

เซลล์แสงอาทิตย์

SOLAR CELL



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....50352.....

วัน,เดือน,ปี 13 พ.ค. 2547

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

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ประกอบการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์

SOLAR CELL



โดย
นายปิยะ แซ่เจ็ย รหัส 41014274
นายพงษ์พจน์ วงศ์มลาไสย รหัส 42010213
นายวศิน รอดมณี รหัส 42010316

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.สมศักดิ์ เขียวศิริกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2545 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เซลล์แสงอาทิตย์

SOLAR CELL

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------|------------|------------------|
| 1. นายปิยะ | แซ่เจีย | รหัสนี้ 41014274 |
| 2. นายพงษ์พจน์ | วงศ์กมลไสย | รหัสนี้ 42010213 |
| 3. นายวศิน | รอดมณี | รหัสนี้ 42010316 |

ลงชื่อ..........อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ประวัติเซลล์แสงอาทิตย์และพลังงานแสงอาทิตย์	5
2.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.2 พลังงานที่ได้รับจากดวงอาทิตย์	6
2.3 ผลตอบสนองทางความถี่	7
บทที่ 3 ทฤษฎี รอยต่อ พี-เอ็น	8
3.1 ทฤษฎี รอยต่อ พี-เอ็น	8
3.2 กระแสรั่วไหลที่รอยต่อ พี-เอ็น	13
บทที่ 4 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบรอยต่อ พี-เอ็น	15
4.1 เซลล์แสงอาทิตย์	15
4.2 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก	17
4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบ รอยต่อ พี-เอ็น	17
4.4 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบ รอยต่อ พี-เอ็น	21
4.5 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์	24
4.6 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	26
4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	27
4.8 ความถี่ของรอยต่อ p - n	30
4.9 ความหนาแน่นของการโคปแผ่นฐาน	32
4.10 การสร้างสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ (Back Surface Field)	34
4.11 การกัดแบบแอนไอโซโทรปิกในสารละลาย KOH	35
4.12 โครงสร้างอะตอมซิลิกอน	35
บทที่ 5 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผิวแบบพีระมิดและผลการทดลอง	39
5.1 ขั้นตอนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
5.2 ขั้นตอนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น (มี Back Surface Field : BSF)	46
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	50
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	55
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ศัพท์เทคนิค	58
ภาคผนวก ข สัญลักษณ์	60
ภาคผนวก ค รูปขนาดความกว้างของปากหลุม	61
ภาคผนวก ง อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	63
ภาคผนวก จ รูปเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทดลองสร้างขึ้น	66
กิตติกรรมประกาศ	67
บรรณานุกรม	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ผลตอบสนองทางความถี่แสงของเซลล์แสงอาทิตย์	7
รูปที่ 3.1	แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อพี-เอ็น	9
รูปที่ 3.2	แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน	
รูปที่ 3.3	แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งให้ไบอัสตรง	10
รูปที่ 3.4	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	11
รูปที่ 3.5	แสดงรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	
รูปที่ 3.6	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ V_A	12
รูปที่ 3.7	แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	13
รูปที่ 4.1	แสดงระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์	15
รูปที่ 4.2	แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้	16
รูปที่ 4.3 (ก)	แสดงลักษณะโครงสร้างอย่างง่าย ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์	18
(ข)	แสดงภาพตัดด้านข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง	
รูปที่ 4.4	แสดงการเกิดกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสง	20
รูปที่ 4.5	แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์อาทิตย์ ขณะที่เซลล์ได้รับแสง	20
รูปที่ 4.6	แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่ได้รับแสงและได้รับแสง	21
รูปที่ 4.7	แสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่สำคัญ	22
รูปที่ 4.8 (ก)	แสดงผลของความต้านทานอนุกรม	25
(ข)	แสดงผลของความต้านทานขนาน	
รูปที่ 4.9	แสดงการลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น	26
รูปที่ 4.10	แสดงผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	27
รูปที่ 4.11	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส, แรงดันและพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์	30
รูปที่ 4.12 (ก)	การเปลี่ยนแปลงของความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะ เมื่อเทียบกับความลึก	31
(ข)	การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตพาหะเมื่อเทียบกับความลึกของเซลล์แสงอาทิตย์	
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการโคปสารเจือปน	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และเวลาอายุของพาหะข้างน้อย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนความหนาแน่นของ N_A	34
(ก) ในกรณีไม่มีชั้น BSF (ข) เป็นกรณีมีชั้น BSF	
รูปที่ 4.15 พันธะในอะตอมซิลิกอนระนาบต่างๆ	
(ก) ระนาบ (100)	36
(ข) ระนาบ (110)	
(ค) ระนาบ (111)	
รูปที่ 4.16 การกักแบบแอนไอโซโทรอปิก	37
รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผิวแบบพีระมิด	38
รูปที่ 4.18 แสดงการกักแบบแอนไอโซโทรอปิกในซิลิกอนระนาบ(100)	
รูปที่ 6.1 การวัดคุณสมบัติของเซลล์ฯ ขณะได้รับแสงโดยใช้มิเตอร์	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 มุมระหว่าง {HKL} กับ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของระนาบต่างๆ 37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

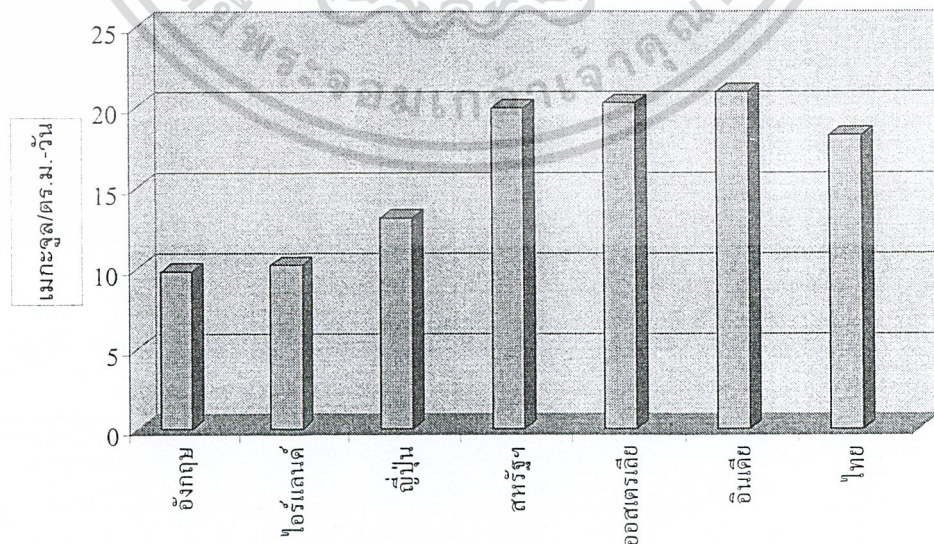
บทนำ

ดวงอาทิตย์เป็นต้นกำเนิดพลังงานที่ใหญ่ที่สุดของระบบสุริยะที่เห็นได้ชัดคือ พลังงานแสงสว่าง และพลังงานความร้อน ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์รวมทั้งสิ่งอื่นๆ ทั้งปวงบนโลก

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำ ขึ้นกับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่บริเวณนั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากจะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานสูง ในประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ปานกลางแต่เป็นบริเวณกว้าง โดยเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 1,300 – 1,600 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ในวันหนึ่งๆ ประเทศไทยเรามีความต้องการพลังงานไฟฟ้าประมาณ 250 ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นถ้าเรามีพื้นที่ประมาณ 1,500 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 0.3 ของประเทศไทย) เราก็จะสามารถผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพียงพอ กับความต้องการทั้งประเทศ

จากการเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยของประเทศต่างๆ ที่ได้พบว่า ประเทศไทยได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็นค่ารายวันเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 18.2 เมกะจูล/ตารางเมตร-วัน ซึ่งถือได้ว่า ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยประเทศต่างๆ ได้รับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดแสงสว่าง) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง และไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (Renewable Energy) สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใดๆ

เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell) และชนิดผลึกโพลีซิลิคอน (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ประเทศไทยนำเข้าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนมาใช้งานมากที่สุด ข้อดีเด่นคือ ใช้ธาตุซิลิคอนซึ่งมีมากที่สุดในโลกและมีราคาถูกเป็นวัตถุดิบ

2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar cell) ได้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลขซึ่งมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบาง เบา ราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กไปจนถึงใหญ่หลายตารางเมตรได้ใช้ธาตุซิลิคอนเช่นกัน แต่เคลือบให้เป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน หรือ 0.0005 มิลลิเมตรเท่านั้น

3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar Cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดระดับร้อยละ 25 ขึ้นไป แต่มีราคาแพงมาก ไม่นิยมนำมาใช้งานบนพื้นโลก จึงใช้งานสำหรับดาวเทียมเป็นส่วนมาก

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดแสงสว่าง) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งาน ไม่ทำลายสภาพแวดล้อม เพียงแต่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแจ้ง ก็สามารถใช้งานได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหว เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เท่านั้น จึงเป็นการประหยัดน้ำมันและอนุรักษ์พลังงาน และสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานได้มาฟรี และมีไม่สิ้นสุด อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 20 ปี ดังนั้นเมื่อลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรก ก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป

การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีความสลับซับซ้อนและไม่อันตราย ประชาชนทั่วไปสามารถหาซื้อและติดตั้งเพื่อใช้งานในครัวเรือนด้วยตนเอง ไฟส่องสนามพลังงานแสงอาทิตย์ ไฟส่องโรงจอดรถ พลังงานแสงอาทิตย์ ชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์พลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับการออกแบบระบบใหญ่ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้าน ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ในด้านต่างๆ

การคมนาคม	ทางทะเล แสงไฟประภาคาร แสงไฟของทุ่นลอยน้ำ ทางบก ไฟสัญญาณข้างถนน ไฟสัญญาณพื้นถนน ไฟสัญญาณให้รถไฟ โคมไฟบนทางด่วน โทรศัพท์ฉุกเฉินบนทางด่วน กล้องวีดีโอข้างถนน พัฒนาระบายอากาศที่หน้าต่างหลังการถ
การสื่อสาร	สถานีถ่ายทอดวิทยุโทรทัศน์บนภูเขาสูง เครื่องวัดพยากรณ์อากาศ กล้องตรวจจับความปลอดภัยที่เขื่อน โทรศัพท์มือถือ โทรศัพท์ทหาร
การป้องกันการสึกกร่อน	ท่อน้ำมัน ท่อก๊าซ สะพานเหล็ก เขื่อนกันคลื่น แสงไฟท่อก๊าซ
อุปกรณ์นอกอาคาร	โคมไฟถนน โคมไฟสนามหญ้า โคมไฟประตูลิ้ว โคมไฟป้ายรถเมล์ โคมไฟตู้โทรศัพท์ โคมไฟป้ายประกาศ โคมไฟป้ายลิฟท์ โคมไฟหอนาฬิกา เครื่องขยายเสียง บั้มสูบน้ำ ประตูลิ้วไฟฟ้า ประตูบ้านไฟฟ้า โคมไฟติดผนังอาคารเสริมงานสถาปัตยกรรม โคมไฟติดตั้งที่หลังคาสระว่ายน้ำ โคมไฟติดตั้งที่หลังคาสนามกีฬา
การอวกาศ	ดาวเทียม สถานีอวกาศ ยานอวกาศเดินทางไกล
การปลอดภัย	รั้วไฟฟ้าป้องกันสัตว์หนี บั้มน้ำคั้นน้ำใช้ แสงไฟจับกบจับแมลงต่างๆ
การประมง	เครื่องกระตุ้นการแพร่พันธุ์สัตว์น้ำในทะเลด้วยเสียงและแสงไฟ โคมไฟล่อปลาในทะเล โคมไฟหาปลาในทะเล ห้องเย็นเก็บสัตว์ทะเล เป่าลมลงบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อกระตุ้นการแพร่พันธุ์
การเกษตรกรรม	บั้มสูบน้ำ แสงไฟครีดยางพารา บ้านชาวสวนยาง หุ่นไล่กา ร่องไถ นก ห้องอบเป่า พืชให้แห้ง เครื่องนวดข้าวกลางทุ่งนา การชลประทาน ระบบฉีดพ่นน้ำ
การวัดและรักษาสภาพแวดล้อม	เครื่องวัดอุณหภูมิน้ำทะเล เครื่องวัดความเค็มน้ำทะเล เครื่องวัดความเร็วน้ำทะเล เครื่องวัดความสูงคลื่นทะเล เครื่องวัดฝุ่นในอากาศ เครื่องวัดระดับเสียง/ควีน เครื่องวัดละอองเกสรดอกไม้ (ป้องกันโรคมุมิแพ้) เป่าลมลงบ่อน้ำ/คลอง
การแพทย์	ตู้เย็นเก็บยาและวัคซีน โคมไฟสถานีอนามัย วิทยุสื่อสารบนด้านการค้า

เอกสารแพทย์สารที่สงวนไว้สำหรับ... ผู้เขียนเก็บยาและวัคซีน โคมไฟสถานีอนามัย วิทยุสื่อสารบนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบันทึก	เรื่อมอเตอร์ โคมไฟแคมป์ วิทยุสื่อสาร โทรทัศน์ โคมไฟบ้าน พัดตากอากาศ เครื่องบิน เครื่องร่อน รถยนต์ไฟฟ้า ของเล่นไฟฟ้า รถไฟฟ้าสนามกอล์ฟ หมวกติดพัดลม
ระบบไฟฟ้า	ต่อเข้าระบบของการไฟฟ้าฯ หมู่บ้านห่างไกล โรงเรียนห่างไกล สถานีอนามัยห่างไกล
ภายในอาคาร	เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ ของเล่น ประตูดู-หน้าต่าง ผลิตไฟฟ้าได้ พัดลมระบายอากาศที่หน้าต่าง
ติดตั้งบนหลังคาบ้าน	จ่ายไฟฟ้าให้บ้าน หลอดแสงสว่าง ตู้เย็น โทรทัศน์ เครื่องปรับอากาศ

ในโครงการฉบับนี้ ได้แสดงผลการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ที่มีผิวขรุขระแบบพีระมิด ซึ่งแสงที่เดินทางเข้ามา จะสะท้อนที่ผิวของพีระมิดและจะเบี่ยงเบนเข้าสู่เนื้อผลึก และเกิดการสะท้อนแสงในผลึกหลายๆครั้ง เนื่องจากแสงที่เดินทางเข้าสู่เนื้อผลึกมีทิศทางเฉียงดังนั้นระทบเดินแสงในผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงในผลึกมากขึ้นนิยมเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นป้องกันการสะท้อนแสงและผิวขรุขระนี้ว่า “เซลล์ดำ” (Black Cell) เพราะว่าเมื่อเรามองผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ จะพบว่าสีของเซลล์เป็นสีดำ แนวการสร้างแบบนี้เป็นการพัฒนาปรับปรุงขบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ขึ้นมาใหม่เพื่อให้เซลล์มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ประวัติเซลล์แสงอาทิตย์และพลังงานแสงอาทิตย์

2.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์

ได้มีการค้นพบการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อประมาณ 150 ปีมาแล้วโดยในปี ค. ศ. 1817 เบอริชเชิลีเยส (Berzelius) ได้ค้นพบธาตุซีลีเนียม และสามารถเตรียมธาตุซีลีกอนได้เป็นครั้งแรก จากผลอันนี้ทำให้มีการค้นพบลักษณะความจำเพาะของแสง (Photoconductivity) ในซีลีเนียม โดยวิลลาจปี สมิท (Willoughby Smith) ในปีค.ศ. 1873 จากนั้นจึงได้มีการค้นพบผลของโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) โดยอดัมและเคย์ (adum and Day) ในปี ค.ศ. 1876 หลังจากนั้นอีก 7 ปีต่อมาฟริทท์ (Fritts) จึงได้อธิบายถึงโฟโตโวลตาอิกเซลล์ ที่ทำจากซีลีเนียมเป็นคนแรก และในปี ค.ศ. 1904 ฮอลวอชต์ (Hallwachs) ก็ได้สังเกตพบความไวต่อแสง (Photosensitivity) ในโครงสร้างของคอปเปอร์คิวปริอัสออกไซด์ (Copper Cuprousoxide)

จากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ในการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น แบบโกรว์จังก์ชัน (Grown junction) ทำให้มีการสร้างอุปกรณ์แบบโฟโตโวลตาอิก ที่ทำมาจากผลึกรูปเดี่ยวของซีลีกอนในปี 1941 จนกระทั่งอีก 12 ปีต่อมาจึงได้มีการพัฒนาการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น ขึ้นด้วยวิธีการแพร่สารเจือ (Impurity diffusion method) ในปีแรกของการพัฒนาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีใหม่ ทำให้สามารถสร้างเซลล์ที่มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานได้ 6 % อีก 12 ปีต่อมาทางโรงงานอุตสาหกรรมเอกชนจึงได้เริ่มผลิตอุปกรณ์ประเภทนี้ออกมา เพื่อหวังให้เป็นสินค้าสำคัญของตลาดจึงได้มีการพัฒนาทางด้านขบวนการผลิต, พิจารณาทำความเข้าใจกับทฤษฎีการทำงานของอุปกรณ์รวมทั้งการพัฒนาการออกแบบอุปกรณ์ด้วย ทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 14% ในปี ค.ศ. 1958 จากจุดนี้วิศวกรจึงได้พยายามที่จะทำให้เซลล์ ดีขึ้นกว่าเดิม เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟในอวกาศ รวมทั้งปรับปรุงเสถียรภาพต่างๆ ให้ดีขึ้นและยังได้พยายามหาทางลดราคาในการผลิตลง

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาการสร้างเซลล์ ด้วยสารประกอบอื่นๆ นอกเหนือไปจากซีลีกอน ซึ่งเป็นธาตุแท้ โดยเริ่มจาก คอปเปอร์ คิวปริอัสออกไซด์ แต่ก็พบว่ามันให้พลังงานออกมาน้อยกว่าเซลล์ที่ทำมาจาก แกลเลียม อาเซไนด์ , แคลเมียม ซัลไฟด์ และแคลเมียมเทลลูไรด์ ปรากฏว่าเซลล์ที่ทำจาก แกลเลียม อาเซไนด์ ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า แต่เนื่องจากแกลเลียม อาเซไนด์ มีราคาวัสดุที่สูงกว่าซีลีกอนมาก จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับแคลเมียมซัลไฟด์ และแคลเมียมเทลลูไรด์ สามารถสร้างเซลล์ได้โดยใช้เทคนิคทางด้านฟิล์มบาง (thin film) ทำให้เซลล์มีต้นทุนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลง แม้ในช่วงแรกนี้จะได้ประสิทธิภาพต่ำ และเสถียรภาพในการทำงานจะไม่ดีนัก แต่ก็คาดได้ว่า จะเป็นเซลล์ที่มีความสำคัญต่อไปในอนาคต

2.2 พลังงานที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องมายัง โลกผ่านชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ (Atmosphere) จะมีพลังงานลดน้อยลง และมีผลตอบสนองตามความถี่ของแสงแตกต่างกันไปจากแสงอาทิตย์ ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากในชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ ประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด รวมทั้งไอน้ำและฝุ่นละอองต่างๆ ที่เป็นตัวดูดกลืนพลังงานแสงบางส่วนเอาไว้ และทำให้แสงบางส่วนเปลี่ยนทิศทาง (Scattering)

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาความเข้มและผลตอบสนองทางความถี่แสงของแสงอาทิตย์ จึงได้มีการกำหนดค่า แอร์แมสเอ็ม (Air Mass m) โดยที่ แอร์แมสเอ็ม คืออัตราส่วนระหว่างระยะทางเดินของแสงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ ต่อระยะทางเดินของแสงเมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะ แสดงได้โดยสมการ

$$m = \sec z = \frac{1}{\cos z} \quad (2.1)$$

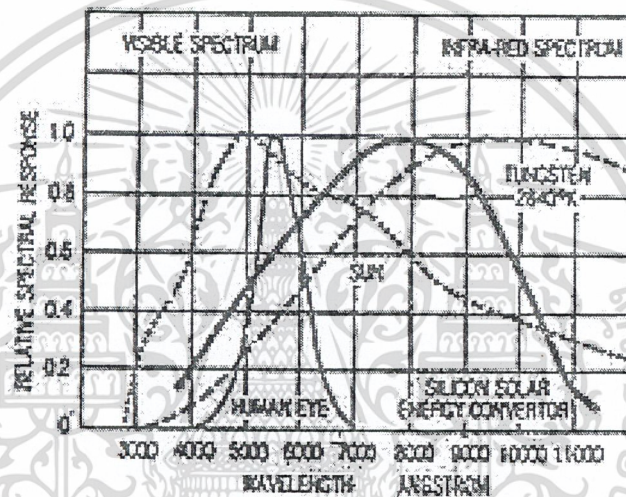
เมื่อ z (Zenith angle) คือมุมระหว่างแนวลำแสงที่ทำกับแนวตั้ง

แสงอาทิตย์ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์จะเรียกว่าชั้น แอร์แมสซีโร่ (Air Mass Zero, AM0) จะถือว่ามีค่าพลังงาน 138 มิลลิวัตต์ ต่อ หนึ่งตารางเมตร สำหรับแสงอาทิตย์ที่ผิวโลก ระดับน้ำทะเลในตอนเที่ยงวัน ที่ดวงอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะ จะเรียกว่าชั้น แอร์แมสวัน (Air Mass One, AM1) จะถือว่ามีค่าพลังงาน 100 มิลลิวัตต์ ต่อ 1 ตารางเซนติเมตร (2) ปริมาณของพลังงานแสงนี้ ได้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งก็คือประสิทธิภาพของเซลล์นั่นเอง ตามความจริงแล้วพลังงานแสงที่ได้รับบนผิวโลกในสถานที่แตกต่างกันจะมีค่าแตกต่างกันแล้วแต่เงื่อนไขและสภาวะทางภูมิศาสตร์ รวมทั้งสภาพของอากาศในบริเวณนั้นด้วยดังนั้นในการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจริงจึงจำเป็นต้องรู้ปริมาณของแสงและเวลาที่เซลล์ฯ ได้รับแสงในแต่ละสถานที่ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการพิจารณาออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากแสงอาทิตย์ประกอบด้วยแสงที่มีความถี่ต่างๆ มากมายรวมกันอยู่ตั้งแต่แสงที่มองเห็นและมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เส้นจุดไขในรูปที่ 2.1 เป็นผลตอบสนองตามความถี่ของแสงอาทิตย์ในชั้น AM1 เมื่อได้พิจารณาผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนที่ความถี่ต่างๆ ดังแสดงเป็นเส้นทึบหนาไว้ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าจุดสูงสุดของกราฟทั้งสองมีความถี่ไม่ตรงกัน ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียพลังงานแสงในกรณีไปส่วนหนึ่ง โดยพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 5000 อังสตรอม , ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์จะมีผลตอบสนองต่อความถี่แสงมากที่สุดที่ประมาณ 8000 อังสตรอม



รูปที่ 2.1 ผลตอบสนองทางความถี่แสงของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น

3.1 ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น

วิธีการที่จะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไปใช้งานได้อย่างคุ้มค่าและมีประโยชน์อย่างยิ่งก็คือ การเติมสารเจือให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิด พีและเอ็น ที่รอยต่อระหว่างสารชนิดพีและสารชนิดเอ็น เราเรียกว่า “รอยต่อพี-เอ็น” (p-n junction) ที่รอยต่อพี-เอ็น นี้จะมีลักษณะทางไฟฟ้าต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษอื่น ๆ

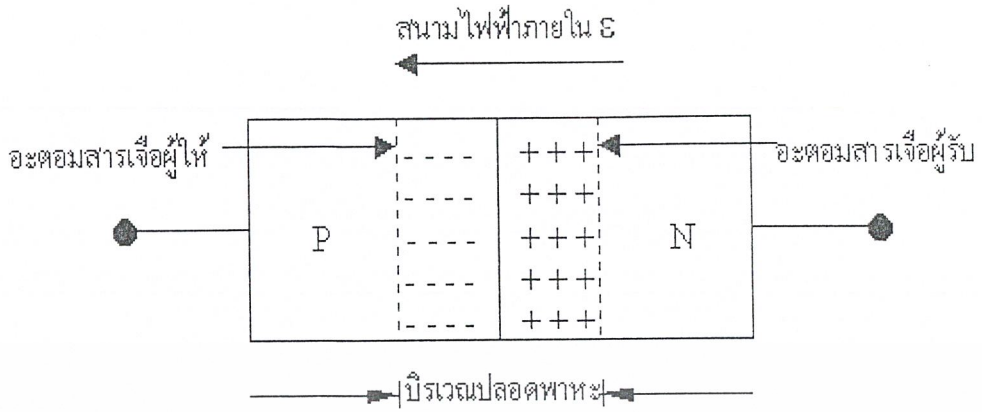
3.1.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

เมื่อยรอยต่อพี-เอ็น ถูกสร้างขึ้น จะเห็นว่ามีความแตกต่างของความหนาแน่นของพาหะ โดยโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีความหนาแน่นมากกว่าโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก็มีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านพี ดังนั้นทำให้เกิดการแพร่ของพาหะ จากด้านที่มีความหนาแน่นมากกว่าไปสู่ด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า เพื่อให้ด้านทั้งสองของรอยต่อมีความหนาแน่นของพาหะเท่ากัน การแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อพี-เอ็น และจะเกิดมีการรวมตัวกัน (recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอน กล่าวคือ อะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอน อะตอมจึงแสดงตัวเป็นไอออนบวก และอะตอมของสารเจือชนิดพีทางด้านพี จะสูญเสียโฮล อะตอมจึงแสดงตัวเป็นไอออนลบ ทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ เรียกว่า สนามไฟฟ้าภายใน (built-in-voltage) ดังรูปที่ 3.1

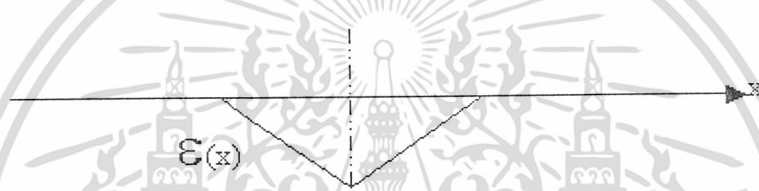
จากรูปจะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และในที่สุดสนามไฟฟ้านี้จะมีผลพอดีทำให้โฮลและอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อได้ เรียกว่า “ภาวะสมดุล” ที่บริเวณรอยต่อที่สนามไฟฟ้าจะไม่มีพาหะใด ๆ อยู่ เนื่องจากถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าปิดออกไปเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (Depletion Region) ที่บริเวณปลอดพาหะนี้มีความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น เรียกว่า “ศักย์สัมผัส”

(Contact Potential, V_0)

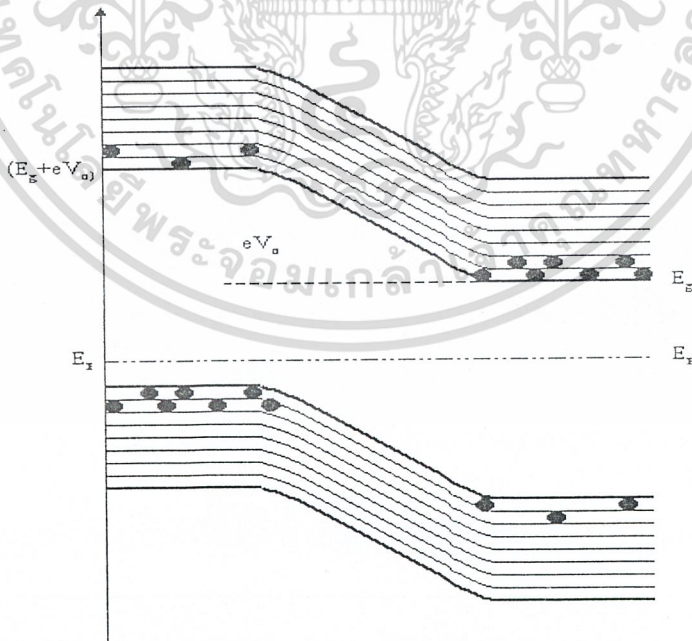
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ



รูปที่ 3.1 แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 3.2 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน

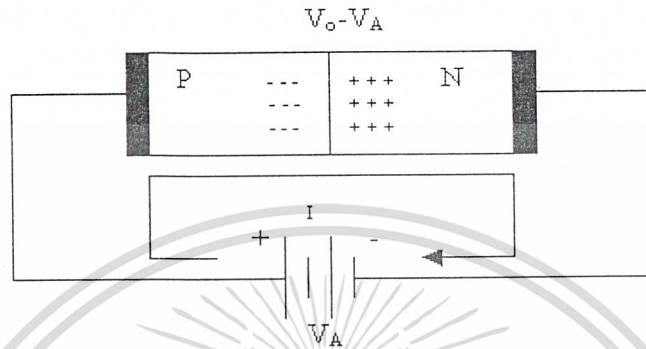
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขใบอนุญาตการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ในการให้แรงดันแก่รอยต่อพี-เอ็นนั้น จะให้ด้านพีมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็นตามรูป

ที่ 3.3



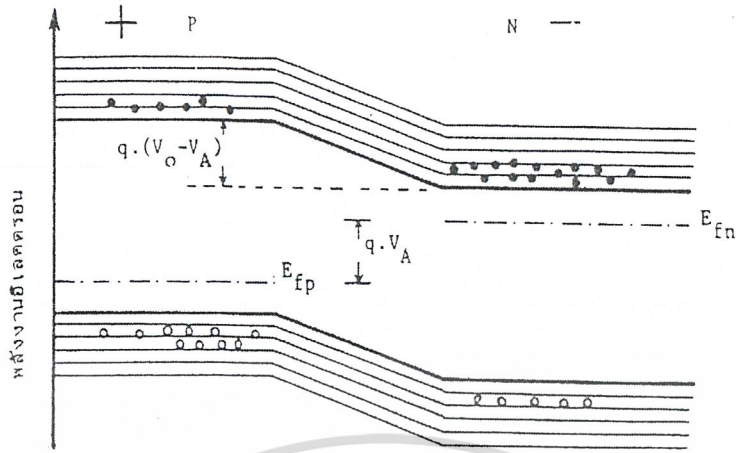
รูปที่ 3.3 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งให้ไบอัสตรง

แรงดันไบอัสจากภายนอก V_A จะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็น และอยู่ในลักษณะที่หักล้างกับแรงดันไฟฟ้าภายในที่บริเวณรอยต่อ นั่นก็คือค่าแรงศักย์ที่รอยต่อจะลดลง จึงมีผลทำให้โฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นถูกฉีด (injection) ข้ามรอยต่อพี-เอ็นได้ ปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนี้ จะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสในลักษณะของเอ็กโปเนนเชียล (exponential function) จากการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เองจะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ซึ่งแสดงดังสมการ (3.1)

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่ยูนิจันได้รับแรงดันไบอัสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิ (E_F) ของด้านพีและด้านเอ็นจะไม่เท่ากัน และค่าแรงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ เป็นผลทำให้มีกระแสไหลในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



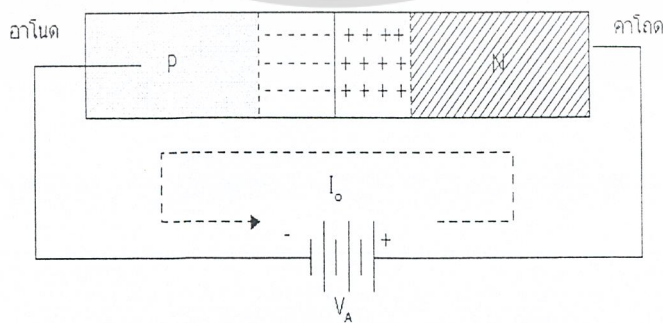
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

ดังนั้นเมื่อนำไดโอดไปใช้เป็นอุปกรณ์แสงต่าง ๆ นั้นสมการของไดโอดก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยแสงไปมีผลทำให้ค่ากระแสในกรณีไบอัสตรงลดลง เนื่องจากทิศทางของกระแสแสงมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสไบอัสตรง ดังสมการ (3.2)

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right) - I_p \quad (3.2)$$

3.1.3 รอยต่อ พี-เอ็น ในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

การให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อพี-เอ็น นั้นทำได้โดยการให้ทางพีมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางเอ็นดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

