, Ge เป็นต้น

3. **วัสดุฉนวน (Insulator)** ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดี เช่น แก้ว, เบกาไลต์, โม่กา เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. **สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุแท้ (Element semiconductor)** ได้แก่ ธาตุในหมู่ที่ 4 ของตารางพีริออดิก เช่น ซิลิคอน, เยอรมันเนียม, ดีบุก, คาร์บอน เป็นต้น

2. **สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ (Compound semiconductor)** ได้แก่ สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ 3 และหมู่ที่ 5 เช่น GaAs, GaP และสารประกอบของธาตุในหมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 6 เช่น CdS เป็นต้น

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

ชนิดของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

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

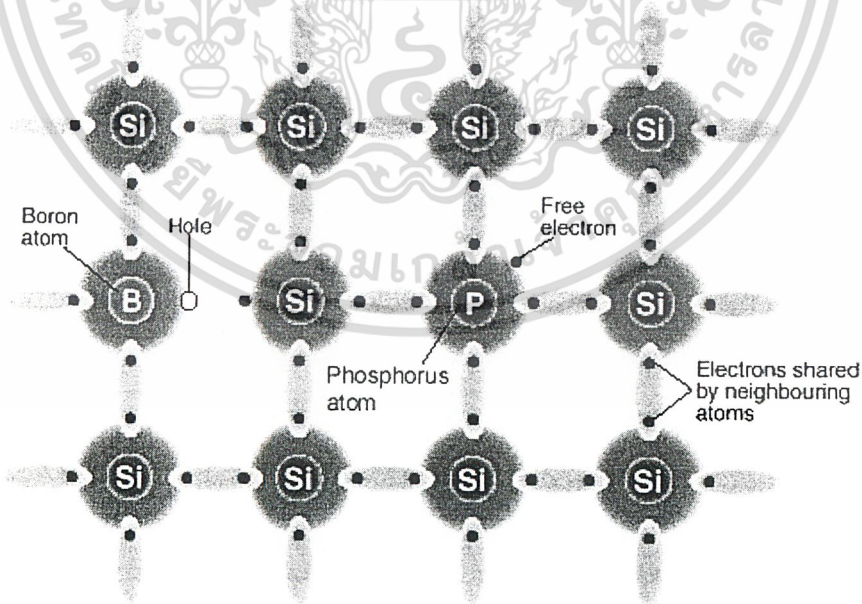
2. **สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor)** เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮลมีค่าน้อย ซึ่งถ้าคำนวณเป็นค่าความนำไฟฟ้าแล้วจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุตัวนำมาก และในทางปฏิบัติ เพื่อให้สารกึ่งตัวนำสามารถถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จำเป็นที่จะต้องเติมอะตอมสารเจือ ซึ่งผลของอะตอมสารเจือที่เติมจะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นอย่างมากมาย และยังสามารถควบคุมค่าความนำไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุอื่นว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor)

อะตอมสารเจือ (Impurity atoms) หมายถึง อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ III หรือกลุ่ม V ของตารางพีริออดิกของธาตุ ซึ่งใช้เติมลงไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้พาหะ เช่น อิเล็กตรอนหรือโฮล และปริมาณของพาหะตามที่ต้องการ อะตอมที่นำมาเป็นสารเจือควรจะต้องมีขนาดของอะตอม และคุณสมบัติกายภาพที่ใกล้เคียงกับอะตอมสารกึ่งตัวนำนั้นๆ เพื่อไม่ให้เกิดการไม่ว่การณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียหายของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำได้ อะตอมสารเจือ อาจถูกจัดแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1.10 คือ

(ก) อะตอมสารเจือชนิดเอ็น (n-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ V ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส (P), สารหนู (As), พลวง (Sb) และบิสมัท (Bi) เป็นต้น และที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน ดังนั้นบางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “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 อะตอมของธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ III ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น โบรอน (B), อะลูมิเนียม (Al), อินเดียม (In) และแกลเลียม (Ga) เป็นต้น และที่นิยมใช้งานมาก ได้แก่ โบรอน (B) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้โฮลหรือผู้รับอิเล็กตรอน ดังนั้นบางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้รับ” (Acceptor atoms) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้รับจะมีปริมาณโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก โฮลจึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้า ทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดพี” (p-Type Semiconductor) คำว่า พี (p: Positive charge) หมายถึง ประจุบวก



รูปที่ 1.10 ลักษณะของผลึกซิลิคอนซึ่งถูกเจือด้วยอะตอมโบรอนและฟอสฟอรัส

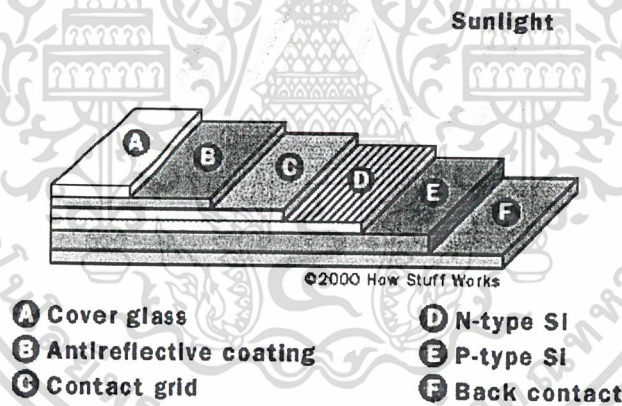
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

บทนำ

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



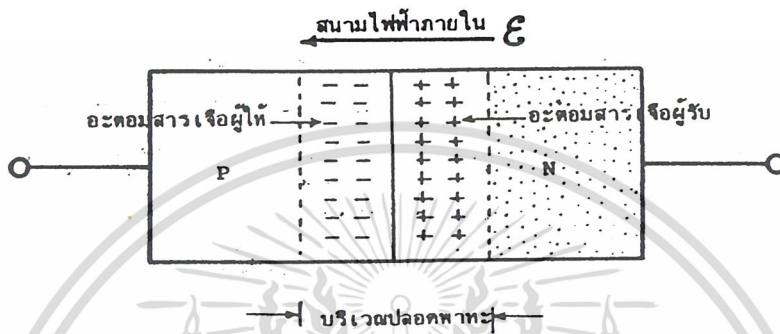
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง

2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุล ขณะที่ไม่มีความดันไบอัส

เมื่อยรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าด้านทั้งสองของรอยต่อมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของพาหะ กล่าวคือ โสลทางด้านพีจะมากกว่าโสลทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านพี จึงเป็นเหตุให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ เพื่อให้ด้านทั้งสองของรอยต่อมีพาหะเท่ากัน ดังนั้น พาหะจากด้านซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะแพร่ไปทางด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า คือ โสลทางด้านพีจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านเอ็น และ

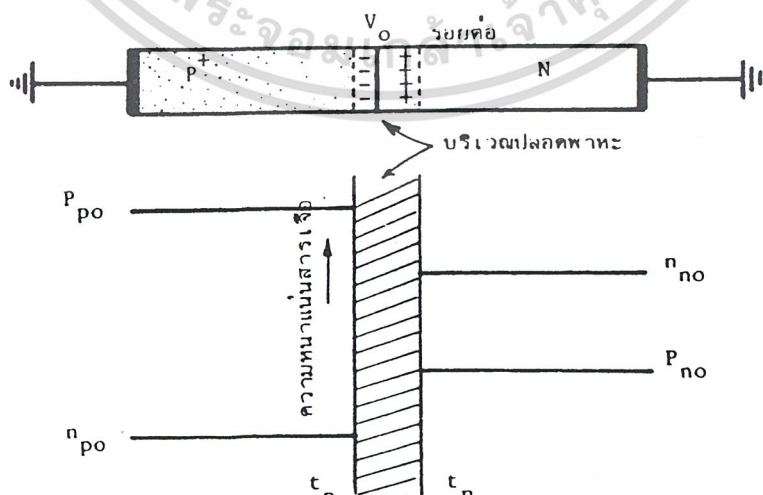
อิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้ามาทางด้านพี การแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อนี้จะเกิดขึ้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บริเวณใกล้รอยต่อเป็นอันดับแรก ดังนั้น อะตอมสารเจือผู้รับทางด้านพีบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็น อีออนลบ และอะตอมสารเจือผู้ให้ทางด้านเอ็นบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็นอีออนบวก ประจุไฟฟ้าของอีออนทั้งสองจะเริ่มทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ เรียกว่า สนามไฟฟ้าภายใน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะช่วยต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นจนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีผลพอดีทำให้โฮล และอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ในภาวะนี้จะไม่มีการแพร่ของพาหะใดๆข้ามรอยต่อเลย เราเรียกภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” ที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นจะเป็นบริเวณที่ไม่มีพาหะอยู่ เนื่องจากพาหะจะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าปิดออกไปจากบริเวณนี้ บริเวณดังกล่าวถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (Depletion region หรือ Space charge region หรือ Transition region)

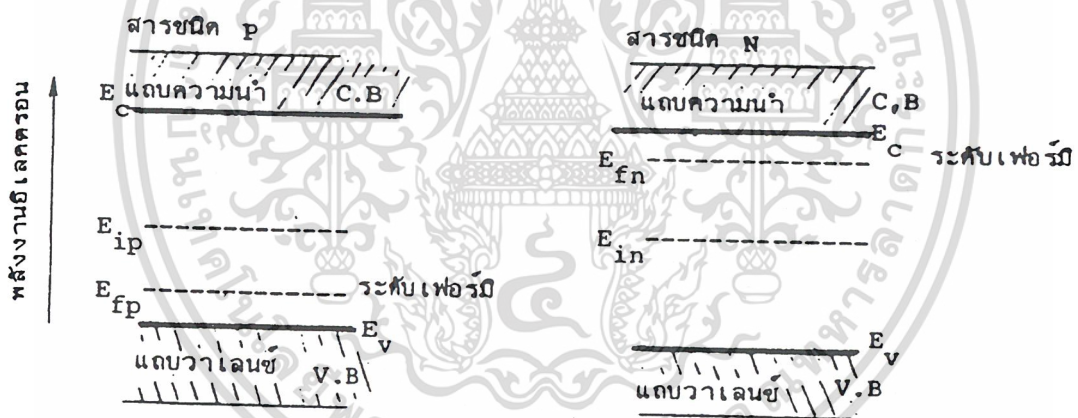


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีการไบอัส โยชนด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

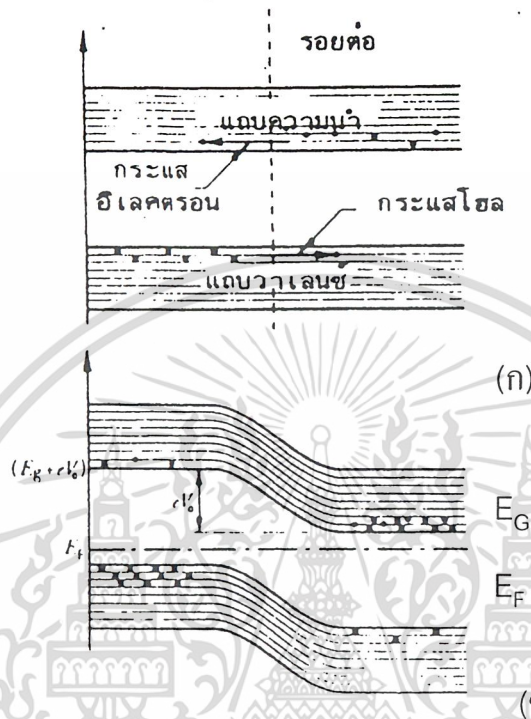
- เมื่อ V_0 คือ ศักย์สัมผัส (โวลต์)
- k คือ ค่าคงตัวของโบสตันน์มีค่า $= 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
- T คือ อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K)
- q คือ ประจุอิเล็กตรอน $= 1.6 \times 10^{-19}$ คูอมบ์
- N_A คือ ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ (cm^{-3})
- N_D คือ ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})
- n_i คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำ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



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น
ขณะยังไม่เกิดรอยต่อพี-เอ็น

ในการเขียนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band diagram) เราต้องพิจารณาถึงระดับเฟอร์มิเป็นหลักสำคัญ จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีระดับพลังงาน เฟอร์มิ E_f ไม่เท่ากัน แต่ในภาวะสมดุลระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อจะต้องต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันตลอดผ่านรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทพาหะเกิดขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านที่มีระดับ E_f สูงกว่า คือด้านเอ็น ไปยังระดับพลังงานที่ว่างในแถบความนำของส่วนพีซึ่งมีระดับ E_f ต่ำกว่า และไหลจากส่วนพีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะไหลเข้ามายังระดับที่ว่างในแถบวาเลนซ์ของส่วนเอ็น ขณะที่มีการถ่ายเทของพาหะข้ามรอยต่อนี้ ระดับเฟอร์มีจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับระดับใหม่ จนกระทั่งในภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มีของด้านเอ็น และด้านพีจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นแสดงด้วยแถบพลังงาน (ก) ขณะสัมผัส (ข) ภาวะสมดุลหลังสัมผัสแล้ว

ในภาวะสมดุล ระยะเวลาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

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

เมื่อ X_m คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุล (cm.)

ϵ คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำ

V_0 คือ ศักย์สัมผัส (V.)

นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับ โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

(Capacity) ค่าความหนาแน่นของควมจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

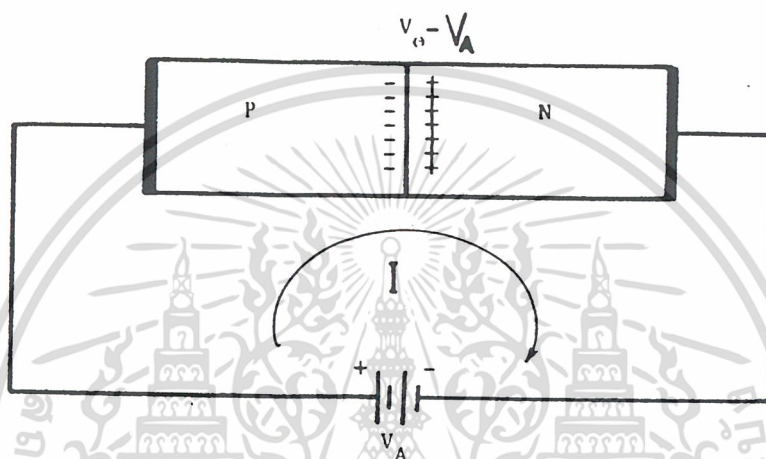
$$C_j = \frac{\epsilon \cdot q \cdot N_A \cdot N_D}{\sqrt{2(N_A + N_D) \cdot V_0}} \text{ F/m}^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (F/m²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.6

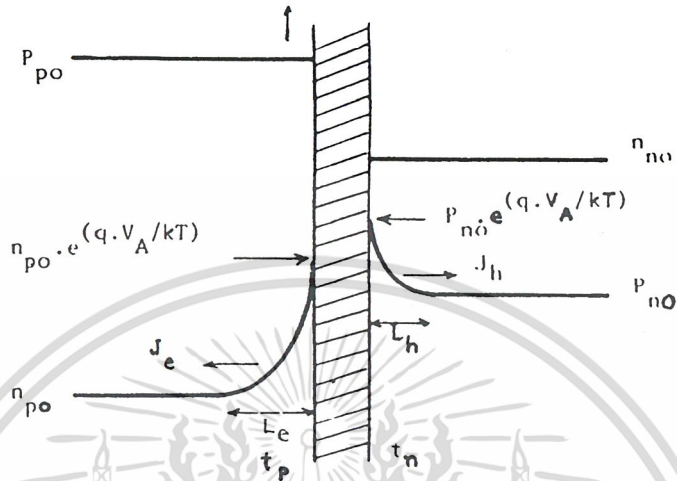
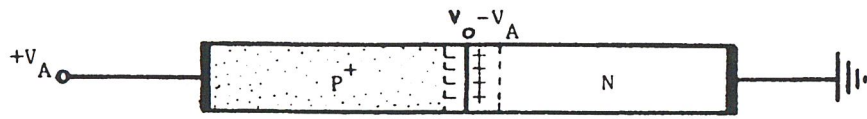


รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง

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

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง โวลตจากด้านพีจะถูกฉีดเข้ามาทางด้านเอ็น ดังนั้น ปริมาณของโวลตทางด้านเอ็นบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อจะเพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกัน เมื่ออิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปทางด้านพี ปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านพีก็จะเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

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

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

เมื่อ $p_n|_{t_n}, n_p|_{t_p}$ คือ ความหนาแน่นของโฮลที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ และ

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

และ V_A คือ แรงดันไบอัสตรงภายนอก

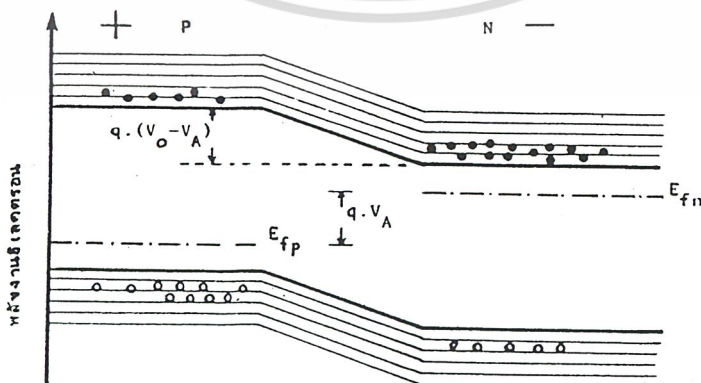
I_0 คือ กระแสอิ่มตัว

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น

D_h คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

D_e คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

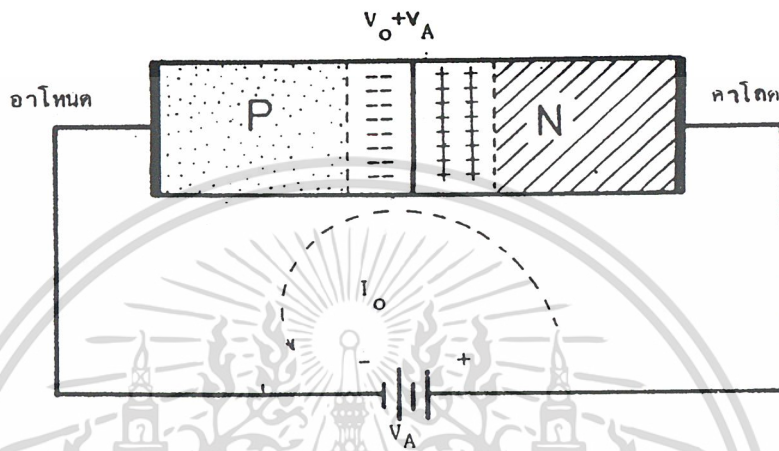
และขณะรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน แสดงได้ดังรูป 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

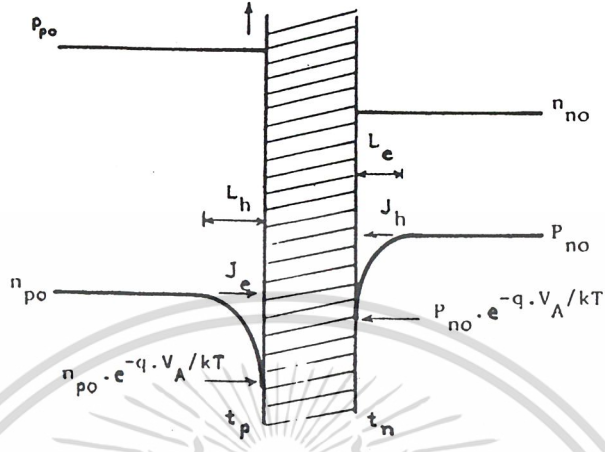
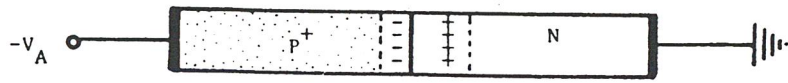
หากให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า V_A แล้ว แรงดัน V_A จะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีค่าสูงขึ้นจากเดิม ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ รอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้จึงกระทำตัวคล้ายฉนวนซึ่งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น และกว้างกว่าในตอนที่ยังไม่ได้รับการไบอัส

เนื่องจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A จะทำให้พาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆ บริเวณปลอดพาหะจะมีจำนวนลดลงดังรูปที่ 2.10 และสามารถหาความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยได้จากกฎของรอยต่อ คือ

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

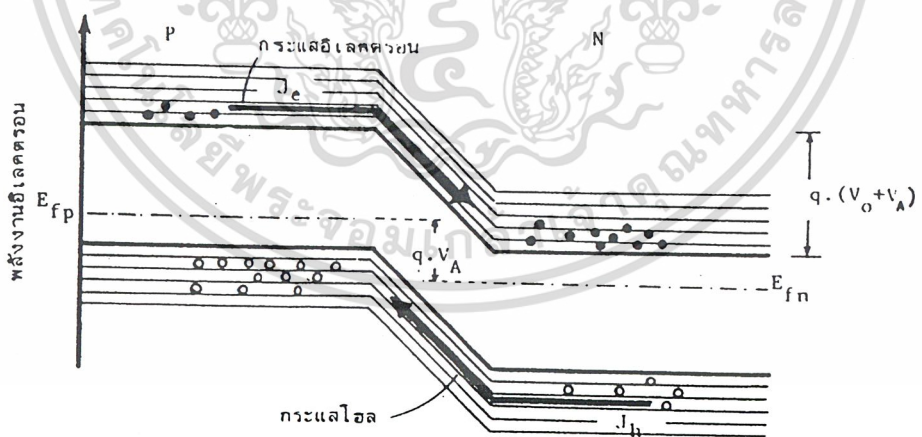
$$n_p|_{t_p} = n_{p0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ
ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ มีผลให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อ
แตกต่างกัน qV_A ซึ่งใช้ธิบายว่าเกิดมีกระแสของพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น
ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A

จากสมการไดโอดในหัวข้อที่แล้ว เมื่อแทนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ ได้ว่า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุ(2.10) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายลบ หมายถึง กระแสย้อนกลับ มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีได้รับไบอัสตรง จะเห็นได้ว่า กระแส I_0 เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งมีค่าน้อยมาก และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้นอกจากอุณหภูมิของรอยต่อ

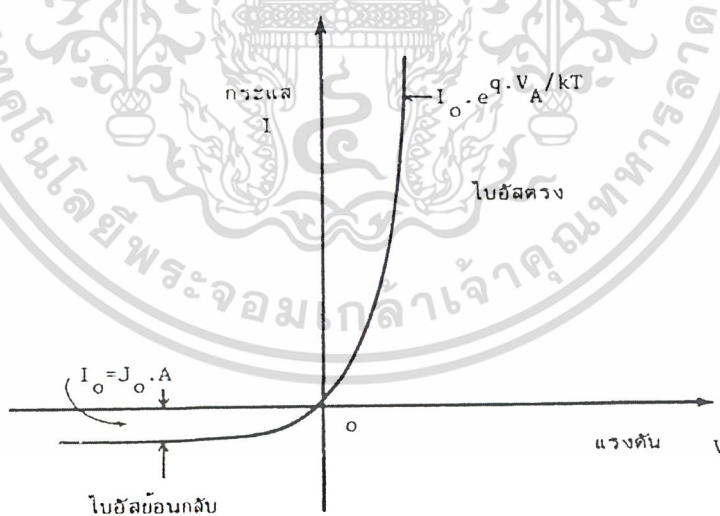
2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งกราฟนี้เราได้มาจากสมการที่ 2.6

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

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



รูปที่ 2.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)

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

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

เมื่อ E_{photon} คือ พลังงานของโฟตอน

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

ν คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

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

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

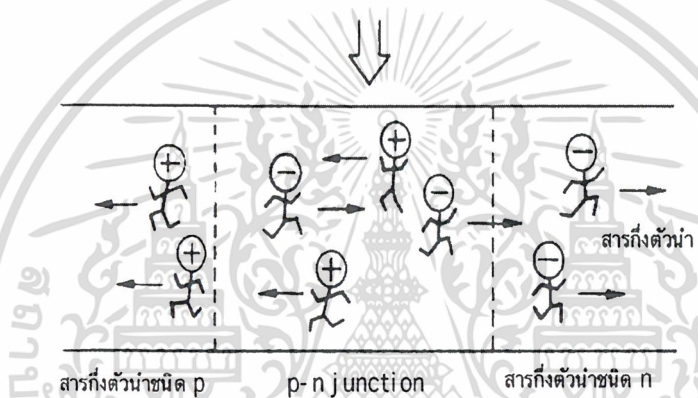
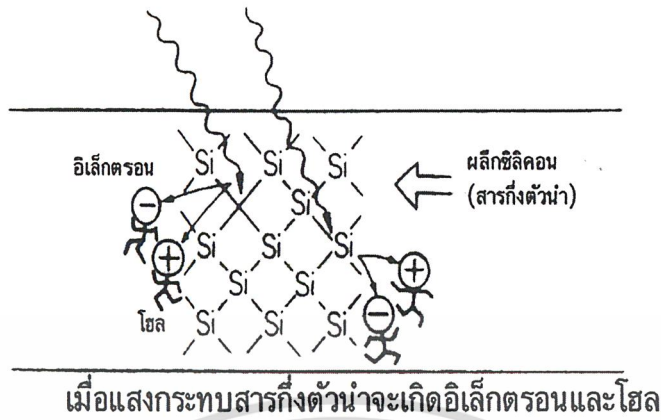
$$\text{กรณีรอยต่อได้รับแสง (illumination)} \quad I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) - I_p \quad (2.13)$$

โดยที่ I_p คือ กระแสเนื่องจากแสง (photo current)

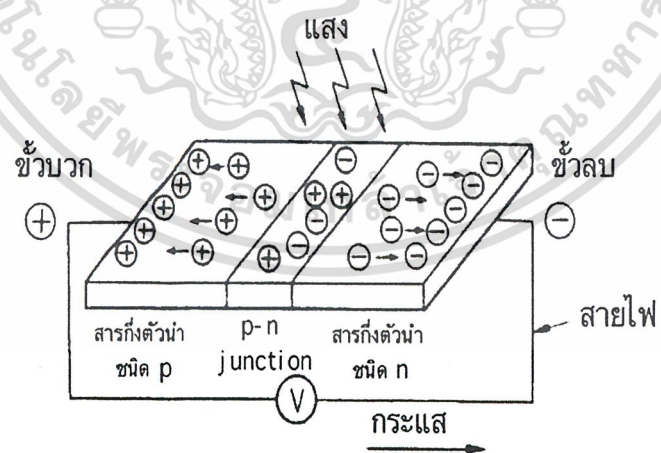
และกระแสเนื่องจากแสงสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.14

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



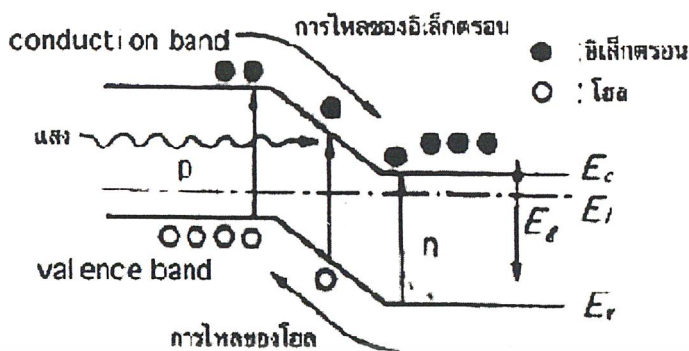
อิเล็กตรอนจะวิ่งไปด้านสารกึ่งตัวนำชนิด n
โฮลจะวิ่งไปด้านสารกึ่งตัวนำชนิด p



เมื่อต่อขั้วบวกและลบจะมีกระแสไฟฟ้าไหล

รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์

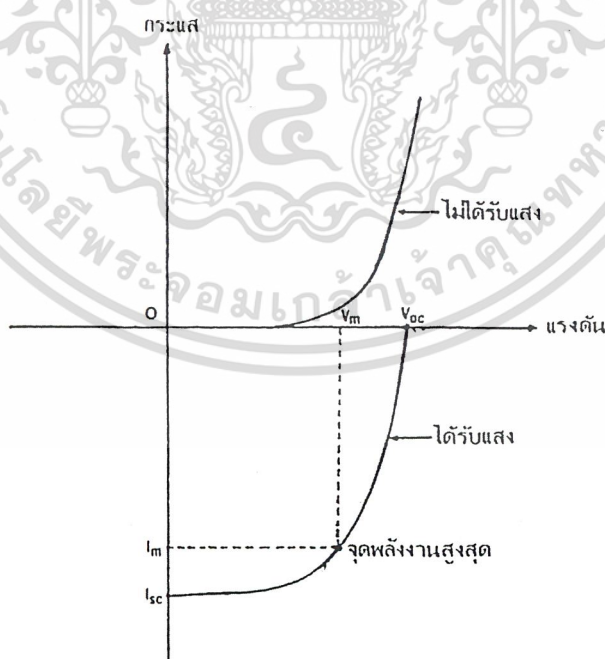
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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 และไม่ได้รับแสงสามารถเขียนแสดงเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ขณะที่ไม่ได้รับแสง และ ได้รับแสง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

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

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

ขณะลัดวงจร $V_A = 0$, ดังนั้นสมการที่ 2.13 จะเขียนใหม่ได้ว่า

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

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

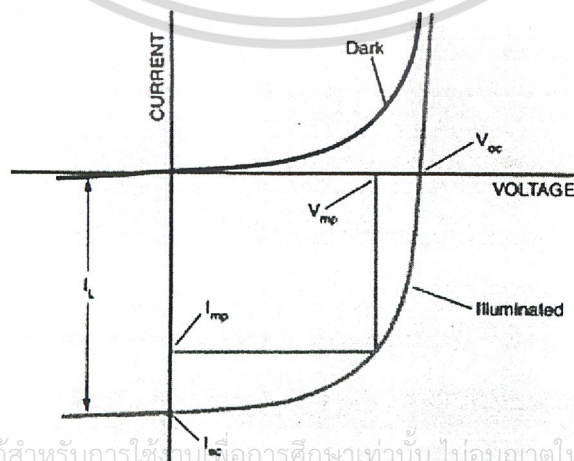
เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร $I = 0$, สมการที่ 2.13 เขียนใหม่ได้ว่า

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

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

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

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

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

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

เมื่อ α, β เป็นค่าคงที่

ตารางที่ 2.1 ค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน

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

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

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

และค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการที่ 2.19

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

ค่าของ P_m , V_m , และ I_m แสดงได้ดังกราฟคุณสมบัติของเซลล์ในรูปที่ 2.15

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

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

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก เซลล์ที่ใช้งาน โดยทั่วไปค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.6-0.8

นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญยิ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนตัวย่อเป็น η ประสิทธิภาพของเซลล์ ถูกนิยามว่าคือ 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)

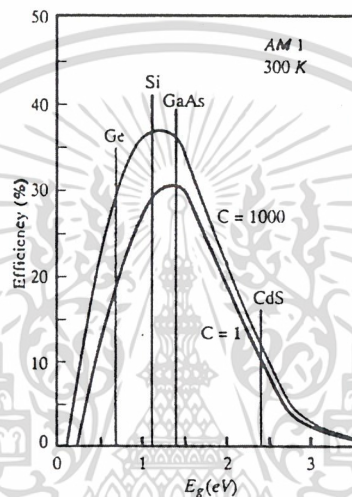
พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เซลล์ได้รับเกิดจากการดูดกลืนพลังงาน โฟตอนที่มีค่าสูงมากกว่า E_G ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่า E_G จะไม่มีผลทำให้เกิดกระแสแสง และในโฟตอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงกว่า E_G อาจไม่เกิดกระแส แต่จะกระจายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งหากเป็นกรณีนี้ ประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลง ดังนั้น ขนาดของ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

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

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

นอกจากนี้ยังมีการใช้เลนส์รวมแสงเพื่อเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้น แล้วฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเลนส์ขนาดใหญ่สามารถเพิ่มความเข้มของแสงได้เป็นหลายร้อยเท่า ทำให้เซลล์จ่ายกระแสไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

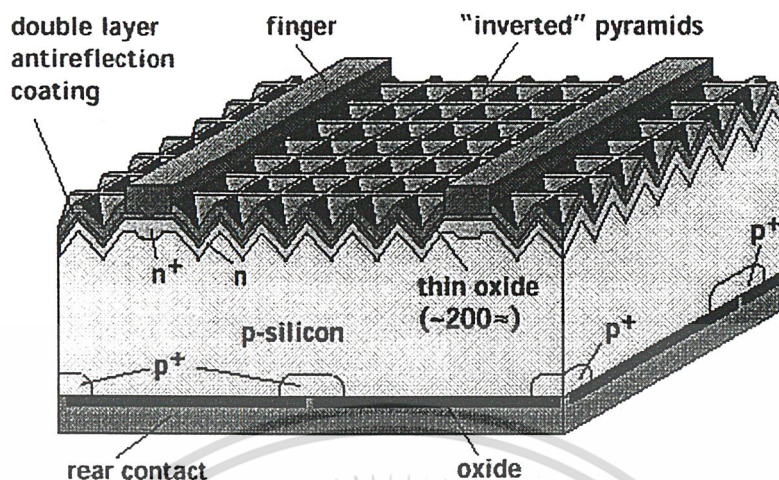


รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ 300K กับขนาด E_g ของสารกึ่งตัวนำ

จากกราฟในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าซิลิคอน และแกเลียมอาร์เซไนด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาด E_g ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



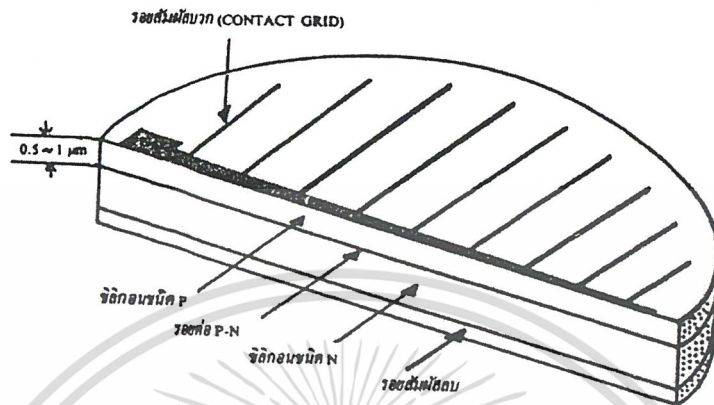
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรมุมูล

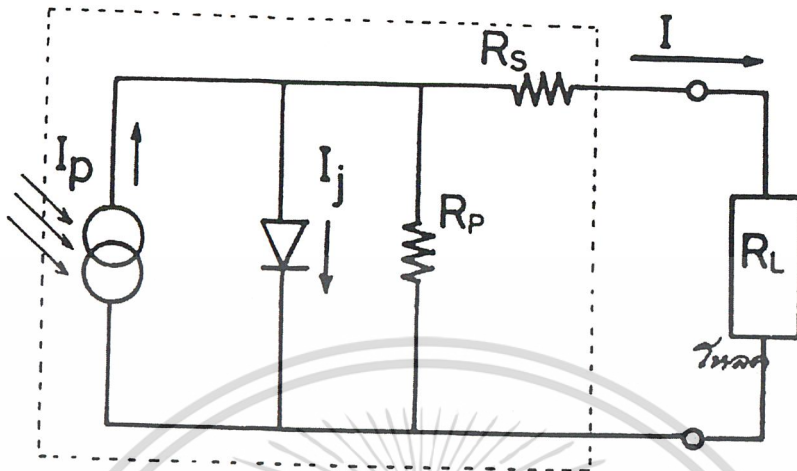


รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน

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

จากลักษณะของเซลล์ดังกล่าว เราสามารถเขียนวงจรมุมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ลักษณะวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น โดยที่ I_p คือ กระแสเนื่องจากแสง I_j คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่ได้มีแสง 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 เขียนตัวย่อได้เป็น R_s ส่วนค่าความต้านทานขนาน (Parallel resistance หรือ Shunt resistance: R_p) เป็นค่าความต้านทานสมมติที่ขนานกับรอยต่อพี-เอ็น ในรอยต่อพี-เอ็นที่สมบูรณ์ หรือในทางอุดมคติ ค่าของ R_p จะมีค่าเป็นอนันต์ (∞) และค่าของ R_s จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดเสีย (defect) เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ โดยเฉพาะรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ๆ ย่อมมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏอยู่ จึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่า R_p จึงไม่สูงเป็นค่าอนันต์ และค่า

R_s ก็มีค่าไม่เป็นศูนย์ ผลของค่า R_s และ R_p จะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงได้ในรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22

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

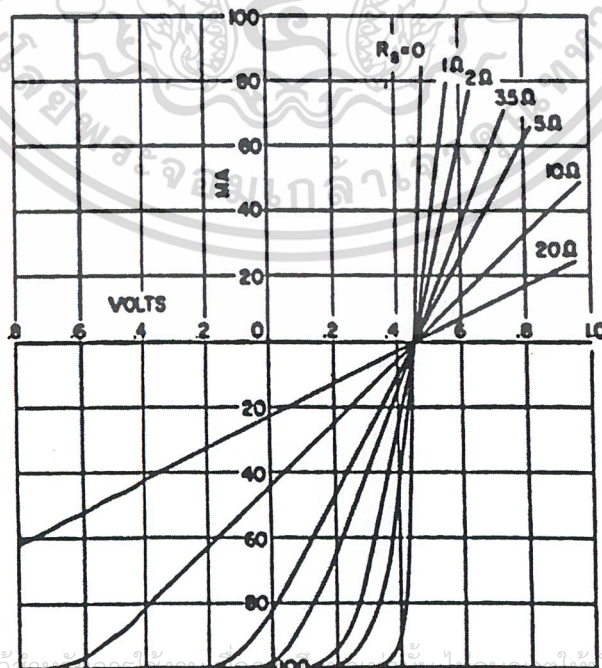
$$I_R = I_p - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

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

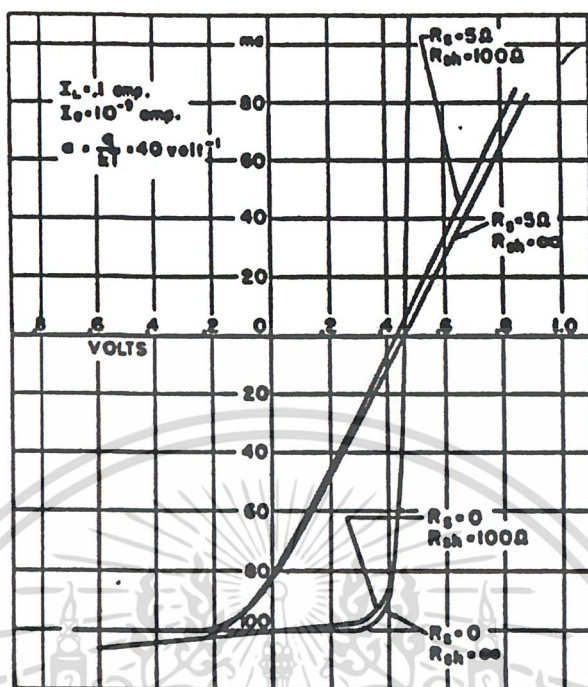
$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ (V)} = V_0 + I_R R_s$$

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

จากสมการที่ 2.22 สามารถนำไปเขียนกราฟ เพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2.19 จากรูปจะเห็นได้ว่า เซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อย และความชันของกราฟก็ลดลงด้วย เป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรหาทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

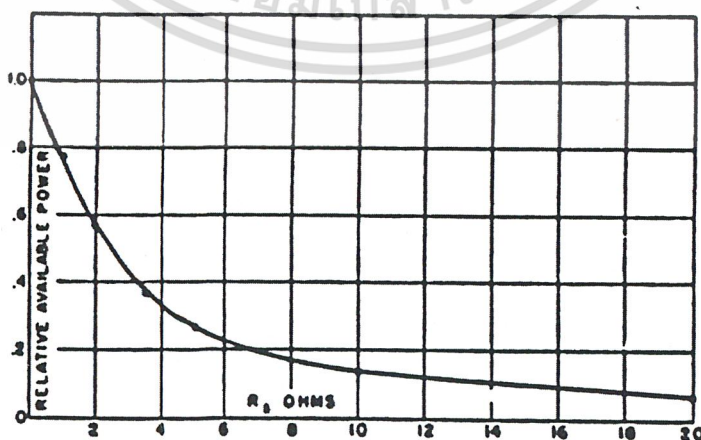


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในชั้นเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿来ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 2.21 นี้ ผลิตของ ความต้านทานอนุกรมของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

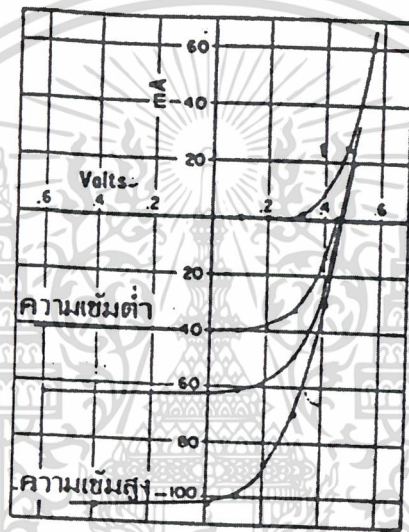


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควรไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.23 การลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

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



รูปที่ 2.24 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริง ๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแส และแรงดันที่ได้จากเซลล์ด้วย เมื่อพิจารณาสมการของกระแส I_R ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L

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

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

2.9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_j

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เมื่อพิจารณาจากของ I_j ในสมการที่ 2.11 ซึ่ง I_j มีค่าดังนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า I_0 จะมีผลต่อกระแส I_j มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_0 โดยพิจารณาจากสมการของ I_0 ดังนั้น

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

จากสมการของ I_0 จะพบว่า n_i^2 ของซิลิคอนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

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

จากสมการจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 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

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

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

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

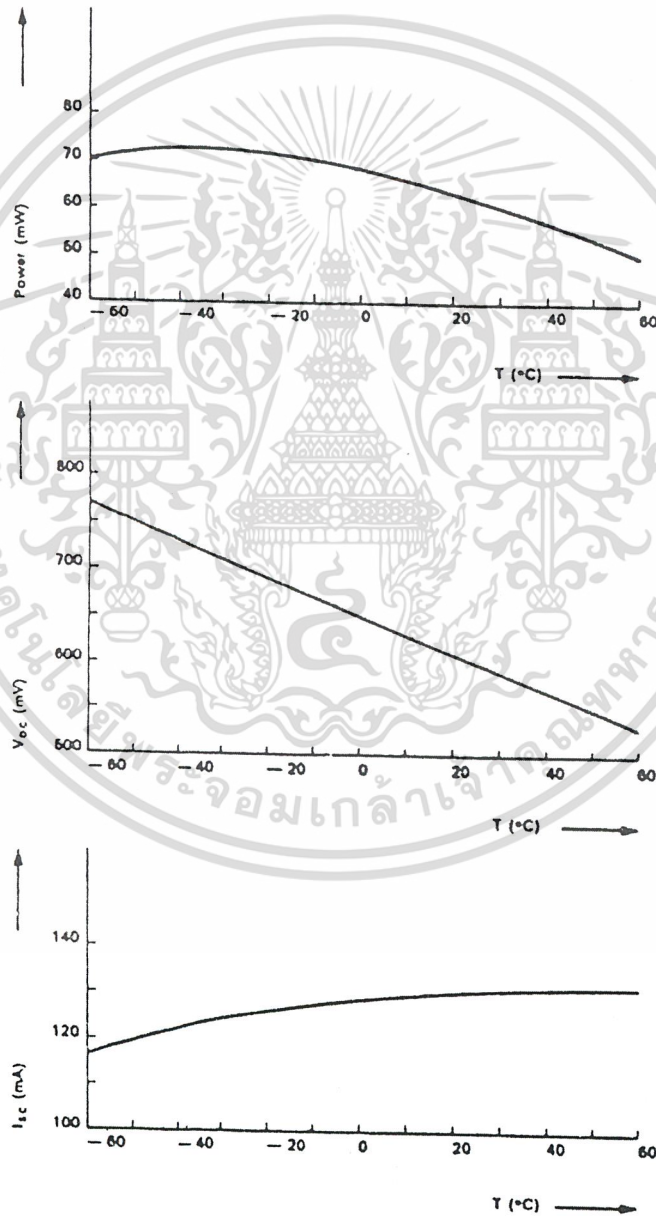
2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (V_{oc}) ตามสมการที่ 2.16

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลของงานวิจัยของเขาสู่บุคคลที่สามที่มีการนำไปใช้

2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น เนื่องจากแสงที่ส่องมากระทบผิวหน้าเซลล์จะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเอาไว้เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และมีส่วนสะท้อนไปจากผิวหน้าของเซลล์ แสงส่วนที่สะท้อนออกไปจากผิวหน้านี้เองที่สูญเสียไปโดยไม่เกิดประโยชน์ เพื่อที่จะนำแสงส่วนนี้มาใช้ประโยชน์อีก จึงควรมีชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของเซลล์ ชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ยอมให้แสงผ่านเข้าไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้ เมื่อแสงสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเซลล์ ชั้นลดการสะท้อนแสงจะทำให้แสงบางส่วนสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์อีก ช่วยให้เซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จึงทำให้เซลล์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย ชั้นลดการสะท้อนแสงจะช่วยให้แสงสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้มากขึ้นเพียงใด จะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเห และความหนาของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 การสะท้อนของแสงในตัวกลางต่างชนิดกัน

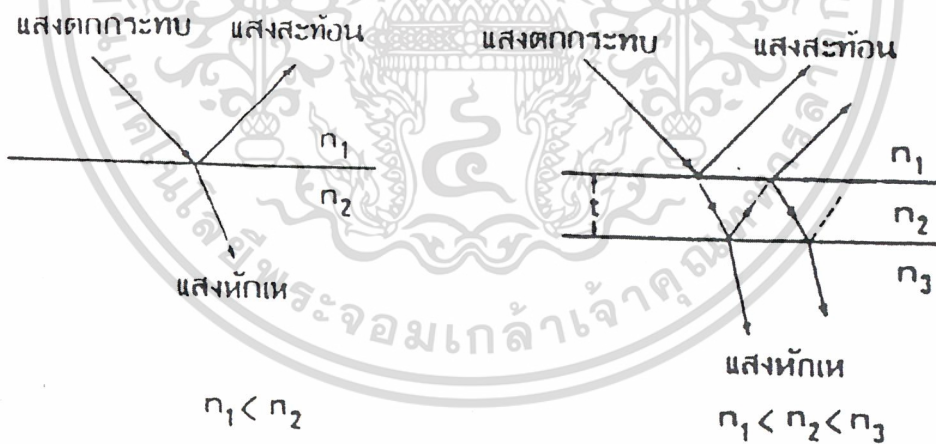
เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 2 ชนิด จะมีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับและส่วนหนึ่งหักเหผ่านตัวกลาง สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ (Coefficient of reflection: ρ) หาได้ดังนี้

