สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน

DEVELOPMENT OF SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS FABRICATION PROCESS

T050396

จัดทำโดย

นาย คงศักดิ์ อิ่มอุไร

นาย ปกรณ์ ศิริวัฒนานนท์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน....50396....
วัน,เดือน,ปี 13 พ.ค. 2547

.b.....
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน

DEVELOPMENT OF SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS FABRICATION PROCESS

จัดทำโดย

นาย คงศักดิ์ อิ่มอุไร รหัส 43015250

นาย ปกรณ์ ศิริวัฒนานนท์ รหัส 43015265

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ของซิลิคอน

DEVELOPMENT OF SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS FABRICATION PROCESS

จัดทำโดย นาย คงศักดิ์ อิ่มอุไร รหัส 43015250

นาย ปกรณ์ ศิริวัฒนานนท์ รหัส 43015265



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ของซิลิคอน

DEVELOPMENT OF SILICON P-N JUNCTION SOLAR CELLS FABRICATION PROCESS

ผู้จัดทำ นาย คงศักดิ์ อิ่มอุไร

นาย ปกรณ์ ศิริวัฒนานนท์

โครงงานนี้ได้รับการตรวจสอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน

นาย คงศักดิ์ อิ่มอุไร
นาย ปกรณ์ ศิริวัฒนานนท์
รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน ได้รับการพัฒนาและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะได้กล่าวถึงผลการทดลอง การวิจัย การสร้าง และการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ขึ้นที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF SILCON P-N JUNCTION SOLAR CELLS FABRICATION PROCESS

Mr. Kongsak aimurai

Mr. Pagorm Siriwattananon

Assoc. Prof. Dr.Somkiat Supadech (Adviser)

2nd Semister , Education Year 2002

Abstract

The solar cell is an energy conversion device which directly converts solar energy into electrical energy. Up to the present, silicon p-n junction solar cells have been developed and have already found general application. The theis deals with the results of research. Fabrication. And the development of silicon solar cells at the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน สำเร็จลุล่วงได้ดี ต้องกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องและให้ข้อเสนอที่เป็นประโยชน์ ทำให้โครงงานสำเร็จลงด้วยความเรียบร้อย รวมทั้งคุณ นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง นักวิจัยในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้เสียสละเวลามาช่วยทำในการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน ตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสมบูรณ์ รวมถึงการแนะนำการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ จึงขอถือโอกาสแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คงศักดิ์ อิ่มอุไร

(นาย คงศักดิ์ อิ่มอุไร)

ปกรณ์ ศิริวัฒนานนท์

(นาย ปกรณ์ ศิริวัฒนานนท์)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ..... I

Abstract..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VIII

สารบัญรูป..... X

บทที่ 1 บทนำ..... 1

แนวความคิดและที่มาของการทำโครงงาน..... 2

วัสดุประสงค์..... 3

รายละเอียดของโครงงาน..... 3

แผนการดำเนินงาน..... 3

บทที่ 2 ประวัติเซลล์แสงอาทิตย์และพลังงานแสงอาทิตย์..... 5

2.1 ประวัติและความเป็นมา..... 6

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์..... 6

2.3 พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี..... 7

2.4 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก..... 8

บทที่ 3 ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน..... 9

3.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุลย์..... 9

3.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับไบอัสตรง..... 13

3.3 รอยต่อพีเอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ..... 15

3.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น... 17

3.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น..... 22

3.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรสมมูลย์... 25

3.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์..... 27

3.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์..... 29

3.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์..... 29

3.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์..... 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 เทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน..... 32

4.1 บทนำ..... 32

4.2 การสร้างแผ่นผลึก..... 33

4.3 แผ่น solar grade silicon..... 35

4.3.1 ลักษณะของ solar grade silicon wafer..... 35

4.3.2 ขั้นตอนการนำทรายหรือซิลิก้ามาทำเป็น MG – Si (Metallugical- grade silicon) 35

4.3.3 Solar-grade silicon..... 36

4.4 การแพร่สารเจือ..... 38

4.5 การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิค 39

4.6 การประกอบร่วมเป็นแผงเซลล์ฯ..... 40

4.7 การปรับปรุงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน..... 41

4.7.1 ซิลิคอนแบบริบบอน..... 43

4.8 อะมอร์ฟัส ซิลิคอน (Amorphous silicon) 44

บทที่ 5 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์..... 46

5.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์..... 46

5.2 สร้างอย่างไร..... 47

5.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว..... 47

5.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกโพลี..... 48

5.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบอะมอร์ฟัส..... 49

5.3 การเตรียมแผ่นผลึก..... 51

5.3.1 กรรมวิธีในการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน..... 54

5.3.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์... 54

5.4 การออกซิเดชั่น..... 57

5.4.1 ขบวนการออกซิเดชั่นด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) 58

5.4.2 การหาความหนาของชั้นออกไซด์..... 61

5.4.3 การพิจารณาความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุดสำหรับป้องกัน การแพร่สารเจือ..... 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4.4 ลำดับขั้นตอนในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์วิธี Thermal Oxidation..... 62
5.5 ขบวนการ Photolithography..... 62
5.5.1 Mask Making..... 62
5.5.2 การออกแบบมาส์ค (Master Mask) 63
5.5.3 การตัดมาส์คต้นแบบ..... 63
5.5.4 การออกแบบมาส์ค (Master Mask) 63
5.6 การออกแบบมาส์คด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 66
5.7 ขั้นตอนการทำขบวนการ Photolithography..... 78
5.7.1 เคลือบสารไวแสง (photo resist)..... 78
5.7.2 Mask alignment and expose 79
5.7.3 การดีเวลลอป (development)..... 80
5.7.4 Etching..... 81
5.7.5 การลอดชั้นสารไวแสง..... 81
5.8 การทดลองการแพร่สารเจือ (Diffusion)..... 82
5.8.1 คณิตศาสตร์สำหรับการแพร่..... 82
5.8.2 คำตอบของสมการ..... 83
5.8.3 การเกิดรอยต่อ P-N..... 88
5.9 แสดงภาพตัดขวางในขบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์..... 89
บทที่ 6 การวัดและการทดลอง..... 91
6.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของการ Drive In ที่ต่างกัน..... 91
6.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของอุณหภูมิที่ต่างกัน..... 94
6.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของความเข้มแสงที่ต่างกัน..... 96
6.4 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของความต้านทานอนุกรมที่ต่างกัน..... 98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.5 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของ
Premium Grade Silicon..... 101
6.6 การตรวจสอบคุณสมบัติของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon
ได้และผลของการ Drive In ที่ต่างกัน..... 103
6.7 การตรวจสอบคุณสมบัติของไดโอดที่สร้างจาก
Premium Grade Silicon..... 109

บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์..... 112
บทสรุปแผนการดำเนินงาน..... 114
แผนการดำเนินงานที่ดำเนินการแล้วในภาคเรียนที่ผ่านมา..... 114
แผนการดำเนินงานที่ดำเนินการในภาคเรียนนี้..... 115
ประมวลภาพการดำเนินงานทั้งหมดในโครงงานนี้..... 116
บทผนวกที่ 1. ตาราง ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ 117
บทผนวกที่ 2. ตารางคุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300K)..... 118
บทผนวกที่ 3. ตาราง แสดงสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน..... 119
บทผนวกที่ 4. วัสดุและเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 122
บรรณานุกรม..... 124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ชนิดของอะตอมสารเจือใน Metallurgical-grade silicon..... 36

ตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบต่าง ๆ..... 52

ตารางที่ 5.6.1 แสดงขนาดและระยะของตำแหน่งต่างๆบนเซลล์ที่ใช้ในการออกแบบ..... 67

ตารางที่ 5.6.2 แสดงพื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆที่ได้จากการออกแบบ 74

ตารางที่ 5.6.3 แสดงขนาด และระยะของตำแหน่งต่างๆบนเซลล์ที่ใช้ในการออกแบบ..... 75

ตารางที่ 5.6.4 แสดงพื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆที่ได้จากการออกแบบ 77

ตารางที่ 6.1.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 50 นาที 91

ตารางที่ 6.1.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 60 นาที 93

ตารางที่ 6.2.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 22 องศา เซลเซียส..... 95

ตารางที่ 6.2.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 34 องศา เซลเซียส..... 95

ตารางที่ 6.3.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 300*100M LUX..... 97

ตารางที่ 6.3.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 600*100M LUX..... 97

ตารางที่ 6.3.3 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 900*100M LUX..... 97

ตารางที่ 6.3.4 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1200*100M LUX..... 98

ตารางที่ 6.4.1 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน อนุกรม Rs = 0.4 Ohm. 99

ตารางที่ 6.4.2 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน อนุกรม Rs = 0.8 Ohm. 99

ตารางที่ 6.4.3 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน อนุกรม Rs = 2 Ohm..... 99

ตารางที่ 6.4.4 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน อนุกรม Rs = 20 Ohm..... 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 6.4.5 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน อนุกรม Rs = 50 Ohm. 100

ตารางที่ 6.4.6 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน อนุกรม Rs = 100 Ohm. 100

ตารางที่ 6.4.7 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน อนุกรม Rs = 200 Ohm. 100

ตารางที่ 6.4.8 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน อนุกรม Rs = 300 Ohm. 100

ตารางที่ 6.5.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ Premium Grade Silicon 102

ตารางที่ 6.6.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon... 104

ตารางที่ 6.5.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon... 106

ตารางที่ 6.7.1 แสดงค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade Silicon..... 109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงรูปแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... 5
รูปที่ 2.2 แสดงระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์..... 6
รูปที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ pn..... 10
รูปที่ 3.2 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน
ก. ก่อนสัมผัส ข. ขณะสัมผัส ค. ภาวะสมดุลย์หลังสัมผัสแล้ว..... 12
รูปที่ 3.3 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี – เอ็น 13
รูปที่ 3.4 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง..... 14
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับ
แรงดันไบอัสตรง V_A 15
รูปที่ 3.6 แสดงรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ..... 15
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อ พี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัส
ย้อน กลับ V_A 16
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น..... 17
รูปที่ 3.9 แสดงการเกิดโฟตอนจากแสงอาทิตย์ถ่ายพลังงานให้อะตอมของซิลิคอนทำให้เกิด
อิเล็กตรอน และโฮลอิสระ..... 18
รูปที่ 3.10 แสดงการเกิดกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสง..... 19
รูปที่ 3.11 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่เซลล์ได้รับแสง..... 20
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของรอยต่อ พี-เอ็น ขณะ
ที่ไม่ได้รับแสงและได้รับแสง..... 21
รูปที่ 3.13 แสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่สำคัญ..... 23
รูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างภายในของเซลล์ แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน..... 26
รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะวงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น..... 27
รูปที่ 3.16 (ก). แสดงผลของความต้านทานอนุกรม และ
(ข). ผลของความต้านทาน ขนาน..... 28
รูปที่ 3.17 แสดงผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์..... 29
รูปที่ 3.18 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์..... 30
รูปที่ 3.19 โครงสร้างของเซลล์ฯ ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงและตัวอย่างดัชนีหักเหของสาร
ที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง..... 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 ภาพสเก็ตดาวเทียม skylab ที่ใช้ เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า.. 32

รูปที่ 4.2 แสดงลำดับขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการเตรียมแร่ซิลิคอน..... 33

รูปที่ 4.3 (ก). การดึงผลึกโดยวิธีของโซคราสกี้
(ข). แท่งผลึกที่ได้จะถูกนำไปตัดออกเป็นแผ่นผลึก
(ค). แผ่นผลึกรูปเดี่ยวที่ตัดและขัดผิวแล้ว..... 34

รูปที่ 4.4 แสดงแผ่น Solar Grade Silicon Wafer ที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์..... 35

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลกระทบของอะตอมสารเจือที่มีต่อ silicon solar cells..... 37

รูปที่ 4.6 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์เป็นแหล่งจ่าย
สารเจือ..... 38

รูปที่ 4.7 การระเหยโลหะในสูญญากาศ เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์..... 39

รูปที่ 4.8 (ก). การใช้แผ่นฟอยล์บาง ๆ ของโลหะในการเชื่อมต่อเซลล์ฯ เข้าด้วยกัน
(ข). การเก็บบรรจุเซลล์ฯ โดยมีชั้น laminated เพิ่มความแข็งแรงให้กับแผงเซลล์ฯ 40

รูปที่ 4.9 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว..... 41

รูปที่ 4.10 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจาก polycrystal 42

รูปที่ 4.11 การดึงแผ่นซิลิคอนแบบริบบอน..... 43

รูปที่ 4.12 ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน..... 44

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างของ การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว..... 48

รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการผลิตของโพลีซิลิคอน..... 49

รูปที่ 5.3 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน..... 50

รูปที่ 5.3.1 แสดงกรรมวิธีในการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน..... 53

รูปที่ 5.4 แสดงการวัดและเครื่องวัดค่าพิกัดความต้านทานโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ..... 56

รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา และเวลาในการสร้างออกไซด์
อุณหภูมิต่าง ๆ แบบ Dry Oxidation..... 59

รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา และเวลาในการสร้างออกไซด์
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 60

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุด..... 61

รูปที่ 5.8 แสดงการออกแบบมาส์คที่ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จริง..... 65

รูปที่ 5.9 แสดงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ L-Edit ที่ใช้ในการออกแบบ..... 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.10 แสดง Layout Area ที่ใช้ในการออกแบบขั้วโลหะ..... 67
รูปที่ 5.11 แสดง Layout Area การออกแบบมาส์คต้นแบบ ERC01..... 68
รูปที่ 5.12 แสดง Layout Area การออกแบบมาส์คต้นแบบ ERC02..... 69
รูปที่ 5.13 แสดง Layout Area การออกแบบ Monitor มาส์คของ Monitor เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองแสดงได้รูปด้านล่าง..... 72
รูปที่ 5.14 แสดงการวางมาส์คเซลล์ทดลองบนแผ่นเวเฟอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว 74
รูปที่ 5.15 แสดงลำดับขั้นตอน และภาพด้านข้าง ของผลึกซิลิคอน ในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี..... 78
รูปที่ 5.16 แสดงการทำงานวิธีการเคลือบสารไวแสง..... 79
รูปที่ 5.17 แสดงอุปกรณ์ในการจัดมาส์ค (alignment)..... 80
รูปที่ 5.18 แสดงวิธีการดีเวลลอป (development)และน้ำยาดีเวลลอป..... 80
รูปที่ 5.19 แสดงค่า Solid Solubitity ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิคอน..... 84
รูปที่ 5. 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิการแพร่ และอุณหภูมิของสารเจือชนิดต่าง ๆ..... 86
รูปที่ 5.21 กราฟหาการกระจายทั้งแบบ erfc และ Gaussion..... 87
รูปที่ 5.22 แสดงการเกิดรอยต่อ P-N..... 88
รูปที่ 6.1.1 วงจรที่ใช้ทดลองวัดเปรียบเทียบ Drive In ที่ ต่างกัน..... 91
รูปที่ 6.1.2 แสดงกราฟกระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 50 นาที..... 92
รูปที่ 6.1.3 แสดงกราฟกำลังงาน และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 50 นาที..... 93
รูปที่ 6.1.4 แสดงกราฟกระแส และแรงดันไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 60 นาที..... 94
รูปที่6.2.1 วงจรที่ใช้ทดลองวัดเปรียบเทียบที่ อุณหภูมิ ต่างกัน..... 94
รูปที่ 6.2.2 แสดงกราฟกระแส และแรงดันไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส..... 95
รูปที่ 6.2.3 แสดงกราฟกระแส และแรงดันไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส..... 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.3.1 วงจรที่ใช้ทดลองวัดเปรียบเทียบที่ ความเข้มแสงต่างกัน..... 96
รูปที่ 6.3.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่างกัน 98
รูปที่ 6.4.1 วงจรทดลองวัดผลของความต้านทานอนุกรมภายใน..... 99
รูปที่ 6.4.2 แสดงกราฟกระแส และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทาน
อนุกรม (Rs)ที่ต่างกัน..... 101
รูปที่ 6.5.1 วงจรที่ใช้ทดลองวัดเซลล์ของ Premium Grade Silicon..... 101
รูปที่ 6.5.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ Premium Grade
Silicon..... 102
รูปที่ 6.5.3 แสดงการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ Solar Grade Silicon กับเซลล์
แสงอาทิตย์ Premium Grade Silicon..... 103
รูปที่ 6.6.1 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon
ขณะไบอัสตรง..... 105
รูปที่ 6.6.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon
กรณี Leak Current..... 105
รูปที่ 6.6.3 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon
กรณี Break Down Voltage..... 106
รูปที่ 6.6.4 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon
ขณะไบอัสตรง..... 107
รูปที่ 6.6.5 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon
กรณี Leak Current..... 108
รูปที่ 6.6.6 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon
กรณี Break Down Voltage..... 108
รูปที่ 6.7.1 แสดงกราฟกระแส และแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade
Silicon ขณะไบอัสตรง..... 110
รูปที่ 6.7.2 แสดงกราฟกระแส และแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade
Silicon กรณี Leak Current..... 110
รูปที่ 6.7.3 แสดงกราฟกระแส และแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade
Silicon กรณี Break Down Voltage..... 111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ดวงอาทิตย์เป็นต้นกำเนิดพลังงานที่ใหญ่ที่สุดของระบบสุริยะ (Solar System) มากกว่า 500 ล้านปีแล้วและคาดว่า จะยังคงเป็นเช่นนี้อยู่ต่อไปอีกอย่างน้อย 50 ล้านปี พลังงานที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ที่เห็นได้ชัดก็คือ พลังงานความร้อนและแสงสว่าง ซึ่งมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตบนโลก พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ นับเป็นพลังงานธรรมชาติที่มีปริมาณมหาศาลสุดคณานับ และสามารถใช้ได้ตราบชั่วอายุของระบบสุริยะ การนำเอาพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ จึงเป็นเทคโนโลยีแขนงหนึ่งที่น่าสนใจยิ่ง

การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง สามารถทำได้โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่มนุษย์ได้พยายามประดิษฐ์คิดค้นขึ้นมาที่เรียกว่า “ เซลล์แสงอาทิตย์ ” หรือ “โซล่าเซลล์ ” (Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์นี้ได้ถูกสร้างขึ้นมาเป็นเวลาหลายสิบปีแล้ว และได้รับการพัฒนามาโดยตลอด จนมีประสิทธิภาพสูงพอที่จะนำมาใช้งานได้ อย่างไรก็ดีในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์เพียงแต่ได้รับความสนใจอยู่ในวงแคบของกลุ่มวิจัยเท่านั้น และบทบาทของเซลล์ก็จะจำกัดอยู่ในวงการอวกาศเป็นส่วนใหญ่ มิได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาสูง เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่สามารถนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เช่นกัน แต่เมื่อไม่กี่ปีมานี้เองที่โลกประสบกับวิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักของโลกในปัจจุบันนี้ และน้ำมันเชื้อเพลิงเหล่านี้ก็มีทีท่าว่า จะมีราคาสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ ทำให้ทุกคนมองเห็นปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความสนใจ และมีการพัฒนายิ่งกว่าเดิม นอกจากนี้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะแต่ประการใด และอายุการใช้งานที่ยาวนาน อีกทั้งไม่ต้องคอยดูแลรักษามากมายอีกด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมอย่างยิ่งประเภทหนึ่งที่สามารถใช้แหล่งพลังงานใหม่ของโลกในอนาคต

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้งานบนพื้นโลกเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ และยังสามารถประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างกว้างขวาง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงหลักการทางทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์ และกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา เพื่อทำการศึกษาและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ำ และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วย แต่การศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จะเน้นที่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ (Low Cost) เป็นหลักซึ่งเราจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบ (Solar Grade) ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งนี้ยังพิจารณาถึง ผลของความเข้มแสง อุณหภูมิ และชั้นลดการสะท้อนของแสงที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อจะนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงและการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

แนวความคิดและที่มาของการทำโครงงาน

ในปัจจุบันนี้สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ จึงนำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถใช้งานได้อย่างง่ายสะดวกต่อการใช้งาน และจะต้องมีประสิทธิภาพในการทำงานดี และมีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม ดังนั้นการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาเพื่อทำการศึกษา และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ำและเป็นปัจจัยในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วย แต่การศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ จะเน้นที่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ (Low Cost) เป็นหลักซึ่งเราจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบ (Solar Grade) ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งนี้ยังพิจารณาถึง ผลของความเข้มแสง อุณหภูมิและชั้นลดการสะท้อนของแสงที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อจะนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงและการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายด้วยเหตุนี้ผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงความสำคัญประกอบกับคณะผู้จัดทำมีความพร้อม คือมีห้องปฏิบัติการทางด้านสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะได้รับความสะดวกในการศึกษาอย่างยิ่ง อีกทั้งยังอำนวยให้ผู้ศึกษาได้ปฏิบัติเพื่อหาความรู้เพิ่มเติมจากที่ได้รับจากการเรียนทฤษฎี เพื่อให้เข้าใจอย่างลึกซึ้ง และท่องแท้ โดยที่สามารถมองเห็นถึงขบวนการปฏิบัติได้อย่างละเอียดและชัดเจน ซึ่งจะส่งผลให้ผู้จัดทำได้นำไปเป็นประสบการณ์และประยุกต์ใช้งานในโอกาสต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมจากที่ได้รับจากการเรียนทฤษฎี เพื่อให้เข้าใจอย่างลึกซึ้งและท่องแท้โดยที่สามารถมองเห็นถึงขบวนการปฏิบัติได้อย่างละเอียดและชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อศึกษาพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นำไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัย การพัฒนาทดลอง และการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของแผ่น (Solar Grade Si) ที่จะนำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์

4. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างและการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แผ่น (Solar Grade Si) ตลอดจน Simple Process Si ของเซลล์แสงอาทิตย์

5. เพื่อทดสอบการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนเปรียบเทียบ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Solar Grade Si กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Premium Grade Si ทั้งด้านคุณสมบัติ ประสิทธิภาพ และต้นทุนการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากเซลล์ทั้ง 2 แบบ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งในการเลือกวัสดุและกระบวนการผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม

6. เพื่อศึกษาการวัดและการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

รายละเอียดของโครงงาน

รายงานฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยแบ่งออกเป็นดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของโครงงานและแผนการดำเนินงาน

บทที่ 2 กล่าวถึงประวัติของเซลล์แสงอาทิตย์และพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน

บทที่ 4 กล่าวถึงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5 กล่าวถึงกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 6 ผลการทดลอง

บทที่ 7 บทสรุป

แผนการดำเนินงานการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน

1. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ P-N Junction Diode (I-V)

ทำการสร้างไดโอดโดยใช้ Solar Grade Silicon มาทำการสร้าง เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดและพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อที่จะศึกษาถึง กระแส-แรงดันของไดโอด ก่อนที่จะนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป ในที่นี้เราจะใช้ Mointor (เป็นแผ่นทดสอบ) คุณสมบัติของได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอด และอีกประการหนึ่งเราจะทำการศึกษาการแพร่สารเจือ แบบ Spin On Doplant อีกด้วย เพื่อหาข้อมูลและรายละเอียดต่างๆในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

2. ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (Large Area Junction or Solar Cells)

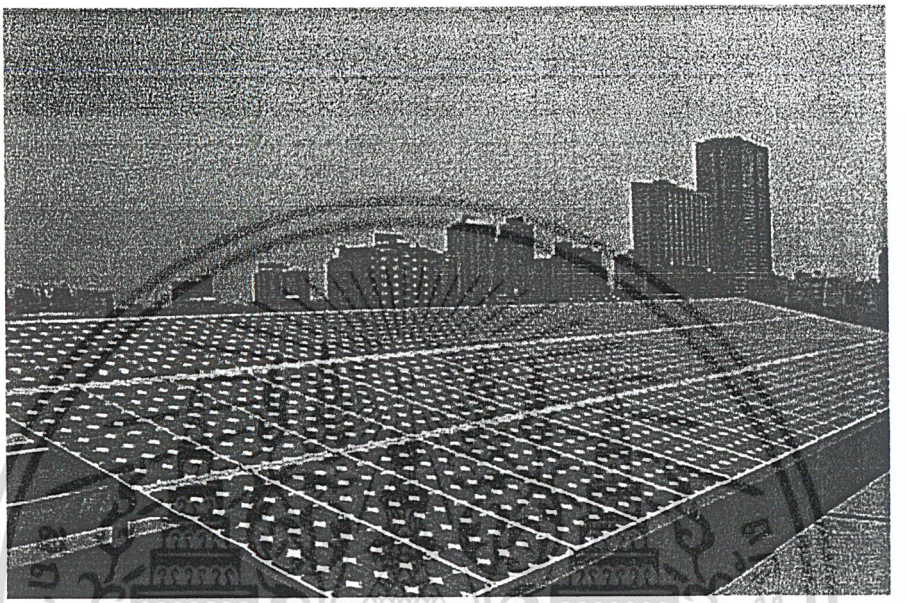
ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ Solar Grade Silicon ในการสร้าง เพื่อประหยัดต้นทุน (Low Cost)การสร้าง โดยกระบวนการสร้างเราจะทำการออกแบบและกระบวนการสร้างต่างๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นปัจจัยในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

2.1 ประวัติและความเป็นมา



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยคุณสมบัติเรียกว่า " ผลของโฟโต้โวลตาอิค " (Photovoltaic effect) ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยนาย Becquerel ได้สังเกตเห็นการเกิดมีแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลท์ เมื่อมีแสงตกกระทบ และใน ปี ค.ศ. 1876 ก็ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์นี้ขึ้นในสารซิลิเนียม (Selenium) ต่อจากนั้นได้มีการพัฒนาโฟโต้เซลล์โดยใช้สารซิลิเนียมและสารประกอบของ cuprous oxide

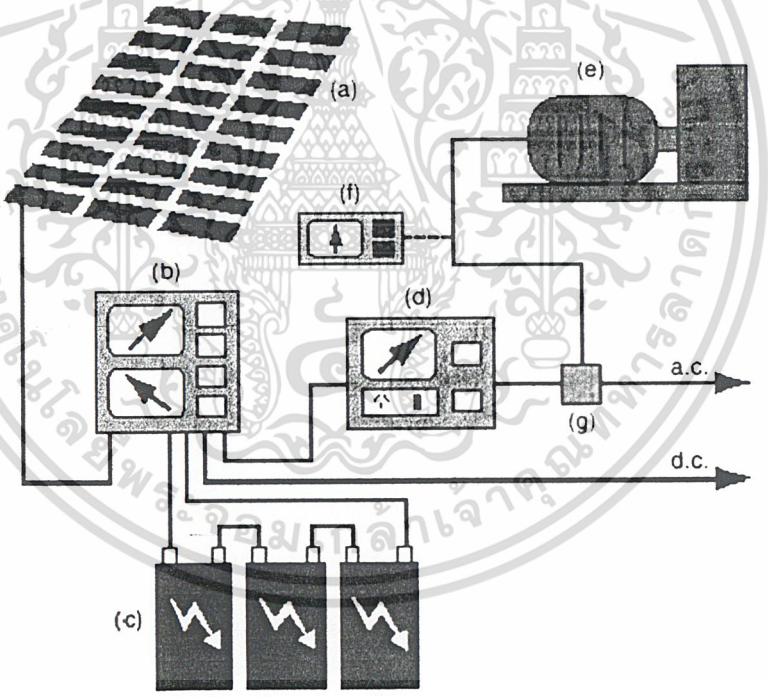
เมื่อปี ค.ศ. 1941 เริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีของการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น โดยวิธีการที่เรียกว่า Grown junction เทคโนโลยีดังกล่าว มีส่วนช่วยในการพัฒนางานของเซลล์แสงอาทิตย์ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1954 กลุ่มนักวิจัยจากบริษัท Bell telephone ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี -เอ็น ของผลึกซิลิคอนขึ้นมาเป็นผลสำเร็จในครั้งแรกนี้ เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น และในปี ค.ศ. 1958 ก็ได้มีการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านอวกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนาและสร้างขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานบนพื้นโลก โดยเฉพาะการเพื่อประสิทธิภาพของเซลล์ และการลดค่าต้นทุนในการสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน จึงขยายวงออกไปอย่างกว้างขวางจนกระทั่งในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิกอนมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงถึงราว 15%

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงเซลล์จ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันทีหรืออาจจะมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (Alternating Current) และจึงนำไปใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆทำงานได้ต่อไป



รูปที่ 2.2 แสดงระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย และเป็นที่นิยมกันมาก ทั้งนี้เนื่องมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ธาตุซิลิคอนเป็นธาตุที่หาได้ง่าย และมีมากที่สุดบริเวณโลกราคาจึงถูก

2. เทคโนโลยีเกี่ยวข้องกับธาตุซิลิคอนเป็นที่เข้าใจกันอย่างดี เนื่องจากมีการพัฒนาเป็นเวลานาน และใช้กันอย่างกว้างขวางอยู่แล้วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

2.3 พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี

ดวงอาทิตย์เป็นก๊าซที่ร้อนจัด และกำลังเผาไหม้ โดยปฏิกริยาทางนิวเคลียร์ฟิวชั่นดังนั้นจึงมีรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แผ่กระจายออกมาตามกฎของการแผ่รังสี บริเวณศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ คาดว่ามีอุณหภูมิสูงถึง 20,000,000 ^{o}k และที่ผิวนอกอุณหภูมิประมาณ 600 ^{o}k

พลังงานจากการแผ่รังสีต่อพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของดวงอาทิตย์ นอกบรรยากาศของโลกจะมีค่าคงที่ ความเข้มของการแผ่รังสีนี้เราเรียกว่า Solar Constant หรือที่นิยมเรียกกันว่าเป็นแบบ Air mass zero หรือเรียกย่อ ๆ ได้เป็น AMO ซึ่งในงาน Photovoltaic การแผ่รังสีแบบ AMO กำหนดกันว่ามีค่าเท่ากับ 135.3 mW/cm^{2}

สำหรับบนผิวโลก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะสูญเสียไปในชั้นบรรยากาศของโลก เนื่องจากชั้นของก๊าซต่าง ๆ เช่น O_2, O_3 ไอน้ำ CO_2 เป็นต้น ดังนั้นความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะลดลง และองค์การนาซ่า (NASA) แห่งสหรัฐอเมริกา เป็นผู้กำหนดมาตราฐานของพลังงานที่ได้รับในระดับน้ำทะเล เมื่อแสงอาทิตย์ทางตั้งฉากกับผิวโลกมีค่า 100 mW/cm^{2} และมีการกำหนดว่าเป็นการแผ่รังสีแบบ Air mass 1 หรือเขียนย่อๆได้เป็น AM1 ค่าของพลังงานค่านี้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถ หรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า

ลักษณะการแผ่รังสีแบบต่างๆอาจพิจารณาได้ดังนี้คือ

$$\text{Air mass} = \frac{1}{\cos\theta}$$

มุม θ: คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ ทำกับทิศตั้งฉาก กับพื้นผิวโลกบริเวณที่ทำการวัด

ดังนั้นดวงอาทิตย์ ทำมุมทิศตั้งฉากกับโลกเป็นมุม 60^{o} ลักษณะของการแผ่รังสีนี้จะเรียกว่าเป็นแบบ AM2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งค่าของ Air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่น ๆ ไม่เปลี่ยนแปลง พลังงานแสงอาทิตย์ ที่มาถึงยังผิวโลกก็ยิ่งมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่ง คือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM 1.5 ซึ่งค่าพลังงานรวมทั้งหมดมีค่า 83.2 mW/cm^2

2.4 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ลำแสงหรือรังสีของแสงอาทิตย์ ที่ตกลงบนพื้นผิวโลก จะประกอบด้วยรังสีสองส่วนคือ

1) Direct sunlight หรือ ลำแสงอาทิตย์โดยตรง

2) Indirect or Diffused sunlight หรือ ลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจายดวงอาทิตย์โดยตรง และสำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจายหรือ diffused sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลกประมาณกันว่า แม้แต่ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10 – 20% ของรังสีทั้งหมดที่รับได้ ยิ่งในวันที่มีเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10 – 20% ของรังสีทั้งหมดที่รับได้ ยิ่งในวันที่มีเมฆหมอกปกคลุมมาก ๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจ่ายนี้จะยิ่งมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

สเปกตรัมของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจายจะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงแบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อนและแพร่กระจาย นอกนี้แล้ว ลักษณะการแผ่รังสีแบบ Air mass ค่าสูง ๆ จะมีผลทำให้ปริมาณของแสงที่ได้รับในส่วนแพร่กระจายมีค่าเพิ่มยิ่งขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน

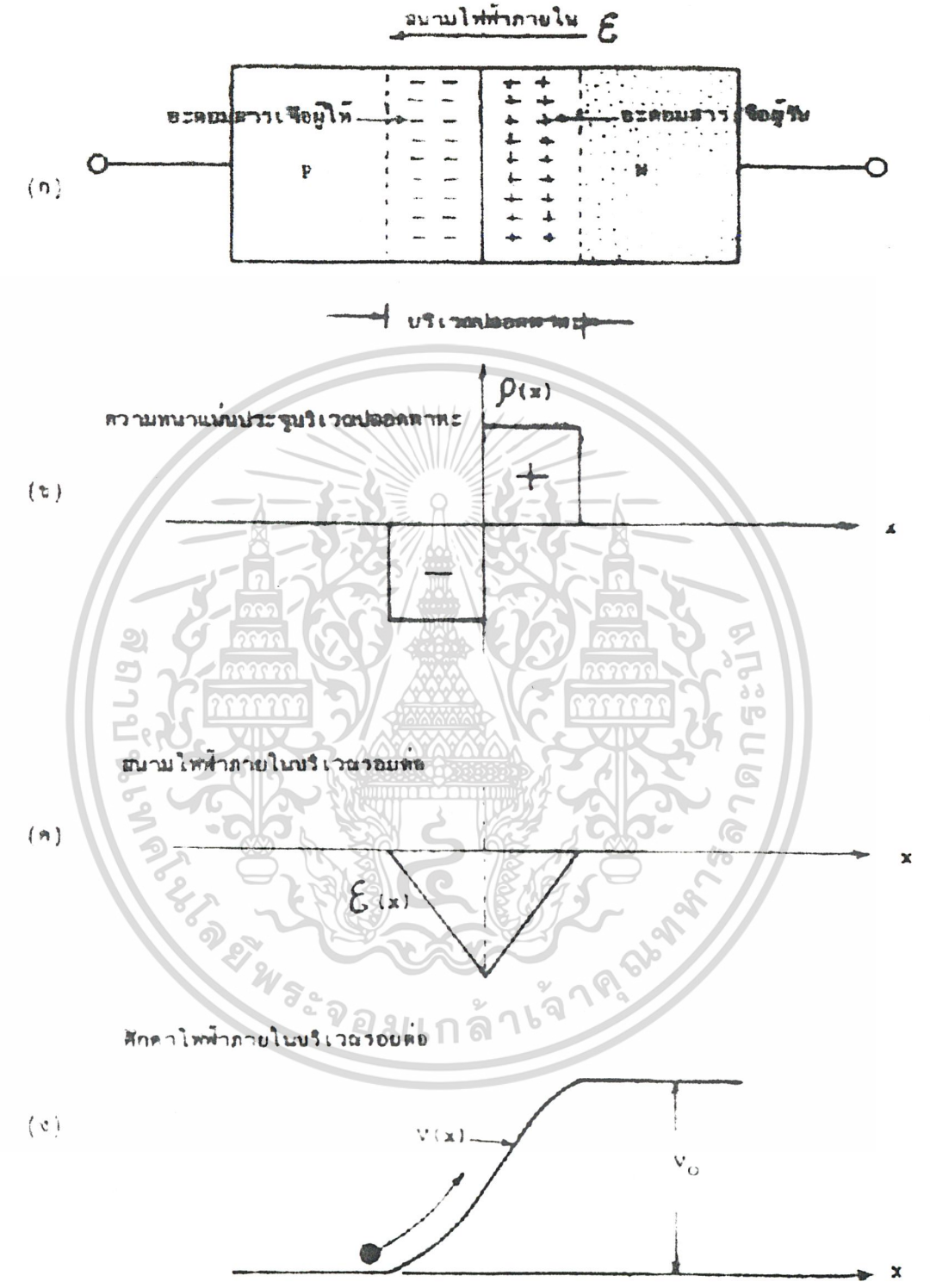
3.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุลย์

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น และพอสรุปได้ดังนี้คือ เนื่องจากโฮล ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P) มีความหนาแน่นมากกว่าโฮลทาง ด้านอิเล็กตรอนทางด้าน สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (n) มีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นด้วยความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกันนี่เอง จะทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุพาหะจากทางด้านที่ซึ่งมีความหนาแน่นของประจุพาหะมากกว่าไปยังด้านซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า กล่าวคือ โฮลทางด้านพีในบริเวณใกล้รอยต่อ จะแพร่เข้าไปในด้านเอ็นและอิเล็กตรอน ทางด้านเอ็นในบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปทางด้านพี การแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อ พี-เอ็น และสิ่งที่ตามมาก็คือจะมีการรวมตัว (recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนผลจากการรวมตัวของประจุพาหะทั้งสองนี้ จะทำให้อะตอมของสารเจือบริเวณใกล้ ๆ กับรอยต่อ พี - เอ็น กลายเป็นไอออน (ion) และแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมาได้ กล่าวคืออะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านเอ็น จะสูญเสียอิเล็กตรอน อะตอมนี้จึงแสดงตังเป็นไอออนบวก และอะตอมของสารเจือชนิดพีทางด้านพี จะสูญเสียโฮลไป จึงทำให้อะตอมนี้แสดงตัวเป็นไอออนลบ เมื่อเป็นเช่นนี้ จะทำให้เกิดสะสมประจุไฟฟ้าขึ้น ณ บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่อำนาจของสนามไฟฟ้านี้จะขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นการแพร่ข้ามรอยต่อจองประจุพาหะทั้งสองชนิด จะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีอำนาจมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้ประจุพาหะทั้งสองรอยต่ออยู่ในภาวะ “สมดุลย์” (equilibrium)

นอกจากนี้แล้ว ปรากฏการณ์ ดังกล่าวจะทำให้บริเวณภายในรอยต่อนั้นไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิด คงมีแต่อะตอมของสารเจือชนิดพี และชนิดเอ็น ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาพไอออนลบและไอออนที่มีอยู่ในบริเวณดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (depletion region) สนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณนี้มีแรงดันไฟฟ้าภายใน (built - in voltage) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เองที่เป็นกำแพงศักย์ ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นของประจุ สนามไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อแสดงได้ ดังในรูปที่ 3.1 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อหรือที่เรียกว่า “ศักย์สัมผัส” (contact potential) แสดงได้ด้วยสมการ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ pn

$$V_o = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \qquad (3.1)$$

ซึ่ง V_o : ศักย์สัมผัส (โวล์)

k : ค่าคงตัวของโบสต์มันน์มีค่า = 8.62×10^{-5} eV/^oK

T : อุณหภูมิองศาสัมบรูณ์ (^oK)

q : ประจุอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

N_A : ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (cm^{-3})

N_D : ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (cm^{-3})

n_i : ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})

ในกรณีที่เราพิจารณาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน จะพบว่าขณะที่รอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น เนื่องจากระดับเฟอร์มิ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เรานิยามไว้ว่า โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานนี้จะมีค่าเป็น 1/2 ของสารกึ่งตังนำชนิดเอ็น และชนิดพีไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อรอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น ระดับเฟอร์มิในสารทั้งสองจะต้องปรับให้มีระดับเดียวกัน ขณะที่ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองกำลังปรับให้เท่ากัน จะตรงกับภาวะที่โฮล และอิเล็กตรอนแพร่ข้ามรอยต่อ จนกระทั่งเกิดสนามไฟฟ้าภายในต่อต้านการแพร่ของประจุพาหะ และในที่สุดอิเล็กตรอนและโฮลก็ไม่สามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้ ซึ่งเป็นภาวะสมดุลย์ของรอยต่อ ในขณะนี้เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่าระดับเฟอร์มิ (Fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะมีระดับเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และในภาวะสมดุลย์ ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังในสมการ 3.2