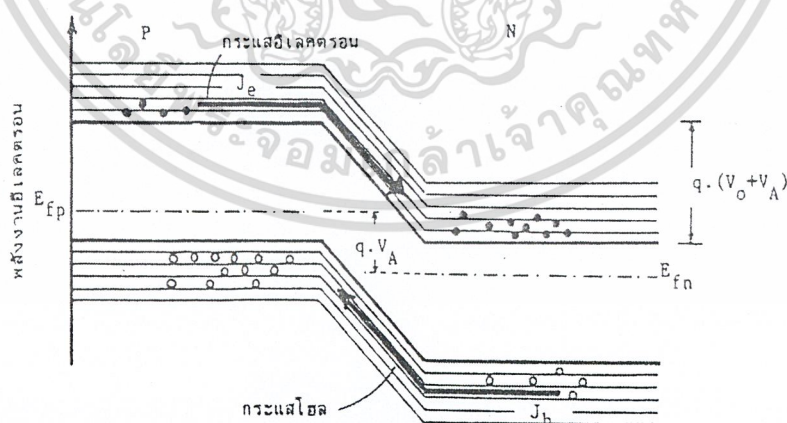
ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อ มีค่า V_A แรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายในที่รอยต่อ ดังนั้นจะทำให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และโฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้ รอยต่อพี-เอ็น ในภาว่นี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวน ไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ ดังนั้นจึงปรากฏมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก ซึ่งอาจพิจารณาได้จากสมการ (3.1) ค่าของ V_A แทนด้วย $-V_A$ และพิจารณาว่าที่อุณหภูมิห้อง

$$T = 300^\circ\text{K} \text{ เทอมของ } \left(e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right) \text{ เทอมของ exponential จะมีค่าน้อยกว่า 1 มาก}$$

ดังนั้นกระแสที่ไหลในขณะได้รับไบอัสกลับ

$$I \approx -I_0 \quad (3.3)$$

ซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ลักษณะของแถบพลังงานในขณะนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ๆ



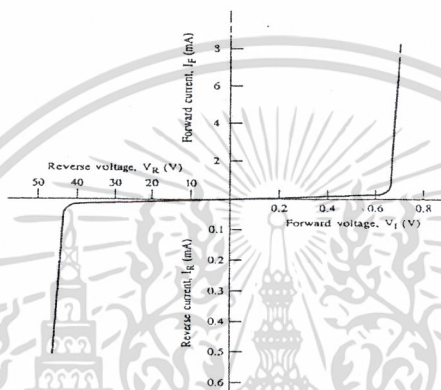
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ V_A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำไดโอดไปใช้เป็นอุปกรณ์แสงต่าง ๆ นั้นสมการของไดโอดก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยแสงไปมีผลทำให้ค่ากระแสในกรณีไบอัสกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากทิศทางของกระแสแสงมีทิศทางเดียวกับกระแสไบอัสกลับ สมการ (3.4)

$$I \approx - (I_0 + I_p) \quad (3.4)$$

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในทางอุดมคติ



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

3.2 กระแสรั่วไหลที่รอยต่อพี-เอ็น

กระแสรั่วที่รอยต่อพี-เอ็น คือ กระแสอิมิตชันกลับในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งมีค่าประมาณ I_0 ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$I_0 = A \cdot q \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{D_h}{L_h n_n} + \frac{D_e}{L_e p_p} \right) \quad (3.5)$$

เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลย์

$$p = n = n_i = K \cdot T \cdot \frac{3}{2} \cdot e^{\frac{-E_g}{2KT}} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และนอกจากกระแสอัมตัมที่เกิดขึ้นที่รอยต่อแล้วก็ยังมีกระแสรั่วที่บริเวณปลอดพาหะเกิดขึ้น
อีกด้วย โดยกระแสรั่วจะถูกเรียกว่า Depletion-layer generating recombination current หรือเรียก
ว่ากระแส G-R ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแส G-R ก็คือความไม่สมบูรณ์ของผลึก



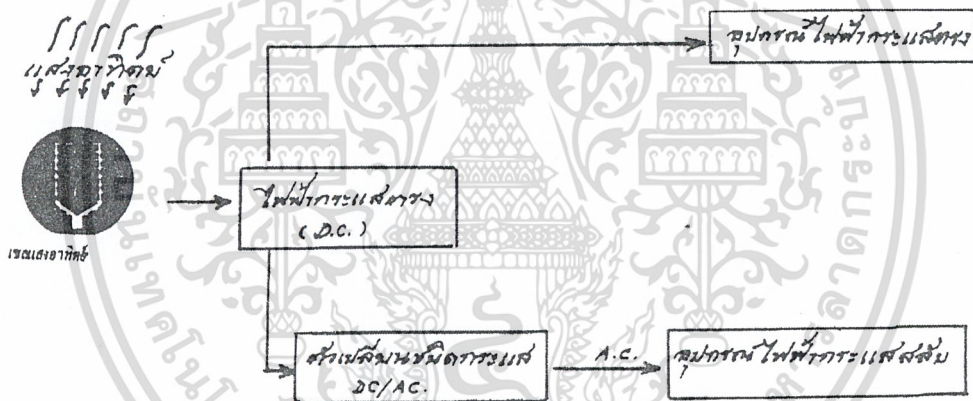
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

4.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง เซลล์จะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันที หรืออาจจะมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current) แล้วจึงนำไปใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ทำงานได้ต่อไป ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับกันมาก ทั้งนี้เนื่องมาจาก

1. วัสดุซิลิกอน เป็นธาตุที่หาได้ง่าย และมีมากที่สุดบริเวณผิวโลกราคาจึงถูก
2. เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุซิลิกอนเป็นที่เข้าใจกันอย่างดี เนื่องจากพัฒนามาเป็นเวลานาน และใช้กันอย่างกว้างขวางอยู่แล้วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

จากผลการวิเคราะห์ ปรากฏว่า วัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีค่าของช่องว่างพลังงาน (Energy gap)

ประมาณ 1.5 eV ซึ่ง สารกึ่งตัวนำชนิด GaAs มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.43 และจากการ

ทดลองสร้างก็ปรากฏว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก GaAs ด้วยโครงสร้างที่เหมาะสมจะสามารถให้ประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานได้สูงถึง 20% แต่ว่าแกเลียมอาเซนายด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาแพง ซึ่งเป็นข้อที่เสียเปรียบสารซิลิกอน

SOLAR CELL MATERIAL CANDIDATES (FROM BYLANDER [13])

Material	Major materials					Experimental diffusion length (μ)
	Energy gap (eV)	Mobility (300 K) ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)		Lifetime (s)		
		μ_n	μ_p	τ_n	τ_p	
Si	1.1	1450	500	400		100
GaAs	1.4	8500	400	50	110^{-2}	5
CdS	2.6	340	615	100	10^{-2}	~ 1
B	1.5	6000	4000			
Se(Hax)	1.6	2	17			
SiC(β)	2.6	1000	10			
As ₂ Se ₃	1.6	15	45			
Sb ₂ Se ₃	1.2	15	45			
AlSb	1.6	400	400			
GaP	2.2	>200	150			
CdAs ₂	1.0		100			
InP	1.2	4000	>600	2000	2	
ZnSe	2.8	500	16			
ZnTe	2.2	500	900			
CdSe	1.7	600				
CdTe	1.4	700	65			

Other materials

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

รูปที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ที่สามารถเข้ามาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ลำแสงหรือรังสีของแสงอาทิตย์ ที่ตกลงบนพื้นผิวโลก จะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วนคือ

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

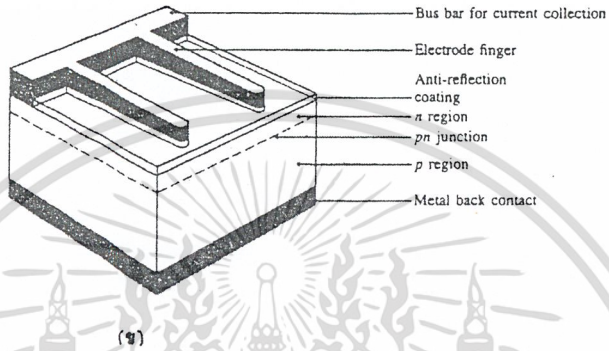
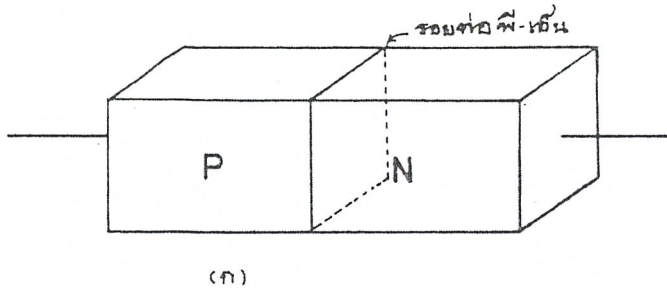
ลำแสงอาทิตย์โดยตรง หรือ Direct sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์ โดยตรง และลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจายหรือ diffused sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากกระสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลกประมาณกันว่า แม้แต่ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10-20% ของรังสีทั้งหมดที่รับได้ ยิ่งในวันที่มีเมฆหมอกปกคลุมมาก ๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายนี้จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

สเปกตรัมของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจาย จะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงแบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อนและแพร่กระจาย

4.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

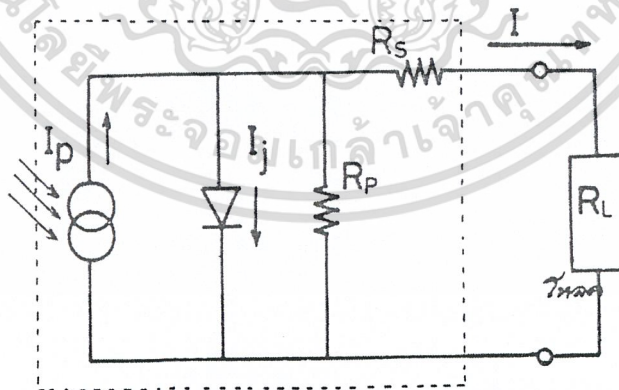
เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันนั้น มักมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น คล้าย ๆ กับโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น หากแต่เซลล์แสงอาทิตย์ จะมีขนาดใหญ่กว่าไดโอดมาก ๆ ทั้งนี้ก็เพื่อให้เซลล์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสง มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากพอที่นำไปใช้งานได้ การสร้างรอยต่อพี-เอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำได้ด้วยวิธีการเดียวกันกับการสร้างไดโอด ซึ่งมักนิยมใช้วิธีการแพร่สารเจือ (impurity) ชนิดเอ็นหรือชนิดพี เข้าไปในเนื้อของสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดตรงกันข้าม และในบทนี้จะได้กล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น ทั้งในขณะที่ไม่ได้รับแสง และในขณะที่ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างอย่างง่าย ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์
 (ข) แสดงภาพตัดด้านข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง

4.3.1 วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น



โดยที่ I_p คือ กระแสเนื่องจากแสง

I_j คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ pn ขณะไม่มีแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_L คือ โหลด

R_S คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

R_p คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

4.3.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็น

1) ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมากและกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ และจากกราฟแสดงให้เห็นคุณลักษณะในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนี้

$$\text{กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark)} \quad I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

2) ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (illumination)

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแสง จะพิจารณาว่าในลำแสงประกอบด้วยกลุ่มของโฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานแสดงดังสมการ (4.2)

$$E_{\text{photon}} = hv \quad (4.2)$$

โดย

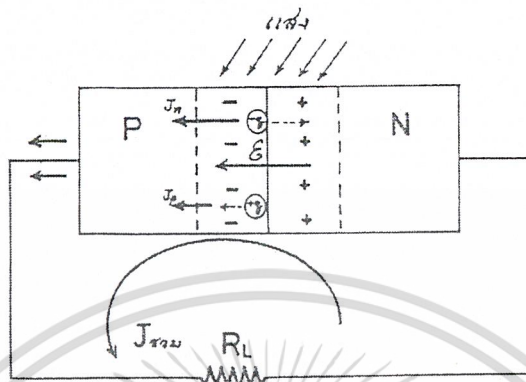
E_{photon} คือ พลังงานของโฟตอน

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

v คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) อยู่ในแถบความนำ (conduction band) ได้ และทำให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้ ๆ กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามเอกสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำแพงศักย์ภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

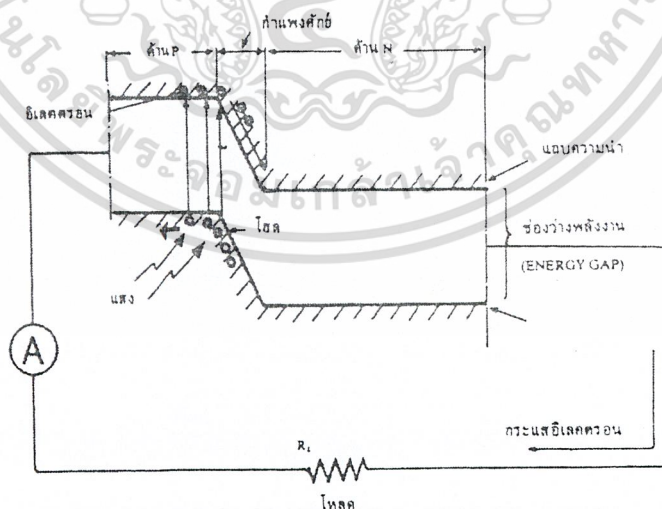
ด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่ยังไม่ได้รับไบอัสตรง ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการเกิดกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสง

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง” (photo current) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า I_p ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแสง แสดงดังรูปที่ 4.5 และแสดงสมการได้ดังสมการ (4.3)

กรณีที่ยังไม่ได้รับแสง (illumination)
$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right) - I_p \quad (4.3)$$

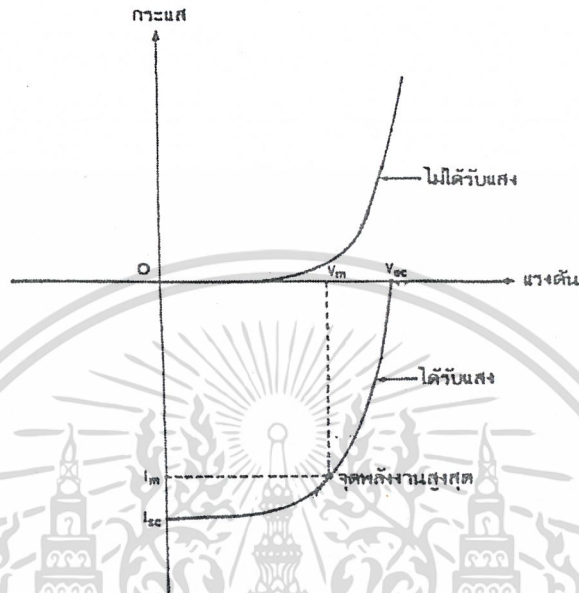


รูปที่ 4.5 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซมิคอนดักเตอร์ ขณะที่ยังไม่ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น
เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.6

ขณะ ได้รับแสงและไม่ได้รับแสงสามารถเขียนแสดง



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น
ขณะที่ไม่ได้รับแสงและได้รับแสง

4.4 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ และโดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือก็คือเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งจะต้องให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์ถูกัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสง จะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสงไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจรในภาวะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า “กระแสัดวงจร” (Short circuit current) เขียนย่อ ๆ ว่า I_{sc} ค่าของกระแสัดวงจรนี้ หาได้จากสมการ (4.3) เมื่อกำหนดให้