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

โดยที่ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 2 ชนิด

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

ถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 3 ชนิด ที่มีดัชนีหักเหแสงเป็น n_1, n_2 และ n_3 ตามลำดับ ถ้า $n_1 < n_2 < n_3$ แสงส่วนใหญ่จะหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 2 และ 3 แสงส่วนที่สะท้อนออกจากผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 เมื่อมาถึงผิวหน้าของตัวกลางที่ 2 แสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับลงมายังผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 อีก และแสงส่วนน้อยหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ดังรูปที่ 2.27 การสะท้อนกลับนี้เอง ที่ทำให้ผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.27 การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยี และการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

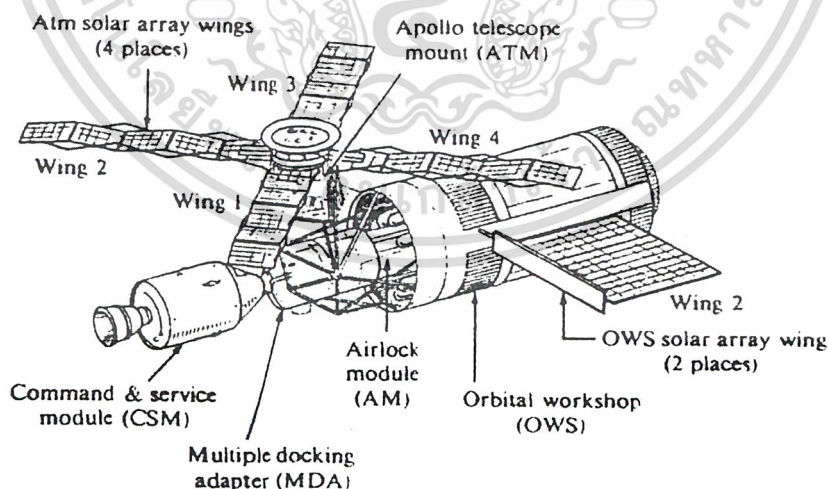
Silicon Solar Cell Technology and Fabrication

บทนำ

ตั้งแต่ปีค.ศ.1953 เป็นต้นมา ก็ได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับยานอวกาศ หรือดาวเทียมต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.1 จนกระทั่งถึงปีค.ศ.1973 หลายบริษัทได้ให้ความสนใจที่จะนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลก จึงได้มีการพัฒนาการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดราคาในการผลิตลง ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ในอนาคต

เทคโนโลยีของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

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



รูปที่ 3.1 ภาพสเกตดาวเทียม skylab ที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

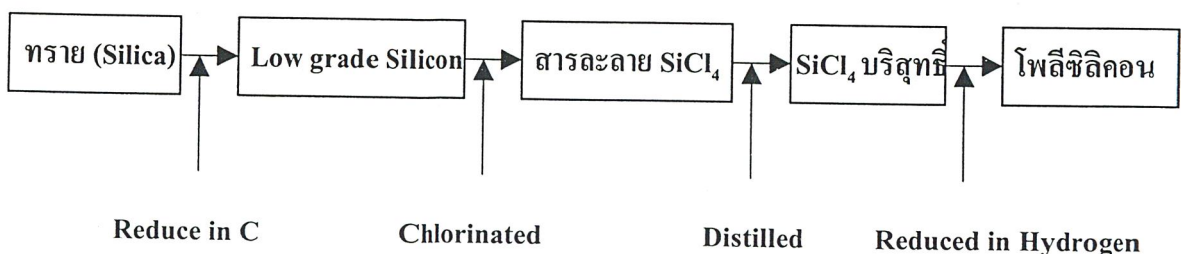
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

3.1.1 การเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์

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

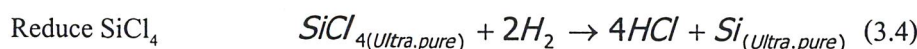
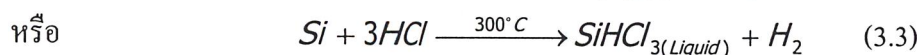
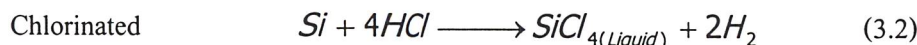
ขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ก็คือ การสกัดทรายให้ได้แร่ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด กระบวนการแยกแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ ทำได้โดยการเผาซิลิกาพร้อมกับคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงในเตาไฟฟ้า ทรายคาร์บอนจะทำหน้าที่ดึงออกซิเจนออกจากซิลิกา จึงทำให้ได้แร่ซิลิคอน แต่ยังไม่บริสุทธิ์ ซึ่งเรียกว่า “Low grade silicon” หรือบางครั้งก็เรียกว่า “เฟอโรซิลิคอน” (Ferro silicon) กระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า “Reduce SiO_2 ” ดังแสดงในสมการที่ 3.1 จากนั้นจึงนำเอา Low grade silicon ไปทำการ “คลอรีเนต” (Chlorinated) โดยรวมกับคลอรีน ในทางปฏิบัตินิยมใช้กรดเกลือ (HCl) เพื่อเป็นตัวทำละลายซิลิคอน จะทำให้ได้สารละลายซิลิคอนเตตระคลอไรด์ (SiCl_4) หรือ ไตรคลอโรไฮเดรน (SiHCl_3) ดังแสดงในสมการที่ 3.2 หรือสมการที่ 3.3 ซึ่งในสารละลายนี้จะมีเพียงซิลิคอนเท่านั้นที่ละลายรวมกับคลอรีน สารปะปนอื่นๆ จะตกตะกอน และแยกตัวออกไป เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (Ultra pure) จึงมีการกลั่นสารละลายนี้อีกครั้งหนึ่ง จากนั้นจึงนำไปทำการแยกแร่ซิลิคอนออกจากสารละลาย ซึ่งอาจทำได้โดยการทำให้ร้อนจัดในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 3.4 จากปฏิกิริยานี้ในที่สุดจะได้แร่ซิลิคอนที่บริสุทธิ์สูง แต่จะอยู่ในรูปของผลึกโพลีคริสตอล หรือ โพลีซิลิคอน (Poly Silicon) ขั้นตอนต่างๆ ของการเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการเตรียมแร่ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเคมีของการเตรียมแร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่ขั้นตอนต่างๆ อาจสรุปได้ดังนี้



3.1.2 การปลูกผลึกรูปเดี่ยว

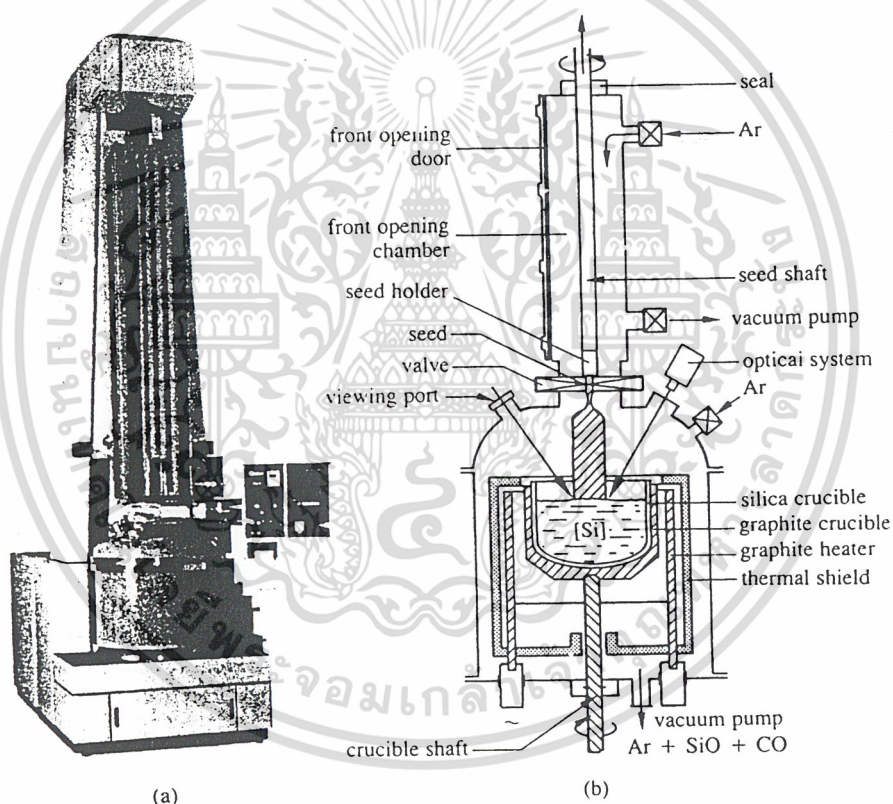
แร่ซิลิคอนบริสุทธิ์ที่เตรียมได้ มักจะถูกนำไปหลอมละลาย และทำให้เป็นแท่งทรงกระบอก ซึ่งแท่งผลึกนี้จะมีคุณสมบัติเป็นผลึกหลายรูปหรือโพลีคริสตัล ก่อนที่จะนำไปใช้สร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จะต้องนำไปทำให้เป็นผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ ซึ่งกระบวนการที่ทำให้ได้ผลึกรูปเดี่ยว ถูกเรียกว่า “การปลูกผลึก (Crystal growth)” ที่ใช้คำว่าปลูกผลึก ก็เนื่องจาก คล้ายกับการปลูกต้นไม้ เมื่อเราจะปลูกต้นไม้ อะไร ก็ต้องใช้เมล็ดของต้นนั้นมาปลูก จึงจะได้ต้นไม้อายุยืนยาวนั้น การปลูกผลึกก็เช่นกัน จำเป็นต้องใช้ชิ้นผลึกชิ้นเล็กๆ เป็นส่วนเริ่มต้นเพื่อการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ และเราเรียกชิ้นผลึกนี้ว่า “เมล็ดผลึก (Crystal seed)” ผลึกที่ได้จะมีคุณลักษณะเหมือนกับเมล็ดผลึกทุกประการ การปลูกผลึกรูปเดี่ยวสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมกันได้แก่ วิธีโซคราสกี (Czochralski), วิธีโซนรีไฟนิ่ง (Zone refining) และวิธีฟลอยด์ติงโซน (Floating zone) โดยในที่นี้เราจะพูดถึงวิธีการที่นิยมทำกันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถปลูกผลึกได้ขนาดใหญ่ ซึ่งนั่นคือ วิธีโซคราสกี (Czochralski) และวิธีโซนรีไฟนิ่ง (Zone refining)

3.1.2.1 วิธีโซคราสกี (Czochralski)

วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า “วิธีดึง” (Pulling method) โดยลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ แสดงดังในรูปที่ 3.3 เริ่มจากการนำเอาแร่บริสุทธิ์ที่สกัดได้ มาใส่ลงในเบ้าหลอมที่อยู่ในเตาชนิดพิเศษ เพื่อหลอมให้เป็นของเหลว เช่น ซิลิคอนมีจุดหลอมเหลวที่ $1,420^\circ\text{C}$ เบ้าหลอมมักเป็นซิลิกา หรือที่เรียกว่าควอตซ์ ภายในเตานี้ถูกควบคุมให้เป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือก๊าซฮีเลียม (He) เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ของซิลิคอน นอกจากนี้แล้ว ต้องควบคุมไม่ให้มีสิ่งแปลกปลอมหรือสารเจือปนอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง ระบบกำเนิดความร้อนของเตามักเป็นขดลวด เหนี่ยวนำความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Induction Heating Coil) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเบ้าหลอม ซิลิกาถูกทำให้ร้อน $1,420^\circ\text{C}$ แร่ซิลิคอนจะหลอมเป็นของเหลว จากนั้นการปลูกผลึกก็เริ่มขึ้นด้วยการหย่อนเมล็ดผลึกให้ปลายด้านหนึ่งแตะกับผิวหน้าของสารละลาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

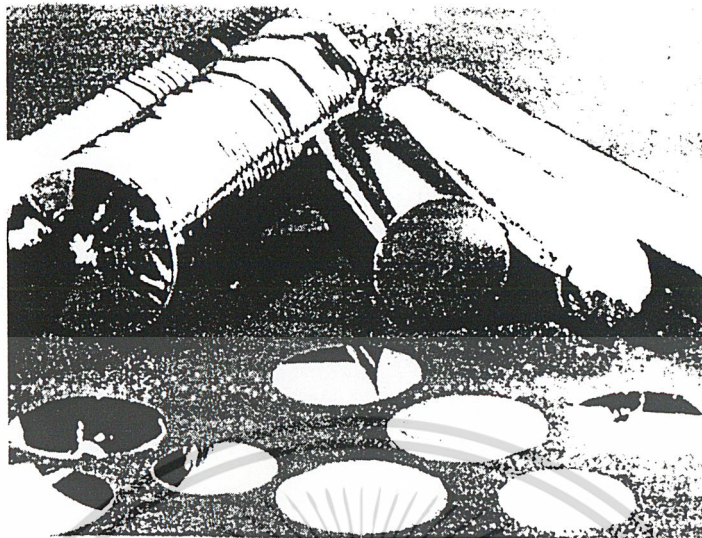
ปลายของเมล็ดผลึกด้านนี้จะหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับของเหลวในเบ้าหลอม เมล็ดผลึกจะถูกดึงขึ้นอย่างช้าๆ และในเวลาเดียวกันจะหมุนรอบตัวเองไปด้วย ของเหลวในเบ้าหลอมจะติดกับเมล็ดผลึกขึ้นมา และเย็นตัวลงมีสภาพกลายเป็นผลึกที่มีระนาบเหมือนกับเมล็ดผลึก ขณะที่เมล็ดผลึกถูกดึงขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง ของเหลวซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำก็จะถูกดึงขึ้นมาอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน ทำให้ได้แท่งผลึกรูปทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยมีขนาดต่างๆ กัน ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการหมุน และอัตราการดึงเมล็ดผลึก รวมทั้งขนาดของเมล็ดผลึกด้วย และตามปกติจะมีการเติมสารเจืออย่างใดอย่างหนึ่งลงไป ปัจจุบันสามารถปลูกผลึกที่มีขนาดใหญ่มาก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นิ้ว และขนาดของแท่งผลึกยาวประมาณ 1 เมตร



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนโดยวิธีโซคราสกี

ในกระบวนการสร้างแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำนี้ เป็นกระบวนการที่ยุ่ยากซับซ้อน และมีต้นทุนการผลิตที่สูงมาก เหมาะสำหรับทำในรูปแบบอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ดังนั้นกระบวนการนี้จึงมิได้ทำขึ้นเองในสถาบัน แต่เป็นการจัดซื้อมาจากโรงงานอุตสาหกรรมแทน

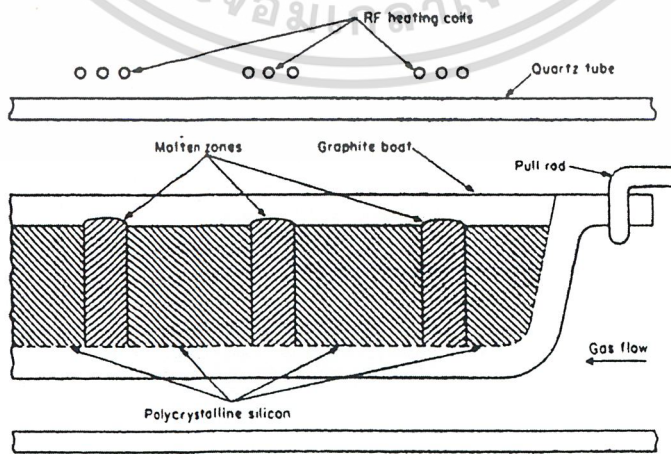
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน

3.1.2.2 วิธีโซนรีไฟนิ่ง (Zone refining)

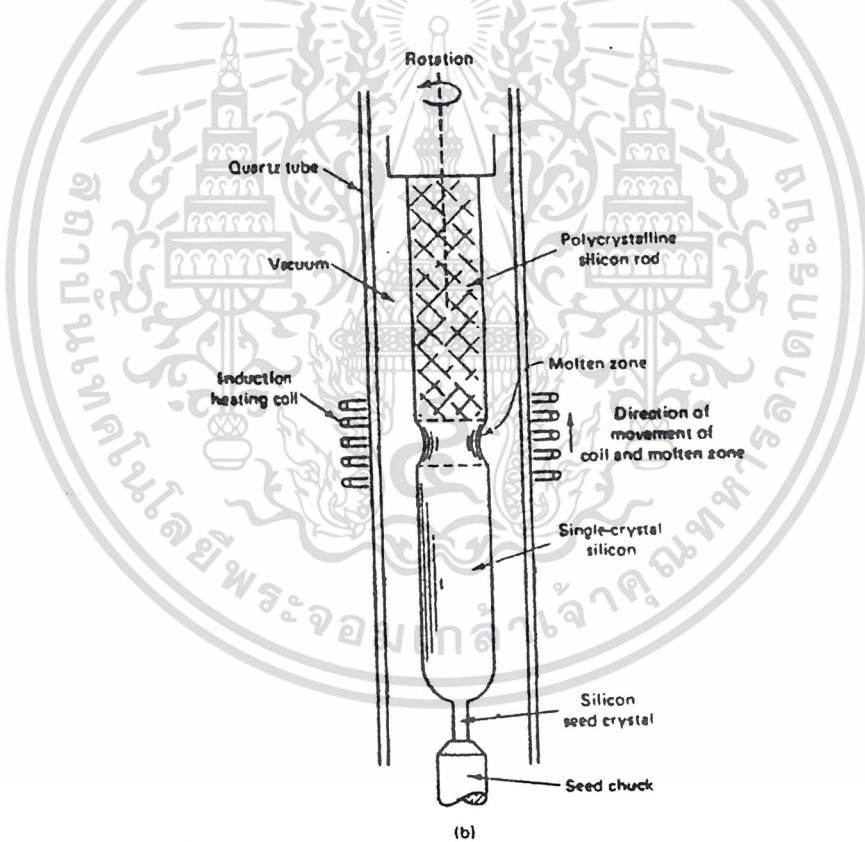
เป็นวิธีการสร้างผลึกรูปเดี่ยว โดยมีอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.5 หลักการของวิธีโซนรีไฟนิ่งก็คือ การทำให้แท่งผลึกหลายรูปของสารกึ่งตัวนำ ถูกหลอมละลายเป็นของเหลวเฉพาะในบางส่วน โดยส่วนที่ถูกความร้อนจะหลอมเป็นของเหลว และจะยังสามารถอยู่ได้ระหว่างส่วนสองส่วนซึ่งเป็นของแข็ง เมื่อเลื่อนตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำหรือเลื่อนแท่งผลึกหลายรูป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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีโซนรีไฟนิ่ง

วิธีโซนรีฟนิ่งค์ ใช้สำหรับในกรณีที่ต้องการผลึกรูปเดี่ยวที่มีความบริสุทธิ์มาก หรือเมื่อต้องการที่จะได้ปดด้วยสารเจือก็สามารทำได้เช่นกัน ทั้งนี้โดยการจัดให้แท่งผลึกหลายรูปที่เติมสารเจือชนิดพี หรือชนิดอื่นลงไปในแก้ว ในที่สุดจะได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวที่ถูกเจือด้วยสารเจือ เรียกวิธีการนี้ว่า โฟลทโซน (Float Zone) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 แต่วิธีการดังกล่าวนี้มีข้อจำกัด ก็คือ ขนาดของแท่งผลึกที่สร้างได้จะมีขนาดไม่ใหญ่นัก คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่กี่เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากแรงตึงผิวมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้แท่งผลึกทรงตัวอยู่ได้

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

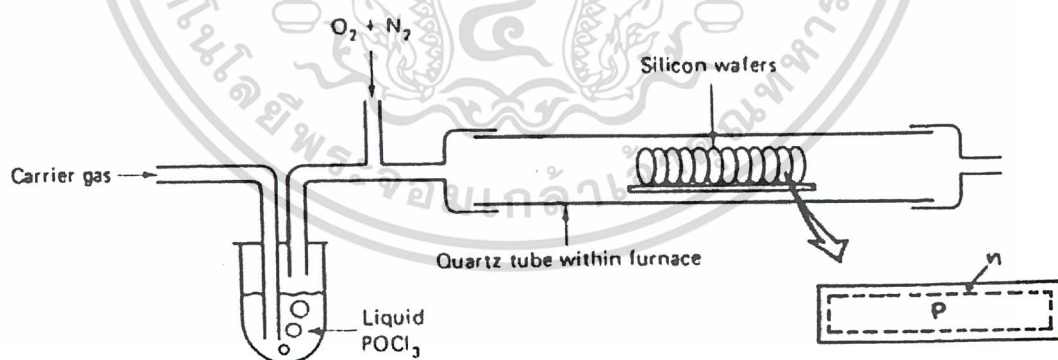


รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธีโฟลทโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การแพร่สารเจือ

การแพร่สารเจือ เป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยรอยต่อพี-เอ็นนี้จะอยู่ลึกจากผิวหน้าลงไปประมาณ 0.1-0.5 ไมครอน การแพร่สารเจือส่วนมากจะใช้การแพร่ซึมฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูงราว 800-1000°C ลงในฐานรองชนิดพีที่มีโบรอนแพร่ซึมอยู่ก่อนแล้วทั่วทั้งแผ่นผลึกตั้งแต่กระบวนการปลูกผลึก วิธีการแพร่ซึมฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะใช้ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ (POCl_3) เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ (Impurities source) ดังรูปที่ 3.7 เนื่องจากฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์มีลักษณะเป็นของเหลวระเหยง่าย จึงต้องนำไปใส่ไว้ในหม้อแก้ว (Bubble) ที่มีการชิลอย่างดี จากนั้นจึงใช้ก๊าซเฉื่อยพวกไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหย POCl_3 พร้อมกับป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าไปในการแพร่สารที่มีแผ่นซิลิคอนวางอยู่ที่อุณหภูมิสูงราว 800-1000°C จะเกิดขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์ต่างๆ ปกคลุมทั่วทั้งแผ่นผลึก พร้อมกันนั้นฟอสฟอรัสก็จะแพร่ซึมผ่านชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงไปในซิลิคอน การแพร่ซึมใช้เวลาราว 20 นาที ก็จะได้ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นบางๆ หนาราว 0.1-0.3 ไมครอน จากนั้นใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กัดชั้นออกไซด์ออกทั้งหมด ก็จะได้แผ่นซิลิคอนที่มีรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้นทั้งด้านหน้า และด้านหลัง ซึ่งรอยต่อที่ด้านหลังนี้จะถูกกำจัดให้หมดไปโดยการเคลือบอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นสารเจือปนชนิดพี ด้วยกระบวนการระเหยสารในสุญญากาศ แล้วจึงนำไปทำการแพร่ซึมอะลูมิเนียมให้ทะลุผ่านชั้นฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 700-800°C เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้ P^+ บางๆ เกิดขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นเซลล์



รูปที่ 3.7 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ

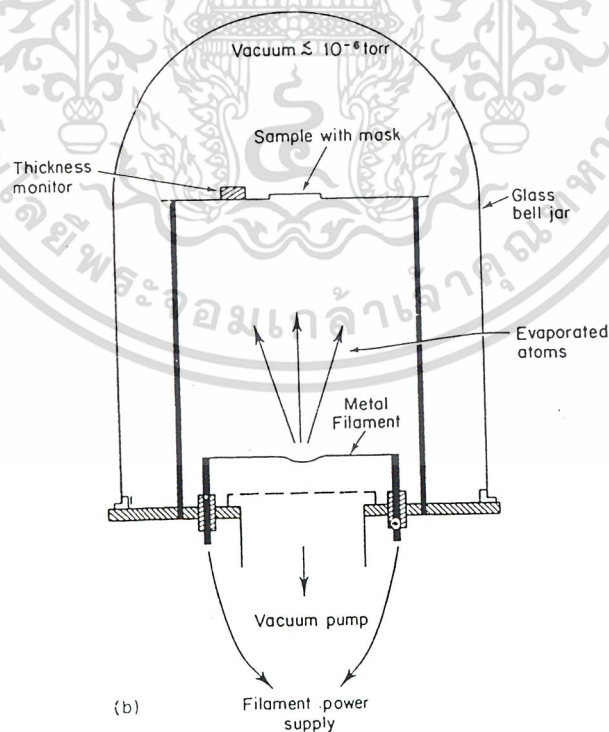
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสร้างรอยสัมผัสโหม้มิค

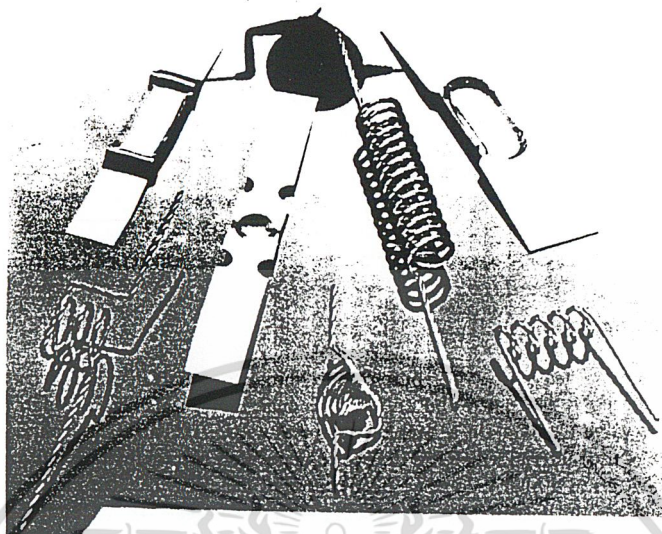
เป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับต่อสายเพื่อนำไปใช้งาน โลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องบัดกรีได้ เพื่อความสะดวกในการต่อเซลล์หลายๆ เซลล์เข้าด้วยกัน โลหะที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ เงิน, นิกเกิล, ทองแดง, ไททาเนียม ฯลฯ

การสร้างขั้วไฟฟ้าจะใช้วิธีระเหยสารในสุญญากาศ ที่เรียกว่า Evaporation ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ขั้วไฟฟ้าที่สร้างด้วยวิธีนี้จะประกอบด้วยขั้วโลหะ 3 ชั้น จากชั้นในสุด คือ เงิน, พาราเดียม และไททาเนียมจะอยู่ชั้นนอกสุด โลหะทั้ง 3 ชนิด แต่ละชนิดจะถูกทำให้ระเหยในสุญญากาศ ผ่านช่องโฟโตมาสก์ ซึ่งทำเป็นลวดลายตาข่าย (grid pattern) ไปเกาะติดอยู่ที่ผิวของซิลิคอนตามลำดับ ส่วนด้านหลังจะติดที่ทั้งหมด จากนั้นจึงนำไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500-600°C เป็นเวลา 5-30 นาที เพื่อให้โลหะติดแน่นกับซิลิคอน และทำให้ความต้านทานที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าลดลง

หลังจากสร้างขั้วโลหะแล้วจะใช้กระบวนการ Evaporation ระเหยสารพวกออกไซด์ไปเคลือบลงบนผิวหน้าของเซลล์ซึ่งโลหะที่ใช้แสดงในรูปที่ 3.9 หรืออาจจะใช้กระบวนการสร้างออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapour Deposition) สร้างชั้นออกไซด์บางๆ ของ SiO_2 , SiO_2 , TiO_2 หรือ Ta_2O_5 ลงบนผิวหน้าของเซลล์ เพื่อใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และชั้นป้องกันผิวหน้า ซึ่งจะทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.8 การระเหยโลหะในสุญญากาศ เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

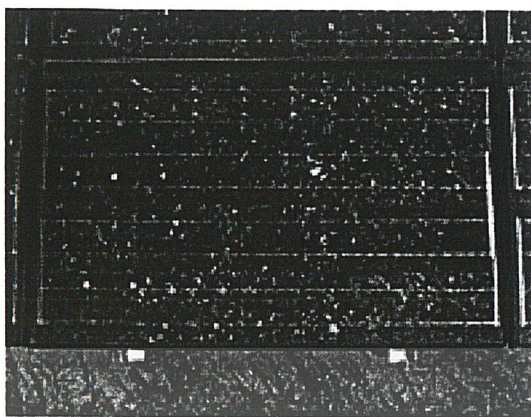


รูปที่ 3.9 ประเภทของเส้นลวดนำไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยโลหะในสุญญากาศ

เนื่องจากการสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี Evaporation นั้นทำให้ราคาในการผลิตเซลล์สูงมาก เซลล์ที่สร้างด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในงานทางด้านอวกาศ ซึ่งต้องการความทนทาน และมีความไว้วางใจที่สูงกว่าเซลล์ที่ใช้บนพื้นโลก เมื่อมีการพัฒนากระบวนการผลิต เพื่อลดต้นทุนในการผลิตลง การสร้างขั้วไฟฟ้าจึงได้เปลี่ยนมาใช้วิธีการซิลสกรีนโลหะและการชุบด้วยไฟฟ้าแทน

การซิลสกรีนด้วยโลหะจะใช้โลหะเหลวพวกเงิน หรือนิกเกิล สกรีนผ่านด้นแบบลวดลายลงบนแผ่นซิลิคอน ส่วนด้านหลังจะสกรีนที่บัพทั้งหมดแล้วจึงนำไปทำการแอนนีสล เพื่อให้โลหะติดแน่นเป็นเนื้อเดียวกับซิลิคอน หลังจากการแอนนีสลแล้ว บางบริษัทจะนำเซลล์ไปทำการชุบตะกั่วเพื่อให้ขั้วไฟฟ้ามีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และไม่เกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย วิธีการชุบตะกั่ว หรือจะเรียกว่า ออบตะกั่ว ก็คงได้โดยจะเริ่มจากการนำเซลล์ที่ผ่านการแอนนีสลแล้ว ไปจุ่มลงในอ่างตะกั่วที่มีตะกั่วหลอมเหลวอยู่ ตะกั่วจะเกาะติดเฉพาะส่วนที่เป็นลวดลายโลหะทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เซลล์ที่ผ่านการชุบตะกั่วมาแล้วจะช่วยให้การต่อเซลล์เข้าด้วยกันสะดวกยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แผ่นผลึกแบบ Polycrystal ที่ผ่านการต่อสายแล้ว
ในระบบ โรงงานอุตสาหกรรม

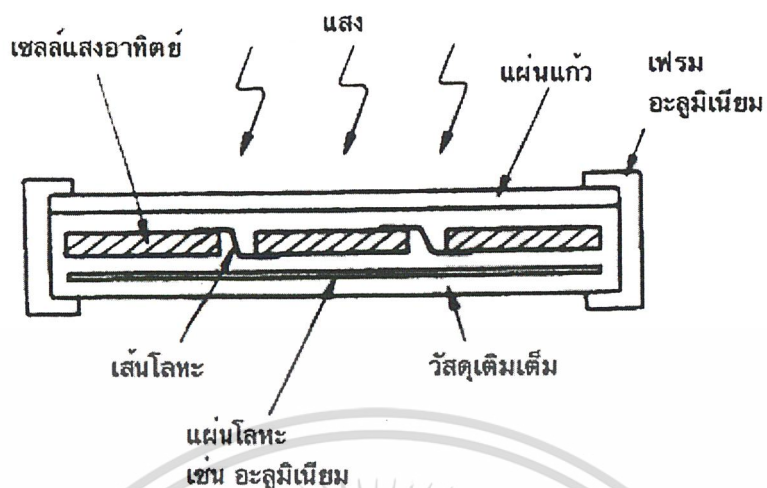
3.4 การประกอบเป็นแผงเซลล์

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

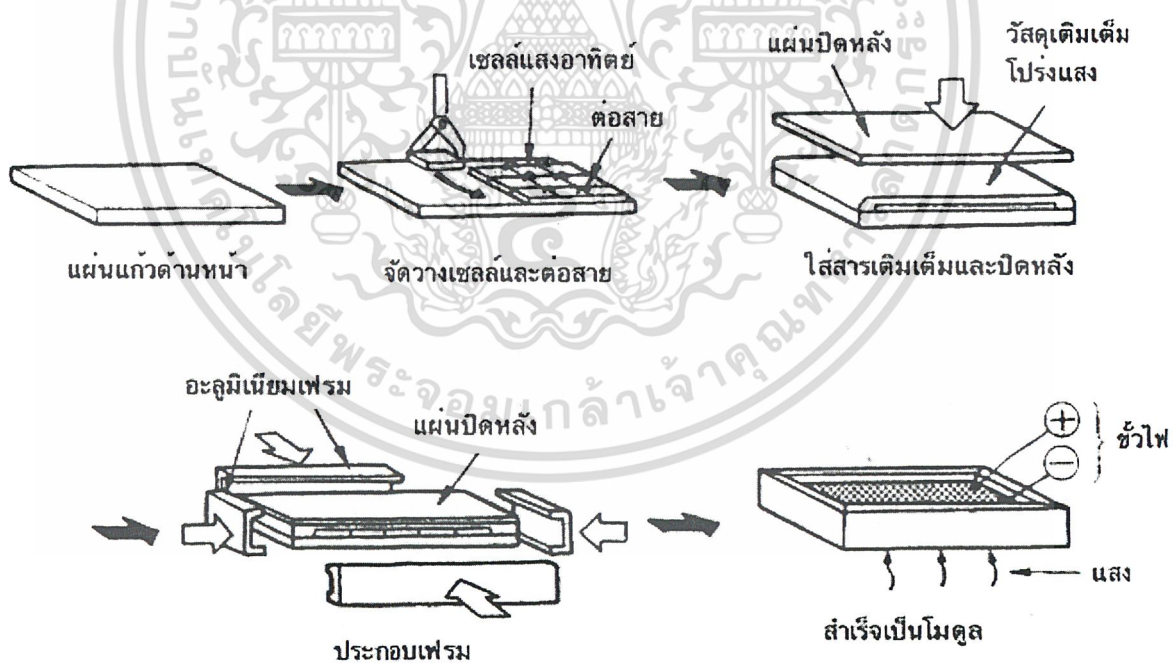
การต่อเซลล์แต่ละเซลล์เข้าด้วยกันในแบบอนุกรม จะใช้แผ่นฟอยล์ของโลหะบางๆ เป็นตัวเชื่อม เพื่อให้มีการยึดหยุ่นได้บ้างเล็กน้อย หลังจากนั้นเซลล์เหล่านี้จะถูกนำไปวางบนแผ่นฉนวนฐานรอง ซึ่งอาจจะทำมาจากแก้ว หรืออีพ็อกซีก็ได้ แล้วจึงใช้แผ่นกระจกใสปิดผิวหน้าด้านบนอีกครั้ง ระหว่างกระจกใสด้านหน้า และแผ่นฐานรอง จะใส่สารพวกซิลิโคนซึ่งเป็นสารที่แสงผ่านได้ดี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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของโมดูลชนิดหนึ่ง

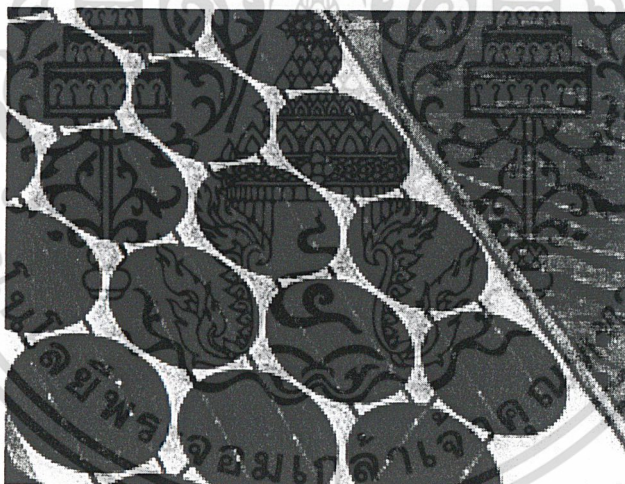


รูปที่ 3.12 การประกอบเซลล์เป็น โมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 เป็นโมดูลที่แพร่หลายในปัจจุบัน เรียกว่าแบบ super strate โดยรูปที่ 3.12 แสดงขั้นตอนการสร้าง ด้านที่รับแสงจะใช้วัสดุโปร่งใส เช่น แผ่นแก้ว ซึ่งจะเป็นตัวโครงสร้างทางกลของโมดูลด้วย เมื่อจัดวางเซลล์ทางไฟฟ้าแล้ว ก็จะอัดที่ว่างด้วยวัสดุเติมเต็ม โปร่งใส เช่น PVB (polyvinyl butyrol) หรือ EVA (ethylene vinyl acetate) จากนั้นก็จะปิดด้านหลัง และหุ้มโมดูล ทั้งหมดด้วยเฟรมอะลูมิเนียม ประสิทธิภาพของโมดูลที่มีขายในท้องตลาดปัจจุบัน ที่มีขนาดประมาณ 40cm x 120cm คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนผลึกเดี่ยว 10-14% แบบโพลีซิลิคอน 8-12% และแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน 6-9 %

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบผลึกรูปเดี่ยวนี้ จะมีต้นทุนในการผลิตสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพของเซลล์สูงตามไปด้วย จึงเป็นที่เชื่อได้ว่าเทคโนโลยีในการสร้างเซลล์แบบผลึกรูปเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะยังคงมีใช้กันอยู่อีกนาน และยังคงใช้เวลาอีกมาก เพื่อพัฒนาหาทางนำเซลล์แบบอื่นมาใช้ และระยะเวลาในการใช้งานจะต้องไม่ต่ำกว่า 25 ปีด้วย ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เซลล์แบบผลึกรูปเดี่ยวสามารถใช้ได้



รูปที่ 3.13 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว

3.5 การปรับปรุงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

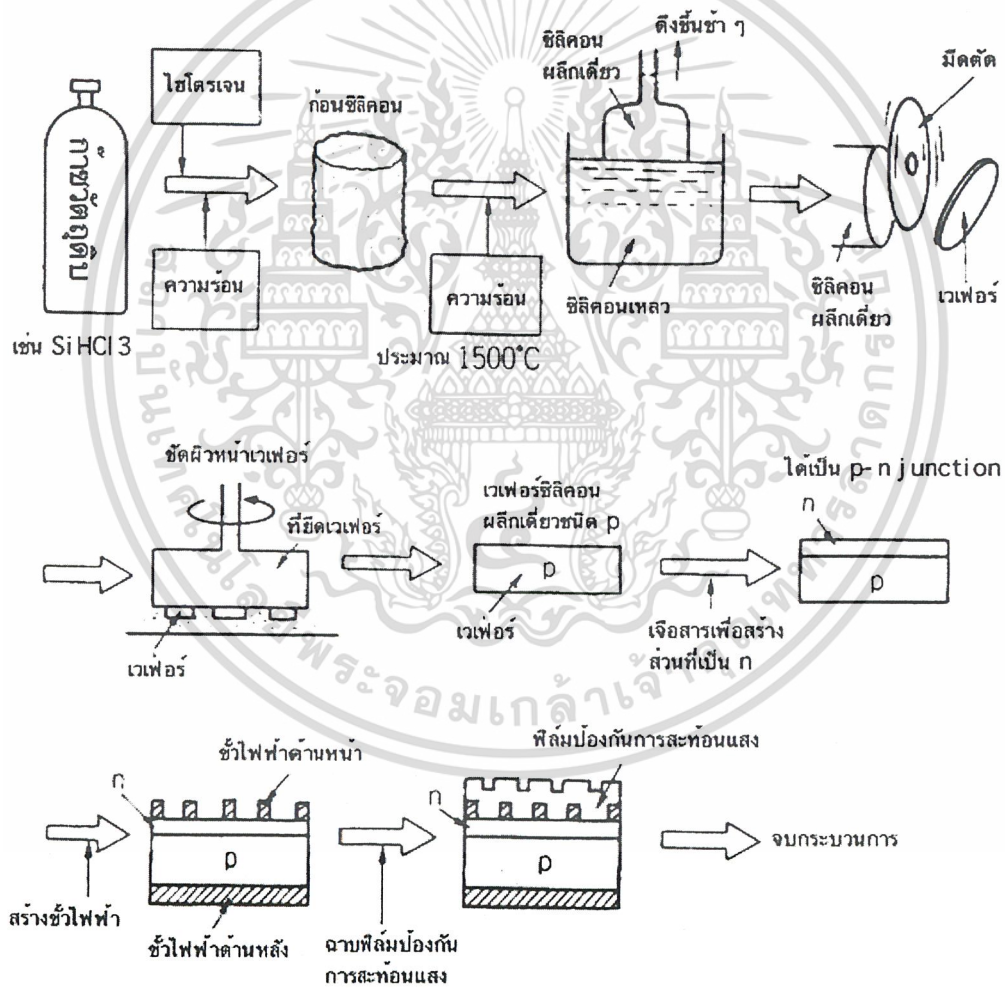
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบ่งได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ คือ แบบผลึก และแบบอะมอร์ฟัส ซึ่งการสร้างของแต่ละชนิดจะต่างกัน

3.5.1 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว

ขออธิบายจากกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว เริ่มจากการนำเอาซิลิคอน ซึ่งผ่านการแยกสารนี้เป็นเอกลักษณ์สูงจนบริสุทธิ์สูงมาก (99.999%) ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศา

เซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว) จากต้นผลึก (seed crystal) ด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึก คุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

ต่อไปก็จะนำแท่งผลึกเดี่ยวนี้ไปตัดเป็นแผ่นๆ เรียกว่า เวเฟอร์ หนาประมาณ 300 ไมโครเมตร และขัดความเรียบของผิว จากนั้นก็จะนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น p-n junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการ diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ก็จะเป็นขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า เพื่อนำกระแสไฟออกใช้ และขั้นสุดท้ายก็จะเป็นการเคลือบฟิล์มผิวหน้า เพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อยที่สุด รูปที่ 3.14 เป็นตัวอย่างของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว



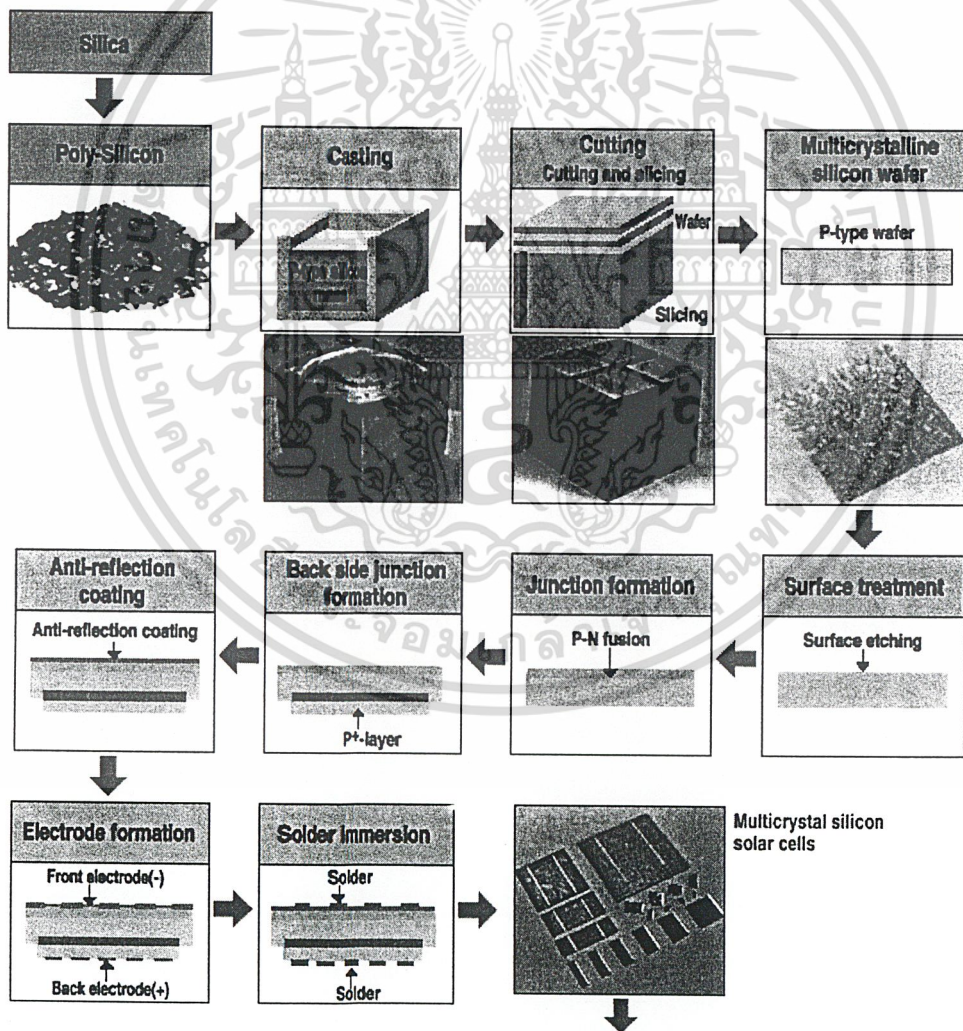
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่าการสร้างแผ่นผลึกด้วยวิธีของ โซคราลสกี เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ราคาค้นทุนในการผลิตเซลล์สูงกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ยังไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นผลึกที่มีคุณภาพสูงเช่นนี้ จึงได้มีการนำเอาผลึกแบบ Polycrystal หรือที่เรียกว่า ผลึกหลายรูป มาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถสร้างได้ มีประสิทธิภาพสูงสุดถึง 17% แต่เมื่อนำไปสร้างในระบบอุตสาหกรรมจะมีประสิทธิภาพราว 12%

3.5.2 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกโพลี

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาด้านทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยว ซิลิคอน แบบผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอน ก็คือ ก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ (ขนาดระดับ ไมโครเมตร-มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน รูปที่ 3.15 แสดงขั้นตอนการผลิตของ โพลีซิลิคอน



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของ โพลีซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านบนของรูปแสดงการผลิตแบบ cast โดยจะเทซิลิคอนที่หลอมละลายเข้าไปใน crucible แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ ซึ่งก็จะได้ก้อน ingot ของโพลีซิลิคอนที่มีรูปร่างตาม crucible ที่ใช้