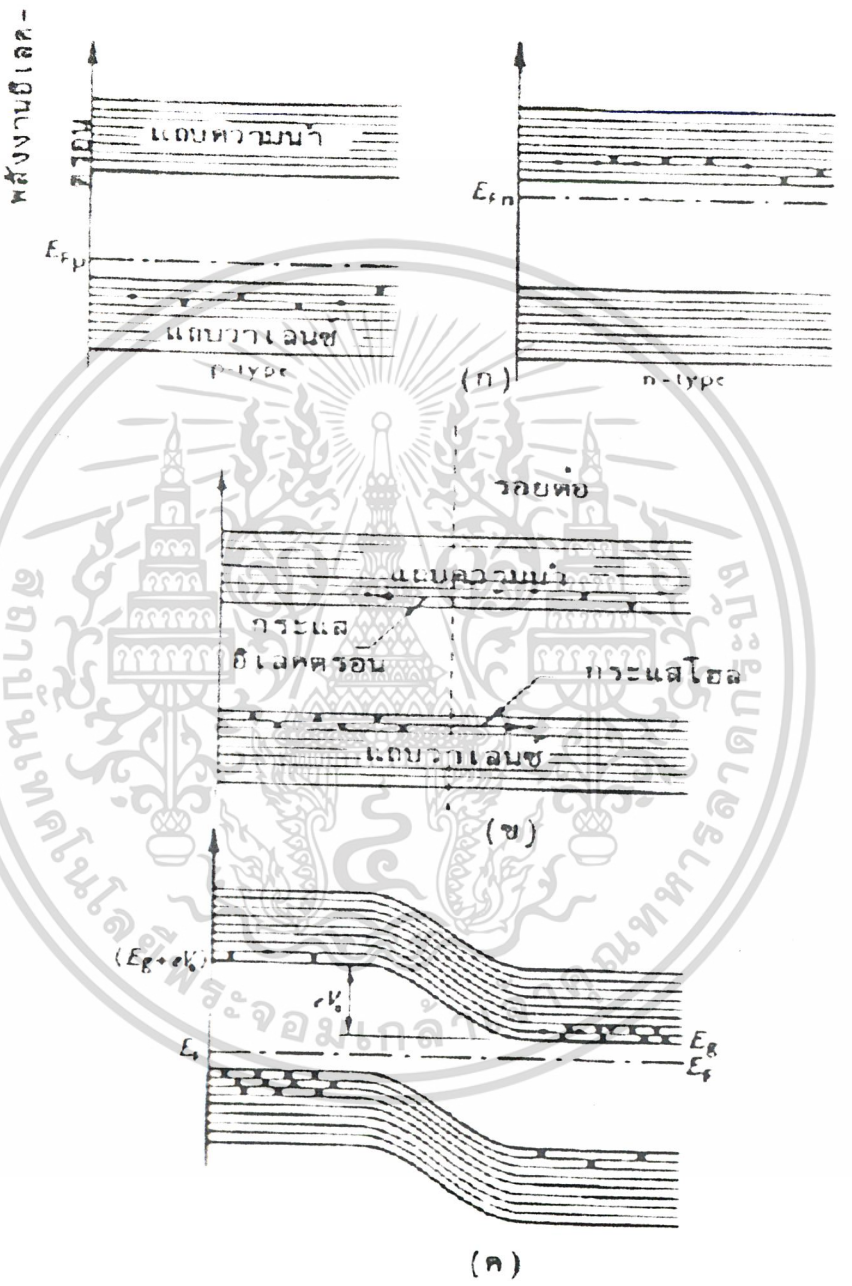
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุลย์ $Xm = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_o(N_A + N_D)}{q \cdot N_A \cdot N_D}}$ cm. (3.2)

โดยที่ ε : permittivity ของสารกึ่งตัวนำ

V_o : ศักย์สัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และนอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังในสมการ 3.3



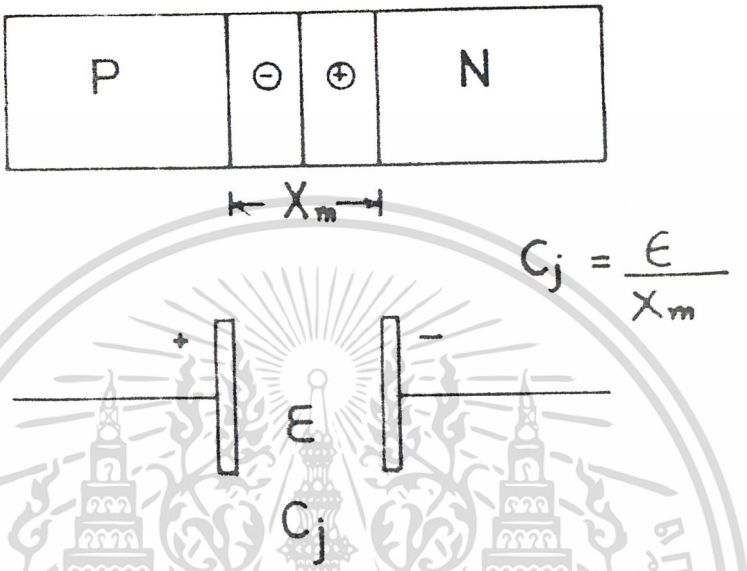
รูปที่ 3.2 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน

ก. ก่อนสัมผัส ข. ขณะสัมผัส ค. ภาวะสมดุลย์หลังสัมผัสแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_j = \sqrt{\frac{\varepsilon.q.N_A.N_D}{2(N_A+N_D)V_o}} \quad F/m^2 \qquad (3.2)$$

โดยที่ C_j ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ , ฟาหรัด/ตร.เมตร



รูปที่ 3.3 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี – เอ็น

3.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับไบอัสตรง

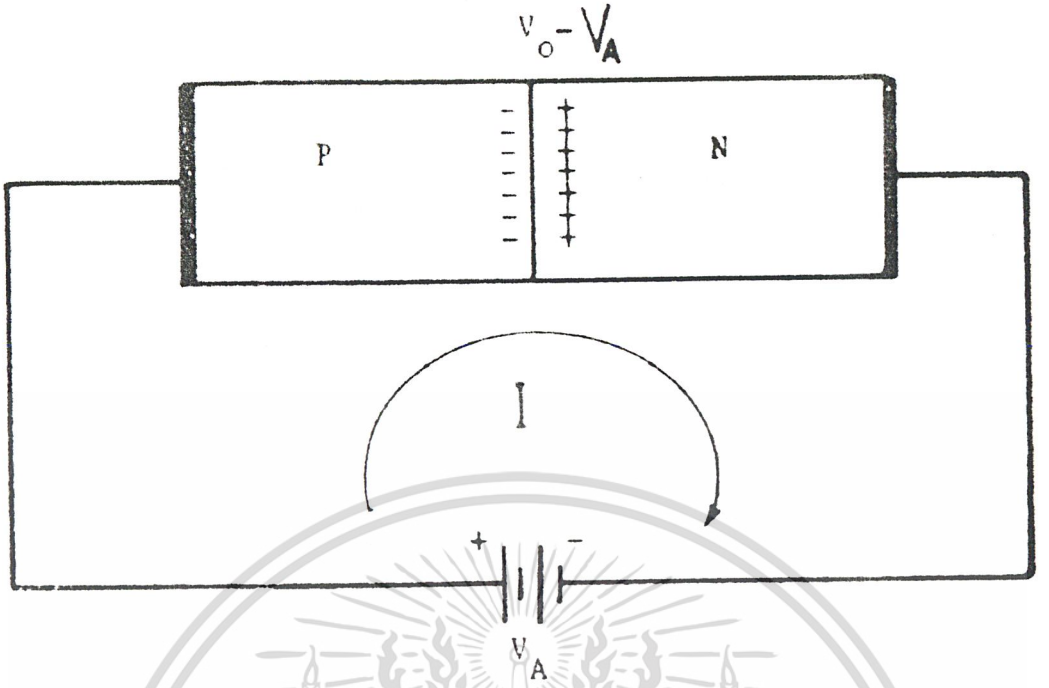
ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 3.4

แรงดันไบอัสจากภายนอกค่า V_A จะไปปรากฏที่รอยต่อ พี - เอ็น และอยู่ในลักษณะโฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นถูกฉีด (injection) ข้ามรอยต่อพีเอ็นได้ปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนี้ จะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสในลักษณะของเอกโปเนนเชียล (exponential function) จากการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เอง จะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ (3.4)

$$I = I_o \left(e^{qV_A/kT} - 1\right) \qquad (3.4)$$

และ $$I_o = A\left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D}\right) \qquad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง

โดยที่ I : คือกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น

I_o : คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

V_A : คือแรงดันไบอัสที่ให้

A : คือพื้นที่ของรอยต่อพีเอ็น

D_e, D_h : คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

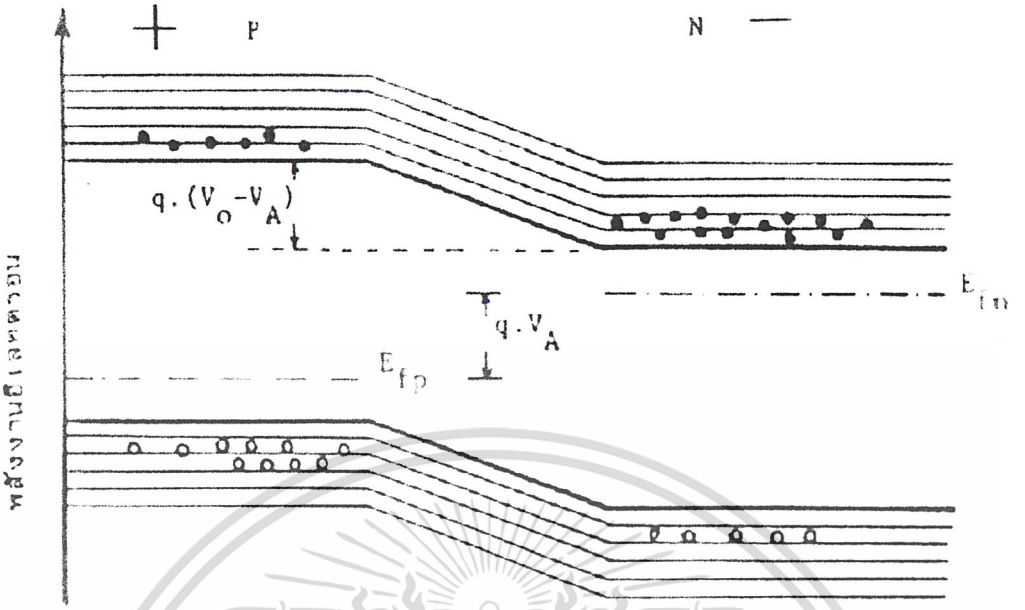
L_e, L_h : คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงได้ดังในรูปที่ 3.5 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิ (E_F) ของด้านพีและเอ็นจะไม่เท่ากัน และกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลงดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ และเป็นผลให้มีกระแสไหลในวงจรได้

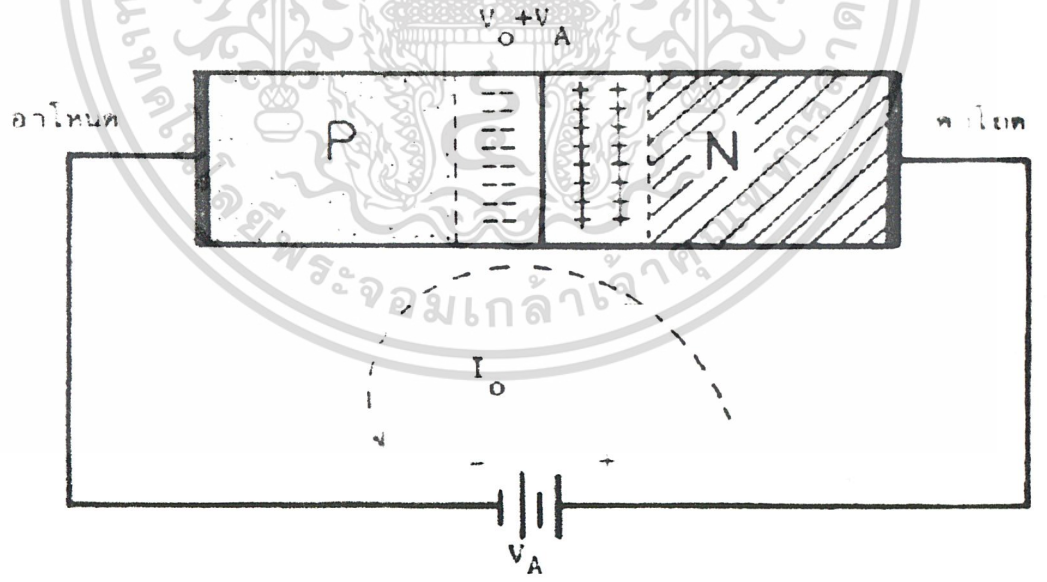
3.3 รอยต่อพีเอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสดังแสดงในรูปที่ 3.6 กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบทางด้านเอ็น ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อพีเอ็น มีค่า V_A โวลท์แล้ว จะพบว่า แรงดันไบอัสดังกล่า;จะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายใน ซึ่งปรากฏที่บริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A



รูปที่ 3.6 แสดงรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

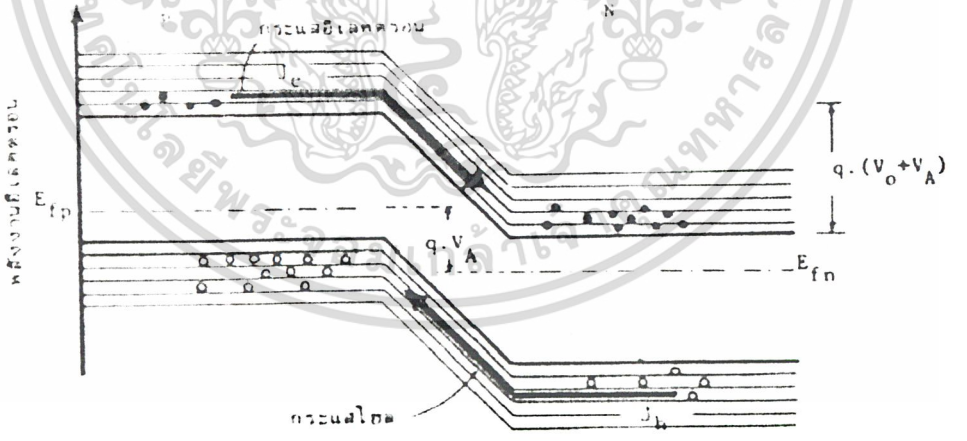
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อ (V_O) ดังนั้น จะทำให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และโฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้รอยต่อพี-เอ็นในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวน ไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ อย่างไรก็ดีจะพบว่าในขณะนี้โฮลทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านพี ซึ่งมีจำนวนน้อยสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงปรากฏมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับ กระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะได้รับแรงดันไลอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในขณะรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งอาจพิจารณาได้จากสมการ 3.4 เมื่อแทนค่าของ V_A ด้วย $-V_A$

ดังนั้นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

$$I \cong -I_O \qquad (3.6)$$

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะนี้แสดงได้ดังในรูปที่ 3.5 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิคู่หนึ่ง ๆ



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อน กลับ VA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

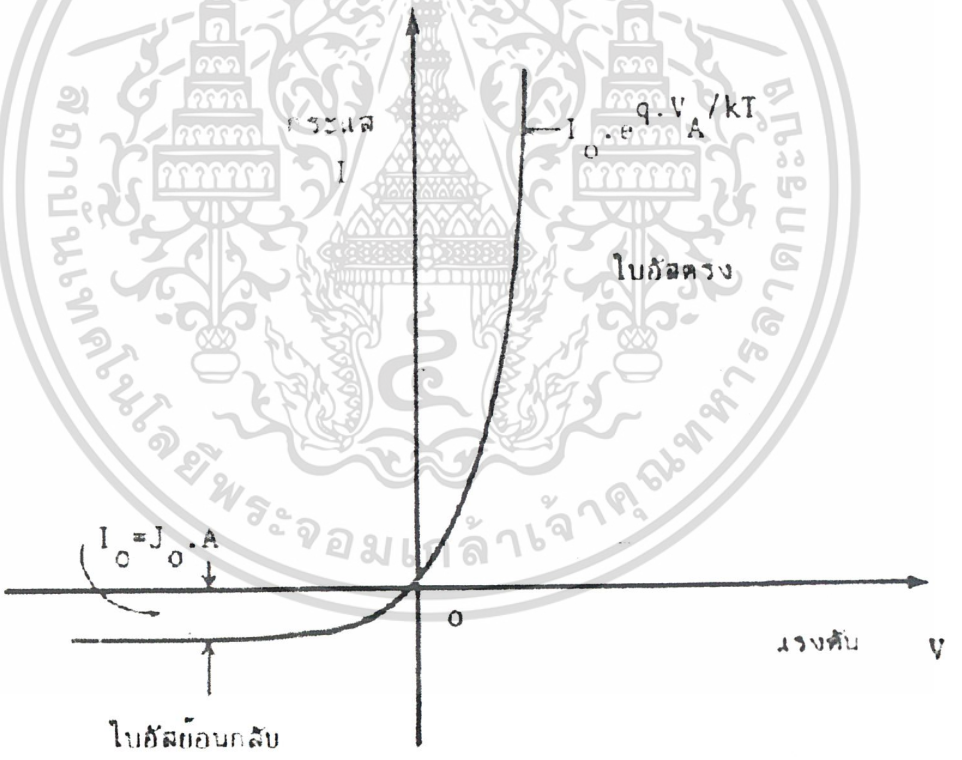
3.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

1) ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนที่ 3.2 และ 3.3 เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมากและกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกโปแนนเชียลกับแรงดัน และในขณะให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังในรูปที่ 3.8 ซึ่งกราฟนี้ได้มาจากสมการที่ 3.4

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั่นอาจเขียนได้ว่า

กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark) $I = I_0(e^{qV/kT} - 1)$ (3.7)

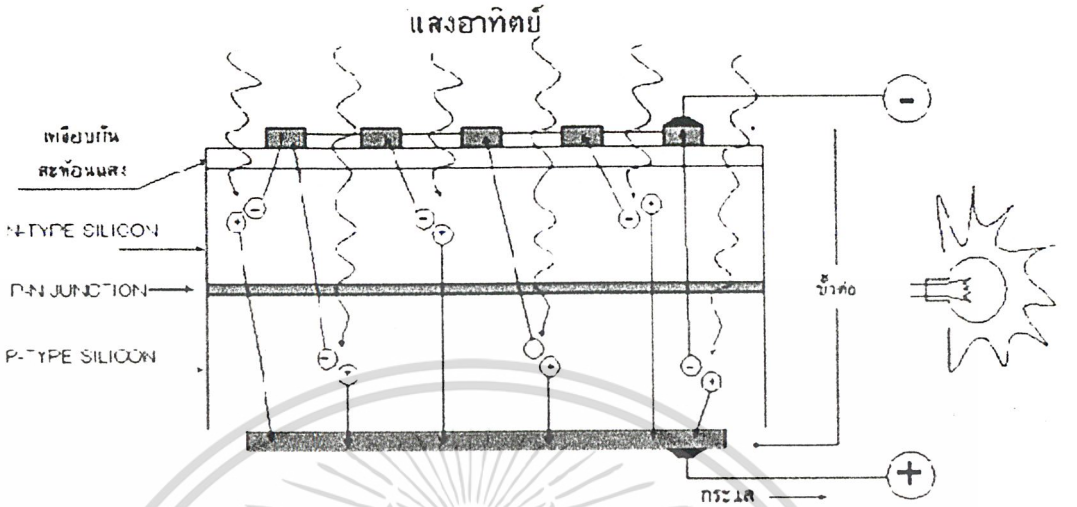


รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50396

2) ในภาวะที่รอยต่อพีเอ็นได้รับแสง (illumination)



รูปที่ 3.9 แสดงการเกิดโฟตอนจากแสงอาทิตย์ถ่ายพลังงาน ให้อะตอมของซิลิคอน ทำให้เกิดอิเล็กตรอน และโฮลอิสระ

ในขณะที่รอยต่อพีเอ็นได้รับแสง เราพิจารณากันว่าในลำแสง ประกอบไปด้วยกลุ่มของโฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่งดังแสดงในสมการ 3.8

$$E_{photon} = hv \qquad (3.8)$$

$E_{phonton}$: คือ พลังงานของโฟตอน

h : ค่าคงตัวของแพลงค์ = 6.624×10^{-34} joule-sec.

V : ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบรอยต่อพีเอ็น ซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) อยู่ในแถบความนำ conduction band) ได้ และทิ้งให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน - โฮล ที่เกิดค้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้ ๆ กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่รอยต่อได้รับไบอัสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.10

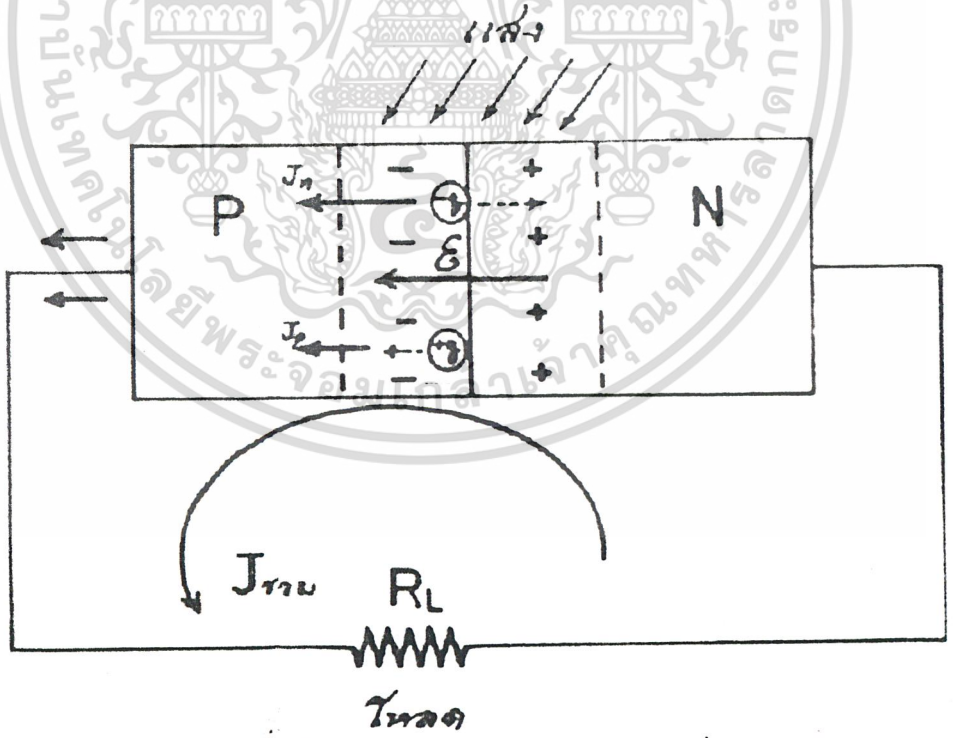
กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง” (Photo current) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า I_p ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแสง แสดงได้ดังในรูปที่ 3.10 ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

กรณีรอยต่อได้รับแสง (illumination) $$I = Io(e^{qV_A/kT} - 1) - Ip \qquad (3.8)$$

โดยที่ I_p : กระแสเนื่องจากแสง (photo current)

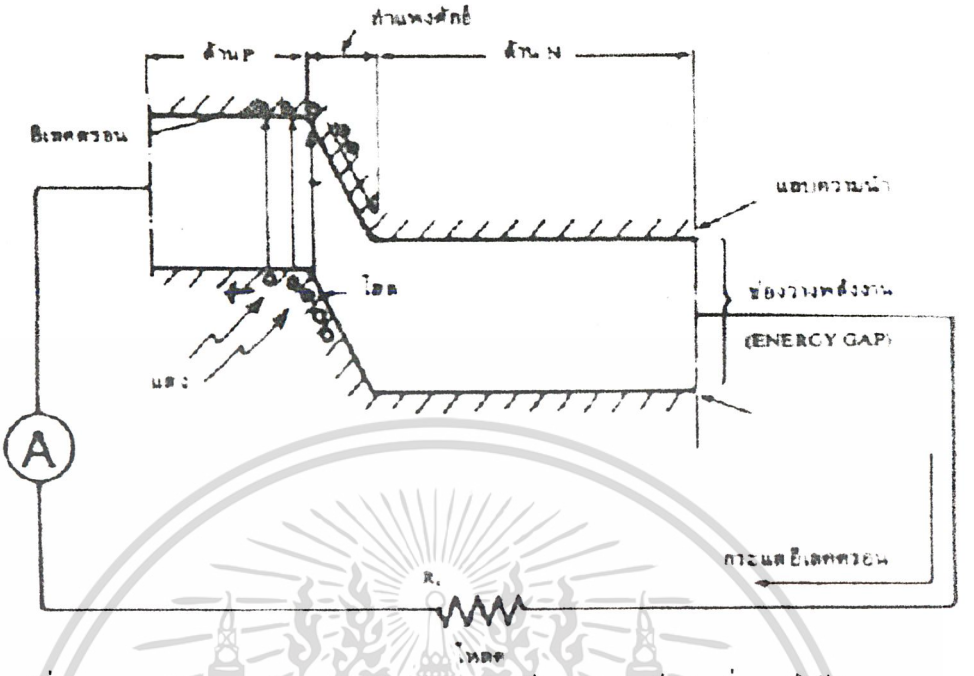
และกระแสเนื่องจากแสงสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 3.9

$$I_p = q.A\ g_{op}(L_p + L_n) \qquad (3.9)$$



รูปที่ 3.10 แสดงการเกิดกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่เซลล์ได้รับแสง

q : ประจุของอิเล็กตรอน คูลอมบ์

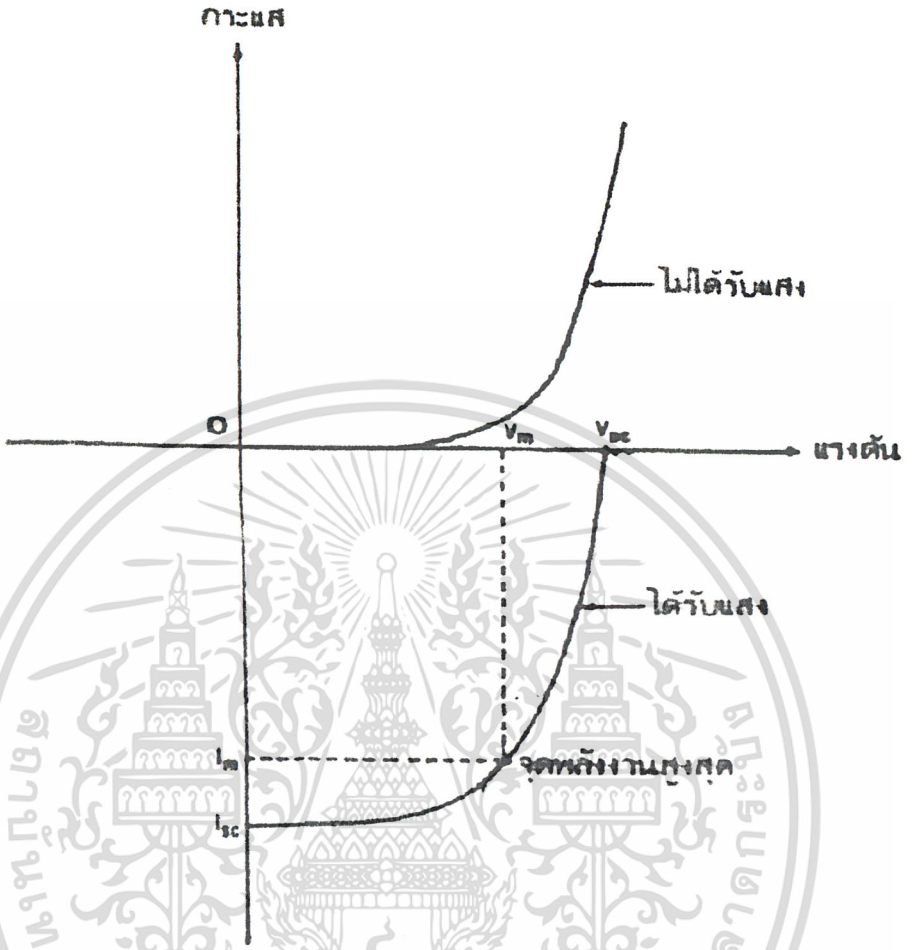
A : พื้นที่ของรอยต่อ-เอ็นที่ถูกแสง

g_{op} : อัตราการเกิด ประจุพาหะคู่ อิเล็กตรอน –โฮล เนื่องจากแสง (Optical Generation rate)

L_n ,L_p : คือระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

ดังนั้นคุณสมบัติของรอยต่อพี- เอ็นขณะได้รับแสงและไม่ได้รับแสงสารถเขียนแสดงเปรียบเทียบได้ดังในรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพีเอ็นขณะที่ไม่ได้รับแสงและได้รับแสง

3.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ และโดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือก็คือเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งจะต้องให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์ฯ ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสง จะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสงไหลออกมาจากเซลผ่านวงจรในภาวะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า “กระแสลัดวงจร” (Short circuit current) เขียนย่อ ๆ ว่า Isc ค่าของกระแสลัดวงจรนี้ พิจารณาหาได้ จากสมการที่ 3.8 เมื่อกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะลัดวงจร, $V_A = 0$, ดังนั้นสมการ 3.8 เขียนใหม่ได้ว่า

$$I = -I_p = Isc \qquad (3.10)$$

ในขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจรออก (open circuit) และที่รอยต่อได้รับแสง จะพบว่ากระแสที่ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรถูกเปิด แรงดันที่ปรากฏคร่อมรอยต่อพี-เอ็นขณะนี้ถูกเรียกว่า "แรงดันวงจรเปิด" (open circuit voltage) เขียนย่อ ๆ ว่า V_{oc} ค่า V_{oc} นี้หาได้โดยพิจารณาว่า

เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร , $I = 0$, สมการ 3.8 เขียนใหม่ได้ว่า

$$0 = I_o(e^{qV_A/kT} - 1) - I_p$$

ดังนั้น

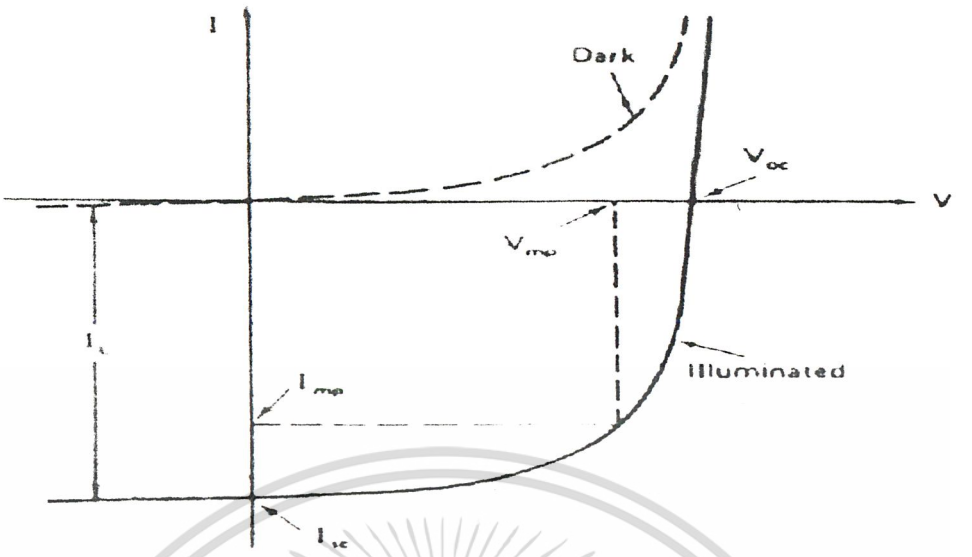
$$V_A = V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_o} + 1\right)$$

หรือ

$$Voc = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{Isc}{Io} + 1\right) \qquad (3.11)$$

ค่าของ I_{sc} และ V_{oc} แสดงไว้ในกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิด จะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

1. ขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง
2. สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสง เพื่อเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล
3. ระยะความลึกของรอยต่อพีเอ็น
4. ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
5. ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ
6. ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว
7. ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์

โดยทั่ว ๆ ไป กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน จะมีค่าประมาณ $35 \sim 40 mA/cm^2$ และในกรณีของแกลเลียมอาเซนายด์ค่า Isc จะอยู่ในราว 20 mA/cm^2 โดยวัดที่ค่า Air mass 0 ,(AM0)

ส่วนค่าของแรงดันวงจรเปิด (Open circuit voltage) V_{oc} จะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) Eg ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์ ฯ อย่างไรก็คือค่า V_{oc} นี้จะมีขนาดจำกัด คือสูงสุดไม่เกินค่าของความกว้างของช่องว่างพลังงานและปกติ ค่าของ V_{oc} ในเซลล์ ฯ แบบซิลิคอนมีค่าประมาณ 0.45-0.6 โวลท์ และในกรณีของสารแกลเลียมอกเซนายด์ V_{oc} จะมีค่าราว 0.9 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดีขณะที่นำเซลล์ไปใช้งาน เซลล์จะไม่อยู่ในภาวะลัดวงจร หรือเปิดวงจร ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์จะต้องถูกต่อเข้ากับโหลด (load) ซึ่งมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง ดังนั้นแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมาให้แก่โหลดจะมีค่าน้อยกว่าค่า V_{oc} และ I_{sc} โหลดซึ่งนำมาต่อเมื่อมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมามีค่าสูงสุด หรือที่เรียกว่า "ค่ากำลังงานสูงสุด" (maximumpower) ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลดได้ เขียนย่อ ๆได้ว่า P_m ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนอักษรย่อแทนเป็น I_m และ V_m ตามลำดับ

นั่นคือ $$P_m = I_m . V_m \qquad (3.12)$$

และค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการ 3.13

$$R_{load} = \frac{V_m}{I_m} \qquad (3.13)$$

ค่าของ P_m , V_m และ I_m บนกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสดงดังรูปที่ 3.13

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือค่าฟิลแฟคเตอร์ (fill factor) เขียนอักษรย่อเป็น F.F ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์ ถูกนิยามไว้ว่า คือ อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานสูงสุดที่เซลล์จะจ่ายให้แก่โหลดได้จริง กับค่าของพลังงานสูงสุดในทางอุดมคติที่เซลล์จ่ายได้นั่นก็คือ

$$F.F = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \qquad (3.14)$$

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก เซลล์ที่ใช้งานโดยทั่ว ๆ ไป ค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.6 ~ 0.8

นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญยิ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนตัวย่อเป็น η ประสิทธิภาพของเซลล์ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามว่าคืออัตราส่างระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จาก เซลล์ กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์

$$\text{นั่นคือ} \qquad \eta = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์}}{\text{พลังงานแสงที่เซลล์ได้รับ}} \times 100\,\%$$

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

$$\text{หรือ} \qquad = \frac{F.F \times I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \times 100\,\% \qquad (3.15)$$

โดยที่ Pin คือพลังงานรวมของแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์

ในปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของผลึกรูปเดี่ยวของ ซิลิคอน ที่ใช้งานกันโดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในช่วง 12~14 %

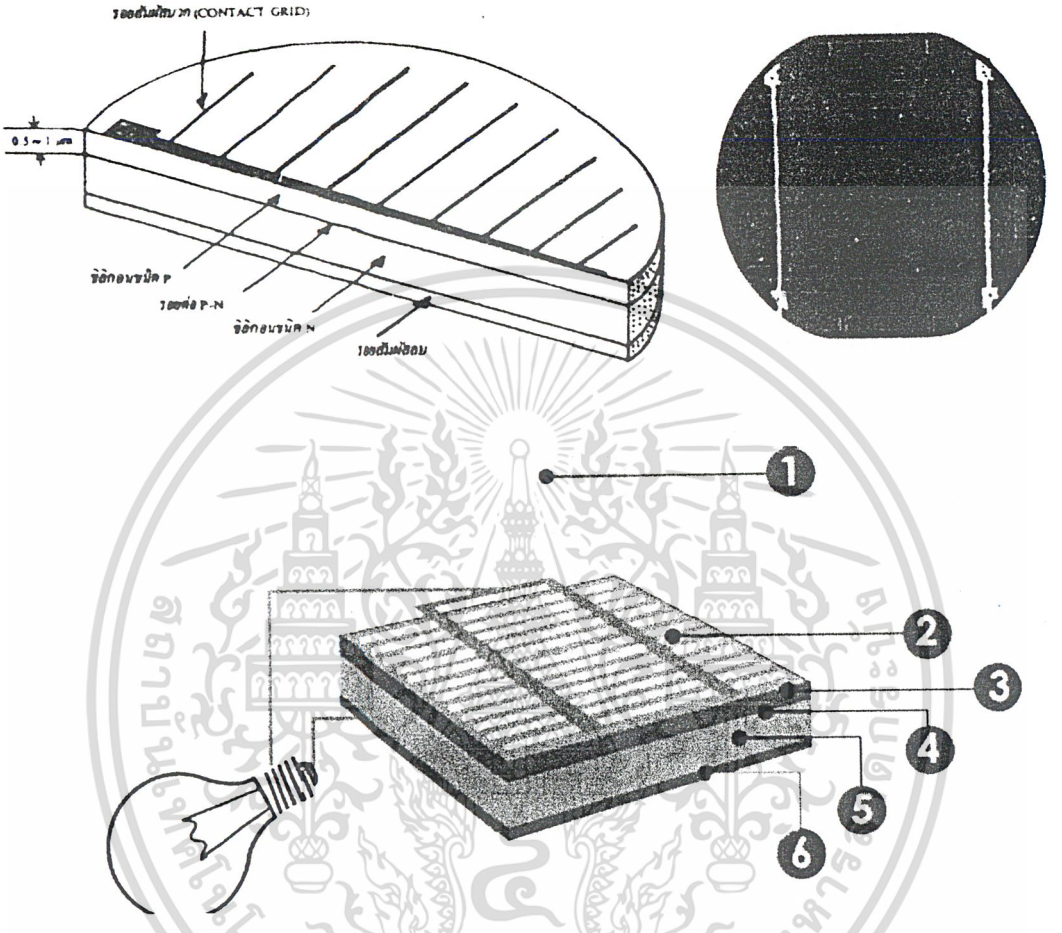
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น I_{sc}, V_{oc}, P_m, F.F. และ η ซึ่งมีค่าสูง ๆ อย่างไรก็ดีพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ ก็ถูกจำกัดด้วยแฟคเตอร์อื่น ๆ มากมาย ซึ่งบางแฟคเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟคเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

3.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจร สมมูลย์

โดยการแพร่สารเจือชนิดพี ลงไปในแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้น ความลึกของรอยต่อพี-เอ็น จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ ปกติความลึกของรอยต่อนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1μm เช่น 0.3~0.5 μm เพื่อให้พลังงานจากโฟตอนของลำแสงสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อได้โดยสะดวก ชั้นป้องกันการสะท้อนของแสงมีหน้าที่ช่วยดูดกลืนแสงและช่วยลดการสะท้อนกลับของแสง จึงมีผลช่วยเพิ่มปริมาณการดูดกลืนแสง รอยสัมผัสทางด้านหน้าของเซลล์มักใช้โลหะอะลูมิเนียม ทำเป็นลายนิ้วมือ หรือลายก้างปลา ทำหน้าที่รับกระแสออกมาจากรอยต่อ ส่วนทางด้านล่างของเซลล์จะถูกฉาบด้วยอะลูมิเนียมเช่นกัน เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบของเซลล์ อย่างไรก็ดี การนำเซลล์ไปต่อร่วมกันหลาย ๆ เซลล์ นิยมใช้วิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัดกรีดังนั้นเพื่อให้สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้ จึงนิยมนำเซลล์ไปทำการชุบนิเกล เพื่อให้ส่วนที่เป็นขั้วสัมผัสบวก และลบของเซลล์สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้



1. light (photons) **2.** front contact **3.** negative layer **4.** diversion layer **5.** positive layer **6.** back contact

รูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างภายในของเซลล์ แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

จากลักษณะของเซลล์ดังกล่าว เราสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.15

โดยที่ I_P คือ กระแสเนื่องจากแสง

I_j คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ ขณะไม่มีแสง

I คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านโหลดในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

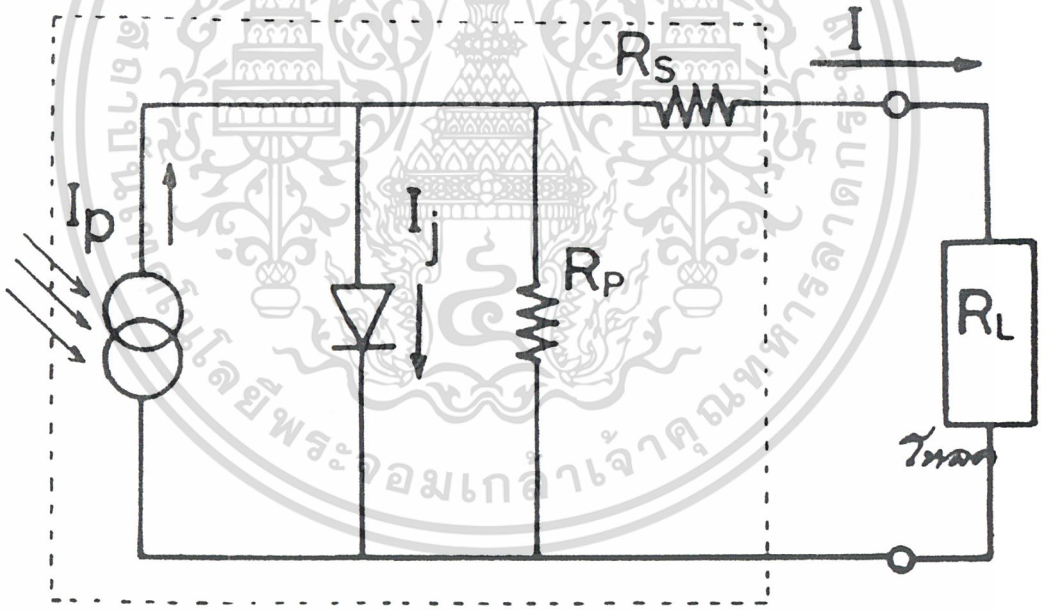
R_L คือ โหลด

R_s คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

R_P คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

3.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะใช้งาน จะเห็นว่า กระแสเนื่องจากแสง (Photo current) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (Current source) I_p ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ในทางอุดมคติ I_j ค่าความต้านทานอนุกรม (Seric resistance) R_s เกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความต้านทานของบริเวณรอยสัมผัสโอห์มมิค (ohmic contact)