ขณะัดวงจร, $V_A = 0$ ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

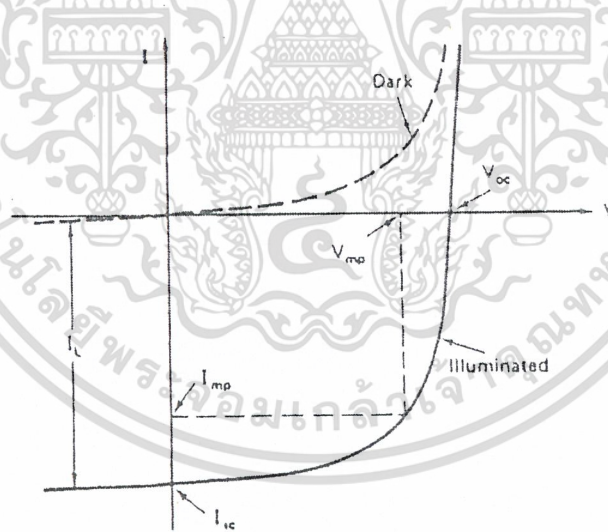
ในขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจรออก (open circuit) และที่รอยต่อได้รับแสง จะพบว่ากระแสที่ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรถูกเปิด แรงดันที่ปรากฏคร่อมรอยต่อพี-เอ็น ขณะนี้ถูกเรียกว่า “แรงดันวงจรเปิด” (open circuit voltage) เขียนย่อ ๆ ว่า V_{oc} ค่า V_{oc} หาได้โดยพิจารณาว่าเมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร, $I = 0$ สามารถเขียนสมการ (4.3) ได้ใหม่ว่า

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

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

หรือ
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (4.5)$$

ค่าของ I_{sc} และ V_{oc} แสดงในกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิด จะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้
 คือขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง, สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสง เพื่อเกิดประจุ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 พาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล, ระยะเวลาการพักของรอยต่อพี-เอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ,
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว, และค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไป ๆ กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน จะมีค่าประมาณ $35-40 \text{ mA/cm}^2$ และกรณีของเซลล์แบบอานาไฮโดรเจนค่า I_{sc} จะอยู่ในราว 20 mA/cm^2

ส่วนค่าของแรงดันวงจรเปิด (Open circuit voltage) V_{oc} จะมีค่ามากขึ้นขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) E_g ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์ อย่างไรก็ตามค่า V_{oc} นี้จะมีขนาดจำกัด คือสูงสุดไม่เกินค่าของความกว้างของช่องว่างพลังงานและปกติ ค่าของ V_{oc} ในเซลล์แบบซิลิกอนมีค่าประมาณ 0.5-0.6 โวลต์ และในกรณีของสารเซลล์แบบอานาไฮโดรเจนค่า V_{oc} จะมีค่าราว 0.9 โวลต์

อย่างไรก็ดีขณะที่นำเซลล์ไปใช้งาน เซลล์จะไม่อยู่ในภาวะลัดวงจร หรือเปิดวงจร ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์จะต้องถูกต่อเข้ากับโหลด (load) ซึ่งมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง ดังนั้นแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมาให้แก่โหลดจะมีค่าน้อยกว่าค่า V_{oc} และ I_{sc} โหลดซึ่งนำมาต่อเมื่อมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของแรงดันและกระแสที่เซลล์จ่ายออกมามีค่าสูงสุด หรือที่เรียกว่า “ค่ากำลังงานสูงสุด” (maximum power) ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลดได้ เขียนย่อ ๆ ได้ว่า P_m ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนอักษรย่อแทนเป็น I_m และ V_m

$$\text{นั่นคือ } P_m = I_m \times V_m \quad (4.6)$$

และค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการ (4.7)

$$R_{LOAD} = \frac{V_m}{I_m} \quad (4.7)$$

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

$$F.F = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก เซลล์ที่ใช้งาน โดยทั่ว ๆ ไปค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.6 ~ 0.8

นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญยิ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนตัวย่อเป็น η ประสิทธิภาพของเซลล์ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์

$$\eta = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์}}{\text{พลังงานแสงที่เซลล์ได้รับ}} \times 100\% \quad (4.9)$$

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

โดยที่ P_{in} คือพลังงานรวมของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์

ในปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอนที่ใช้งานกันโดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในช่วง 12 ~ 14%

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น I_{sc} , V_{oc} , P_m , FF และ η ซึ่งมีค่าสูง ๆ อย่างไม่ก็ดีพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ถูกจำกัดด้วยแฟคเตอร์อื่น ๆ มากมาย ซึ่งบางแฟคเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟคเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

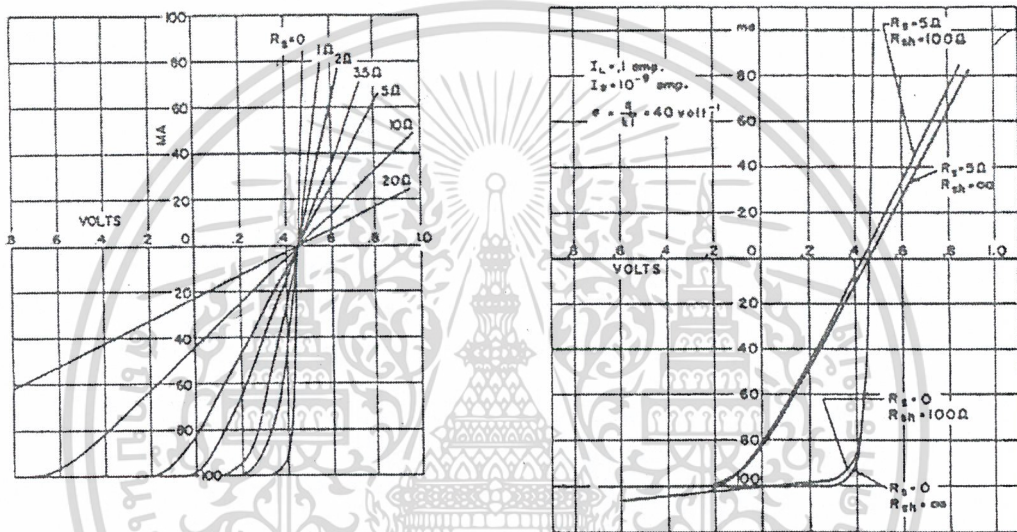
4.5 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ใช้งาน จะเห็นว่า กระแสเนื่องจากแสง (Photo current) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (current source) I_p ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ในทางอุดมคติ I_p ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance) R_s เกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความต้านทานของบริเวณรอยสัมผัสโห้มิก (ohmic contact) ระหว่างโลหะกับส่วนพีและส่วนเอ็นค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมดเขียนตัวย่อได้เป็น R_s ,

ค่าความต้านทานขนานหรือ R_p (parallel resistance หรือ shunt resistance) เป็นค่าความต้านทาน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติที่ขนานกับรอยต่อในรอยต่อพี-เอ็น ที่สมบูรณ์ในทางอุดมคติค่าของ R_p จะมีค่าเป็นค่าอนันต์ (∞) และในเซลล์แสงอาทิตย์อุดมคติค่าของ R_s จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดเสีย (defect) เกิดขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อโดยเฉพาะรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ๆ ย่อมมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏอยู่ จึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ดังนั้นค่า R_p จึงไม่สูงเป็นค่าอนันต์ และค่า R_s ก็มีค่าไม่เป็นศูนย์ ผลของค่า R_s และ R_p จะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 (ก) แสดงผลของความต้านทานอนุกรม

(ข) แสดงผลของความต้านทานขนาน

โดยทั่วไปแล้วจะพบในเซลล์แสงอาทิตย์ใช้งานค่าความต้านทานขนาน R_p จะมีค่าสูงพอที่ไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม R_s จะมีผลและบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อคุณสมบัติของเซลล์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง, การสร้าง จึงต้องพิจารณาผลของค่า R_s ซึ่งถ้าคิดที่ $R_s = 0$ และได้ I ออกมาดังนี้

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right) \quad (4.10)$$

ซึ่งถ้า R_s ไม่เท่ากับ 0 แล้วแรงดัน V_0 ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อและแรงดันที่ตกคร่อม R_s ซึ่งเท่ากับ $I * R_s$ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริงๆจะมีค่าดังนี้

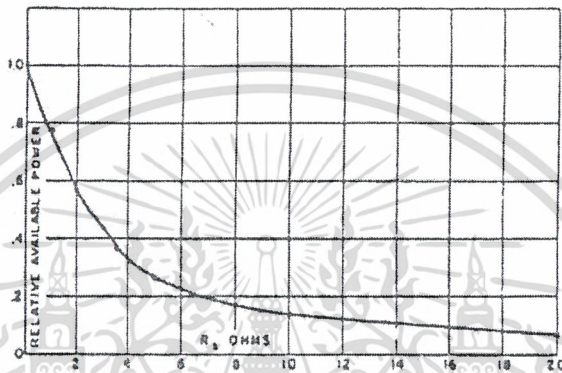
$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ (V)} = V_0 + I * R_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{q(V_0 + IR_s)}{kT} - 1 \right) \quad (4.11)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.11) สามารถนำไปเขียนกราฟเพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 4.8 (ก) จะเห็นได้ว่าเซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อยลงและความชันของกราฟก็จะลดลงด้วยเป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์ลดน้อยลงไปมากดัง รูปที่ 4.9 ดังนั้นในการสร้างเซลล์ฯ จึงควรวางทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

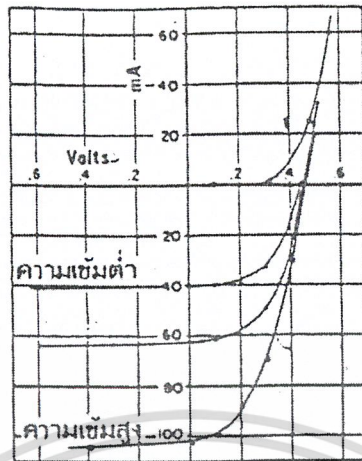


รูปที่ 4.9 แสดงการลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

4.6 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงานจำเป็นต้องมีแสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอที่จะเป็นอิสระและทิ้งโฮลให้เกิดขึ้น ดังนั้นถ้าหากแสงที่มาตกกระทบ มีความเข้มสูงมาก หรือก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮล เป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสง ดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริง ๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์ด้วย เมื่อได้พิจารณาสมการของกระแส I_R ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L ในวงจรสมมูล จะพบว่า กระแส I_R นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องมาจากแสง I_L และกระแส I_j ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ I_L และ I_j

4.7.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L

กระแส I_L ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงจะมีค่าตามสมการต่อไปนี้

$$I_L = qgA(L_n + L_p) \quad (4.12)$$

โดยที่ g คือ อัตราเกิดกระแสเนื่องมาจากแสง (generation rate)

L_n, L_p คือ ระยะการแพร่ (diffusion length) ของอิเล็กตรอนและโฮล

เนื่องจาก I_L แปรผันตาม g และ L จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ g และ L

$$\text{จากสมการ } L = \sqrt{D\tau} \quad (4.13)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร (Diffusion coefficient หรือ Diffusion constant) สำหรับที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้น จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมน้อยมาก จากสมการ

ของ L จึงเหลืออยู่แต่ค่าอายุของพาหะ, (Carrier lifetime) ที่ต้องพิจารณา ซึ่งก็พบว่าที่อุณหภูมิค่า ๆ หนึ่ง ค่าอายุของพาหะจะเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ว่าค่าอายุของพาหะจะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

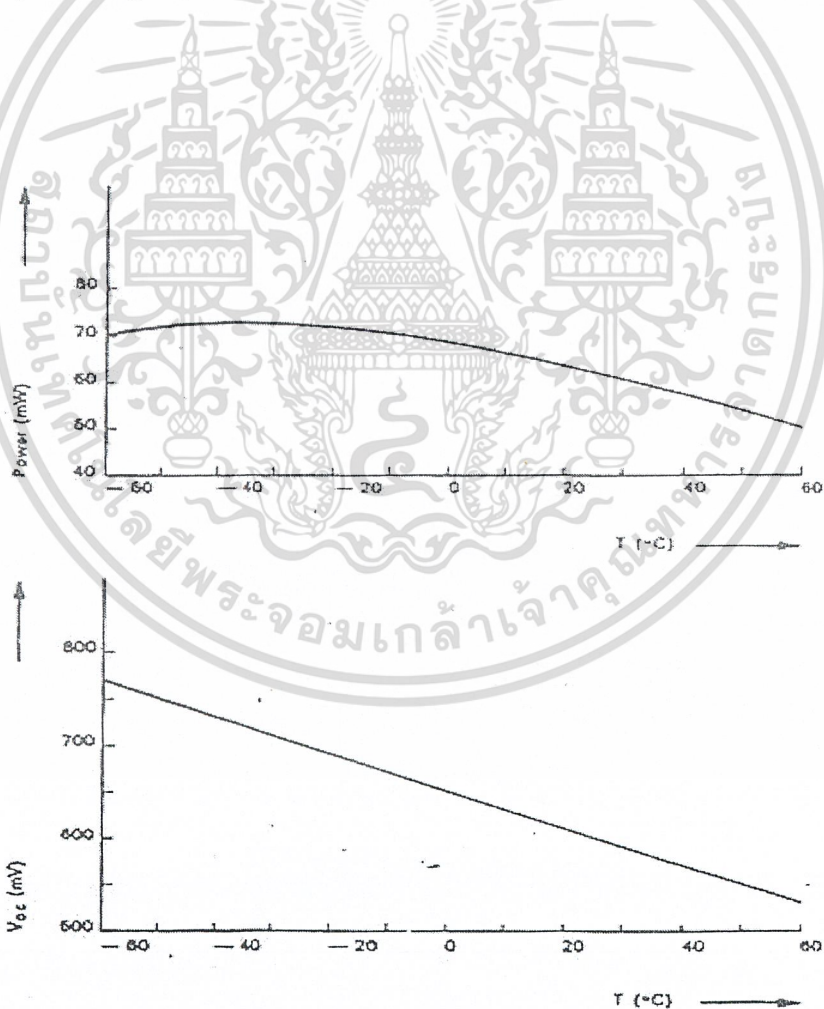
4.7.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์ เพื่อความสะดวกพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (V_{oc}) ตามสมการที่ (4.11) ซึ่งได้แสดงไว้ดังนี้

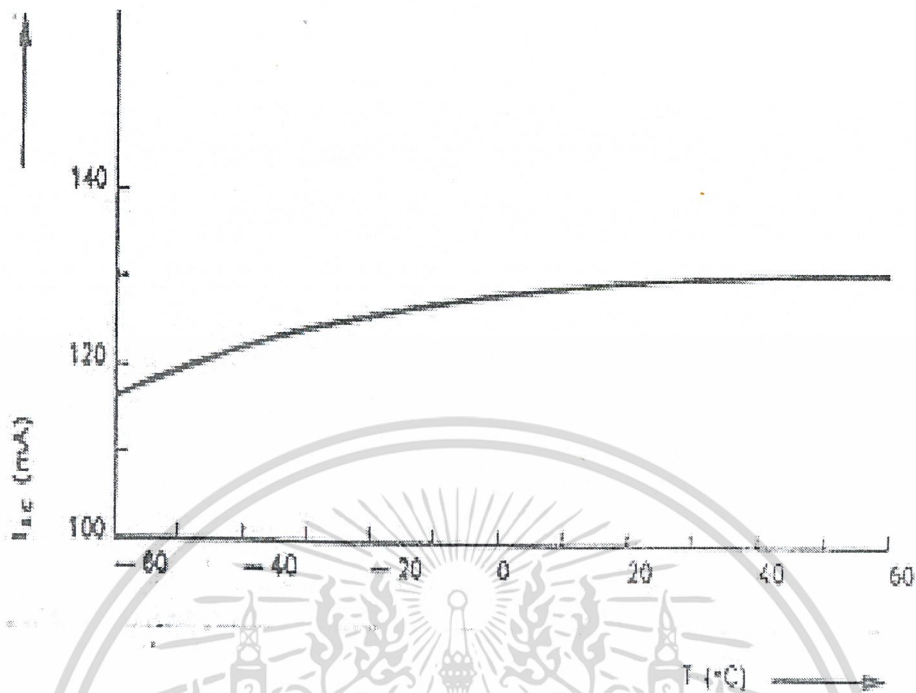
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (4.16)$$

จากสมการนี้ค่า kT/q จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่า k/q มีค่าต่ำมาก, ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} ก็คือ I_0 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้ V_{oc} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{sc} , V_{oc} และ P_o ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส, แรงดันและพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

4.8 ความลึกของรอยต่อ p-n

โดยทั่วไป การรวมตัวของพาหะโฟโต (recombination of photocarriers) ที่บริเวณผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์มักจะเกิดขึ้นได้ง่ายและมีอัตราการรวมตัวที่สูง (high recombination surface velocity) และการรวมตัวของพาหะที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำและขั้วไฟฟ้าก็มีอัตราการรวมตัวที่สูงเช่นกัน วิธีการลดอัตราการรวมตัวกันที่ผิวดังกล่าวที่ใช้ได้ผลวิธีหนึ่งคือ การเพิ่มขึ้น back surface field (BSF) ขึ้นที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งโคปด้วยความหนาแน่นสูงเช่น n-p-p+

ความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะที่เกิดจากแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ (collection probability) นอกจากเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงใน รูปที่ 4.12 แล้ว ความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะโฟโตมีค่าสูงสุดที่บริเวณย่านปลอดพาหะซึ่งอยู่ตรงกลางของรอยต่อ p-n และลดลงเมื่อห่างออกไป ความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะโฟโตที่ผิวหน้าด้าน n มีค่าน้อย เราสามารถปรับปรุงให้ความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะด้าน p มีค่าสูงขึ้นด้วยการโคปด้านหลังสุดให้ความหนาแน่นของ p+ มีค่ามากดังรูป(ก)ซึ่งส่งผลให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นด้วย

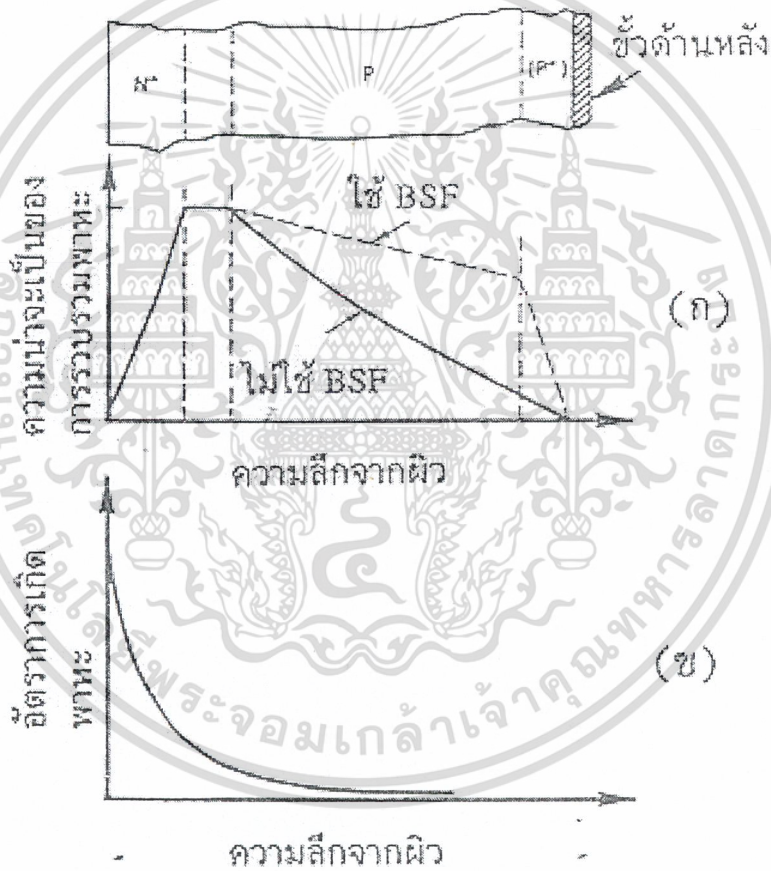
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราพิจารณาอัตราการผลิตพาหะโฟโตด้วยแสง เราพบว่าอัตราการผลิตพาหะโฟโตมีค่าสูงสุดที่ผิวด้านรับแสงและจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางความลึกดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) ตามสมการ

$$G(\chi) = (1-R)\alpha N e^{-\alpha\chi} \quad (4.17)$$

โดยที่ χ : ระยะทางจากผิวรับแสง
 α : สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

N : โฟตอนฟลักซ์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์
 R : สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง



รูปที่ 4.12 (ก) การเปลี่ยนแปลงของความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะเมื่อเทียบกับความลึก

(ข) การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตพาหะเมื่อเทียบกับความลึกของเซลล์แสงอาทิตย์

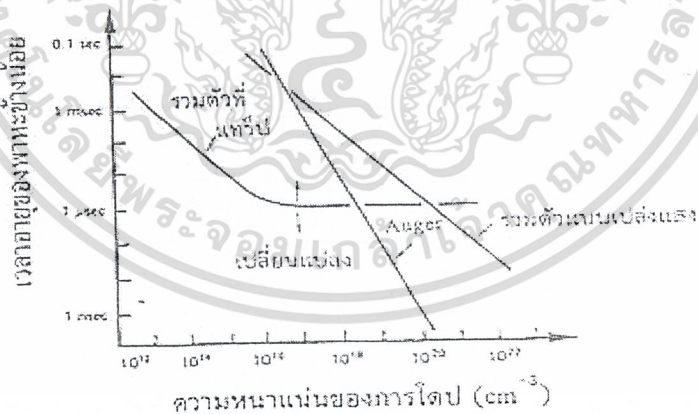
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างจากรูป 4.12 เปรียบเทียบรูป(ก) (ข) พบว่าที่ผิวรับแสง ความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะโฟโตมีค่าน้อยมาก ในขณะที่อัตราการผลิตพาหะโฟโตมีค่าสูงสุด เราจึงได้แนวทางว่า รอยต่อ p-n ควรมิตำแหน่งที่พื้นด้านรับแสงมากที่สุด

4.9 ความหนาแน่นของการโคปแผ่นฐาน

โดยทั่วไป แผ่นฐานที่นำมาใช้ผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์มีความหนาประมาณ 200-400 μm ซึ่งได้จากการตัด(slicing)แท่งผลึก การโคปแผ่นฐานจะถูกกำหนดตั้งแต่ขั้นตอนการดึงผลึก ในหัวข้อนี้พิจารณาว่า ความหนาแน่นของการโคปแผ่นฐานควรมีค่าเท่าไร

เมื่อกำหนดค่าความลึกของรอยต่อ p-n แล้ว ค่าระยะทางแพร่ซึมของพาหะข้างน้อย(diffusion length of minority carriers) ในแผ่นฐานจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตลัดวงจร I_{sc} ค่าระยะห่างแพร่ซึมมีค่าพื้นฐานตามสูตร $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ ค่าระยะทางแพร่ซึมนี้ได้รับอิทธิพลจากการรวมตัวของพาหะ 3 ชนิดด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าเราเพิ่มปริมาณการโคปสารเจือปนจะทำให้เวลาอายุพาหะลดลง ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการโคปสารเจือปนและเวลาอายุของพาหะข้างน้อยแสดงในรูปที่ 4.13 เวลาอายุของพาหะดังกล่าวจะยาวนานหรือสั้น จะถูกกำหนดด้วยกลไกการรวมตัวของพาหะ กลไกการรวมตัวของพาหะที่สำคัญมี 3 ชนิดดังนี้



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการโคปสารเจือปนและเวลาอายุของพาหะข้างน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การรวมตัวของพาหะที่ระดับแตร็ป (Recombination at Trap Centers)

เวลาอายุของพาหะที่ถูกกำหนดด้วยการรวมตัวที่ระดับแตร็ปคือ

$$\tau_{nT} = \tau_{no} \left(1 + \frac{m_1}{N_A} \right) \quad (4.18)$$

2. การรวมตัวแบบ Auger (Auger Recombination)

เวลาอายุของพาหะที่ถูกกำหนดด้วยการรวมตัวแบบ Auger คือ

$$\tau_{nA} = \frac{1}{DN_A^2} \quad (4.19)$$

3. การรวมตัวชนิดเปล่งแสง (Radiative Recombination)

เวลาอายุของพาหะที่ถูกกำหนดด้วยการรวมตัวชนิดเปล่งแสงคือ

$$\tau_{nR} = \frac{1}{2BN_A} \quad (4.20)$$

ดังนั้นถ้าการรวมตัวของพาหะมีสาเหตุจากกลไกหลายๆ ชนิด จะทำให้เวลาอายุของพาหะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_{nT}} + \frac{1}{\tau_{nA}} + \frac{1}{\tau_{nR}} \quad (4.21)$$

จากข้อมูลทั้ง 3 สมการนี้ ทำให้เราทราบว่า ถ้าเพิ่มความหนาแน่นของการโด๊ปแอกเซ็ปเตอร์ จะทำให้เวลาอายุของพาหะข้างน้อย (อิเล็กตรอน) ลดลง นั่นคือจะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาท์พุทลัดวงจร I_{sc} ลดลงด้วย

ในขณะเดียวกัน กระแสไฟฟ้าย้อนอิมิตัว I_0 แปรผกผันกับความหนาแน่นของการโด๊ปตามสมการ

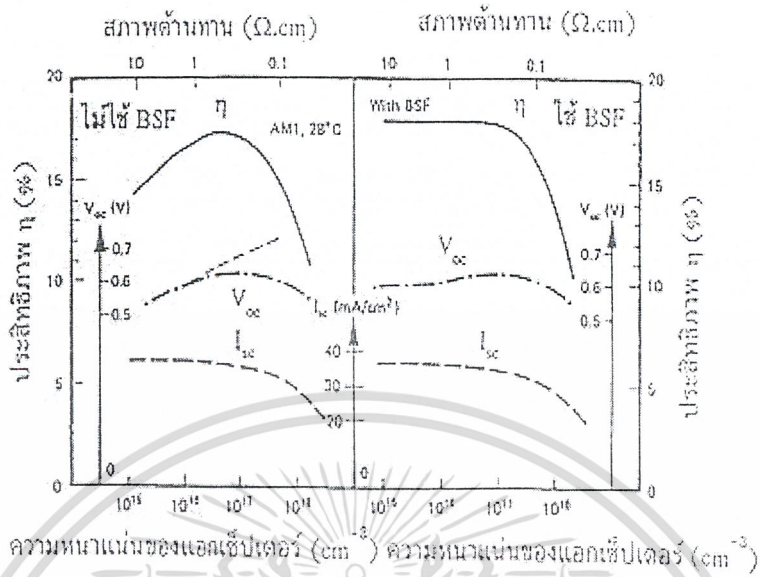
$$I_0 = qA \left(\frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} \right) \quad (4.22)$$

และจากสมการ

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

ถ้า I_0 ลดลงจะทำให้ V_{oc} ดังนั้นการเพิ่ม N_A และ N_D จะทำให้ V_{oc} เพิ่มขึ้นถ้าเราใช้สารกึ่งตัวนำชนิด p เป็นแผ่นฐาน ปกติเราโด๊ปชั้น n ด้วย N_D ที่ความหนาแน่นสูงมากเพื่อลดความต้านทานแผ่น ดังนั้นพจน์ที่สองในสมการที่ 4.22 จึงมีค่าน้อย ดังนั้นจากสมการที่ 4.22 นี้เราจึงสรุปได้ว่า V_{oc} จะเพิ่มขึ้นถ้าเราเพิ่มความหนาแน่นของ N_A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนความหนาแน่นของ N_A
 (ก) ในกรณีไม่มีชั้น BSF
 (ข) เป็นกรณีมีชั้น BSF

จากที่เราได้วิเคราะห์หามา เราได้พบว่า I_{sc} และ V_{oc} ได้รับอิทธิพลจาก N_A ในลักษณะที่ตรงข้ามกัน กล่าวคือ เมื่อเพิ่ม N_A จะทำให้ V_{oc} เพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ I_{sc} ลดลง ดังรูป 4.14 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์โดยเปลี่ยนความหนาแน่นของแอกเซ็ปเตอร์ โดยรูป (ก) เป็นกรณีไม่มีชั้น BSF และรูป (ข) เป็นกรณีมีชั้น BSF จากรูปนี้เราได้ข้อมูลที่สำคัญว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดที่ความหนาแน่นของแอกเซ็ปเตอร์ที่เหมาะสมการค่าๆ หนึ่ง

4.10 การสร้างสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ (Back Surface Field)

ได้กล่าวมาแล้วว่า การโคปให้ด้านหลังสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีความหนาแน่นสูง จะส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้ลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้ลัดวงจรเพิ่มขึ้นเพราะประสิทธิภาพของการรวบรวมพาหะที่ด้านหลังของเซลล์ดีขึ้น และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มขึ้นเพราะกระแสไฟฟ้ย้อนอิมิตัวลดลง กระแสไฟฟ้ย้อนอิมิตัวในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น BSF มีค่าดังนี้

$$I_{op} = \frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} \tanh\left(\frac{W_p}{L_e}\right) \quad (4.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความหนาของแผ่นฐานชนิด p มีค่าน้อยกว่าระยะทางแพร่ซึมของอิเล็กตรอน ($W_p \ll L_e$) สมการจะมีรูปที่ง่ายขึ้นดังนี้

$$I_{op} = \frac{q n_i^2 W_p}{\tau_e N_A} \quad (4.24)$$

เนื่องจากการลดความหนาแน่นของ N_A ทำให้ τ_e เพิ่มขึ้น ดังนั้นในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น BSF แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด V_{oc} จึงไม่ค่อยได้รับอิทธิพลจาก N_A มากนักซึ่งแนวโน้มนี้จะสังเกตได้จากรูปที่ 4.14

4.11 สำหรับปรากฏการณ์การกัดแบบแอนไอโซโทรปิกในสารละลาย KOH มีกลไกดังต่อไปนี้

- (1) อนุโมลไฮดรอกซิลจะเข้าไปจับกับแขนว่าง (dangling bond) ของซิลิกอน สำหรับแขนยื่นของซิลิกอนในระนาบ (100) มีสองแขน ในขณะที่มีเพียงแขนเดียวในซิลิกอนระนาบ (111) ขั้นตอนนี้ใช้พลังงานไอออนไนเซชันเพียง 0.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก
- (2) พันธะซิลิกอนหลัก (back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ (100) และเท่ากับ 3 สำหรับระนาบ (111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น $Si(OH)_2^+$ หรือ $SiOH_3^+$ (เรียกอนุโมลซิลิกอนไฮดรอกไซด์) ปฏิกิริยานี้ถ้าให้พลังงานแก่ผลึกต่างกัน อัตราส่วนการกัดของระนาบต่างๆ จะไม่เท่ากัน ที่อุณหภูมิใกล้เคียงเค็้ออัตราการกัดระนาบ (110) : (100) : (111) เท่ากับ 160:100:1 แต่จะเท่ากับ 50:30:1 ที่อุณหภูมิห้อง
- (3) ซิลิกอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอนุโมลไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย
- (4) กรด Orthosilic acid แยกตัวเพื่อรวมตัวกับน้ำ เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน

4.12 โครงสร้างอะตอมซิลิกอน

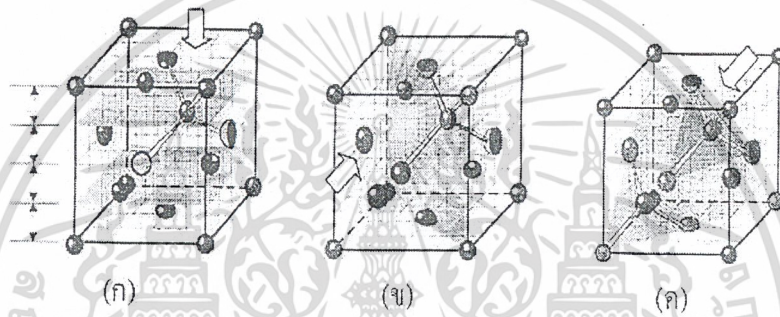
ในระนาบต่างๆ ของซิลิกอน จะมีจำนวนพันธะที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า (เหลือเป็นแขนยื่น) จำนวนพันธะที่กำลังถูกกัด และจำนวนพันธะที่จะถูกดึงออกสู่สารละลายเป็นขั้นต่อไปไม่เท่ากัน กล่าวคือ

- (1) ระนาบ(100) อะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่จะดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ

(2) ระนาบ(111) จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้ไปเผยแพร่ในช่องทางอื่นใด
นี่จึงเป็นระนาบที่แข็งแกร่งที่สุด
ไม่เว้นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ระนาบ(110) จะมีสามอะตอมอยู่ที่ผิวหน้า หนึ่งอะตอมอยู่ใต้ผิวหน้าและหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า แม้ว่าจะมีสองอะตอมที่มีพันธะร่วมกับอะตอมตรงกลางที่อยู่บนผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่อยู่ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดออกไปพร้อมกัน ระนาบ (100) จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงน้อยกว่าระนาบ (100) และระนาบ (111)