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

ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แบบ Polycrystal ก็คือ รูปร่างของแผ่นเซลล์ซึ่งสามารถทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมได้ ทำให้สามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบแผ่นกลมถึง 25% เนื่องจากมีช่องว่างบนแผงเซลล์น้อยกว่าแบบแผ่นกลมนั่นเอง

3.5.3 ซิลิคอนแบบริบบอน

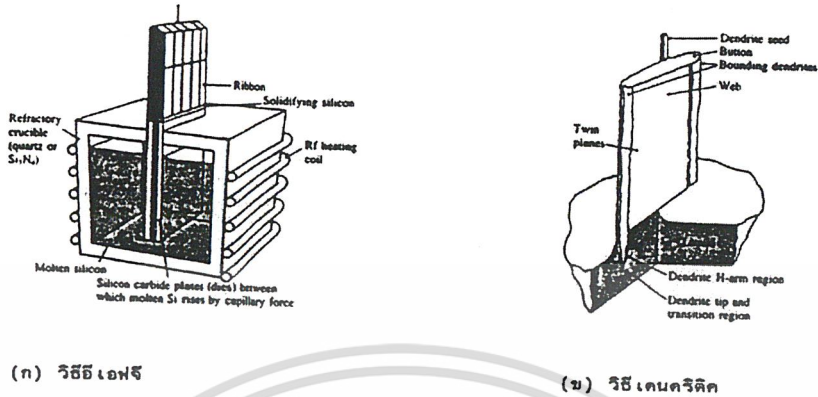
เทคโนโลยีของการสร้างแผ่นผลึกทั้งแบบผลึกรูปเดี่ยวที่เป็นแผ่นกลม และแบบผลึกหลายรูปที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมนั้นยังคงเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองวัสดุอยู่ เนื่องจากต้องมีการตัดแผ่นผลึกทำให้ต้องเสียเนื้อของซิลิคอนไปส่วนหนึ่ง จึงได้มีการปรับปรุงเทคนิคต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแผ่นซิลิคอนให้เป็นแผ่นบาง และยาวที่เรียกว่า ริบบอน (Ribbon) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ทำให้ไม่ต้องเสียเนื้อซิลิคอนในการตัดให้เป็นแผ่นบางๆ เทคนิคในการสร้างแผ่นผลึกแบบริบบอนมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีอีเอฟจี และเคนดริติก

อีเอฟจี (EFG) ย่อมาจาก Edge-defined film-fed growth เป็นวิธีการสร้างแผ่นผลึกที่คล้ายกับวิธีของโซคราลสกี ที่ต้องใช้เมล็ดผลึกไปหล่อ และดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องเล็กๆ บางๆ ที่ทำด้วยแกรไฟต์ เพื่อให้ซิลิคอนจัดเรียงตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมยาวตามที่ต้องการ แผ่นผลึกที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะมี ความหนา 150-300 ไมครอน มีความกว้างตั้งแต่ 5-10 เซนติเมตร ใช้อัตราการดึงราว 5 เซนติเมตร ต่อนาที

ข้อเสียของริบบอนแบบอีเอฟจีนี้ ก็คือ มีโครงสร้างของผลึกที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับวิธีของโซคราลสกี และการที่ซิลิคอนต้องถูกหลอมเหลวอยู่ในเบ้าหลอม แล้วยังต้องมีการดึงผ่านช่องแคบๆ ของแกรไฟต์อีก วิธีการเช่นนี้ทำให้แผ่นผลึกที่ได้มีความไม่สมบูรณ์สูง เนื่องจากสิ่งแปลกปลอม และสารเจือปนต่างๆ จากเบ้าหลอม และแผ่นแกรไฟต์สามารถเข้าไปในเนื้อซิลิคอนได้ง่าย วิธีการที่สามารถจะลดความไม่บริสุทธิ์ของแผ่นผลึกแบบริบบอนได้ก็คือ วิธีการแบบเคนดริติก

การดึงแผ่นผลึกริบบอนแบบเคนดริติก จะใช้เมล็ดผลึกไปหล่อ และดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องที่มีอยู่เฉพาะตรงขอบทั้ง 2 ด้าน เพื่อให้ซิลิคอนจัดเรียงตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมในแบบริบบอน แผ่นผลึกที่สร้างด้วยวิธีนี้จะมีความบริสุทธิ์สูงใกล้เคียงกับวิธีของโซคราลสกี เมื่อนำไปสร้างเซลล์จะได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอีเอฟจี

ราคาจำหน่ายของเซลล์แบบริบบอนยังคงใกล้เคียงกับแบบแผ่นกลม เนื่องจากปริมาณการผลิตยังต่ำอยู่นั่นเอง และเป็นที่คาดหวังกันว่าเซลล์แบบริบบอนนี้ จะสามารถสร้างให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ ทั้งยังสามารถจะลดต้นทุนการผลิตลงได้อีก เมื่อได้มีการปรับปรุงเทคนิคต่างๆ ให้ดีขึ้น



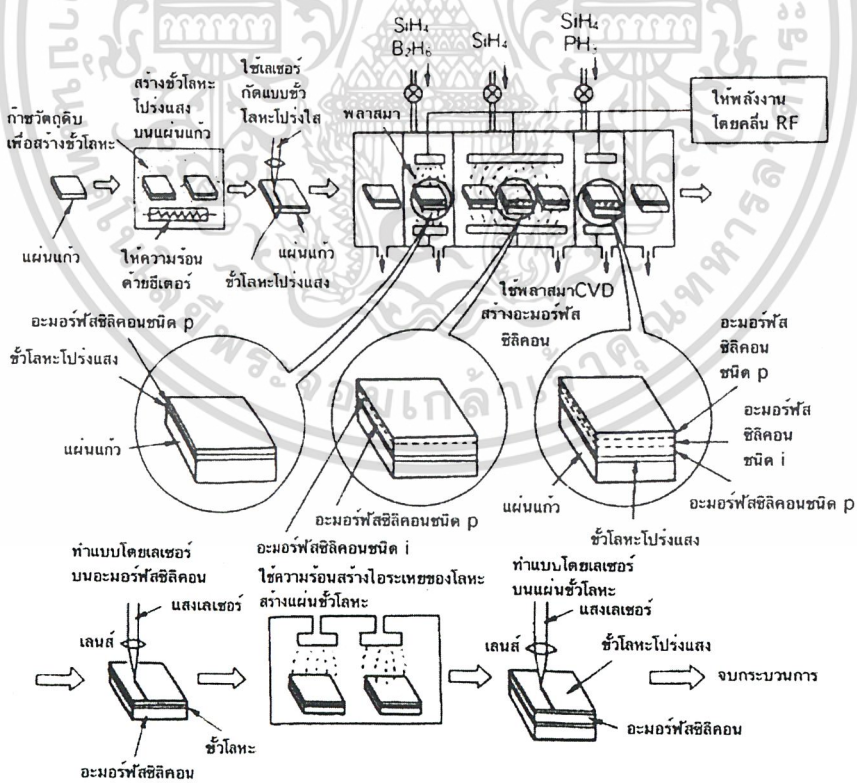
(ก) วิธีซีเอฟซี

(ข) วิธีเคนคริติก

รูปที่ 3.16 การดึงแผ่นซิลิคอนแบบริบบอน

3.5.4 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบอะมอร์ฟัส

เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส มีวิธีการผลิตที่ต่างจากแบบผลึกโดยสิ้นเชิง โดยจะเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางไม่ใช่เวเฟอร์ รูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นขั้นตอนการผลิต

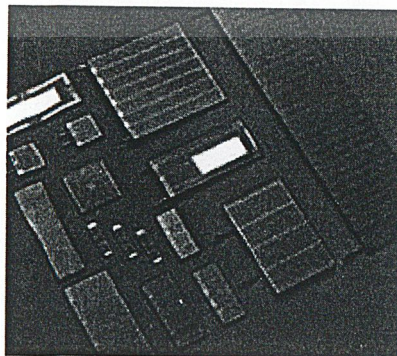


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงรูปที่ 3.17 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนไว้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะสร้างแผ่นฟิล์มบางของซิลิคอนบนแผ่นฐานรอง โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งจะมีระบบนำก๊าซที่มีซิลิคอนติดอยู่ เช่น ก๊าซไซเรน (SiH_4) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศ และตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีการกระตุ้น เช่น โดยใช้พลาสมา เพื่อส่งพลังงานให้ซิลิคอนแยกตัวออกจากก๊าซ เข้าไปจับตัวกันบนแผ่นฐานรอง โดยส่วนใหญ่จะเป็นแก้ว, สเตนเลส หรือพลาสติก ซึ่งได้ทำให้การเคลือบชั้นตัวนำโปร่งแสงไว้อ่อน โดยมีอุณหภูมิบนแผ่นฐานรองประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ซิลิคอนจะทับถมสะสมบนแผ่นเกิดเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในขั้นตอนนี้หากเราใส่ก๊าซที่มี boron เช่น B_2H_6 เข้าไปด้วย เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด p และถ้าหากใส่ก๊าซที่มี phosphate เช่น PH_3 เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด n ซึ่งจะเห็นได้ว่า ด้วยวิธีนี้เราสามารถควบคุมการไหลของก๊าซ เพื่อสร้างให้เกิดชั้นของ pin อะมอร์ฟัสซิลิคอนขึ้นได้อย่างค่อนข้างง่ายตาย หลังจากได้โครงสร้าง pin แล้ว เราก็จะสร้างส่วนของขั้วไฟฟ้าให้เสร็จเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

จุดเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส ก็คือ

1. พลังงานที่จำเป็นในการผลิตน้อยกว่า (แบบผลิตต้องใช้อุณหภูมิสูงระดับ 1000-1500 องศาเซลเซียส ส่วนแบบอะมอร์ฟัสใช้แค่ระดับ 300 องศาเซลเซียส)
 2. ขั้นตอนในการผลิตไม่ซับซ้อน (สร้างฟิล์มไปพร้อมกับการสร้าง pin junction ได้เลย)
 3. เนื่องจากอัตราการดูดแสงของอะมอร์ฟัสซิลิคอนสูงกว่าผลึกมาก จึงสามารถลดความหนาของฟิล์มเป็นระดับ 1 ไมโครเมตรได้ ในขณะที่แบบผลึกต้องทำอย่างน้อยหนาประมาณ 300 ไมโครเมตร ซึ่งทั้งนี้ก็เพื่อความแข็งแรงทางกลของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย นั่นก็คือ อะมอร์ฟัสซิลิคอนสามารถประหยัดปริมาณของซิลิคอนได้มากกว่า
 4. เนื่องจากปฏิกิริยาเป็นแบบก๊าซ จึงสามารถสร้างแผ่นที่มีขนาดพื้นที่ใหญ่ๆ ได้ง่ายกว่า
- จากรูปที่ 3.17 จะเห็นว่า อาจจะใช้เลเซอร์ช่วยในการตัดวงจรเพื่อสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะของวงจรรวมได้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ จากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 3.18 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส

นอกจากนี้เซลล์แบบนี้ยังมีอายุการใช้งานที่สั้นมากราว 1 ปี เมื่อนำไปใช้กับแสงแดด ปัญหาการเสื่อมลงของเซลล์แบบอะมอร์ฟัสนี้ยังเป็นปัญหาหลักที่ยังต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแก้ไขกันต่อไปอีก

ปัจจุบันเซลล์แบบอะมอร์ฟัสขนาดเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ได้มีการผลิตออกมาใช้ร่วมกับนาฬิกา และเครื่องคิดเลขดังแสดงในรูปที่ 3.19 เป็นจำนวนมาก เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ภายในนาฬิกา และเครื่องคิดเลขใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยมาก เซลล์แบบอะมอร์ฟัสซึ่งมีราคาถูก และมีประสิทธิภาพไม่เกิน 5% ก็พอเพียงแล้วสำหรับการใช้งานประเภทนี้



รูปที่ 3.19 เครื่องคิดเลขที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ จะเห็นว่า มีบางประเภท ที่ทำจาก สารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบซึ่งไม่ใช่ซิลิคอน แต่โดยรวมแล้วยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ด้วยเหตุผลทางด้านราคา และความยุ่งยากในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	สารกึ่งตัวนำที่เป็นวัตถุดิบ	ประสิทธิภาพของเซลล์	ประสิทธิภาพของโมดูล
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกเดี่ยว	15-24 %	10-14 %
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกโพลี	10-17 %	9-12 %
ซิลิคอน-อะมอร์ฟัส	Amorphous Silicon Amorphous SiC Amorphous SiGe	8-13 %	6-9 %
สารกึ่งตัวนำ 2 ธาตุ	GaAs/InP CdS/CdTe	18-30 % (GaAs) 10-15 %	NA
สารกึ่งตัวนำ 3 ธาตุ	CdS/CuInSe2	10-15 %	NA

หมายเหตุ NA หมายถึง not applicable or not available

ตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ จะเห็นว่าซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด ตามมาก็คือ ซิลิคอนแบบผลึกโพลี และแบบอะมอร์ฟัส อย่างไรก็ตามแบบโพลี และแบบอะมอร์ฟัสนั้น ยังมีโอกาสที่จะลดต้นทุนการผลิตได้อีกมากกว่าแบบผลึกเดี่ยว ยิ่งไปกว่านั้นแบบอะมอร์ฟัสนั้น ก็ยังมีจุดเด่นอื่นๆที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นไม่มี

ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์อื่นๆ นอกจากตระกูลซิลิคอนแล้วก็มีจุดเด่นจุดด้อยดังตารางที่ 3.2 ซึ่งในปัจจุบัน การใช้งานยังจำกัดอยู่ในการประยุกต์ลักษณะพิเศษ เช่น การใช้งานในอวกาศ ฯลฯ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 จุดเด่น และจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

ตระกูล	ประสิทธิภาพ (%)	พลังงานในการผลิต	ราคา	วัตถุดิบ	ความเชื่อถือ	สิ่งแวดล้อม
ซิลิคอนผลึกเดี่ยว	15-24	Bad	Bad	Good	Very Good	Very Good
โพลีซิลิคอน	10-17	Good	Good	Good	Good	Very Good
อะมอร์ฟัสซิลิคอน	8-13	Very Good	Very Good	Very Good	Good	Very Good
GaAs	18-30	Bad	Very Bad	Bad	Very Good	Bad
CdS/ CdTe	10-15	Good	Good	Bad	Good	Bad
CdS/ CuInSe ₂	10-15	NA	NA	Bad	Good	Bad

หมายเหตุ NA หมายถึง not applicable or not available

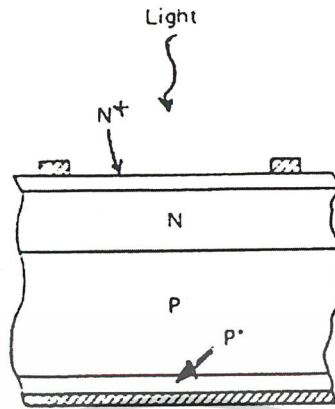
3.6 การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

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

3.6.1 Back Surface Fields (BSF)

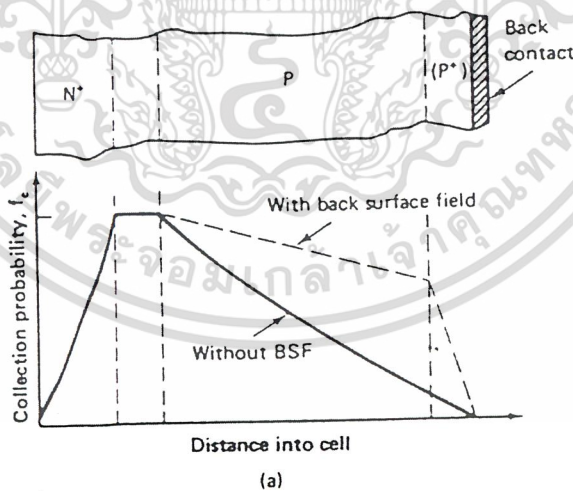
Back surface fields เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีดังกล่าวนี้ในปัจจุบันนี้ได้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมาตรฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงในหลายแห่ง เนื่องจากกระบวนการสร้าง Back surface fields ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้อย่างมากอีกด้วย การทำ Back surface fields (BSF) สามารถทำได้โดยการทำ High dope ชนิดเดียวกันกับฐานรองในบริเวณด้านล่างของแผ่น Substrate ใกล้เคียงกับ Back contact แสดงได้ดังรูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ ด้วยวิธี Back Surface Fileds (BSF)

การทำ Back surface fields (BSF) จะมีผลช่วยเพิ่มกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) เนื่องจากการ Back surface fields (BSF) จะเข้าไปช่วยเพิ่มค่าของ Collection Probability (f_c) โดยค่าของ Collection Probability จะหมายถึง พาหะส่วนน้อยที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงจะมีโอกาสเปลี่ยนเป็นกระแสลัดวงจร (I_{sc}) ได้เท่าใด และจากการเพิ่มขึ้นของค่า Collection Probability นี้จะมีผลทำให้ค่าของกระแสลัดวงจร (I_{sc}) เพิ่มขึ้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 Collection Probability ของเซลล์ที่มี BSF และไม่มี BSF

หมายเหตุ จากความหมายเบื้องต้นของ Collection Probability จะได้สมการ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ฟรีโดยไม่หวังกำไรสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

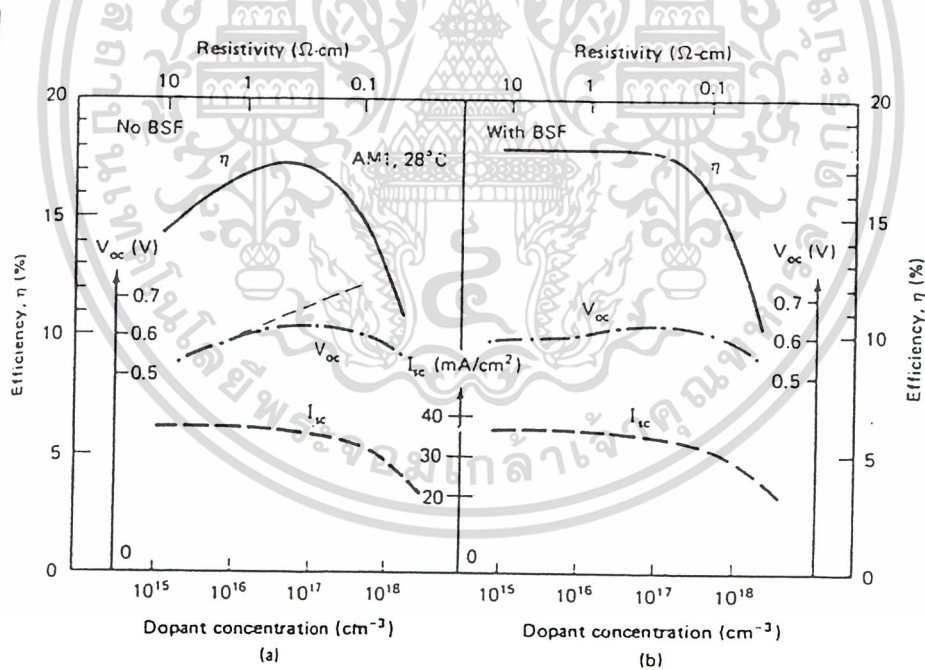
ไม่หวังกำไรใด ๆ ทั้งสิ้น $f_c = e^{-\frac{x}{L_c}}$ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tag{3.6}$$

เมื่อ	J_{sc}	คือ	การเสถ็ดวงจร (I_{sc})
	J_{dis}	คือ	กระแสที่เกิดขึ้น
	x	คือ	ระยะทางจากขอบของ Depletion region ไปยังขั้ว
	L_c	คือ	ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

ซึ่งจากรูปที่ 3.21 จะเห็นได้ว่าค่า f_c เมื่อมี Back surface fields (BSF) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากแต่ก่อนเมื่อไม่มี Back surface fields (BSF) ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ 3.6 จะพบว่า f_c จะถูกลดทอนด้วยเทอมเอ็กโปเนนเชียลแต่ Back surface fields (BSF) ช่วยทำให้การลดทอนของ f_c ลดลงจึงมีผลทำให้ f_c มีค่าเพิ่มขึ้น

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญคือ กระแสเสถ็ดวงจร (I_{sc}), แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ภายหลังการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back surface field (BSF) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 Dependence of key solar cell parameters upon the density of p-type dopants as obtained by high-performance experimental device:

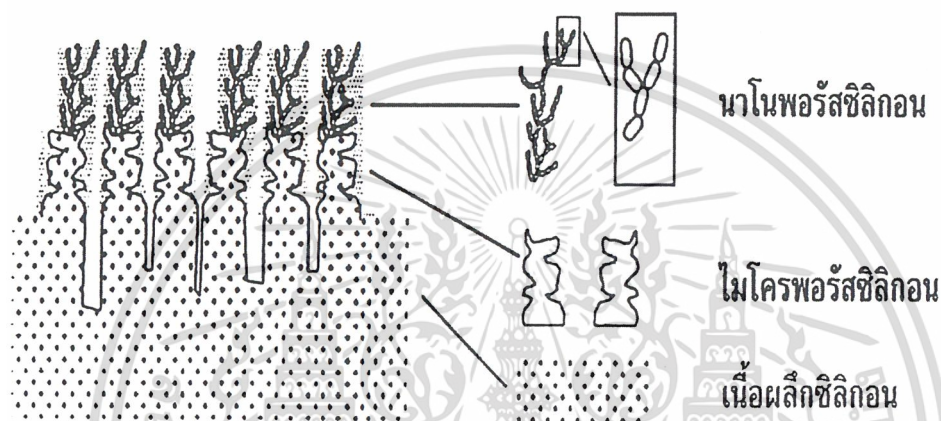
- (a) Without a back surface field.
- (b) With a back surface field.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)

3.6.2.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอน คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิคอนเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรอยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน

จากภาพจะเห็นได้ว่าชั้นของพอร์สซิลิคอนจะประกอบด้วย

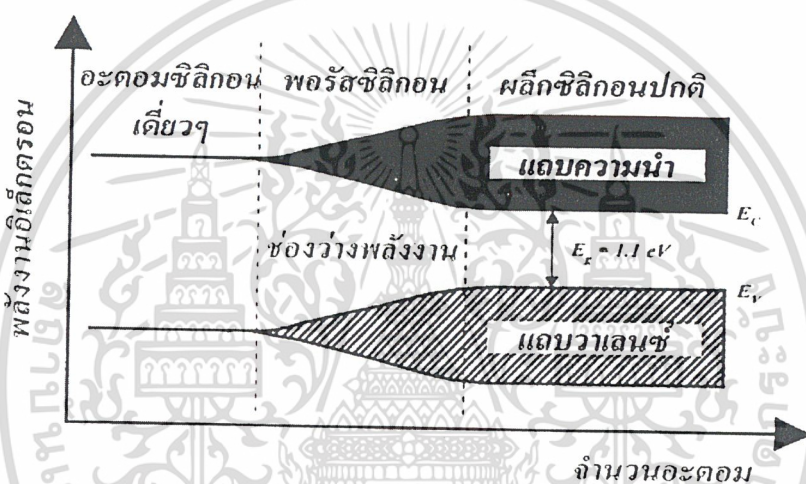
1. โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่ติดกับเนื้อของผลึกซิลิคอน
2. โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 10 นาโนเมตรลงไป

โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิคอนไฮไดรด์ ($\text{Si} : \text{H}$) หรือ ซิลิคอนออกซิไฮไดรด์ ($\text{Si} : \text{O} : \text{H}$) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิคอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้การแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิคอนเดิม



รูปที่ 3.24 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 3.24 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิคอนปกติ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบ หรือบังคับด้วยลักษณะ และขนาดของ

โครงสร้างผลึก ทำให้ปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

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

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้าง นาโนเมตรของพอร์สซิลิคอน

3.6.2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

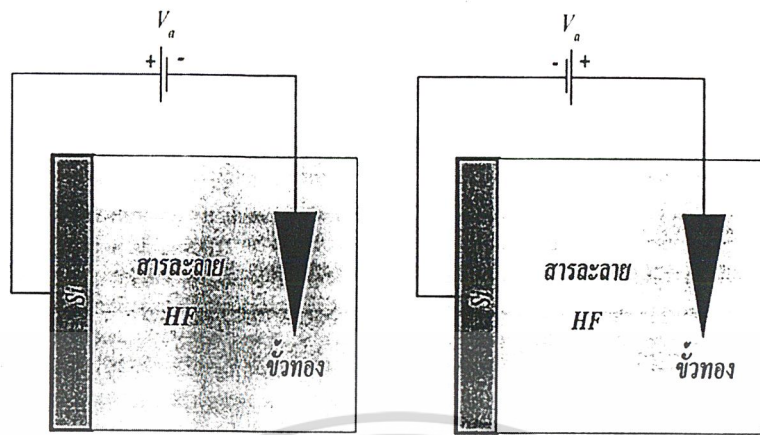
การกัดกร่อนของสสารใดๆ สามารถนิยามได้ว่าเป็นความเสื่อมโทรมของสสาร ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และมักจะเริ่มจากผิวนอกของสารนั้นเสมอ โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อะตอมของสารมีการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้น โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) ได้
2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเท และเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยบริเวณที่ซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction) ได้

ลักษณะในการ ไปอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. การไปอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (anodic bias) มีผลทำให้ผลึกซิลิคอนสามารถถูกกัดได้
2. การไปอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias) ทำให้ไม่เกิดการกัดผลึกซิลิคอนขึ้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.25 ซึ่งการไปอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีสามารถแสดง ได้ดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) anodic bias

(ข) cathodic bias

รูปที่ 3.25 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ

ตารางที่ 3.3 สรุปลักษณะสำคัญๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

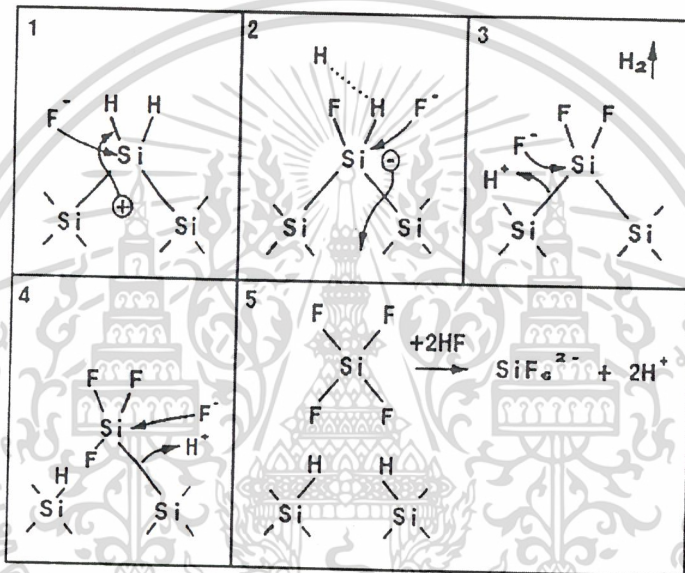
ชนิดของผลึก ซิลิคอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบ Cathodic bias	แบบ Anodic bias
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกกัด ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky 	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัด โดย จะเกิด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ จะเกิดการขัดผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Forward-biased Schottky
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกกัด ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky 	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย จะเกิด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ จะเกิดการขัดผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน

3.6.2.4.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิคอน

ในสภาวะปกติ เมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ผลึกซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบ anodic bias ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยปฏิริยาเคมี และขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.26

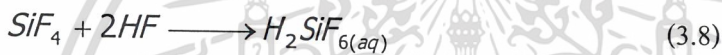
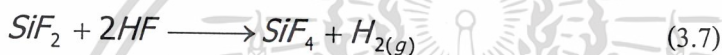
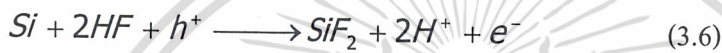


รูปที่ 3.26 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน

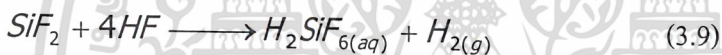
เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกรไบอัสแบบ anodic bias ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วแอโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si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

โมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในชั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาลเลนซ์อิเล็กตรอน (polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในชั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนที่อยู่ถัดเข้ามามีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในชั้นตอนที่ 3 และ 4 จากชั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิคอน พร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิคอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในชั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



จากสมการที่ 3.7 และสมการที่ 3.8 สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวมใหม่ได้เป็น



จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3.6 ที่มีผลึกซิลิคอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยโฮลในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF_2 ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอนต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_2 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ 3.7 ได้ผลลัพธ์เป็น SiF_4 หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นนี้เอง สังเกตได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้าย คือ สารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ 3.8

3.6.2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์ซซิลิคอน

ลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. แบบ eletropolishing
2. แบบ porous etching

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน

ระหว่างการ anodization โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการกัดทั้งสองลักษณะ

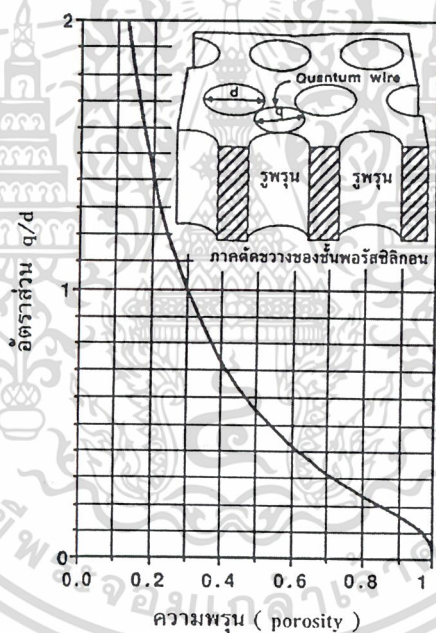
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.5 ความพรุนของพอร์ซซิลิคอน

วัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะได้ถือว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวล หรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าพอร์ซซิลิคอนนั้นก็คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอนที่เหลือนั้น และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์ซซิลิคอนแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน(q)

กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์ซซิลิคอน

จากรูปที่ 3.27 จะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์ซซิลิคอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้พอร์ซซิลิคอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์ซึลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

3.6.2.6 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

วิธีการที่จะศึกษาถึงขนาด หรือลักษณะของช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state ให้ได้ผลดีที่สุด ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เพราะว่าการดูดกลืนแสงที่ดี หรือการเปล่งแสงที่ดี เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานใดๆ มีการดูดกลืนแสง แล้วคายแสงออกมา เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานซึ่งค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมานั่นเอง

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

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

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

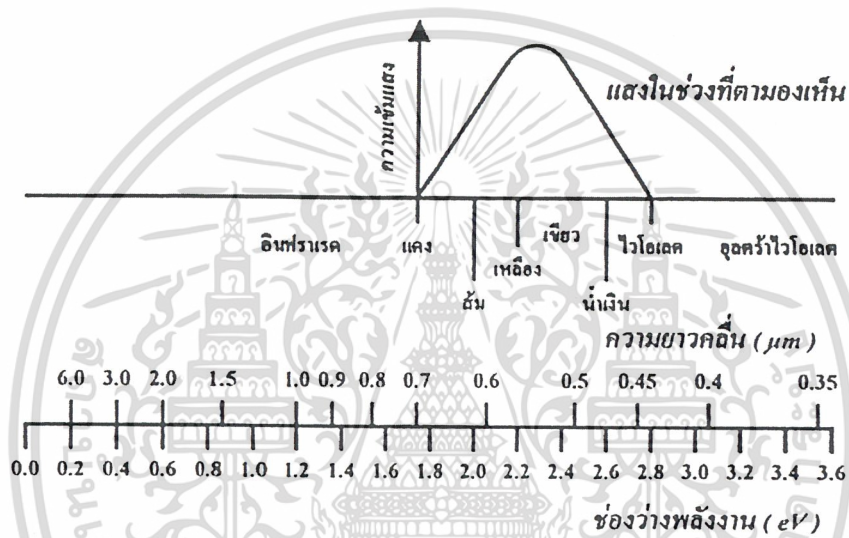
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์ $= 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$
 c เป็นความเร็วแสง $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

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

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า การที่แสงที่เปล่งออกมาจะมีความยาวคลื่นหรือสีต่างๆ ได้นั้น ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่คายออกมานั่นเอง โดยสีของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ

3.6.2.7 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

กลไกในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอน

จากลักษณะโครงสร้าง และส่วนประกอบของพอร์สซิลิคอน หลายนากลุ่มวิจัยทั่วโลกเชื่อว่าคุณสมบัติของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน คือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect ขึ้น ภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอน ทำให้ขนาดช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิคอน

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขังในหอสมุดแห่งชาติ หรือในหอสมุดของหน่วยงานราชการ การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคในการสร้างแบบต่างๆ

1. เทคนิคในการสร้างแบบ Microwave plasma decomposition ของก๊าซซิลิโคน (SiH_4)
2. เทคนิควิธีการสร้างแบบ Laser breakdown ก๊าซซิลิโคน (SiH_4)
3. เทคนิคการสร้างแบบ High-frequency spark discharge
4. การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี
5. การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการ Stain Etching

เทคนิคต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคการปลูกผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆ เหล่านี้จะต้องอาศัยเทคนิคการสร้าง และอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาที่สูงมาก แต่ในการทดลองนี้ได้ทำการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรเช่นกัน ด้วยวิธีการข้อมลิต (Stain Etching) เนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

3.7 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

3.7.1 การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยวที่ประกอบเป็นแผงเซลล์พื้นที่ 1-2 m^2 จะพบว่า

35% ของต้นทุน อยู่ที่การเตรียมแผ่นซิลิคอนที่จะนำมาผลิต (ready for cell production)

30% ของต้นทุน อยู่ที่กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (making a solar cell)

30% ของต้นทุน อยู่ที่การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์เข้าเป็นแผง

เมื่อพิจารณาต้นทุนการเตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ สำหรับเป็นวัสดุเริ่มต้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จะพบว่า

30% ของต้นทุน อยู่ที่การเตรียมวัสดุ (poly-Si)

35% ของต้นทุน อยู่ที่การปลูกผลึก (Crystal growth)

30% ของต้นทุน อยู่ที่การตัดผลึกให้เป็นแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเกือบครึ่งหนึ่งต้องเสียเนื้อซิลิคอนไปกับผลึกซิลิคอนที่ถูกเลื่อย

5% ของต้นทุน อยู่ที่การ etching, polishing, cleaning etc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยทั่วไปเทคโนโลยีมาตรฐานในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอน สามารถแบ่งได้เป็น

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

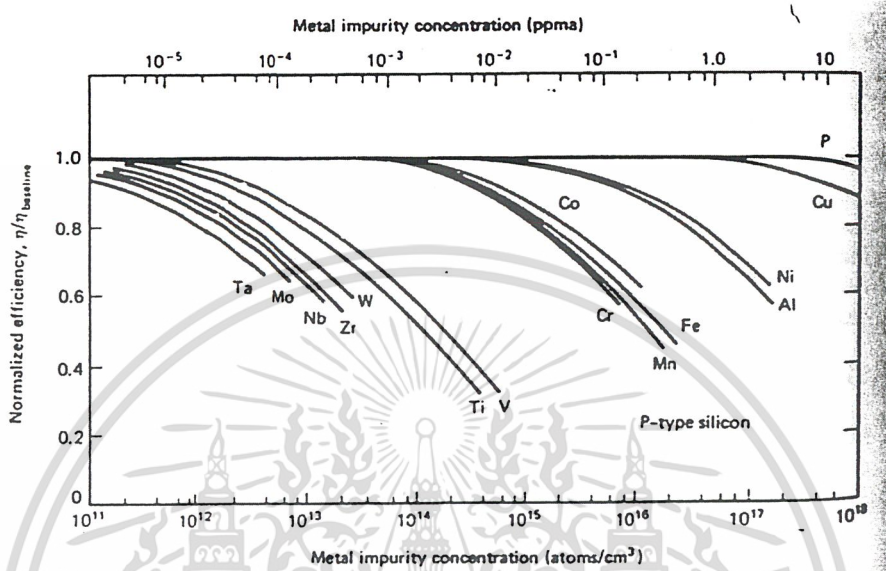
การสร้าง Solar-Grade Silicon (SoG-Si) สามารถทำได้โดยการใช้ MG-Si มาเป็นวัตถุดิบในการปลูกผลึกซิลิคอน ซึ่งซิลิคอนที่อยู่ในรูปของ MG-Si นี้จะมีความบริสุทธิ์ที่ประมาณ 99 % และยังมีอะตอมแปลกปลอมของสารอื่นดังแสดงได้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความหนาแน่นของอะตอมแปลกปลอม
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าอะตอมแปลกปลอมที่มีมาก ได้แก่ เหล็ก (Fe) และอะลูมิเนียม (Al) อย่างไรก็ตามการที่ซิลิคอนที่นำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์มีอะตอมอื่นปะปนอยู่ ย่อมมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์อยู่บ้าง แต่ก็นับว่าน้อยมาก ดังแสดงได้จากรูปกราฟที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ผลกระทบของอะตอมแปลกปลอมเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

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

การลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากการเลือกวัสดุที่ใช้ให้มีราคาที่ต่ำแล้ว กระบวนการที่นำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีส่วนช่วยลดต้นทุนไปน้อยทีเดียว ดังนั้น ในปัจจุบันจึงมีความพยายามในการวิจัยและพัฒนาเพื่อหากระบวนการมาตรฐาน ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด เช่น การลดกระบวนการที่มีต้นทุนสูงลง โดยหากระบวนการที่มีต้นทุนต่ำกว่าแล้วได้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันเข้ามาทดแทน

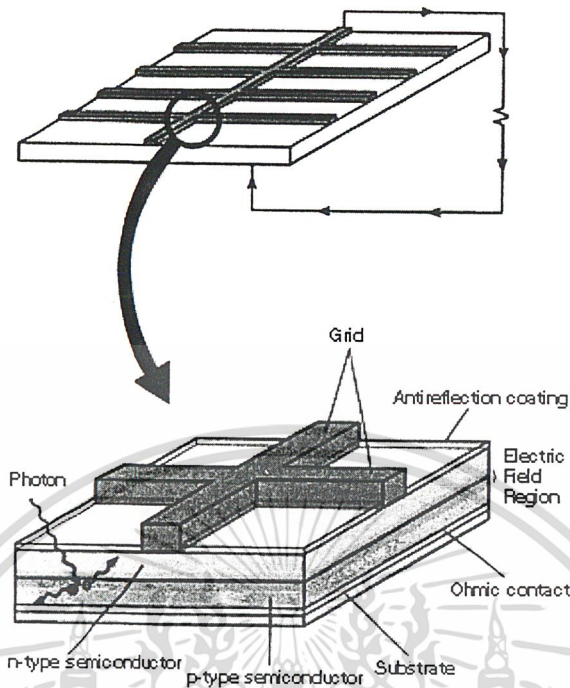
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

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

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสามารถในการที่จะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น เมื่อแสงตกกระทบพลังงานแสงบางส่วนจะสะท้อนออกไปและบางส่วนจะถูกดูดกลืน ทำให้เกิดประจุพาหะอิสระขึ้น 2 ชนิด คือ ชนิดบวก ซึ่งเรียกว่า โฮล (hole) และชนิดลบ ซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอน ที่บริเวณของรอยต่อพี-เอ็นนี้ โดยธรรมชาติแล้วจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น อิทธิพลจากสนามไฟฟ้างดังกล่าว จะทำให้ประจุอิสระแยกจากกัน ถ้าหากต่อให้ครบวงจรแล้วก็ยอมที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ เพื่อที่จะให้กระแสที่ไหลนั้นมีปริมาณมากพอที่จะใช้งานได้นั้น พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นจะต้องมีขนาดใหญ่ และรับแสงได้มากที่สุด จากที่กล่าวไปข้างแล้วจะเห็นได้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์นั้น ทางหนึ่งที่ได้รับการพัฒนา ก็คือ การทำให้แสงที่ตกกระทบนั้นสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด หรือทำให้มีการสะท้อนของแสงน้อยที่สุด จึงมีการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงที่เรียกกันว่า “ชั้นลดการสะท้อน” โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานกันทั่วไป

(anti-reflection) ชั้นลดการสะท้อนนี้ อาจทำโดยใช้สาร โปร่งแสงชนิดต่างๆ เช่น ไททาเนียม ไดออกไซด์ (TiO_2), ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นต้น การใช้ชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน เป็นกระบวนการที่ประหยัดที่สุดที่ได้โดยสะดวก จึงใช้กัน กว้างขวาง และแพร่หลายทั่วไป นอกจากนี้ เพื่อให้รอยต่อได้รับพลังงานมากที่สุด รอยต่อดังกล่าวจึง จำเป็นต้องอยู่ใกล้ผิวหน้ามากที่สุดและในทางปฏิบัติแล้ว มักจะสร้างรอยต่อให้ลึกน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ($1\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}$ เมตร หรือ = 1 ในล้านเมตร)

แผ่นผลึกซิลิคอนที่สามารถสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดึ้นนั้น ทั่วไปแล้วจะต้องมีพิกัด ความต้านทานที่ต่ำกว่า 1 โอห์ม-ซม. และมีความหนาอยู่ในช่วง 200-400 ไมครอน ผิวของแผ่นผลึกที่ โรงงานทำออกจำหน่ายนั้นมีทั้งชนิดขัดมัน (mirror polish) และชนิดขัดหยาบ (rough polish) แม้ว่า แบบผิวหน้าขัดมันจะสร้างได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่ราคาของแผ่นผลึกก็สูงกว่า ด้วย ความจริงแล้ว โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอยู่บนชนิดพี หรือ สารกึ่งตัวนำชนิดพีอยู่บนชนิดเอ็นก็ได้ แล้วแต่แผ่นผลึกเริ่มต้น เพราะผลึกที่ทำจำหน่ายจากโรงงาน นั้น มีเพียงชนิดเอ็นหรือชนิดพี ผู้สร้างจะต้องสร้างชั้นที่เหลือเอง เพราะคุณสมบัติความเป็นสารกึ่ง ตัวนำของซิลิคอนบริสุทธิ์ จะมีความนำไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย การเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่นๆ ลงไปแม้ ปริมาณเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ความนำไฟฟ้าเปลี่ยนไปได้มาก และเช่นเดียวกัน การที่จะทำให้เป็น ไร สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือเป็นชนิดพีนั้น ก็แล้วแต่ว่าสารเจือที่เติมลงไปนั้นเป็นอะไร ึ่งในทางปฏิบัติ

แล้วสารเจือชนิดอื่น จะได้มาจากการเติมอะตอมของธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 5 เช่น ฟอสฟอรัส, สารหนู และพลวง เป็นต้น ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพีนั้น ได้มาจากการเติมอะตอมของธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 เช่น โบรอน, แกลเลียม, อินเดียม และอะลูมิเนียม เป็นต้น การเติมอะตอมสารเจือ หรือการแพร่สารเจือ นั้น จะต้องทำที่อุณหภูมิสูง และถ้าหากไม่มีสารบางอย่างเคลือบสารเจือก็จะแพร่เข้าไปในทุกส่วนของซิลิคอน การควบคุมไม่ให้อะตอมของสารเจือแพร่เข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการนั้น ทำได้โดยการสร้างชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์กั้นเอาไว้ ซึ่งการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ จะเรียกว่า การออกซิเดชัน แรกสุดซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกสร้างขึ้นมาครอบคลุมแผ่นผลึกซิลิคอนทั้งแผ่นก่อน จากนั้นโดยกระบวนการพิเศษ ที่เรียกว่า โฟโตลิโธกราฟี ซึ่งใช้สารไวแสงเคลือบ และถ่ายแบบลวดลาย แล้วทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ซึ่งเรียกว่า เปิดช่องออกไซด์ หรือ window ทำให้สารเจือแพร่เข้าไปตามช่องที่เปิดไว้ สารเจือที่เข้าไปก็จะทำให้เกิดรอยต่อขึ้น ประจุพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงก็จะวิ่งเข้าหาขั้วโลหะ ถ้าหากขั้วโลหะถูกสร้างไว้ห่างไกลมาก ประจุที่เกิดขึ้นเหล่านี้ บางครั้งกว่าจะเดินทางไปถึงขั้วโลหะก็จะเกิดการรวมตัวและหายไป เมื่อเป็นเช่นนี้ เพื่อเป็นการรวบรวมให้ได้กระแสมากที่สุด จึงนิยมสร้างขั้วโลหะให้เป็นแถบเล็กๆ ทั่วไปบน ผิวหน้า เพราะถ้าหากเป็นแถบใหญ่ๆ แล้ว แม้จะรวบรวมกระแสได้ดี แต่ก็จะไปบังแสงทำให้กระแสที่เกิดขึ้นไม่มีปริมาณมากพอ หลังจากที่แพร่สารเจือ และขั้วลึกลงแล้ว ก็จะเปิดช่องของซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำลายขั้วโลหะ (contact grid) ทางด้านหน้า ส่วนทางด้านหลังก็จะใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบไว้ทิ้งไป ทำการเคลือบอะลูมิเนียมทั้งด้านหน้า และด้านหลังด้วยวิธีการระเหยสารในสุญญากาศ เมื่อผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแล้ว ก็จะได้ลวดลายอะลูมิเนียมขั้วสัมผัส ตามที่ออกแบบไว้แต่แรก เพื่อให้อะลูมิเนียมที่สร้างขึ้น มีการสัมผัสกับซิลิคอนในลักษณะอัลลอยด์ จึงต้องนำเข้าเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 500°C ในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น 10 นาที เรียกว่า การแอนนัล (anneal) เนื่องจากว่าขั้วสัมผัสซึ่งเป็นโลหะอะลูมิเนียมนั้น แม้จะนำไฟฟ้าได้แต่ก็ไม่สามารถจะใช้ตะกั่วในการบัดกรีเพื่อต่อสายออกมาใช้งานได้ จึงต้องมีการสร้างชั้นของนิเกิลเคลือบไปบนชั้นอะลูมิเนียมด้วยขบวนการทางเคมี และไม่ใช้ไฟฟ้า (เรียกว่า electroless plating) เซลล์ที่สร้างได้นับว่าเสร็จสมบูรณ์ แต่ในการใช้งานนั้นอาจจะไม่สะดวกนัก หลังจากนั้นจึงมีการเก็บบรรจุในลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวๆ หรือเป็นแผงเซลล์ก็ได้ เซลล์แสงอาทิตย์นั้นปกติแล้ว ต่อ 1 เซลล์จะมีแรงดันประมาณ 0.5 โวลต์ ส่วนกระแสก็จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของเซลล์ การต่อเซลล์เป็นแผงนั้นก็จะมีทั้งการต่อขนานหรืออนุกรม ก็แล้วแต่จะต้องการกระแส หรือแรงดันขนาดไหน