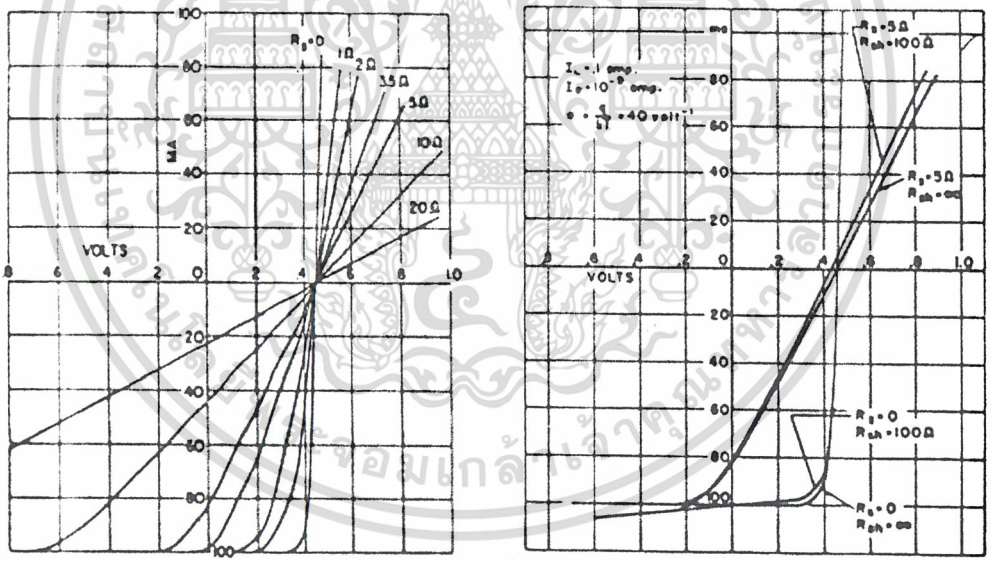
รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะวงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น

ระหว่างโลหะกับส่วนพีและส่วนเอ็น ค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมดเขียนตัวย่อได้เป็น R_s, ค่าความต้านทานขนานหรือ R_P (parallel resistance หรือ shunt resistance) เป็นค่าความต้านทานสมมุติที่ขนานกับรอยต่อในรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สมบูรณ์ในทางอุดมคติค่าของ R_p จะมีค่าเป็นค่าอนันต์ (∞) และในเซลล์แสงอาทิตย์อุดมคติค่าของ R_s จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดเสีย (defect) เกิดขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความไม่สมบูรณ์ยองรอยต่อโดยเฉพระรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ๆ ย่อมมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏอยู่ จึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ดังนั้นค่า R_p จึงไม่สูงเป็นค่าอนันต์ และค่า R_s ก็มีค่าไม่เป็นศูนย์ ผลของค่า R_s และ R_p จะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปดังเสดงได้ในรูปที่ 3.16

อย่างไรก็ดีโดยทั่วไปแล้วจะพบว่าในเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ใช้งานค่าความต้านทานขนาน R_p จะมีค่าสูงพอที่ไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม R_s จะมีผลและบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อคุณสมบัติของเซลล์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง , การสร้าง จึงต้องพิจารณาผลของค่า R_s อย่างรอบคอบ และพยายามให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ขณะที่ค่า R_s สูงขึ้นพลังงานสูงสุดซึ่งเซลล์ จะสามารถจ่ายได้จะมีค่าลดลงและแสดงได้ดังในรูปที่ 3.17

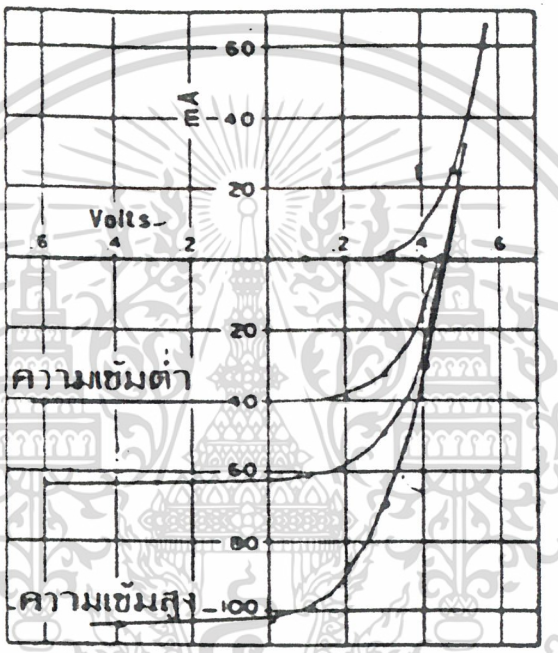


รูปที่ 3.16 (ก). แสดงผลของความต้านทานอนุกรม และ
(ข). ผลของความต้านทาน ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะทำงานจำเป็นต้องมีแสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอที่จะเป็นอิสระและทิ้งโฮลให้เกิดขึ้น ดังนั้นถ้าหากแสงที่มาตกกระทบ มีความเข้มสูงมาก หรือก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอนโฮล เป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.17

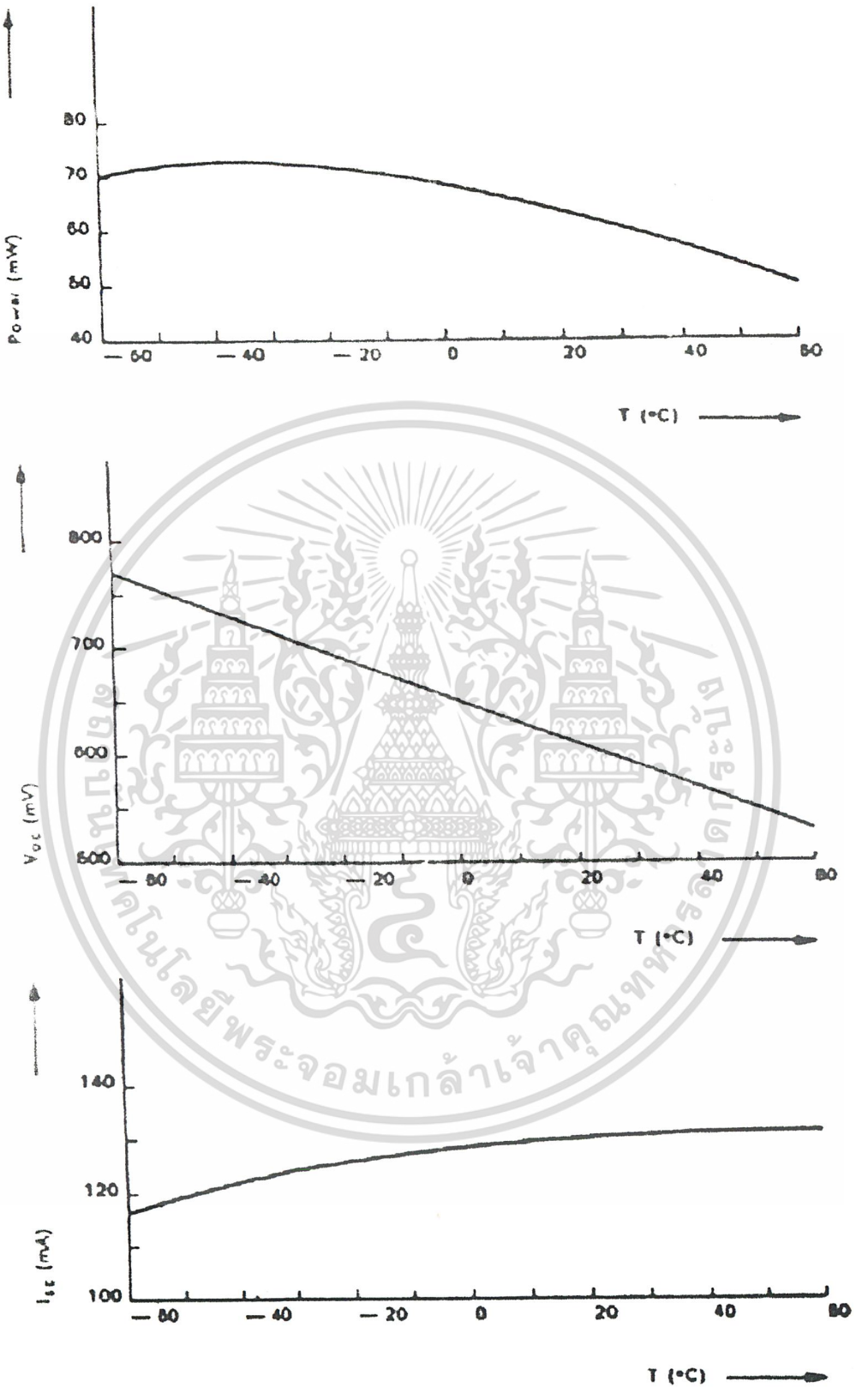


รูปที่ 3.17 แสดงผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

3.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจริง เซลล์จะต้องได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ด้วย ดังนั้นอุณหภูมิของเซลล์จึงเพิ่มขึ้น ผลที่ติดตามมาก็คือ คุณสมบัติของเซลล์จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งพอจะสรุปได้ว่า ขณะที่อุณหภูมิของเซลล์เพิ่มขึ้น พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์คือ I_{sc} จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า V_{oc} จะมีค่าลดลง และผลดังกล่าวจะทำให้ค่าของพลังงานที่เซลล์จะจ่ายได้จะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

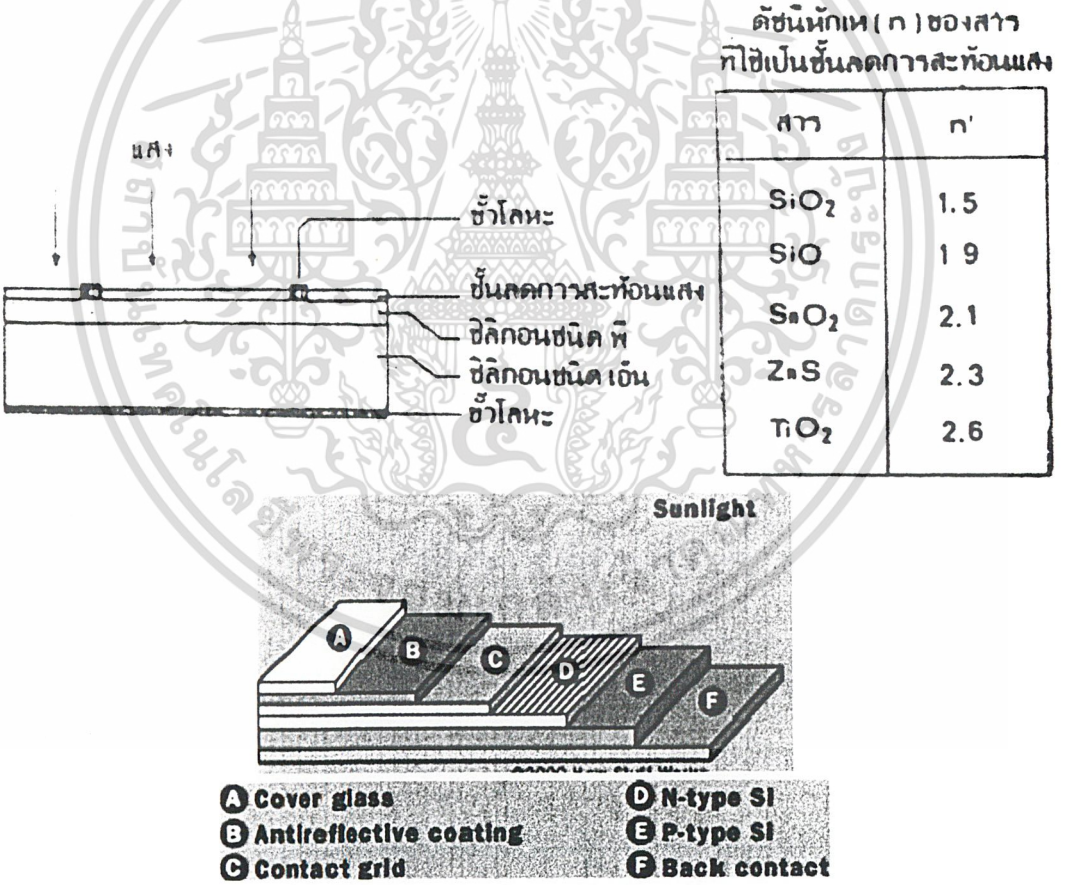


รูปที่ 3.18 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น เนื่องจากแสงทั้งหมดที่ส่องมากระทบผิวหน้าเซลล์ฯ จะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเอาไว้เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และมีบางส่วนสะท้อนไปจากผิวหน้าของเซลล์ฯ แสงส่วนที่สะท้อนออกไปจากผิวหน้านี้เองที่สูญเสียไปโดยไม่เกิดประโยชน์ เพื่อที่จะนำแสงส่วนนี้มาใช้ประโยชน์อีกจึงควรมีชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของ เซลล์ฯ ชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ยอมให้แสงผ่านเข้าไปยังผิวหน้าของเซลล์ ได้เมื่อแสงสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของ เซลล์ฯ ชั้นลดการสะท้อนแสงจะทำให้แสงบางส่วนสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของ เซลล์ฯ อีก ช่วยให้เซลล์ฯได้รับความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จึงทำให้เซลล์ฯ สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย ชั้นลดการสะท้อนแสงจะช่วยให้แสงสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์ฯ ได้มากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหและความหนาของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 3.19 โครงสร้างของเซลล์ฯ ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง
และตัวอย่างดัชนีหักเหของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

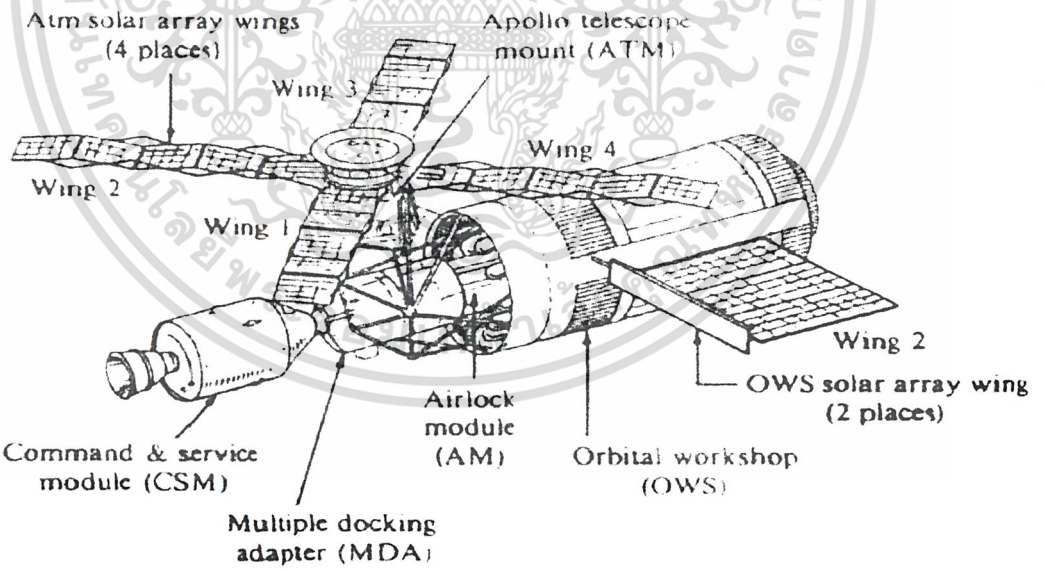
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
เทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน
(silicon solar Cell Technology)

4.1 บทนำ

ตั้งแต่ปี ค ศ. 1953 เป็นต้นมา ก็ได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับยานอวกาศหรือดาวเทียมต่าง ๆ จนกระทั่งถึงปี ค ศ . 1973 หลายบริษัทได้ให้ความสนใจ ที่จะนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลก จึงได้มีพัฒนาการผลิตเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพและลดราคาในการผลิตลง ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ในอนาคต

เทคโนโลยีของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ซึ่งได้แก่ การสร้างแผ่นผลึก การแพร่สารเจือ การ2สร้างขั้วไฟฟ้า และการต่อสายเก็บบรรจุเซลล์ เพื่อทำเป็นโมดูลหรือแผงเซลล์



รูปที่ 4.1 ภาพสเก็ตดาวเทียม skylab ที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างแผ่นผลึก

เป็นการเตรียมแผ่นผลึกขึ้นมาเพื่อนำไปใช้สร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่ว ๆ ไปซิลิคอนจะอยู่ในสภาพที่เป็นสารประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์ เช่นก้อนกรวดและทราย ซึ่งมีมากเป็นอันดับสองรองจากออกซิเจนที่บริเวณผิวโลก กรวด และทรายเหล่านี้ จะถูกนำไปผสมกับคาร์บอนในเตาไฟฟ้าที่มีการอาร์คที่อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งจะทำให้ซิลิกอนแยกตัวออกมาจาก ซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดังสมการ

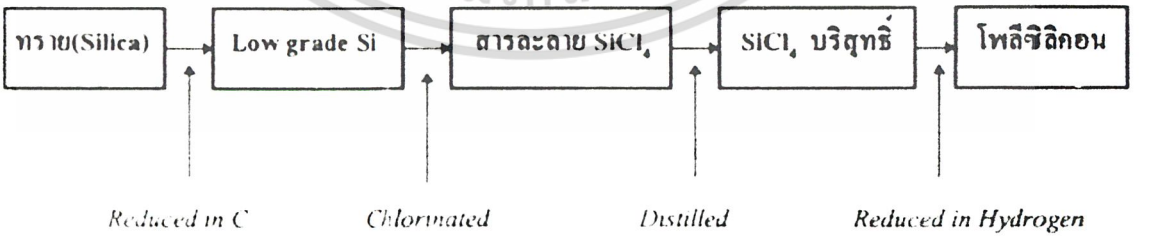
$$SiO_2 + 2C \longrightarrow Si + 2CO$$

ซิลิคอนที่ได้จะอยู่ในสภาพเป็น polycrystal ซึ่งยังไม่บริสุทธิ์มากนักที่เรียกว่า MG-Si (Metallurgical-grade silicon)

$$Si + 3\,HCl \longrightarrow SiHCl_3 + H_2$$

เมื่อนำ MG-Si ไปทำปฏิกิริยากับ HCl จะได้ก๊าซไตรโครโรซีเลน ($SiHCl_3$) เมื่อผ่านการ condense แล้วจะอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว จากนั้นจึงผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปใน chamber ของไตรโคลโรซีเลน ซึ่งถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 1000-1200^{o}C จะทำให้ซิลิคอนแยกตัวออกจากไตรโคลโรซีเลนและตกผลึกเป็นซิลิคอน ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงที่เรียกว่า SeG-Si (Semiconductor-grade silicon)

$$SiHCl_3 + H_2 \longrightarrow Si + 3HCl$$



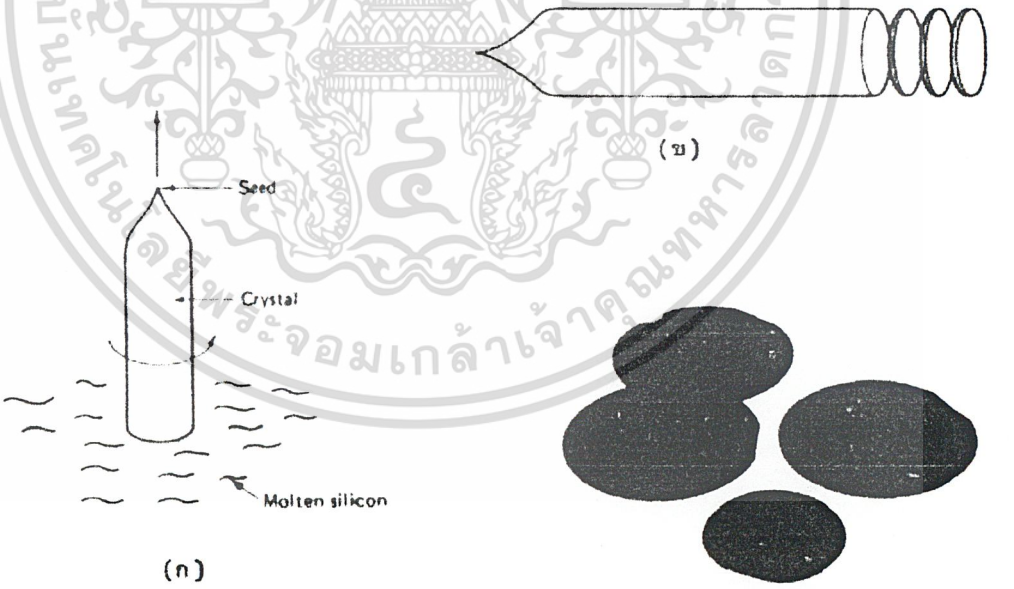
รูปที่ 4.2 แสดงลำดับขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการเตรียมแร่ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากผลึกนี้ยังอยู่ในลักษณะที่เป็น polycrystal ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่ยังไม่สมบูรณ์ จึงต้องนำผลึกเหล่านี้ไปปลูกให้เป็นแท่งผลึก (Ingot) อีกครั้งด้วยวิธีการของโซคราลสกี้ (Czochralaki) หรือวิธีโฟลทโซน (Float – Sone) แต่โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้วิธของโซคราลสกี้ เนื่องจากสามารถปลูกผลึกได้ขนาดใหญ่กว่า

วิธีของโคราลสกี้ จะเริ่มจากการนำเอา SeG - Si ไปหลอมละลายในเบ้าหลอมที่มีอุณหภูมิราว 1420°C ในช่วงนี้จะมีการเติมสารเจือชนิดใดชนิดหนึ่งลงไป สำหรับกรณีของเซลแสงอาทิตย์ จะนิยมเติมโบรอนซึ่งเป็นสารเจือชนิดพีลงไป จากนั้นจึงนำเมล็ดผลึกรูปเดี่ยว (Single-crystal seed) มาสัมผัสกับผิวของซิลิคอนที่กำลังหลอมเหลว พร้อมทั้งหมุนและดึงขึ้นอย่างช้า ๆ จากการควบคุมอัตราการดึงขึ้นและการหมุน จะทำให้แท่งผลึกซิลิคอนรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 3 –5 นิ้ว ยาวประมาณ 1 เมตร หลังจากนั้นแท่งผลึกนี้จะถูกนำไปตัดออกเป็นแผ่นผลึกที่มีคความหนาประมาณ 300 ไมครอน และถูกนำไปขัดผิวให้เรียบพร้อมทั้งทำความสะอาดผิวหน้าด้วยสารเคมีอีกครั้งก่อนจะนำไปทำการแพร่สารเจือ

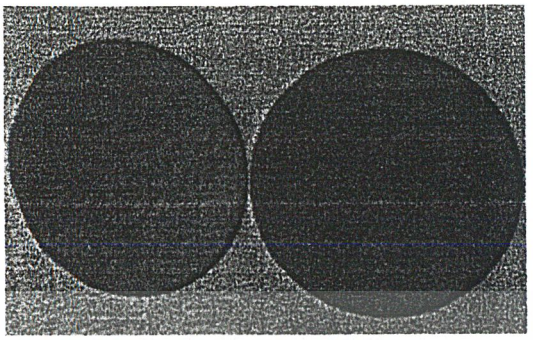
แผ่นผลึกที่สร้างจากวิธีปลูกผลึกของโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ เมื่อนำไปสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์จะได้เซลล์ ที่มีประสิทธิภาพสูงแต่ต้นทุนในการผลิตเซลล์ ก็จะสูงตามไปด้วย



รูปที่ 4.3 (ก). การดึงผลึกโดยวิธีของโซคราสกี้
(ข). แท่งผลึกที่ได้จะถูกนำไปตัดออกเป็นแผ่นผลึก
(ค). แผ่นผลึกรูปเดี่ยวที่ตัดและขัดผิวแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แผ่น solar grade silicon



รูปที่ 4.4 แสดงแผ่น Solar Grade Silicon Wafer ที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์

4.3.1 ลักษณะของ solar grade silicon wafer

แม้ว่าธาตุซิลิคอนจะเป็นธาตุที่มีอยู่อย่างมากมาย โดยเฉพาะบริเวณเปลือกโลก แต่ไม่ปรากฏในรูปลักษณะแร่บริสุทธิ์ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบ เช่น ซิลิก้า(silica) หรือก็คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ไม่บริสุทธิ์ นอกจากนี้แล้วบางส่วนยังอยู่ในรูปของ ซิลิเกต(silicate)ซึ่งหมายถึงสารประกอบของซิลิคอน ออกซิเจน และธาตุอื่นๆปะปนอยู่ ซึ่งแร่ดังกล่าวนี้ก็คือ ทรายนั้นเอง ในอุตสาหกรรมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำจาก ซิลิคอนจะนำทรายชั้นดี(มีสิ่งเจือปนน้อย)มาสกัด เพื่อให้ได้แร่ซิลิคอนที่บริสุทธิ์ แล้วจึงนำไปปลูก(Growth) เพื่อให้ได้ซิลิคอนในรูปของผลึกรูปเดี่ยว(single drystalline) สำหรับสิ่งประดิษฐ์ชนิดต่างๆต่อไป

4.3.2 ขั้นตอนการนำทรายหรือซิลิก้ามาทำเป็น MG-Si(Metallugical-grade silicon)

โดยตอนเริ่มต้นกระบวนการสร้าง MG-Si ก็คือการสกัดทรายให้ได้แร่บริสุทธิ์ กระบวนการแยกแร่ซิลิกอนบริสุทธ์ทำได้โดยการเผาซิลิก้า(Silica หรือก็คือ ซิลิกอนไดออกไซด์(SiO2)ที่ไม่บริสุทธิ์นัก) เผารวมกับคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงในเตาไฟฟ้า ธาตุคาร์บอนจะทำหน้าที่ดึงออกซิเจนออกจากซิลิก้า จึงทำให้ได้แร่ซิลิคอน แต่ยังไม่บริสุทธิ์ซึ่งเรียกว่า “Low grade silicon” หรือบางครั้งก็เรียกว่า “reduce SiO2” ดังสมการ

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$$

ดังนั้นการเตรียมแร่ซิลิคอนจึงทำได้โดยการสกัดจากทรายเพื่อให้ได้แร่ซิลิกอนที่บริสุทธิ์ก่อนที่จะนำไปปลูกผลึกที่บริสุทธิ์ต่อไป โดยในขั้นตอนนี้จะได้ความบริสุทธิ์ของ Si ประมาณ 98-99% ซึ่งมีอะตอมของสารเจือดังในตาราง (4.12) โดยสารเจือที่เห็นได้ชัดเจนคือเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะพบใน MG-Si เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ชนิดของอะตอมสารเจือใน Metallurgical-grade silicon

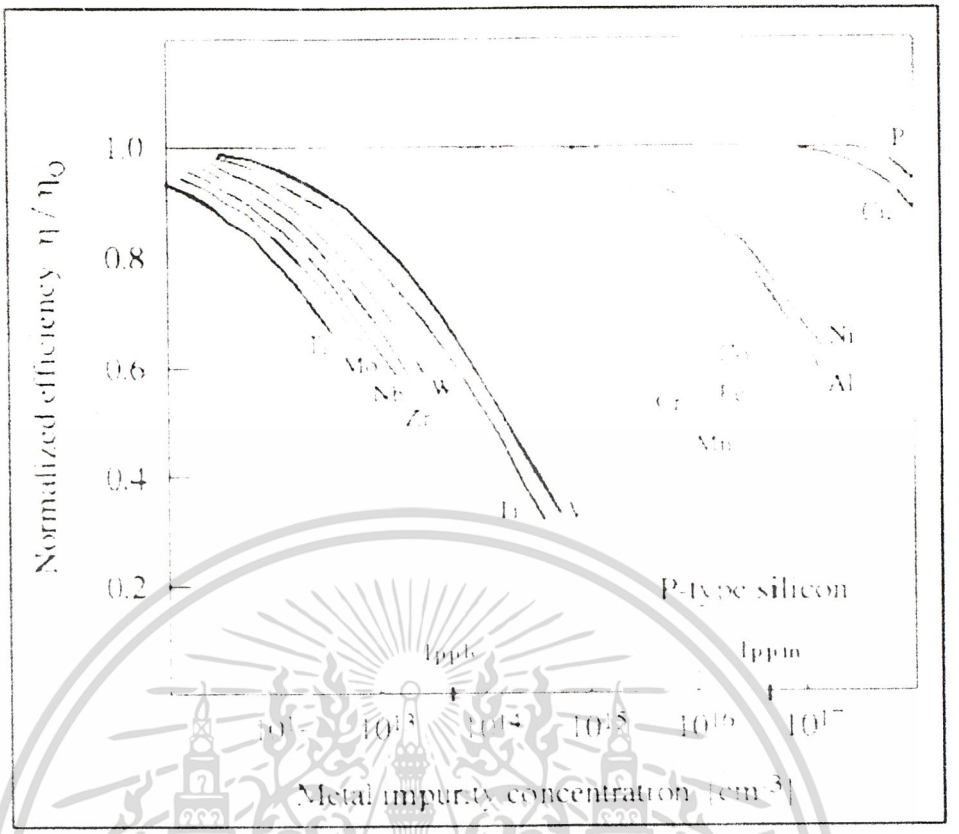
Impurity	Concentration range (pasts per million,atomec)
Al	1500-4000
B	40-80
Cr	50-200
Fe	2000-3000
Mn	70-100
Ni	30-90
P	20-50
Ti	160-250
V	50-200

4.3.3 Solar-grade silicon

อย่างไรก็ตามกระบวนการสร้าง ทรานซิสเตอร์ และ IC(Integrated circuit) นั้นมีความสำคัญที่จะต้องใช้ Si ที่มีคุณภาพสูง(premium grade silicon) และราคาของวัสดุก็มีความสัมพันธ์กับประสิทธิ์ภาพด้วย สำหรับ Solar cells นั้นจะคุ้มค่ากว่าในขณะที่เราพิจารณาข้อดีข้อเสียด้านประสิทธิภาพและด้านราคาของเซลล์แสงอาทิตย์

การสร้าง Solar cells แบบ premium grade Si นั้นจะใช้ต้นทุนการสร้างที่สูงเพราะต้องทำให้ Si มีความบริสุทธิ์มากประมาณ 99.999%ซึ่งการทำให้ Si บริสุทธิ์มากเท่าไหร่ ก็เท่ากับว่าต้นทุนการสร้างก็เพิ่มขึ้นตามมาด้วย ดังนั้นในการทำเซลล์แสงอาทิตย์เราจึงพิจารณาใช้ Solar grade Si ในการสร้าง เซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่ Solar grade Si นั้นจะมีอะตอมสารเจือต่างๆที่เจือปนอยู่ซึ่งจากกราฟผลของ Metal impurity concentration นั้นจะเห็นว่ากลุ่ม Metal impurity ของ Solar grade Si มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์โดยดูจากกราฟจะเห็นว่า Metal impurity เหล่านี้แม้จะมีสิ่งเจือปนใน Solar grade Si แต่ก็มีผลกระทบน้อยต่อประสิทธิภาพ ถ้าอะตอมเจือปนของโลหะไม่มากนักแต่สำหรับ Metal impurity ของธาตุ(Ta,Mo.Nb,Zr,W) ซึ่งจะมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือน้อยแต่ก็มีผลต่อประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก ดังนั้นเราจึงใช้ Solar grade Si ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพราะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพ(efficiency) น้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลกระทบของอะตอมสารเจือที่มีต่อ silicon solar cells

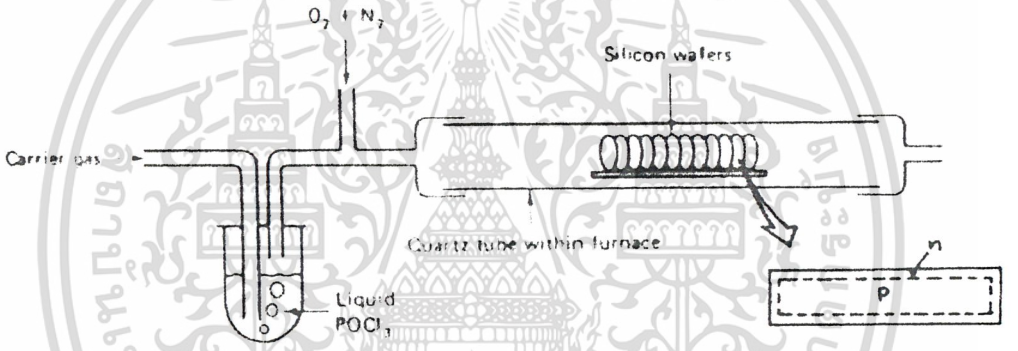
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า เราสามารถนำ Solarcell Si มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพราะสามารถลดต้นทุนของกระบวนการสร้าง Si ที่บริสุทธิ์จะมีค่าใช้จ่ายที่สูง โดยที่ 2/3 ของราคาจะขึ้นอยู่กับการสร้าง Si และ Si technology ที่ทำการผลิตขึ้น และ 1/3 ของราคาขึ้นอยู่กับ process การสร้างเป็นตัวเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ขึ้นมา ดังนั้น Solar grade Si ก็เป็นทางเลือกหนึ่งในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

4.4 การแพร่สารเจือ

การแพร่สารเจือเป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นให้กับเซลล์แสงอาทิตย์โดยรอยต่อพี-เอ็นนี้ จะอยู่ลึกจากผิวหน้าลงไปประมาณ 0.1 - 0.5 ไมครอน การแพร่สารเจือส่วนมากจะใช้การแพร่ซึมฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูงราว 800-1000°C ลงในฐานรองชนิดพีที่มีโบรอนแพร่ซึมอยู่ก่อนแล้วทั่วทั้งแผ่นผลึก ตั้งแต่ขบวนการปลูกผลึก วิธีการแพรซึมฟอฟอรัสส่วนใหญ่จะใช้ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ ($POCl_3$) เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ (Impurities source) เนื่องจากฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์มีลักษณะเป็นของเหลวระเหยง่าย จึงต้องนำไปใส่ไว้ในหม้อแก้ว (Bubble) ที่มีการซีลด์อย่างดี จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นจึงใช้ก๊าซเฉื่อยพวกไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหย$POCl_3$พร้อมกับป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าไปในการแพร่สารที่มีแผ่นซิลิคอนว่างอยู่ ที่อุณหภูมิสูงราว 800-1000°C จะเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บาง ๆ ปกคลุมทั่วทั้งแผ่นผลึก พร้อมกันนั้นฟอสฟอรัสก็จะแพร่ซึมผ่านชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงไปซิลิคอน การแพร่ซึมใช้เวลาราง 20 นาที ก็จะได้ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นบาง ๆ หนาราว 0.1 -0.3 ไมครอน จากนั้นใช้กรดฟอสฟอริก (HF) กัดชั้นออกไซด์ออกทั้งหมด ก็จะได้แผ่นซิลิคอนที่มีรอยต่อพี-เอ็น เกิดขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งรอยต่อที่ด้านหลังนี้จะถูกกำจัดให้หมดไปโดยการเคลือบอลูมิเนียมซึ่งเป็นสารเจือปนชนิด P ด้วยขบวนการระเหยสารในสูญญากาศแล้วจึงนำไปทำการแพร่ซึมอลูมิเนียมให้ทะลุผ่านชั้นฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 700-800 °C เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้ชั้น P^+ บาง ๆ เกิดขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นเซลล์ฯ



รูปที่ 4.6 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสโดยใช้ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ

4.5 การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิค

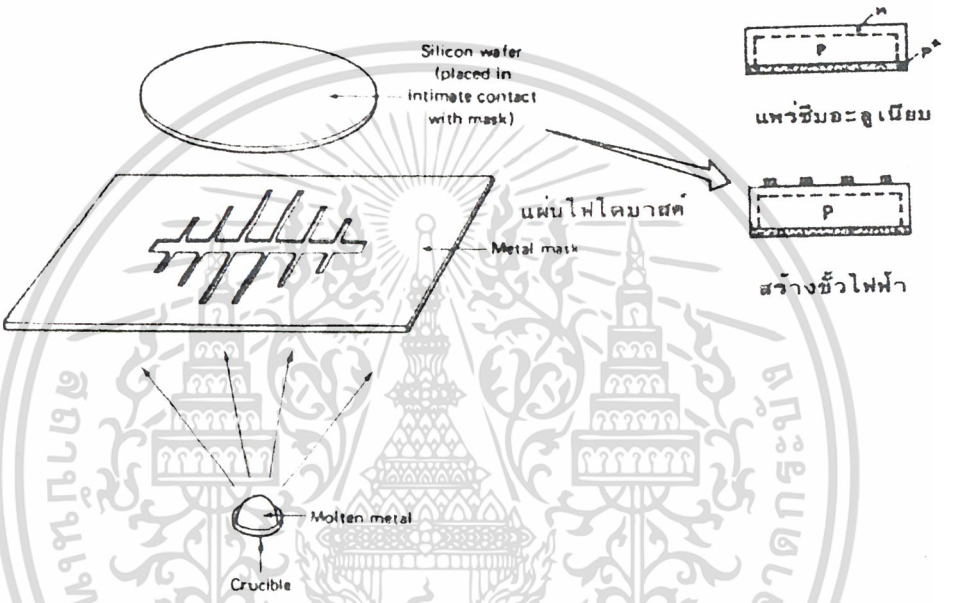
เป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับต่อสายเพื่อนำไปใช้งานโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องบัดกรีได้ เพื่อความสะดวกในการต่อเซลล์ฯ หลาย ๆ เซลล์ฯ เข้าด้วยกัน โลหะที่ใช้ส่วนใหญ่ได้แก่ เงิน , นิเกิล, ทองแดง, ติตาเนียม ฯลฯ

การสร้างขั้วไฟฟ้าจะใช้วิธีระเหยสารในสูญญากาศที่เรียกว่า Evapolation ขั้วไฟฟ้าที่สร้างด้วยวิธีนี้จะประกอบขั้วโลหะ 3 ชั้น จากชั้นในสุดคือเงิน, พาราเดียมและติตาเนียมอยู่ชั้นนอกสุด โลหะทั้ง 3 ชนิดแต่ละชนิดจะถูกทำให้ระเหยในสูญญากาศ ผ่านช่องโฟโตมาสก์ซึ่งทำเป็นลวดลายตาข่าย (grid pattern) ไปเกาะติดอยู่ผิวของซิลิคอนตามลำดับ ส่วนด้านหลังจะติดทึบทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมด จากนั้นจึงนำไปทำการแอนนีลที่อุณหภูมิ 500-600 ^{o}C เป็นเวลา 5 - 30 นาที เพื่อให้โลหะติดแน่นกับซิลิคอนและทำให้ความต้านทานที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าลดลง

หลังจากสร้างขั้วโลหะแล้วจะใช้ขบวนการ Evapolation ระเหยสารพวกออกไซด์ ไปเคลือบลงบนผิวหน้าของเซลล์ฯ หรืออาจจะใช้ขบวนการสร้างออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีที่เรียกว่า CVD(Chemical Vapour Deposition) สร้างชั้นออกไซด์บาง ๆ ของ Sio , Sio_2 , Tio_2 หรือ Ta_2O_5 ลงบนผิวหน้าของเซลล์ฯ เพื่อใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงและชั้นป้องกันผิวหน้า ซึ่งจะทำให้เซลล์ฯ มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 4.7 การระเหยโลหะในสูญญากาศ เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากการสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี Evapolation นั้นทำให้ราคาในการผลิตเซลล์ฯ สูงมาก เซลล์ฯที่สร้างด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในงานทางด้านอวกาศ ซึ่งต้องการความทนทานและความไว้วางใจที่สูงกว่าเซลล์ฯ ที่ใช้บนพื้นโลก เมื่อมีการพัฒนาขบวนการผลิตฯ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตลง การสร้างขั้วไฟฟ้าจึงได้เปลี่ยนมาใช้วิธีการซิลสกรีนโลหะและการชุบด้วยไฟฟ้าแทน

การซิลสกรีนด้วยโลหะจะใช้โลหะเหลวพวกเงิน หรือนิเกิล สกรีน ผ่านต้นแบบลวดลายลงบนแผ่นซิลิคอน ส่วนด้านหลังจะสกรีนทึบทั้งหมดแล้วจึงนำไปทำการแอนนีลเพื่อให้โลหะติดแน่นเป็นเนื้อเดียวกับซิลิคอน หลังจากการแอนนีลแล้วบางบริษัทจะนำเซลล์ฯ ไปทำการชุบตะกั่วเพื่อให้ขั้วไฟฟ้ามีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และไม่เกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย วิธีการชุบตะกั่ว หรือ

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

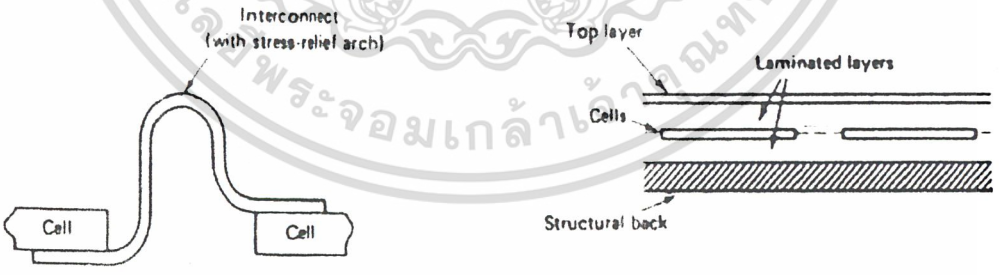
จะเรียกว่า อาบตะกั่วก็คงได้ จะเริ่มจากการนำเซลล์ฯ ที่ผ่านการแอนนีลแล้ว ไปจุ่มลงในอ่างตะกั่วที่มีตะกั่วหลอมเหลวอยู่ตะกั่วจะเกาะติดเฉพาะส่วนที่เป็นลวดลายโลหะทั้งด้านหน้าและด้านหลังเซลล์ฯ ที่ผ่านการชุบตะกั่วมาแล้วจะให้การต่อเซลล์ฯ เข้าด้วยกันสะดวกยิ่งขึ้น

4.6 การประกอบร่วมเป็นแผงเซลล์ฯ

แผงเซลล์ฯ หรือโมดูล (Modules) หรือ อาร์เรย์ (Arrays) เกิดจากการนำเซลล์ฯ แต่ละเซลล์ฯ มาต่อร่วมกันเป็นแผงเซลล์ฯ แล้วเก็บบรรจุด้วยการซีลด์เป็นอย่างงดี เพื่อกันความชื้น และสารเคมีที่อาจจะทำให้เซลล์ฯ เสียหายได้

การต่อเซลล์ฯ แต่ละเซลล์ฯเข้าด้วยกันในแบบอนุกรม จะใช้แผ่นฟอยด์ของโลหะบาง ๆเป็นตัวเชื่อม เพื่อให้มีการยืดหยุ่นได้บ้างเล็กน้อย หลังจากนั้นเซลล์ฯ เหล่านี้จะถูกนำไปวางบนแผ่นฉนวนฐานรอง ซึ่งอาจจะทำมาจากแก้วหรือ อีพ๊อกซี่ก็ได้ แล้วจึงใช้แผ่นกระจกใสปิดผิวหน้าด้านบนอีกครั้ง ระหว่างกระจกใสด้านหน้าและแผ่นฐานรองจะใส่สารพวกซิลิโคนซึ่งเป็นสารที่แสงผ่านได้ดีและมีการยืดหยุ่นได้ เพื่อป้องกันไม่ให้เซลล์ฯ เสียหายจากการกระทบกับของแข็ง นอกจากนี้ยังเป็นตัวช่วยป้องกันความชื้นและสารเคมีได้อีกด้วย การเก็บบรรจุที่สมบูรณ์จะช่วยให้เซลล์ฯ มีอายุการใช้งานนานถึง 20 ปี หรือมากกว่านั้นได้

สำหรับการตรวจสอบแผงเซลล์ฯ จะใช้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ AM1 หรือ 100 mw/cm^2 ซึ่งในโรงงานทั่ว ๆ ไปจะใช้เครื่องผลิตแสงอาทิตย์เทียมที่เรียกว่า Solar simulator เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ฯ ที่ผลิตขึ้นมา



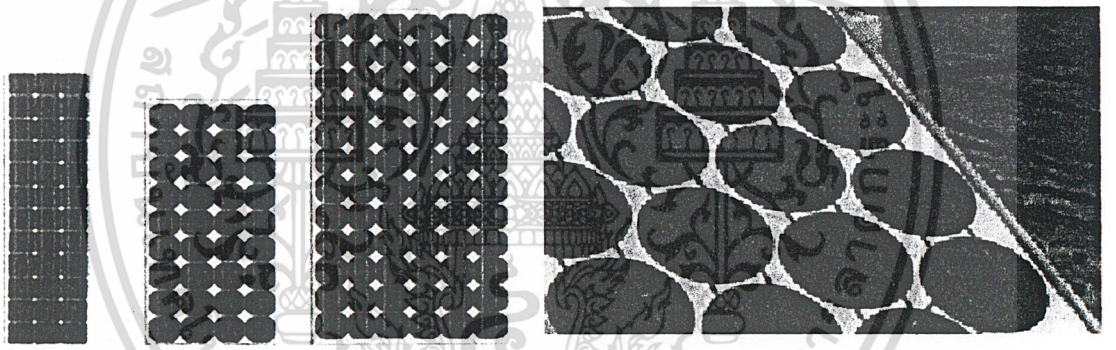
(ก). (ข).