ในรูปที่ 4.15 เป็นจำนวนพันธะในแต่ละระนาบของซิลิกอน ซึ่งแบ่งความใกล้เคียง จากสารละลายเป็นสามระดับ คือ อะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า อะตอมที่กำลังถูกกัดและอะตอมที่ถูกกัดเป็นอันดับต่อไป



รูปที่ 4.15 พันธะในอะตอมซิลิกอนระนาบต่างๆ (ก) ระนาบ (100) (ข) ระนาบ (110)

(ค) ระนาบ (111) (ลูกศรหมายถึงทิศทางเข้าไปกัดของสารละลายแอนไอโซโทรปิก)

เนื่องจากการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกนั้น จะปรากฏการเลือกกัด ดังนั้นร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน ในตารางที่ 3.2 เป็นความสัมพันธ์ของมุมระหว่างระนาบ $\{HKL\}$ และระนาบ $\{hkl\}$ โดยเป็นตารางที่ใช้ตรวจสอบว่า ระนาบที่เหลือจากการกัดควรเป็นระนาบใด

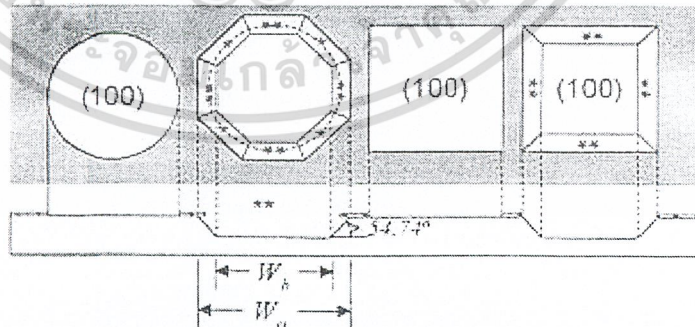
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 มุมระหว่าง {HKL} กับ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของระนาบต่างๆ

{HKL}	{hkl}	มุมระหว่าง {HKL} และ {hkl}				
100	100	0.00	90.00			
	110	45.80	90.00			
	111	54.74				
	210	26.56	63.43	90.00		
	211	35.26	63.90			
	221	48.19	70.53			
	310	18.43	71.56	90.00		
	311	25.24	72.45			
	110	110	0.00	60.00	90.00	
		111	35.26	90.00		
210		18.43	50.77	71.56		
211		30.00	54.74	73.22	90.00	
221		19.47	45.00	76.37	90.00	
310		26.56	47.87	63.43	77.08	
311		31.48	64.76	90.00		
411		10.00				
113		64.7				
115		74.2				
117	78.6					

ตั้งที่กล่าวมาแล้วว่า การวางบริเวณเล็อกกัดเมื่อเทียบกับทิศทางหนึ่งๆ เป็นสิ่งกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของหลุมที่เกิดจากการกัด ในรูปที่ 4.16 เป็นอัตราการกัดซิลิกอนระนาบ (100) ด้วย KOH

* = (100)
** = (111)



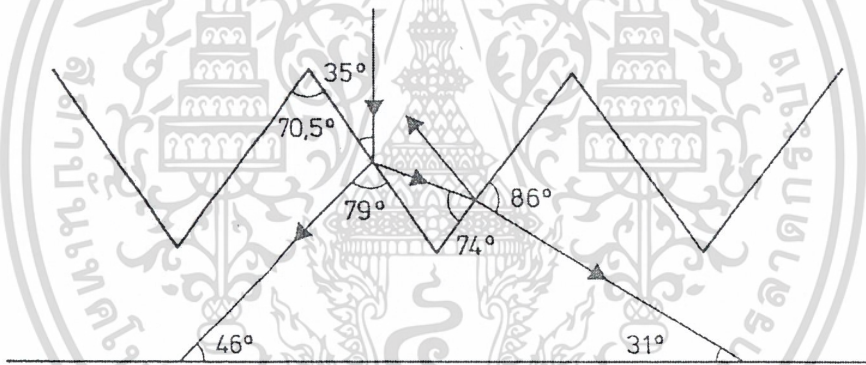
รูปที่ 4.16 การกัดแบบแอนไอโซโทรปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

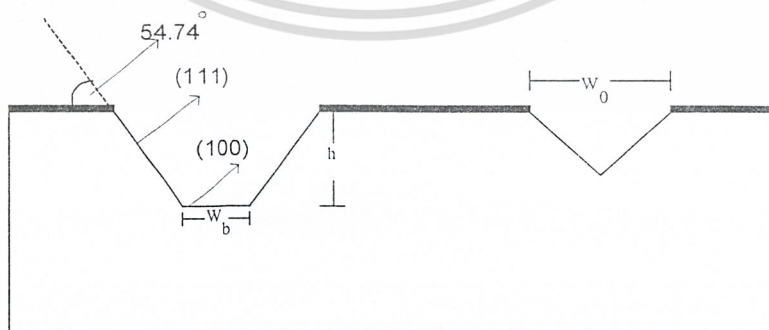
หลุมที่เกิดจากการกัดเมื่อเปิดช่องเลือกกัดบนระนาบผลึกที่ไม่เหมือนกัน จะมีความแตกต่างกัน แต่ผนังที่เกิดขึ้นก็คือระนาบที่มีอัตราการกัดช้าที่สุด สำหรับแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) ถ้าเปิดช่องเลือกเป็นวงกลม หลุมที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยผนังแปลด้าน ผนังสี่ด้านเรียงทำมุม 54.74 องศา ขนานกับพื้นระนาบ (100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทาง <110> จากตารางที่ 4.1 พบว่าระนาบนั้นคือระนาบ (111) และยังมีระนาบ(100) ร่วมประกอบเป็นผนังดังรูปที่ 4.16 แต่ถ้าเปิดบริเวณเลือกกัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านตั้งขนานกับทิศทาง <110> จะได้ผนังสี่ด้านเป็นระนาบ (111) ทั้งหมด พื้นหลุมจะเป็นระนาบ (100) โดยความสัมพันธ์ของเรขาคณิตที่แน่นอนของมุมระนาบ (100) และ ระนาบ(111) จะพบว่า ถ้าปากหลุมมีความกว้างเท่ากับ W_0 และการกัดจนได้ความลึกเท่ากับ h จะได้ขนาดของความกว้างหลุม W_b ดังนี้

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

เมื่อ R เป็นอัตราการกัดในแนวตั้ง และ t เป็นเวลาในการกัด



รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผิวแบบพีระมิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.18 แสดงการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอนระนาบ(100)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

5.1 ขั้นตอนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น

5.1.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอนและการเช็คคุณสมบัติ

- แผ่นซิลิกอนชนิดพีระนาบ(100)
- พิกัดความต้านทาน $0.85 \Omega \cdot \text{cm}$

5.1.2 การทำความสะอาดผิวของซิลิกอนครั้งแรก (Piraha)

- 1) H_2O_2 : H_2SO_4 (Piraha)
- 1 : 3

- 2) HF 5% - 10 %
- HF : H_2O (DI)
- 30 : 1000

- 3) BHF
- HF : NH_4F
- 1 : 10

- นำแผ่นทิ้งไว้ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water : DI) ไหลผ่าน
- จุ่มแผ่นใน Piraha 10 นาที (เพื่อกัดเอาเศษโลหะ , สารประเภทไขมันออก)
- ล้างน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านประมาณ 10 นาที
- จุ่มใน HF 3 % ประมาณ 1 นาที นับตั้งแต่ ออกไซด์ ออกหมด
- ล้างน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่าน ประมาณ 5 – 10 นาที
- ดึงแผ่นขึ้นจากน้ำช้าๆ เพื่อให้น้ำออกหมด
- เป่าแห้งด้วย N_2

5.1.3 กระบวนการออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 3 ชม.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc/min 2 ชม.
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 1 ชม.
- ใช้อุณหภูมิเตา 1100 องศาเซลเซียส , อุณหภูมิน้ำ 90 องศาเซลเซียส
- จะได้ SiO_2 มีความหนาประมาณ 9,000 Å ดังรูปที่ 1

5.1.4 กระบวนการสร้างผิวหน้าไมโครกราฟ

5.1.4.1 เปิดช่องออกไซด์ที่จะใช้ทำการกัด กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ (เปิดช่องออกไซด์ที่จะใช้ทำการกัด) ใช้ Photo mask 1

- อบแผ่นไว้ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az 1350) แล้วนำไปสปินที่ความเร็ว 4,000 rpm
- อบฟิล์มที่ 85 °c นาน 20 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์มโดย
- จุ่มลงใน Az Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Az Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

5.1.4.2 กัดซิลิกอนโดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) ความเข้มข้น 4 โมลาร์ กวนสารละลายด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 90 °C มีอัตราการกัด 1 $\mu\text{m}/\text{min}$

5.1.4.3 กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

จะได้แผ่นซิลิกอนดังรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4.4 กระบวนการใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer for Oxidation 9 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- จะได้ดังรูปที่ 3

5.1.5 กระบวนการออกซิเดชัน

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 75 นาที
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc/min 30 นาที
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 80 นาที
- ใช้อุณหภูมิเตา 1100 องศาเซลเซียส , อุณหภูมิน้ำ 90 องศาเซลเซียส
- จะได้ SiO_2 มีความหนาประมาณ $5,000 \text{ \AA}$
- จะได้ดังรูปที่ 4

5.1.6 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (เพื่อลอกออกไซด์ด้านหน้า) ใช้ Photo mask 2

- ออบแผ่นไว้ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az 1350) แล้วนำไปสปินที่ความเร็ว 4,000 rpm
- ออบฟิล์มที่ 85°C นาน 20 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย
- จุ่มลงใน Az Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Az Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

5.1.7 กระบวนการใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer for Oxidation 6 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

5.1.8 กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

5.1.9 กระบวนการ Pre-deposition

- Phosphorus deposition โดยวิธี spin doped (3m – 31)
- ล้างหลอดหยดด้วย Isopropyl Alcohol
- spin 3000 rpm 20 วินาที
- ล้างหลอดหยดด้วย Isopropyl Alcohol
- อบแผ่น 150 องศาเซลเซียส 10 นาที
- นำแผ่นใส่เตา Phosphorus Drive in / ปากเตา 1 นาที ในเตา 5 นาที อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส
- deposit ด้วย N_2 700 cc/min นาน 40 นาที

5.1.10 ลอกชั้น Phosphorus Glass

- จุ่มใน HF 5 % จนน้ำไม่เกาะแผ่น
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- จะได้ดังรูปที่ 5
- ลอกออกให้หมดทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยใช้สาร Buffer for Phosphorus ประมาณ 6 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.11 กระบวนการ Drive in อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

- ด้วย N_2 1000 cc/min 60 นาที
- ลอกชั้น Phosphorus Glass อีกครั้ง

5.1.12 กระบวนการสร้างขั้วโลหะ (ใช้วิธี lift off)

5.1.12.1 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (สร้างขั้วโลหะด้านหน้า) ใช้ photo mask 3

- อบแผ่นไว้ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az1350) แล้วนำไปสปินที่ความเร็ว 2000 rpm
- อบฟิล์มที่ $85^{\circ}C$ นาน 20 นาที (prebake)
- ดังรูปที่ 6
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย
- จุ่มลงใน Az Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Az Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ $85^{\circ}C$ นาน 30 นาที (postbake)

5.1.12.2 การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator ที่ความดัน 1.6×10^{-6} Torr ดังรูปที่ 7

5.1.12.3 การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)

- จุ่มในสาร Acetone
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- จะได้แผ่นซิลิกอนดังรูปที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.12.4 สร้างขั้วโลหะด้านหลัง

- ทาหน้ายาไวแสงชนิดบวก (Az) ด้านข้างแผ่นซิลิกอน
- การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator ที่ความดัน 1.6×10^6 Torr
- ลอกฟิล์มด้านข้างโดยจุ่มใน Acetone 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2
- จะได้แผ่นซิลิกอนดังรูปที่ 9

5.1.13 กระบวนการ Sintering ที่ $350^\circ C$

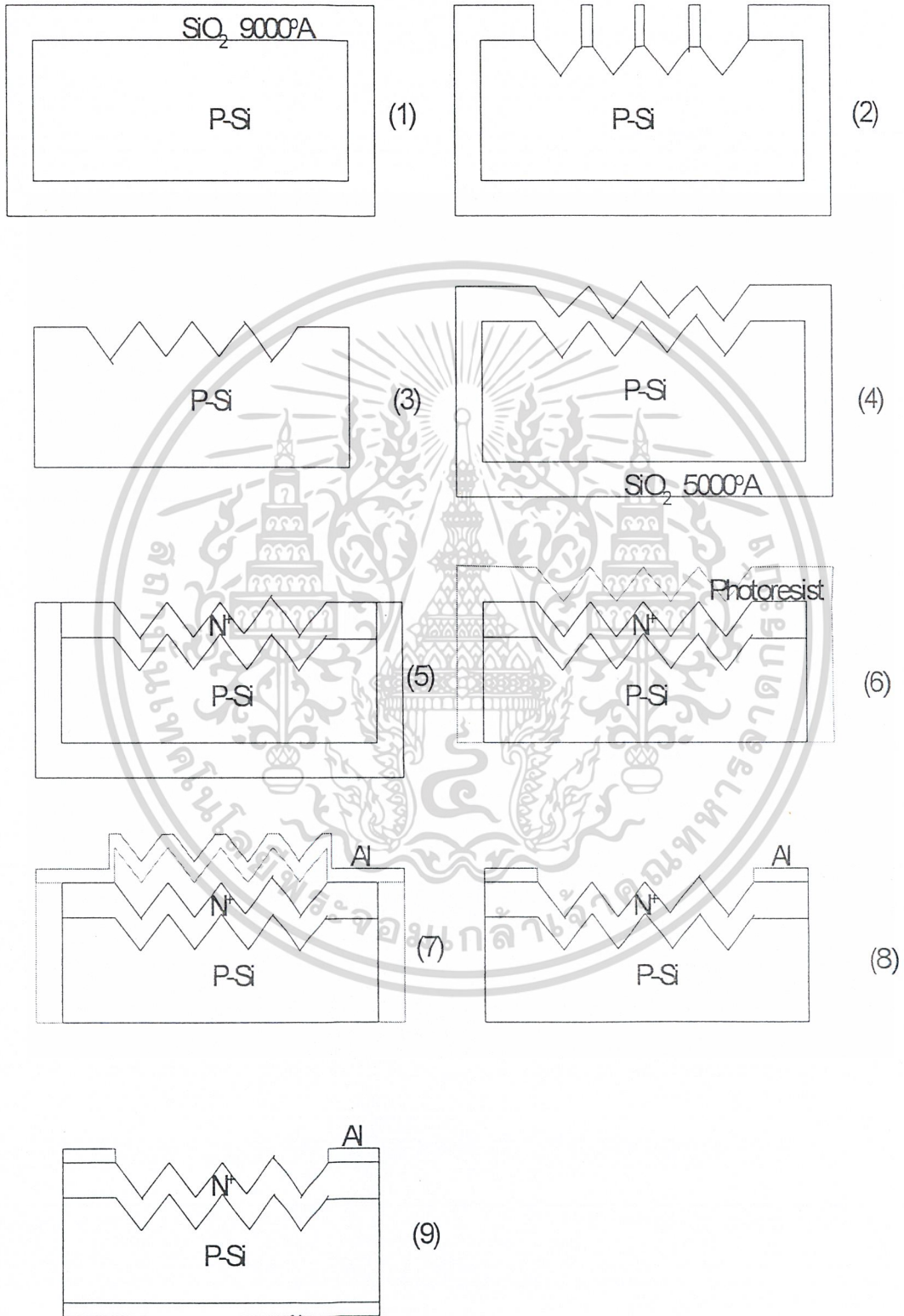
เพื่อให้ได้ส่วนสัมผัสที่เป็นโอห์มมิก โดยทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจน

- Dry N_2 1000 cc/min นาน 10 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ขั้นตอนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น (มี Back Surface Field : BSF)

จะมีวิธีการสร้างเหมือนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบไม่มี BSF แต่จะเพิ่มกระบวนการสร้างชั้น BSF โดยจะทำกระบวนการ กระบวนการ Pre-deposition ที่เป็น Boron deposition และมีการสร้างออกไซด์เพื่อเป็น Diffusion mask ก่อนที่จะทำ Phosphorus deposition