สำหรับลำดับขั้นตอนในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จะพอสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

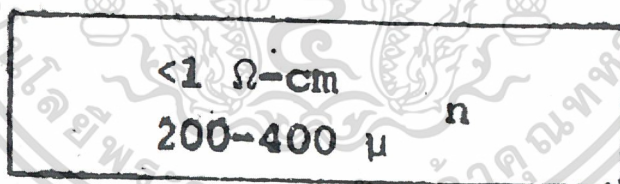
1. เลือกแผ่นผลึกตามต้องการ เช่น ชนิด ความหนา พิกัดความต้านทาน
2. ทำความสะอาดแผ่นผลึก
3. สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ครั้งแรก (first oxidation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ก๊อปข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

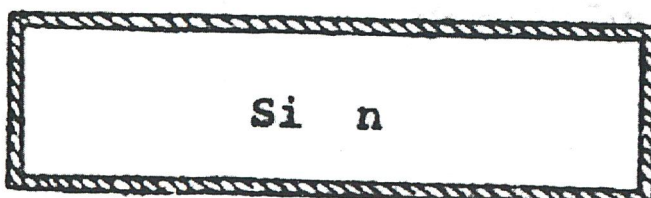
4. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดออกไซด์ด้านหน้า
5. แพร่สารเจือครั้งแรก (pre deposition)
6. ขับลึก และออกซิเดชัน (drive-in) ทำชั้นลดการสะท้อนแสง
7. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องทำขั้วสัมผัสโลหะ
8. เคลือบอะลูมิเนียมด้วยวิธีระเหยสารแข็งในสุญญากาศ
9. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อทำลายขั้วไฟฟ้า
10. ทำการแอนนีส
11. ชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า
12. เก็บบรรจุ

จากหัวข้อที่ 1 ถึง 12 นี้ ถ้าหากเราเขียนผังภาพตัดของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ก็จะแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.33 ซึ่งจะแสดงเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นผลึกชนิดเอ็น ถ้าหากเป็นแผ่นผลึกชนิดพีกระบวนการสร้างก็เป็นเช่นเดียวกัน จะต่างกันเฉพาะชนิดของสารเจือที่แพร่ในตอนที่สร้างรอยต่อพี-เอ็น

รูปที่ 3.33 กระบวนการมาตรฐานกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

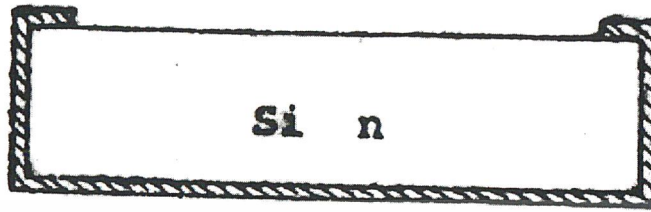


1. แผ่นผลึกเริ่มต้น

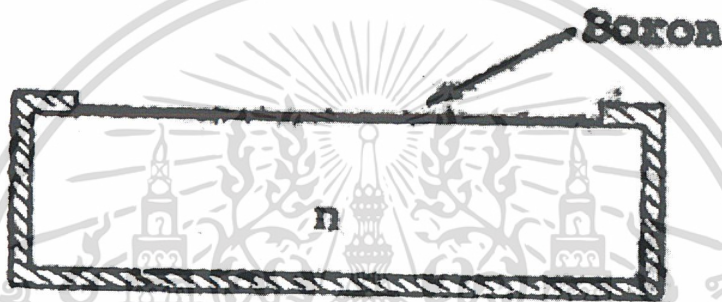


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณี 2.ๆ ทั้งลึ้ออกซิเดชัน มิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

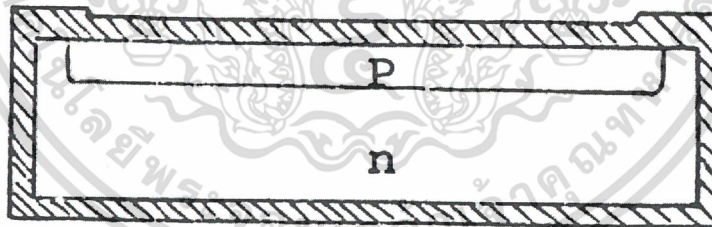
รูปที่ 3.33 (ต่อ) กระบวนการมาตรฐานกระบวนการหนึ่งที่ใช้ใน
ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



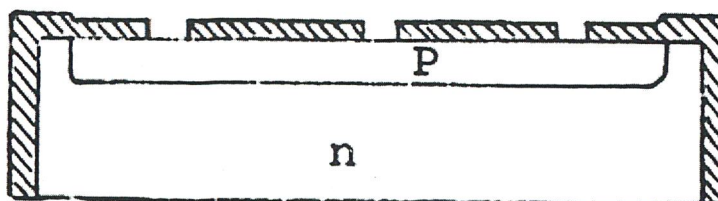
3. เปิดช่องออกไซด์ด้านหน้าเพื่อแพร่สารเจือ



4. แพร่สารเจือครั้งแรก

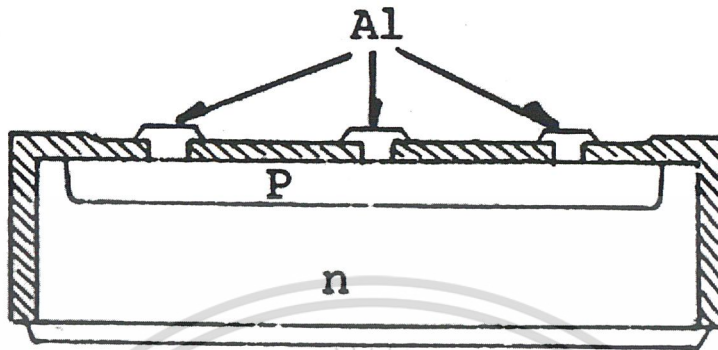


5. ขั้วลึกลงและออกซิเดชัน

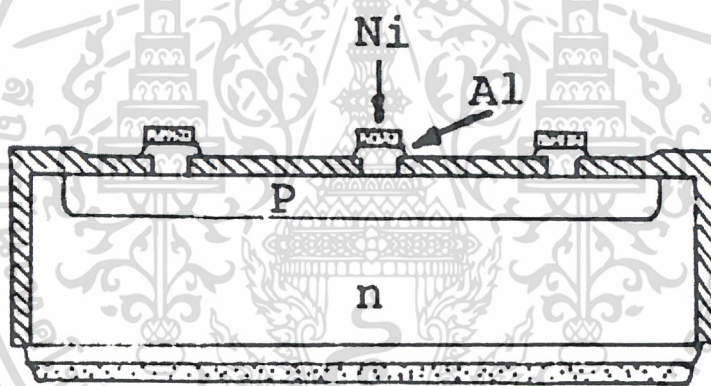


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น เปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วสัมผัสโลหะ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

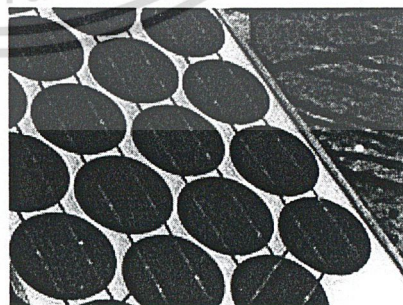
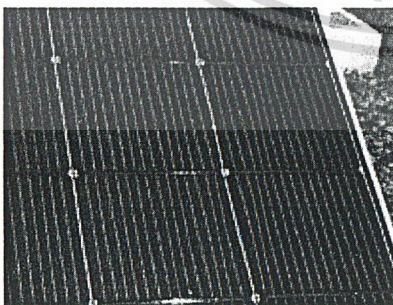
รูปที่ 3.33 (ต่อ) กระบวนการมาตรฐานกระบวนการหนึ่งที่ใช้ใน
ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



7. เคลือบอะลูมิเนียม, ทำลวดลาย, แอนนีสล



8. ชูบนิเกิล และพัฒนาที่จะเก็บบรรจุ

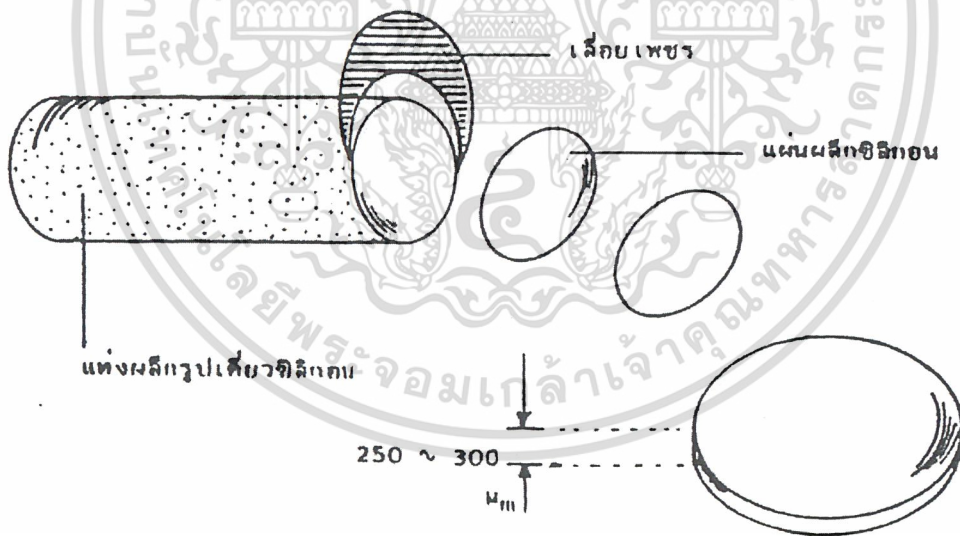


9. เก็บบรรจุแบบเซลล์เดี่ยวๆ หรือเป็นแผงเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชาร์ตในรูปที่ 3.33 เป็นกระบวนการมาตรฐานกระบวนการหนึ่ง ซึ่งใช้ในห้องปฏิบัติการของ ศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ ในการศึกษา และพัฒนากระบวนการสร้าง พบว่า ในบางขั้นตอน สามารถจะลดลงได้ เช่น ไม่จำเป็นต้องเคลือบอะลูมิเนียมทางด้านหลัง และอาจจะไม่เคลือบ อะลูมิเนียมเลยทั้ง 2 หน้าก็ได้ ที่กล่าวมาแล้วนั้นเป็นกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยสังเขปที่ทำการในห้องปฏิบัติการ ต่อไปจะได้กล่าวถึงรายละเอียดแต่พอสังเขปในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ นอกเหนือไปจากหัวข้อ การสร้างแผ่นผลึก, การแพร่สารเจือ, การสร้างขั้วไฟฟ้า และการต่อสายเก็บ บรรจุเซลล์ ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในเรื่องเทคโนโลยีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนี้

เมื่อได้แท่งผลึกรูปเดี่ยว ซึ่งเรียกว่า อินกอต (ingot) แล้ว นำแท่งผลึกรูปเดี่ยวไปตัดเป็นแผ่น ผลึกบางๆ (crystal wafer) ด้วยใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษ (inside diameter) ดังแสดงในรูปที่ 3.34 ใบเลื่อย ดังกล่าวนี้จะมีลักษณะเป็นวงแหวน และมีความคมอยู่ในวงชั้นใน โดยที่ใบเลื่อยจะถูกฉาบไว้ด้วย ผงเพชร (diamond powder) ในการตัดผลึกจะต้องตัดให้ถูกระนาบ หรือแนวผลึก เพื่อให้มีความคมพอ ที่จะตัดเนื้อซิลิคอนซึ่งแข็งมากได้ เมื่อตัดเสร็จแล้วจะปรากฏรอยคมของเลื่อยขึ้นที่ผิวทั้งสองด้านของ แผ่นผลึก ซึ่งรอยนี้จะกำจัดให้หมดไปโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี ($\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{CH}_3\text{COOH}$) แล้วจึงนำ แผ่นผลึกที่ได้นี้ไปทำความสะอาดและขัด (Lapping) ด้วยผงขัด



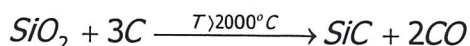
รูปที่ 3.34 ลักษณะของแผ่นผลึกรูปเดี่ยว

ซึ่งพร้อมที่จะนำไปสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

ในการขัด (Lapping) ผิวหน้าของแผ่นผลึก ผงขัดที่ใช้ ได้แก่ ผงเพชร, ผงโบรอนไนโตรด์, ผง ซิลิคอนคาร์ไบด์, ผงอะลูมินา เป็นต้น สำหรับผงขัดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มี 2 ชนิด ดังนี้คือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



ในระหว่างที่ทรายและถ่าน (C) ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยากันในเตาไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูงจะใส ซึ่ลื้อเข้าไปเพื่อให้ส่วนผสมเกิดรูขึ้น และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นสามารถผ่านออกไปได้ จะได้ SiC

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

สำหรับผงขัด SiC ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมี 4 เกรดด้วยกัน ดังนี้คือ

1. เกรด 600 พงขัดเกรดนี้จะหยาบ คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28μ .
2. เกรด 1000 เม็ดผงขัดจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16μ .
3. เกรด 2000 เป็นผงขัดที่ค่อนข้างละเอียด คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.9μ .
4. เกรด 4000 เป็นผงขัด SiC ที่มีความละเอียดมากที่สุด คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง

3 μ .

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

ต่อจากนั้นดำเนินขั้นตอนเพื่อให้ได้ผงขัดที่มีขนาดเล็ก เช่นเดียวกับ SiC จะได้ผงขัด Alumina ที่มีขนาดต่างๆ กัน พง Alumina ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีอยู่ด้วยกัน 2 ขนาด คือ พงขัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 และ 0.05μ

3.8.1 กรรมวิธีในการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน

นำแผ่นผลึกซิลิคอนมาติดกับแท่น (die) ด้วยขี้ผึ้ง (Electronic-grade Wax) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงจนแผ่นผลึกติดแน่นดีแล้ว ผสมผง SiC กับน้ำบริสุทธิ์บนแผ่นกระจกให้เข้ากัน แล้วนำแผ่นซิลิคอนเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวมาขัดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขัดจนผิวหน้าแผ่นผลึกเรียบดีแล้ว จึงนำแผ่นผลึกออกจาก die แล้วนำไปทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกต่อไป

ในบางครั้งแผ่นผลึกซิลิคอน ที่มีอยู่มีขนาดหนาจนเกินไปไม่สามารถไปวางบน boat ได้ เราสามารถขัดแผ่นผลึกดังกล่าวให้บางลงได้ โดยขัดที่ด้านหลังของแผ่นผลึกด้วยผงขัด SiC

สำหรับการขัดด้วยผงขัด alumina คล้ายกับขัดด้วย SiC เพียงแต่นำแผ่นผลึกซิลิคอนไปขัดบนกระจกที่คลุมด้วยผ้าสักหลาด ส่วนขั้นตอนอื่นๆ เหมือนขัดด้วยผงขัด SiC

3.8.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดจนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ คุณสมบัติของแผ่นผลึกก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอันหนึ่ง กล่าวคือ จะต้องเป็นแผ่นผลึกรูปเดี่ยว ซึ่งมีวิธีการปลูกผลึกดังที่กล่าวมาแล้ว ชนิดของสารเจือในแผ่นผลึก ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ความหนาของแผ่นผลึก และระนาบของแผ่นผลึก ในการวัดคุณสมบัติดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้ คือ

3.8.3 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน

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

อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลม และอาจมีสปริงช่วย ทำให้ปลายของเข็มถูกกด และสามารถสัมผัสกับระนาบผิวด้านหน้าที่ขัดมันของชั้นสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้งสี่อยู่ห่างกันเป็นระยะ S เท่าๆ กัน ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไป $S = 0.5 - 1$ มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.35 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสแสงที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุด คือ เข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสาร และถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าได้ ในปัจจุบันเครื่อง Four points probe นี้ได้ทำเป็นเครื่องวัดที่มีการแสดงผลเป็นระบบตัวเลข ซึ่งแค่ใส่แผ่นเวเฟอร์เข้าไป แล้วกดปุ่มก็สามารถทราบค่าสภาพต้านทานได้ทันที เนื่องจากสภาพความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นที่ถูกแพร่สารเจือด้วย แต่เนื่องจากชั้นที่ถูกแพร่สารเจือนั้นมีขนาดบางมากๆ ราว 1-3 ไมโครเมตร จึงไม่สะดวกที่จะนำไปใช้เพื่อคำนวณ และหาพารามิเตอร์อื่นๆ ต่อ จึงนิยมที่จะบอกค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในอีกรูปแบบหนึ่งคือ “สภาพต้านทานแผ่น” (Sheet resistivity; ρ_s) มีหน่วย

เป็นโอห์ม/□ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นที่ถูกแพร่สารเจือ สำหรับเครื่อง Four points probe เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

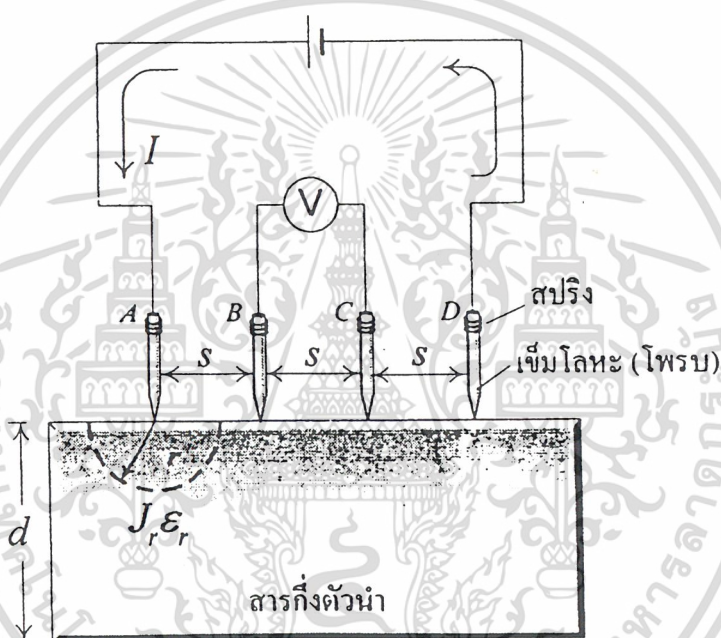
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็มีโหมดให้เลือกโดยถ้าจะวัดแบบ Resistivity ธรรมดาที่ใช้โหมด SLICE ถ้าต้องการวัด Sheet resistivity ก็ใช้โหมด SHEET โดย

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

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

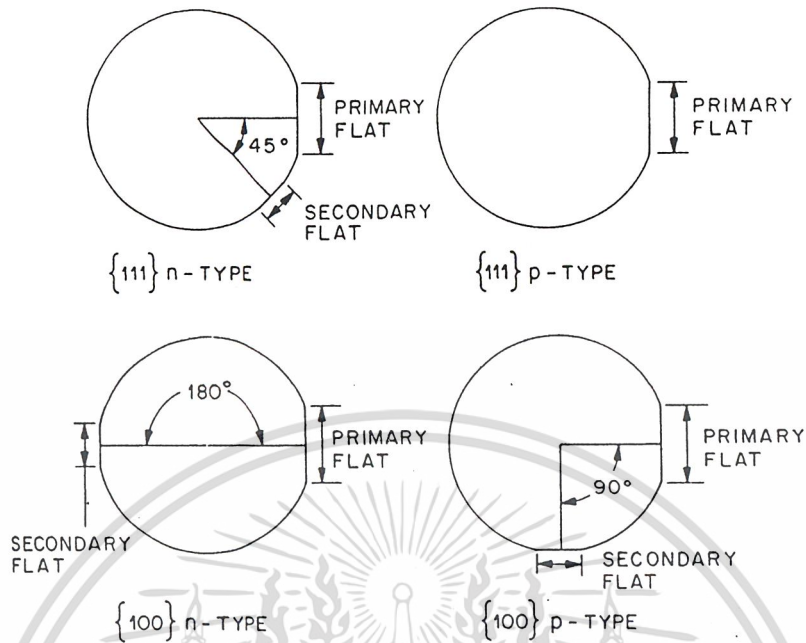
$$\rho_s = R_s \times \text{thickness}$$



รูปที่ 3.35 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพรบสี่โพรบ

ระนาบแต่ละแบบก็เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในแต่ละแบบ การเลือกระนาบของแผ่นผลึกซิลิคอนให้เหมาะสมกับประเภทของการเคลื่อนที่ของประจุพาหะนั้น จะทำให้การเคลื่อนที่ของประจุพาหะเป็นไปอย่างสะดวกให้ประสิทธิภาพสูงสุด และจะให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์อีกด้วย จะเห็นดังแสดงในรูปที่ 3.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 Identifying flats on a silicon wafer.

3.8.4 การทำความสะอาดผิวหน้า

1. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

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

2. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

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

3. การ Slice etching

ถึงแม้แผ่นเวเฟอร์จะสะอาดจากสิ่งเจือปนแล้ว แต่แผ่นเวเฟอร์เองจะมีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมาก แต่เพื่อความเที่ยงตรงในกระบวนการไม่ว่ากรณีใดๆ พึงสนใจทั้งสามข้อข้างต้นให้ดีและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารไว้ที่ตรงมุมขวามือ

สร้างจึงต้องกำจัดชั้นออกไซด์บางๆ นี้ออกไป โดยจุ่มลงในสารละลาย HF 5% 10 วินาที แล้วจุ่มในน้ำ DI. อีก 2 บีกเกอร์ และเป่าแห้งด้วย N₂

3.9 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

เป็นการสร้างชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นบนผิวของแผ่นซิลิคอน เพื่อใช้ป้องกันไม่ให้สารเจือปนเข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการขณะที่ทำการแพร่สารเจือ เพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น กระบวนการออกซิเดชันที่นิยมทำกันมี 3 วิธี คือ

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

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

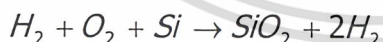


2. Wet Oxidation กรรมวิธีเหมือน Dry Oxidation แต่เพิ่มความชื้นจากน้ำเข้าไปเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น ซึ่งทำได้ 3 วิธี

(ก) Stream System เป็นการเพิ่มไอน้ำเข้าไปในกระบวนการ โดยต้มน้ำให้ได้อุณหภูมิประมาณ 90°C จะได้ไอน้ำแล้วปล่อยผ่านท่อควอตซ์ในขณะออกซิเดชัน ดังรูปที่ 3.38 ชั้นตอนนี้แสดงได้ดังสมการ

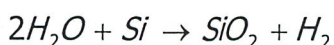


(ข) Torch System (Burn Hydrogen) ใช้การปล่อยก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนเข้าร่วมตัวกัน(สันดาป) แล้วจึงไปทำปฏิกิริยากับผิวแผ่นซิลิคอน แสดงได้ดังสมการ



วิธีนี้ต้องควบคุมปริมาณก๊าซไฮโดรเจนให้ดี ถ้ามักเกินไปอาจเกิดการระเบิดได้

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

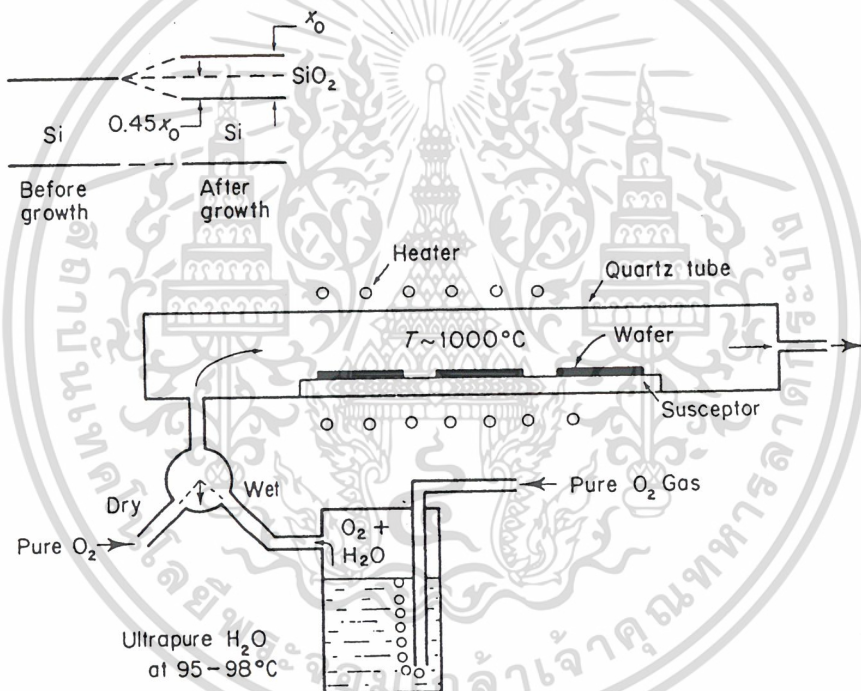


อัตราการเกิดชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการ Thermal Oxidation ในช่วงแรกจะ

แปรผันตรงกับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้น อัตราการเกิดจะช้าลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยจะแปรผันตรงกับรากที่สองของเวลาแทน และโดยเฉลี่ยในความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น ไม่วุ่นวายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีนำไปใช้

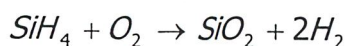
54% จะเกิดขึ้นเหนือระดับผิวของแผ่นซิลิคอน ส่วนอีก 46% จะเกิดลึกลงไปจากระดับผิวของแผ่นซิลิคอน

กระบวนการ Wet Oxidation จะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ได้หนากว่าวิธี Dry Oxidation เมื่อใช้เวลาเท่ากัน เพราะโมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นแอกทีฟออกซิเจนกับก๊าซไฮโดรเจน ทำให้อะตอมซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่คุณภาพที่ได้จาก Wet Oxidation จะดีกว่า คือ จะเกิดช่องว่างในชั้นออกไซด์มากกว่าวิธี Dry Oxidation ซึ่งจะกระทบต่อกระบวนการสร้างในขั้นต่อไปด้วย เช่น ยากในการควบคุมความลึกในการแพร่สารเจือ ฯลฯ จึงมักใช้การออกซิเดชันแบบ Dry Oxidation ในขั้นส่วนที่สำคัญ เช่น เกท ในการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ และใช้สร้างแบบสลับชั้น Wet-Dry ในขั้นส่วนอื่นๆ

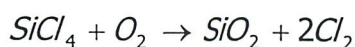


รูปที่ 3.37 เครื่องมือการออกซิเดชัน แบบ Thermal Oxidation

3.9.2 Chemical Vapor Deposition Oxidation (CVD) เป็นกรรมวิธีการสร้างชั้นออกไซด์ด้วยสารเคมี แสดงได้ดังสมการ



หรือ



กรรมวิธีนี้ สารตั้งต้นที่ใช้หายาก มีราคาแพง และยังเป็นก๊าซที่อันตรายอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.3 Spottering

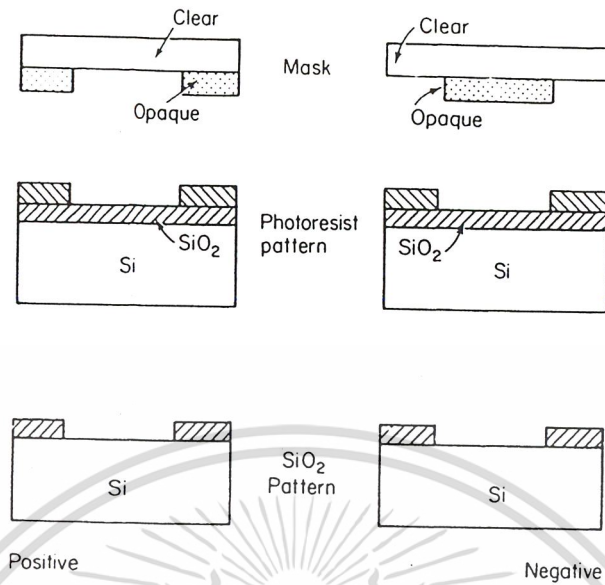
เป็นการนำแผ่น SiO_2 มาติดไว้ทางขั้วไฟฟ้าแคโทดซึ่งเป็นเป้า (Target) ส่วนด้านแอนโนดติดแผ่นซิลิคอนที่ต้องการให้เกิดชั้นออกไซด์ แล้วผ่านสนามไฟฟ้าประมาณ 100,000 โวลท์ ขณะเดียวกันก็ปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar) หรือ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) เข้าไปในระบบ สนามไฟฟ้าแรงสูงจะทำให้ก๊าซแตกตัวเป็น Ar^+ หรือ N^+ แล้ววิ่งเข้าชนเป้า SiO_2 เป้า SiO_2 ที่ถูกชนจะกร่อนลงแล้วตกมารวมตัวกับแผ่นซิลิคอนด้านแอนโนดเกิดเป็นชั้น SiO_2 ขึ้น

3.10 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

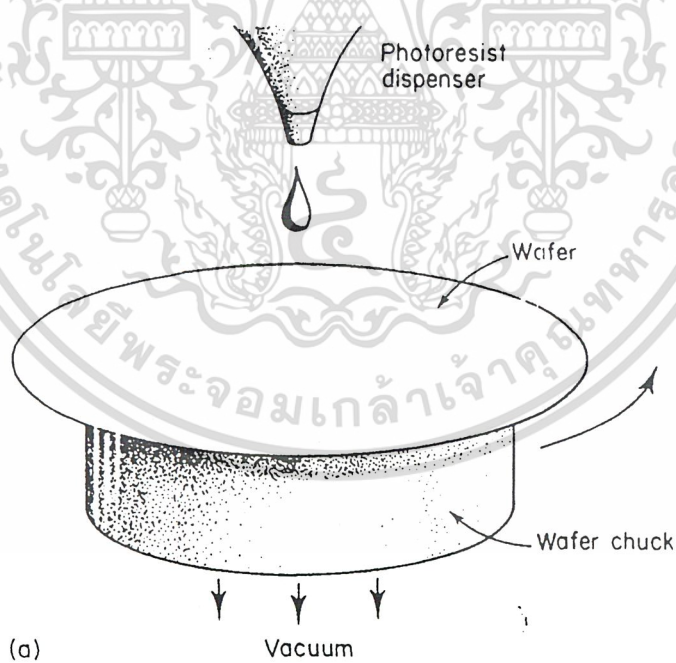
เมื่อเราได้ชั้นออกไซด์เรียบร้อยแล้ว ขั้นต่อไปก็เป็นการสกัดหรือเปิดช่องของชั้นออกไซด์ออกในบริเวณที่เราต้องการให้สารเจือแพร่ลงไป กระบวนการนี้นับเป็นหัวใจของกระบวนการสร้างลายก็ได้ ขั้นตอนนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “โฟโตเอตซิง (Photo-etching)” ซึ่งกรรมวิธีต่างๆมีดังต่อไปนี้ เริ่มจากการอบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นหยคน้ำยาไวแสง (Photoresist) ซึ่งมีทั้งชนิดลบบ (Way coat) หรือชนิดบวก (AZ) ดังแสดงในรูปที่ 3.38 ลงบนชั้นออกไซด์ ปั่นด้วย High speed spinner ดังแสดงในรูปที่ 3.39 เพื่อให้น้ำยากระจายเป็นฟิล์มบางและสม่ำเสมอทั่วแผ่น อบแผ่นอีกครั้ง (อบฟิล์ม) แล้วจึงนำไปฉายแสงโดยมีโฟโตมาสก์บังอยู่อีกชั้นหนึ่ง ถ้าเป็นการฉายแสงตั้งแต่มาสก์ที่ 2 ขึ้นไป การปรับให้ตรงกับมาสก์ชั้นก่อนๆ เป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากรายละเอียดของงานมีขนาดเล็กมากๆ จึงต้องมีการปรับมาสก์ (Alignment) ผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งต้องใช้การฝึกฝนพอสมควร ขั้นตอนต่อมาคือ การนำไปล้าง (Development) ด้วยสารเคมีต่างๆ ซึ่งถ้าน้ำยาไวแสงเป็นชนิดลบ ส่วนของน้ำยาไวแสงที่โดนแสงจะยึดติดกับผิวออกไซด์เมื่อนำไปล้าง แต่ถ้าน้ำยาไวแสงเป็นชนิดบวก ส่วนของน้ำยาไวแสงที่ไม่โดนแสงจะยึดติดกับผิวออกไซด์เมื่อนำไปล้าง ดังนั้น การจะเลือกชนิดของน้ำยาไวแสงที่ใช้งาน ก็ควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของงานที่นำไปใช้ด้วย

เคลือบฟิล์มด้านหลังของแผ่นเพื่อป้องกันชั้นออกไซด์ด้านหลังถูกทำลาย และไม่ให้มีการทำปฏิกิริยากับสารอื่น อบฟิล์ม แล้วนำไปสกัดชั้นออกไซด์ออก (Oxide etching) ด้วยสารละลาย Buffer จำพวก HF (กรดกัดแก้ว) หรือ H_3PO_4 ออกไซด์ส่วนที่ถูกฟิล์มยึดเกาะเอาไว้จะไม่ถูกกัดออกไป ส่วนที่เหลือก็จะถูกกัดออกไปโดยอัตราส่วนการกัดชั้นออกไซด์ (Oxide rate) มีค่าประมาณ 0.1 ไมโครเมตรต่อนาที ภาชนะที่ใช้ต้องทำจาก “เทฟลอน” ซึ่งทนต่อสารละลายพวกนี้ เมื่อชั้นออกไซด์ถูกกัดจนเป็นที่ต้องการแล้ว ก็ต้องลอกฟิล์มออก โดยนำไปต้มกับกรด H_2SO_4 และต้มต่อในน้ำ DI. เป็นขั้นตอนสุดท้าย ขั้นตอนทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.40 และตัวอย่างมาสก์แสดงดังรูปที่ 3.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

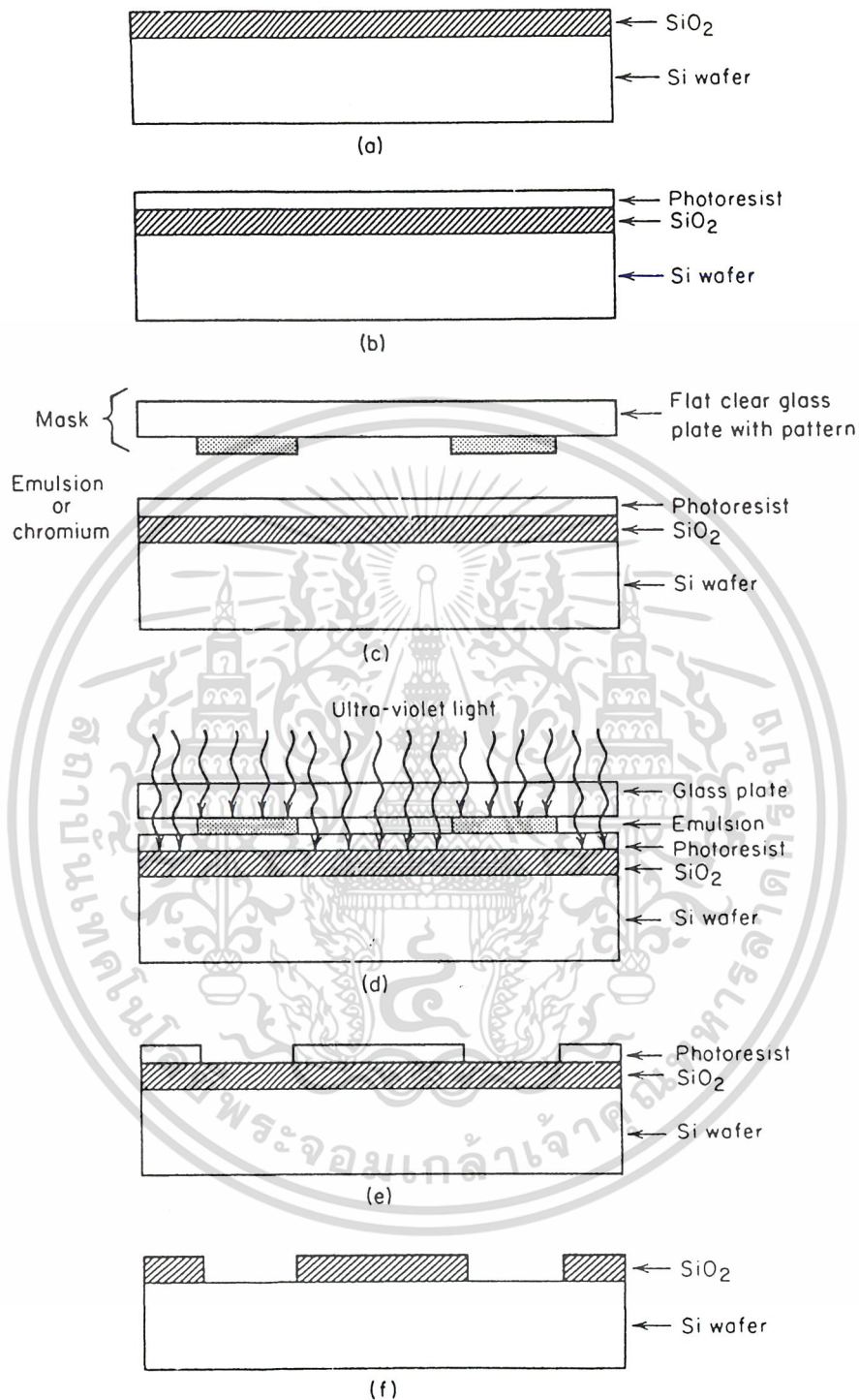


รูปที่ 3.38 นำยาไวแสงชนิดบวก และชนิดลบ



รูปที่ 3.39 อุปกรณ์ที่ทำให้ยาไวแสงกระจายสม่ำเสมอ (Photoresist spinner)

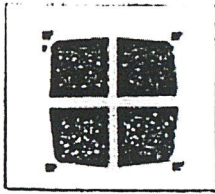
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



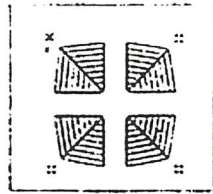
รูปที่ 3.40 กระบวนการ Photolithography โดยใช้ฉายาไวแสงชนิดลบ

(a) growth of SiO_2 film; (b) coating with photoresist; (c) mask placed in proximity; (d) mask aligned and brought into contact; (e) photoresist developed; (f) oxide etch and photoresist removed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือจะเอามาใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สำหรับเปิดช่องออกไซด์ เพื่อแห้วสารเจือ

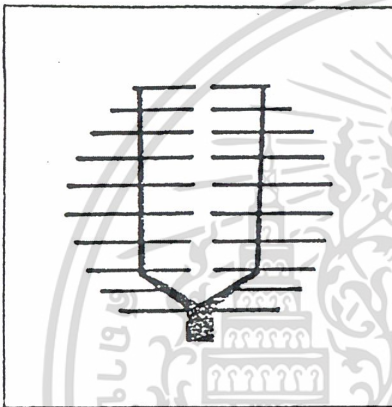


สำหรับเปิดช่องออกไซด์ เพื่อทำขี้โลหะ

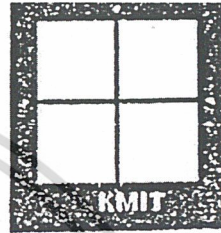


สำหรับทำลวดลาย ขี้โลหะ

ต้นแบบ SC-1 : ต้นแบบชนิดบาก



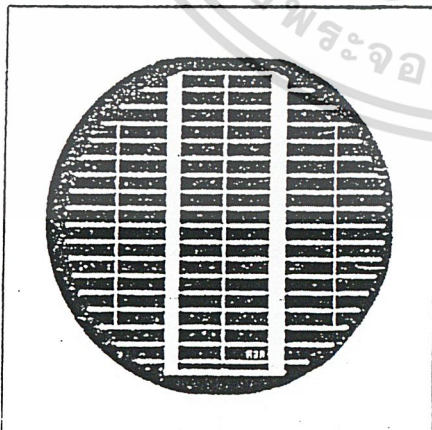
ต้นแบบ SC-2 : ต้นแบบชนิดบาก สำหรับเปิดช่องออกไซด์และทำลวดลาย ขี้โลหะ



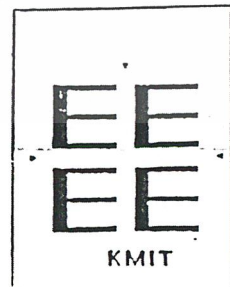
ชนิดลบ : ใช้เปิดช่องออกไซด์ เพื่อแห้วสารเจือ



ชนิดลบ : ใช้เปิดช่องออกไซด์ เพื่อทำขี้โลหะ



ต้นแบบ SC-4 : ต้นแบบชนิดลบ สำหรับเปิดช่องออกไซด์



ชนิดบาก : ใช้ทำลวดลาย ขี้โลหะ

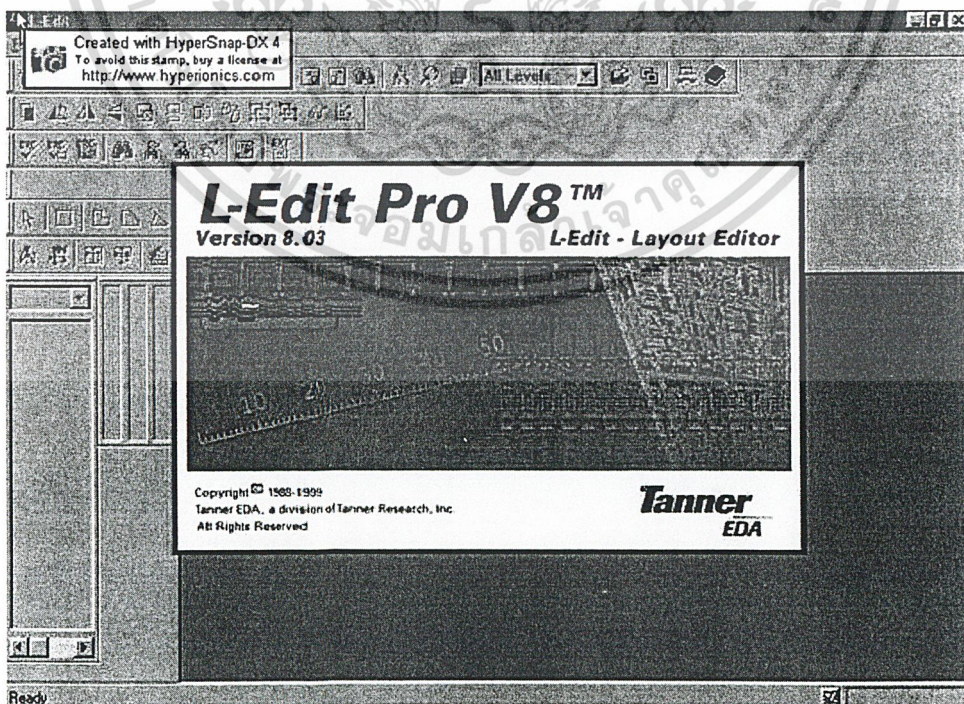
ต้นแบบ SC-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 3.41 ตัวอย่างลวดลายแผ่นโฟโตมาส์กเซลล์แสงอาทิตย์

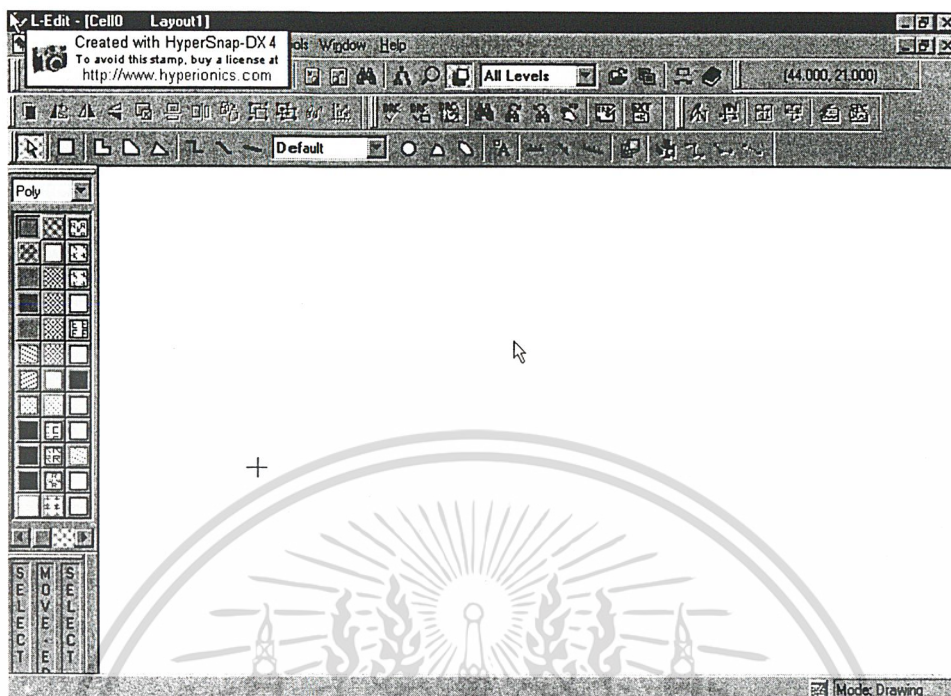
3.11 การออกแบบมาส์กด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการคือการลดต้นทุนการผลิต และการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ การออกแบบมาส์กมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยการออกแบบมาส์กเน้นหนักไปในเรื่องการออกแบบลายขั้วโลหะ (Grid) ให้มีความเหมาะสมไม่ใหญ่หรือเล็กเกินไป และมีปริมาณเพียงพอในเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะเมื่อเกิดประจุพาหะเนื่องจากแสง ประจุพาหะก็จะวิ่งเข้าหาขั้วโลหะ ถ้าขั้วโลหะถูกสร้างไว้ห่างไกลมาก ประจุที่เกิดขึ้นเหล่านี้ บางครั้งกว่าจะเดินทางไปถึงขั้วโลหะก็จะเกิดการรวมตัว และหายไป เมื่อเป็นเช่นนี้ เพื่อเป็นการรวบรวมกระแสให้ได้มากที่สุด จึงนิยมสร้างขั้วโลหะให้เป็นแถบเล็กๆ ทั่วไปบนผิวหน้า เพราะถ้าหากเป็นแถบใหญ่ๆ แล้ว แม้จะรวบรวมกระแสได้ดี แต่ขั้วโลหะนี้ก็จะไปบดบังแสงทำให้พื้นที่รับแสงของเซลล์ลดลง ทำให้กระแสที่เกิดขึ้นไม่มีปริมาณมากพอ

ปัจจุบันกระบวนการออกแบบและสร้างกระจกมาส์กได้มีการพัฒนา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ทำให้มีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดเวลาในการออกแบบและการสร้างได้มาก เพราะเราสามารถนำไฟล์ที่เราออกแบบมาอิงด้วยแสง LASER ลงบนโครเมียมมาส์ก (Hard Mask) ด้วยเครื่อง DWL (Direct Write Laser) ได้เลยทันที แต่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการออกแบบและสร้างกระจกมาส์กด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังมีราคาสูงอยู่ สำหรับโปรแกรมซึ่งใช้ในการออกแบบมาส์กนี้ได้แก่ โปรแกรม L-Edit Pro V8TM Version 8.03 ของ Tanner Research ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ L-Edit ที่ใช้ในการออกแบบ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



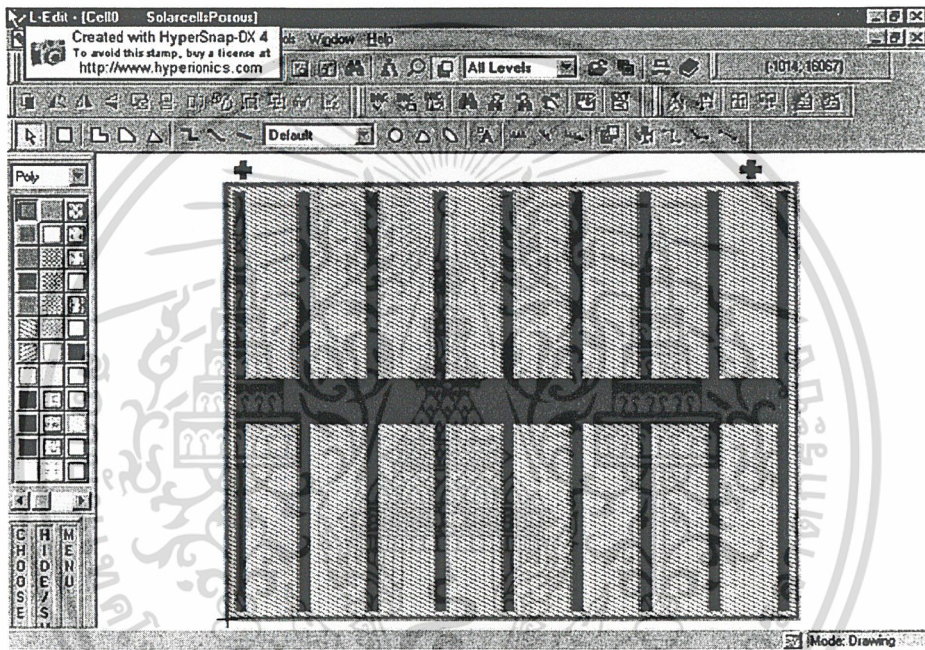
รูปที่ 3.43 Layout Area ที่ใช้ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับขนาดของสายขั้วโลหะ (Finger และ Busbar), ระยะห่างระหว่าง Finger, ระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงปลายสุดของ Finger และระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงขอบเซลล์ ที่ใช้ออกแบบในการทดลองครั้งนี้ เราได้อ้างอิงขนาด และระยะของตำแหน่งต่างๆ จากเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยวประสิทธิภาพสูง ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งได้มีการคำนวณค่า optimum ไว้แล้ว สามารถแสดง ได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ขนาด และระยะของตำแหน่งต่างๆ บนเซลล์ที่ใช้ในการออกแบบ

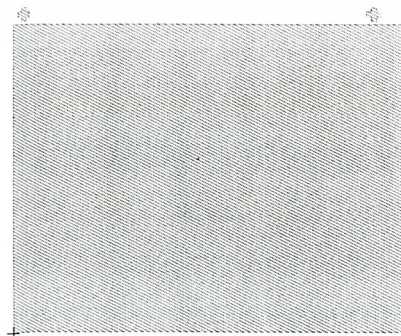
ตำแหน่ง	ขนาด (mm.)
ขนาด Finger ของขั้วโลหะ (Contact)	0.3 mm.
ขนาด Finger ของลวดลายขั้วโลหะ (Metal)	0.5 mm.
ขนาด Busbar ของขั้วโลหะ (Contact)	1.5 mm.
ขนาด Busbar ของลวดลายขั้วโลหะ (metal)	1.7 mm.
ระยะระหว่าง Finger ลวดลายขั้วโลหะ (Metal)	1.8 mm.
ระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงปลายสุด Finger ของลวดลายขั้วโลหะ (Metal)	0.04 mm.
ระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงขอบเซลล์	0.06 mm.

สำหรับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอนในโครงการนี้ เพื่อความสะดวกเราได้ทำการออกแบบมาสก์ต้นแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อน เมื่อได้โครงร่างของเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจึงมาวัดลงในกระดาษตาราง หรือกระดาษกราฟ จากนั้นจึงใช้ไมโครมิเตอร์ (Microcutter) ตัดลวดลายถ่ายทอดไปบนแผ่นไมลาร์ลามิเนต (Mylar laminate) ก่อนจึงนำไปถ่ายภาพย่อส่วนด้วยกล้องย่อส่วน (Reduction Camera) ซึ่งมาสก์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.44

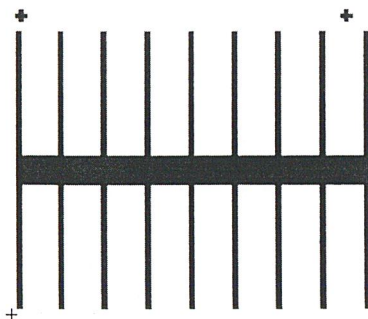


รูปที่ 3.44 Layout Area มาสก์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง
เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบ

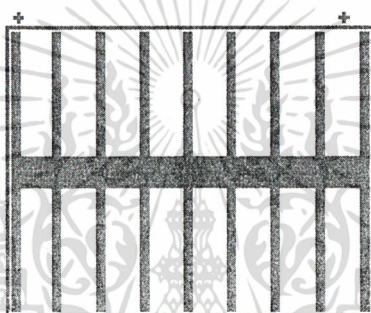
มาสก์ และเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง แสดงได้รูปที่ 3.45



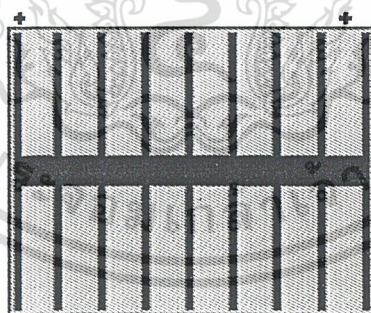
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น Mask#1 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ (N-region Mask) ซึ่งจะมีการนำไปใช้



Mask#2 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วโลหะ (Contact Mask)



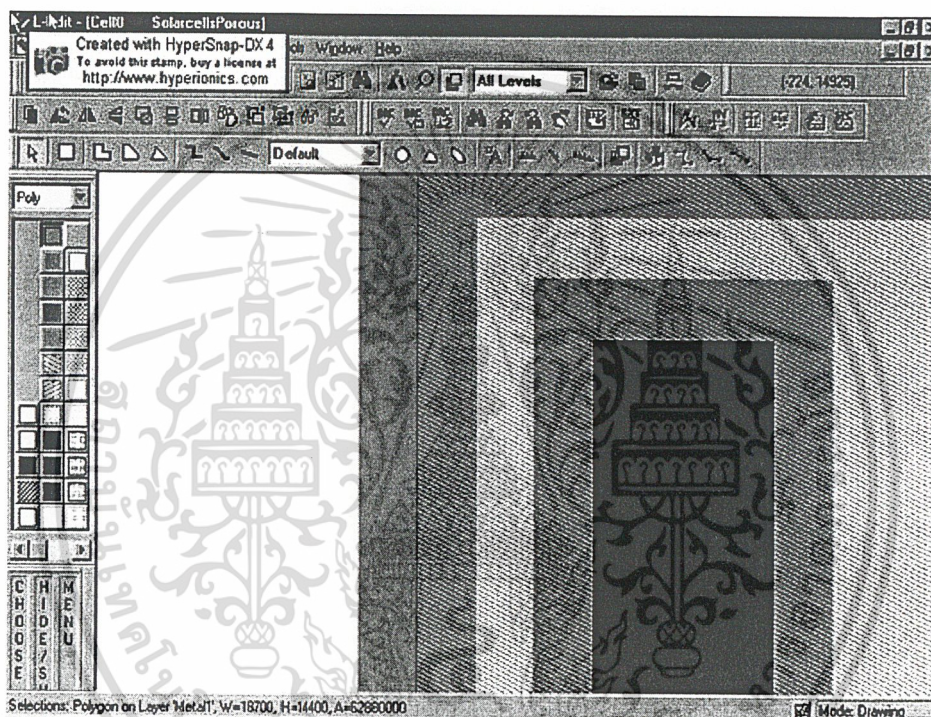
Mask#3 สำหรับทำลวดลายขั้วโลหะ (Metal Mask)



รูปที่ 3.45 รูปมาสก์ และเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

มาส์กของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้ออกแบบมาสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์ซซิลิคอน กรณีที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มาส์กที่ 2 จะเป็นขั้วโลหะ (contact mask) และส่วนมาส์กที่ 3 จะเป็นลวดลายขั้วโลหะ (metal mask) กรณีที่ใช้พอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มาส์กที่ 2 จะเป็นลวดลายขั้วโลหะ (metal mask) และส่วนมาส์กที่ 3 จะเป็นพอร์ซซิลิคอนมาส์ก (porous mask) ซึ่งมาส์กนี้จะไม่ช่วยป้องกันอะลูมิเนียมของลวดลายขั้วโลหะไม่ให้ถูกกัดกร่อนขณะทำพอร์ซซิลิคอนที่มัก เนื่องจาก

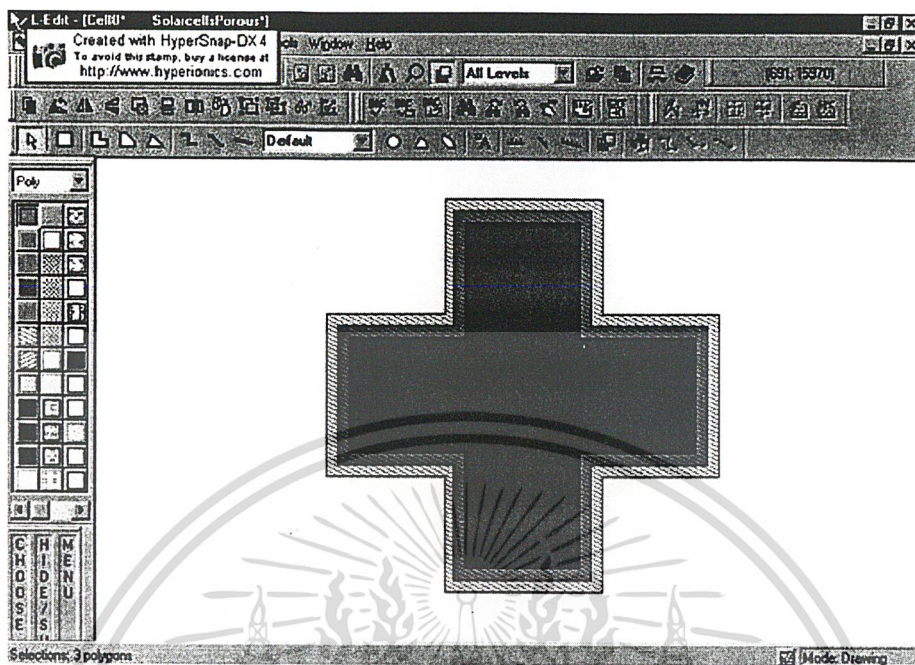
มาสก์ที่ 3 ได้ออกแบบมาให้ overlap มาสก์ที่ 2 อยู่ด้านละ 100 μm . อีกทั้งยังมีการ overlap ในส่วนที่อาจจะเกิดการลัดวงจรของรอยต่อพี-เอ็นเอเอาไว้ด้วย ดังนั้นมาสก์ที่ได้ทำการออกแบบไว้นี้จึงเหมาะสำหรับการทำพอร์สซิลิคอน แต่ในกรณีที่เราไม่ได้ทำพอร์สซิลิคอน มาสก์ที่ถูกออกแบบมาให้ overlap ก็จะทำหน้าที่ช่วยป้องกันไม่ให้ฝุ่นละออง หรือสิ่งแปลกปลอมลงไปติดค้างในร่องเมื่อนำออกไปใช้งาน การออกแบบมาสก์ที่ได้ทำการ overlap ในมาสก์ที่ 2 และมาสก์ที่ 3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 การ overlap ของมาสก์ที่ 2, มาสก์ที่ 3 และส่วนที่อาจเกิดการลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากการทำเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งนี้อาศัยการใช้มาสก์ทั้งสิ้น 3 มาสก์ จึงต้องมีการปรับแต่งมาสก์ (alignment) ในมาสก์ที่ 2 และมาสก์ที่ 3 เพื่อให้ง่ายต่อการปรับแต่งมาสก์ในการใช้มาสก์ที่ 2 และมาสก์ที่ 3 เราจึงได้ออกแบบรูปแบบในการปรับแต่ง (mask pattern alignment) ขึ้น โดยใช้รูปกากบาทเล็กซ้อนอยู่ในรูปกากบาทใหญ่ ที่มีแต่ละด้านอยู่เกยกัน (overlap) ด้านละ 10 μm . ซึ่งเล็กกว่าการ overlap ที่เล็กที่สุดในมาสก์ที่ใช้ในกระบวนการสร้าง จึงทำให้สะดวกในการปรับแต่ง เพียงปรับให้รูปกากบาทเล็กซ้อนอยู่ในรูปกากบาทใหญ่ได้ ส่วนอื่นๆ ทั้งหมดที่อยู่ในเซลล์ก็ถูกปรับแต่งไปด้วยเช่นกัน สำหรับรูปแบบการปรับแต่ง (mask pattern alignment) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.47 รูปแบบการปรับซ้อนมาสก์ (Mask Pattern Alignment)



รูปที่ 3.48 รูปแบบการปรับซ้อนมาสก์ (Mask Pattern Alignment) ในกระบวนการสร้าง

จากการออกแบบลายขั้วโลหะทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง พารามิเตอร์สำคัญซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการออกแบบ คือ พื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์ (หมายถึง พื้นที่ของเซลล์ทั้งหมดเมื่อหักจากลายขั้วโลหะซึ่งบังแสง) ดังแสดงได้ในตารางที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 พื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆที่ได้จากการออกแบบ

เซลล์	พื้นที่รับแสงจริง
เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ	1.8432 cm ²

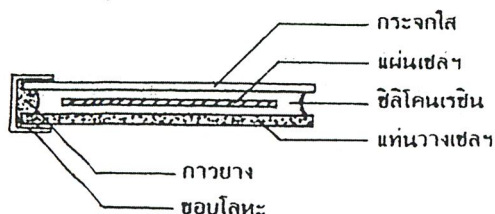
3.12 การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (Electroless nickel plating)

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

3.13 การเก็บบรรจุ

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องใช้งานกลางแจ้ง จึงต้องมีการเก็บบรรจุที่ดี เพื่อป้องกันฝุ่นละออง, ความชื้น และสารเคมี ไม่ให้เข้าไปรบกวนการทำงานของเซลล์ได้ นอกจากนี้แผงเซลล์ยังต้องมีความแข็งแรง ทนทานต่อความเสียหายทางเชิงกลที่อาจจะเกิดขึ้นได้ จากสาเหตุต่างๆ เช่น ลูกเห็บ, นก, ของแข็งที่ตกลงมากระทบแผงเซลล์ และอื่นๆ

ในการเก็บบรรจุจะใช้แท่นวางแผ่นเซลล์ที่เป็นฉนวนไฟฟ้า มีความแข็งแรงและทนความร้อนได้ดี อาจจะใช้เป็นพวกแผ่นกระจกหรืออิพ็อกซี่ ฯลฯ แผ่นปิดด้านหน้าควรใช้กระจกใสผิวเรียบ บางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงผ่านกระจกไปกระทบเซลล์ ระหว่างกระจกด้านหน้ากับแท่นวางแผ่นเซลล์ จะเป็น ซิลิโคนเรซินแบบใส ที่มีลักษณะยืดหยุ่นได้คล้ายยาง มีการดูดกลืนแสงน้อย ซึ่งจะช่วยป้องกันแผงเซลล์จากฝุ่นละอองและความชื้น ทั้งยังช่วยให้แผงเซลล์มีความแข็งแรงทนทานด้วย ที่บริเวณขอบแผงเซลล์จะใช้กาวยางและกรอบโลหะที่เป็นอะลูมิเนียมติดเอาไว้เพื่อกันน้ำ และเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผงเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 3.49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรูปที่ 3.49 การเก็บบรรจุเซลล์แสงอาทิตย์ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

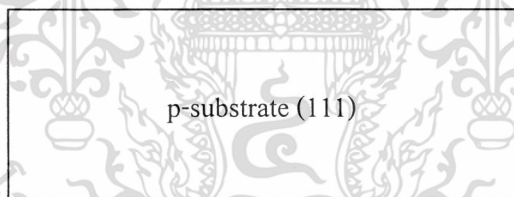
การทดลอง

4.1 การทดลองการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้เราได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นทั้งหมด 8 เซลล์ ด้วยพารามิเตอร์ที่ต่างกัน คือ การใช้เวลาในการขับลึก (drive in) ที่แตกต่างกัน 4 ค่าเวลา ได้แก่ การขับลึก 20 นาที จำนวน 2 เซลล์, การขับลึก 30 นาที จำนวน 2 เซลล์, การขับลึก 40 นาที จำนวน 2 เซลล์ และการขับลึก 50 นาที จำนวน 2 เซลล์ เพื่อหากระบวนการสร้างที่ดีที่สุด และนำกระบวนการนี้มาสร้างเซลล์ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดลองต่อไปโดยกระบวนการสร้างสามารถแสดงได้ดังนี้

4.1.1 แบบใช้ SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (SiO_2 Anti-Reflection Coating)

1. **Initial wafer** แผ่นผลึกเริ่มต้นที่เป็นฐานรอง (substrate) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ผลึกซิลิคอนชนิดพี ที่มีระนาบหรือ Orientation (111), ความหนาของแผ่น 300 μm ., มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นประมาณ 76 mm., สภาพต้านทานในช่วง 0.1-0.3 $\Omega\text{-cm}$.



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

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- Ultrasonic ใน DI เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- คั้มในกรดไนตริก (HNO_3) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- คั้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- คั้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

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

การ Slice Etching

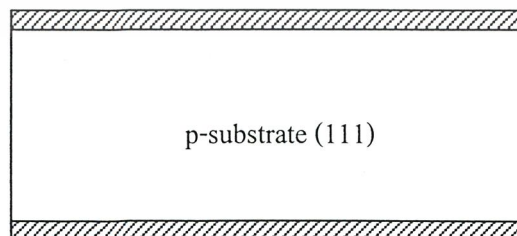
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

3. **First Oxidation** เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นครั้งแรก ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (Diffusion mask of impurity atoms) ในขั้นตอนของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในส่วนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้อุณหภูมิเตา $1,000^\circ C$, อุณหภูมิน้ำ $90^\circ C$ ให้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $5,500 \text{ \AA}$

Oxidation

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

▨ SiO_2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

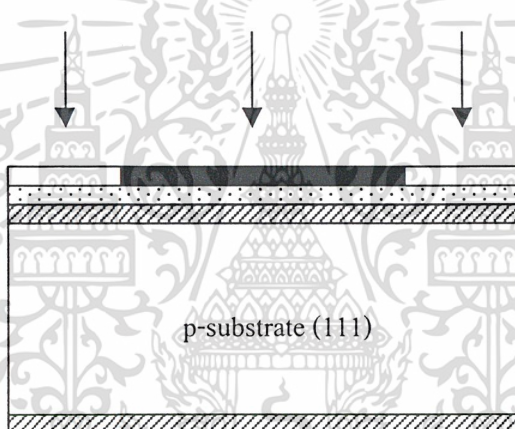
4. **Photo etching for n-region** เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือโฟโต้เอตซิงค์ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เรียกว่า N-region mask

Photolithography Mask1 (N-region)

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



▨ SiO₂

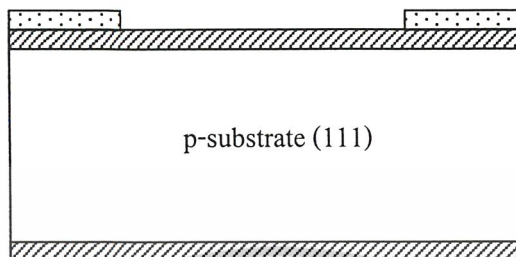
▤ Way coat





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

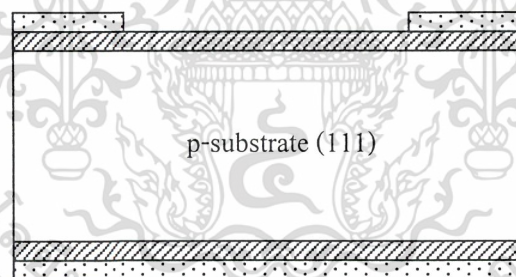
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  SiO₂
-  Way coat



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



-  SiO₂
-  Way coat

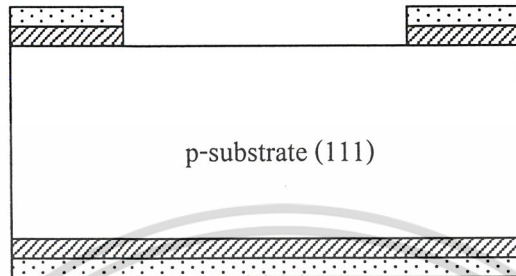


การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

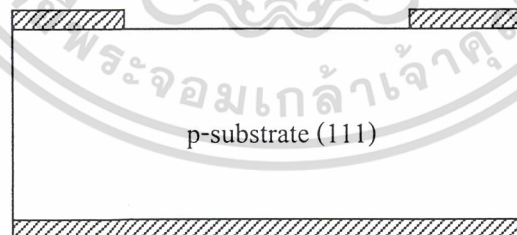
-  SiO₂
-  Wax coat



กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄ conc.) แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄ conc.) แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

-  SiO₂



การทำความสะอาดผิวหน้า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 • เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Slice Etching

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

5. **N-region Diffusion** เป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เข้มข้น (N^+) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณน้อยกว่า $1 \mu m$.

กระบวนการ Pre-deposition

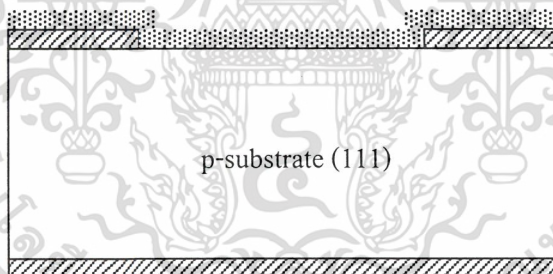
- หยดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส Spin on substrate ที่ 3,000 rpm. เวลา 20 วินาที
- Hot bake ที่ $150^\circ C$ เวลา 10 นาที



SiO_2






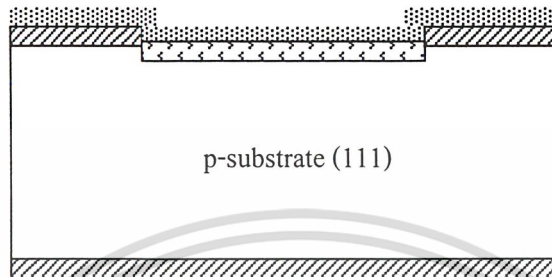
สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส



- Phosphorus pre-deposition ที่ $950^\circ C$, N_2 1,000 cc./min. เวลา 15 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

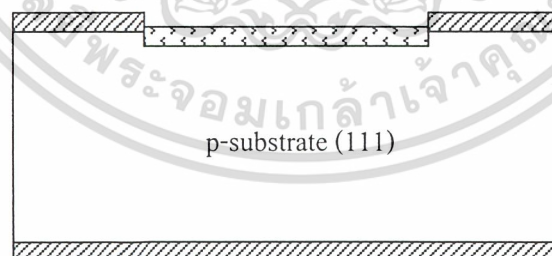
-  SiO_2
-  สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส
-  n^+ region



การ Slice Etching

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

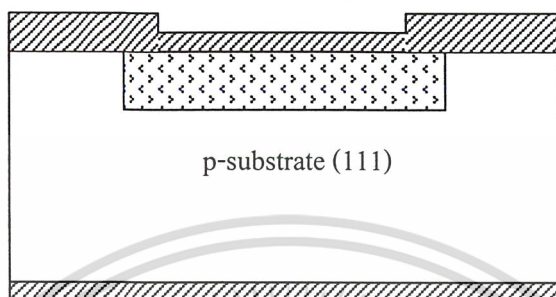
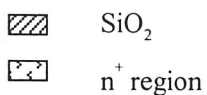
-  SiO_2
-  n^+ region



กระบวนการ Drive-in

- Phosphorus drive-in ที่ $1,000^\circ\text{C}$, O_2 1,200 $^\circ\text{C}$ cc./min. (Dry), O_2 1,000 cc./min. (Wet)
เวลา 20 นาที (Dry 5 min.-Wet 10 min.-Dry 5 min.), ได้ออกไซด์หนา 1,678 Å
เวลา 30 นาที (Dry 10 min.-Wet 10 min.-Dry 10 min.), ได้ออกไซด์หนา 1,569 Å
เวลา 40 นาที (Dry 40 min.), ได้ออกไซด์หนา 725 Å
เวลา 50 นาที (Dry 50 min.), ได้ออกไซด์หนา 750 Å

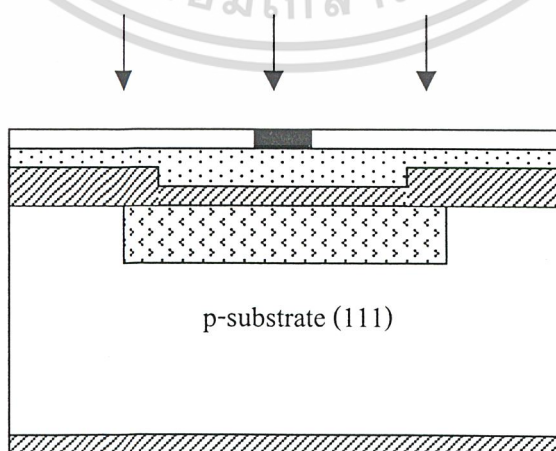
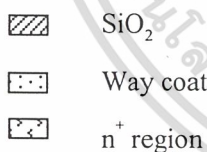
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

Photolithography Mask2 (Contact)

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Develop ฟิล์ม โดย

จุ่มใน Xylene ($C_6H_4(CH_3)_2$) แก้วที่ 1 เวลา 90 วินาที

จุ่มใน Xylene ($C_6H_4(CH_3)_2$) แก้วที่ 2 เวลา 90 วินาที

จุ่มใน Isopropyl Alcohol ($(CH_3)_2CHOH$) แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที

จุ่มใน Isopropyl Alcohol ($(CH_3)_2CHOH$) แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที

จุ่มใน Isopropyl Alcohol ($(CH_3)_2CHOH$) แก้วที่ 3 เวลา 30 วินาที


จุ่มใน DI แก้วที่ 1

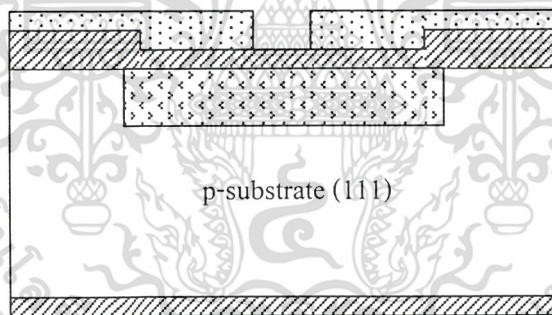
จุ่มใน DI แก้วที่ 2

เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

 SiO_2

 Way coat

 n^+ region






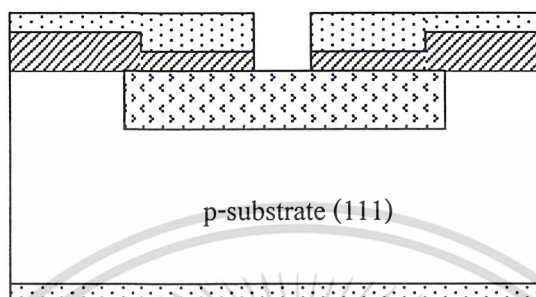
- อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ เวลา 10 นาที (Post bake)

การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer ($HF47\%: NH_4F$)
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

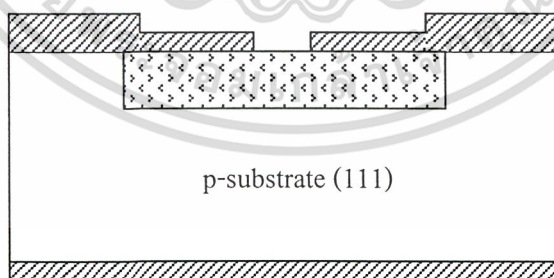
-  SiO₂
-  Way coat
-  n⁺ region



กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄ conc.) แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄ conc.) แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน N₂

-  SiO₂
-  n⁺ region



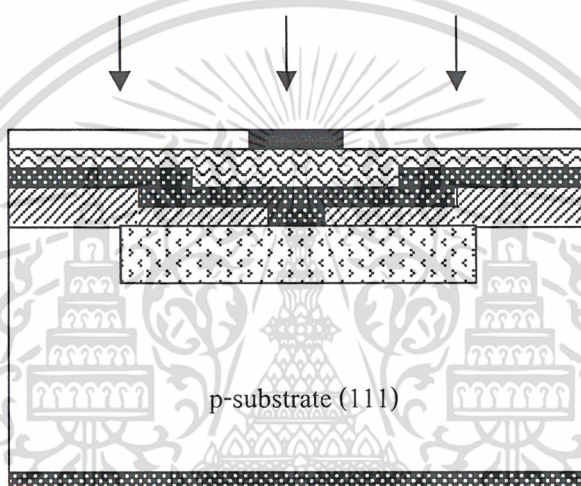
การทำความสะอาดผิวหน้า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


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

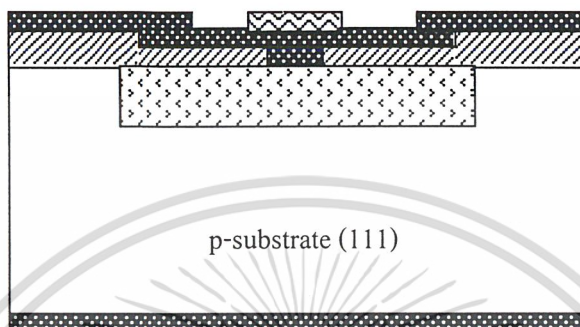
- ☐ SiO₂
- ☐ n⁺ region
- ☐ Al
- ☐ Az





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

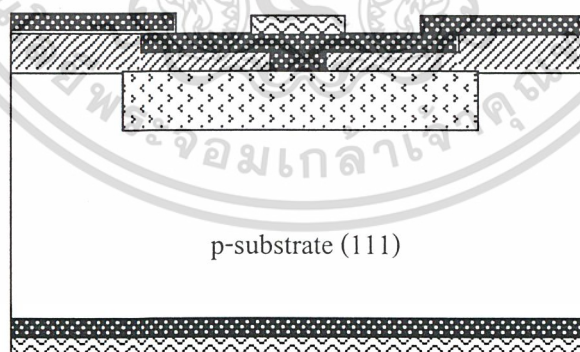
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



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

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



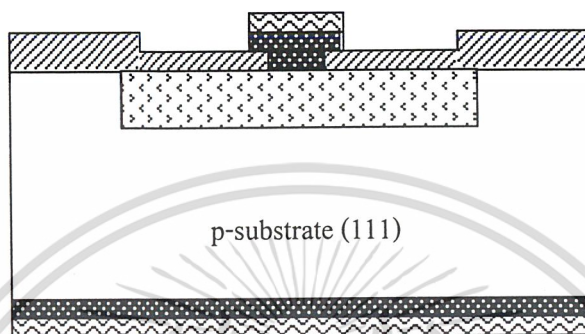
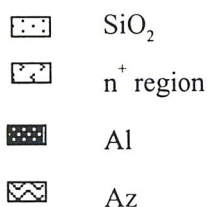
การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

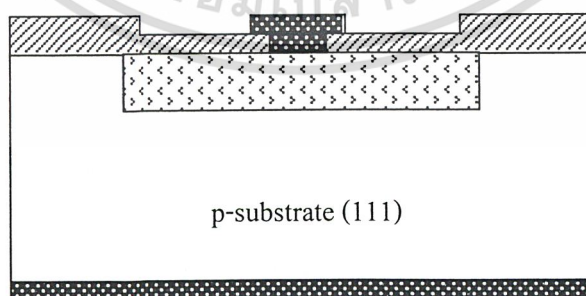
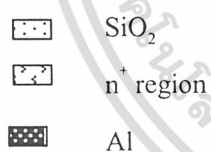
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงใน Acetone (CH₃COCH₃) แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone (CH₃COCH₃) แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ Sintering

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

- Sintering ที่อุณหภูมิ 500°C Dry N₂ 1,000 cc./min. เวลา 12 นาที

กระบวนการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (Electroless nickel plating)

ทำการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า เพื่อให้สามารถนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปบัดกรีใช้งานต่อไปได้

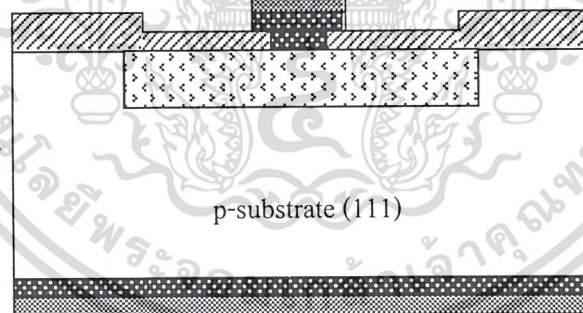
- Electroless nickel plating เวลา 10 นาที
- นำเซลล์ไปอบความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 160°C เวลา 4 ชั่วโมง จึงนำไปบัดกรีติดตั้งบนฐานรอง

SiO₂

n⁺ region

Al

Ni



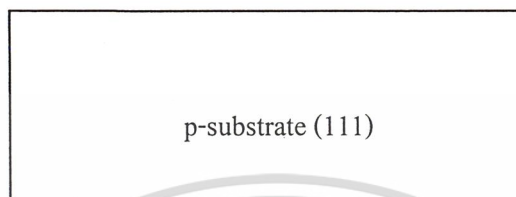
4.1.2 แบบใช้ Porous Silicon เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (Porous Anti-Reflection Coating)

สำหรับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอน นั้น เราไม่ได้ทำการทดลองสร้างขึ้น เนื่องจากการทำพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการ Stain Etching นั้น เรายังไม่ได้ Uniformity ของพอร์สซิลิคอนที่ดีพอ ยังต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลที่มากกว่านี้ และมีการทดลองใช้สารละลายกรดในสูตรอื่นๆ อีก เพื่อหาการเกิดพอร์สซิลิคอนที่ได้ Uniformity ที่ดีที่สุด เราจึงได้แสดงแนวทางในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไปด้วยวิธีการนี้ ซึ่งกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอน สามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. **Initial wafer** แผ่นผลึกเริ่มต้นที่เป็นฐานรอง (substrate) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ผลึกซิลิคอนชนิดที่ ที่มีระนาบหรือ Orientation (111), ความหนาของแผ่น 300 μm ., มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นประมาณ 76 mm., สภาพต้านทานในช่วง 0.1-0.3 $\Omega\text{-cm}$.



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

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

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

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

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 10% เวลา 10 วินาที

- จุ่มใน DI แก้วที่ 1

- จุ่มใน DI แก้วที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

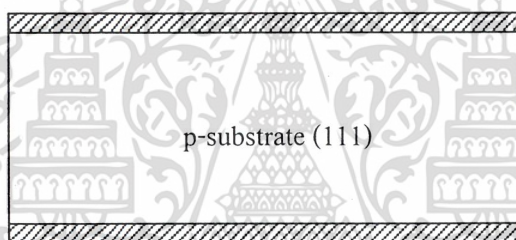
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

3. **First Oxidation** เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นครั้งแรก ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (Diffusion mask of impurity atoms) ในขั้นตอนของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในส่วนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้อุณหภูมิเตา $1,000^\circ C$, อุณหภูมิน้ำ $90^\circ C$ ได้รับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $5,500 \text{ \AA}$

Oxidation

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

▨ SiO_2





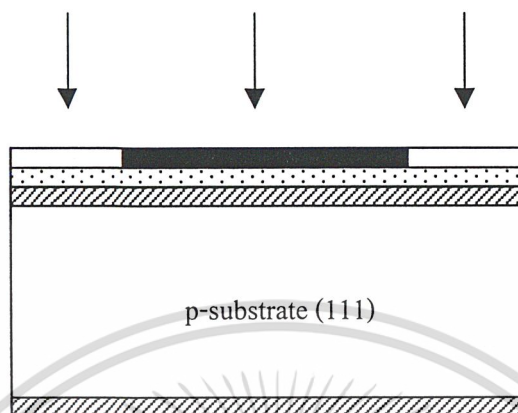
4. **Photo etching for n-region** เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโวลิตลิโทกราฟี (Photolithography) หรือโฟโต้เอตซิงค์ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เรียกว่า N-region mask

Photolithography Mask1 (N-region)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  SiO₂
-  Way coat



- Develop ฟิล์์ม โดย

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

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

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



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

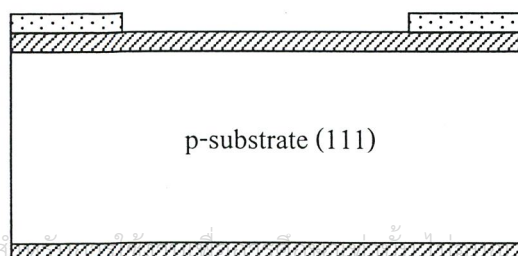
จุ่มใน Isopropyl Alcohol ((CH₃)₂CHOH) แก้วที่ 3 เวลา 30 วินาที

จุ่มใน DI แก้วที่ 1

จุ่มใน DI แก้วที่ 2

เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

-  SiO₂
-  Way coat

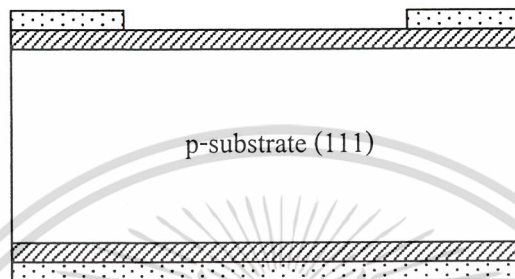


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

▨ SiO₂

⋯ Way coat

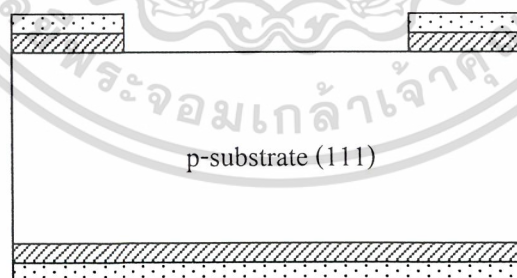


การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

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

▨ SiO₂

⋯ Way coat

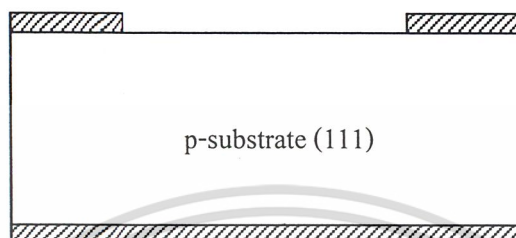


กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄ conc.) แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄ conc.) แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- ▨ SiO_2



การทำความสะอาดผิวหน้า

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

การ Slice Etching

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

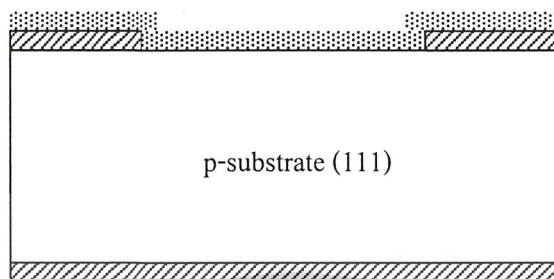
5. **N-region Diffusion** เป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เข้มข้น (N^+) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณน้อยกว่า $1 \mu m$.