รูปที่ 4.8 (ก). การใช้แผ่นฟอยล์บาง ๆ ของโลหะในการเชื่อมต่อเซลล์ฯ เข้าด้วยกัน
(ข). การเก็บบรรจุเซลล์ฯ โดยมีชั้น laminated เพิ่มความแข็งแรงให้กับแผงเซลล์ฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์ฯ แบบผลึกรูปเดี่ยวเท่าที่มีรายงานไว้มีค่าราว 18 % สำหรับประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยก็ราว ๆ 15% แต่เมื่อนำไปผลิตเป็นจำนวนมากในระบบอุตสาหกรรม อีกทั้งต้องนำมาต่ออนุกรมกันหลาย ๆ เซลล์ฯ เพื่อให้ได้เป็นแผงเซลล์ฯ ขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์ฯ แบบนี้ จะลดลงเหลือประมาณ 12% ซึ่งยิ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ใช้ได้ เพราะทางกระทรวงพลังงานของอเมริกาได้ว่างหลักเกณฑ์ของเซลล์ฯ ที่จะนำมาใช้งานในการประหยัดพลังงานนั้น ต้องมีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 10%

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบผลึกรูปเดี่ยวนี้ จะมีต้นทุนในการผลิตสูงแต่ก็ประสิทธิภาพของเซลล์ฯสูงตามไปด้วย จึงเป็นที่เชื่อได้ว่าเทคโนโลยีในการสร้างเซลล์ฯ แบบผลึกรูปเดี่ยวนี้ จะยังคงมีใช้กันอยู่อีกนาน และยังต้องใช้เวลาอีกมากเพื่อพัฒนาหาทางนำเซลล์ฯ แบบอื่นมาใช้ และระยะเวลาในการใช้งานจะต้องไม่ต่ำกว่า 25 ปีด้วย ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เซลล์ฯ แบบผลึกรูปเดี่ยวสามารถใช้ได้



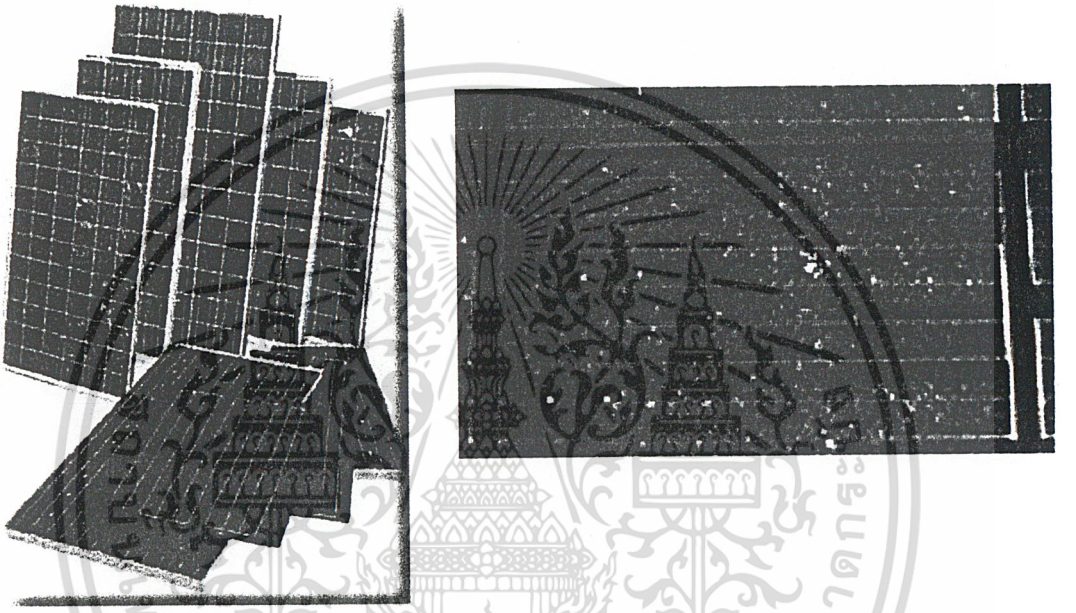
รูปที่ 4.9 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว

4.7 การปรับปรุงเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

เมื่อพิจารณาขบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่าการสร้างแผ่นผลึกด้วยวิธีของโซคราลสกี้ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ราคาต้นทุนในการผลิตเซลล์ฯ สูงกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วในงานการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ยังไม่มีความจำเป็นต้องใช้แผ่นผลึกที่มีคุณภาพสูงเช่นนี้ จึงได้มีการนำเอาผลึกแบบ Polycrystal หรือที่เรียกว่าผลึกหลายรูปมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถสร้างได้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 14 % แต่เมื่อนำไปใช้สร้างในระบบอุตสาหกรรมจะมีประสิทธิภาพราว 10 % บริษัทอเมริกัน Solorex และ Kyocera ของญี่ปุ่น ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของเซลล์ฯประเภทนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของเซลล์ฯ แบบ polycrystal ก็คือรูปร่างของแผ่นเซลล์ฯ ซึ่งสามารถทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมได้ ทำให้สามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบแผ่นกลม ถึง 25% เนื่องจากมีช่องว่างบนแผงเซลล์ฯ น้อยกว่าแบบแผ่นกลมนั่นเอง แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของเซลล์ฯ นี้ยังต่ำกว่าแบบแผ่นกลม อีกทั้งปริมาณการผลิตก็ยังต่ำกว่าแบบแผ่นกลม จึงทำให้ราคาจำหน่ายใกล้เคียงกับเซลล์ฯ แบบแผ่นกลม



รูปที่ 4.10 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจาก polycrystal

4.7.1 ซิลิคอนแบบริบบอน

เทคโนโลยีของการสร้างแผ่นผลึกทั้งแบบผลึกรูปเดี่ยวที่เป็นแผ่นกลมและแบบผลึกหลายรูปที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยม นั้นยังคงเป็นขบวนการที่สิ้นเปลืองวัสดุอยู่ เนื่องจากต้องมีการตัดแผ่นผลึกทำให้ต้องเสียเนื้อของซิกอนไปส่วนหนึ่ง จึงได้มีการปรับปรุงเทคนิคต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแผ่นซิลิคอนให้เป็นแผ่นบางและยาวที่เรียกว่า “ ริบบอน” (Ribbon) ทำให้ไม่ต้องเสียเนื้อซิลิคอนในการตัดให้เป็นแผ่นบาง ๆ เทคนิคในการสร้างแผ่นผลึกแบบริบบอนมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีอีเอฟจี และ เดนดริติค

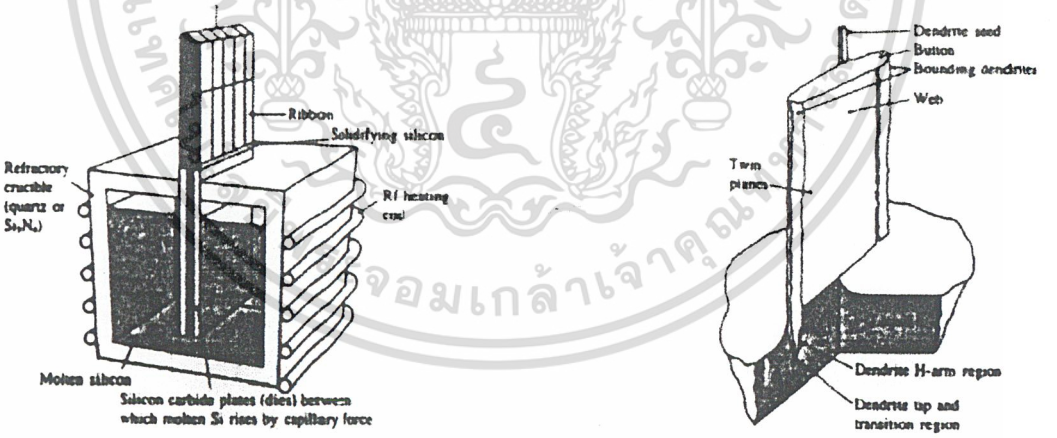
อีเอฟจี (EFG) ย่อมาจาก Edge-defined film-fed growth เป็นวิธีการสร้างแผ่นผลึกที่คล้ายกับวิธีของโชคราลสกี้ ที่ต้องใช้เมล็ดผลึกไปถ่อและดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องเล็ก ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บาง ๆ ที่ทำด้วยแกรไฟท์ เพื่อให้ซิลิคอนฟอร์มตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมยาวตามที่ต้องการแผ่นผลึกที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะมีความหนาราว 150 –300 ไมครอน มีความกว้างตั้งแต่ 5 - 10 เซนติเมตร ใช้อัตราการดึงราว 5 เซนติเมตรต่อนาที Mobil Solar Energy Corp. เป็นบริษัทหนึ่งที่ผลิตแผ่นซิลิคอนแบบริบบอนด้วยวิธีนี้ เซลล์ฯ ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพ เฉลี่ยราว 11%

ข้อเสียของริบบอนแบบอีเอฟจีนี้ก็คือ มีโครงสร้างของผลึกที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับวิธีของโชคราลสกี้ และการที่ซิลิคอนต้องถูกหลอมเหลวอยู่ภายในเบ้าหลอมแล้วยังต้องมีการดึงผ่านช่องแคบ ๆ ของแกรไฟท์อีก วิธีการเช่นนี้ทำให้แผ่นผลึกที่มีความไม่บริสุทธิ์สูง เนื่องจากสิ่งแปลกปลอมและสารเจือปนต่าง ๆ จากเบ้าหลอมและแผ่นแกรไฟท์ สามารถเข้าไปในเนื้อซิลิคอนได้ง่าย วิธการที่สามารถจะลดความไม่บริสุทธิ์ของแผ่นผลึกแบบริบบอนได้ก็คือ วิธีการแบบเดนดริติค

การดึงแผ่นผลึกริบบอนแบบเดนดริติค จะใช้เมล็ดผลักไปล่อและดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องที่มีอยู่เฉพาะตรงขอบทั้ง 2 ด้าน เพื่อให้ซิลิคอนฟอร์มตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมในแบบริบบอน แผ่นผลึกที่สร้างด้วยวิธีนี้จะมีความบริสุทธิ์สูงใกล้เคียงกับวิธีของโชคราลสกี้ เมื่อนำไปสร้างเซลล์ฯ จะได้เซลล์ฯ ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอีเอฟจี เวสติ้งเฮาส์ (Westinghouse) เป็นบริษัทหนึ่งที่กำลังเริ่มผลิตเซลล์ฯ แบบนี้ออกสู่ท้องตลาด เซลล์ฯ ที่ผลิตได้จะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยราว 12%



ก วิธีเอฟจี ข . วิธีเดนดริติค

รูปที่ 4.11 การดึงแผ่นซิลิคอนแบบริบบอน

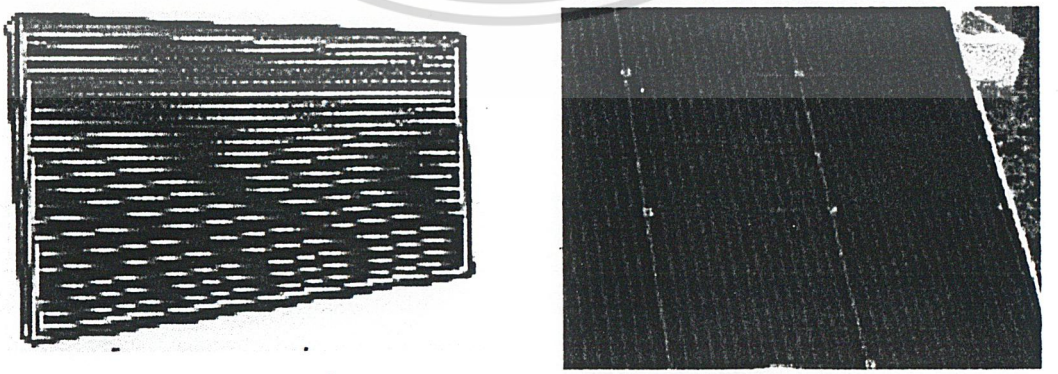
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราคาจำหน่ายของเซลล์ฯ แบบริบบอนยังคงใกล้เคียงกับแบบแผ่นกลม เนื่องจากปริมาณการผลิตยังต่ำอยู่นั่นเอง และเป็นที่คาดหวังกันว่าเซลล์ฯ แบบริบบอนนี้จะสามารถสร้างให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ ทั้งยังสามารถจะลดต้นทุนการผลิตลงได้อีก เมื่อได้มีการปรับปรุงเทคนิคต่าง ๆ ให้ดีขึ้น

4.8 อะมอร์ฟัส ซิลิคอน (Amorphous silicon)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างมาจากอะมอร์ฟัส ซิลิคอน ดูเหมือนจะเป็นความหวังในการสร้างเซลล์ฯ ให้มีราคาถูกที่สุด วิธีการสร้างอะมอร์ฟัส ซิลิคอนนั้นแตกต่างไปจากการสร้างซิลิคอนที่เป็นแบบผลึกโดยสิ้นเชิง

อะมอร์ฟัส ซิลิคอน (a-Si) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนบาง ๆ ราง 1 ไมครอน ลงบนฐานรองที่เป็นฉนวนหรือตัวนำก็ได้ ชั้นซิลิคอนที่เป็นฟิล์มบาง ๆ นี้สามารถสร้างขึ้นได้จากการ Sputtering หรือ Glow discharge แต่เนื่องจากโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมซิลิคอนที่ทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้นมานั้น มีจุดเสียอยู่ภายในมากมาย เนื่องจากการยึดเหนี่ยว (bonding) ระหว่างอะตอมยังไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิด bond ที่ว่างมากมายที่เรียกว่า dangling bond จึงต้องมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนป้อนเข้าไปในระบบของ Supttering หรือ Glow discharge เพื่อให้อะตอมของไฮโดรเจนเข้าไปเป็นตัวกลางในการช่วยยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของซิลิคอน ซึ่งจะช่วยลดจำนวนของ danglind bond ลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถจะป้อนแก๊สฟอสฟีน (PH_3) หรือ ไดโบเรน (B_2H_6) เข้าไปในระบบการสร้างชั้นฟิล์มบางเพื่อให้เกิดชั้นฟิล์มบางของซิลิคอนชนิดเอ็นและพีขึ้น ซึ่งจะกลายเป็นรอยต่อ พี-เอ็น ที่ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้



รูปที่ 4.12 ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส ได้ก่อให้เกิดความตื่นเต้นในหมู่ผู้ที่ในใจเทคโนโลยีทางด้านนี้เป็นอย่างมาก

RCA ได้รับการกล่าวขานว่าเป็นบริษัทหนึ่งที่ประสบความสำเร็จมากในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ในแบบอะมอร์ฟัส ซิลิคอน โดยเซลล์ฯ ที่สร้างขึ้นจากขบวนการ glow discharge ที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนเข้าช่วยในการลด dangling bond ทำให้สร้างเซลล์ฯ ที่มีประสิทธิ์ภาพได้ราว 5.5% ต่อมา RCA ยังได้พัฒนาปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตใหม่จนสามารถ สร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสให้มีประสิทธิภาพสูงถึง 10% ได้ แต่เซลล์ฯ ที่สร้างได้นี้เป็นเพียงเซลล์ฯ ที่มีขนาดพื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ฯ ลดลงไป นอกจากนี้ เซลล์แบบนี้ยังมีอายุการใช้งานที่สั้นมากราว 1 ปี เมื่อนำไปใช้กับแสงแดด ปัญหาการเสื่อมลงของเซลล์ฯ แบบอะมอร์ฟัสนี้ยังเป็นปัญหาหลักที่ยังต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแก้ไขกันต่อไปอีก

ปัจจุบันเซลล์ฯ แบบอะมอร์ฟัสขนาดเล็ก ๆ ได้มีการผลิตออกมาใช้ร่วมกับนาฬิกาและเครื่องคิดเลขเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง sharp, Sanyo และ Casio นับได้ว่าเป็นบริษัทญี่ปุ่นที่บุกเบิกงานทางด้านนี้จนประสบผลสำเร็จเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ที่อยู่ภายในนาฬิกาและเครื่องคิดเลขใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยมาก เซลล์ฯ แบบอะมาร์ฟัสซึ่งมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพไม่เกิน 5% ก็พอเพียงแล้วสำหรับการใช้งานประเภทนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

5.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้รับการพัฒนาและใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดนั้นเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบ ทั้งที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยว (single crystal) และผลึกหลายรูป (polycrystal) และปัจจุบันนี้ได้มีการค้นคว้าเป็นอะมอฟัสต์ (amorphous) แต่ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานยังไม่สูงมากนัก

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสามารถในการทำจะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยคุณสมบัติของรอยต่อ พี-เอ็น เมื่อแสงตกกระทบ พลังงานแสงบางส่วนจะสะท้อนออกไป และบางส่วนจะถูกดูดกลืน ทำให้เกิดประจุพาหะอิสระขึ้น 2 ชนิด คือ ชนิดบวกที่เรียกว่าโฮล (hole) และชนิดลบ ซึ่งเรียกว่าอิเล็กตรอน ที่บริเวณของรอยต่อ พี-เอ็นนี้ โดยธรรมชาติแล้วจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น อิทธิพลจากสนามไฟฟ้าดังกล่าว จะทำให้ประจุอิสระแยกจากกัน ถ้าหากต่อให้ครบวงจรแล้วก็ยอมที่จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลได้ เพื่อที่จะให้กระแสที่ไหลนั้นมีปริมาณมากพอที่จะใช้งานได้นั้น พื้นที่ของรอยต่อ พี – เอ็น จะต้องมีขนาดใหญ่และรับแสงมากที่สุด จากที่กล่าวไปบ้างแล้วจะเห็นได้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์นั้น ทางหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาก็คือ การทำให้แสงที่ตกกระทบนั้นสามารถถูกดูดกลืนได้มากที่สุด หรือทำให้มีการสะท้อนของแสงมากที่สุด จึงมีการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงที่เรียกว่า “ชั้นลดการสะท้อน “ (anti – reflection) ชั้นลดการสะท้อนนี้ อาจทำได้ ใช้สารโปร่งแสงชนิดต่างๆ เช่น ไตตา – เนียมไดออกไซด์ (TiO2) ซิลิคอนมอนอกไซด์ (SiO) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO2) เป็นต้น การใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อน เป็นขบวนการที่ประหยัดที่ทำได้สะดวก จึงใช้กันกว้างขวางและแพร่หลายทั่วไป นอกจากนี้เพื่อให้รอยต่อได้รับพลังงานมากที่สุด รอยต่อดังกล่าวจึงจำเป็นต้องอยู่ใกล้ผิวหน้ามากที่สุด และในทางปฏิบัติแล้วมักจะสร้างรอยต่อให้ลึกน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร

แผ่นผลึกซิลิคอนที่สามารถจะสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดีนั้นทั่วไปแล้วจะต้องมีพิกัดความต้านทานที่ต่ำกว่า 1 โอห์ม – ซม. และมีความหนาอยู่ในช่วง 200 – 400 ไมครอน ผิวของแผ่นผลึกที่โรงงานทำออกจำหน่ายนั้นมีทั้งชนิดขัดมัน (mirror polish)และชนิดขัดหยาบ (rush polish) แม้ว่าผิวหน้าขัดมันจะสร้างได้เซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่ราคาของแผ่นผลึกก็สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าด้วย ความจริงแล้วโครงสร้างของแสงอาทิตย์ จะมีชั้นสารกึ่งตัวนำชนิด n อยู่บนชนิด p หรือ สารกึ่งตัวนำชนิด p อยู่บนชนิด n ก็ได้ แล้วแต่แผ่นผลึกเริ่มต้น เพราะผลึกที่ทำจำหน่ายจากโรงงานนั้น มีเพียงชนิดเอ็นหรือพี ผู้สร้างจะต้องสร้างชั้นที่เหลือเอาเอง เพราะคุณสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำของซิลิคอนบริสุทธิ์ จะมีความนำไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย การเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่นๆ ลงไปแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ความนำไฟฟ้าเปลี่ยนไปได้มาก และเช่นเดียวกัน การที่จะทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือชนิดพีนั้น ก็แล้วแต่สารเจือที่เติมลงไปนั้นเป็นอะไร ในทางปฏิบัติแล้วสารเจือชนิดเอ็น จะได้มาจากการเติมอะตอมของธาตุที่มีวาเลนซ์ อิเล็กตรอน เท่ากับ 5 เช่น ฟอสฟอรัส, สารหนู, และพลวง เป็นต้น ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพีนั้นได้มาจากการเติมอะตอมของธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 เช่น โบรอน, แกลเลี่ยม, อินเดียมและอลูมิเนียม เป็นต้น การเติมอะตอมของสารเจือ หรือ การแพร่สารเจือนั้น

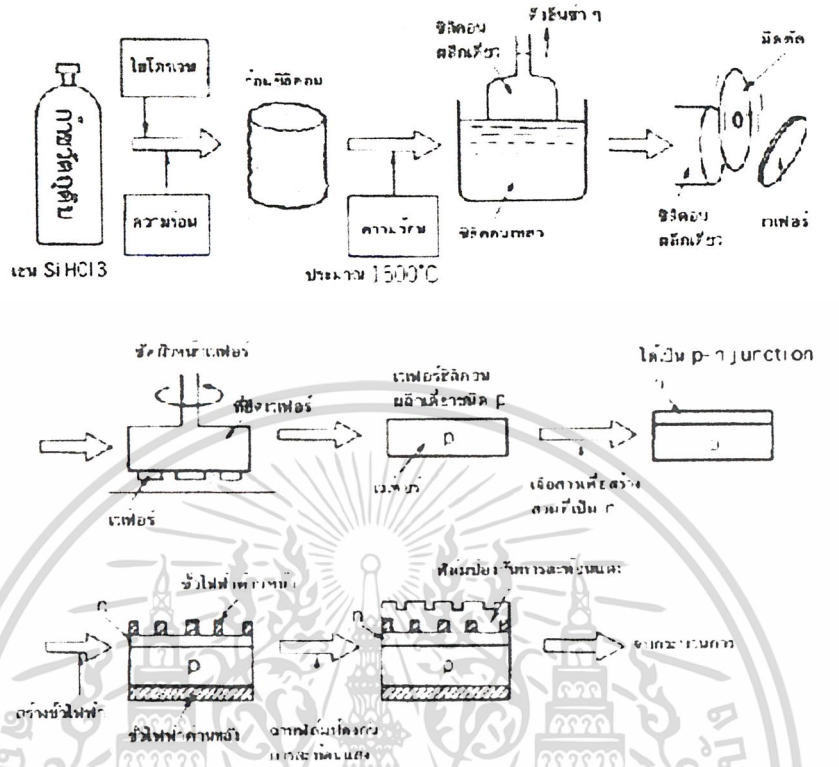
5.2 กระบวนการสร้าง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบ่งได้เป็นสองชนิดใหญ่ ๆ คือ แบบผลึก และแบบอะมอร์ฟัสซึ่ง การสร้างของแต่ละชนิดจะต่างกัน

5.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว

ขออธิบายจากกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว เริ่มจากการนำเอาซิลิคอน ซึ่งผ่านการทำให้ เป็นก้อน ที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.999%) ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อ ทำการสร้าง แท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว) จากต้นผลึก (seed crystal) ด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึก คุณภาพของผลึกเดี่ยว จะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อไปก็จะนำแท่งผลึกเดี่ยวนี้ ไปตัดเป็นแผ่นๆ เรียกว่า เวเฟอร์ หนาประมาณ 300 ไมโครเมตร และขัดความเรียบของผิว จากนั้นก็จะนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น p-n junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการ diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ก็จะเป็นขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟออกใช้ และขั้นสุดท้ายก็จะเป็น การเคลือบฟิล์มผิวหน้า เพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อย ที่สุด รูปที่ 3 เป็นตัวอย่างของ การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยวอย่างไรก็ตาม จะเห็นว่า ขั้นตอนการผลิตจะค่อนข้างซับซ้อน และอุณหภูมิที่ใช้ก็ค่อนข้างสูง ทำให้ต้องใช้พลังงานมาก เป็นผลให้ต้นทุนการผลิตสูงตามไปด้วย ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนา เพื่อลดความซับซ้อนและต้นทุนการผลิต ก็ยังมีอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

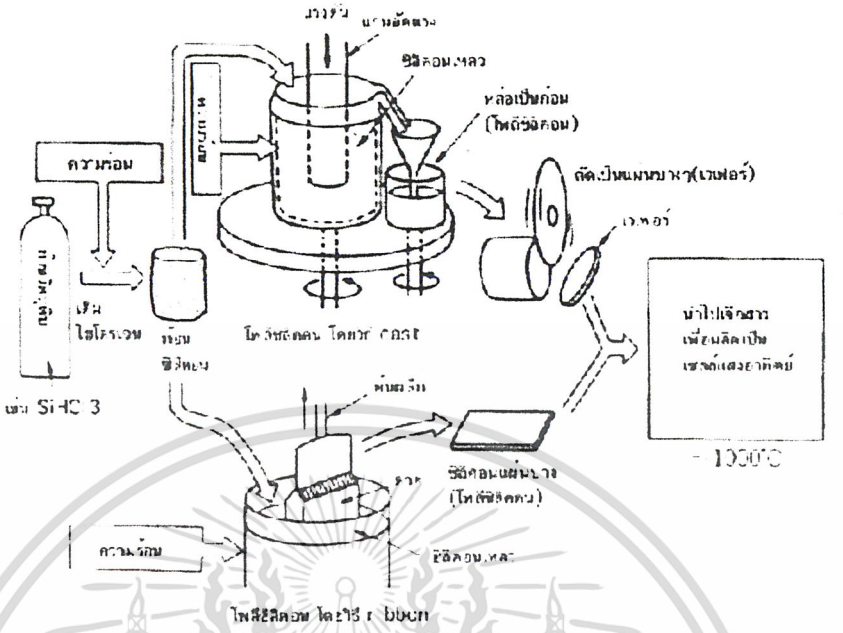


รูปที่ 5.1 ตัวอย่างของ การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยว

5.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกโพลี

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยวซิลิคอนแบบผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอน ก็คือก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ (ขนาดระดับ ไมโครเมตร -มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการผลิตของโพลีซิลิคอน ด้านบนของรูป แสดงการผลิตแบบ cast โดยจะเทซิลิคอนที่หลอมละลายเข้าใน crucible แล้วปล่อยให้เย็นลง อย่างช้าๆ ซึ่งก็จะได้ก้อน ingot ของโพลีซิลิคอนที่มีรูปร่างตาม crucible ที่ใช้หลังจากนั้น การนำไปทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะคล้ายกับกรณีของแบบผลึกเดี่ยว คือ นำไปตัดเป็นเวเฟอร์หนาขนาด 300-400 ไมโครเมตร แล้วก็ทำ p-n junction ต่อไป ด้านล่างของรูปที่ 4 เป็นการสร้างแผ่นโพลีซิลิคอนที่จะใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยตรงจากสารหลอมเหลวซิลิคอน เรียกว่า วิธี ribbon จะเห็นว่า วิธีนี้ลดขั้นตอน ที่จะต้องหั่นเป็นแผ่นเวเฟอร์ในกรณีที่ใช้ ingot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

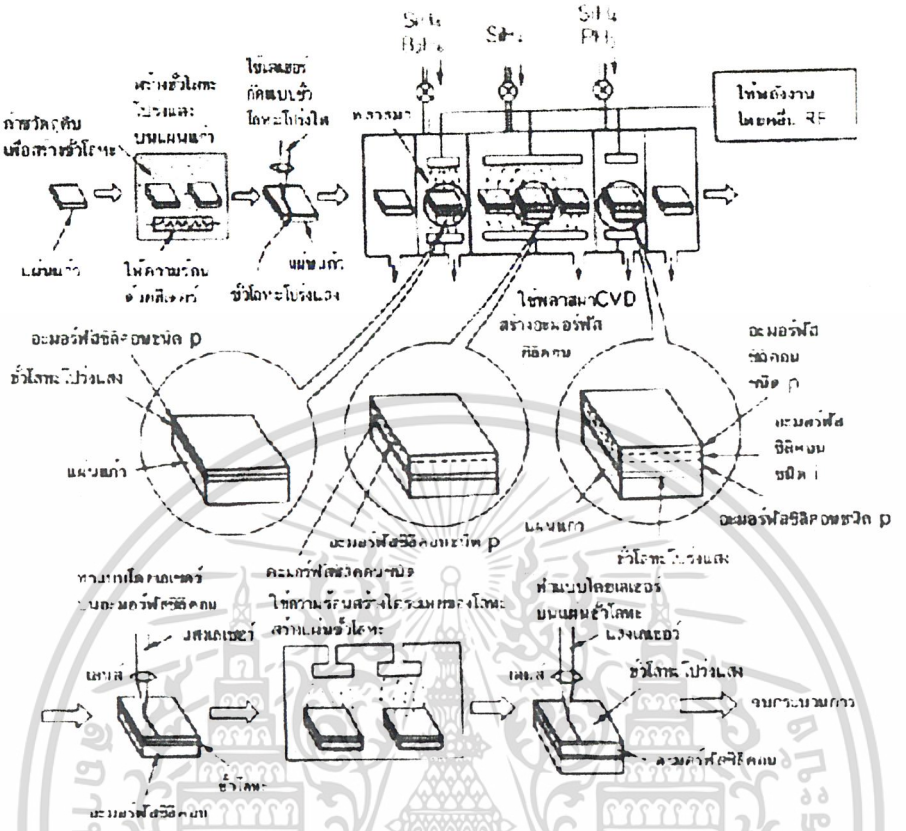


รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการผลิตของโพลีซิลิคอน

5.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบอะมอร์ฟัส

เซลล์แสงอาทิตย์ แบบอะมอร์ฟัส มีวิธีการผลิตที่ต่างจากแบบผลึกโดยสิ้นเชิง โดยจะเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางไม่ใช่เวเฟอร์ รูปที่ 5 แสดงให้เห็นขั้นตอนการผลิตเราจะสร้างแผ่นฟิล์มบางของซิลิคอนบนแผ่น ฐานรอง โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า CVD (ChemicalVapor Deposition) ซึ่งจะมีระบบนำก๊าซที่มีซิลิคอนติดอยู่ เช่น ก๊าซไซเรน (SiH4) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศ และตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีการกระตุ้น เช่น โดยพลาสมา เพื่อส่งพลังงานให้ ซิลิคอนแยกตัวออกจากก๊าซเข้าไปจับตัวกันบนแผ่นฐานรอง โดยส่วนใหญ่จะเป็น แก้ว สเตนเลส หรือพลาสติก ซึ่งได้ทำให้การเคลือบชั้นตัวนำโปรงแสงไว้ก่อน โดยมีอุณหภูมิบนแผ่นฐานรองประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ซิลิคอนจะทับถมสะสมบนแผ่น เกิดเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในขั้นตอนนี้ หากเราใส่ก๊าซที่มี boron เช่น B2H6 เข้าไปด้วย เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด p และถ้าหากใส่ก๊าซที่มี phosphate เช่น PH3 เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด n ซึ่งจะเห็นได้ว่า ด้วยวิธีนี้ เราสามารถควบคุมการไหลของก๊าซ เพื่อสร้างให้เกิดชั้นของ pin อะมอร์ฟัสซิลิคอน ขึ้นได้อย่างค่อนข้างง่ายดาย หลังจากได้โครงสร้าง pin แล้ว เราก็จะสร้างส่วนของขั้วไฟฟ้า ให้เสร็จเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน

☆ จุดเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสก็คือ

1. พลังงานที่จำเป็นในการผลิตน้อยกว่า (แบบผลึกต้องใช้อุณหภูมิสูงระดับ 1000-1500 องศาเซลเซียส ส่วนแบบอะมอร์ฟัส ใช้แค่ระดับ 300 องศาเซลเซียส)

2. ขั้นตอนในการผลิตไม่ซับซ้อน (สร้างฟิล์มไปพร้อมกับการสร้าง pin junction ได้เลย)

3. เนื่องจากอัตราการดูดแสงของอะมอร์ฟัสซิลิคอนสูงกว่าผลึกมาก จึงสามารถลดความหนาของฟิล์ม เป็นระดับ 1 ไมโครเมตรได้ ในขณะที่แบบผลึกต้องทำอย่างน้อยหนาประมาณ 300 ไมโครเมตร ซึ่งทั้งนี้ก็เพื่อ ความแข็งแรงทางกลของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย นั่นก็คืออะมอร์ฟัสซิลิคอนสามารถประหยัดปริมาณของ ซิลิคอนได้มากกว่า

4. เนื่องจากปฏิกิริยาเป็นแบบก๊าซ จึงสามารถสร้างแผ่นที่มีขนาดพื้นที่ใหญ่ๆ ได้ง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นว่า อาจจะใช้เลเซอร์ช่วยในการตัดวงจร เพื่อสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะของวงจรรวมได้ด้วย ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบต่าง ๆ จะเห็นว่า ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด ตามมาก็คือซิลิคอนแบบผลึกโพลี และแบบอะมอร์ฟัส อย่างไรก็ตามแบบโพลี และแบบอะมอร์ฟัสนั้น ยังมีโอกาสที่จะลดต้นทุนการผลิตได้อีกมากกว่าแบบผลึกเดี่ยวยิ่งไปกว่านั้น แบบอะมอร์ฟัสนั้น ก็ยังมีจุดเด่นอื่นๆ ที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นไม่มี โดยจะกล่าวในบทต่อ ๆ ไป ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์อื่น ๆ นอกจากตระกูลซิลิคอนแล้ว ก็มีจุดเด่นจุดด้วยดังตาราง ซึ่งในปัจจุบัน การใช้ งานยังจำกัดอยู่ในการประยุกต์ลักษณะพิเศษ เช่น การใช้งานในอวกาศ ฯลฯ เป็นต้น

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบต่าง ๆ

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

5.3 การเตรียมแผ่นผลึก

เมื่อได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวเรียกว่าอินกอต (ingot) แล้วนำแท่งผลึกรูปเดี่ยวไปตัดเป็นแผ่นผลึกบาง ๆ (crystal wafer) โดยใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษ (inside diameter) ใบเลื่อยดังกล่าวนี้จะมีลักษณะเป็นวงแหวน และมีคมอยู่ในวงชั้นในโดยที่ใบเลื่อยจะถูกฉาบไว้ด้วยผงเพชร (diamond powder) ในการตัดผลึกจะต้องให้ถูกระนาบหรือแนวผลึกซึ่งจะกล่าวต่อไป เพื่อให้มีความคมพอที่จะตัดเนื้อซิลิคอนซึ่งแข็งมากได้ เมื่อตัดเสร็จแล้วจะปรากฏรอยคมของเลื่อยขึ้นที่ผิวทั้งสองด้านของแผ่นผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งรอยนี้จะกำจัดให้หมดไปโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี (HNO_3 + HF + CH_3COOH) แล้วจึงนำแผ่นผลึกที่ได้นี้ไปทำความสะอาดและขัด (Laspping) ด้วยผงขัด

ในการขัด (Lapping) ผิวหน้าของแผ่นผลึก ผงขัดที่ใช้ได้แก่ ผงเพชร ผงโบรอนไนโตรด์ ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ผงอะลูมินา เป็นต้น สำหรับผงขัดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยมี 2 ชนิด ดังนี้คือ

1. ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นผงที่ใช้ขัดเพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกเรียบ ซึ่งพบโดย Edward G. Acheson ในปี 1897 ผงขัดชนิดนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างทราย (SiO_2) กับคาร์บอน (C) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 2000 °C ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้า และได้ผงขัดที่มีคุณภาพไม่ดีไม่สามารถนำมาใช้ในการขัดได้ ปฏิกิริยาดังกล่าวมีสมการเคมีดังนี้

$$SiO_2 + 3C \xrightarrow{T > 2000\ ^\circ C} SiC + 2CO$$

ในระหว่างที่ทรายและถ่าน (C) ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยากันในเตาไฟฟ้า ที่มีอุณหภูมิสูง จะใส่ขี้เลื่อยเข้าไปเพื่อส่วนผสมเกรูขึ้น และก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นสามารถผ่านออกไปได้

ต่อจากนั้นนำผงขัด SiC ที่ได้ซึ่งยังคงมีขนาดใหญ่ไปบดด้วยเครื่องบด และนำไปร่อนด้วยตะแกรงตาข่ายที่มีขนาดช่องว่างแตกต่างกัน จะได้ผงขัด SiC ที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ หยาบปานกลาง

สำหรับผงขัด SiC (ผงซิลิคอนคาร์ไบด์) ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมี 4 เกรด ด้วยกันคือ