5.2.1 กระบวนการสร้างชั้น BSF

5.2.1.1 กระบวนการโฟโวลติโทกราฟี (เพื่อลอกออกไซด์ด้านหลัง)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส 30 นาที
- เครื่องน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) โดยใช้วิธีการทางด้านหน้า
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียส 20 นาที

5.2.1.2 กระบวนการใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer for Oxidation 6 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

5.2.1.3 กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

5.2.1.4 กระบวนการ Pre-deposition

- Boron deposition โดยวิธี spin doped (3m – 31)
- ล้างหลอดหยดด้วย Isopropyl Alcohol
- spin 3000 rpm 20 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ล้างหลอดหยดด้วย Isopropyl Alcohol เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบแผ่น 150 องศาเซลเซียส 10 นาที
- นำแผ่นใส่เตา Boron Drive in / ปากเตา 1 นาที ในเตา 5 นาที อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส
- deposit ด้วย N_2 700 cc/min นาน 40 นาที

5.2.1.5 ลอกชั้น Boron Glass

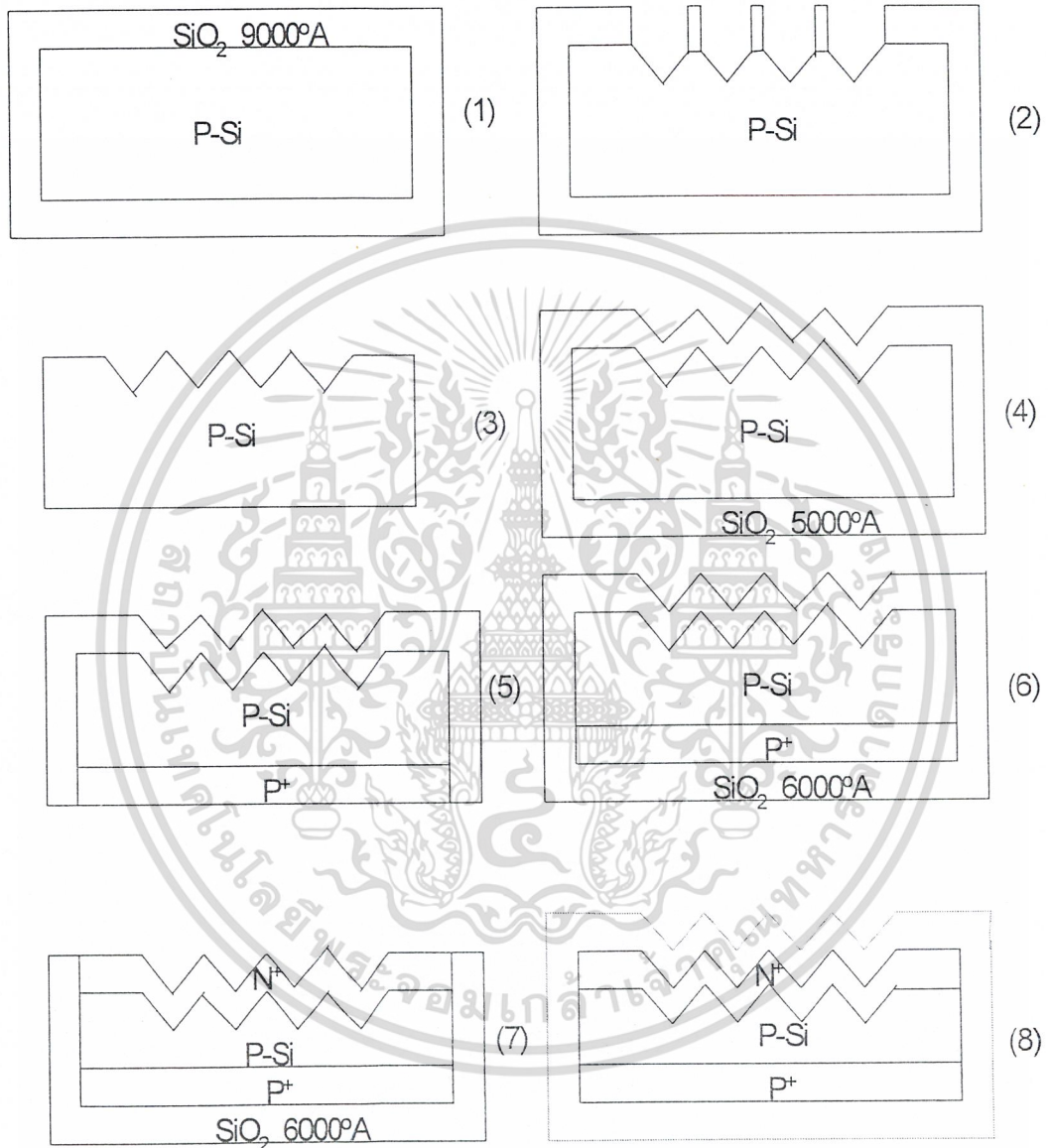
- จุ่มใน HF 5 % จนน้ำไม่เกาะแผ่น
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- จะได้แผ่นซิลิกอนดังรูปที่ 5
- ลอกออกไซด์ออกให้หมดทั้งด้านหน้าและด้านหลังโดยใช้สาร Buffer for Boron
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ (DI) แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

5.2.2 กระบวนการ Drive in และสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 15 นาที
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc/min 60 นาที
- จะได้ออกไซด์ที่มีความหนา 6000 \AA
- จะได้แผ่นซิลิกอนดังรูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น (มี BSF)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

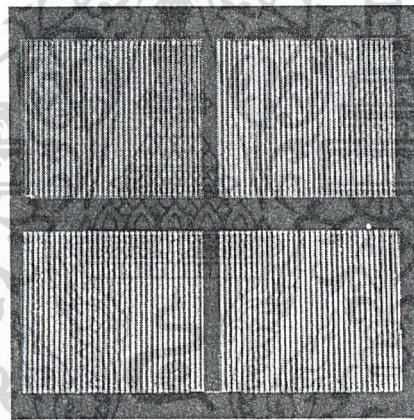
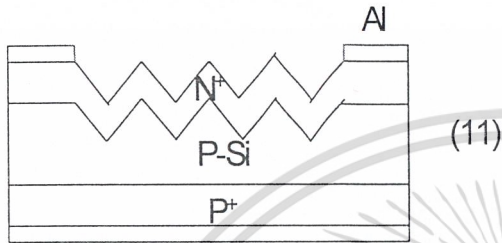
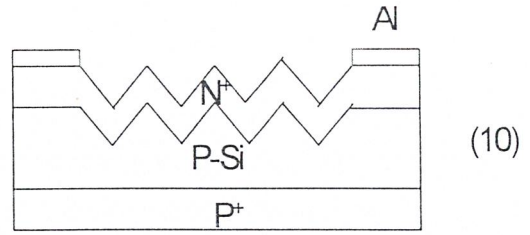
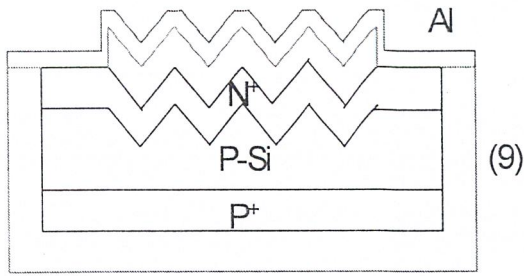


Photo Mask 1

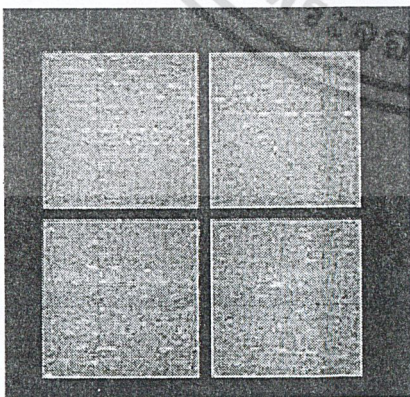


Photo Mask 2

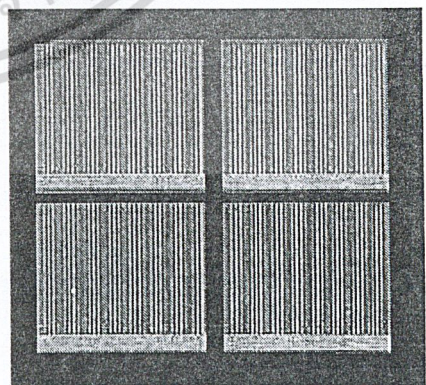


Photo Mask 3

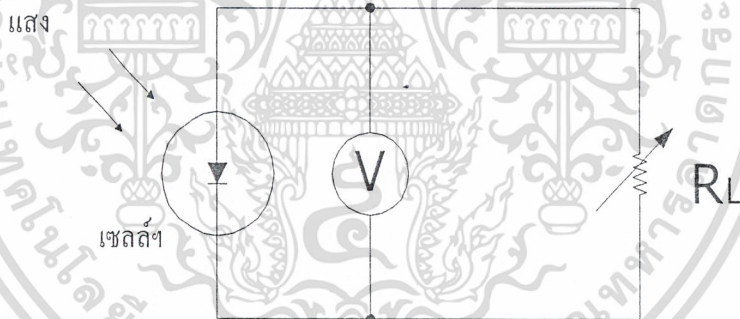
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลอง

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาทดลองนั้นต่อวงจรทดลองตามรูปที่ 6.1 โดยให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับ โหลดและ โวลท์มิเตอร์วัดแรงดันตกคร่อมโหลด
2. เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโหลด จะทำให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไปก็จะได้กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์
3. คำนวณค่า P_m , V_m , I_m , F.F และ η ของเซลล์แสงอาทิตย์

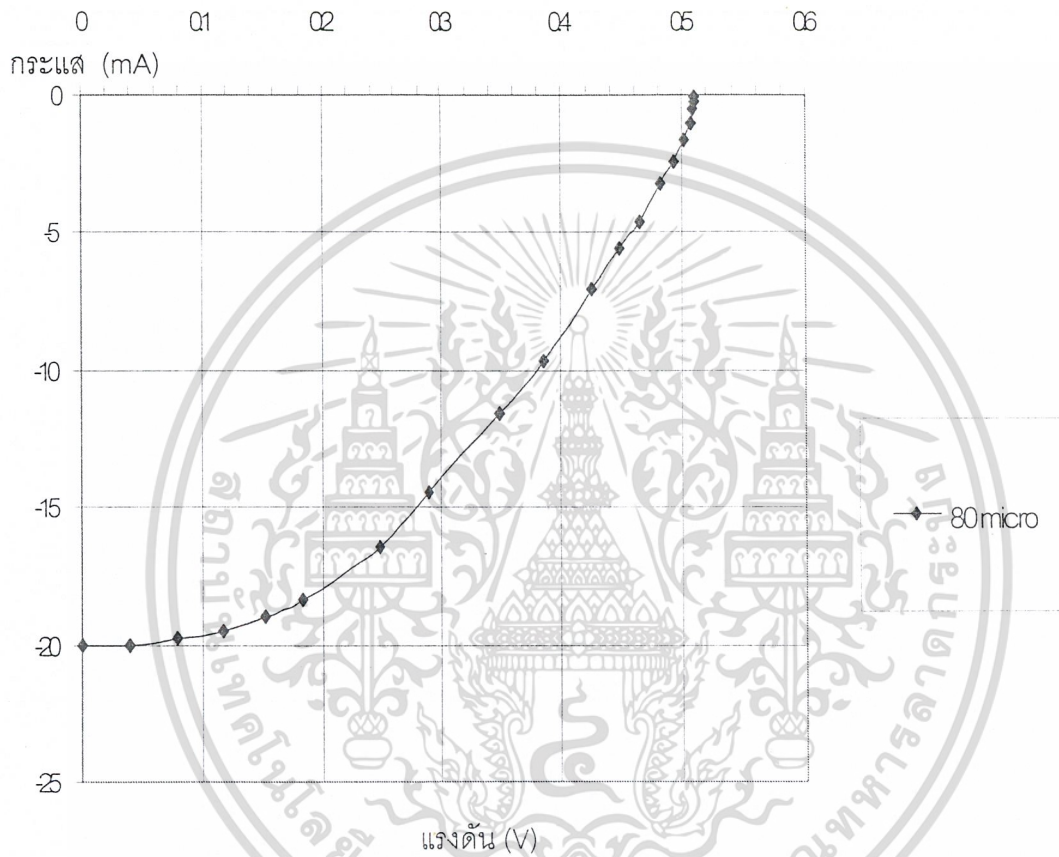


รูปที่ 6.1 การวัดคุณสมบัติของเซลล์ฯ ขณะได้รับแสงโดยใช้มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

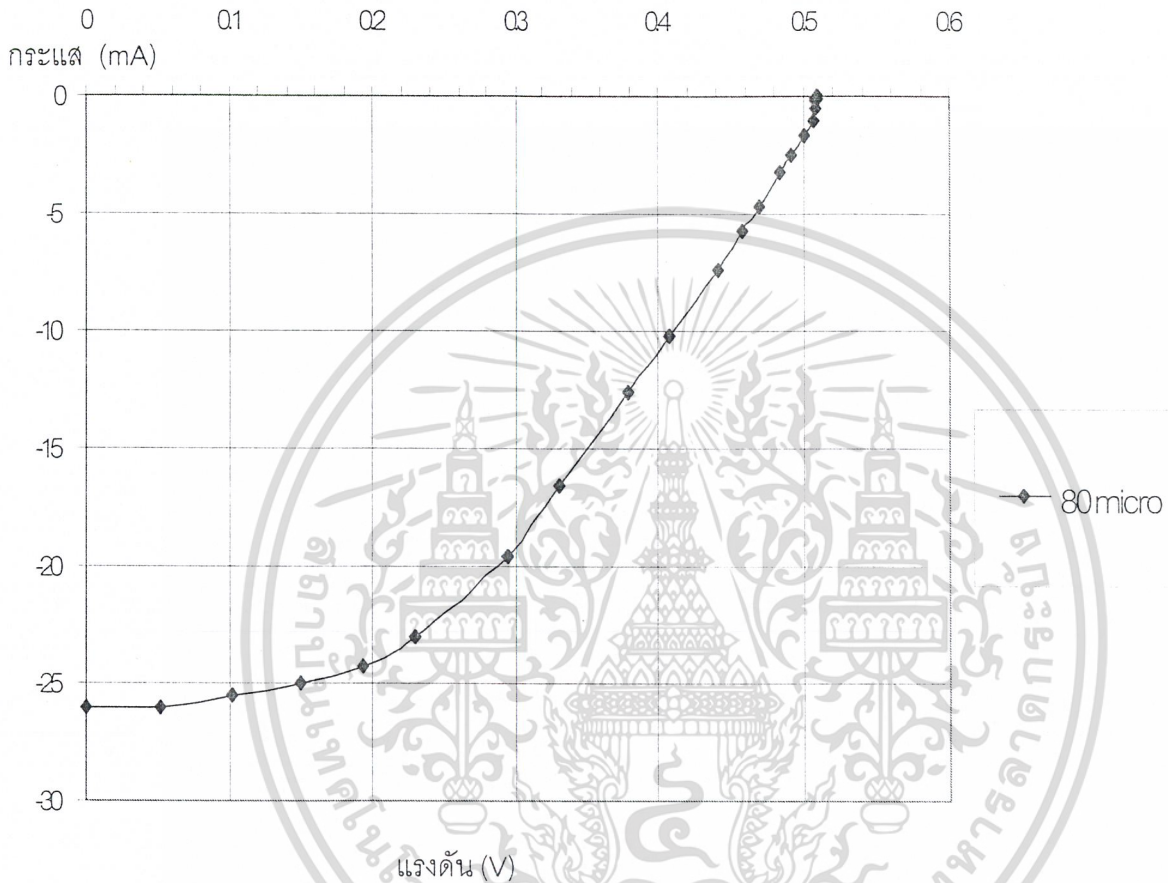
1. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น ไม่มี BSF ที่ ขนาดความกว้าง 80 ไมโครเมตร



อุณหภูมิขณะวัด	=	40	องศาเซลเซียส
กระแสขณะลัดวงจร(Isc)	=	20	มิลลิแอมป์
แรงดันขณะวงจรเปิด(Voc)	=	0.51	โวลท์
พลังงานสูงสุดที่ได้(Pm)	=	4.2	มิลลิวัตต์
ฟิลแฟคเตอร์	=	0.41	
ประสิทธิภาพ	=	8.33	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