กระบวนการ Pre-deposition

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

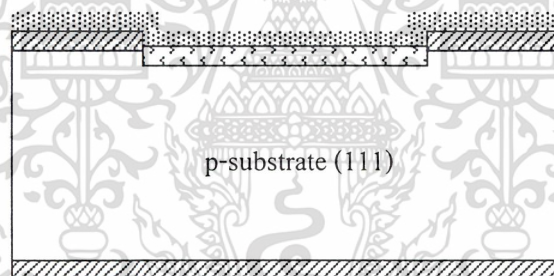
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  SiO₂
-  สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส



- Phosphorus pre-deposition ที่ 950°C, N₂ 1,000 cc./min. เวลา 15 นาที



-  SiO₂
-  สารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส
-  n⁺ region

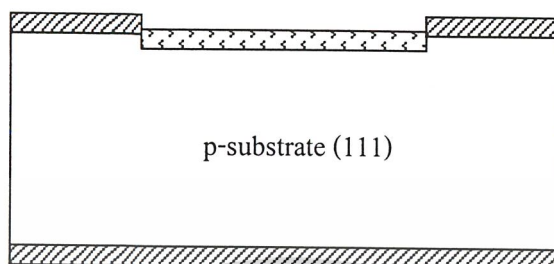


การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 5% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

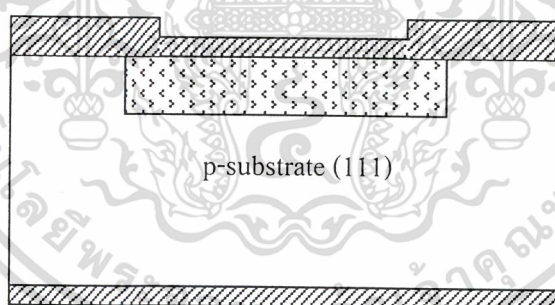
-  SiO₂
 n⁺ region



กระบวนการ Drive-in

- Phosphorus drive-in ที่ 1,000°C, O₂ 1,200°C cc./min. (Dry), O₂ 1,000 cc./min. (Wet)
 เวลา 40 นาที (Dry 40 min.), ได้ออกไซด์หนา 745 Å
 เวลา 50 นาที (Dry 50 min.), ได้ออกไซด์หนา 750 Å

-  SiO₂
 n⁺ region



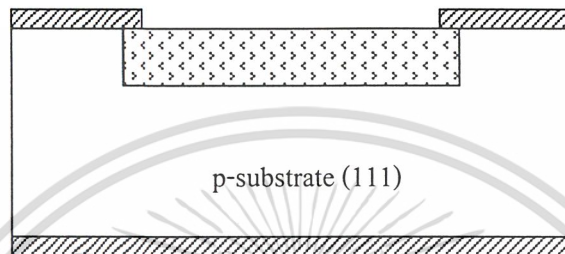
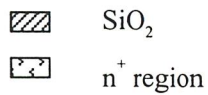
6. **Metallization** เป็นการสร้างชั้นของโลหะ (อะลูมิเนียม) ชั้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ ปกติชั้นของโลหะนี้ได้แก่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีความหนา 1 μm. เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่บางกรณีอาจใช้ อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของซิลิคอนราว 2% เพื่อป้องกันการเกิด Al Spike ที่ขั้วสัมผัส

การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

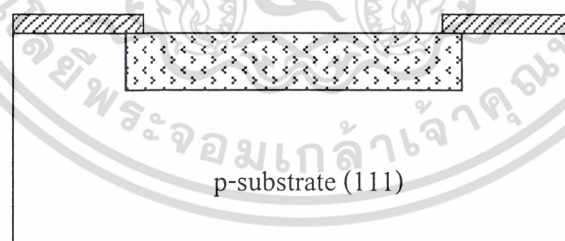
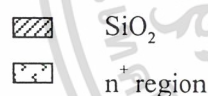
- จุ่มในสารละลาย Buffer (HF47%:NH₄F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ● จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)






หมายเหตุ ซิลิคอน ไดออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกจะยังคงมีอยู่ เพราะซิลิคอน ไดออกไซด์ด้านหน้าจะบางกว่าที่ด้านหลัง ดังนั้น เวลาทำการสกัดชั้นออกไซด์จะดูว่าออกไซด์ที่ด้านหน้าหมดก็พอ เพื่อป้องกันการสกัดออกไซด์ที่ด้านข้างของขั้วสัมผัส (Side etching) ส่วนออกไซด์ที่ด้านหลังจะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az) ทาเป็นตัวป้องกันที่ด้านบนแล้วจึงทำการสกัดออกไซด์ที่ด้านหลังออก ก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศ

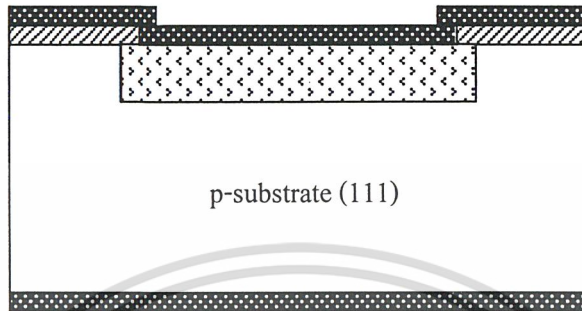


การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al



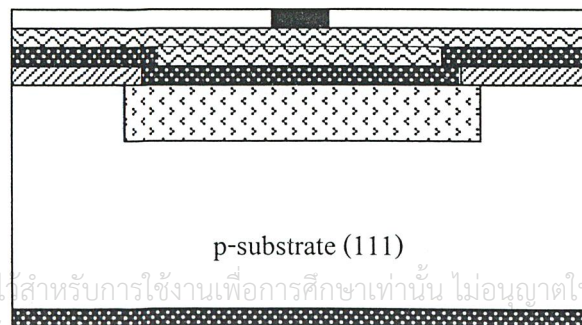
หมายเหตุ ทำการเคลือบอะลูมิเนียมทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นผลึก

7. **Photo etching for Metallization** เป็นการสกัดชั้นของอะลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน ให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ชั้นที่ 2 และเรียกว่า Metal Mask

กระบวนการ **Photolithography Mask2 (Metal Mask)**

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

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

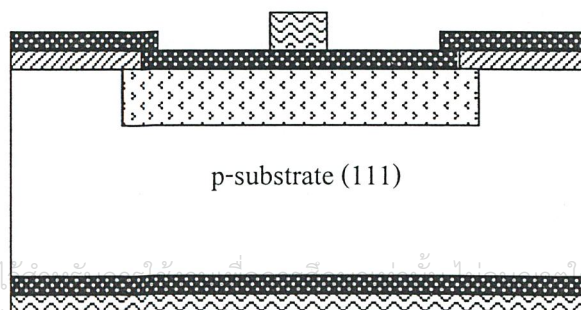
- Develop फिल्म โดย
 - จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 1
 - จุ่มใน DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

- ▣ SiO₂
- ▣ n⁺ region
- ▣ Al
- ▣ Az



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





- ▣ SiO₂
- ▣ n⁺ region
- ▣ Al
- ▣ Az

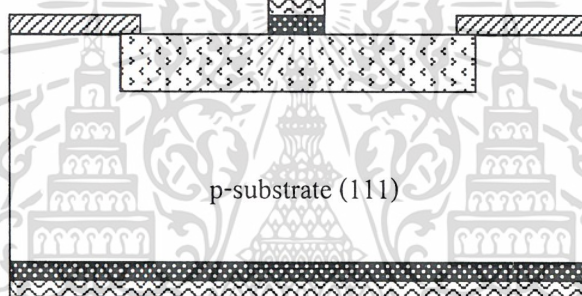


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-Etching)




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

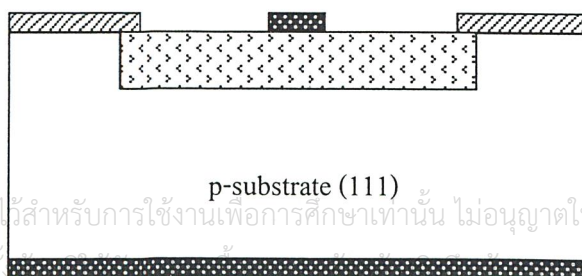
-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al
-  Az



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงใน Acetone (CH₃COCH₃) แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone (CH₃COCH₃) แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

-  SiO₂
-  n⁺ region
-  Al



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ Sintering

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

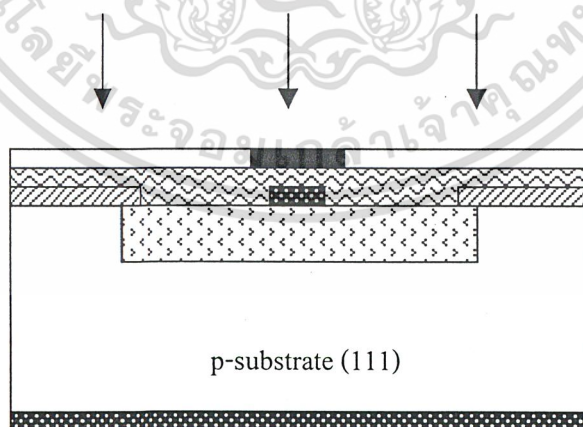
- Sintering ที่อุณหภูมิ 500°C Dry N₂ 1,000 cc./min. เวลา 12 นาที

8. **Photo etching for Porous Silicon** เป็นการทำให้พอร์ซิลิคอนที่ผิวหน้าของแผ่นผลึก เพื่อใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนของแสง (Anti-Reflection Coating) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์สำหรับทำพอร์ซิลิคอน (Porous silicon Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ชั้นที่ 3 เรียกว่า Porous silicon mask

กระบวนการ Photolithography Mask3 (Porous Silicon Mask)

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

- ▣ SiO₂
- ▣ n⁺ region
- ▣ Al
- ▣ Az



- Develop ฟิล์ม โดย

จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 1 เวลา 30 วินาที





จุ่มใน Az Developer แก้วที่ 2 เวลา 30 วินาที

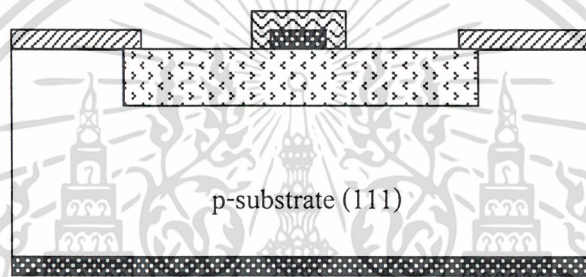
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุ่มใน DI แก้วที่ 1





จุ่มใน DI แก้วที่ 2

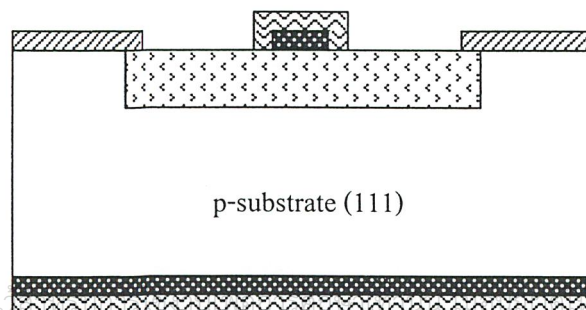
เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

-  SiO_2
-  n^+ region
-  Al
-  Az



- อบฟิล์มที่ $85^\circ C$ เวลา 20 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ $85^\circ C$ เวลา 20 นาที






-  SiO_2
-  n^+ region
-  Al
-  Az

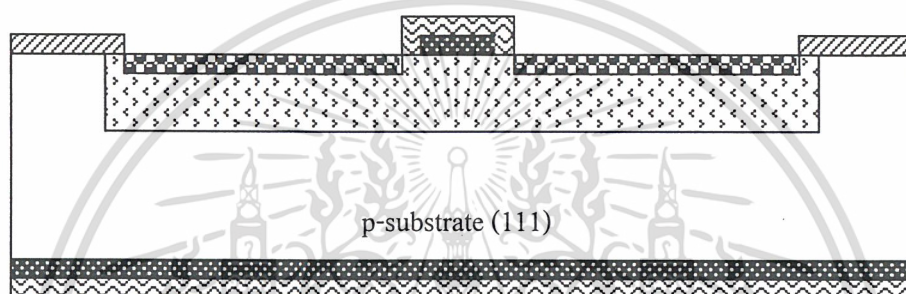


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำพอร์ซิลิคอน (Porous Silicon) ด้วยวิธี Stain etching





- ใช้สารละลายกรด HF49% 1 : HNO₃ 3 : DI 5

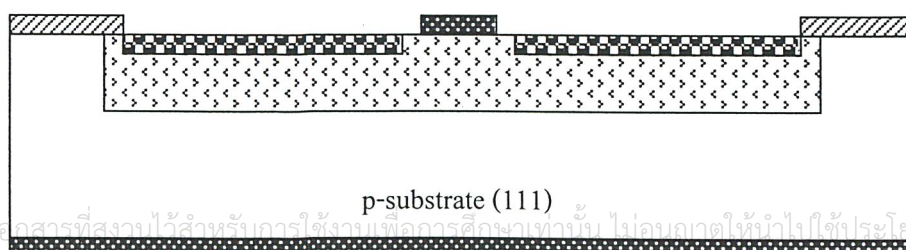
	SiO ₂
	n ⁺ region
	Al
	Az
	Porous Silicon



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงใน Acetone (CH₃COCH₃) แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone (CH₃COCH₃) แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

	SiO ₂
	n ⁺ region
	Al
	Porous Silicon








เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

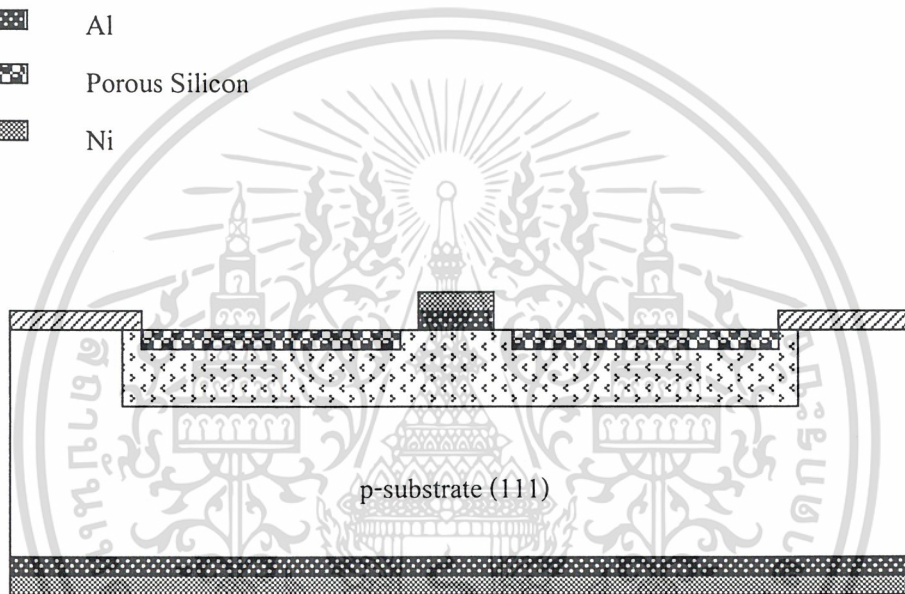
กระบวนการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (Electroless nickel plating)

ทำการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า เพื่อให้สามารถนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปบัตกรีใช้งานต่อไปได้

- Electroless nickel plating เวลา 10 นาที
- นำเซลล์ไปอบความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 160°C เวลา 4 ชั่วโมง จึงนำไปบัตกรีติดตั้ง

บนฐานรอง

-  SiO_2
-  n⁺ region
-  Al
-  Porous Silicon
-  Ni



หมายเหตุ ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น ทั้งแบบที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอน ไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เราไม่ได้ทำการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า เนื่องจากขาดสารแอมโมเนียมซิเตรท ทำให้การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้าไม่ประสบความสำเร็จ ไม่เกิดการ Deposit ของนิเกิลขึ้น และเกิดสารประกอบอื่นๆ ขึ้นแทน ทำให้ในการทดลองครั้งนี้ เราใช้กาวเงินแทนการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า ซึ่งการใช้กาวเงินจะมีข้อเสีย คือ จะมีความต้านทานที่มากกว่าการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า อีกทั้งการทาเงินที่มากเกินไปก็จะทำให้กาวเงินไปบดบังพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

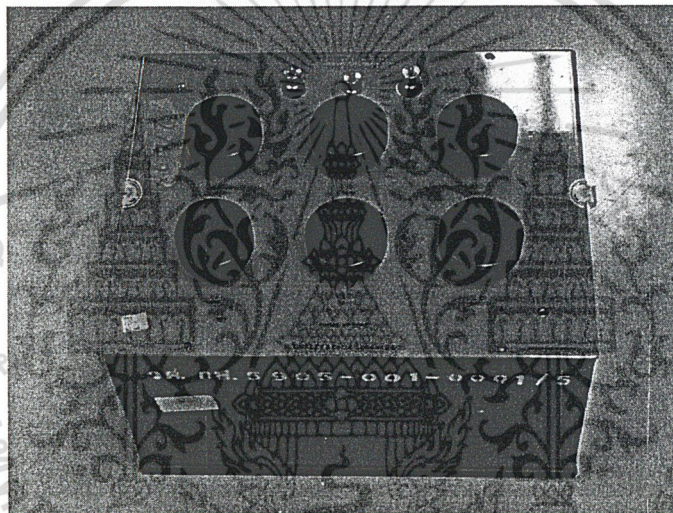
4.2 การวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

ทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากกระบวนการสร้างข้างต้น โดยคุณสมบัติ

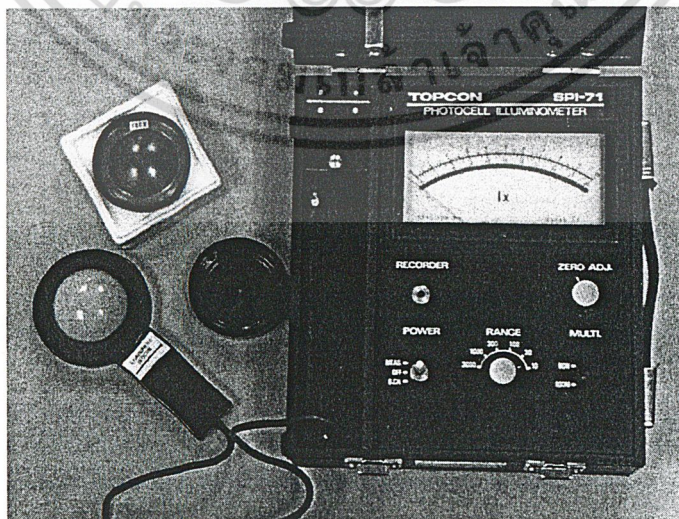
พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เราศึกษา คือ กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}), แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางอุดมคติ (P_0), ค่าความเข้มของกระแสต่อพื้นที่ (J_{sc}), กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) และแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) นอกจากนี้ยังต้องวัดค่าของแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และกระแสลัดวงจร (I_{sc}) ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เราศึกษา

ไฟฟ้าสูงสุด (I_m), แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์จ่ายได้จริง (P_m), ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.), ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η), การหาค่าความต้านทานอนุกรมภายใน (R_s), ผลของค่าความต้านทานอนุกรมภายในต่อเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{ss}) และผลของความเข้มแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ตัวต้านทานปรับค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1, เครื่องวัดความสว่างของแสง (Photocell Illuminator SPI 71) ดังแสดงในรูปที่ 4.2, ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM), ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และเครื่องกำเนิดแสง ในที่นี้เราใช้เครื่องฉายแผ่นใส แล้วทำการต่อกล่องที่มีกระจกด้านบนสำหรับให้แสงลอดผ่าน ทำการวัดความสว่างของแสงให้ได้ประมาณเท่ากับความสว่างของแสงอาทิตย์ขณะเที่ยงวัน คือ 125,000 lx. ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.4



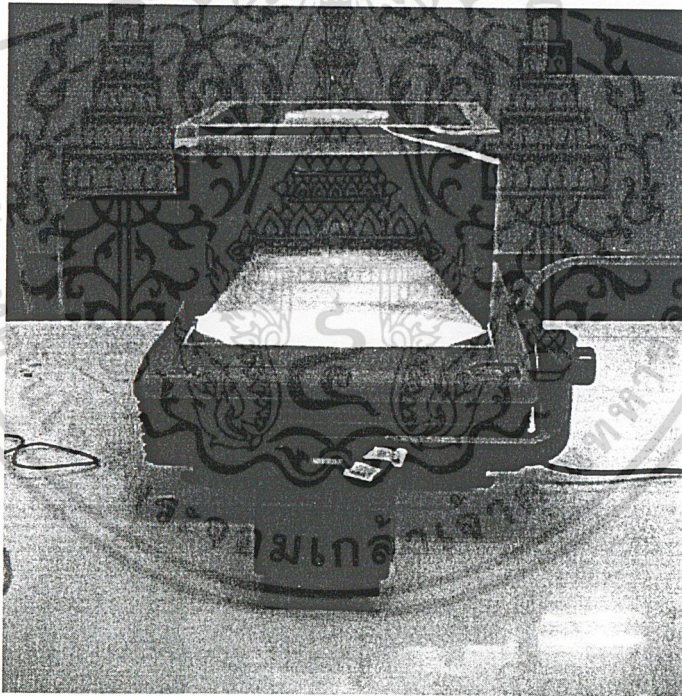
รูปที่ 4.1 ตัวต้านทานปรับค่าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.2 เครื่องวัดความสว่างของแสง (Photocell Illuminator SPI 71) ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



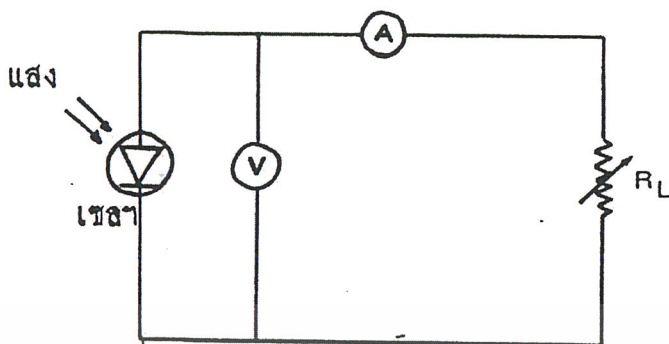
รูปที่ 4.3 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM)



รูปที่ 4.4 เครื่องกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลอง

นำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อตามวงจรในรูปที่ 4.5 เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ ขณะได้รับแสงจากเครื่องกำเนิดแสงที่มีความสว่างประมาณ 125,000 lx. ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการคำนวณ คือ 83.2 mW./cm^2 นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรการวัดคุณสมบัติของเซลล์ ขณะได้รับแสง

4.3 การศึกษาผลของการ Sintering

ทำการทดลองการ Sintering ที่อุณหภูมิ 450°C ที่เวลา 8 นาที และ 300°C ที่เวลา 8 นาที เพื่อศึกษาถึงผลของการ Sintering ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจาก เซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีความลึกของรอยต่อพี-เอ็นที่ตื้น ประมาณน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ดังนั้น การ Sintering ที่อุณหภูมิสูงเกินไป หรือใช้เวลานานเกินไป อาจทำให้เกิด Al- spike ได้ ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีรอยต่อพี-เอ็นเสียหาย ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีแรงดันเปิดวงจรของเซลล์ที่ลดต่ำลง การที่เซลล์ให้แรงดันเปิดวงจรที่ต่ำลง (ประมาณ 0.1-0.2 volts) สาเหตุสำคัญ คือ ความต้านทานขนานภายในเซลล์ต้องมีค่าไม่สูงพอ ทำให้แรงดันที่เซลล์ไปตกคร่อมอยู่ที่ความต้านทานนั้น ทำให้แรงดันเปิดวงจรของเซลล์น้อยลง

4.4 การหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์

ในการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายใน (R_s) นั้น เราได้ทำการทดลองโดยต่อวงจรให้ไบอัสตรงแก่เซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่เซลล์ไม่ได้รับแสง (ใช้กระดาษปิดตัวเซลล์ไว้) จ่ายแรงดันให้แก่เซลล์จนได้กระแสที่ไหลเท่ากับกระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}) ซึ่งแรงดันที่ทำให้เซลล์มีกระแสไหลเท่ากับกระแสขณะลัดวงจร เรากำหนดให้เท่ากับ V_a แล้วเราสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมภายใน R_s ได้จากสมการที่ 4.1

$$R_s = \frac{V_a - V_{oc}}{I_{sc}} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองเพื่อศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรมภายในต่อเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{ss}) เราได้ทำการทดลองวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีค่าความต้านทานอนุกรมภายในที่ต่างกัน คือ 0 โอห์ม, 1 โอห์ม, 2 โอห์ม, 3 โอห์ม, 4 โอห์ม, 5 โอห์ม, 8 โอห์ม, 20 โอห์ม และ 100 โอห์ม นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตลงบนกราฟเดียวกัน พร้อมทั้งดูผลของการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

4.6 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เราได้ทำการทดลองวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่เซลล์ได้รับความเข้มแสงที่ต่างกัน คือ 270,000 lx., 230,000 lx., 160,000 lx., 125,000 lx., 110,000 lx. และ 30,000 lx. นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตลงบนกราฟเดียวกัน พร้อมทั้งดูผลของกระแสตรง และแรงดันเปิดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น



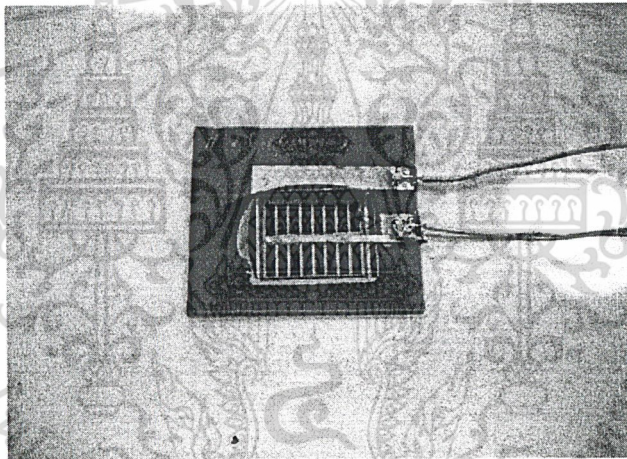
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

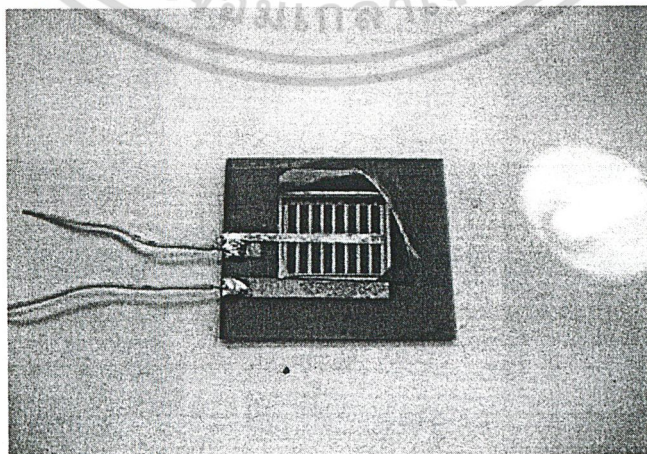
ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้เราได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นทั้งหมด 8 เซลล์ ด้วยพารามิเตอร์ที่ต่างกัน คือ การใช้เวลาในการขับเคลื่อน (drive in) ที่แตกต่างกัน 4 ค่าเวลา ได้แก่ การขับเคลื่อน 20 นาที จำนวน 2 เซลล์, การขับเคลื่อน 30 นาที จำนวน 2 เซลล์, การขับเคลื่อน 40 นาที จำนวน 2 เซลล์ และการขับเคลื่อน 50 นาที จำนวน 2 เซลล์ เพื่อหากระบวนการสร้างที่ดีที่สุด และนำกระบวนการนี้มาสร้างเซลล์ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดลองต่อไป รูปเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากกระบวนการสร้างสามารถแสดงได้ดังนี้

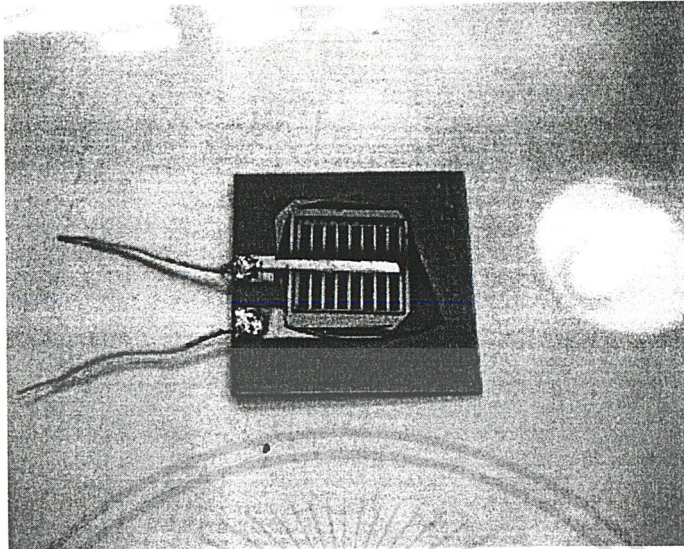


รูปที่ 5.1 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 2

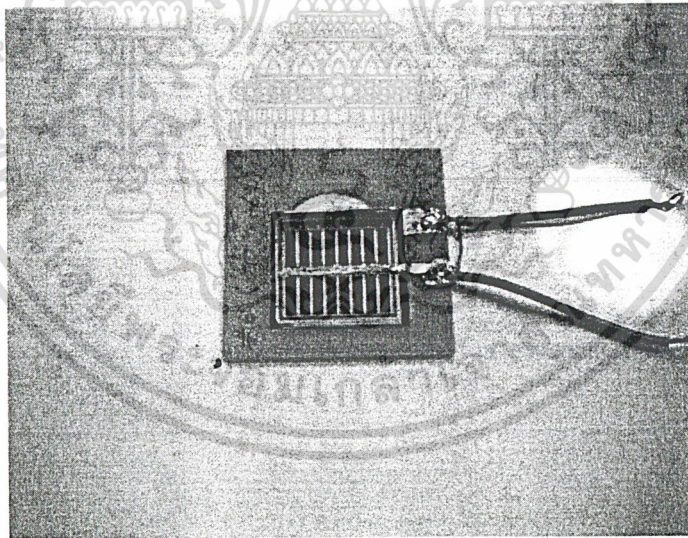


รูปที่ 5.2 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์เท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

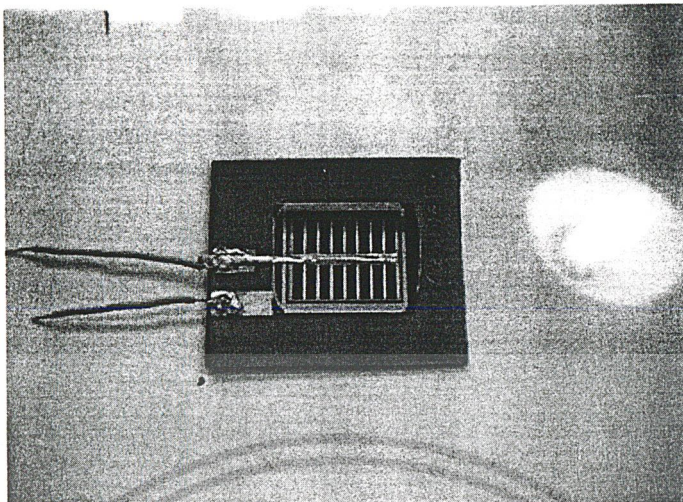


รูปที่ 5.3 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 5

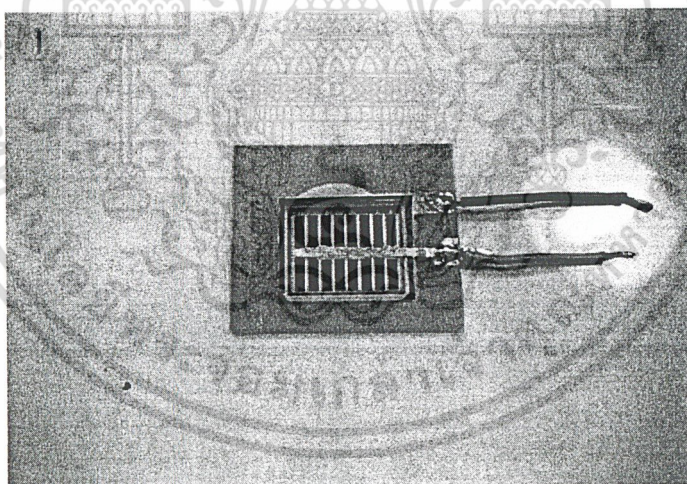


รูปที่ 5.4 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

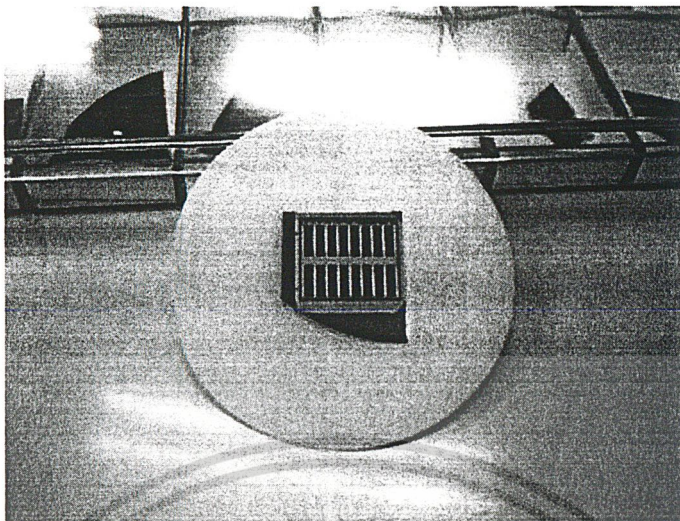


รูปที่ 5.5 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 7



รูปที่ 5.6 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



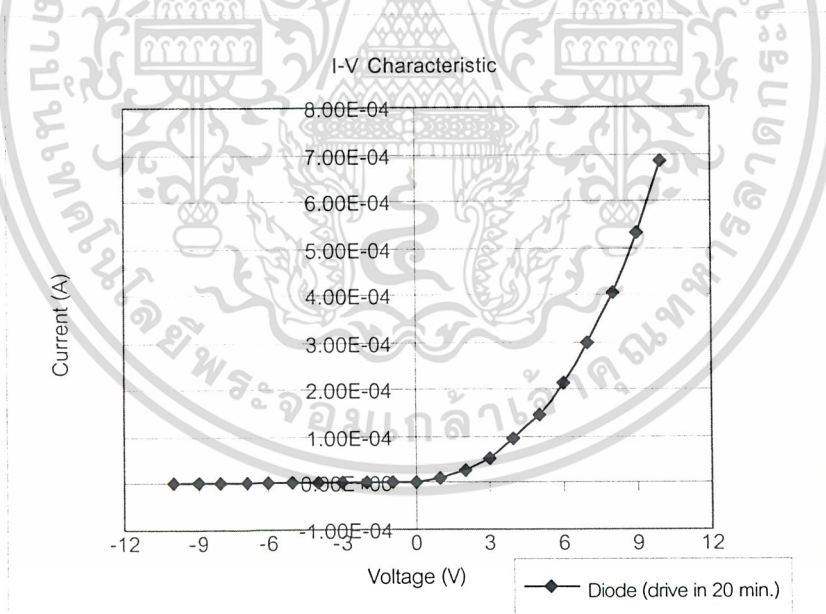
รูปที่ 5.7 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 4



รูปที่ 5.8 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 9

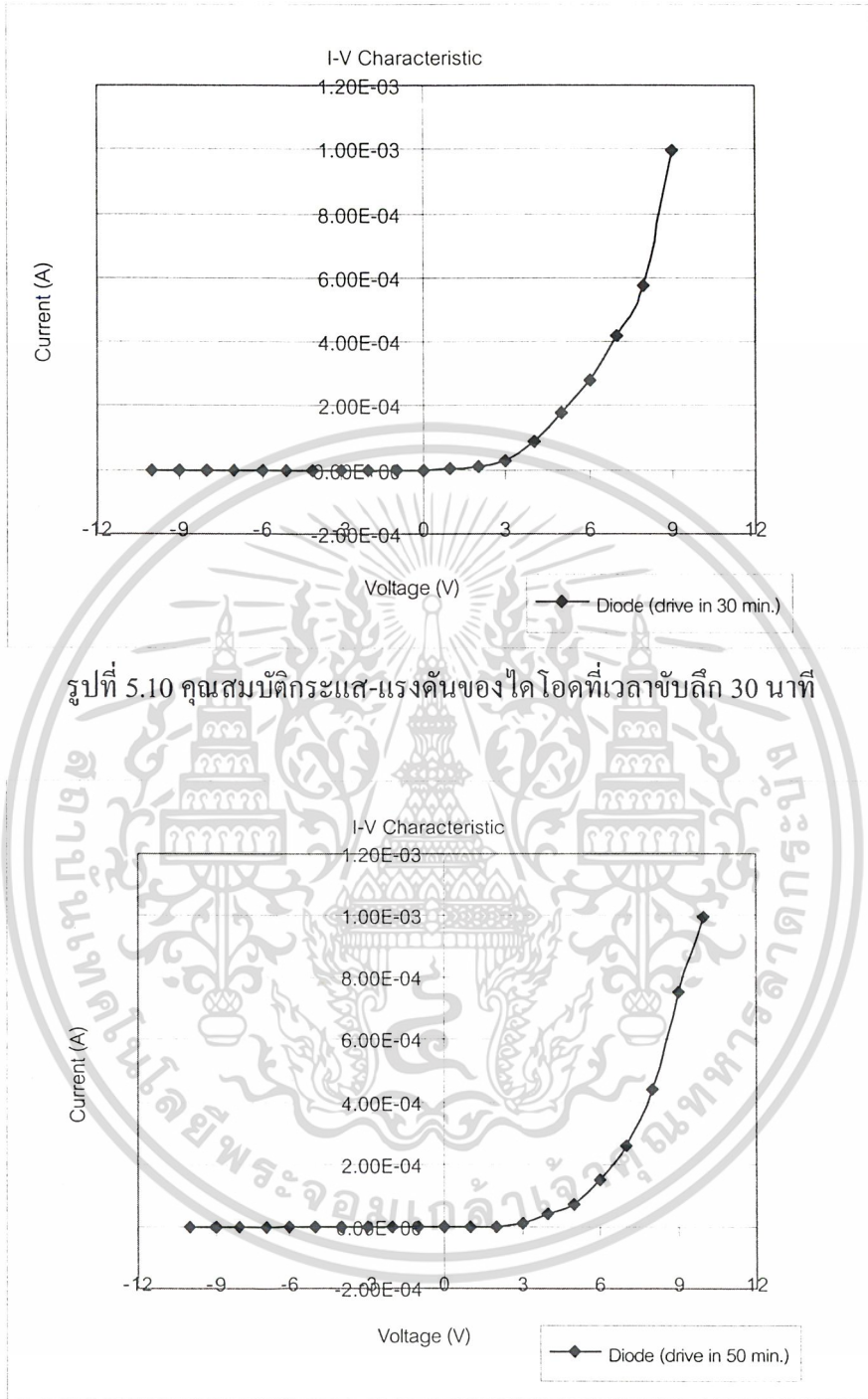
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อหากระบวนการสร้างที่ดีที่สุด แล้วใช้กระบวนการนี้สร้างเป็นเซลล์มาตรฐานขึ้นนั้น เราได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 8 เซลล์ ด้วยพารามิเตอร์ที่ต่างกัน คือ การใช้เวลาในการขับลิท (drive in) ที่แตกต่างกัน 4 ค่าเวลา ได้แก่ การขับลิท 20 นาที จำนวน 2 เซลล์, การขับลิท 30 นาที จำนวน 2 เซลล์, การขับลิท 40 นาที จำนวน 2 เซลล์ และการขับลิท 50 นาที จำนวน 2 เซลล์ ซึ่งการที่เราได้เปลี่ยนเวลาในการขับลิทนั้นก็เพื่อต้องการให้เซลล์ที่ได้มีค่าความลึกของรอยต่อพี-เอ็นที่ไม่ตื้น และลึกจนเกินไป เนื่องจากถ้าเซลล์มีความลึกของรอยต่อที่ตื้นเกินไปก็อาจเกิด AI-spike ขึ้นได้ แต่ถ้าเซลล์มีความลึกของรอยต่อมากเกินไปก็จะทำให้พลังงาน หรือ โฟตอนที่ได้รับจากพลังงานแสงอาทิตย์สูญเสียไปก่อนที่จะถึงรอยต่อพี-เอ็นเช่นกัน จากการทดลองครั้งนี้ เราได้ทดลองสร้างไดโอดควบคู่ไปกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลาการขับลิทแตกต่างกัน ไดโอดที่สร้างขึ้นนี้เอาไว้เพื่อคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น โดยการนำไปวัดคุณสมบัติของกระแส และแรงดันของไดโอด แล้วพิจารณาจากกราฟ เพื่อเป็นการง่ายในการสร้าง ไดโอดที่เราสร้างขึ้นนี้จึงไม่ได้สร้างขั้วสัมผัส และลวดลายขั้วสัมผัส เพียงแต่ทำการได้ปแล้วนำไปโพรบคุณสมบัติเลย กราฟคุณสมบัติของ ไดโอดสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.9 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่เวลาขับลิท 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่เวลาขับลิก 30 นาที

รูปที่ 5.11 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่เวลาขับลิก 50 นาที

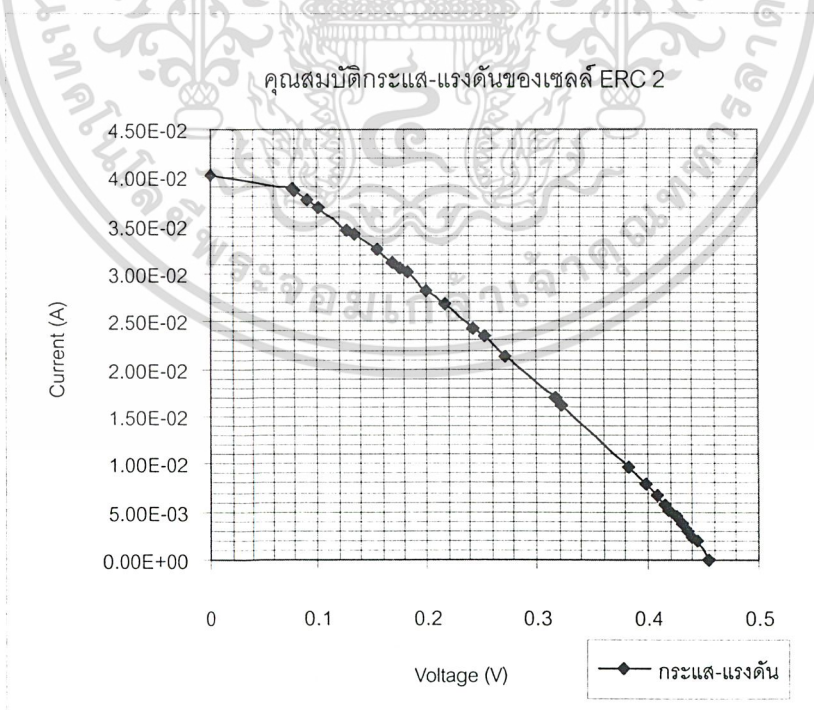
เมื่อพิจารณารูปคุณสมบัติของกระแส และแรงดันของไดโอด ที่เวลาการขับลิกต่างๆ กัน นั้น เราจะพบว่า ไดโอดทั้ง 3 ตัวนั้น มีแรงดันขีดเริ่มที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากเราไม่ได้ ทำขั้วให้กับไดโอด แต่คุณสมบัติของไดโอดทั้ง 3 ตัวนั้น ก็แสดงคุณสมบัติของการเกิดรอยต่อพี-เอ็น ขึ้น นั่นหมายถึง เซลล์แสงอาทิตย์ที่เราทำการสร้างขึ้นนั้น เราสามารถแพร่สารเจือลงไปในฐานรองได้

จากนั้นได้ทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากกระบวนการสร้างทั้ง 8 เซลล์ แสดงผลได้ดังนี้

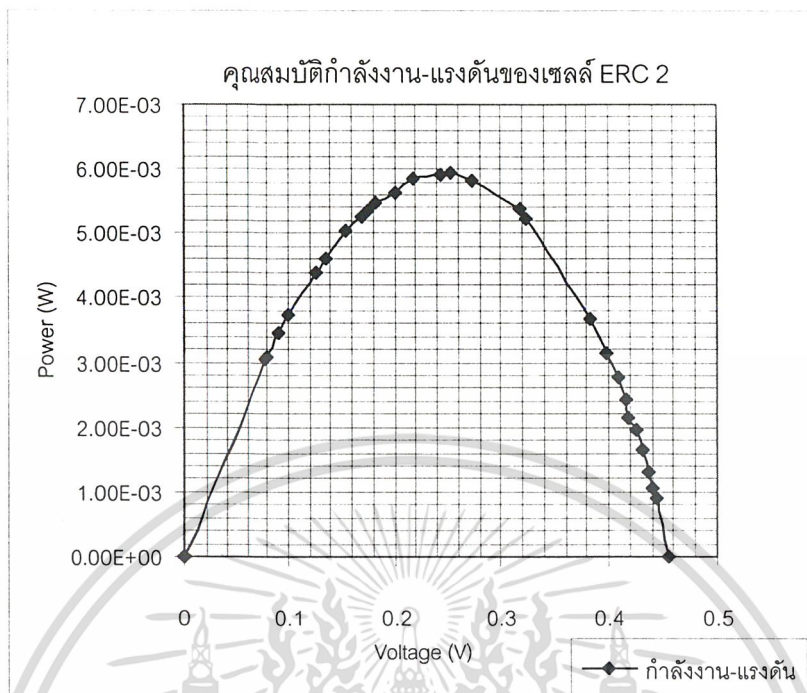
5.1.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 2 (ขั้วลิก 20 นาฬิ)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	40.3 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.455 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	18.3 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	21.864 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	23.5 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.253 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.95 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.3242
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	3.87697%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C

ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 1,600 Å



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.12 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 2
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



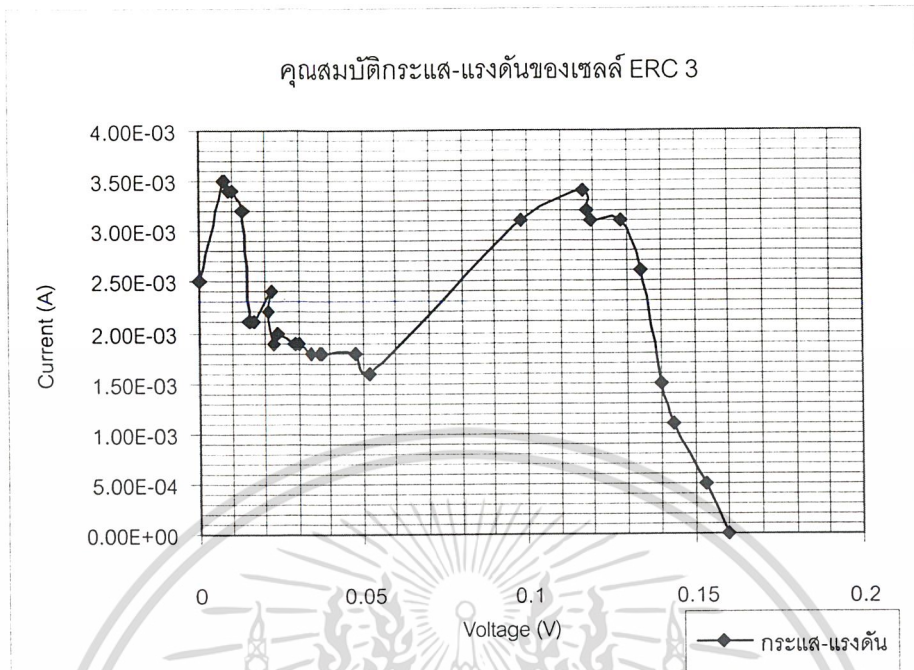
รูปที่ 5.13 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 2

5.1.2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 3 (ขั้วลิก 20 นาที)

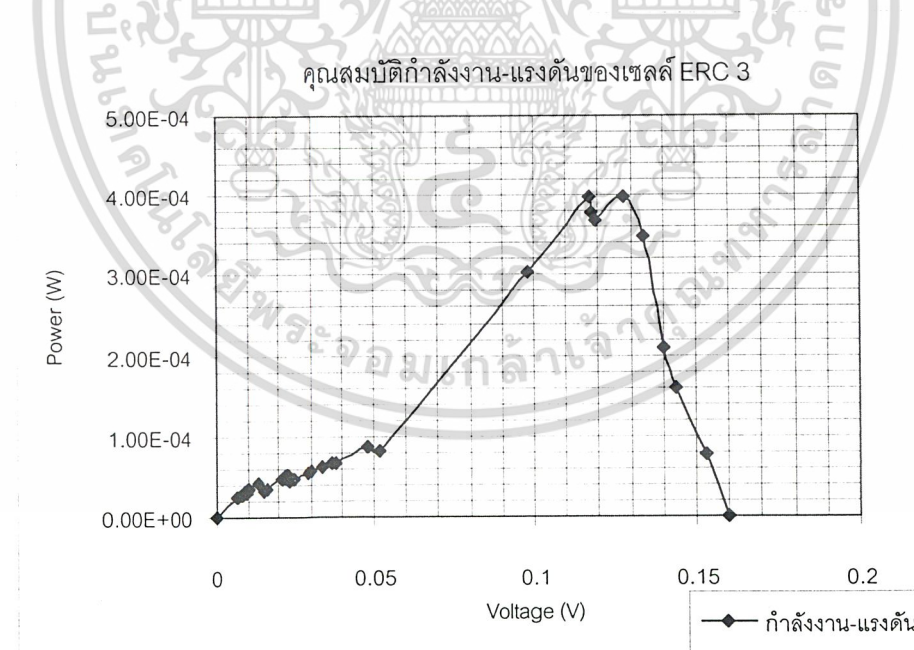
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	2.5 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.16 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	0.4 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	1.356 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	3.1 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.128 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	0.397 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.992
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	0.25875%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C

ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 1,600 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 3