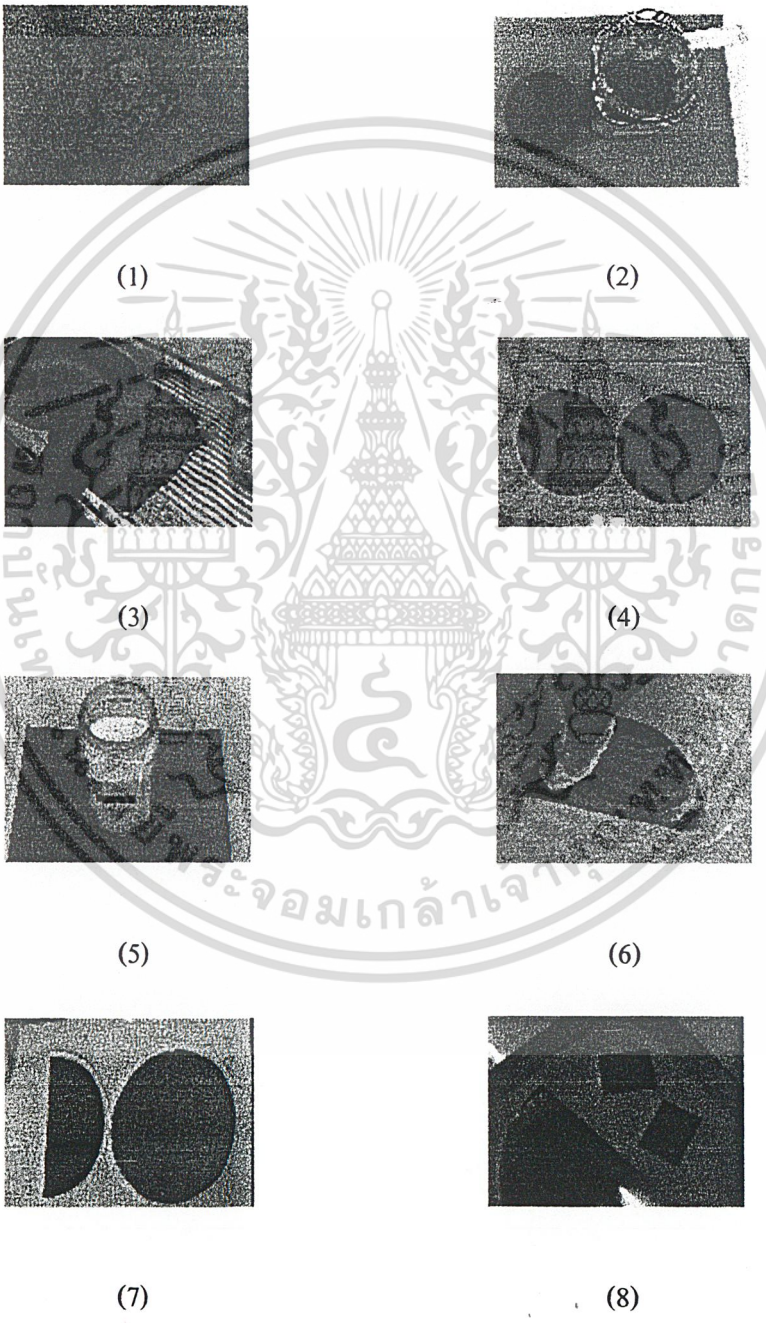
1. เกรด 0000 ผงขัดเกรดนี้จะหยาบ คือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 u
2. เกรด 1000 เม็ดผงขัดจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 u
3. เกรด 2000 เป็นผงขัดที่ค่อนข้างละเอียด คือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 u
4. เกรด 4000 เป็นผงขัด Sic ที่มีความละเอียดมากที่สุด คือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง 3 u

2. ผงอะลูมินา (Alumina) ซึ่งก็คือ Aluminum oxide (Al_2O_3) เป็นผงขัดที่ใช้ขัดผิวผลึกที่เรียบ แล้วให้เป็นมันวาวคล้ายกระจกเงา พบในปี ค.ศ. 1899 โดย Charles B. Jacobs โดยการนำเอาแร่ bauxite ซึ่งเป็นแร่อะลูมิเนียมส่วนใหญ่ประกอบด้วย aluminum oxide (Al_2O_3) มาหลอมละลายในเตาไฟฟ้า ซึ่งมีคาร์บอนเป็นขั้วอิเลคโทรด 2 ขั้วอยู่ในทิศตรงกันข้าม กระแสจากอิเลคโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รดขั้วหนึ่งจะไปยังอีกขั้วหนึ่ง และมีอุณหภูมิ 3700 $^{\circ}$F แร่ bauxite นี้จะละลาย จะได้ Alumina ซึ่งมีขนาดใหญ่และประกอบด้วย Al_2O_3 ถึง 93-94%

ต่อจากนั้นดำเนินขั้นตอนเพื่อให้ได้ผงขัดที่มีขนาดเล็กเช่นเดียวกับ SiC จะได้ผงขัดAlumina ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน ผง Alumina ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีอยู่ด้วยกัน 2 ขนาดคือ ผงขัดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 และ 0.05 u



รูปที่ 5.3.1 แสดงกรรมวิธีในการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1),(2) ผงขัด SiC เกรด 2000 เป็นผงขัดที่ค่อนข้างละเอียดและเกรด 4000 เป็นผงขัด Sic ที่มีความละเอียดมากที่สุด

(3),(4) วิธีการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอนและลักษณะที่ Lapping Wafer แล้ว

(5),(6) ผงอะลูมินา (Alumina) เป็นผงขัดที่ใช้ขัดผิวผลึกที่เรียบ แล้วให้เป็นมันวาวคล้ายกระจกเงา

(7),(8) ลักษณะผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอนที่ Lapping Wafer เรียบร้อยแล้วและได้ทำการตัดแผ่นเพื่อ

สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

5.3.1 กรรมวิธีในการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน

นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่มาติดกับแท่น (dic) ด้วยขี้ผึ้ง (Electronic-grade Wax) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงจนแผ่นผลึกติดแน่นดีแล้ว ผสมผง SiC กับน้ำบริสุทธิ์บนแผ่นกระจกให้เข้ากัน แล้วนำแผ่นซิลิคอนดังกล่าวมาขัดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขัดจนผิวหน้าแผ่นผลึกเรียบดีแล้ว จึงนำแผ่นผลึกออกจาก die แล้วนำไปทำความสะอาดผิวแผ่นผลึก ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไป

ในบางครั้งแผ่นผลึกซิลิคอน ที่มีอยู่มีขนาดหนาจนเกินไปไม่สามารถไปวางบน boat ได้ เราสามารถขัดแผ่นผลึกดังกล่าวให้บางลงได้ โดยขัดที่ด้านบนของแผ่นผลึกด้วยผงขัด SiC

สำหรับการขัดด้วยผงขัด alumina คล้ายกับขัดด้วย SiC เพียงแต่นำแผ่นผลึกซิลิคอนไปขัดบนกระจกที่คลุมด้วยผ้าสักหลาด ส่วนขั้นตอนอื่น ๆ เหมือนขัดด้วยผง SiC

5.3.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่น ๆ คุณสมบัติของแผ่นผลึกก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอันหนึ่ง กล่าวคือ จะต้องเป็นแผ่นผลึกรูปเดี่ยว ซึ่งมีวิธีการปลูกผลึกดังที่กล่าวมาแล้ว ชนิดของสารเจือในแผ่นผลึก ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ ความหนาของแผ่นผลึก และระนาบของแผ่นผลึก ในการวัดคุณสมบัติดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้คือ

❀ **การวัดค่าพิกัดความต้านทาน**

เป็นการหาปริมาณอะตอมสารเจือที่ถูกเติมลงไปในซิลิคอน ไม่ว่าจะเป็นจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เขียนแทนด้วย N_D หรือจำนวนอะตอมสารเจือผู้รับต่อลูกบาศก์เซนติเมตร N_A หรือกล่าวอีกนัยก็คือ จำนวนของพาหะอิสระ (free carrier) ซึ่งก็คือ จำนวนอิเล็กตรอน (n) และโฮล (p) อิสระที่เกิดขึ้นหลังจากเติมสารเจือแล้ว เราสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ เหล่านั้นได้ โดยการวัดค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) หรือค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(resistivity) ของสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ กล่าวคือ ค่าความนำไฟฟ้าจะเป็นส่วนกลับของค่าพิกัดความต้านทาน ดังนั้นถ้าให้ σ และ ρ เป็นสัญลักษณ์แสดงค่าความนำไฟฟ้าและค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้าแล้วจะได้ว่า

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

นอกจากนี้แล้วค่าความนำไฟฟ้าดังกล่าวนี้ จะขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ประจุไฟฟ้าของพาหะแต่ละตัวก็คือ q ซึ่งมีค่า 1.6×10^{-19} คูลอมน์ และยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะ ซึ่งเราเรียกว่า ความคล่องตัว (mobility) ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ จึงแสดงได้โดยสมการ

$$\sigma = q u_n n + q u_p p$$

โดยที่ u_n และ u_p เป็นความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

n และ p คือจำนวนอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด n และชนิด p เรานิยมคิดเฉพาะพาหะส่วนมากในสารกึ่งตัวนำนั้น คือ อิเล็กตรอน และโฮลตามลำดับ ส่วนพาหะส่วนน้อยซึ่งก็คือ โฮล และอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี ถือว่ามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิดคำนวณ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้า ได้โดยวัดค่าพิกัดความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า และทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมวัสดุนั้น ๆ ค่า ρ ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร (Ω-cm) นี้ สามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่องมือโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe)

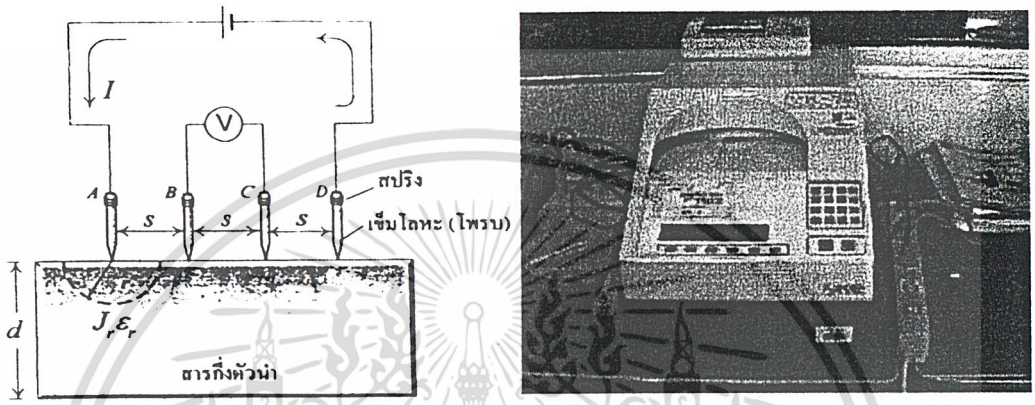
เครื่องมือดังกล่าวนี้นิยมใช้วัดค่า แผ่นความต้านทาน (Sheet resistance) โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ R_S ซึ่งมีหน่วยโอห์มสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($\Omega/\square$) ทำให้เราสามารถทราบค่าพิกัดความต้านทาน ρ ได้โดย

$$\rho = R_S \times \text{ความหนา}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความหนาของแผ่นผลึกนี้ สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Digetal Linear Guage ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แผ่นผลึกที่ใช้หนาประมาณ 250-300 ไมครอน

เครื่อง Four pint probe นี้ จะประกอบด้วยเข็มโลหะซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ซึ่งจะห่างจากกัน เป็นระยะ S เท่า ๆ กัน ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงการวัดและเครื่องวัดค่าพิกัดความต้านทานโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ

เข็มทั้งสี่นี้จะถูกกดลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วป้อนไบอัสทำให้เกิดกระแส I ไหลผ่านเข็มโลหะที่อยู่ริมนอกสุด คือ เข็มที่ 1 และ 4 กระแสดังกล่าวนี้ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม (V) ขึ้นระหว่างขั้วของเข็มโลหะด้านใน

การหาค่าพิกัดความต้านทาน (ρ) ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ขนาดของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดจะต้องมีความยาวและความกว้างมากกว่าระยะระหว่างเข็ม ซึ่งก็คือ S นั่นเอง

❀ **ระนาบ (Orientation) ของผลึก**

ผลึกซิลิคอนระนาบ (111) และ (100) จะถูกนำไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมากที่สุด เนื่องจากระนาบของผลึกนี้ มีความเหมาะสมหลายประการ กล่าวคือ การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ แผ่นผลึกที่ใช้มีระนาบ (111) ซึ่งเป็นแผ่นผลึกที่มีความหนาแน่นอะตอมที่ผิวสูงที่สุด ดังนั้นในการปลูกผลึกระนาบ (111) จะทำได้ง่ายกว่าระนาบอื่น ๆ ระนาบ (111) นี้ จะมีปฏิกิริยาต่อสารเคมีที่ใช้ในการ etching น้อยที่สุด นอกจากนี้ระนาบ (111) ยังมีคุณสมบัติแมคคานิคส์ที่ดี คือ มีความทนแรงดึง (Tensile strength) ของ SiO_2 ได้สูงถึง 0.35×10^{10} dyne/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขบวนการสร้างแบบ Planar แผ่นผลึกระนาบ (111) จะเกิดชั้น SiO_2 ได้เร็วกว่าระนาบ (100) เนื่องจากมีจำนวนอะตอมที่ผิวสูงกว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ ค่าความคล่องตัวของพาหะ (moblility carrier) ของระนาบ (111) จะมีค่าสูงกว่าระนาบ (100) นอกจากนี้แผ่นผลึกระนาบ (111) ยังมีราคาถูกกว่าระนาบ (100) อีกด้วย

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์ จะใช้แผ่นผลึกรูปเดี่ยว P-type ชนิดหยาบ เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. มีค่าพิกัดความต้านทาน 0.4 Ω-cm ระนาบ (111) เทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างเป็นแบบ Planar ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้คือ

ขบวนการทำความสะอาดผิวหน้า

เป็นการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนหลังจาก lapping แล้วมาชำระล้างไขมันและสิ่งแปลกปลอมที่ติดข้างอยู่บนผิวผลึก ซึ่งมีวิธีการดังนี้คือ

1. ต้มในน้ำยาไตรโคลโรเอททีลีน (Trichloroethylene) 5 นาที 2 ครั้ง แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
2. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water) น้ำดังกล่าวนี้จะต้องเป็นน้ำที่ปราศจากอิออนของแร่ธาตุต่างๆ และไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งก็คือ เป็นน้ำที่มีค่าพิกัดความต้านทานสูงประมาณ 18 MΩ-CM
3. ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaner) เพื่อชำระล้างน้ำยาไตรโคลโรเอททีลีน ซึ่งอาจหลงเหลือที่แผ่นผลึกออก คือประมาณ 3 นาที 2 ครั้ง
4. ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง

5.4 การออกซิเดชั่น

หลังจากทำความสะอาดที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จึงนำแผ่นผลึกดังกล่าวมาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ขึ้นปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) นี้ จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวของสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี และยังใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยขบวนการออกซิเดชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยความร้อน (Termal oxidation) โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำ ในบรรยากาศที่มีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้

$$Si \text{ (ของแข็ง)} + O_2 \xrightarrow{\text{อุณหภูมิ } 1100^{\circ}C} SiO_2 \qquad (5.4.1)$$

$$Si + 2H_2O \xrightarrow{\text{อุณหภูมิ } 1100^{\circ}C} SiO_2 + 2H_2 \qquad (5.4.2)$$

สำหรับกลไกการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ เกิดจากก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ เข้าไปจนถึงผิวหน้าสัมผัสระหว่างซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาเคมี

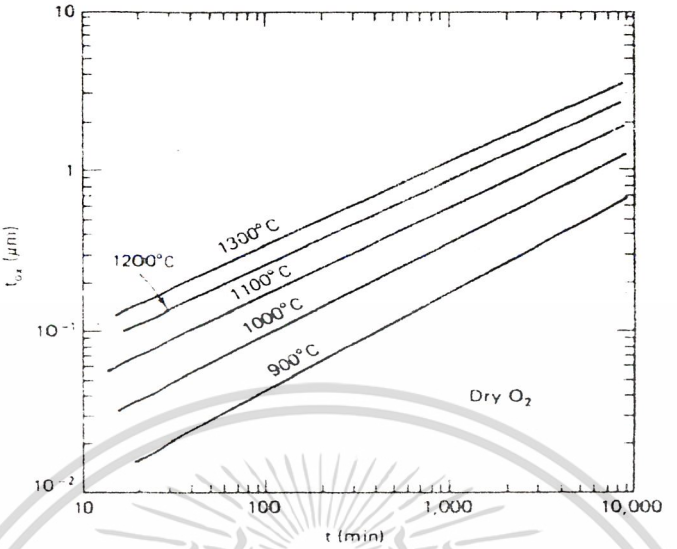
5.4.1 ขบวนการออกซิเดชั่นด้วยความร้อน (Thermal Oxidation)

การสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ ด้วยขบวนการดังกล่าวนี้ ทำได้ 2 ลักษณะคือ

1. การออกซิเดชั่นแบบแห้ง (Dry Oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของผลึกซิลิคอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปน ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1100 $^{\circ}$C จะทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัว ออกซิเจนจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ดังสมการ 5.4.1 เตาที่ใช้ในการ Oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน(ผิดพลาด $\pm$ 0.5 $^{\circ}$C) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้โดยวิธีดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สำหรับความหนาของชั้น SiO_2 นี้ สามารถพิจารณาได้จากรูป 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาในการสร้างออกไซด์ อุณหภูมิต่าง ๆ แบบ Dry Oxidation

จากกราฟดังกล่าวนี้ ทำให้เราสามารถควบคุมความหนาของชั้นออกไซด์ ตามที่ต้องการได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชั่น นอกจากนี้แล้วปริมาณของก๊าซออกซิเจนจะต้องมีมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกริยากับซิลิคอน

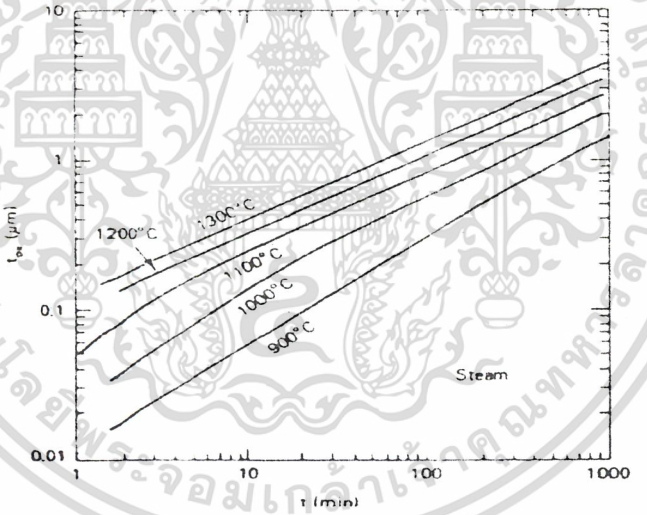
2. การออกซิเดชั่นแบบชื้น (Wet Oxidation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของ Si กับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้แสดงสมการที่ 5.3.2 การออกซิเดชั่นแบบชื้นนี้จะกล่าวเฉพาะเทคนิคที่ใช้ระบบไอน้ำ กล่าวคือ ระบบไอน้ำ (Steam System) เป็นวิธีการปล่อยก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้ว (bubbler) ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนแต่มีค่าต่ำกว่าจุดเดือดราว 90-95 $^{\circ}$C ท่อก๊าซออกซิเจนจะถูกจุ่มลงในน้ำบริสุทธิ์ซึ่งร้อน ทำให้เกิดฟองอากาศผุดขึ้น ซึ่งฟองอากาศที่ผุดขึ้นมานี้ก็คือ ก๊าซออกซิเจนซึ่งอิ่มตัว (มีไอน้ำด้วย) และจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในช่องควอทซ์ ระยะห่างระหว่างทางออกของก๊าซในขวดแก้วและท่อควอทซ์ของเตาออกซิเดชั่นที่ไม่ควรอยู่ไกลนัก เพราะอาจจะเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำได้ ซึ่งควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดกรณีเช่นนี้ได้ วิธีการดังกล่าวนี้เป็นระบบที่ใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ขบวนการออกซิเดชั่นแบบชื้นนี้ จะทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้ได้รับการคุ้มครองลิขสิทธิ์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

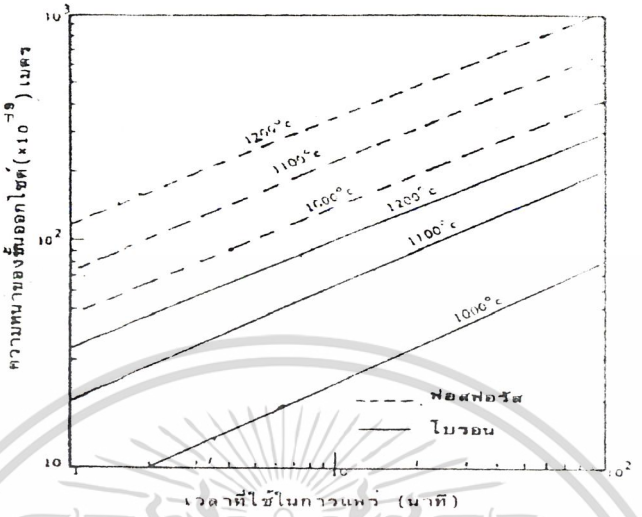
กับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชั่นแบบชื้นนี้ก็คือ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่เลวกว่าแบบแห้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ขั้น SiO_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบแห้งจะมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้น จึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือได้ดีกว่า และเนื่องจากการออกซิเดชั่นแบบชื้นนี้ จะทำให้สภาพผิวของผลึกไม่สมบูรณ์ คือ เกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) เกิดรูพรุนขึ้น

สำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ได้จากการออกซิเดชั่น ซึ่งจะสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ แสดงดังในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุด

5.4.2 การหาความหนาของชั้นออกไซด์

เราสามารถคำนวณหาความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจาก Thermal Oxidation ได้จากกราฟรูปที่ 5.5 และ 5.6

5.4.3 การพิจารณาความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุดสำหรับป้องกันการแพร่สารเจือ

ตามที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าชั้น SiO_2 มีความสำคัญมากต่อการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ คือ จะมีสภาพนำฉนวนไม่นำไฟฟ้า มีความทนทานต่อสนามไฟฟ้าได้ราว 600 v/um นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทำตัวเป็นชั้นที่ต้านทานการแพร่ของอะตอมสารเจือ ในระหว่างการแพร่อะตอมสารเจือ ไม่ว่าจะเป็นชนิดเอ็น (ฟอสฟอรัส) หรือชนิดพี (โบรอน) ก็ตาม มิได้หมายความว่าอะตอมสารเจือเหล่านั้น จะแพร่เข้าไปในเนื้อซิลิคอนแค่เพียงอย่างเดียว จะมีการแพร่เข้าไปในชั้น SiO_2 ด้วยแต่ก็ช้ามาก ทั้งนี้เนื่องสัมประสิทธิของการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือใน SiO_2 มีค่าน้อยกว่าการแพร่ตัวในเนื้อซิลิคอน ดังนั้นชั้น SiO_2 จึงทำหน้าที่ช่วยต้านทานการแพร่ของอะตอมสารเจือ ความสามารถในการต้านทานจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ ค่าความหนาของชั้น SiO_2 ที่น้อยที่สุดที่สามารถทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือได้ แสดงดังรูปที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.4 ลำดับขั้นตอนในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์วิธี Thermal Oxidation

1. กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกรด HF 5% นาน 10 วินาที
2. ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้ง
3. ปรับอุณหภูมิในเตาแพร่ให้คงที่ (อุณหภูมิตามต้องการ)
4. นำแผ่นผลึกวางลงบน Boat แล้วนำไปวางไว้ที่ปากท่อควอทซ์ 5 นาที
5. ค่อย ๆ ดัน Boat ให้เข้าไปในท่อควอทซ์อย่างช้า ๆ 5 นาที
6. ทำการออกซิเดชั่นตามวิธีที่ต้องการ กล่าวคือ ถ้าเป็นแบบแห้งปล่อยก๊าซออกซิเจนแห้งในอัตรา 1000 ซีซี/นาที ถ้าเป็นแบบชื้นปล่อยก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำในอัตรา 600 ซีซี/นาที
7. ทิ้งแผ่นผลึกไว้ในท่อควอทซ์ตามเวลาที่ต้องการ
8. ค่อย ๆ ดึง Boat ให้ออกที่ปากท่อควอทซ์อย่างช้า ๆ 5 นาที
9. ทิ้งแผ่นผลึกไว้ปากราว 5 นาที แล้วเก็บขึ้น

หลังจากขบวนการออกซิเดชั่นแล้ว จะได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอน ต่อจากนั้นทำการเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือในบริเวณที่กำหนด

5.5 ขบวนการ Photolithography

ภายหลังจากการออกซิเดชั่นแผ่นผลึกซิลิคอนแล้ว ชั้นของ SiO_2 จะเคลือบผิวซิลิคอนทั้งหมด ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องแพร่สารเจือลงไปในเนื้อซิลิคอน เพื่อสร้างรอยต่อ p-n บริเวณส่วนที่ต้องการแพร่สารเจือ ต้องทำการเปิดช่องออกไซด์ออก สำหรับขบวนการเปิดช่องออกไซด์ออกนี้เรียกว่า photolithography บางครั้งเรียกสั้น ๆ ว่า photo-etching

5.5.1 Mask Making

สำหรับการสร้างมาส์คต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์นี้ ใช้โฟโต้มาส์คชนิดที่เรียกว่า อีมูลชั่นมาส์ค (emultion mask) หรือบางทีเรียกว่า มาส์คอ่อน (Soff mask) เพราะสะดวกกว่าและราคาถูกกว่าแบบอื่น แต่อายุการใช้งานสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 การออกแบบมาส์ค (Master Mask)

ลวดลายวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็ยลวดลายที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะสร้างแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีขนาดใหญ่ จะได้กำลังงานมากขึ้น สำหรับลวดลายวงจรก็สามารถออกแบบได้หลายแบบ รูปที่ 5.8 เป็นตัวอย่างลวดลายของแผ่นโฟโต้มาส์คเซลล์แสงอาทิตย์

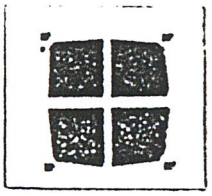
5.5.3 การตัดมาส์คต้นแบบ

หลังจากออกแบบลวดลายบนกระดาษกราฟเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำแผ่นไมลาร์ ชีท ซึ่งประกอบด้วนแผ่นพลาสติกเคลือบอยู่นแผ่น ไมลาร์ มาส์คตามต้นแบบ ซึ่งเป็นไปมีคเลื่อนตัดได้ 2 แกน สามารถตัดได้ละเอียดถึง 0.1 mm ก็ได้

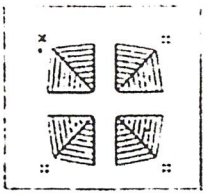
5.5.4 การออกแบบมาส์ค (Master Mask)

นำแผ่นโมลาร์ ชีท ที่ตัดตามต้นแบบไปวางบนฉากของเครื่องถ่ายย่อ (Reduction Camera) เครื่องถ่ายย่อนี้ สามารถย่อได้ตั้งแต่ 20-50 เท่า ถ้าต้องการย่อมากกว่านี้ก็ใช้วิธีถ่ายย่อซ้ำ 2 ครั้ง ในกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่ต้องการถ่ายย่อมากจึงใช้ถ่ายย่อเพียงครั้งเดียวลงบนฟิล์มกระจก ใช้เวลาในการฉายแสง 10-30 วินาที นำฟิล์มกระจกมาแช่ในน้ำยา developer นาที ล้างน้ำแล้วแช่ในน้ำยา Fixer อีก 3 นาที เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) นำมาส์คกระจกไปตรวจดูความเรียบร้อยของลวดลายบน profile projector ต้นแบบในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้ต้องอาศัยมาส์คกระจกในการทำ 1 มาส์ค คือ

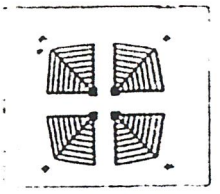
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สำหรับเปิดช่องออกไซด์
เพื่อแพร่สารเจือ

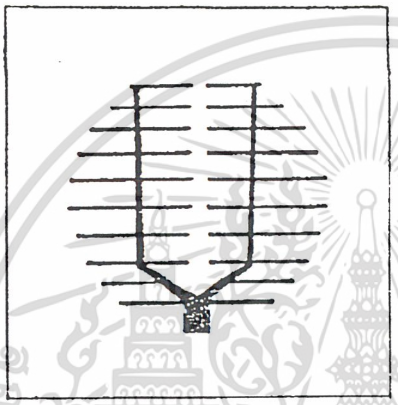


สำหรับเปิดช่องออกไซด์
เพื่อทำขั้วโลหะ

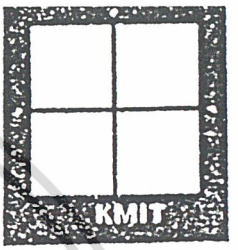


สำหรับทำลวดลาย
ขั้วโลหะ

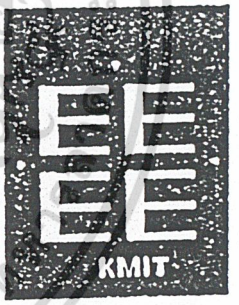
ต้นแบบ SC-1 : ต้นแบบชนิดบวก



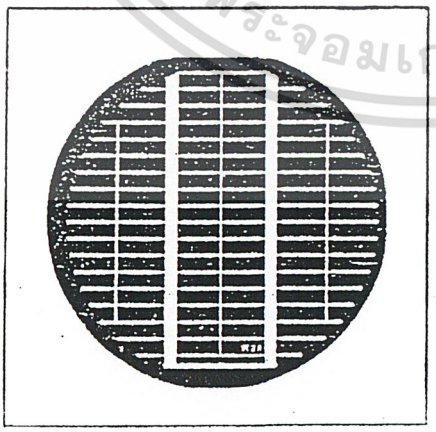
ต้นแบบ SC - 2 : ต้นแบบชนิดบวก
สำหรับเปิดช่องออกไซด์และทำลวดลาย
ขั้วโลหะ



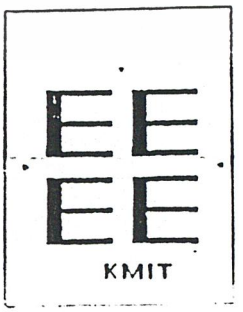
ชนิดลบ : ใช้เปิดช่องออกไซด์
เพื่อแพร่สารเจือ



ชนิดลบ : ใช้เปิดช่องออกไซด์
เพื่อทำขั้วโลหะ



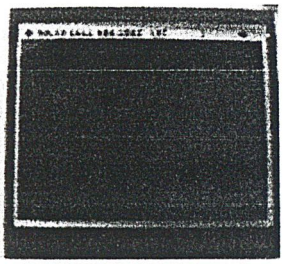
ต้นแบบ SC-4 : ต้นแบบชนิดลบ
สำหรับเปิดช่องออกไซด์



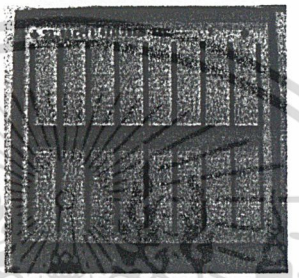
ชนิดบวก : ใช้ทำลวดลาย
ขั้วโลหะ

ตัวอย่างลวดลายแผ่นโฟโต้มาส์คเซลล์แสงอาทิตย์ **ต้นแบบ SC - 3**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



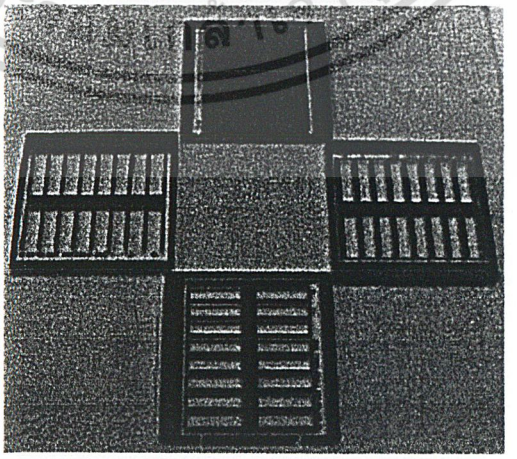
MASK#1 DIFFUSION MASK



MASK#2 CONTACT MASK



MASK#3 METAL MASK



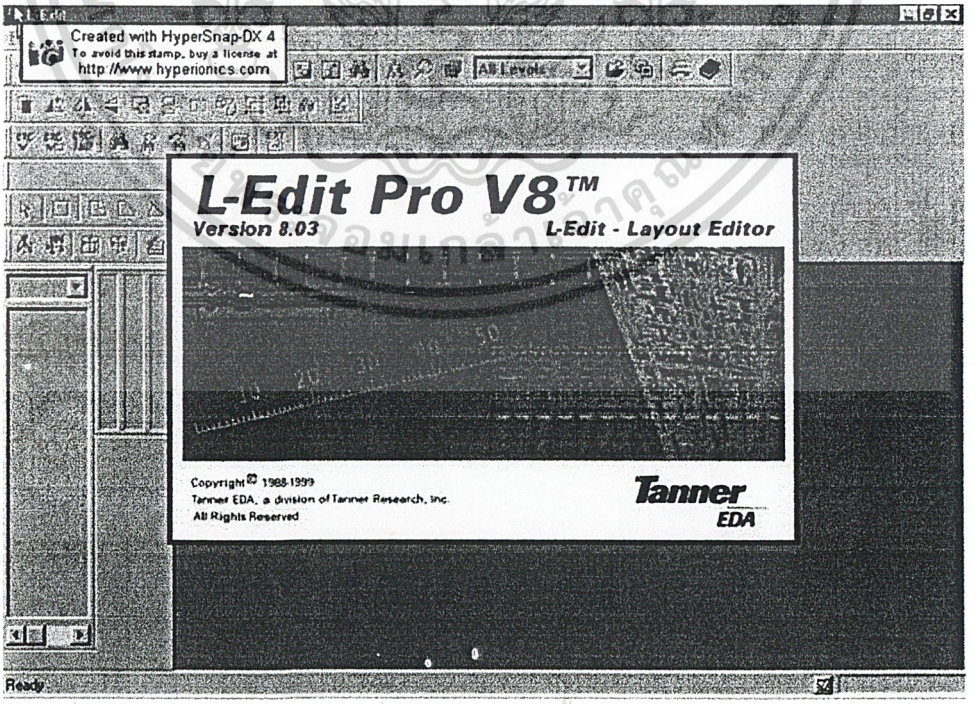
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.8 แสดงการออกแบบมาส์คที่ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จริง

5.6 การออกแบบมาส์คด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

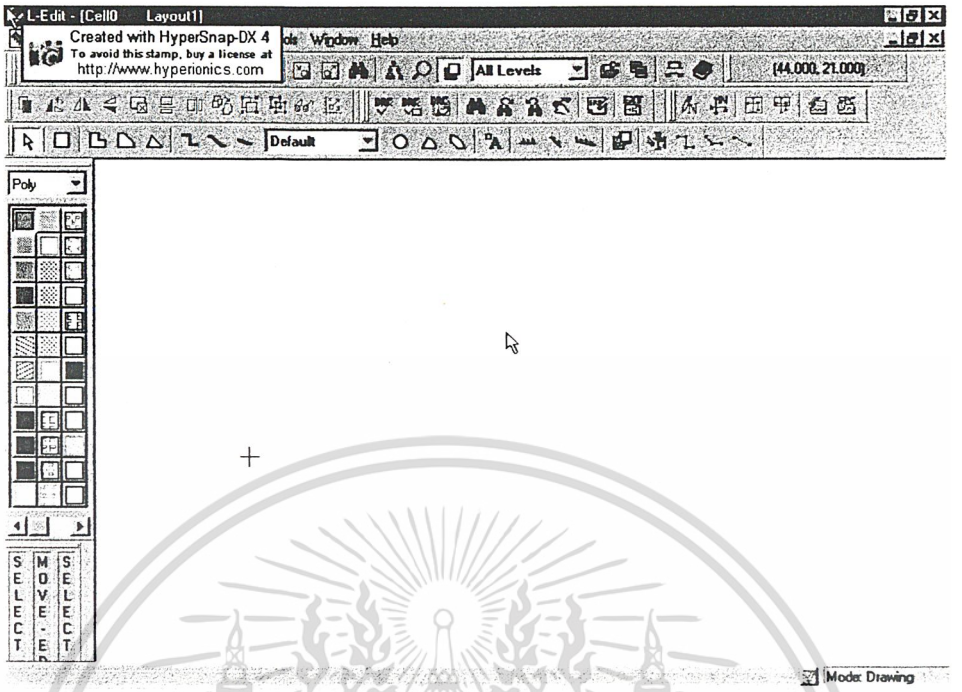
การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการคือ การลดต้นทุนการผลิต และการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ การออกแบบมาส์คมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยการออกแบบมาส์คเน้นหนักไปในเรื่องการออกแบบลายขั้วโลหะ (Grid) ให้มีความเหมาะสมไม่ใหญ่หรือเล็กเกินไป และมีปริมาณเพียงพอในเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะเมื่อเกิดประจุพาหะเนื่องจากแสง ประจุพาหะก็จะวิ่งเข้าหาขั้วโลหะ ถ้าขั้วโลหะถูกสร้างไว้ห่างไกลมาก ประจุที่เกิดขึ้นเหล่านี้ บางครั้งกว่าจะเดินทางไปถึงขั้วโลหะก็จะเกิดการรวมตัวและหายไป เมื่อเป็นเช่นนี้ เพื่อเป็นการรวบรวมกระแสให้ได้มากที่สุด จึงนิยมสร้างขั้วโลหะให้เป็นแถบเล็กๆทั่วไปบนผิวหน้า เพราะถ้าหากเป็นแถบใหญ่ๆแล้ว แม้จะรวบรวมกระแสได้ดี แต่ขั้วโลหะนี้ก็จะไปบดบังแสงทำให้พื้นที่รับแสงของเซลล์ลดลง ทำให้กระแสที่เกิดขึ้นไม่มีปริมาณมากพอ

ปัจจุบันกระบวนการออกแบบและสร้างกระจกมาส์คได้มีการพัฒนา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ทำให้มีความสะดวก, รวดเร็ว และประหยัดเวลาในการออกแบบและการสร้างได้มาก เพราะเราสามารถนำไฟล์ที่เราออกแบบมายิงด้วยแสง LASER ลงบนโครเมียมมาส์ค (Hard Mask) ได้เลยทันที แต่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการออกแบบและสร้างกระจกมาส์คด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังมีราคาสูงอยู่ สำหรับโปรแกรมซึ่งใช้ในการออกแบบมาส์คนี้ได้แก่ โปรแกรม L-Edit Pro V8™ Version 8.03 ของ Tanner Research ซึ่งแสดงได้ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.9 แสดงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ L-Edit ที่ใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 5.10 แสดง Layout Area ที่ใช้ในการออกแบบขั้วโลหะ

สำหรับขนาดของลายขั้วโลหะ (Finger และ Busbar), ระยะห่างระหว่าง Finger, ระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงปลายสุดของ Finger และระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงขอบเซลล์ ที่ใช้ออกแบบในการทดลองครั้งนี้ เราได้อ้างอิงขนาดและระยะของตำแหน่งต่างๆ จากเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบผลึกโพลี่ประสิทธิภาพสูง ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งได้มีการคำนวณค่า optimum ไว้แล้ว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.6.1

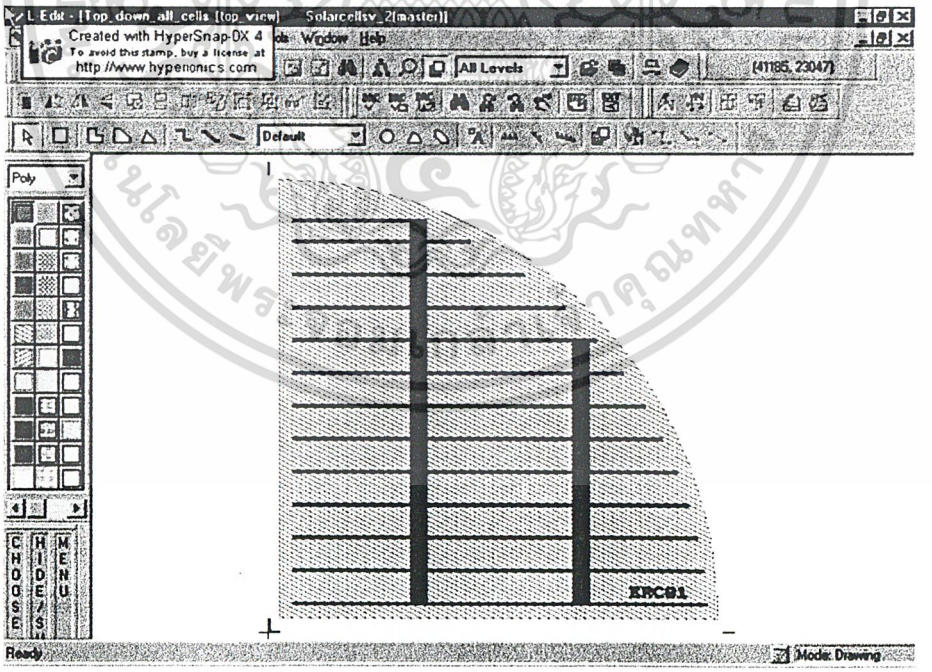
ตารางที่ 5.6.1แสดงขนาดและระยะของตำแหน่งต่างๆบนเซลล์ที่ใช้ในการออกแบบ

ตำแหน่ง	ขนาด (mm.)
ขนาด Finger ของขั้วโลหะ	0.24 mm.
ขนาด Finger ของลวดลายขั้วโลหะ	0.30 mm.
ขนาด Busbar ของขั้วโลหะ	1.74 mm.
ขนาด Busbar ของลวดลายขั้วโลหะ	1.80 mm.
ระยะห่างระหว่าง Finger	3.25 mm.
ระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงปลายสุดของ Finger	1.50 mm.
ระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงขอบเซลล์	1.50 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

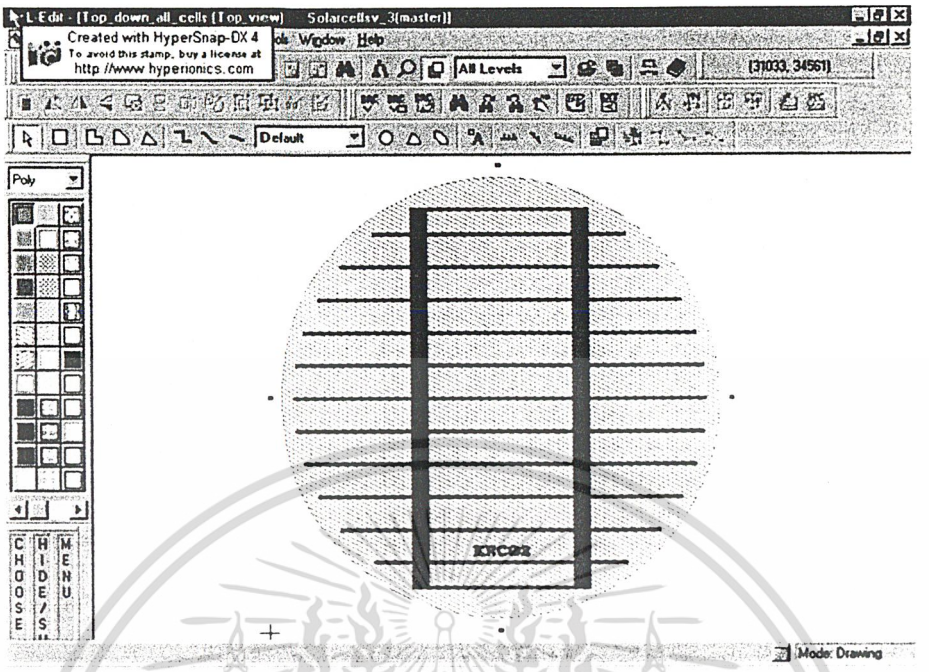
หมายเหตุ ขนาดของ Finger และ Busbar ของขั้วโละและลวดลายของขั้วโลหะได้มีการออกแบบให้ลวดลายของขั้วโลหะเกยออกมาจากขั้วโลหะ (Overlap) ด้านละ 30 μm. เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นละอองหรือสิ่งแปลกปลอมลงไปติดค้างในร่องเมื่อนำออกไปใช้งาน อีกทั้งที่ตำแหน่งของแถบ Finger ที่ 1 บนแผ่นเซลล์ ERC01 และที่ตำแหน่งของแถบ Finger ที่ 2 และ 12 บนแผ่นเซลล์ ERC02 ได้ออกแบบให้ลวดลายของขั้วโลหะเกยออกมาจากขั้วโลหะ (Overlap) ด้านละ20μm. เพื่อเป็น Mark Pattern Alightment ไปในตัว โดยไม่ต้องสร้าง Mark Pattern Alightment ภายหลังอีก เพราะจะทำให้เสียพื้นที่รับแสงของเซลล์

ในการทดลองเพื่อพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นครั้งนี้ เราได้ออกแบบมาส์คต้นแบบไว้ 2 แบบ คือ มาส์คต้นแบบ ERC01 สำหรับใช้ในการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แผ่นเวเฟอร์แบบ Solar-Grade Silicon ผิวหน้าหยาบ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วและ มาส์คต้นแบบ ERC02 สำหรับใช้ในการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แผ่นเวเฟอร์แบบ Primium-Grade Silicon ผิวขัดมัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ดังแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 5.11 แสดง Layout Area การออกแบบมาส์คต้นแบบ ERC01

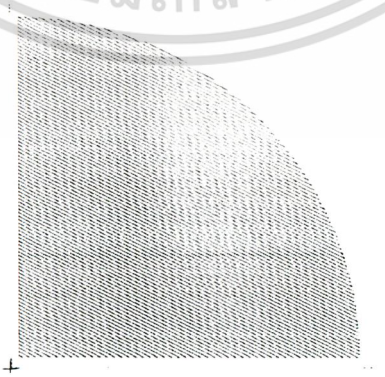
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แสดง Layout Area การออกแบบมาส์คต้นแบบ ERC02

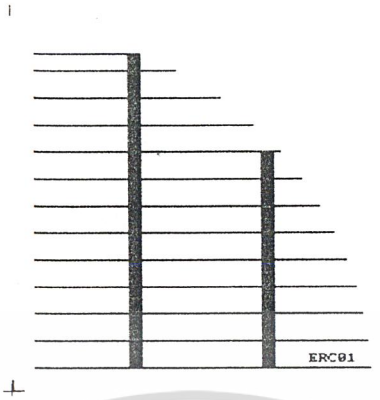
หมายเหตุ เนื่องจากแผ่นเวเฟอร์แบบ Solar-Grade Silicon ผิวหน้าหยาบที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ซึ่งไม่สามารถนำเข้าเตาแพร่สารเจือได้จึงต้องทำการตัดแผ่นออกเป็นสี่ส่วน (มีความยาวด้านละ 2 นิ้ว) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปข้างต้น

มาส์คของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 แบบแสดงได้รูปด้านล่าง

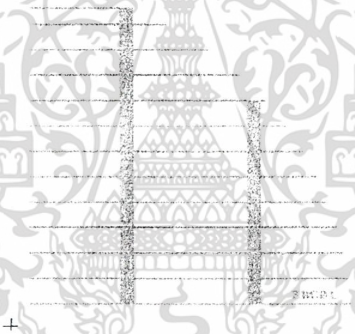


Mask#1 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ

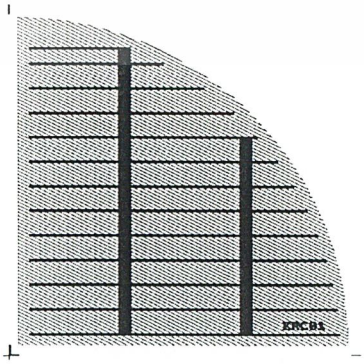
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mask#2 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วโลหะ

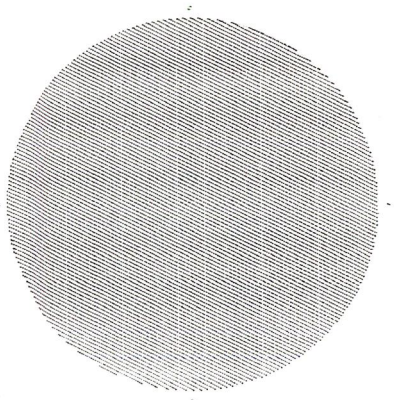


Mask#3 สำหรับทำลวดลายขั้วโลหะ

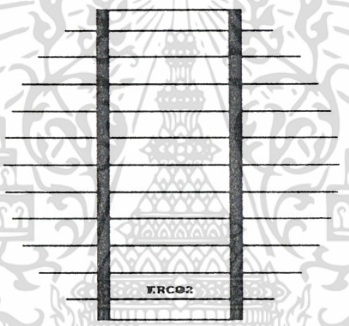


รูปเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ ERC01

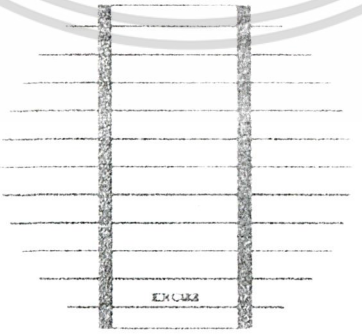
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mask#1 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ



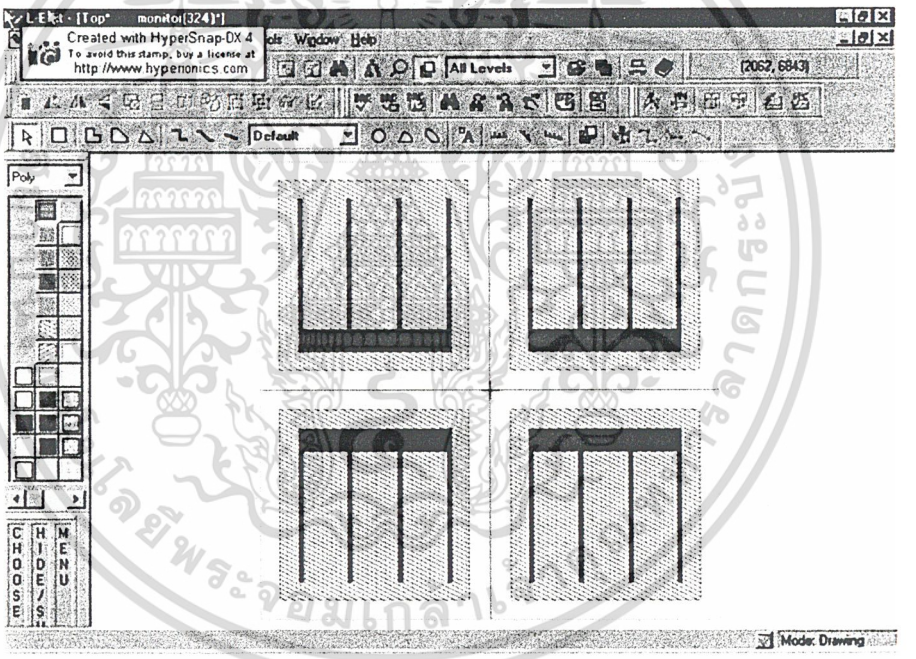
Mask#2 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วโลหะ



Mask#3 สำหรับทำลวดลายขั้วโลหะ

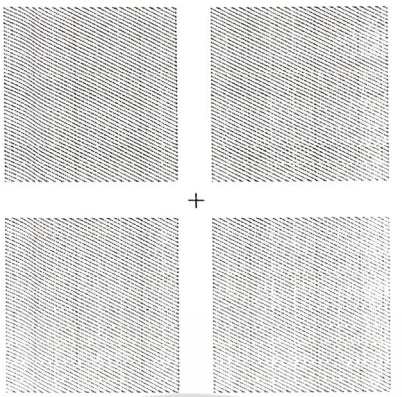
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แผ่นเวเฟอร์แบบ Solar-Grade Silicon ที่มีราคาต่อแผ่นไม่ถึง 100 บาท เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนการผลิตแล้ว เรายังได้ทำการทดลองเพื่อวัตถุประสงค์ เพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี Back Surface Fields (BSF) และการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น Anti-Reflection Coating (ARC) แบบ Porous โดยใช้แผ่นเวเฟอร์แบบ Primium-Grade Silicon ซึ่งมีราคาต่อแผ่นค่อนข้างสูง ดังนั้นในการทดลองเพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์โดยใช้แผ่นเวเฟอร์แบบ Primium-Grade Silicon เราจึงทดลองสร้างเซลล์ในเซลล์ทดลองก่อน (Monitor) เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของเซลล์ที่เพิ่มขึ้นหลังขบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ ก่อนนำไปสร้างเป็นเซลล์ขนาดใหญ่ต่อไป ซึ่งแสดงได้ดังรูป

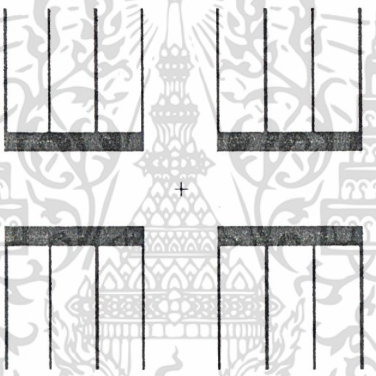


รูปที่ 5.13 แสดง Layout Area การออกแบบ Monitor มาส์คของ Monitor เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองแสดงได้รูปด้านล่าง

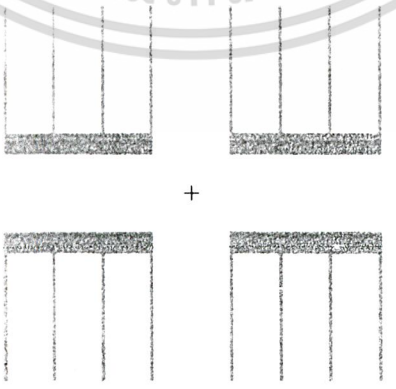
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mask#1 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ



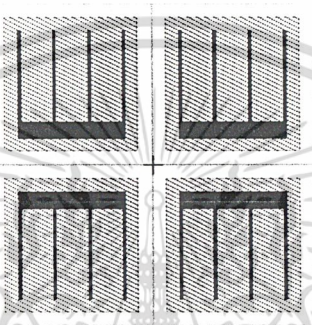
Mask#2 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วโลหะ



Mask#3 สำหรับทำลวดลายขั้วโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปมาส์คของเซลล์ทดลองด้านบนที่เราออกแบบไว้ จะเห็นได้ว่า แผ่นเวเฟอร์ขนาด 2 นิ้ว นั้น เมื่อใช้มาส์คดังกล่าว เราจะได้เซลล์ทดลองทั้งหมด 4 เซลล์ทดลองด้วยกัน อีกทั้งเซลล์ทดลองทั้ง 4 เซลล์นี้ยังแยกจากกันอย่างอิสระอีกด้วย ทำให้เราสามารถทำการทดลอง การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากเซลล์ทดลองทั้ง 4 เซลล์ ได้ด้วยวิธีที่ต่างกันบนแผ่นเซลล์เดียวกัน เมื่อวางมาส์คเซลล์ทดลองที่ออกแบบบนแผ่นเวเฟอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว จะแสดงพื้นที่ได้ดังรูป



รูปที่ 5.14 แสดงการวางมาส์คเซลล์ทดลองบนแผ่นเวเฟอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว

จากการออกแบบลายขั้วโลหะทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ ERC01, ERC02 และเซลล์แสงอาทิตย์ทดลอง (Monitor) พารามิเตอร์สำคัญซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการออกแบบ คือ พื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์ (หมายถึง พื้นที่ของเซลล์ทั้งหมดเมื่อหักจากลายขั้วโลหะซึ่งบังแสง) ดังแสดงได้ในตารางที่ 5.5.2

ตารางที่ 5.6.2 แสดงพื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆที่ได้จากการออกแบบ

เซลล์	พื้นที่รับแสงจริง
เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ ERC01	15.1427 cm^2
เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ ERC02	15.2234 cm^2
เซลล์แสงอาทิตย์ทดลอง (Monitor)	1.9116 cm^2

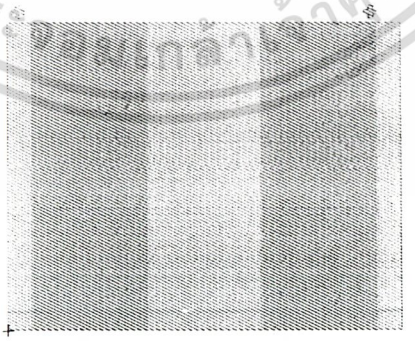
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ [illegible] เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.63 แสดงขนาด และระยะของตำแหน่งต่างๆบนเซลล์ที่ใช้ในการออกแบบ

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.
8ระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงปลายสุด Finger ของลวดลายขั้วโลหะ (Metal)	0.04 mm.
ระยะห่างจากขอบพื้นที่รับแสงถึงขอบเซลล์	0.06 mm.

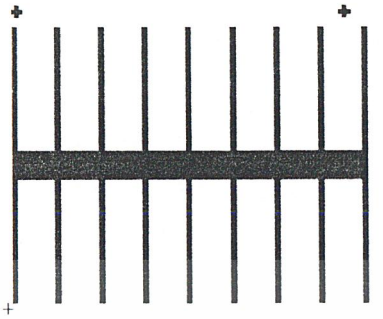
สำหรับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอนในโครงงานนี้ เพื่อความสะดวกเราได้ทำการออกแบบมาส์กต้นแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อน เมื่อได้โครงร่างของเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจึงมาวาดลงในกระดาษตาราง หรือกระดาษกราฟ จากนั้นจึงใช้ไมโครมิเตอร์ (Microcutter) ตัดลวดลายถ่ายทอดไปบนแผ่นไมล่าร์ลามิเนต (Milarlarminate) ก่อนจึงนำไปถ่ายภาพย่อส่วนด้วยกล้องย่อส่วน (Reduction Camera)

มาส์กของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงได้รูปด้านล่าง

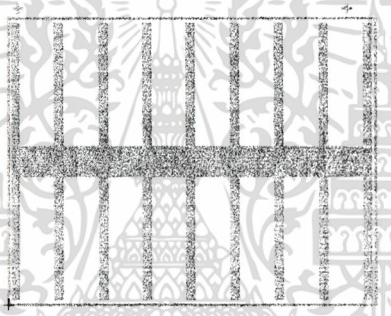


Mask#1 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ (N-region Mask)

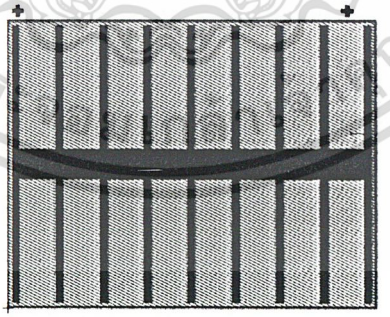
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mask#2 สำหรับเปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วโลหะ (Contact Mask)

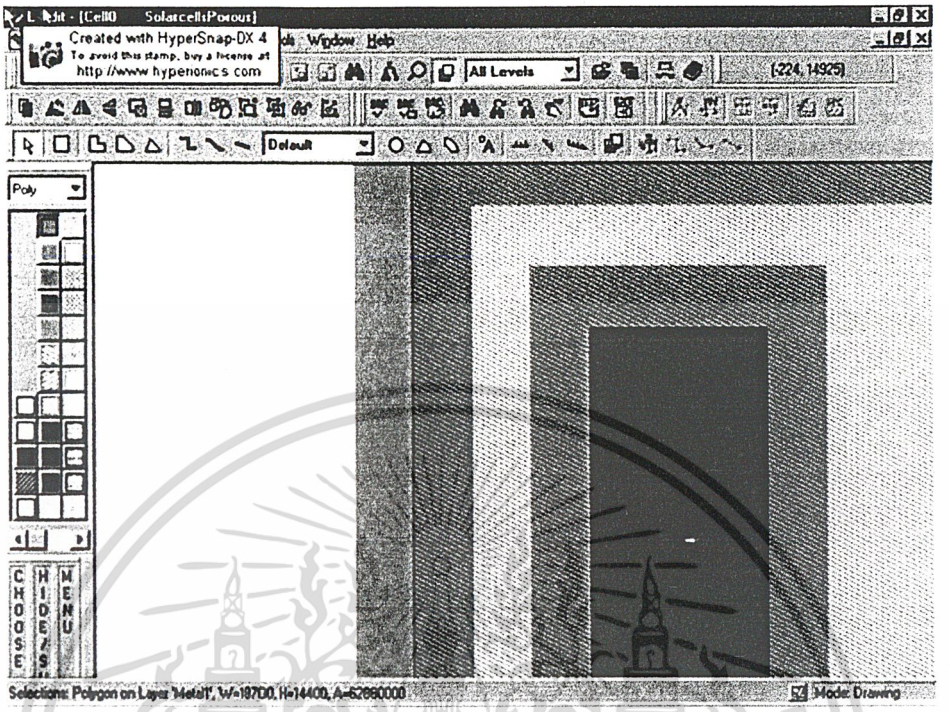


Mask#3 สำหรับทำลวดลายขั้วโลหะ (Metal Mask)



รูปเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากการออกแบบลายขั้วโลหะเซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์สำคัญซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการออกแบบ คือ พื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์ (หมายถึง พื้นที่ของเซลล์ทั้งหมดเมื่อหักจากลายขั้วโลหะซึ่งบังแสง) ดังแสดงได้ในตารางที่ 5.6.4

ตารางที่ 5.6.4 แสดงพื้นที่รับแสงจริงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆที่ได้จากการออกแบบ

เซลล์	พื้นที่รับแสงจริง
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทำการทดลอง	2.0238 cm^2

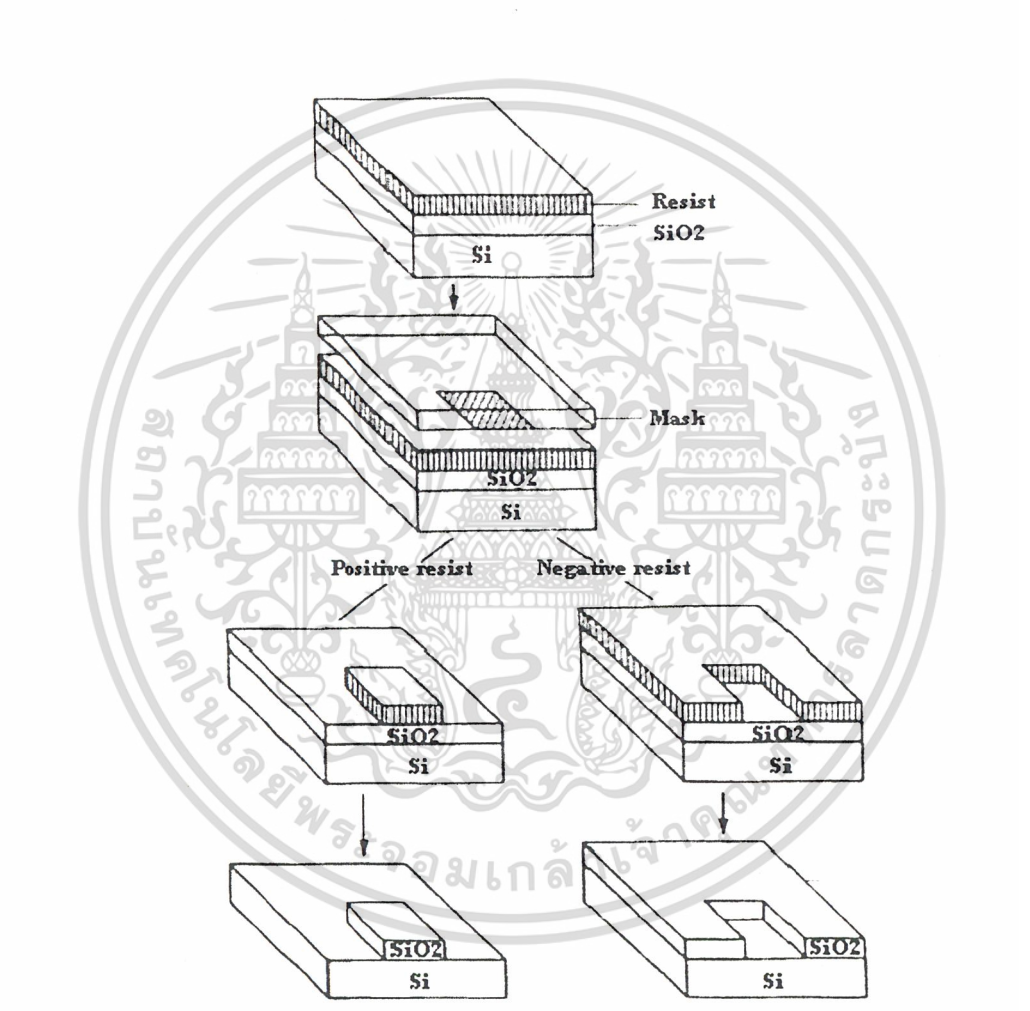
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 ขั้นตอนการทำขบวนการ Photolithography

5.7.1 เคลือบสารไวแสง (photo resist)

ในการทำ photolithography จะใช้น้ำยาไวแสงทั้งชนิดลบและบวก

1. น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative photo resist) จะใช้ Waycoat
2. น้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive photo resist) จะใช้ AZ-1350



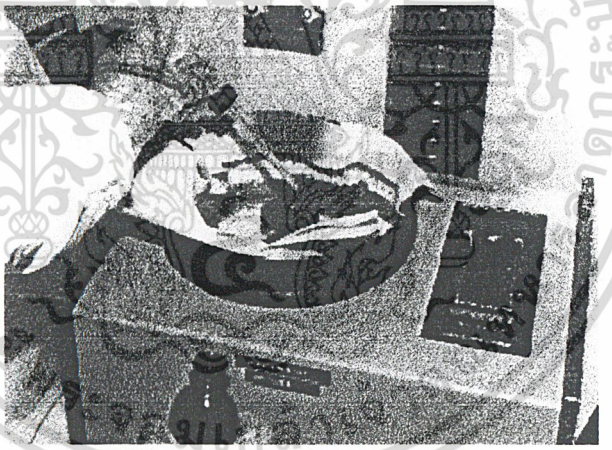
รูปที่ 5.15 แสดงลำดับขั้นตอน และภาพด้านข้างของผลึกซิลิคอนในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้ง 2 ชนิด จะให้ผลตรงกันข้ามกัน ดังรูปที่ 5.15 หลังจากนำแผ่นผลึกซิลิคอนล้างทำความสะอาดและสร้างชั้นออกไซด์แล้ว มาอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบที่ 100 °C อีก 30 นาที เพราะถ้ามีความชื้นแล้ว สารไวแสงจะไม่ติดกับแผ่นผลึกทำให้หลุดลอกออกได้ง่าย

❖ วิธีการเคลือบสารไวแสง

จะใช้สปินเนอร์ (Spinner) โดยนำแผ่นผลึกไปตัดบนแป้นหมุนปรับวางให้แผ่นสมดุลย์ เปิดเครื่องดูดแผ่นผลึกให้ติดกับแป้นหมุน ปรับความเร็วรอบไปจนถึงความเร็วที่ต้องการ ถ้าเป็นสารไวแสงชนิดลบ (Waycoat) ใช้ความเร็วรอบ 5000 rpm ถ้าเป็นสารไวแสงชนิดบวก (AZ-1350) ใช้ความเร็วรอบ 3000 rpm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารไวแสง ถ้าสารไวแสงมีความหนืดมาก แล้วใช้ความเร็วรอบต่ำ น้ำยาจะนูนตรงกลาง แต่ถ้าสารไวแสงหนืดน้อย ใช้ความเร็วรอบสูง น้ำยาจะนูนบริเวณขอบ ดังนั้นจะต้องเลือกความเร็วรอบให้พอเหมาะกับประเภทของน้ำยาไวแสง เมื่อตั้งความเร็วรอบที่ต้องการได้แล้ว หยดน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึก 2-3 หยด เปิดเครื่องสปินเนอร์ โดยจะใช้เวลาในการสปิน 30 วินาที ให้ได้ความหนาของสารไวแสงที่เคลือบผิวแผ่นผลึกประมาณ 1600 Å-2000 Å นำไปอบในตู้อบให้แห้งอีก 30 วินาที (Solf bake)



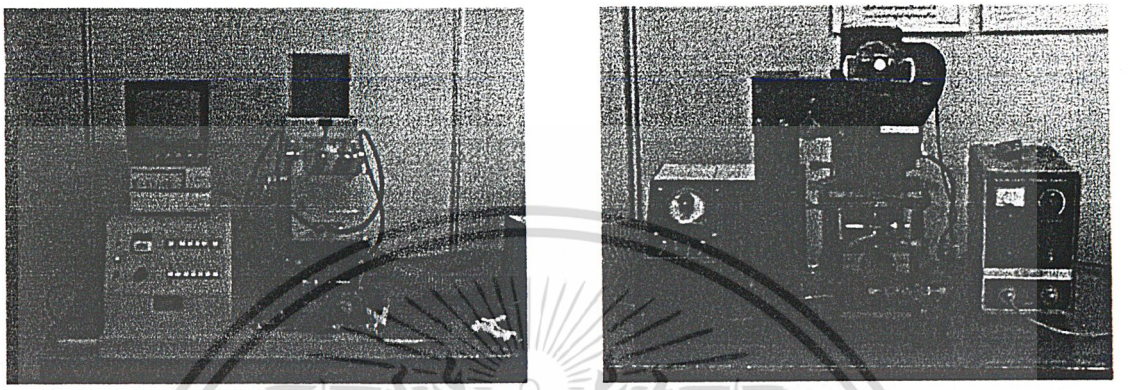
รูปที่ 5.16 แสดงการทำงานวิธีการเคลือบสารไวแสง

5.7.2 Mask alignment and expose

นำแผ่นผลึกที่ผ่านการเคลือบสารไวแสงและอบให้แห้งแล้ว มาวางซ้อนกับมาส์คกระจกต้นแบบทำการ alignment (จัดมาส์ค) ด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์เมื่อ alignment เสร็จแล้วเลื่อนแผ่นผลึกมาประกบกับแผ่นมาส์ค ใช้อากาศอัดให้แผ่นผลึกกับมาส์คทาบติดกันให้แนบฉายแสง U.V (Ultra Violet) ซึ่งมีความยาวคลื่น 2000Å -3000Å เพื่อทำให้แบบที่ถูกฉายมีความคมชัดดี เพราะถ้าใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

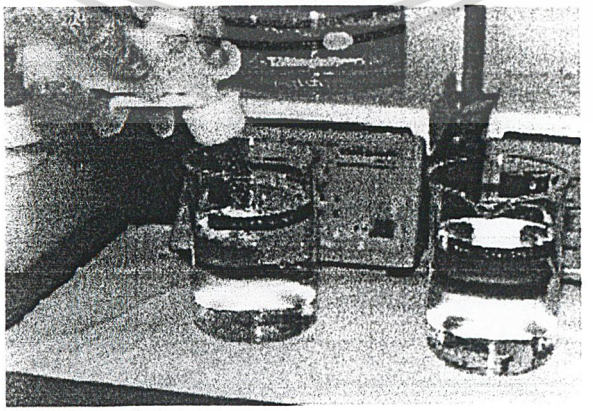
คลื่นแสงที่ยาวมากจะเกิดการเลี้ยวเบนของแสงมากขึ้น แหล่งกำเนิดแสงใช้หลอดไฟ Xe-Hq ใช้เวลาในการฉายแสงประมาณ 8 วินาที



รูปที่ 5.17 แสดงอุปกรณ์ในการจัดมาส์ค (alignment)

5.7.3 การดีเวลลอป (development)

เมื่อฉายแสงแล้วนำแผ่นผลึกมาแช่ในน้ำยา developer ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงลบ (Waycoat) ใช้ Xylene ($C_6 H_4 (CH_3)_2$) 2 แก้ว ๆ ละ 1 นาที แล้วจุ่มใน Isoprophy Alcohol ($(CH_3)_2 CHOH$) 3 แก้ว ๆ ละ 10 นาที , 20 วินาที , 30 วินาที ตามลำดับเพื่อล้าง Xylene แต่ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงบวก (AZ-1350) ใช้ AZ-developer ผสมน้ำ 1: 1,2 แก้ว ๆ ละ 1 นาที แล้วล้างน้ำ DI ให้สะอาด นำแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนดีเวลลอป แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบอีก 30 นาที เพื่อไล่ความชื้น (postbske) ป้องกันฟิล์มลอก



รูปที่ 5.18 แสดงวิธีการดีเวลลอป (development)และน้ำยาดีเวลลอป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.4 Etching

นำแผ่นผลึกที่อบแห้งแล้วไปทำการกัดออกไซด์ออก ในการเตรียมเพื่อจะทำการแพร่สารเจือ หรือเตรียมที่จะทำขั่วโลหะ โดยใช้น้ำยา Buffer (HF 47% : NH_4 F 40% 1 : 6) กัดออกไซด์มีอัตราการกัด 1000 Å /นาที

5.7.5 การลอดชั้นสารไวแสง

นำแผ่นผลึกที่ผ่านการ Etching แล้วมาลอกสารไวแสงออกถ้าเป็นWaycoat ใช้กรด H_2 SO_4 ต้มให้ร้อน 2 แก้ว ๆ ละ 5 นาที ล้างน้ำ DI ต้มน้ำ DI จุ่ม ๆ สัก 2-3 นาที แล้วล้างน้ำ DI ถ้าเป็น AZ-1350 ให้ Super Sonic ใน Acetone (DH_3 $COCH_3$) 2-3 นาที แล้วล้างน้ำ DI นำแผ่นผลึกที่ลอกฟิล์มชั้นสารไวแสงออกหมดแล้วเป่าให้แห้ง เป็นการครบขั้นตอนของขบวนการ photolithography

สรุปขั้นตอนในการปฏิบัติการที่ใช้ใน Leb ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ลาดกระบัง เพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

1. อบแผ่นผลึกในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 30 นาที
2. ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่อง Spinner ที่ 5000rpm สำหรับ Waycoat 3000 rpm สำหรับ AZ-1350 ประมาณ 30 วินาที
3. Prebake อบแผ่นผลึกในตู้อบอุณหภูมิ 100°C นาน 30 นาที
4. Mask aliqnment และฉายแสง U.V. (expode) 8 วินาที
5. Development ของ Waycoat ใช้ Xylene I, II อย่างละ 1 นาที 30 นาที ตามลำดับ ล้างน้ำ DI ถ้า Development ของ AZ-1350 ใช้ AZ-developer I, II อย่างละ 1 นาที ล้างน้ำ DI
6. เป่าแห้ด้วยไนโตรเจน (N_2)
7. Postbake อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100°C นาน 30 นาที
8. Etching ออกไซด์ด้วย Buffer
9. ล้างน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน
10. ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงบวก AZ-13520 โดย Super Sonic ใน Acetone 2-3 นาที หรือลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงลบ Waycoat โดยต้มในกรด H_2 SO_4 I, II อย่างละ 5 นาที
11. ล้างน้ำ DI 2-3 ครั้ง
12. ต้มน้ำ DI จุ่ม ๆ 2-3 นาที
13. ล้างน้ำ DI 2-3 ครั้ง
14. เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 การแพร่สารเจือ

เป็นขบวนในการที่จะแพร่สารเจือชนิดพีหรือเอ็น เข้าไปในเนื้อซิลิคอน เพื่อสร้างให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็น หรือสร้างชั้นขึ้น เหตุผลสำคัญสำหรับกลไกของการแพร่ คือ ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน (Concentrarion gradient) และสนามไฟฟ้าที่เข้ามาบังคับ

5.8.1 คณิตศาสตร์สำหรับการแพร่

อัตราการแพร่ของอะตอมสารเจือที่จะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสารเจือ หรือคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการแพร่สารอีกด้วย ปกติแล้วลักษณะการเกิดการแพร่นั้น จะเกิดขึ้นทุกทิศทาง แต่สำหรับการแพร่สารเจือในสารกึ่งตัวนำ การพิจารณาเพียงมิติเดียวก็นับว่าเพียงพอ

$$F = -D\frac{\partial N}{\partial X} \qquad (5.8.1)$$

สมการที่ 5.8.1 เป็นกฎของฟิค (Fick' s Law) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลัก F (อะตอม/ตารางเมตร/วินาที) กับการเปลี่ยนแปลงการกระจายอนุภาคสารต่อระยะทาง (อะตอม/เมตร^4) เครื่องหมายลบแสดงให้ทราบถึงค่าการแพร่ไปสู่บริเวณที่ความหนาแน่นต่ำกว่าเสมอ โดยที่ D เป็นค่าสัมประสิทธิการแพร่ของสารเจือชนิดนั้น ๆ ในเนื้อซิลิคอนและถ้าหากพิจารณาเมื่อมีสนามไฟฟ้า มาบังคับ สมการที่ (5.8.1) ก็จะกลายเป็น

$$F = -D\frac{\partial N}{\partial X} + \mu N\varepsilon \qquad (5.8.2)$$

เมื่อ N คือ ความหนาแน่นสารเจือ (อะตอม/เมตร^3) จากสมการที่ (5.8.1) ถ้าเราพิจารณาระยะทางในการแพร่เป็น Δx และเวลา Δt แล้ว จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสารเจือในหน่วยปริมาตรนั้น คือ ความแตกต่างของฟลักในระยะทาง Δx นั่นเองหรือ

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\Delta X \cdot A) = A\,F(X) - F(X + \Delta X) \qquad (5.8.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{F(X) - F(X + \Delta X)}{\Delta X}$$

$$= \frac{\partial F}{\partial X} = D\frac{\partial^2 N}{\partial X^2} \qquad (5.8.4)$$

หรือถ้าหากนำสมการที่ (5.8.2) มาแทนก็จะได้

$$\frac{\partial N}{\partial X} = -\frac{\partial F}{\partial X}$$

$$= D\frac{\partial^2 N}{\partial X^2} - \mu\varepsilon\frac{\partial N}{\partial X} \qquad (5.8.5)$$

สมการที่ (5.8.5) ก็คือ สมการทั่วไปของการแพร่

5.8.2 คำตอบของสมการ

เห็นว่าสมการที่ (5.8.5) เป็น Second order differenrial Equation การหาคำตอบจะต้องหาเงื่อนไขขอบเขตเสียก่อน

กรณีที่ 1 เมื่อแพร่โดยไม่จำกัดซอส (อะตอมสารเจือปริมาณไม่จำกัด) จะได้

Boundary condition คือ

$$N(o,t) = No$$

$$N(\alpha, t) = O$$

และ $$N(x,o) = O$$

คำตอบทั่วไปของสมการที่ (5.8.5) จึงเป็น

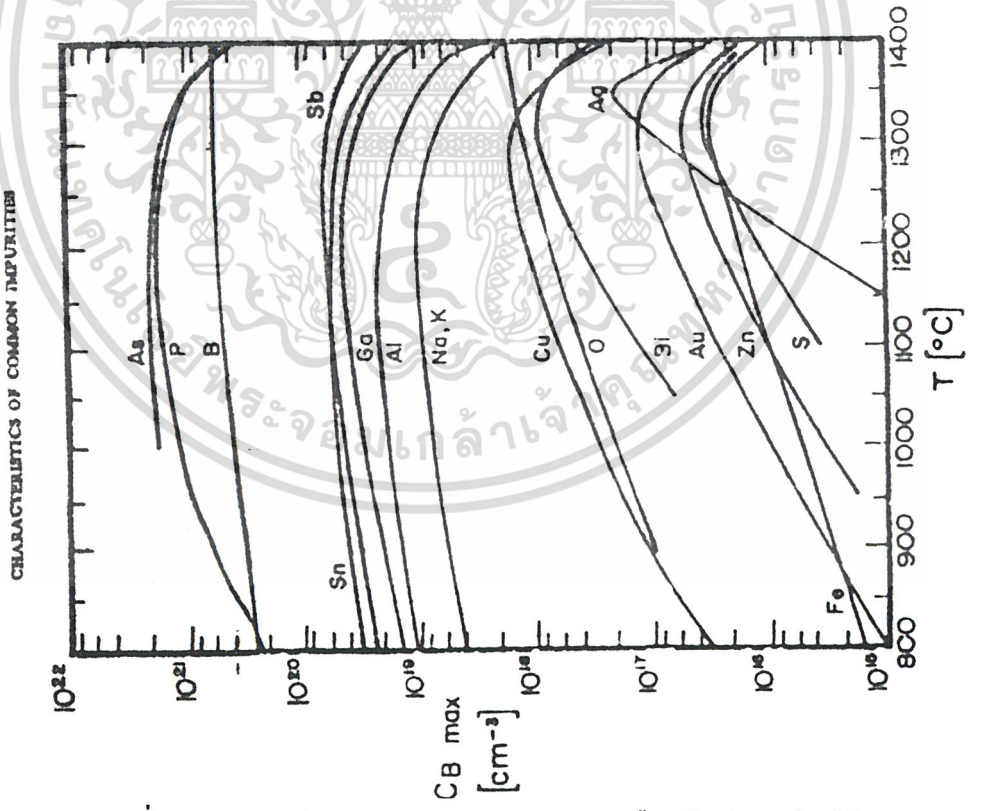
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(x,t) = No\{(1-erf(x/2\sqrt{Dt}))\} \quad (5.8.6)$$

หรือถ้าหาก $1-erf(x/2\sqrt{Dt}) = erfc(x/2\sqrt{Dt})$ จะได้

$$N(x,t) = No\{erfc(x/2\sqrt{Dt})\} \quad (5.8.7)$$

สมการที่ (5.8.7) นี้จะเรียกว่า error functionm distribution และจึงเข้าใจว่าที่มาของสมการที่ (5.8.6) นั้นยุ่งยากและจะไม่ขอกล่าวในที่นี้ ส่วน No นั้น เรียกว่า Solid Solubility ของสารเจือ ซึ่งหมายถึงปริมาณสารเจือที่แพร่ออกมาได้มากที่สุด ณ อุณหภูมินั้นค่านี้สามารถได้จากกราฟในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 แสดงค่า Solid Solubitity ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าของ error funcion หรือ Complementary error function นั้นสามารถหาได้จากกราฟในรูปที่ 5.21