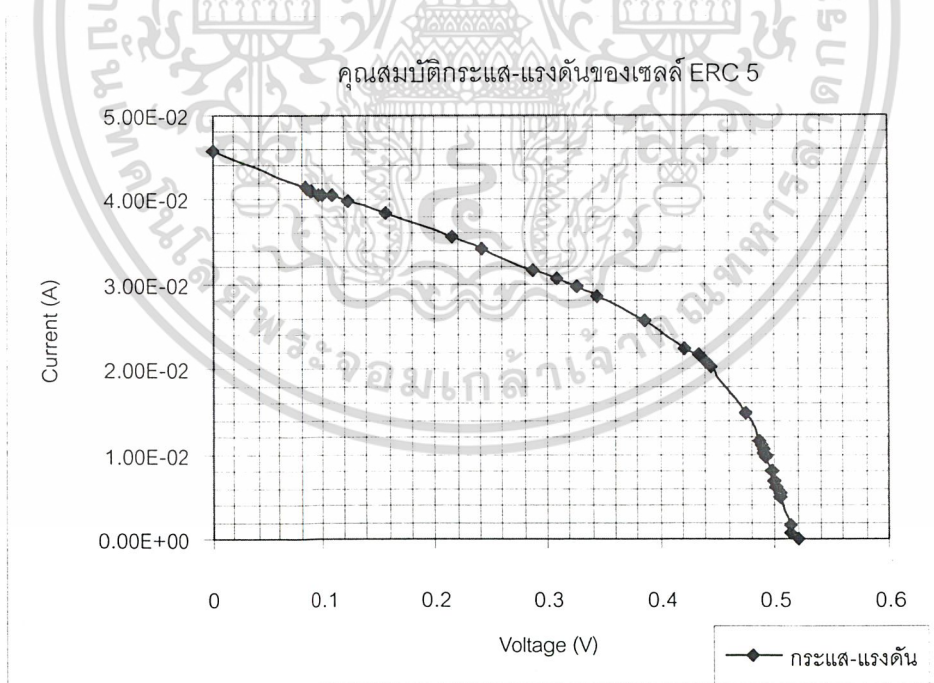


รูปที่ 5.15 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

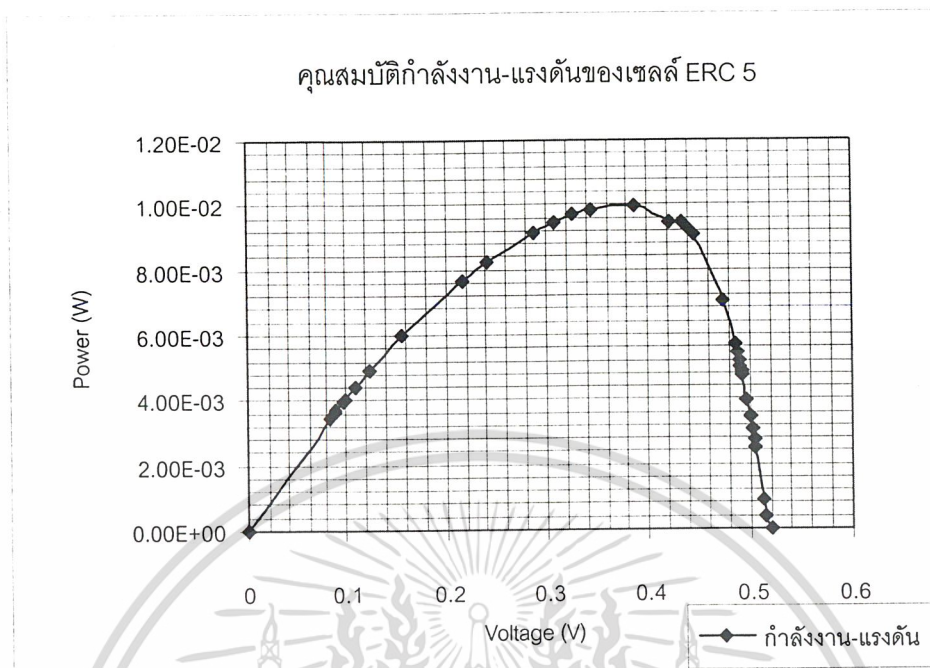
5.1.3 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 5 (ขั้วลึกลับ 30 นาที)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	45.8 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.52 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	23.8 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	24.848 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	25.8 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.378 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	9.98 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.4192
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	6.5108%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์หนา 1,600 Å		



รูปที่ 5.16 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



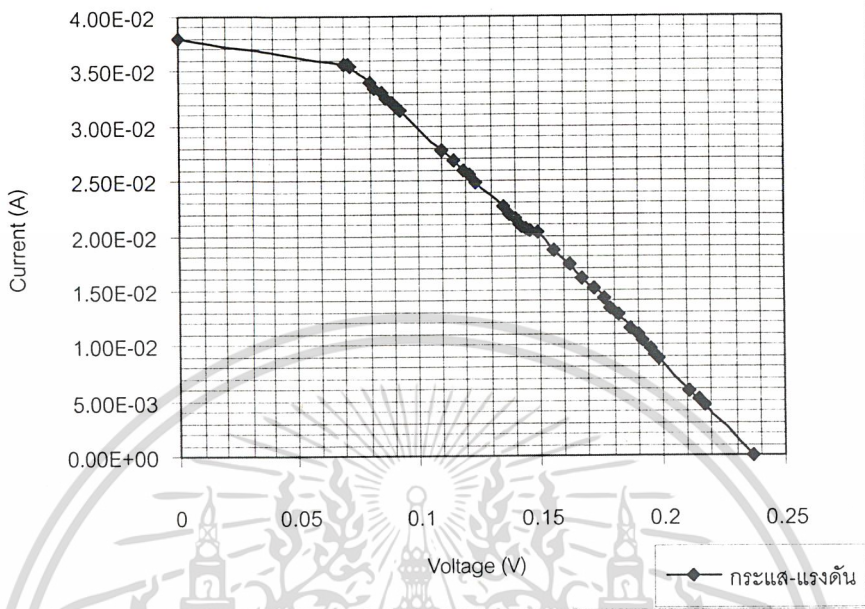
รูปที่ 5.17 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 5

5.1.4 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 6 (ขั้วลึก 30 นาที)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	38 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.237 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	9.01 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	20.616 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	26.9 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.115 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	3.09 mW.
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F)	=	0.3435
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	2.0172%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 1,600 Å		

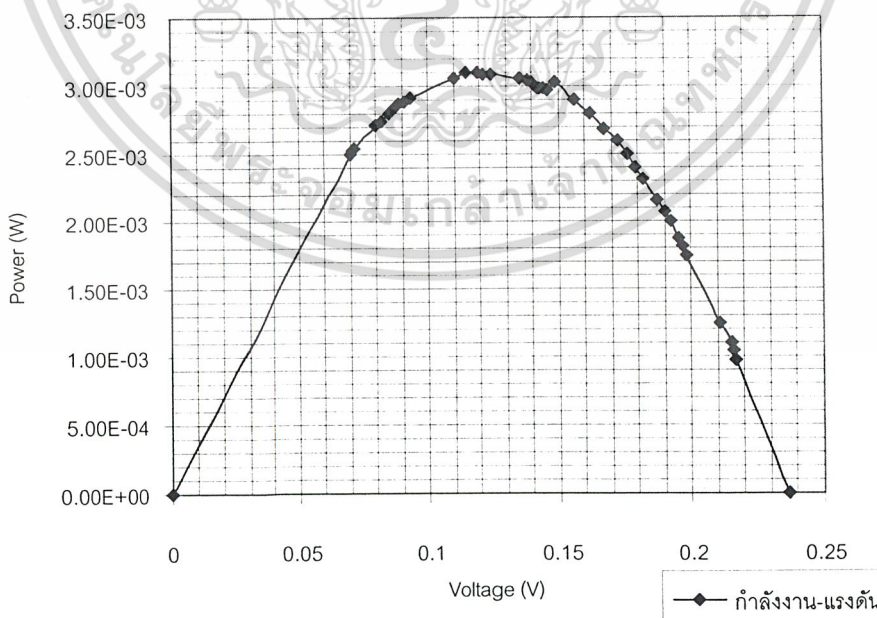
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 6



รูปที่ 5.18 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 6

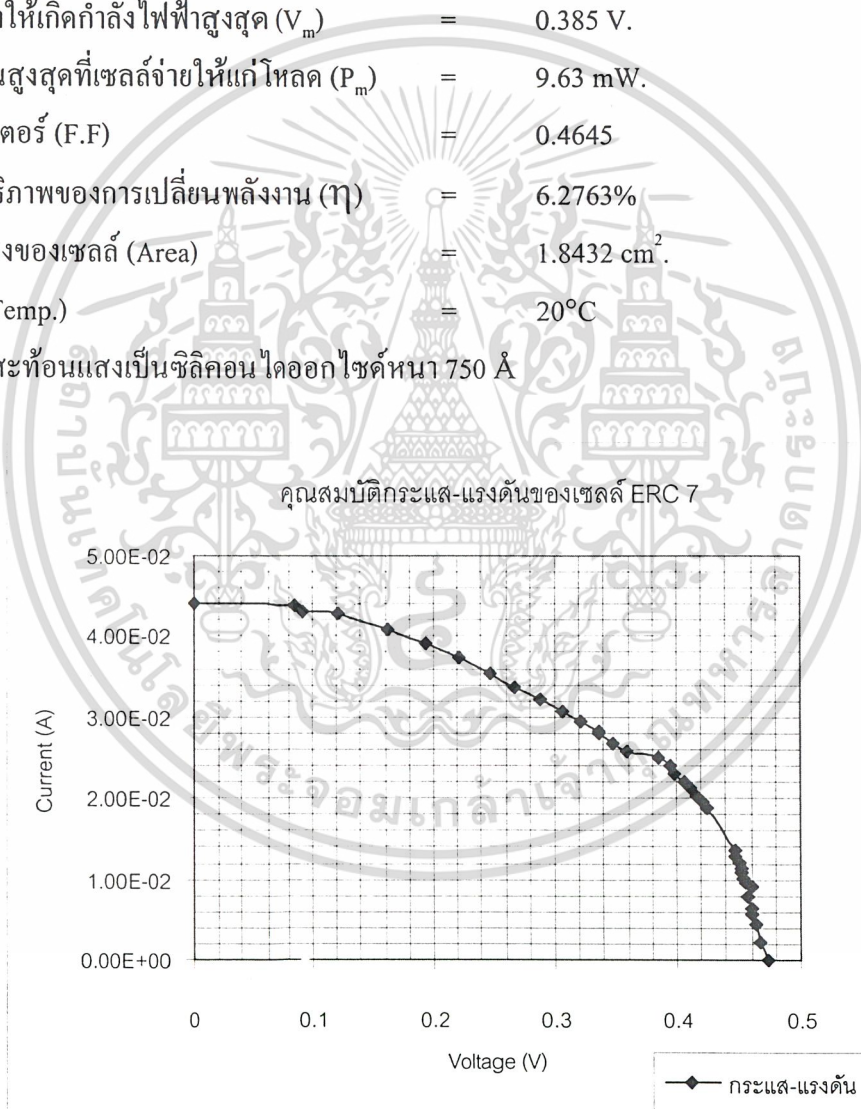
คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า .
 ระบุว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังไม่มีเหตุเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข และตยงยั้งยั้งของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

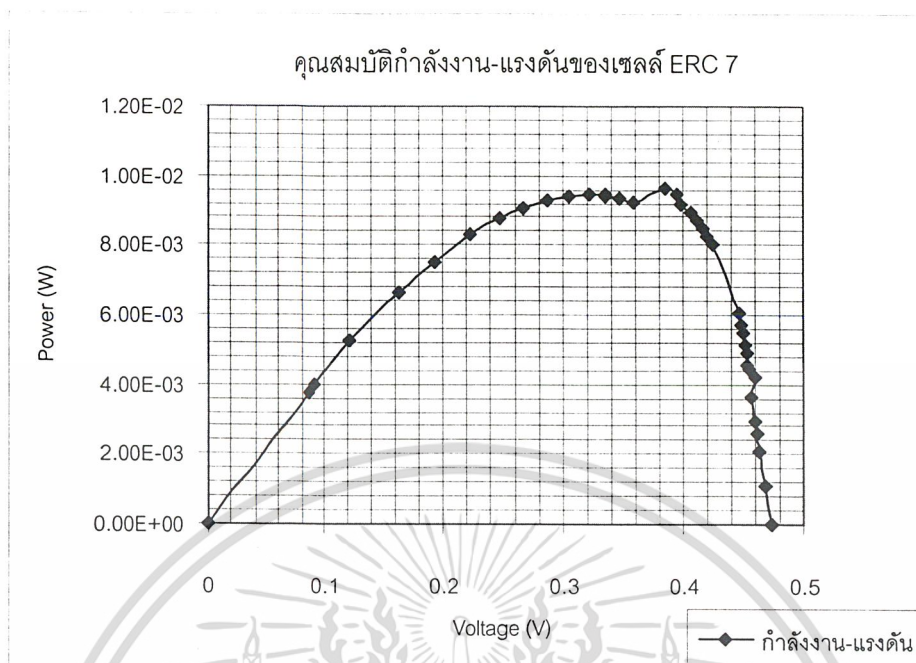
5.1.5 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 7 (ขั้วลึกลับ 40 นาที)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	44 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.437 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	20.8 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	23.872 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	25 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.385 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	9.63 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.4645
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	6.2763%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C
ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์หนา 750 Å		



รูปที่ 5.20 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

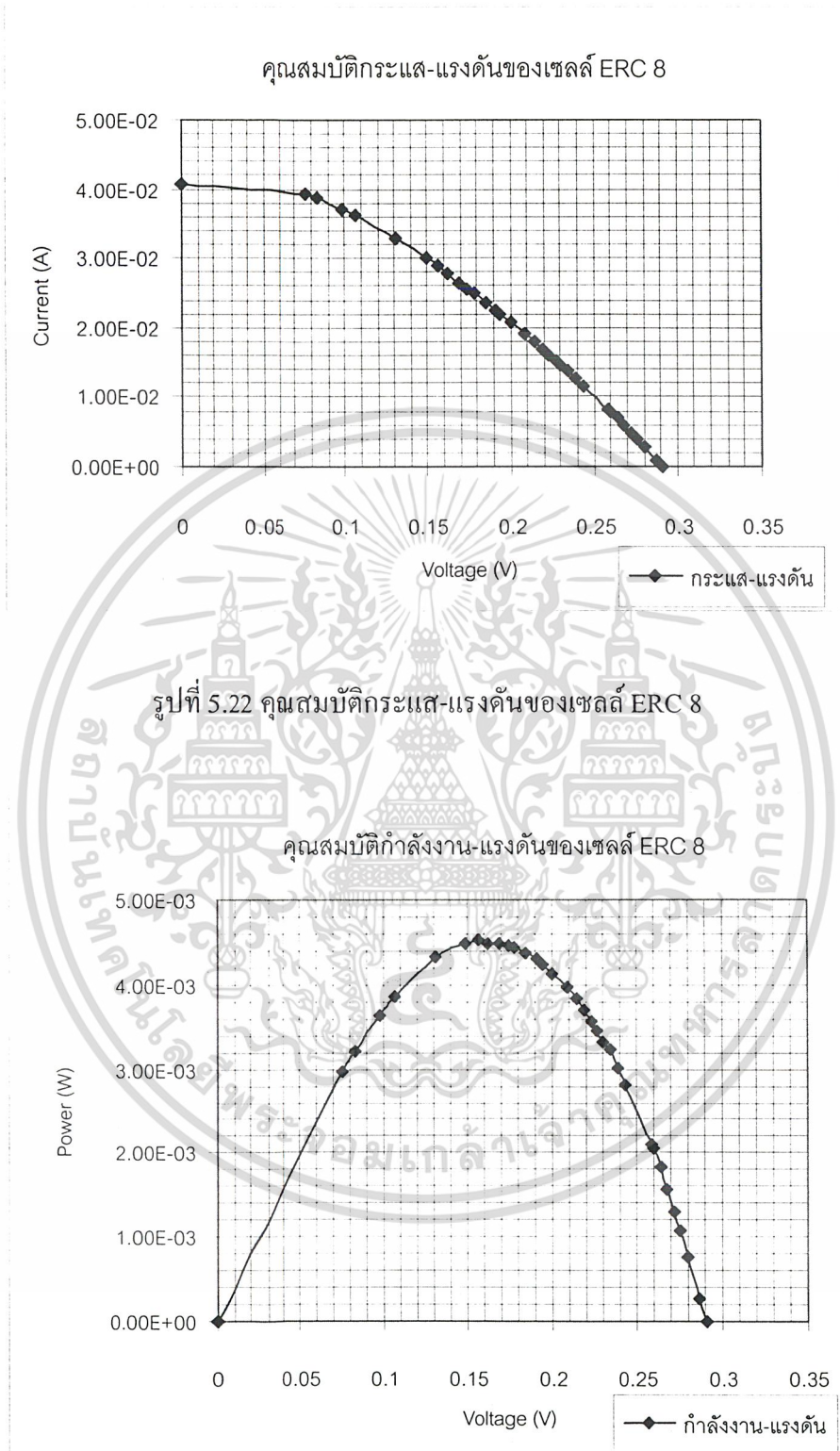


รูปที่ 5.21 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 7

5.1.6 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 8 (ขั้วลึก 40 นาที่)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	40.8 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.291 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	11.9 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	22.135 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	28.8 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.157 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.52 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.38
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	2.9485%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์หนา 750 Å		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

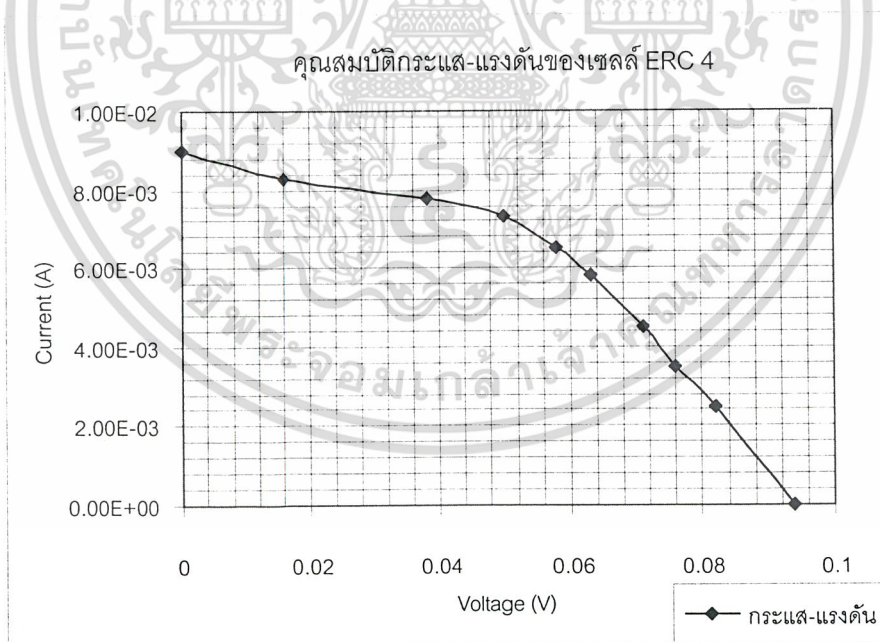


รูปที่ 5.23 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 4 (ขั้วลึกลับ 50 นาที)

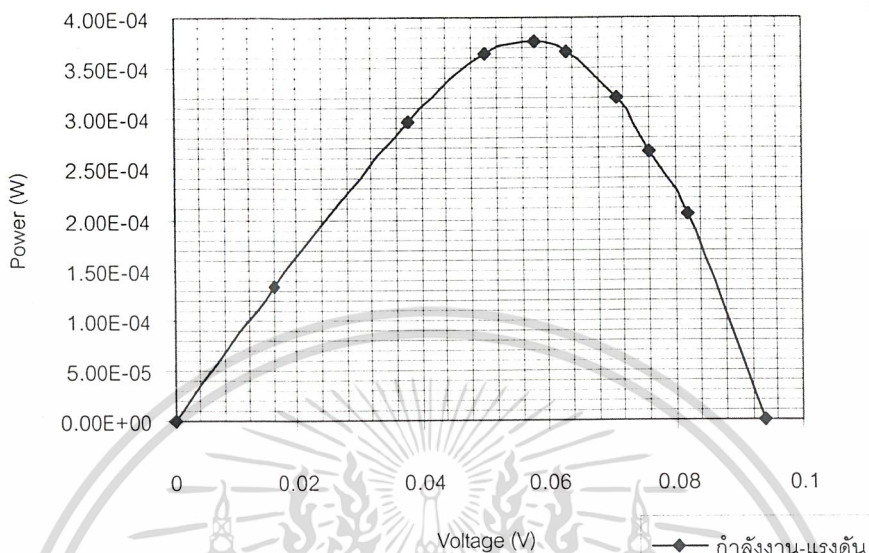
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	9 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.094 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	0.846 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	4.883 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	6.5 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.058 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	0.377 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.4456
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	0.2458%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C
ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 750 Å		



รูปที่ 5.24 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 4



รูปที่ 5.25 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 4

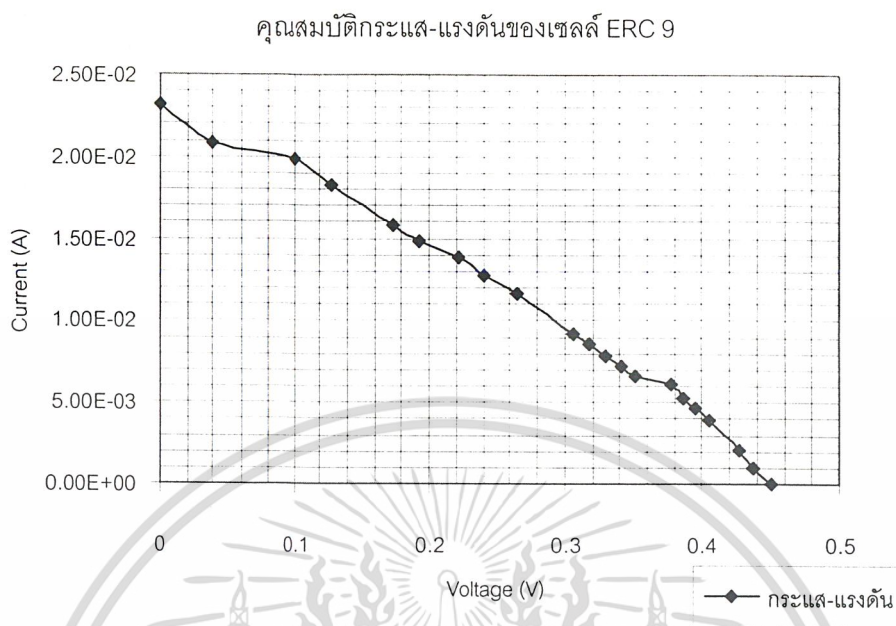
5.1.8 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 9 (ขั้วลิก 50 นาที)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	23.2 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.45 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	10.4 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	12.587 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	13.9 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.222 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	3.09 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.2956
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	2.0122%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C

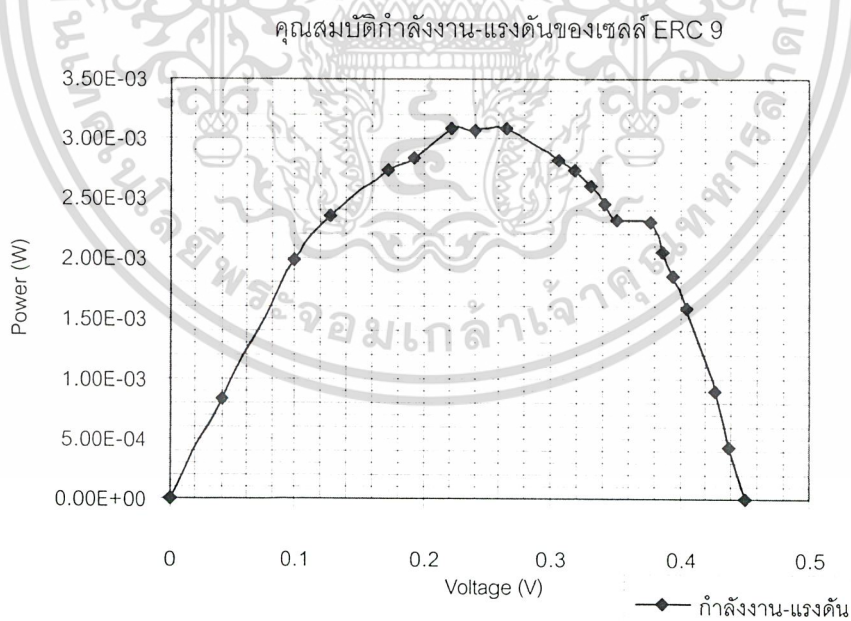
ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์หนา 750 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 9



รูปที่ 5.27 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์จากกระบวนการสร้างครั้งที่ 1

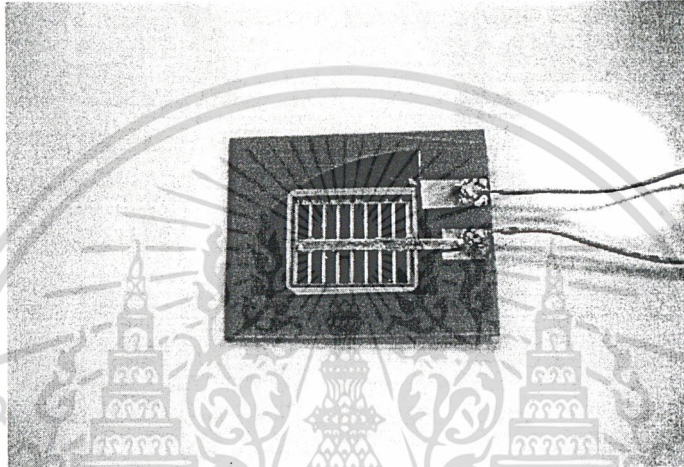
Monitor	Isc	Voc	Po	Jsc	Im	Vm	Pm	F.F.	Eff.
ERC 2(20)	0.0403	0.455	0.018337	0.021864	0.0235	0.253	0.005946	0.324244	3.87697
ERC 3(20)	0.0025	0.160	0.000400	0.001356	0.0031	0.128	0.000397	0.992000	0.25874
ERC 5(30)	0.0458	0.520	0.023816	0.024848	0.0258	0.387	0.009985	0.419239	6.51080
ERC 6(30)	0.0380	0.237	0.009006	0.020616	0.0269	0.115	0.003094	0.343493	2.01720
ERC 7(40)	0.0440	0.473	0.020812	0.023872	0.0250	0.385	0.009625	0.462474	6.27630
ERC 8(40)	0.0408	0.291	0.011873	0.022135	0.0288	0.157	0.004522	0.380837	2.94870
ERC 4(50)	0.0090	0.094	0.000846	0.004883	0.0065	0.058	0.000377	0.445626	0.24580
ERC 9(50)	0.0232	0.450	0.010440	0.012587	0.0139	0.222	0.003086	0.295575	2.01220

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.1 และกราฟแสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เวลาในการขัปลีกแตกต่างกัน เราจะพบว่า ในทุกๆช่วงเวลาของการขัปลีก จะมีเซลล์ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างน้อย 1 ตัว (สังเกตจากแรงดันเปิดวงจรของเซลล์มีค่าประมาณ 0.5 โวลต์) ส่วนเซลล์ที่เหลืออีกตัวจะให้แรงดันเปิดวงจรที่น้อยกว่า 0.5 โวลต์อยู่มาก เราถือว่าเซลล์ที่ให้แรงดันเปิดวงจรที่น้อยกว่า 0.5 โวลต์มากๆ ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ถึงกระบวนการที่มีโอกาสทำให้เซลล์ไม่สามารถใช้งานได้ ทั้งๆ ที่กราฟไดโอดที่เวลาการขัปลีก 20 นาที, 30 นาที และ 50 นาที ก็แสดงว่ามีรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้น นั้นมีสาเหตุมาจากกระบวนการ Sintering และทำให้เกิด AI-spike เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีนั้น ไม่ควรที่จะมีค่าความลึกของรอยต่อพี-เอ็นตื้น หรือลึกจนเกินไป ดังนั้น ในการสร้างครั้งแรกเราจึงเลือกช่วงเวลา ที่คิดว่าจะมีช่วงเวลาที่ทำให้ได้เซลล์ที่มีคุณสมบัติที่ดี แต่จากการที่เซลล์ให้แรงดันเปิดวงจรมีค่าน้อย ย่อมแสดงว่าค่าความต้านทานขนานภายในของเซลล์ไม่มีค่าที่สูงพอ ในทางอุดมคติเรากำหนดให้ ค่าความต้านทานขนานภายในเซลล์มีค่าเป็นอินฟินิตี ดังนั้น จึงมีแรงดันไปตกคร่อมค่าความต้านทานค่าน้อยนั้น ส่งผลให้ค่าแรงดันเปิดวงจรของเซลล์ลดน้อยลง เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ เราจึงทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาอีกชุดหนึ่ง โดยใช้เวลาในการขัปลีกให้นานขึ้น เพื่อป้องกันการเกิด AI-spike คือ เวลา 55 นาที จำนวน 2 เซลล์ และเวลา 65 นาที จำนวน 2 เซลล์ และการที่เราสร้างเซลล์ขึ้นมาจำนวน 2 เซลล์ต่อชุดนั้น ก็เพื่อที่จะทำการทดลองว่ากระบวนการ Sintering นั้นส่งผลให้เซลล์ที่เราสร้างขึ้นในครั้งแรกใช้งานได้ ดังการทดลองที่จะกล่าวถึงต่อไป

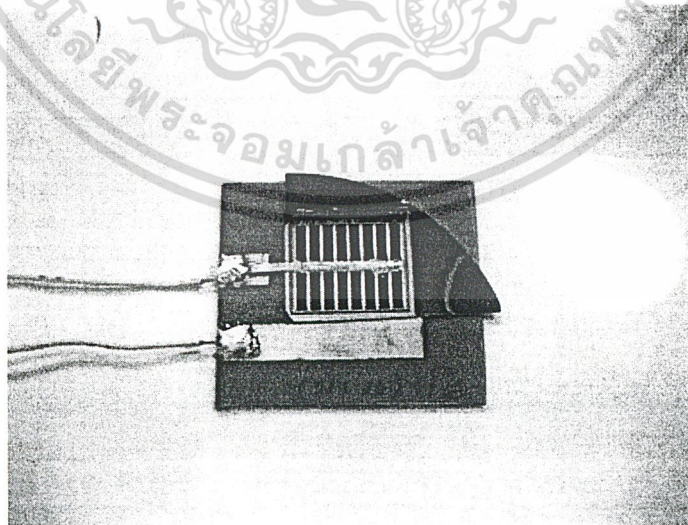
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดลองการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

เราได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาอีก 4 เซลล์ ด้วยกระบวนการสร้างที่เราคาดว่าจะ เป็นกระบวนการสร้างที่ทำให้เซลล์มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด และใช้เซลล์ที่ดีที่สุดที่ได้จากกระบวนการสร้าง ครั้งนี้เป็นเซลล์มาตรฐานในการทดลองต่อไป รูปเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างที่ คาดว่าจะทำให้เซลล์มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดแสดงได้ดังนี้

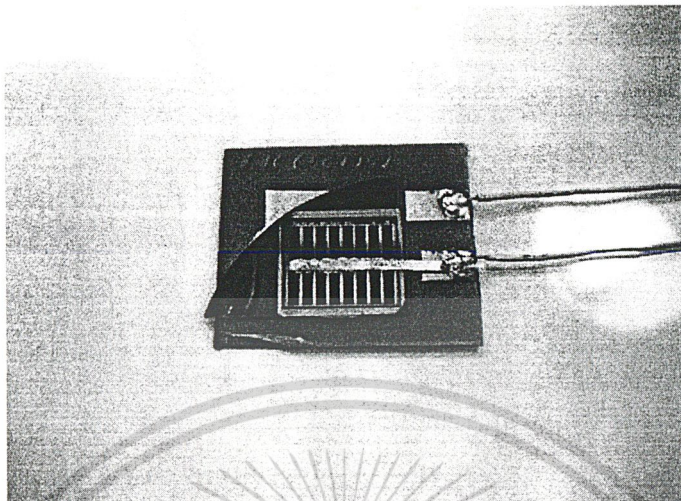


รูปที่ 5.28 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 14



รูปที่ 5.29 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 16



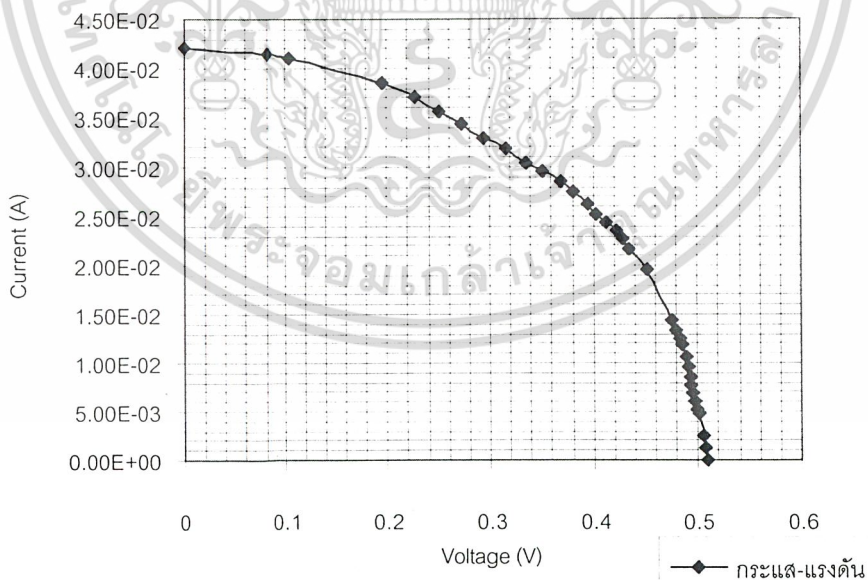
รูปที่ 5.31 เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 15 (ขั้วลึกลับ 55 นาที)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	42 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.51 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	21.4 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	22.786 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	28.5 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.37 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	10.5 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.4923
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	6.8762%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิกอน ไดออกไซด์หนา 900 Å		

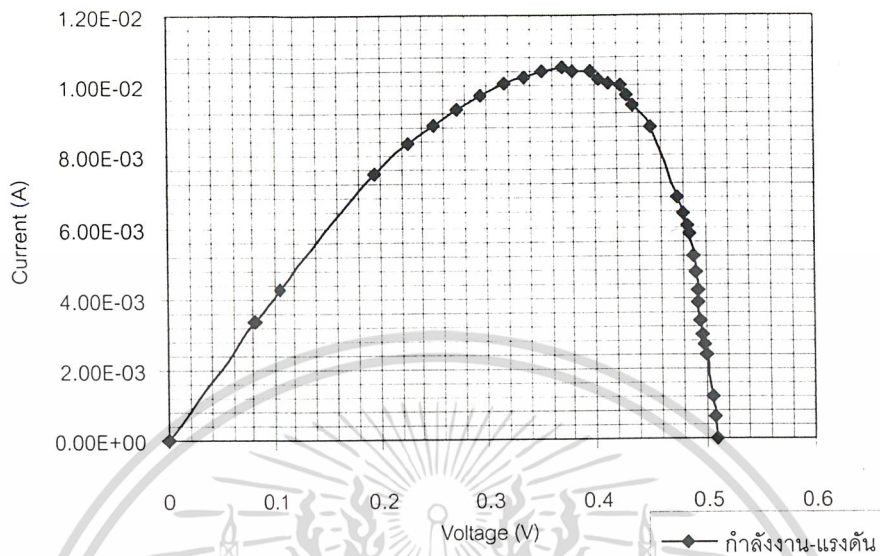
คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 15



รูปที่ 5.32 คุณสมบัติของกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 15



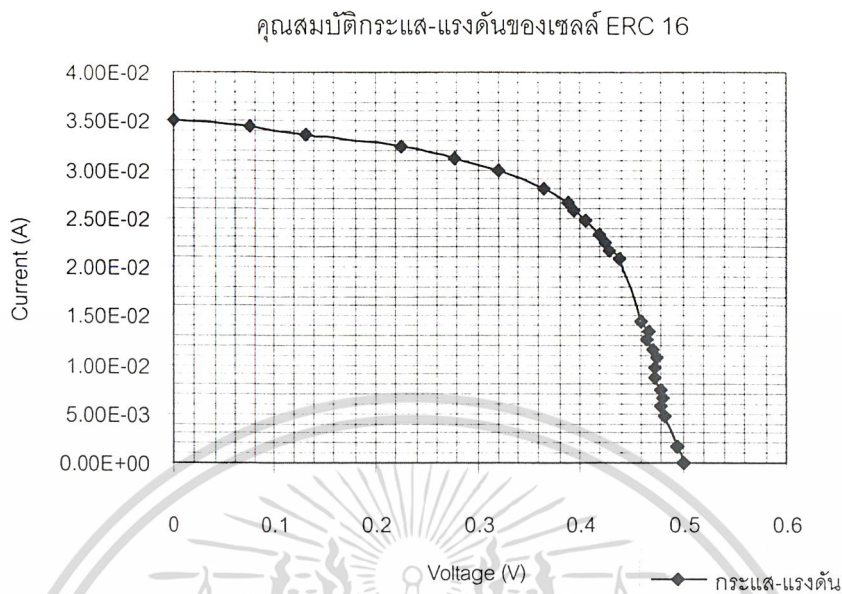
รูปที่ 5.33 คุณสมบัติของกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 15

5.2.2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 16 (ขั้วลิก 65 นาที)

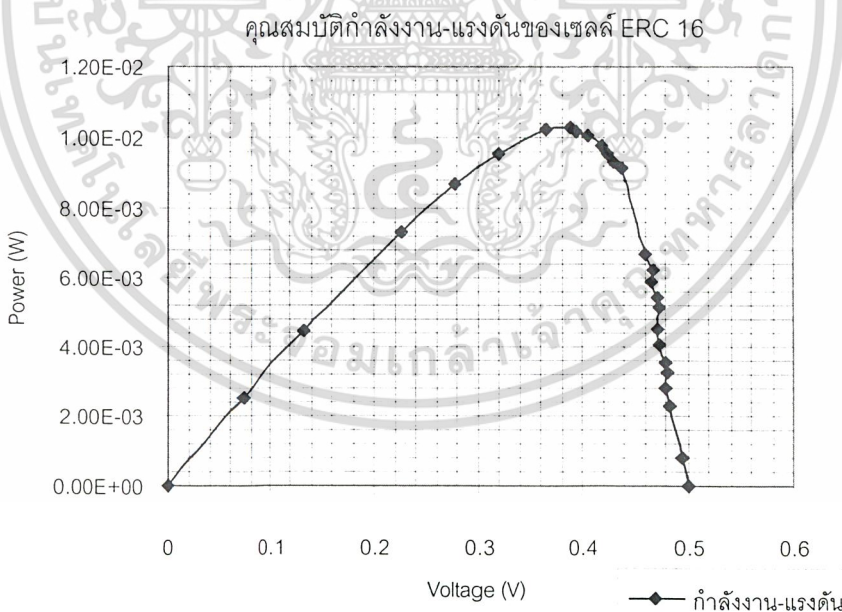
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	35 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.5 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	17.5 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	18.989 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	28.1 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.365 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	10.3 mW.
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F)	=	0.5861
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	6.6881%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 925 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 คุณสมบัติของกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 16

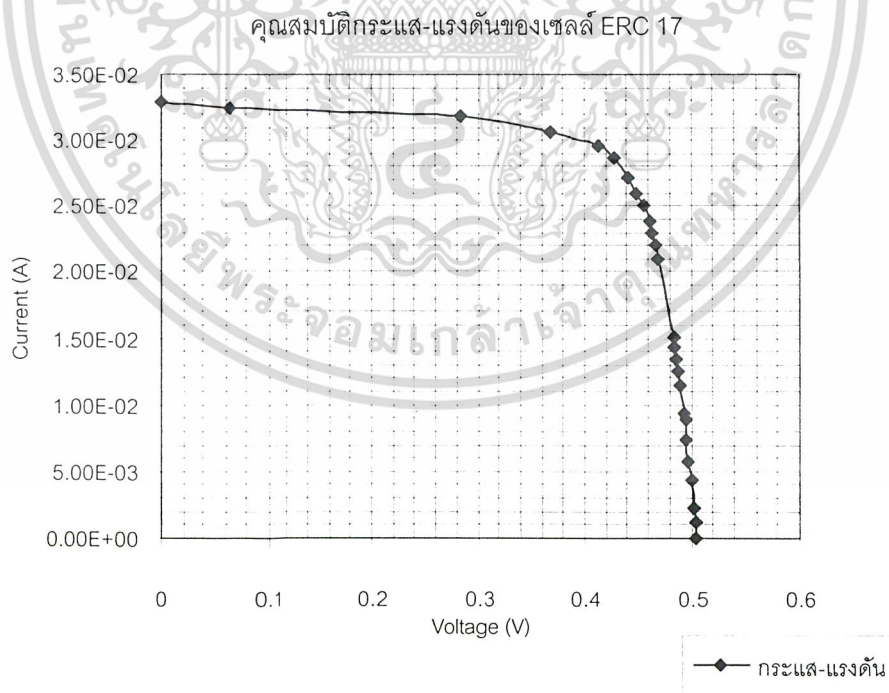


รูปที่ 5.35 คุณสมบัติของกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 (ขั้วลึกลับ 65 นาที)

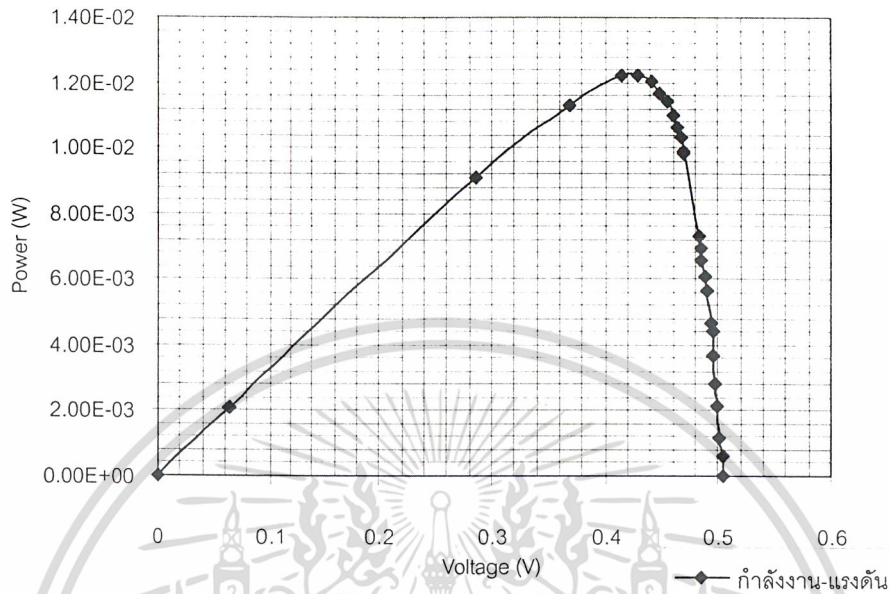
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	41 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.521 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	21.4 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	22.244 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	34.2 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.409 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	14 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.6548
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	9.1212%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์หนา 925 Å		



รูปที่ 5.36 คุณสมบัติของกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 17



รูปที่ 5.37 คุณสมบัติของกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 17

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์จากกระบวนการสร้างครั้งที่ 2

Cell	Isc	Voc	Po	Jsc	Im	Vm	Pm	F.F.	Eff.
ERC 15(55)	0.042	0.510	0.02142	0.022786	0.0285	0.370	0.010545	0.492297	6.8762
ERC 16(65)	0.035	0.500	0.01750	0.018989	0.0281	0.365	0.010257	0.586086	6.6880
ERC 17(65)	0.041	0.521	0.021361	0.022244	0.0342	0.409	0.013988	0.654829	9.1212

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากกระบวนการสร้างครั้งที่ 2 ในตารางที่ 5.2 พบว่า เซลล์ทั้ง 3 เซลล์มีคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีมาก ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน, ค่าฟิลแฟคเตอร์ ฯลฯ ซึ่งจากคุณสมบัติของเซลล์ทั้ง 3 เซลล์นี้ ทำให้เราสามารถใช้กระบวนการสร้างเซลล์ทั้ง 3 นี้ อ่างเป็นกระบวนการสร้างที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และเราจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 เป็นเซลล์มาตรฐานในการอ้างอิง หรือทดลองคุณสมบัติต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลองการศึกษาผลของการ Sintering

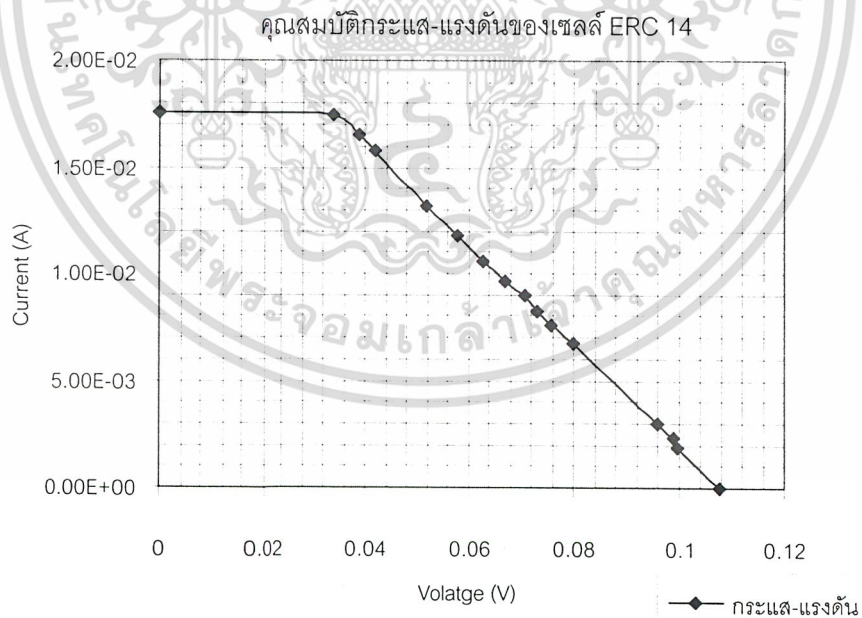
เราได้ทำการทดลองการ Sintering เซลล์ที่อุณหภูมิ 450°C ที่เวลา 8 นาที และ 300°C ที่เวลา 8 นาที เพื่อศึกษาถึงผลของการ Sintering ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการ Sintering ที่อุณหภูมิสูงเกินไป หรือใช้ระยะเวลาเกินไป อาจทำให้เกิด Al-spike ได้ ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีรอยต่อพี-เอ็นเสียหาย ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีแรงดันเปิดวงจรของเซลล์ที่ลดต่ำลง การที่เซลล์ให้แรงดันเปิดวงจรที่ต่ำลง (ประมาณ 0.1-0.2 volts) สาเหตุสำคัญ คือ ความต้านทานขนานภายในเซลล์ต้องมีค่าไม่สูงพอ ทำให้แรงดันที่เซลล์ไปตกคร่อมอยู่ที่ความต้านทานนั้น ทำให้แรงดันเปิดวงจรของเซลล์น้อยลง

จากกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ครั้งที่ 2 เราได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 14 และ ERC 15 ที่เวลาขั้วลิก 55 นาทีเท่ากัน แต่เราใช้อุณหภูมิในการ Sintering ที่ต่างกัน คือ เซลล์ ERC 14 เราใช้อุณหภูมิ 450°C เวลา 8 นาที ในขณะที่เซลล์ ERC 15 เราได้ลดใช้อุณหภูมิลงมาเหลือ 300°C เวลา 8 นาที เนื่องจากก่อนทำการ Sintering เราได้นำเซลล์ทั้ง 2 เซลล์มาลองโพรบเพื่อวัดแรงดันเปิดวงจร และกระแสลัดวงจร ซึ่งผลที่ได้ คือ เซลล์ทั้ง 2 มีแรงดันเปิดวงจรประมาณ 0.5 โวลต์เท่ากัน และมีกระแสลัดวงจรประมาณ 40 mA. เท่ากัน นั่นแสดงว่าก่อนทำการ Sintering เซลล์ทั้ง 2 เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดี และนำไปใช้งานได้ แต่เมื่อเรานำเซลล์ ERC 14 ไปทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 450°C เวลา 8 นาที แล้วนำออกมาวัด ปรากฏว่า เซลล์ ERC 14 ให้แรงดันเปิดวงจรลงเหลือ 0.1 โวลต์ ทำให้เราสรุปผลได้ว่า การ Sintering ที่อุณหภูมิ 450°C เวลา 8 นาที ทำให้เซลล์ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ หรือเกิด Al-spike ดังนั้น เราจึงทำการลดอุณหภูมิลงเหลือประมาณ 300°C โดยใช้เวลาเท่าเดิม ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิ 300°C จะไม่เกิดอัลลอยด์ของอะลูมิเนียม และซิลิคอน แต่ก็เป็นการดีที่ได้นำเซลล์ไปอบที่อุณหภูมิสูงก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อเป่าไล่สิ่งๆ ไปขวางระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิคอนได้บ้าง ดีกว่าไม่นำไปอบเลย คุณสมบัติของเซลล์ ERC 14 หลังทำการ Sintering แสดงได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

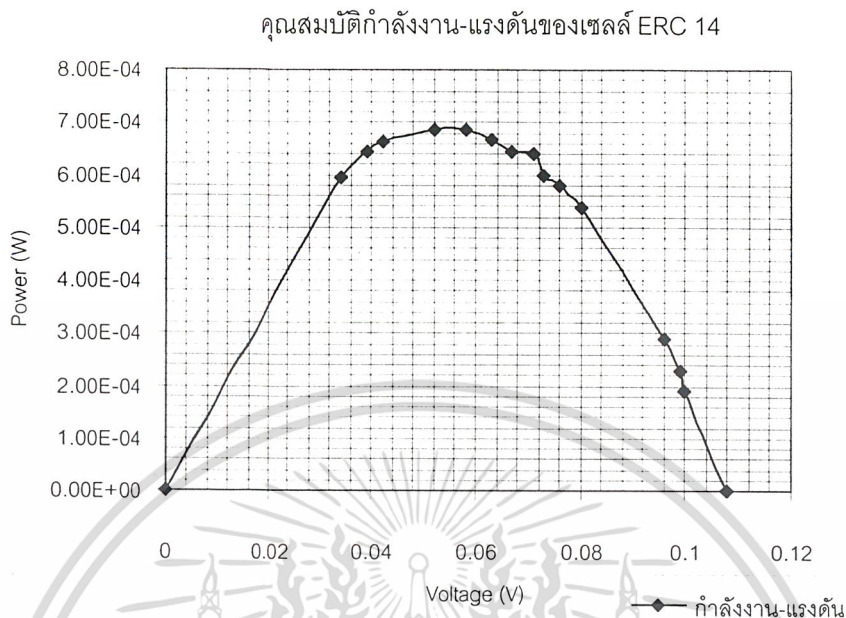
5.3.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 14 (ขั้วลึกลับ 55 นาที)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	17.6 mA.
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.108 V.
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	1.9 mW.
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	9.549 mA./cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	13.2 mA.
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.052 V.
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	0.686 mW.
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F)	=	0.3611
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	0.4476%
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	1.8432 cm ² .
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20°C
ขั้นตอนการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์หนา 900 Å		



รูปที่ 5.38 คุณสมบัติของกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 คุณสมบัติของกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 14

5.4 ผลการทดลองการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์

เราได้ทำการทดลองหาค่าความต้านทานอนุกรมภายใน (R_s) โดยต่อวงจรให้ไบอัสตรงแก่เซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่เซลล์ไม่ได้รับแสง (ใช้กระดาษปิดตัวเซลล์ไว้) จ่ายแรงดันให้แก่เซลล์จนได้กระแสที่ไหลเท่ากับ กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันที่ทำให้เซลล์มีกระแสขณะลัดวงจรเรากำหนดให้เท่ากับ V_a แล้วเราสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมภายใน R_s ได้จากสมการที่ 4.1

$$R_s = \frac{V_a - V_{oc}}{I_{sc}} \quad (4.1)$$

ค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ทำการหาแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์

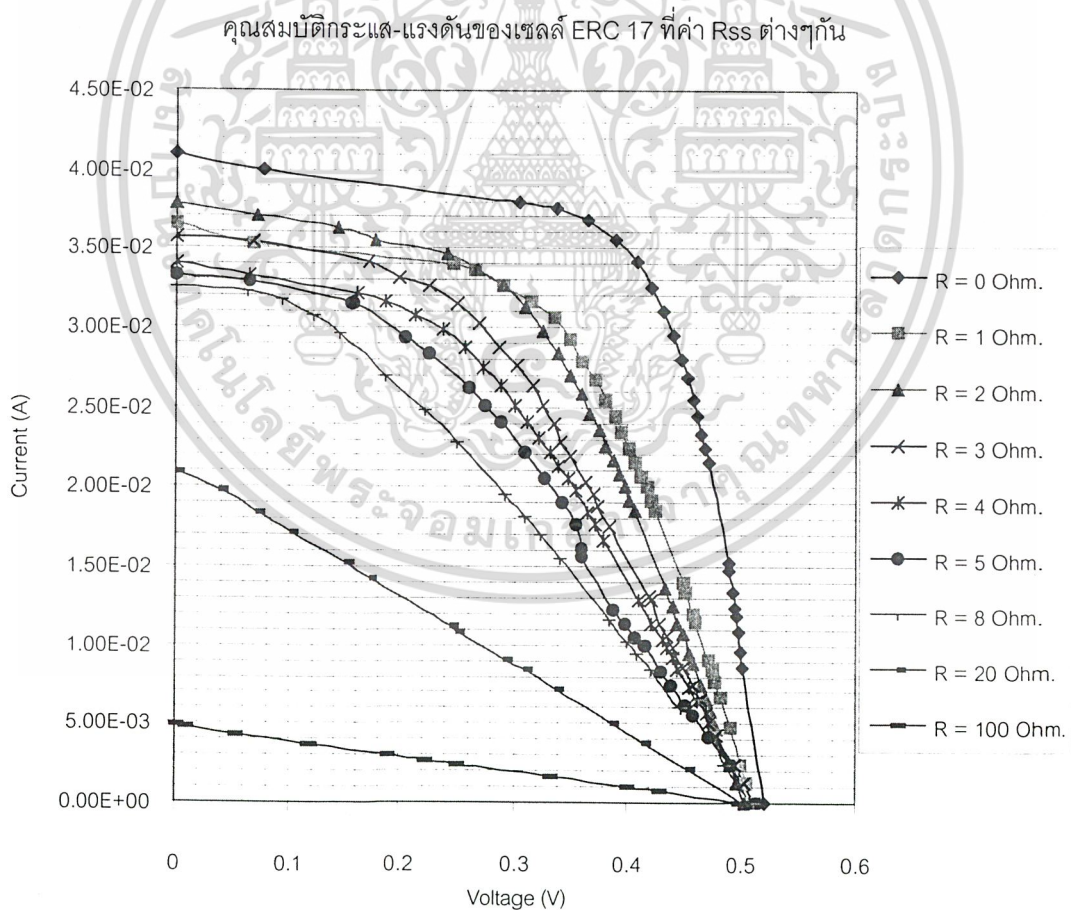
Cell	I_{sc}	V_{oc}	V_a	R_s
ERC 15	42 mA	0.51 V	0.594 V	2 Ohm
ERC 16	35 mA	0.5 V	0.591 V	2.6 Ohm
ERC 17	41 mA	0.521 V	0.603 V	2 Ohm

จะพบว่าค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 มีค่าที่ยังสูงอยู่ ซึ่งค่าความต้านทานอนุกรมภายในนี้นั้น เราต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้มีผลต่อค่าพลังงานสูงสุดของเซลล์ได้ ดังจะได้ทำการทดลองต่อไป

5.5 ผลการทดลองการศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

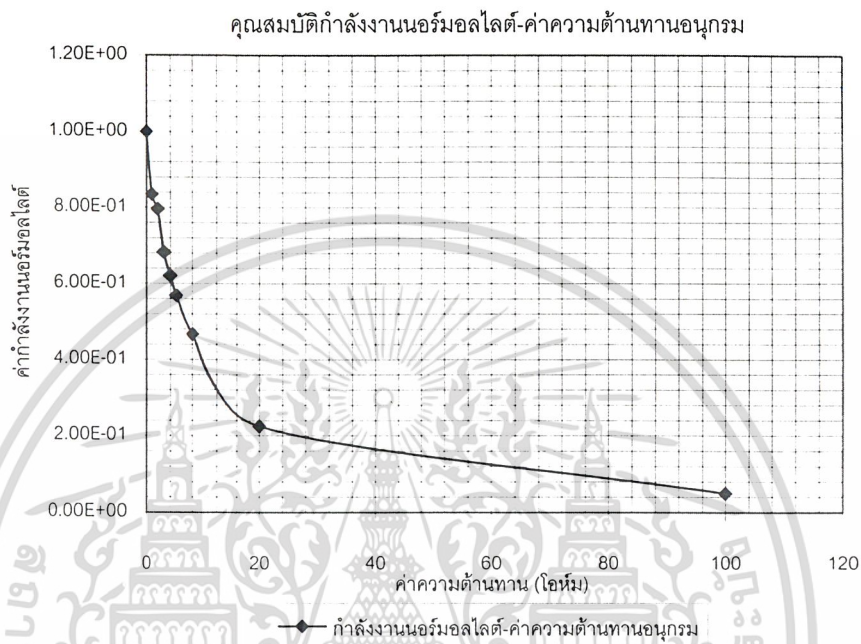
การทดลองเพื่อศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{ss}) เราได้ทำการทดลองวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีค่าความต้านทานอนุกรมที่ต่างกัน คือ 0 โอห์ม, 1 โอห์ม, 2 โอห์ม, 3 โอห์ม, 4 โอห์ม, 5 โอห์ม, 8 โอห์ม, 20 โอห์ม และ 100 โอห์ม นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตลงบนกราฟเดียวกัน พร้อมทั้งดูผลของการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

5.5.1 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ค่า R_{ss} ต่างๆ กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.40 คุณสมบัติของกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ค่า R_{ss} ต่างๆ กัน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 คุณสมบัติกำลังงานนอร์มอลไลต์ - ค่าความต้านทานอนุกรม
ของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ค่า Rss ต่างๆ กัน



รูปที่ 5.41 คุณสมบัติกำลังงานนอร์มอลไลต์-ค่าความต้านทานอนุกรม
ของเซลล์ ERC 17 ที่ค่า Rss ต่างกัน

ตารางที่ 5.4 ค่าความต้านทานอนุกรม, กำลังงานสูงสุด และค่าพลังงานนอร์มอลไลต์

Rss (Ohm)	Pm (Watts)	Pn
0	0.0122130	1.0000000
1	0.0101908	0.8344223
2	0.0097148	0.7954475
3	0.0083352	0.6824859
4	0.0075744	0.6201916
5	0.0069408	0.5683125
8	0.0057000	0.4667158
20	0.0027440	0.2246786
100	0.0006021	0.0492999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

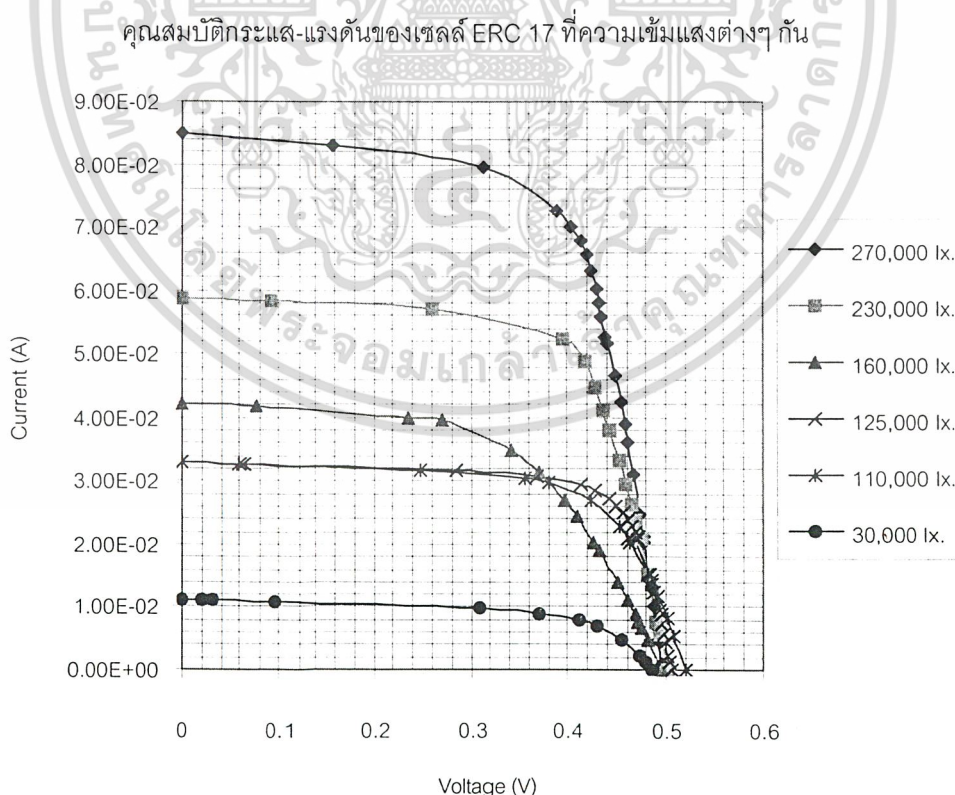
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ความต้านทานอนุกรมภายในมีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มาก ดังจะเห็นได้จากรูปกราฟที่ 5.41 ว่าเมื่อความต้านทานอนุกรมภายในเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ก็จะมีผลทำให้พลังงานไฟฟ้าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้ามาตกคร่อมที่ตัวต้านทานมากขึ้น ดังนั้น ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จึงควรหาทางลดความต้านทานอนุกรมภายในให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยการเลือกใช้แผ่นซิลิคอนที่จะนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความต้านทานจำเพาะต่ำๆ หลังจากสร้างเสร็จควรนำเซลล์ไปอบความร้อน เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าความต้านทานต่ำที่สุด

5.6 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

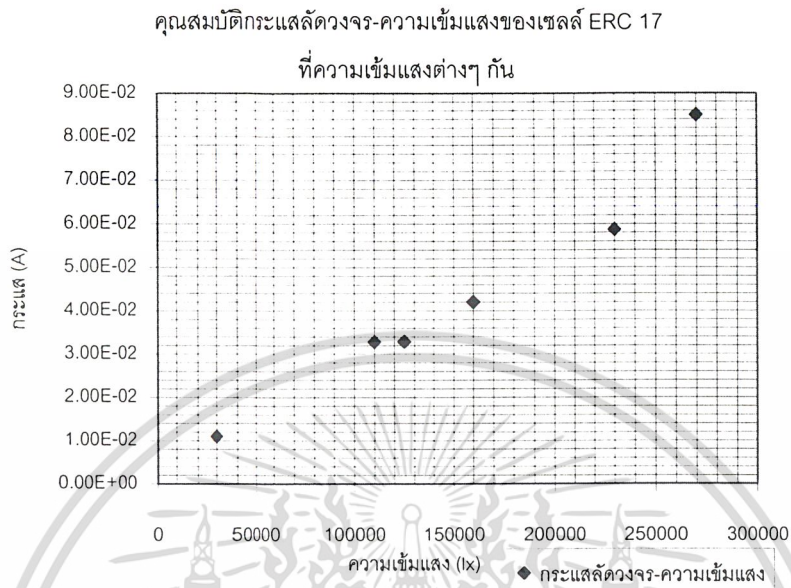
การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เราได้ทำการทดลองวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่เซลล์ได้รับความเข้มแสงที่ต่างกัน คือ 270000, 230000, 160000, 125000, 110000 และ 30000 lx. ตามลำดับ นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตลงบนกราฟเดียวกัน พร้อมทั้งดูผลของกระแสตรงและแรงดันเปิดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น

5.6.1 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ กัน



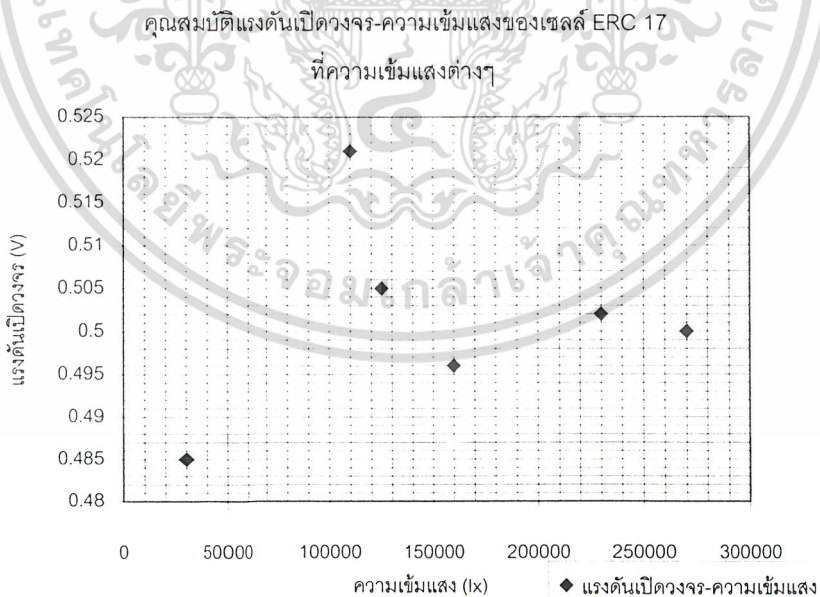
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.42 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ กัน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.2 คุณสมบัติกระแสลัดวงจร-ความเข้มแสงของเซลล์ ERC 17 ที่ความเข้มแสงต่างๆ



รูปที่ 5.43 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

5.6.3 คุณสมบัติแรงดันเปิดวงจร-ความเข้มแสงของเซลล์ ERC 17 ที่ความเข้มแสงต่างๆ

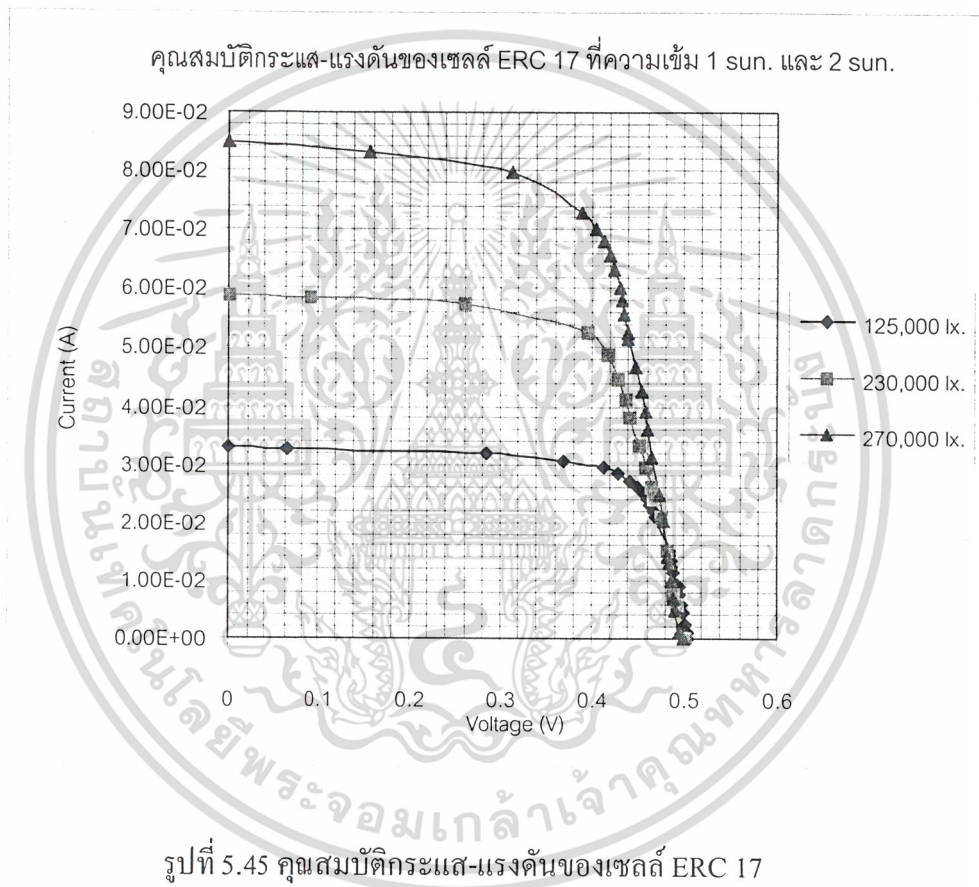


รูปที่ 5.44 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อแรงดันขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 5.43 พบว่าความเข้มแสงและกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น โดยถ้ายิ่งเพิ่มความเข้มแสงขึ้นเท่าใดก็จะได้กระแสมากขึ้นตามไปด้วย จากกราฟในรูปที่ 5.44 พบว่าความเข้มแสงและแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือ แรงดันจะมีค่าประมาณคงที่เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น

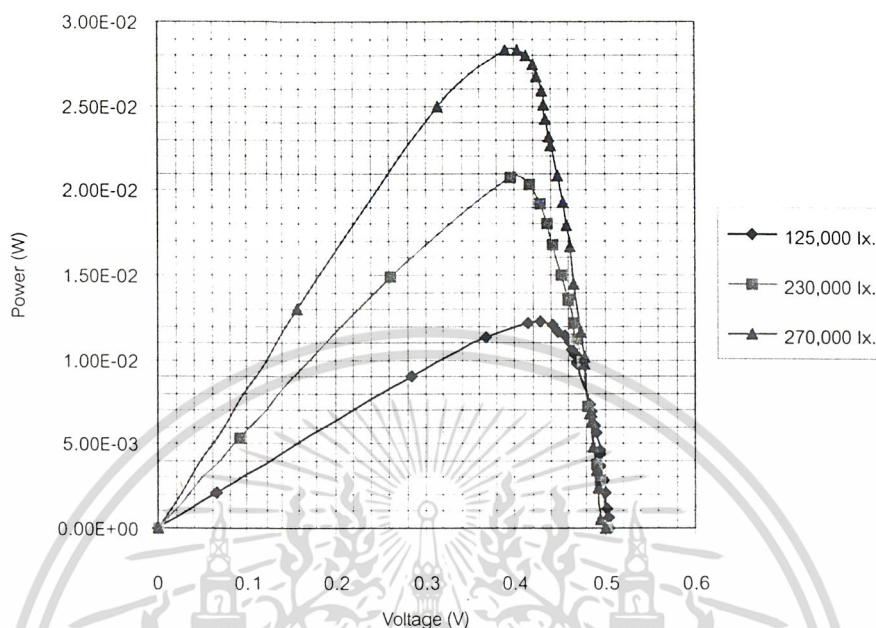
คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ความเข้มแสง 1 Sun. (125,000 lx.) และความเข้มแสงประมาณ 2 Sun. (270,000 lx., 230,000 lx.) แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.45 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสง 1 Sun. และความเข้มแสง 2 Sun.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ความเข้ม 1 sun. และ 2 sun.



รูปที่ 5.46 คุณสมบัติกำลังงาน-แรงดันของเซลล์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสง 1 Sun. และความเข้มแสง 2 Sun.

ตารางที่ 5.5 คุณสมบัติของเซลล์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสง 1 Sun. และความเข้มแสง 2 Sun.

Intensity	Isc	Voc	Po	Jsc	Im	Vm	Pm	F.F.	Eff.
125000	0.0410	0.521	0.021361	0.022244	0.0342	0.409	0.013988	0.654829	9.121235
230000	0.0587	0.502	0.029467	0.031847	0.0524	0.396	0.020750	0.704182	13.53102
270000	0.0850	0.500	0.042500	0.046115	0.0727	0.390	0.028353	0.667129	18.48857

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 ที่ค่าความเข้มแสง 1 Sun. (125,000 lx.) และความเข้มแสงประมาณ 2 Sun. (270,000 lx., 230,000 lx.) เราจะพบว่าที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจาก 1 Sun. เป็น 2 Sun. จะได้ค่ากระแสตรงจร ค่าความเข้มของกระแสต่อพื้นที่ ค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางอุดมคติ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์จ่ายได้จริง ค่าฟิลแฟกเตอร์ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน มีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็นอย่างมาก ทำให้เราสามารถประยุกต์การนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งาน โดยการใช้เลนส์รวมแสงเพื่อทำให้มีเซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ดังนั้นในพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์เท่าเดิม เราจะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย แต่ไม่อาจกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องระมัดระวังในเรื่องของความร้อนที่เกิดขึ้น เพราะที่ความเข้มแสงมาก ก็จะมีความร้อนเกิดขึ้นมากตามไปด้วย ซึ่งผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้การจ่ายกำลังงานของเซลล์ลดลงมากด้วยเช่นกัน ดังนั้น การที่เราจะนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีเลนส์รวมแสงเพื่อเพิ่มความเข้มแสง เราจะต้องมีระบบการหล่อเย็น (Cooling) ไปด้วย มิฉะนั้น จะทำให้การจ่ายกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น ให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพที่ดีนั้น เราได้เริ่มตั้งแต่การออกแบบมาส์กของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีลวดลายของขั้วโลหะที่เหมาะสม ให้เพียงพอที่อิเล็กตรอนที่เกิดสามารถวิ่งมาที่ขั้วโลหะได้ก่อนที่จะรวมตัวหรือสูญหายไป และไม่มีขั้วโลหะมากเกินไปจนบดบังพื้นที่รับแสงของเซลล์ โดยการอ้างอิงเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ หลังจากนั้นจึงลงมือวาดรูปแบบลงบนกระดาษกราฟ, ตัดลวดลายลงบนแผ่นไมลาร์ลามิเนต แล้วจึงนำไปถ่ายภาพย่อส่วนด้วยกล้องย่อส่วนให้ได้กระจกมาสักต้นแบบต่อไป

การที่จะได้มาซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง ก่อนอื่นเราได้ทำการทดลองกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยพารามิเตอร์ที่ต่างกัน คือ เวลาของการขับลิค (Drive in) เพื่อจะหากระบวนการสร้างที่เหมาะสม ในการที่จะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นมาตรฐานในการทดลองต่อไป จากการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาที่เวลาการขับลิค 20, 30, 40 และ 50 นาทีนั้น เราพบว่าเซลล์ที่ได้บางเซลล์มีคุณสมบัติที่ดี แต่บางเซลล์ก็ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เมื่อวิเคราะห์หาสาเหตุ ก็พบว่าน่าจะเกิดจากกระบวนการ Sintering ที่อุณหภูมิสูงเกินไป หรือใช้เวลานานเกินไป ทำให้เกิด Al-spike ขึ้น ดังนั้น เราจึงได้ทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาอีกชุด ที่ใช้เวลาการขับลิคที่ 55 และ 65 นาที เพื่อที่จะทำการทดลองว่ากระบวนการ Sintering มีผลทำให้เกิด Al-spike จริงหรือไม่ อีกทั้งการที่เราเพิ่มเวลาการขับลิคก็เพื่อที่จะให้รอยต่อลงไปลึกกว่าเดิม ป้องกัน Al-spike ไปในตัวด้วย แต่ต้องระวังไม่ให้ระยะเวลาในการขับลิคมากเกินไป เพราะจะทำให้รอยต่อมีค่าลึกลง และจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีประสิทธิภาพที่ไม่ดี

จากการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากกระบวนการสร้างครั้งที่ 2 พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดีมาก คือ มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานอยู่ที่ประมาณ 6-9 % อีกทั้งจากการทดลองเรื่องกระบวนการ Sintering พบว่า เราควรจะทำ การ Sintering ที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 8 นาที โดยให้ก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านในปริมาณที่มากเกินไป เนื่องจากเราได้ทำการทดลองใช้เซลล์ที่สร้างขึ้นพร้อมกัน และเป็นเซลล์ที่มีแรงดันเปิดวงจร 0.5 โวลต์ กระแสลัดวงจรประมาณ 40 mA. เข้าไปทำการทดลอง Sintering ที่อุณหภูมิ 450°C เวลา 8 นาที แล้วพบว่า แรงดันเปิดวงจรลดลงเหลือ 0.1 โวลต์ นั่นคือ เกิด Al-spike เราจึงอ้างอิงเอากระบวนการสร้างครั้งที่ 2 ที่ใช้เวลาในการขับลิคนาน 65 นาที และใช้กระบวนการ Sintering ที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 8 นาที เป็นกระบวนการสร้างเซลล์แสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาทิตย์ที่เหมาะสมที่สุด คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 เมื่อวัดที่ความเข้มแสง 125,000 lx. เซลล์มีพื้นที่รับแสง (Area) เท่ากับ 1.8432 cm². ที่อุณหภูมิ (Temp.) 20°C คือ กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}) เท่ากับ 41 mA. แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) เท่ากับ 0.521 V. พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o) เท่ากับ 21.4 mW. ความเข้มกระแส (J_{sc}) เท่ากับ 22.244 mA./cm² กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m) เท่ากับ 34.2 mA. แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m) เท่ากับ 0.409 V. ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m) เท่ากับ 14 mW. ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F) เท่ากับ 0.6548 ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η) เท่ากับ 9.1212% โดยใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 925 Å และกำหนดให้เซลล์แสงอาทิตย์ ERC 17 เป็นเซลล์อ้างอิงในการทดลอง

จากการทดลองผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ความต้านทานอนุกรมภายในมีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มาก คือ ค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์เพิ่มขึ้นเพียงนิดเดียว ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้ลดลงเกือบครึ่งหนึ่ง เนื่องจาก มีแรงดันไฟฟ้ามาตกคร่อมที่ตัวต้านทานมาก ดังนั้น ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จึงควรหาทางลดความต้านทานอนุกรมภายในให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยการเลือกใช้แผ่นซิลิคอนที่จะนำมาสร้างเซลล์ให้มีความต้านทานจำเพาะค่าต่ำๆ และหลังจากสร้างเซลล์เสร็จแล้วควรนำเซลล์ไปอบความร้อน เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าความต้านทานต่ำที่สุด

จากการทดลองผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า กระแสลัดวงจรจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากกับความเข้มแสง ส่วนแรงดันเปิดวงจรจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือประมาณคงที่ ซึ่งเราสามารถนำผลอันนี้ไปพิจารณาออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ได้

อีกทั้งเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1 Sun. (125,000 lx.) และที่ความเข้มแสงประมาณ 2 Sun. (270,000 lx., 230,000 lx.) จะพบว่าที่ความเข้มแสงประมาณ 2 Sun. ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้น ในระบบการใช้งานเราควรจะใช้เลนส์รวมแสง เพื่อช่วยเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ในพื้นที่เซลล์เท่าเดิม จะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานที่เพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นต้องมีการระบายความร้อนของเซลล์ด้วย เพราะที่ความเข้มแสงมาก ย่อมทำให้เกิดความร้อน (อุณหภูมิสูงขึ้น) ตามมาด้วย ซึ่งอาจทำให้การจ่ายกำลังงานของเซลล์ลดลง

ในโครงการนี้ยังได้เสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้โดยการทำ Back Surface Field เพื่อช่วยเพิ่มประจุพาหะที่เกิดจากแสง และการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์ตซิลิคอน เพื่อช่วยเพิ่มความเข้มแสง (พลังงาน) และกระแสลัดวงจรด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. “การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542
- รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์” แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542
- รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ” แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543
- รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ” แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545
- Adolf Goetzberger. “Crystalline Silicon Solar Cells” John Wiley & Sons Ltd., 1998
- Hans Joachim Moller. “Semiconductors for Solar Cells” Artech House, Inc., 1993
- MATIN A.GREEN. “SOLAR CELLS Operating Principles, Technology and
System Application” Prentice-Hall, Inc., 1982
- Glenn O. Mallory. “Electroless Plating: Fundamentals And Applications”
American Electroplaters and Surface Finishers Society, 1990

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก (ต่อ)

2. คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300 K)

คุณสมบัติ	ซิลิคอน	เยอรมันเนียม	แกลเลียม อาเซไนด์	หน่วย
ความหนาแน่นอะตอม	5×10^{22}	4.4×10^{22}	2.2×10^{22}	cm^{-3}
ช่องว่างพลังงาน (E_g)	1.12	0.66	1.42	eV
มวลยังผล อิเล็กตรอน (m_n^*/m_0)	1.182	0.553	0.0655	
โฮล (m_p^*/m_0)	0.81	0.357	0.524	
ความหนาแน่นสถานะ ที่แถบนำ (N_c)	3.22×10^{19}	1.03×10^9	4.21×10^{17}	cm^{-3}
ที่แถบวาเลนซ์ (N_v)	1.83×10^{19}	5.35×10^{18}	9.52×10^{16}	
ความหนาแน่นพาหะ อินทรีนซิก (ni)	1×10^{10}	2.17×10^{13}	2.49×10^6	cm^{-3}
สภาพคล่องที่ low doping μ_n (electron)	1350	3900	8800	$\text{cm}^2/\text{V-S}$
μ_p (hole)	480	1900	4000	
สนามไฟฟ้าพังทลาย Breakdown field	3×10^5	105	4×10^5	V/cm
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (K)	11.8	15.8	13.1	
จุดหลอมละลาย	1,410	940	1240	$^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก (ต่อ)

3. คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
น้ำหนักอะตอม	60.08	
ความหนาแน่นอะตอม	2.310-22	cm ⁻³
ความต้านทาน (ที่ 300 K)	>10 ¹⁶	Ω-cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	3.9	
จุดหลอมเหลว	1700	°C
ความร้อนจำเพาะ	1.0	J/g °C
การนำความร้อน	0.014	W/cm-°C
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	0.5x10 ⁻⁶	(°C) ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก (ต่อ)

4. คุณสมบัติของซิลิคอน

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	
ความหนาแน่น	2.328	g/cm ⁻³
ความหนาแน่นอะตอม	2.96 x10 ²²	cm ⁻³
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	eV
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3 x10 ⁻⁴	eV/°C
จุดหลอมเหลว	1417	°C
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว ระบาย 100	580	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร ระบาย100	1260	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิว ระบาย100	400	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสาร ระบาย 100	230	cm ² /V.s
ดัชนีหักเห	3420	
การนำความร้อน	1.57	W/cm-°C
การขยายตัว เนื่องจากความร้อน	2.6 x10 ⁻⁶	(°C) ⁻¹
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	Å
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98 x10 ¹²	cm ² /dym
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิคอนบริสุทธิ์	1.45 x10 ¹⁰	cm ⁻³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม

1.1 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์

หรือที่เรียกว่า น้ำยาบัฟเฟอร์ (buffer solution)

น้ำยาบัฟเฟอร์ใช้สำหรับการกัดซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับแพร่สารเจือ หรือเพื่อทำรอยสัมผัส (contact) ให้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ น้ำยาที่ใช้มีอัตราในการกัดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้ตามความจำเป็นของงาน

น้ำยาบัฟเฟอร์ 1

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 % 1 ส่วน

แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) 6 ส่วน

ผสมกัน โดยปริมาตร มีอัตราการกัด (etching rate) ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

น้ำยาบัฟเฟอร์ 2

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 % 1 ส่วน

แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) 10 ส่วน

ผสมกัน โดยปริมาตร มีอัตราการกัดประมาณ 600 อังสตรอมต่อนาที (10 อังสตรอมต่อวินาที)

1.2 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียม

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียมใช้สำหรับการกัดอะลูมิเนียมเพื่อทำลวดลายขั้วโลหะบน อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ มีส่วนผสมของสารเคมีโดยปริมาตร ดังนี้

กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) 80 ส่วน

กรดไนตริก (HNO_3) 5 ส่วน

กรดอะซิติก (CH_3COOH) 5 ส่วน

น้ำบริสุทธิ์ (deionized water; DI water) 10 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (Electroless nickel plating)

การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้าเป็นการสร้างชั้นโลหะให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการทางเคมี โดยไม่ต้องอาศัยผลทางไฟฟ้าช่วย แต่จะใช้ผลจากความร้อนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทำให้มีความสะดวกขึ้น ทั้งนี้นิเกิล (Ni) ที่ได้ยังสามารถนำไปบัดกรีได้ง่ายอีกด้วย ส่วนผสมของสารเคมีที่ใช้มีดังนี้

นิเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	30	กรัมต่อลิตร
แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)	50	กรัมต่อลิตร
แอมโมเนียมซัลเฟต [$(\text{NH}_4)_2\text{CH}_6\text{H}_2\text{O}_7$]	65	กรัมต่อลิตร
โซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ ($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	10	กรัมต่อลิตร

ในการชุบใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จนกระทั่งน้ำยามีค่า pH ประมาณ 8-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การ Stain Etching

การศึกษาผลของการ Stain Etching

ทำการทดลอง Stain etching แผ่นฟิล์มชนิดเอ็นบนฐานรองชนิดพี ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกันกับของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เวลาการ Stain etch แตกต่าง ๆ กัน สังเกตผลที่ได้จากก่อนการข้อมสี และหลังการข้อมสี

ผลการทดลองการศึกษาการ Stain Etching

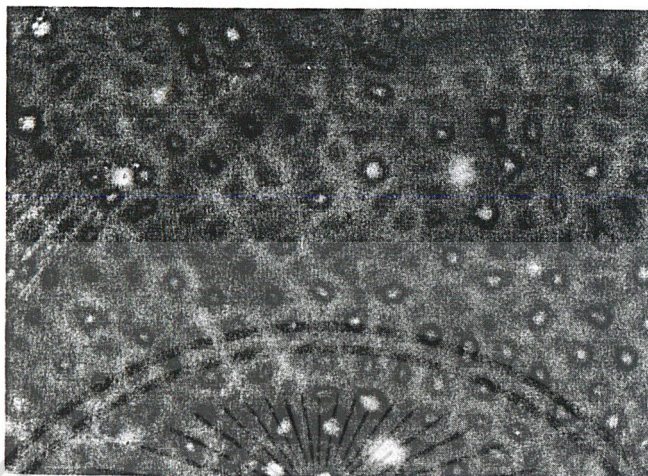
ทำการทดลอง Stain etching แผ่นฟิล์มชนิดเอ็นบนฐานรองชนิดพี ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกันกับของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เวลาการ Stain etch แตกต่าง ๆ กัน สังเกตผลที่ได้จากก่อนการข้อมสี และหลังการข้อมสี สามารถแสดงรูปได้ดังนี้



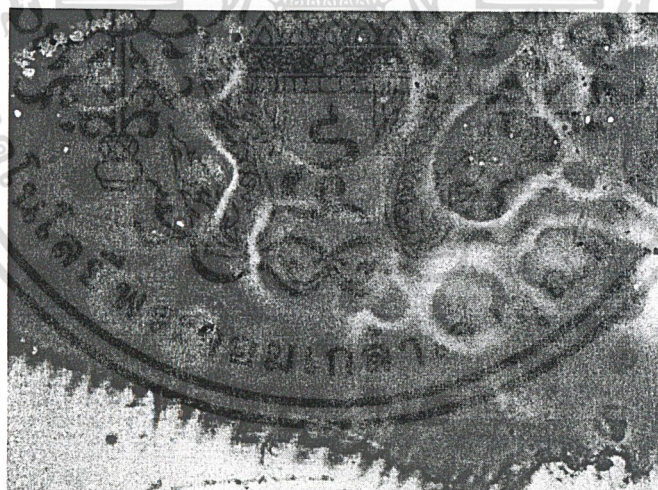
รูปที่ 1ง พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนก่อนทำการ Stain etching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เมื่อทดลองกับแผ่นที่ใช้เวลาขั้บลึก 20 นาที

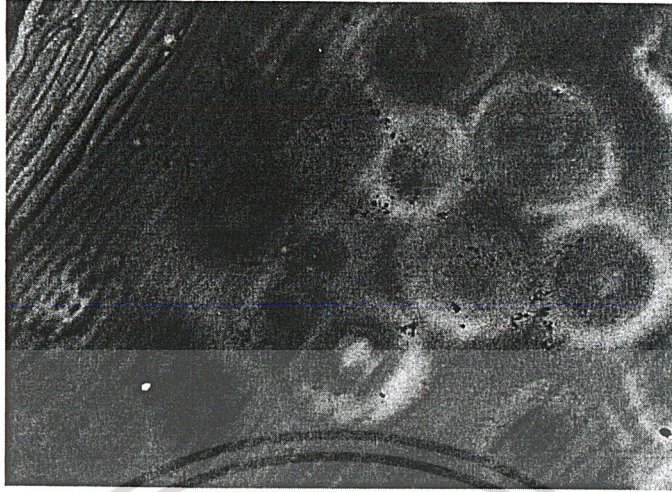


รูปที่ 2ง พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนหลังทำการ Stain etching ที่เวลา 20 วินาที



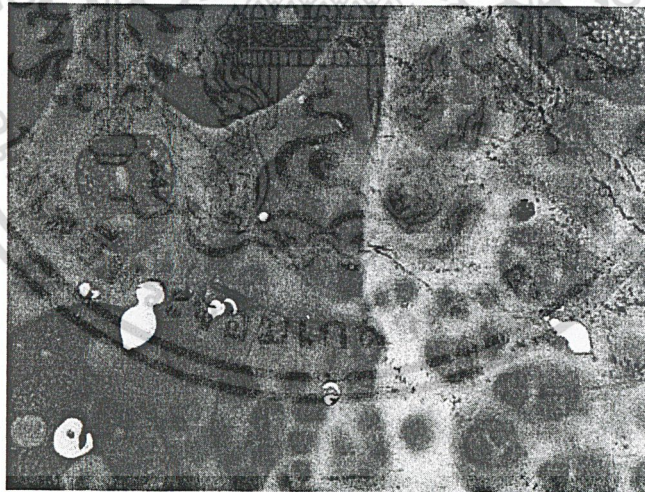
รูปที่ 3ง พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนหลังทำการ Stain etching ที่เวลา 25 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



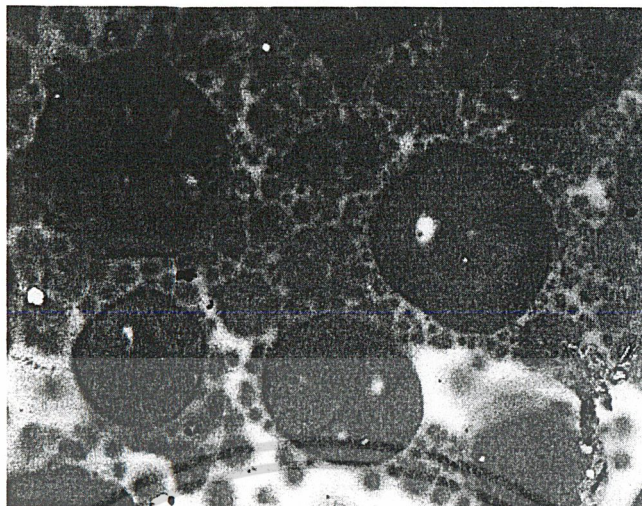
รูปที่ 4ง พื้นผิวของแผ่นชิลิคอนหลังทำการ Stain etching ที่เวลา 30 วินาที

2. เมื่อทดลองกับแผ่นที่ใช้เวลาขั้ดลึก 30 นาที



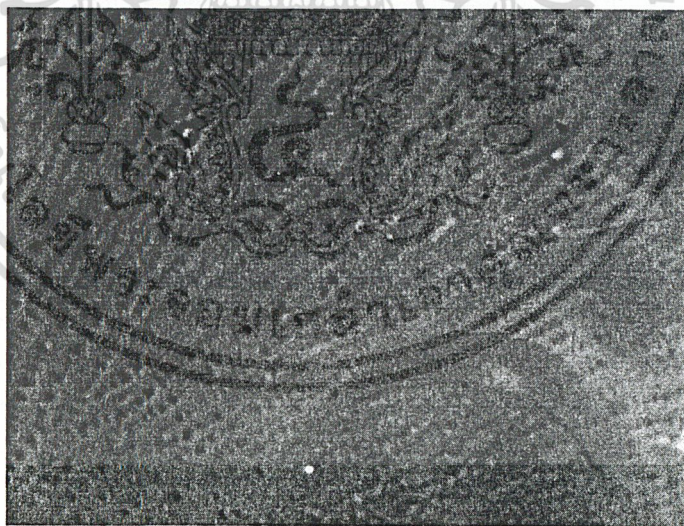
รูปที่ 5ง พื้นผิวของแผ่นชิลิคอนหลังทำการ Stain etching ที่เวลา 40 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6ง พื้นผิวของแผ่นซิริคอนหลังทำการ Stain etching ที่เวลา 50 วินาที

3. เมื่อทดลองกับแผ่นที่ใช้เวลาขัปลิก 55 นาที



รูปที่ 7ง พื้นผิวของแผ่นซิริคอนหลังทำการ Stain etching ที่เวลา 110 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8ง พื้นผิวของแผ่นซิงค์คอนหลังทำการ Stain etching ที่เวลา 150 วินาที



รูปที่ 9ง พื้นผิวของแผ่นซิงค์คอนหลังทำการ Stain etching ที่เวลา 230 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลจากการทดลองการ Stain etching ของแผ่นผลึกซิลิคอนที่เวลาการขั้บดึก 20, 30 และ 55 นาที จะพบว่า เวลาที่ใช้ในการขั้บดึกน้อยจะเกิดการข้อมสีได้เร็วกว่าแผ่นผลึกที่ใช้เวลาในการขั้บดึกมากกว่า อีกทั้งถ้าใช้เวลามากๆ รุพารุนที่เกิเกิดขึ้นก็จะทะลุลงไปนชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ ซึ่งถ้าเป็นเช่นนี้ เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะได้รับความเสียหาย แต่สำหรับแผ่นผลึกที่ใช้เวลาการขั้บดึกนานก็จะเกิดการข้อมสีช้า อีกทั้งการข้อมสีที่เกิขึ้นกับแผ่นผลึกที่ใช้ในการทดลองยังไม่มีควมสม่ำเสมอ (Uniformity) ในการเกิอีกด้วย ในโครงการครั้งนี้เรานำเสนอแนวคิดในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการทำชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอนเอาไว้ เพื่อการประยุกต์ หรือทดลองต่อไปในภายภาคหน้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้