อนึ่งสำหรับในกรณีที่ 1 นี้ เราสามารถจะหา Flux intensity (Q) คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือต่อตารางพื้นที่ได้โดย การอินทิเกรดสมการของ N(x,t) คือ

$$Q = \int_0^{\infty} N(x,t)\,dx$$

$$= 2No\frac{\sqrt{Dt}}{\pi} \qquad (5.8.8)$$

ค่า D (diffusion Coefficience) ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือชนิดต่าง ๆ จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิ และค่า activation energy โดยความสัมพันธ์คือ

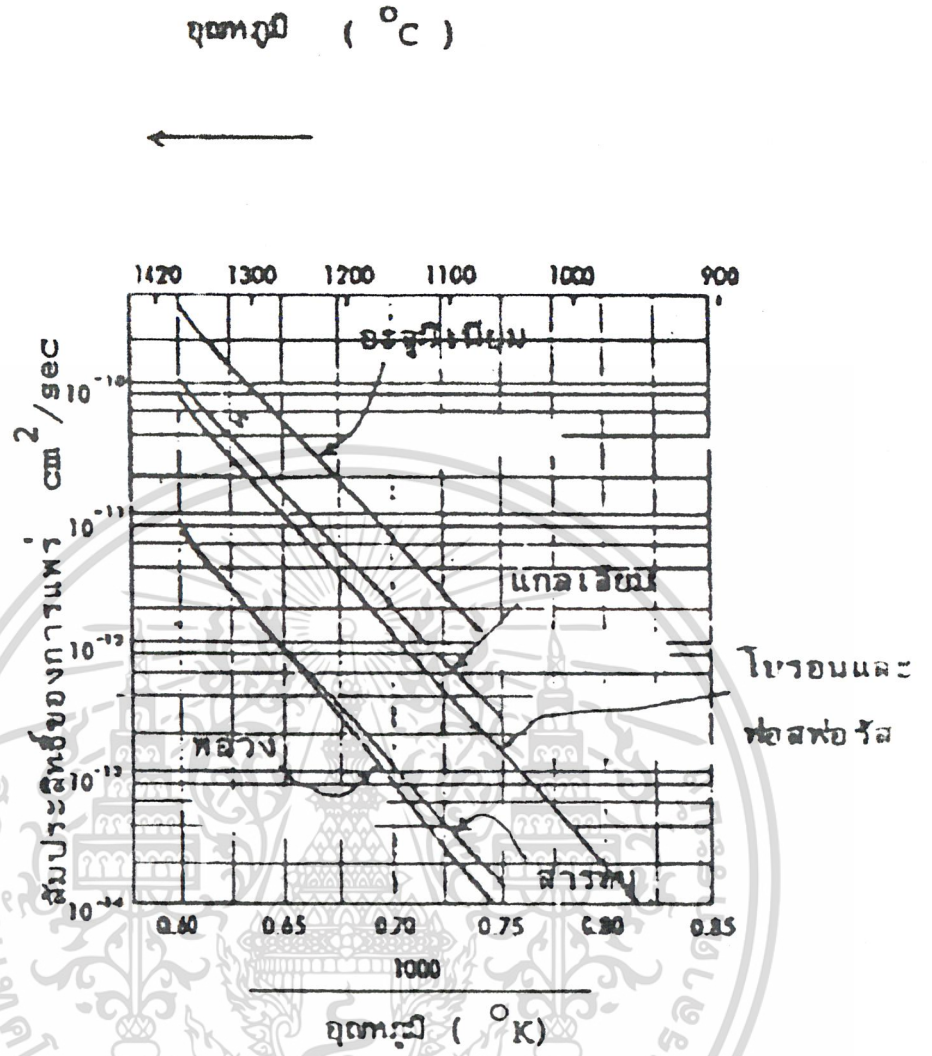
$$D = Do\ \exp\ (-E_a / KT) \qquad (5.8.9)$$

เพื่อความสะดวกต่อการหาค่าและใช้งาน กราฟของสมการที่ (5.8.9) แสดงในรูปที่ 5.20

กรณีที่ 2 การแพร่เมื่อจำกัดประมาณอะตอมสารเจือ ซึ่งในทางปฏิบัติประมาณจำกัดของอะตอมสารเจือคือ Q อะตอม/พื้นที่

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - \mu\varepsilon\frac{\partial N}{\partial x}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5. 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิการแพร่และอุณหูมิของสารเจือชนิดต่าง ๆ

$$N(\alpha, t) = 0$$

$$N(0, t) = \text{Constant}$$

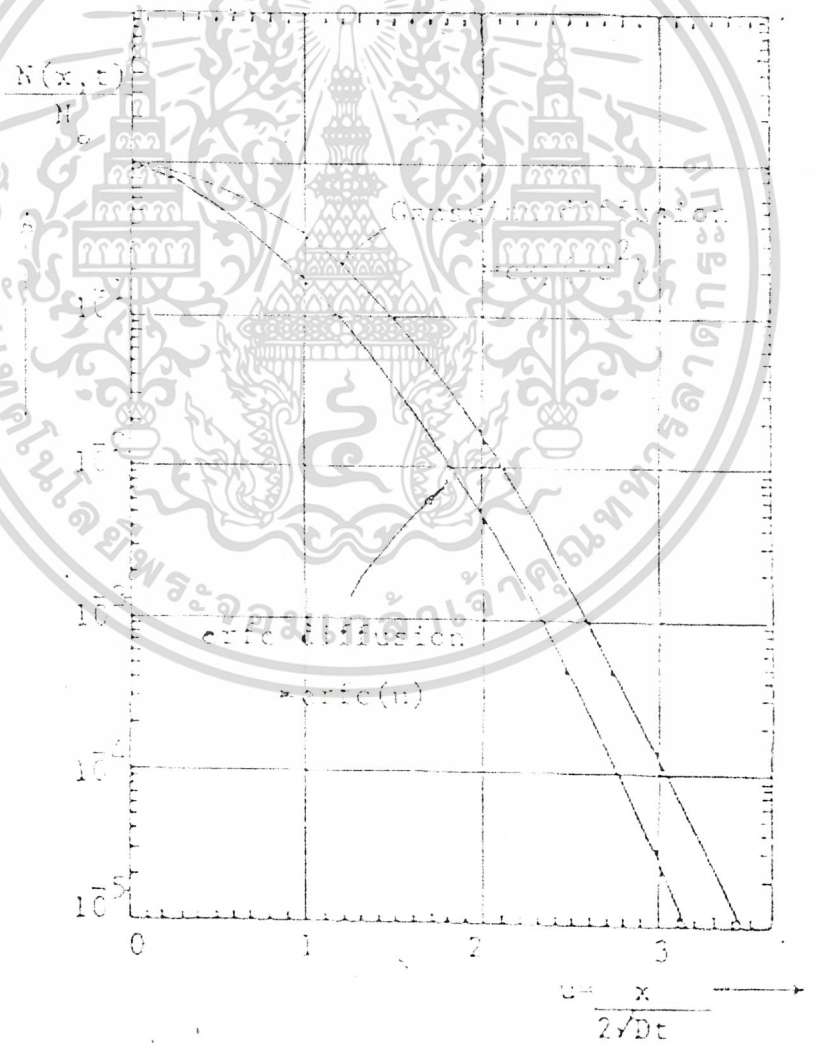
$$\left.\frac{\partial N}{\partial x}\right|_{t = 0} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งคำตอบทั่วไปก็คือ

$$N(X,t) = \frac{Q}{\sqrt{Dt}} \exp(-X^2/4Dt) \qquad (5.8.10)$$

สมการ (5.8.10) คือ Gaussion distribution และค่า ก็คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือบริเวณผิว เห็นได้ชัดว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่านี้จะลดลงเพราะปริมาณสารเจือมีอยู่จำกัด



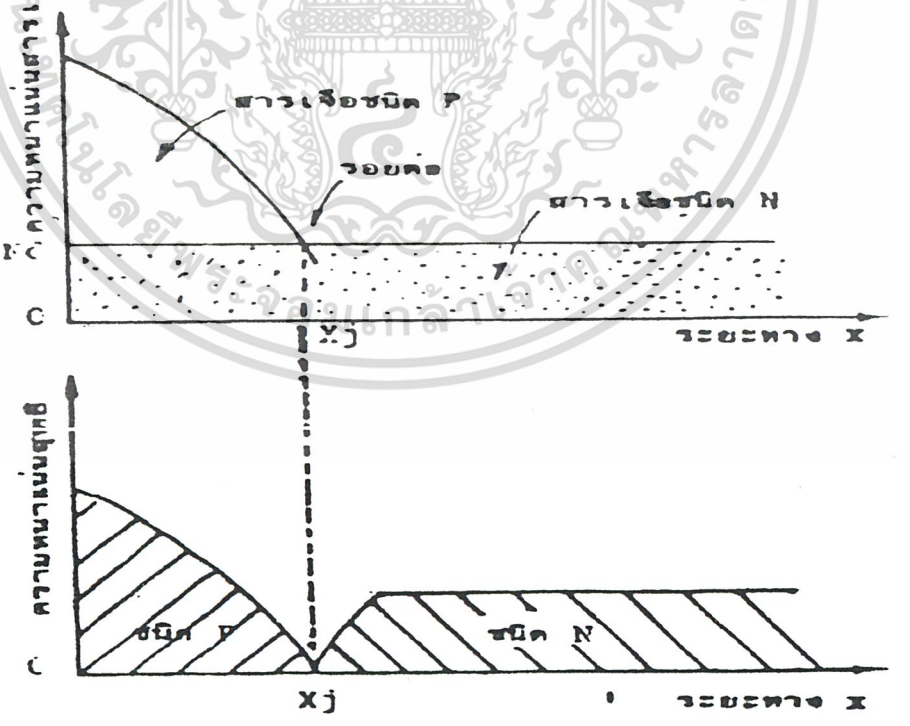
รูปที่ 5.21 กราฟหาการกระจายทั้งแบบ erfc และ Gaussion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการแพร่สารเจือไม่ว่าชนิด N หรือชนิด P จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญเสมอ คือ การทำ Pre-deposition และการ drive-in การ deposite จะทำการแพร่สารด้วยเงื่อนไขในกรณีที่ 1 คือ ไม่จำกัดปริมาณสารเจือซึ่งทางปฏิบัติมักทำในเวลาสั้น และอุณหภูมิต่ำกว่า 1000°C สมการ drive-in นั้นเป็นการแพร่สารต่อจากสาร deposite แล้วกรณีนี้จะเป็นการแพร่แบบจำกัดประมาณสารเจือ และมักทำการออกซิเดชั่นไปด้วยในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแพร่ของสารเจือออกมาจากแผ่นผลึก การทำมักทำที่อุณหภูมิสูงและเวลานานตามระยะของการเกิดรอยต่อซึ่งออกแบบไว้

5.8.3 การเกิดรอยต่อ P-N

สมมุติว่าเราแพร่สารเจือ N เข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิด P อะตอมของสารเจือจะกระจายเข้าไป โดยที่บริเวณผิวหน้าย่อมจะมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือสูงที่สุด และจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะ X ลึกลงไป เมื่ออะตอมของปริมาณสารเจือลดลงเท่ากับอะตอมปริมาณสารเจือเดิม (คนละชนิด) ตำแหน่งนี้ก็คือ ตำแหน่งของรอยต่อ p-n ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.22 แสดงการเกิดรอยต่อ P-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

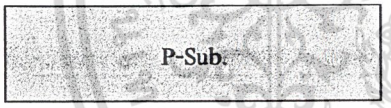
จากสมการที (5.8.10) $N(X,t) = \frac{Q}{\sqrt{Dt}} \exp(-X^2/4Dt)$

เมื่อ $X = X_j$; $N(X,t) = N_d = \frac{1}{\rho.q.\mu_n}$ ดังนั้น

$$N_d = N(X,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp(-X_j^2/4Dt) \quad (5.8.11)$$

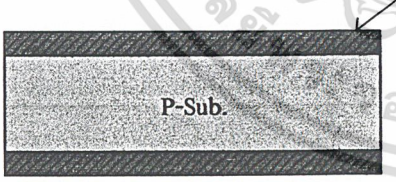
โดยที่ค่า X_j สามารถหาได้ ถ้าหากรู้ค่า t, D, N_d และ Q

5.9 แสดงภาพตัดขวางในขบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์



แผ่น Substrate ใช้ Solar Grade ชนิด P สภาพ

ความต้านทานแผ่น = 35 Ω/□

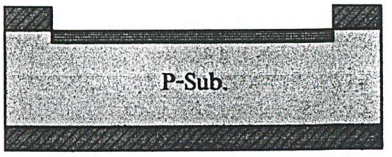


Oxidation 1,050 °C , O_2

-Dry 1,200 cc/min , 1 hr.

-Wet 1,000 cc/min , 1 hr.

-Dry 1,200 cc/min, 1 hr.



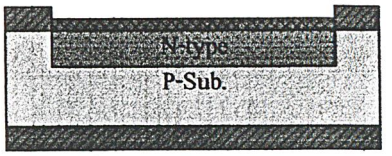
1 Phosphorus Diffusion

Predeposition 1,000 °C

N2 1,000 cc/min, 15 min สภาพความต้านทาน

แผ่นเปลี่ยนจาก 35 Ω/□ เหลือประมาณ 22 Ω/□

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

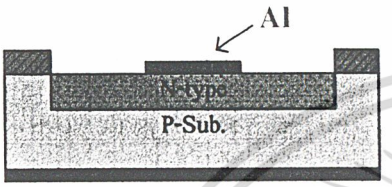


Drive in 1,000 °C , O_2

-Dry 1,200 cc/min , 15 min

-Wet 1,000 cc/min , 20 min*

-Dry 1,200 cc/min, 15 min



#2 Metallization and Metal mask

หมายเหตุ การทดลองครั้งนี้ เราใช้มาส์ค #1 และมาส์ค #2 ทดลอง

*ทำการเปลี่ยนเวลาที่ 20min และ30min

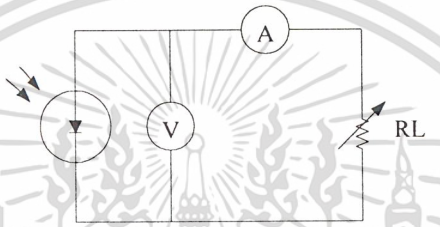
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การวัดและการทดลอง

6.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของการDrive In ที่ต่างกัน

1. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ตามขบวนการสร้างในบทที่ 5 โดยใช้แผ่น Solar Grade Silicon

2. ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบการ **Drive In ที่ ต่างกัน** ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส



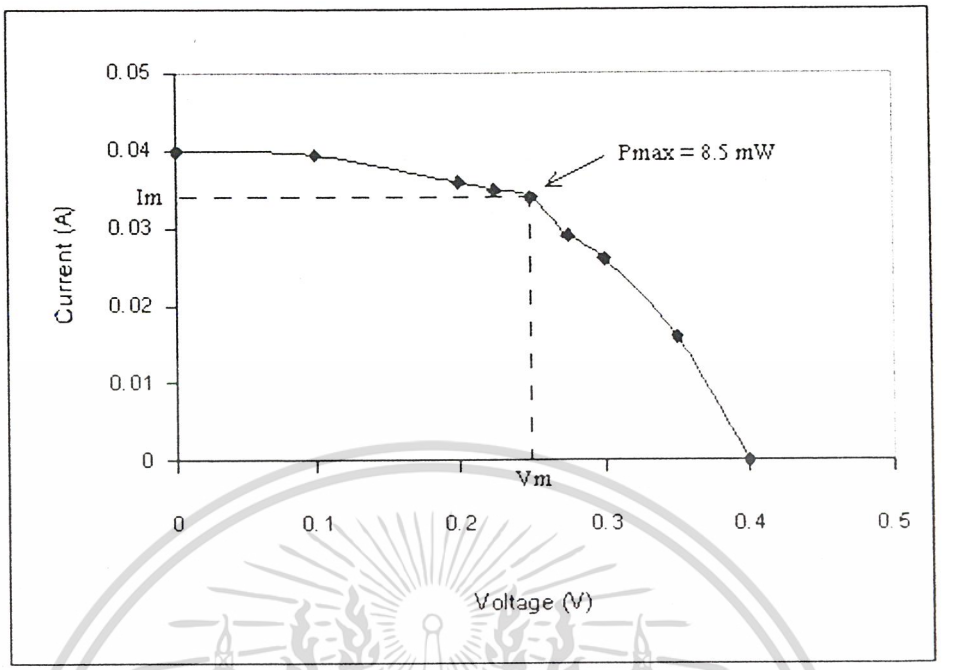
รูปที่ 6.1.1 วงจรที่ใช้ทดลองวัดเปรียบเทียบ Drive In ที่ ต่างกัน

Drive In ที่ 50 นาที , ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6.1.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 50 นาที

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.35	0.43
กระแส (mA)	40	39.5	36	35	34	29	26	16	0
ความต้านทาน (Ω)	0	2.53	5.6	6.43	7.35	9.48	11.5	21.9	∝

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



J_{SC} = 19.76 mA/cm^2

I_{SC} = 40 mA.

V_{OC} = 0.43 V.

Pm = 8.5 mW

F.F. = 0.54

η = 4.95%

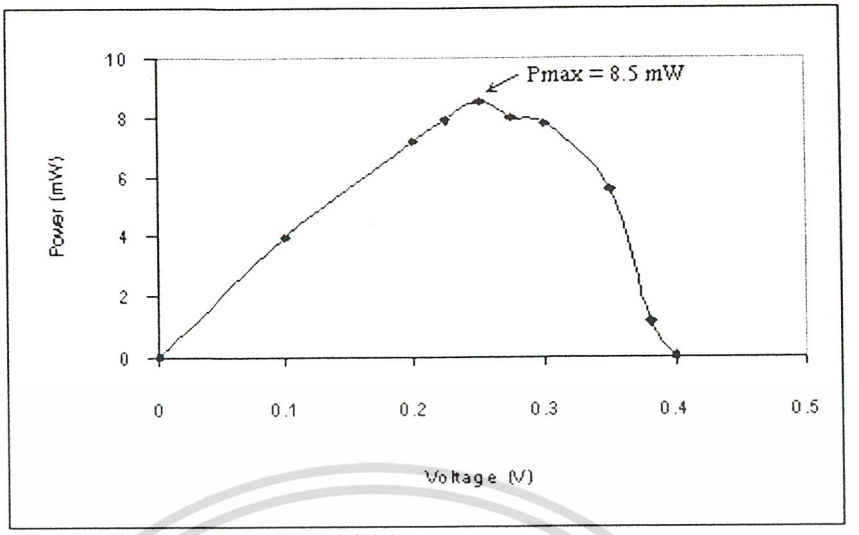
พื้นที่รับแสงของเซลฯ = 2.0238 cm^2

รูปที่ 6.1.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 50 นาที

ตารางที่ 6.1.2 แสดงกำลังงานและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 50 นาที

Power (mW)	0	3.95	7.2	7.875	8.5	7.98	7.8	5.6	1.17	0
Voltage (V)	0	0.1	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.35	0.38	0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1.3 แสดงกราฟกำลังงานและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 50 นาที

Drive In ที่ 60 นาที , ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6.1.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 60 นาที

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.35	0.4
กระแส (mA)	40	40	36	34	32	29	25	12	0
ความต้านทาน (Ω)	0	2.5	5.55	6.62	7.81	9.48	12	30	∝

J_{SC} = 19.76 mA/cm^2

I_{SC} = 40 mA.

V_{OC} = 0.4 V.

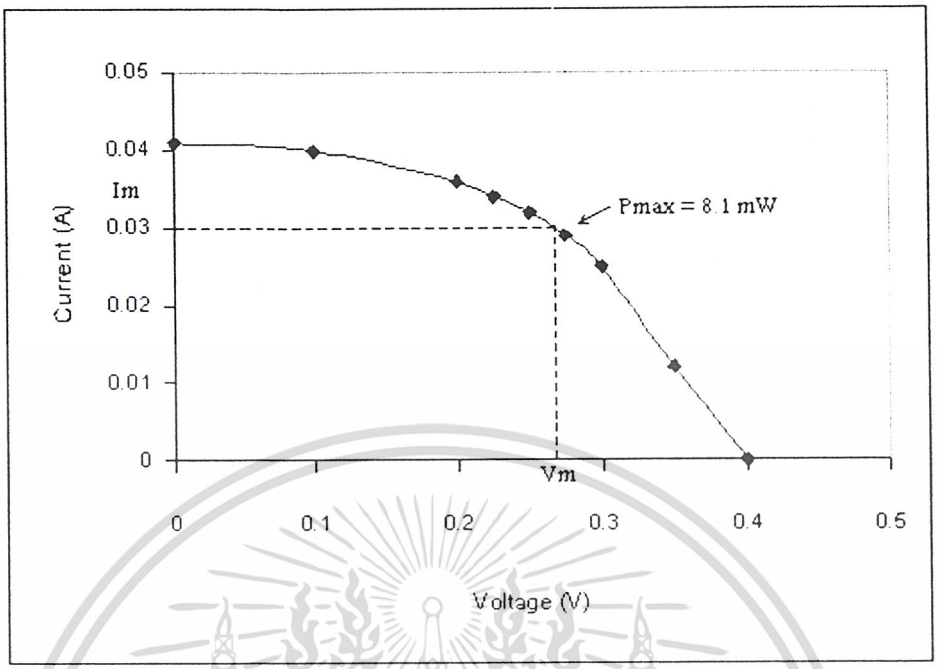
Pm = 8.1 mW

F.F. = 0.506

η = 4.7%

พื้นที่รับแสงของเซลฯ = 2.0238 cm^2

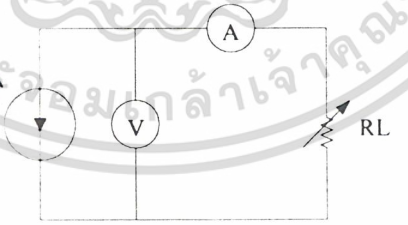
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1.4 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ Drive In ที่ 60 นาที

6.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของอุณหภูมิที่ต่างกัน

1. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ตามขบวนการสร้างในบทที่ 5 โดยใช้แผ่น Solar Grade Silicon
2. ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบที่**อุณหภูมิ ต่างกัน**



รูปที่6.2.1 วงจรที่ใช้ทดลองวัดเปรียบเทียบที่ อุณหภูมิ ต่างกัน

Drive In ที่ 50 นาที , **ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส**

J_{SC} = 19.76 mA/cm^2

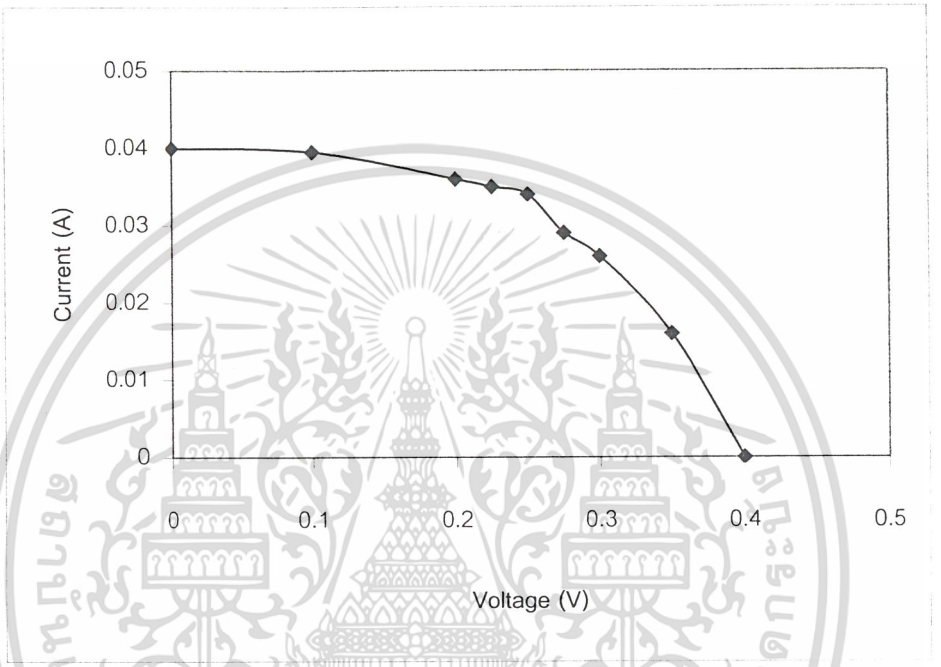
I_{SC} = 40 mA.

V_{OC} = 0.43 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.35	0.4
กระแส (mA)	40	39.5	36	35	34	29	26	16	0
ความต้านทาน (Ω)	0	2.53	5.6	6.43	7.35	9.48	11.5	21.9	∝



รูปที่ 6.2.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

Drive In ที่ 50 นาที , **ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส**

J_{SC} = 17.93 mA/cm^2

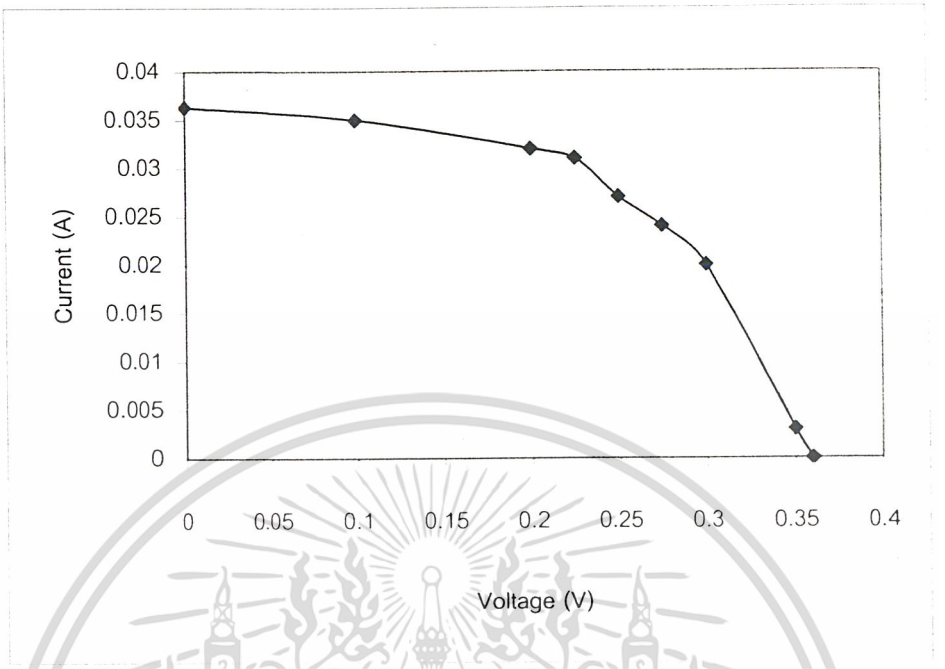
I_{SC} = 36.3 mA.

V_{OC} = 0.4 V.

ตารางที่ 6.2.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.35	0.4
กระแส (mA)	36.3	35	32	31	27	24	20	3	0
ความต้านทาน (Ω)	0	2.68	6.25	7.25	9.26	11.54	15	117	∝

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



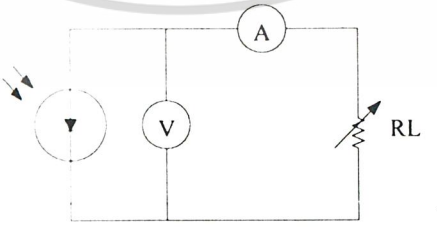
รูปที่ 6.2.3 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส

6.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของความเข้มแสงที่ต่างกัน

1. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ตามขบวนการสร้างในบทที่ 5 โดยใช้แผ่น Solar Grade Silicon

2. ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบที่**ความเข้มแสงต่างกัน**

โดยใช้ Solar Cells ที่ Drive In 50 นาที , ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในการทดลอง



รูปที่6.3.1 วงจรที่ใช้ทดลองวัดเปรียบเทียบที่ ความเข้มแสงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเข้มแสง 30,000 LUX

Voc = 0.33 V.

Isc = 11.6 mA.

ตารางที่ 6.3.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ **300*100M LUX**

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.33
กระแส (mA)	11.6	9.5	7.3	16	0

ที่ความเข้มแสง 60,000 LUX

Voc = 0.36 V.

Isc = 22.6 mA.

ตารางที่ 6.3.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ **600*100M LUX**

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.32	0.36
กระแส (mA)	22.6	18	14	8	4	0

ที่ความเข้มแสง 90,000 LUX

Voc = 0.381 V.

Isc = 32 mA.

ตารางที่ 6.3.3 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ **900*100M LUX**

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.32	0.35	0.381
กระแส (mA)	32	23	18	14	1	0.5	0

ที่ความเข้มแสง 120,000 LUX

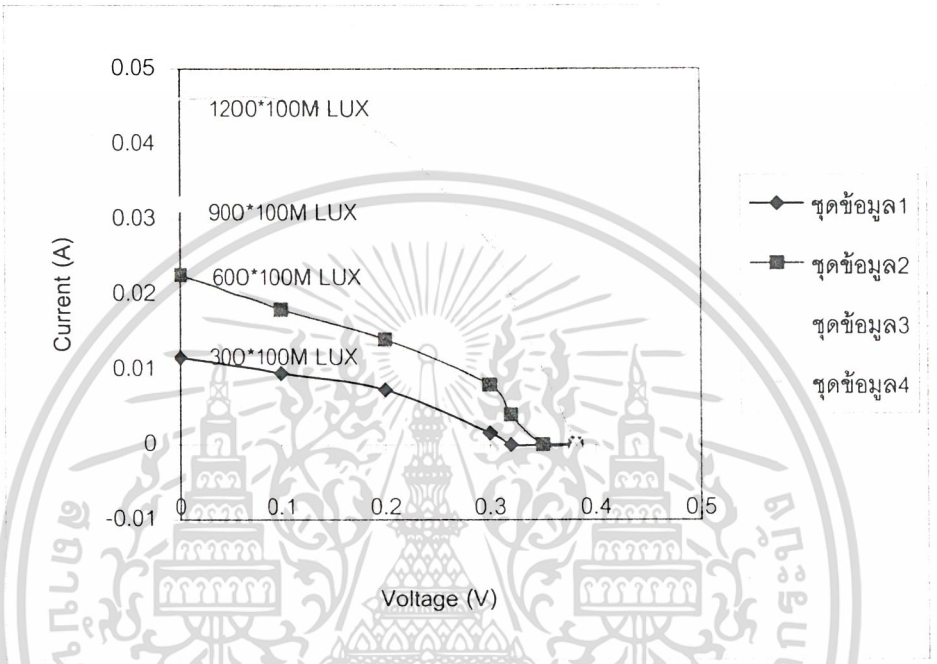
Voc = 0.379 V.

Isc = 46 mA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3.4 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ **1200*100M LUX**

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.32	0.35	0.381
กระแส (mA)	46	46	41	27	2	1	0



รูปที่ 6.3.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงต่างกัน

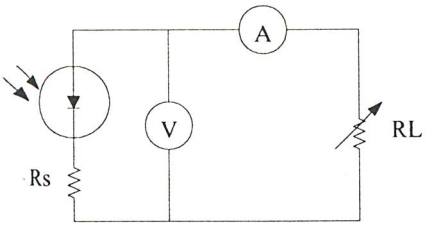
<u>หมายเหตุ</u> ความเข้มแสง 125,000 Lux = 100 mW/cm^2

6.4 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์และผลของความต้านทานอนุกรมที่ต่างกัน

1.สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ตามขบวนการสร้างในบทที่ 5 โดยใช้แผ่น Solar Grade Silicon

2.ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบที่**ค่าความต้านทานอนุกรม (Rs) ที่ต่างกัน**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4.1 วงจรทดลองวัดผลของความต้านทานอนุกรมภายใน

ตารางที่ 6.4.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม

Rs = 0.4 Ohm.

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
กระแส (mA)	36	34	32	21	0

ตารางที่ 6.4.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม

Rs = 0.8 Ohm.

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
กระแส (mA)	34	34	30	19	0

ตารางที่ 6.4.3 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม

Rs = 2 Ohm.

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
กระแส (mA)	35	33	30	15	0

ตารางที่ 6.4.4 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม

Rs = 20 Ohm.

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
กระแส (mA)	10	9.5	6.5	3	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4.5 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม

Rs = 50 Ohm.

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
กระแส (mA)	5	4.7	3	1.2	0

ตารางที่ 6.4.6 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม

Rs = 100 Ohm.

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
กระแส (mA)	2.7	2.5	1.5	0.8	0

ตารางที่ 6.4.7 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม

Rs = 200 Ohm.

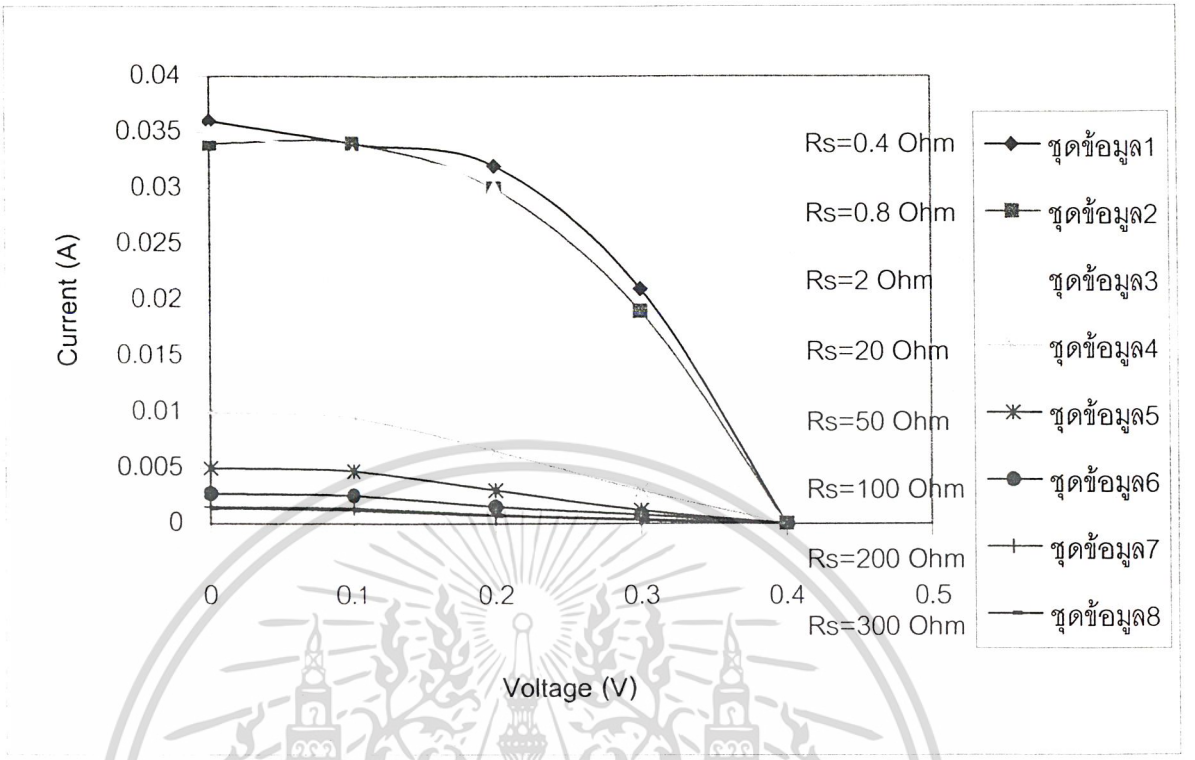
แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
กระแส (mA)	1.5	1.4	0.8	0.4	0

ตารางที่ 6.4.8 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม

Rs = 300 Ohm.

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
กระแส (mA)	1.4	1.2	0.7	0.3	0

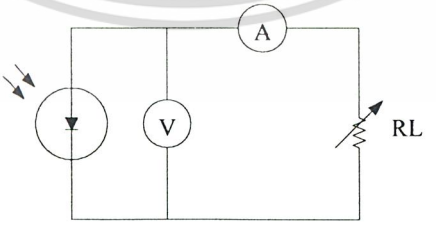
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ค่าความต้านทานอนุกรม (Rs) ที่ต่างกัน

6.5 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์ที่สร้างได้และผลของ Premium Grade Silicon

1. ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

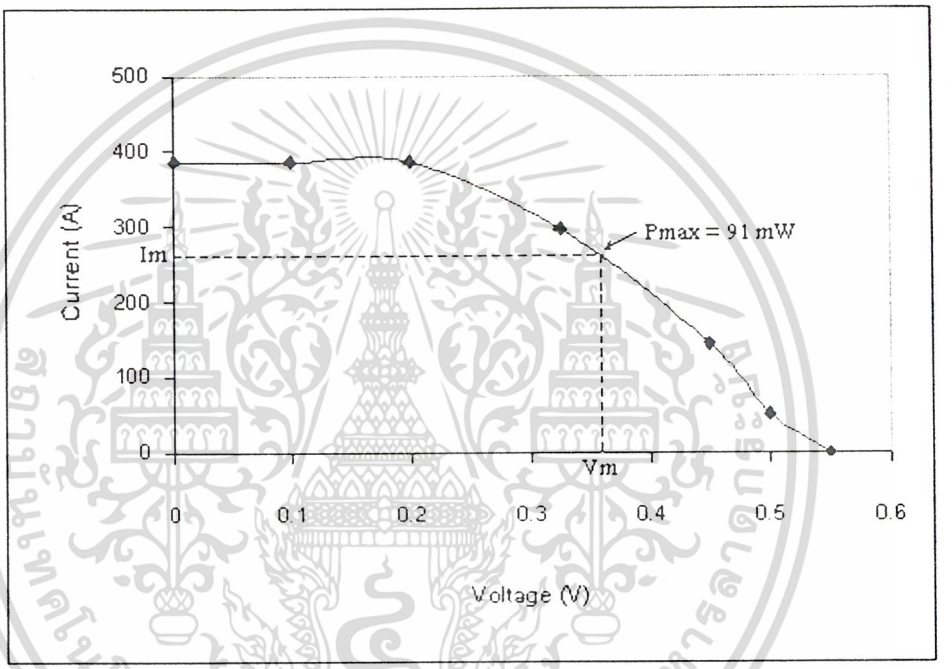


รูปที่ 6.5.1 วงจรที่ใช้ทดลองวัดเซลล์ของ Premium Grade Silicon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ Premium Grade Silicon

แรงดัน (V)	0	0.1	0.2	0.325	0.45	0.5	0.55
กระแส (mA)	386	386	386	297	144.3	50.9	0.06
ความต้านทาน (Ω)	0	0.2	0.5	1	3	10	∝



J_{SC} = 30.88 mA/cm^2

I_{SC} = 386 mA.

V_{OC} = 0.55 V.

Pm = 91 mW

F.F. = 0.429

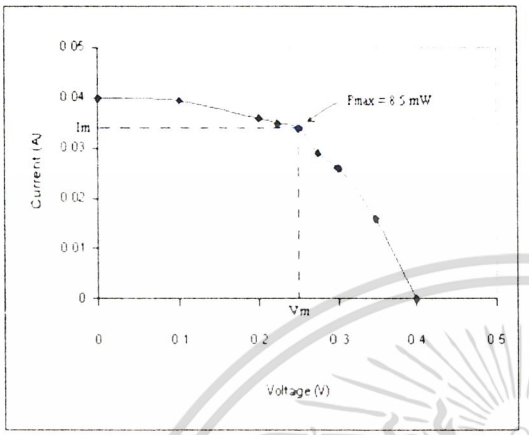
η = 8.56 %

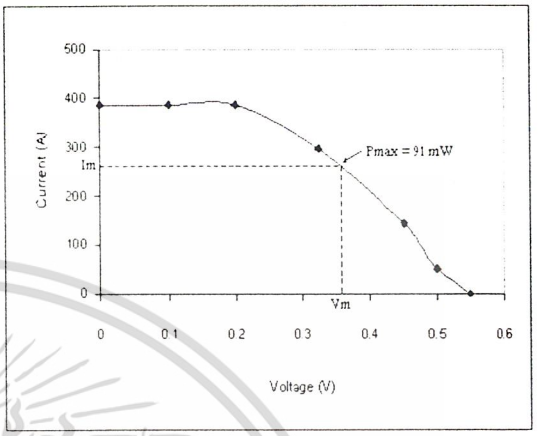
พื้นที่รับแสงของเซลฯ = 12.5 cm^2

รูปที่ 6.5.2แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ Premium Grade Silicon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ Solar Grade Siliconกับ เซลล์แสงอาทิตย์ Premium Grade Silicon





J_{SC} = 19.76 mA/cm^2

I_{SC} = 40 mA.

V_{OC} = 0.43 V.

Pm = 8.5 mW

F.F. = 0.54

η = 4.95%

พื้นที่รับแสงของเซลฯ = 2.0238 cm^2

J_{SC} = 30.88 mA/cm^2

I_{SC} = 386 mA.

V_{OC} = 0.55 V.

Pm = 91 mW

F.F. = 0.429

η = 8.56 %

พื้นที่รับแสงของเซลฯ = 12.5 cm^2

รูปที่ 6.5.3 แสดงการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ Solar Grade Siliconกับเซลล์แสงอาทิตย์ Premium Grade Silicon

6.6 การตรวจสอบคุณสมบัติของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Siliconได้และผลของการ Drive In ที่ต่างกัน

1.ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอด โดยเปรียบเทียบที่ การ **Drive In ที่ ต่าง กัน**

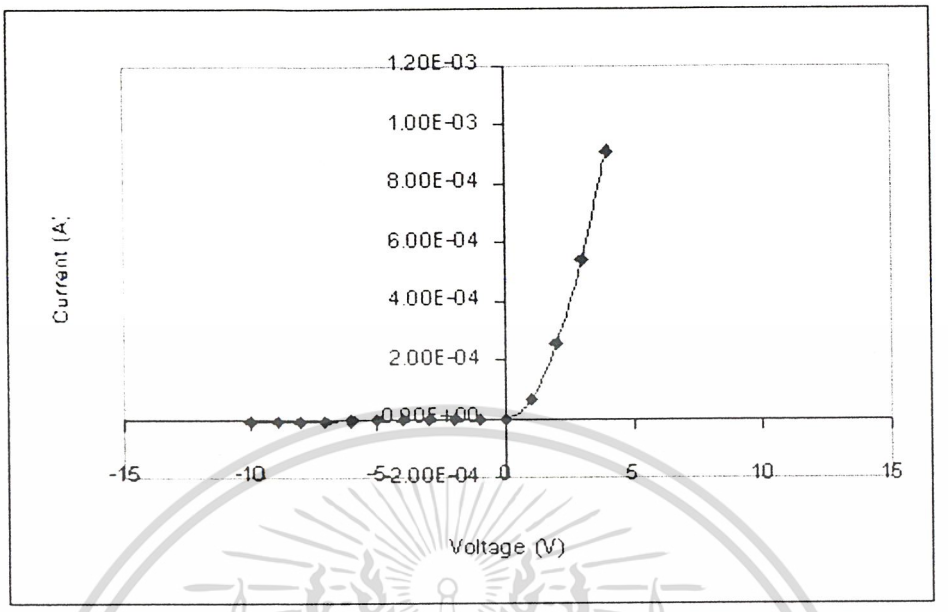
(Drive In ที่ 40 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

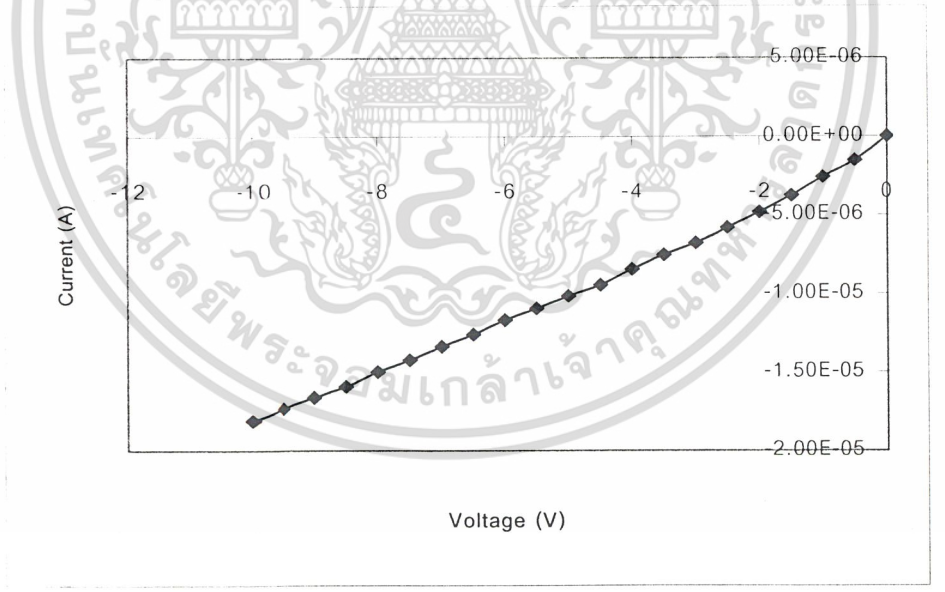
ตารางที่ 6.6.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon

แรงดัน (V)	กระแส (A)
-10	-8.81E-06
-9	-7.65E-06
-8	-6.68E-06
-7	-5.96E-06
-6	-5.15E-06
-5	-4.26E-06
-4	-3.42E-06
-3	-2.57E-06
-2	-1.79E-06
-1	-1.00E-06
0	4.59E-09
1	6.59E-05
2	0.000255
3	0.000541
4	0.000911
5	0.000994
6	0.000994
7	0.000994
8	0.000994
9	0.000994
10	0.000994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

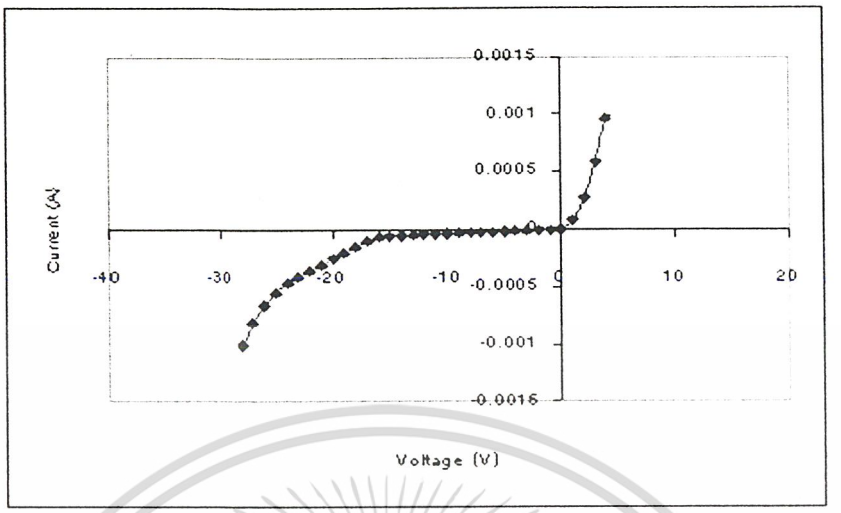


รูปที่ 6.6.1 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon ขณะไบอัสตรง



รูปที่ 6.6.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon กรณี Leak Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6.3 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon กรณี Break Down Voltage

2. ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอด โดยเปรียบเทียบที่ การ **Drive In ที่ ต่าง กัน**

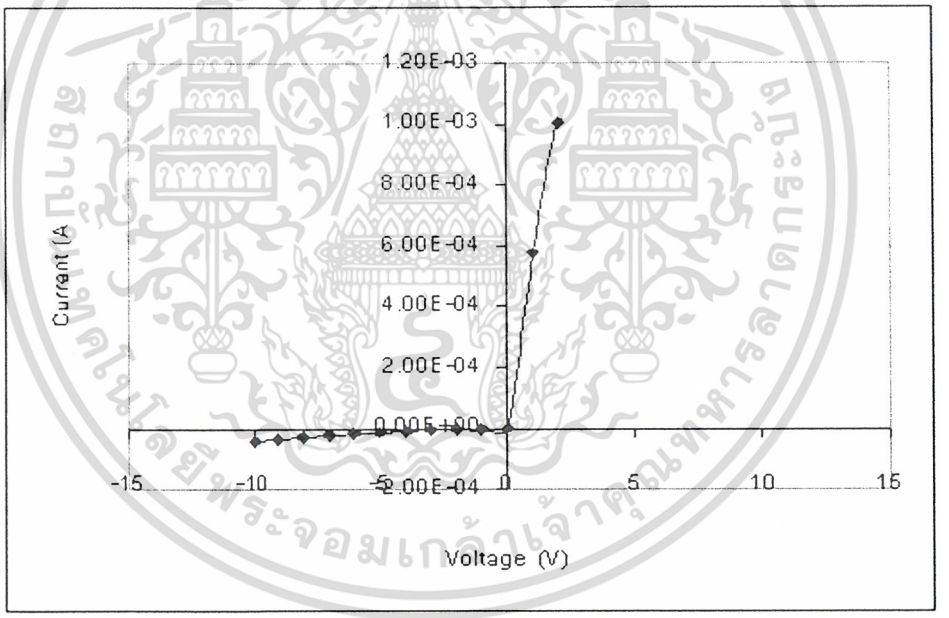
(Drive In ที่ 65 นาที)

ตารางที่ 6.5.2 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon

แรงดัน (V)	กระแส (A)
-10	-4.18E-05
-9	-3.48E-05
-8	-2.84E-05
-7	-2.32E-05
-6	-1.76E-05
-5	-1.29E-05
-4	-8.87E-06
-3	-5.53E-06
-2	-2.96E-06
-1	-1.66E-06
0	-1.14E-07

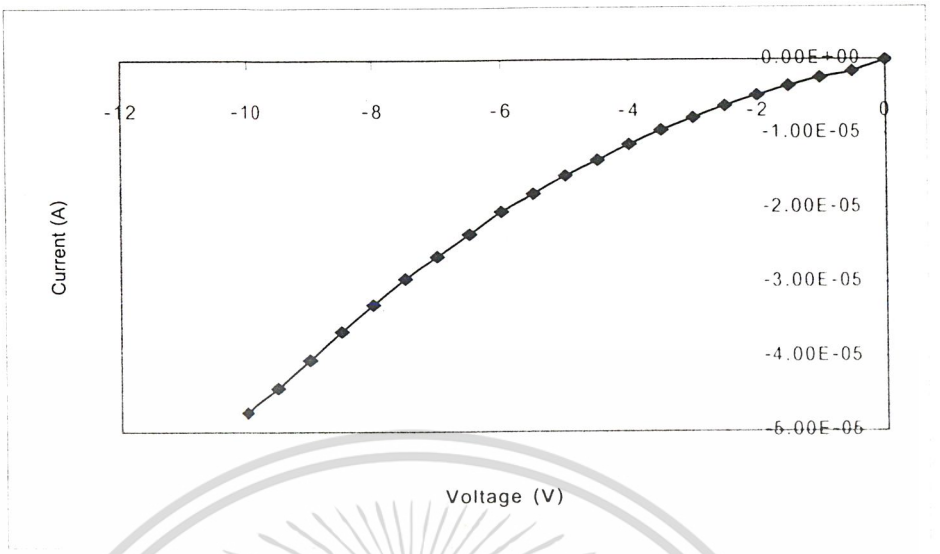
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน (V)	กระแส (A)
1	0.000577
2	0.001004
3	0.001004
4	0.001004
5	0.001004
6	0.001004
7	0.001004
8	0.001004
9	0.001004
10	0.001004

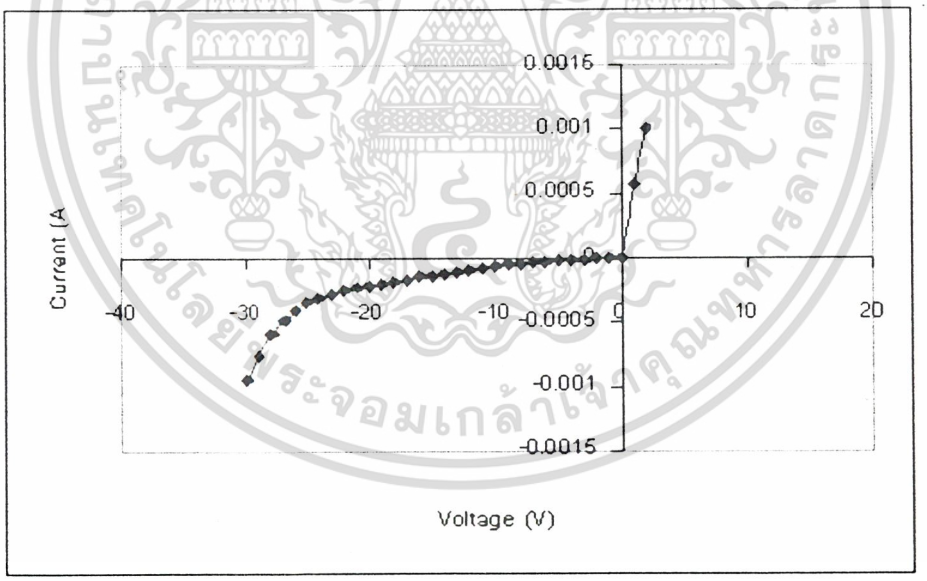


รูปที่ 6.6.4 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon ขณะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6.5 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon กรณี Leak Current



รูปที่ 6.6.6 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Solar Grade Silicon กรณี Break Down Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

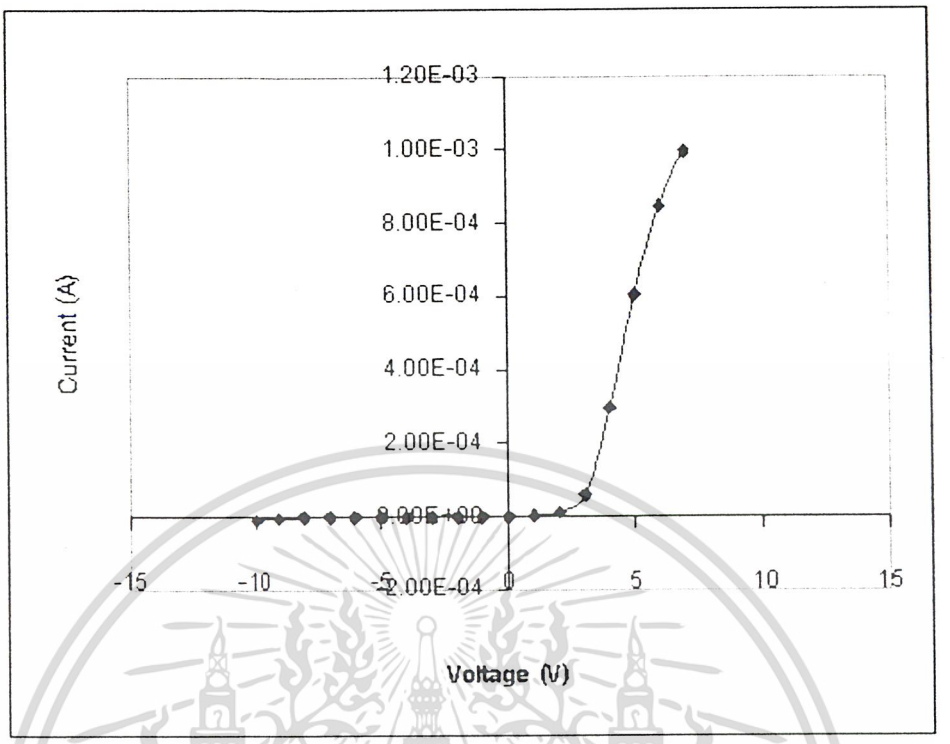
6.7 การตรวจสอบคุณสมบัติของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade Silicon

1.ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอด โดย (**Drive In ที่ 50 นาที**)

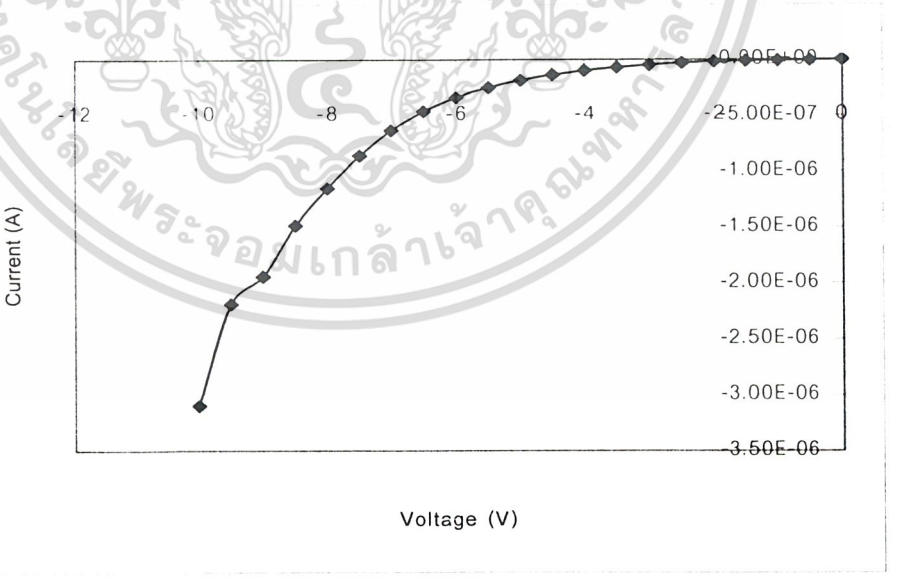
ตารางที่ 6.7.1 แสดงค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade Silicon

แรงดัน (V)	กระแส (A)
-10	-9.41E-06
-9	-4.25E-06
-8	-1.85E-06
-7	-1.05E-06
-6	-5.24E-07
-5	-2.79E-07
-4	-1.52E-07
-3	-7.67E-08
-2	-3.45E-08
-1	-1.67E-08
0	-1.33E-10
1	3.27E-06
2	1.18E-05
3	5.90E-05
4	0.000295
5	0.000602
6	0.000846
7	0.000995
8	0.000995
9	0.000995
10	0.000995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

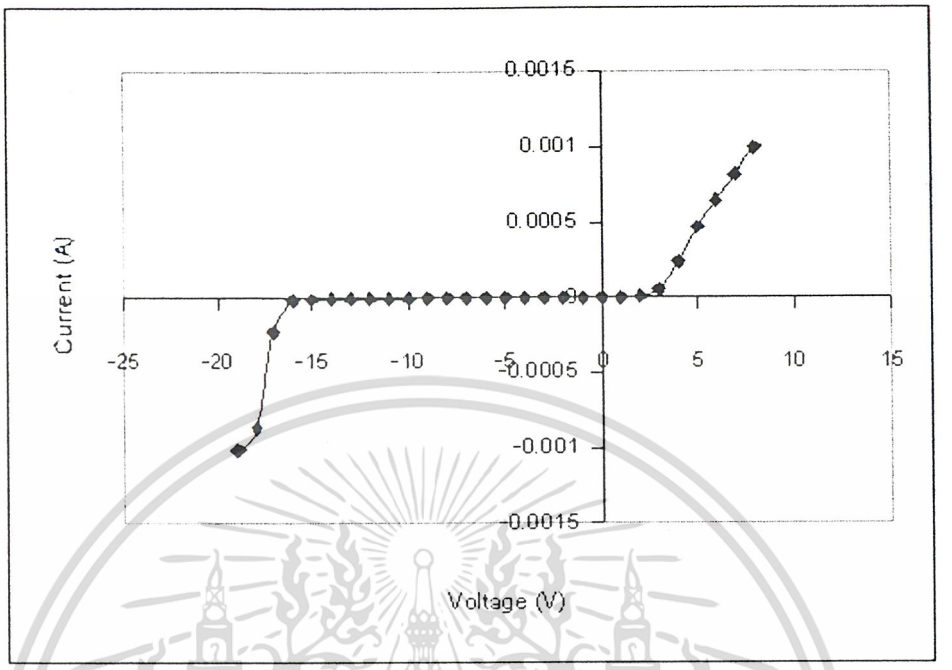


รูปที่ 6.7.1 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade Silicon ขณะไบอัสตรง



รูปที่ 6.7.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade Silicon กรณี Leak Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7.3 แสดงกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างจาก Premium Grade Silicon กรณี Break Down Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปและวิจารณ์

ในปัจจุบันนี้สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ จึงนำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถใช้งานได้อย่างง่ายสะดวกต่อการใช้งาน และจะต้องมีประสิทธิภาพในการทำงานดี และมีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม ดังนั้นการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาเพื่อทำการศึกษา และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ำและเป็นปัจจัยในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วย แต่การศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ จะเน้นที่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ (Low Cost) เป็นหลักซึ่งเราจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบ (Solar Grade) ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งนี้ยังพิจารณาถึง ผลของความเข้มแสง อุณหภูมิและชั้นลดการสะท้อนของแสงที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อจะนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงและการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.1 เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้และผลของการ Drive In ที่ต่างกัน โดยเราจะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Solar Grade Silicon ขึ้นมาเพื่อทดสอบว่าการ Drive In ที่ต่างกันมีผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างไรบ้าง จากการทดลองเราจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ค่าการ Drive In ต่างกันคือ 50 นาที และ 60 นาที จากการทดลองจะเห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ Drive In 50 นาที จะมีกระแส Isc ที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ Drive In 60 นาที เพราะเกิดจากรอยต่อ พี-เอ็น ได้ถูกขับลึกลงไปมากขึ้นจึงทำให้พลังงานแสง (โฟตอน) เข้าไปกระตุ้นพาหะที่บริเวณรอยต่อได้น้อยลง ซึ่งความลึกของรอยต่อในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่า < 1um. เพื่อให้พลังงานโฟตอนของลำแสงสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อได้โดยสะดวก ซึ่งจะเป็นผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายพลังงานออกมาได้มากขึ้นนั้นเอง

จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.2 เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้และผลของอุณหภูมิ ที่ต่างกัน โดยเราจะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Solar Grade Silicon ขึ้นมาเพื่อทดสอบ และจัดสภาพแวดล้อมโดยกำหนดให้อุณหภูมิรอบๆที่ทำการทดลอง แตกต่างกันไป โดยอุณหภูมิที่ทำการทดลองแรกคือ 22 องศาเซลเซียส ในขณะเปิดเครื่องปรับอากาศในห้องและอุณหภูมิที่ทำการทดลองที่เปรียบเทียบคือ 34 องศาเซลเซียส ในขณะปิดเครื่องปรับอากาศในห้องนั้นเอง จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่อุณหภูมิที่ทำการทดลองแรกคือ 22 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตแรงดันและกระแสออกมาได้มากกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ 34 องศาเซลเซียส จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้กำลังงานที่เซลล์จ่ายออกมามีค่าต่ำลง ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎี คือ อุณหภูมิสูงขึ้นกระแสจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากกับอุณหภูมิ แต่แรงดันจะลดลงมากกับอุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้กำลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตออกมามีค่าลดลง ดังนั้นในการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานควรนำเซลล์ไปใช้งานในที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก หรือจะมีการระบายความร้อนให้กับเซลล์ด้วยก็จะช่วยให้เซลล์ทำงานได้ดีขึ้น

จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้และผลของความเข้มแสง ที่ต่างกัน โดยเราจะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Solar Grade Silicon ขึ้นมาเพื่อทดสอบเกี่ยวกับความเข้มแสงที่ต่างกันออกไป จากการทดลองเมื่อ ความเข้มแสงค่อยๆเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าค่ากระแสและค่าแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้น จากกราฟการทดลองความเข้มแสง เราจะกำหนดค่าความเข้มแสงคือ 30,000 , 60,000 , 90,000 , 120,000 LUX เป็นต้น ลักษณะความเข้มแสงที่ป้อนให้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายพลังงานออกมาได้เพิ่มขึ้นด้วย ความเข้มแสงมีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ จะพบว่ากระแสจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากกับความเข้มแสง ส่วนแรงดันจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากกับความเข้มแสงต่ำๆเท่านั้น และแรงดันจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากกับแสงที่มีจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากกับความเข้มแสงสูงๆ เนื่องจากความหนาแน่นของโฟตอนสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะ อิเล็กตรอน-โฮล เป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากกับความเข้มแสง

จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.4 เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้และผลของค่าความต้านทานอนุกรม ที่ต่างกัน จากการทดลองเราได้นำค่าความต้านทาน Rs มาต่อเพื่อศึกษาผลกระทบที่ที่มีต่อเซลล์ เช่น ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF.) และ ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) เมื่อเราทำการทดลองให้ค่าความต้านทานอนุกรม (Rs) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันและค่ากระแสของเซลล์ที่จ่ายออกมามีค่าลดต่ำลง ทำให้ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF.) และ ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency)ลดต่ำลงด้วย จะเห็นว่า (Rs) เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการสร้างและการใช้งานโดยค่า Rs เกิดขึ้นได้เนื่องจาก ค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ค่าความต้านทานของบริเวณ รอยสัมผัสโอห์มมิค (Ohmic Contact) ระหว่างโลหะกับส่วนพีกับส่วนเอ็น ค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ในอุดมคติ Rs ควรมีค่าเป็นศูนย์ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า Rs มีผลต่อการลดลงของพลังงานในขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรม (Rs) มีค่าเพิ่มขึ้นในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เราควรพิจารณาถึงผลดังกล่าวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.5 เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Solar Grade Silicon และ Premium Grade Silicon โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Solar Grade Silicon คือ Jsc=19.8 mA/cm^2,Jm=16.83 mA/cm^2,FF=0.5,η=4.95 % ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Premium Grade Silicon คือ Jsc=30.88 mA/cm^2,Jm=22.4 mA/cm^2,FF=0.4,η=8.56 %จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Premium Grade Silicon จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เพราะปราศจากอะตอมเจือปน และจุดเสีย (Defect) ที่เกิดกับเนื้อสาร เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Solar Grade Silicon ที่มีอะตอมที่แปลกปลอมมากและโครงสร้างผลึกมี defect ที่มากกว่าด้วย ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Solar Grade Silicon สามารถนำมาใช้งานได้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาที่ต่ำ และสามารถพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นได้และ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Solar Grade Silicon นั้นถ้าได้รับการพัฒนาที่ดีขึ้นแล้วก็จะสามารถเปิดตลาดเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Solar Grade Silicon ได้เป็นอย่างดีด้วย ซึ่งตรงกับนโยบายประหยัดพลังงานได้อีกด้วย

สรุปคุณสมบัติการนำ Solar Grade Silicon มาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้งานกันทั่วไปจะเห็นได้ว่า ราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเซลล์จะเห็นได้ว่ามีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปนั้นสร้างจาก Premium Grade Silicon ซึ่งเป็นแผ่น Wafer ที่มีราคาที่สูงอยู่ที่ราคาหลักพันบาทขึ้นนำไป เพราะแผ่น Wafer ที่เป็นแบบ Premium Grade Silicon นั้นจะมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งจะมีความเสียหายของผลึก (Defect) และอะตอมแปลกปลอมมีค่าน้อยมาก ซึ่ง Premium Grade Silicon นั้นมักจะใช้งานประเภทวงจรรวม (Integrated Circuit) เพราะอุปกรณ์เหล่านี้ต้องการความบริสุทธิ์ของผลึกที่นำมาสร้างสูง ดังนั้นเราใช้แผ่น Wafer ชนิด Premium Grade Silicon ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ก็ทำให้มีราคาที่สูงขึ้นด้วย

ดังนั้นเราจึงได้ค้นคว้าและพัฒนาโดยใช้ Solar Grade Silicon ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผลึกของ Solar Grade Silicon จะมีความเสียหายของผลึกและอะตอมแปลกปลอมที่สูงกว่า Premium Grade Silicon แต่เนื่องจากคุณสมบัติที่กล่าวมานั้นไม่มีผลกระทบต่อเซลล์มากนัก เนื่องจากกระบวนการสร้าง Solar Grade Silicon นั้นจะลดกระบวนการลงแล้วยังทำให้ประหยัดต้นทุนการผลิตอีกด้วย ซึ่งแผ่น Wafer ชนิด Solar Grade Silicon จะมีราคาหลักร้อยบาทเท่านั้นเอง เราจึงนำ Solar Grade Siliconนำมาสร้างและพัฒนาในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะเห็นได้ว่า ค่าฟิลแฟคเตอร์ ค่าประสิทธิภาพ ที่น้อยกว่า Premium Grade Silicon แต่ความแตกต่างนั้นไม่มากนัก ทำให้เราสามารถ นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้าง Solar Grade Silicon มาใช้งานได้จริง เนื่องจากเซลล์สามารถจ่ายพลังงานออกมาได้มากเนื่องจากการมีกระแสรั่วที่สูงนั้นเอง และถ้าเราได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำชั้นผิวหน้าป้องกันการสะท้อน และการเพิ่มสนามไฟฟ้าในการขับประจุพาหะ ก็จะทำให้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้าง Solar Grade Silicon เป็นทางเลือกหนึ่งในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อประหยัดต้นทุนการผลิต ซึ่งประสิทธิภาพและความสามารถในการจ่ายพลังงานออกมาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Premium Grade Silicon อีกด้วย

บทสรุปแผนการดำเนินงาน

ในการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของซิลิคอน ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนที่ต่ำ โดยใช้ Solar Grade Silicon ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

แผนการดำเนินงานที่ดำเนินการแล้วในภาคเรียนที่ผ่านมา

ศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้านต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาหาความรู้ เพื่อนำไปใช้ในการดำเนินการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

1.) ศึกษาวัสดุที่จะนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ Solar Grade Silicon รวมทั้งกระบวนการสร้างและอะตอมต่างๆที่ปะปนใน Solar Grade Silicon ตลอดจนผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ Solar Grade Silicon ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

2.) การออกแบบ Mask Pattern ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่แผ่น Wafer ที่มีขนาดต่างๆ

3.) ศึกษาการแพร่สารเจือโดยใช้แหล่งสารเจือแบบ Spin On ตลอดจนกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการดำเนินการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในภาคเรียนต่อไป

แผนการดำเนินงานที่ดำเนินการในภาคเรียนนี้

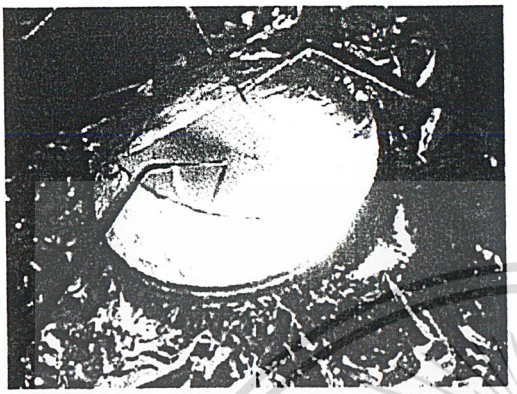
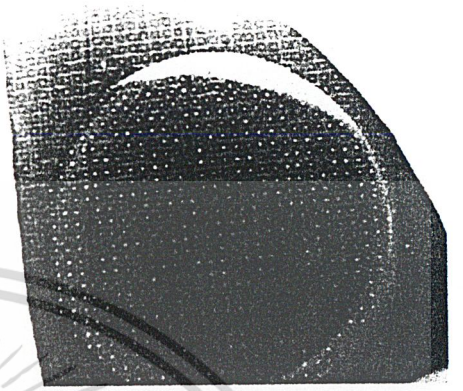
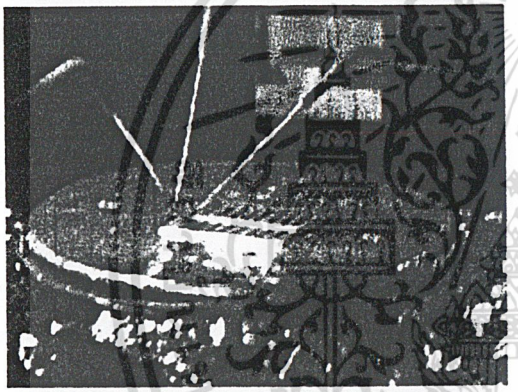
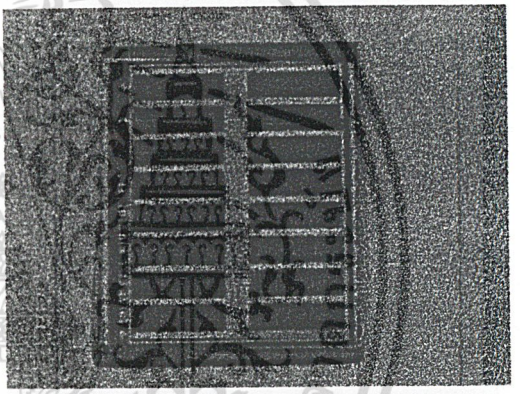
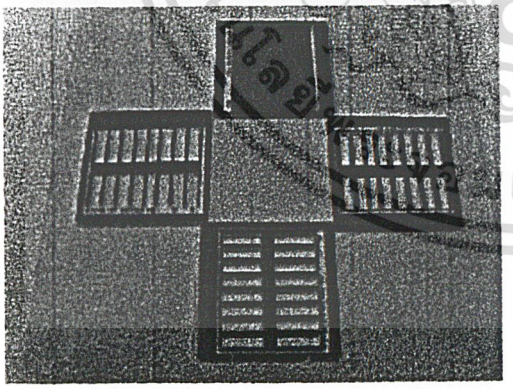
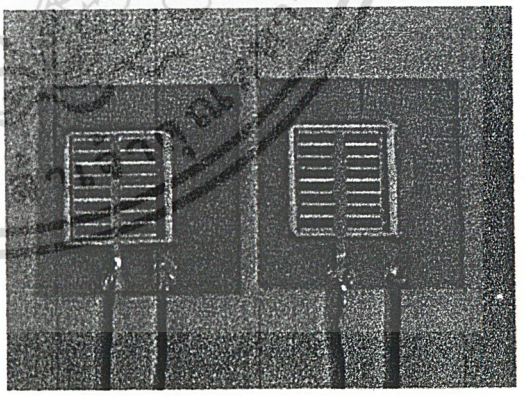
1.) ทำการทดสอบ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ P-N Junction Diode เพื่อใช้ทดสอบ กระแสและแรงดัน (I-V) ตลอดจนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีผลต่อการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะใช้ Monitor ในการทดสอบ

2.) ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาโดยใช้ Solar Grade Silicon และ Premium Grade Silicon เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆของของเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้ง 2 ชนิด

3.) เพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก Solar Grade Silicon ให้มีประสิทธิภาพ (High Efficiency) เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลภาพการดำเนินงานทั้งหมดในโครงงานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทผนวกที่ 1

ตาราง 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 nuetron)	m_n	1.675×10^{-27} kg.
ประจุอิเล็กตรอน(electron charge)	q	1.602×10^{-19} C
อัตราส่วนระหว่างประจุ กับมวลนิ่งของอิเล็กตรอน	q/m_e	1.76×10^{11} C/kg
ค่าคงที่ของแพลงก์ (Planck's constant)	h $\hbar = h/2\pi$	6.626×10^{-34} J-sec 4.136×10^{-15} eV-sec 1.055×10^{-34} j-sec
ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์(Boltzmann 's constant)	k	1.381×10^{-23} j/K 8.617×10^{-5} eV/K
เลขอะโวกาโด(Avogadro's number)	N_0	6.023×10^{26} (k mol)$^{-1}$
ความเร็วแสงในสุญญากาศ(speed of light in space)	c	2.998×10^{8} m/sec
ค่าคงที่ของแรงคูลอมบ์(Coulomb force constant)	$1/4\pi\varepsilon_0$	8.988×10^{9} N m^2/c^2
อัตราส่วนมวลโปรตอนและอิเล็กตรอน	m_p/m_e	1836
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริคของสุญญากาศ(Permittivity 0f free space)	ε_0	8.854×10^{-12} c^2/N m^2 (F/m)
ค่าเปอร์มิอะบิลิตี้ในสุญญากาศ(permeability 0f free space)	μ_0	1.257×10^{-6} T.m/A(H/m)
ค่ารัศมีของบอห์ร(Bohr radius)	a_0	5.292×10^{-11} m.
ค่าคงที่ของริดเบอร์ก(Rydberg constant)	R	1.097×10^{7} m^{-1}
ค่าคงที่ของสเตฟาน(Stafan's constant)	σ	5.67×10^{-8} W/m^2
ค่าบอห์รแมกนีตอน(Bohr magneton)	μ_B	9.273×10^{-24} J/T
ค่าอิเล็กตรอนโวลต์(1 electron -volts)	eV	1.602×10^{-19} J
ค่าพลังงานจูล (1 Joule)	J	6.242×10^{18}eV.
ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)	K	$^{\circ}$C +273.15 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทผนวกที่ 2

ตารางคุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300K)

คุณสมบัติ	ซิลิคอน	เยอรมันเนียม	แกลเลียมอาร์เซไนด์	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				cm^{-3}
ที่แถบนำไฟฟ้า (N_c)	3.22×10^{19}	1.03×10^{19}	4.21×10^{17}	
ที่แถบวาเล็นซ์(N_v)	1.83×10^{19}	5.35×10^{18}	9.52×10^{18}	
ความหนาแน่นพาหะ	1×10^{10}	2.17×10^{13}	2.49×10^{6}	cm^{-3}
อินทรินซิค (n_i)				
สภาพคล่องที่ low doping				$cm^2/v\text{-}s$
μ_n (electron)	1350	3900	8800	
μ_p (hole)	480	1900	400	
สนามไฟฟ้าพังทะลาย	3×10^5	10^5	4×10^5	V/cm
Breakdown field				
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (K)	11.8	15.8	13.1	
จุดหลอมละลาย	1,410	940	1,240	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 3

ตาราง แสดงสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน

ความหนา (อาร์มสตรอง)	สี
500	สีเขียวเหลือง
700	สีน้ำตาล
1000	สีม่วงเข้มถึงสีแดงม่วง
1200	สีฟ้า
1500	สีน้ำเงินอ่อนถึงสีเทาน้ำเงิน
1700	สีน้ำเงินถึงสีเหลือง
2000	สีทองถึงสีเหลือง
2200	สีทองค่อนข้างเหลืองแกมส้ม
2500	สีส้มถึงสีเขียวอ่อน
2700	สีแดงม่วง
3000	สีน้ำเงินถึงสีม่วงน้ำเงิน
3100	สีน้ำเงิน
3200	สีน้ำเงินถึงสีน้ำเงินเขียว
3400	สีเขียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนา (อาร์มสตรอง)	สี
3500	สีเขียวถึงสีเขียวเหลือง
3600	สีเหลืองเขียว
3700	สีเขียวเหลือง
3900	สีเหลือง
4100	สีส้มอ่อน
4200	สีชมพูอ่อน
4400	สีม่วงแดง
4600	สีแดงม่วง
4700	สีม่วง
4800	สีน้ำเงินม่วง
4900	สีน้ำเงิน
5000	สีน้ำเงินเขียว
5200	สีเขียว
5400	สีเหลืองเขียว
5600	สีเขียวเหลือง
5700	สีเหลืองถึงสีเทาอ่อน
5800	สีส้มหรือสีเหลืองถึงสีชมพู
6000	สีชมพู
6300	สีม่วงแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนา (อาร์มสตรอง)	สี
6800	สีเขียวถึงสีเขียวเหลือง
7200	สีเหลืองเขียว
7700	สีเขียวเหลือง
8000	สีเหลือง
8200	สีส้มอ่อน
8500	สีชมพูอ่อน
8600	สีม่วงแดง
8700	สีแดงม่วง
8900	สีม่วง
9200	สีน้ำเงินม่วง
9500	สีน้ำเงิน
9700	สีน้ำเงินเขียว
9900	สีเขียว
1.00 µm	สีเหลืองเขียว
1.02 µm	สีเขียวเหลือง
1.05 µm	สีเหลืองถึงสีเทาอ่อน
1.06 µm	สีส้มหรือสีเหลืองถึงสีชมพู
1.07 µm	สีชมพู
1.10 µm	สีม่วงแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทผนวกที่ 4

วัสดุและเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

Boron (B) : โบรอน

เป็นธาตุกลุ่มที่ 3 ของตารางพิริออดิคของธาตุ ใช้เป็นอะตอมสารเจือในการแพร่เพื่อสร้างส่วนเดรนและส่วนซอสในเอ็นฮานซ์เทนท์มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนล

Isopropyl alcohol : ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

เป็นสารละลายชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้สำหรับล้างทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้ายก่อนทำให้แห้ง

Methylalcohol : เมทิลแอลกอฮอล์

เป็นสารละลาย ซึ่งใช้สำหรับล้างแผ่นผลึกในครั้งสุดท้าย เพื่อขจัดสารอื่นๆก่อนทำให้แห้ง

Nitric acid (NHO_3) : กรดดินประสิว

เป็นกรดแก่ ซึ่งใช้สำหรับทำสะอาดผิวหน้าของผลึก เพื่อกำจัดเศษโลหะต่างๆที่อาจมีได้

Nitrogen (N_2) : ไนโตรเจน

เป็นก๊าซเฉื่อยที่ใช้สำหรับทำหน้าที่ ในการแพร่สารเจือลงไปในแผ่นซิลิกอน หรือใช้สำหรับเป่าแผ่นผลึกให้แห้งภายหลังการล้าง

Oxygen (O_2) : ออกซิเจน

เป็นก๊าซที่ใช้สำหรับกระบวนการออกซิเดชั่นเพื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phosphorus (P) : ฟอสฟอรัส

เป็นธาตุในกลุ่มที่ 5 ใช้เป็นอะตอมสารเจือชนิดเอ็นในการแพร่เพื่อสร้างส่วนเดรนและส่วนซอสในพีมอสทรานซิสเตอร์ทั่วๆไป

Silicon dioxide (SiO_2) : ซิลิกอนไดออกไซด์

ใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่สารเจือ และเป็นชั้นป้องกันผิวหน้าของแผ่นผลึกที่สมบูรณ์แล้วเตรียมได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชั่น

Sulfulric acid (H_2SO_4) : กรดกำมะถัน

เป็นกรดแก่ใช้ในการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนและสารละลายสารไวแสงในแผ่นผลึกภายหลังกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่

Trichloroethylene : ไตรคลอโรเอทีลีน

เป็นสารละลายซึ่งใช้สำหรับล้างไขมันและสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวแผ่นซิลิกอน หรือภาชนะอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

Xylean : ไซลีน

เป็นสารละลายที่ใช้ในกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ เพื่อละลายน้ำยาไวแสงที่ไม่ถูกฉายแสงออกจากแผ่นผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช , "สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 228 หน้า ,2528
2. เทคโนโลยีการสร้าง และการใช้งาน เซลล์แสงอาทิตย์ , " ศูนย์วิจัยอิเล็กตรอนิกส์"
3. MARTIN A.GREEN, "Solar Cell Operating Principles,Technology And System Application"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้