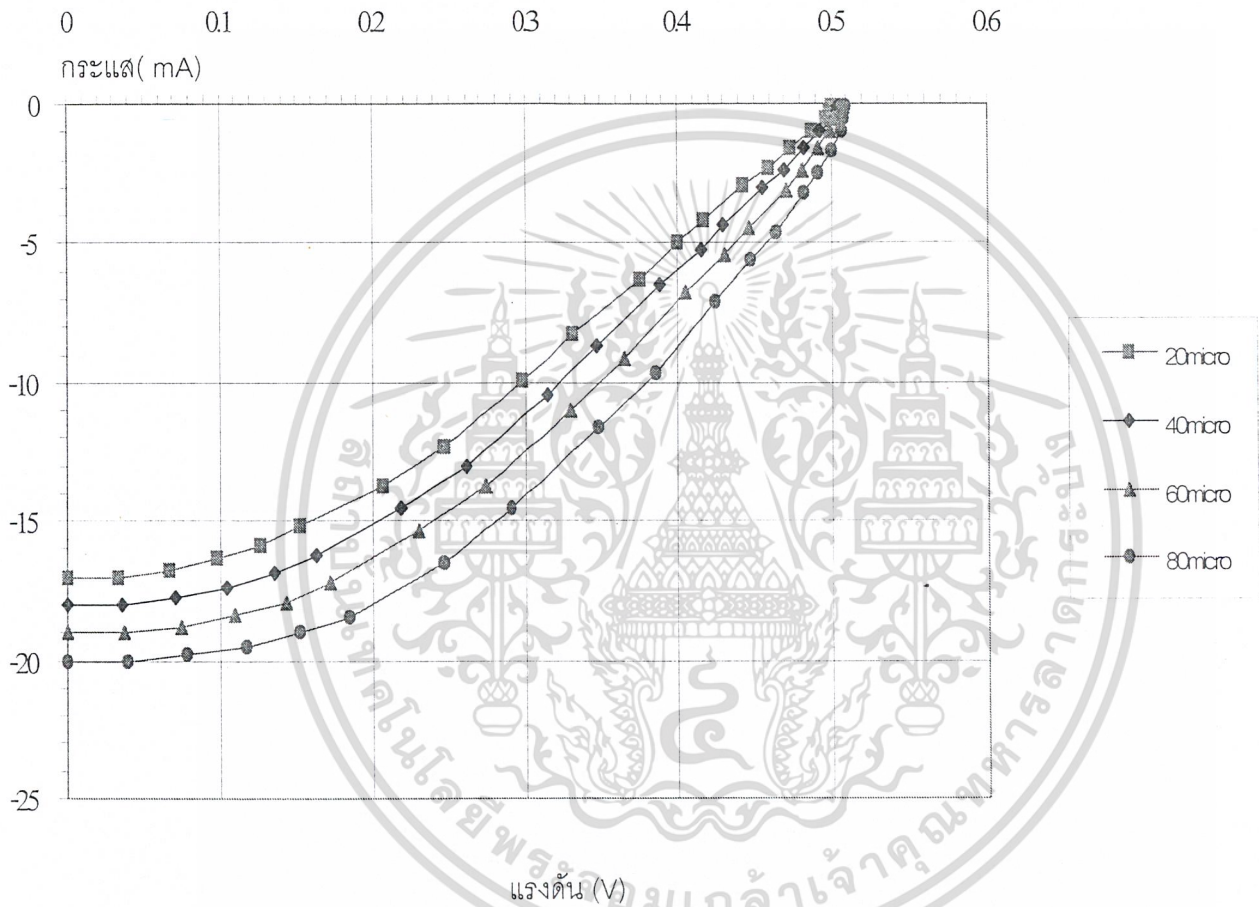
2. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น มี BSF ที่ ขนาดความกว้าง 80 ไมโครเมตร



อุณหภูมิขณะวัด	=	40	องศาเซลเซียส
กระแสขณะลัดวงจร(Isc)	=	26	มิลลิแอมป์
แรงดันขณะวงจรเปิด(Voc)	=	0.51	โวลท์
พลังงานสูงสุดที่ได้(Pm)	=	5.76	มิลลิวัตต์
ฟิลแฟคเตอร์	=	0.45	
ประสิทธิภาพ	=	11.43	เปอร์เซ็นต์

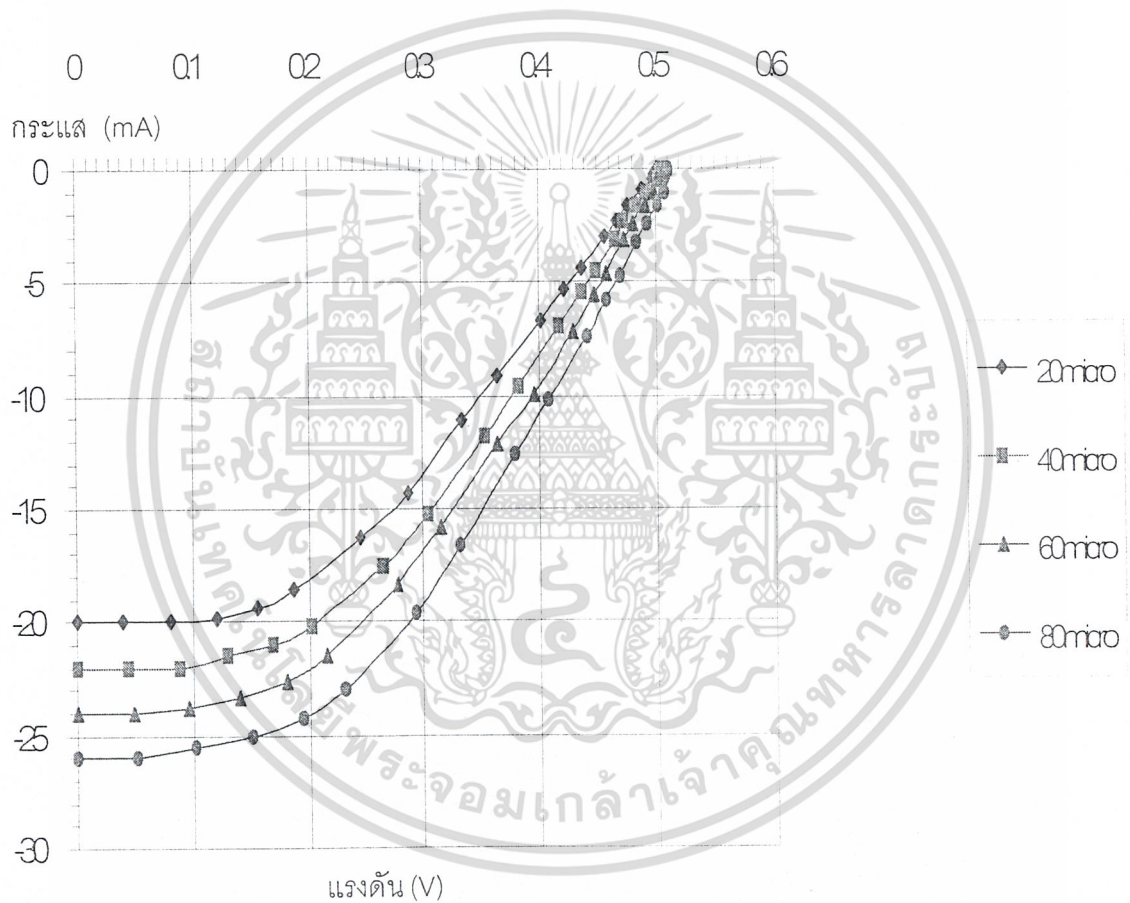
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น ไม่มี BSF ที่ ขนาดความกว้าง 20 , 40 , 60 และ 80 ไมโครเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น มี BSF ที่ ขนาดความกว้าง 20 , 40 , 60 และ 80 ไมโครเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบผิวไมโครกรุปที่มี Back Surface Field จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบไม่มี Back Surface Field และแบบเซลล์ปกติ

โดยทฤษฎีที่อ้างอิงว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี Back Surface Field คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้นเพราะประสิทธิภาพของการรวบรวมพาหะที่ด้านหลังของเซลล์ดีขึ้น และแรงดันไฟฟ้าวงจเปิดเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าย้อนกลับอ้อมตัวลดลง

$$\text{กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอ้อมตัวลดลง} \quad I_0 = qA \left(\frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} \right) \quad (1)$$

จากสมการ (1)

$$\text{ทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจเปิดเพิ่มขึ้น} \quad V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2)$$

ลักษณะเซลล์	ไม่มี BSF ที่ ขนาดความกว้าง 80 ไมโครเมตร	มี BSF ที่ ขนาดความกว้าง 80 ไมโครเมตร
Voc	0.51 V	0.51 V
Isc	20 mA	26 mA
ประสิทธิภาพ(%)	8.33	11.43

2. ขนาดความกว้างของปากหลุมในการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกในซิลิกอนในระนาบ(100) เป็นไปตามสมการ

$$W_0 = W_b + \sqrt{2}h \quad (3)$$

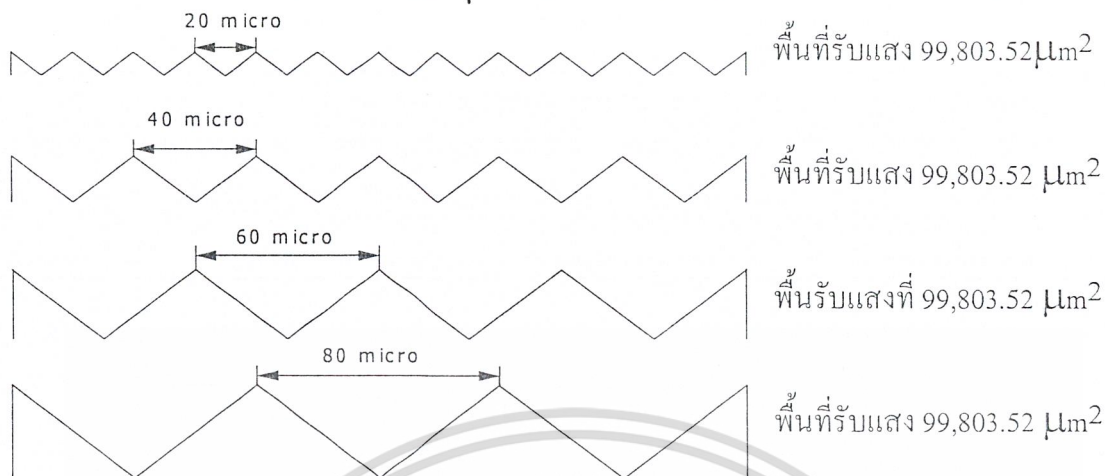
โดย W_0 คือ ความกว้างของปากหลุม

h คือ ความลึกของก้นหลุม

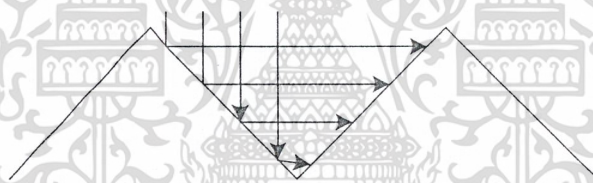
W_b คือ ความกว้างของก้นหลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองคำนวณที่พื้นที่ $240 \times 240 \mu\text{m}^2$ ซึ่งจะได้ขนาดพื้นที่รับแสงเท่ากับทั้ง 4 เซลล์



ซึ่งจะพบว่าที่ความกว้างปากหลุมต่างกัน แต่มีพื้นที่ของระนาบเท่ากันจะมีพื้นที่รับแสงเท่ากัน แต่ต่างกันที่ความลึกของหลุม เมื่อความกว้างปากหลุมมากขึ้น ทำให้ความลึกมากขึ้น แสงที่เดินทางเข้ามาสะท้อนที่ผิวพีระมิดมีการสะท้อนในผลึกมากขึ้น และมีการเบี่ยงเข้าสู่เนื้อผลึกมากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้กระแสที่ได้มีค่ามากตามความกว้างของปากหลุม



ความกว้างของปากหลุม แบบไม่มีBSF	20 ไมโครเมตร	40 ไมโครเมตร	60 ไมโครเมตร	80 ไมโครเมตร
Isc	17mA	18mA	19mA	20mA

ความกว้างของปากหลุม แบบมีBSF	20 ไมโครเมตร	40 ไมโครเมตร	60 ไมโครเมตร	80 ไมโครเมตร
Isc	20mA	22mA	24mA	26mA

งานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการวิจัยและทดลองสร้างเซลล์ขึ้นมา โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ ทางด้านสารกึ่งตัวนำที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืนกฎหมาย
จากกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ทำการหาเงื่อนไขการโคปสตาร์เจือ(พอสฟอรัส)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการโคปสารเจืออุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 950-970 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้ทำให้ค่าแรงดันเปิดวงจร(V_{oc}) มากที่สุด และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีความต้านทานอนุกรม(Series resistance) R_s น้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติ ความต้านทานอนุกรมนี้อาจเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ เช่น ความต้านทานอนุกรมของสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานของรอยต่อ p-n ความต้านทานของขั้วไฟฟ้า ความต้านทานที่เกิดจากกาเวนที่นำมาต่อขั้วอุณหภูมิเย็นเพื่อนำต่อไปใช้งาน

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีความต้านทานชัณฑ์(Shunt Resistance) R_{sh} มากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติความต้านทานชัณฑ์อาจมีค่าลดลง อันเนื่องจากการเกิดร้าวของกระแสไฟฟ้าที่ขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือการสร้างขั้วโลหะ ได้ใช้วิธี Vacuum Evapolaion จะต้องทำให้อุปกรณ์เคลือบโลหะ(Evaporator)อยู่ในสถานะเป็นสุญญากาศมากที่สุดเพื่อให้ขั้วโลหะที่ได้นำไฟฟ้าได้ดีที่สุด และกระบวนการสร้างเซลล์นี้ใช้ความกดดันบรรยากาศประมาณ 10^{-7} ทอร์และในกระบวนการสกัดอุณหภูมิโดยวิธี Lift-off สิ่งที่สำคัญคือ ความหนาของชั้น Photoresist ต้องหนากว่า ความหนาของชั้นขั้วโลหะ เพื่อให้บริเวณที่เคลือบด้วย Photoresist สามารถละลายออกไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ศัพท์เทคนิค

บริเวณปลอดพาหะ	Depletion Region
ศักย์สัมผัส	Contact Potential
การรวมตัวของพาหะ	Recombination
การเกิดของพาหะ	generation
ปรากฏการณ์การพังทลาย	Breakdown Phenomena
การพังทลายแบบซีเนอร์	Zener Breakdown
การพังทลายแบบอะวาแลนช์	Avalanche Breakdown
จุดหลอมเหลว	Melting point
ความดันของไอ	Vapor Pressure
สารเจือขัปลึก	deep impurity
สัมประสิทธิ์การแพร่	diffusion coefficient
การแพร่แบบเข้าไปแทนที่	Substitutional diffusion
ช่วงอายุ	lifetime
พิกัดความต้านทาน	Resistivity
อายุพาหะ	carrier lifetime
ค่าโซลิด โซลูบิลิตี	Solid solubility
แถบวาเลนซ์	Valance band
แถบความนำ	Conduction band
ระดับพลังงาน	Deep acceptor
ปรากฏการณ์ชดเชย	compensation
ศูนย์กลางการรวมตัว	recombination center
ค่าความเร็วของอุณหภูมิต่ำ	thermal velocity
ความต้านทานเชิงลบ	Negative sresistance
ภาคตัดขวางการจับยึด	Capture Cross Section
กระบวนการการจับยึด	Trapping Process

เอกสารนี้เป็นต้นฉบับที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นผลึก	Crytal wafer
ฐานรอง	Wafer
กระจกต้นแบบ	Photo mask
กระบวนการสร้าง	Photolithography process
กระบวนการสร้างในแนวระนาบ	Metallization process
กระบวนการออกซิเดชัน	Oxidation process
กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	Dry Oxidation process
กระบวนการโซลคาลาสกี	Czochralski process
สกัดชั้นออกไซด์	Oxide Etching



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

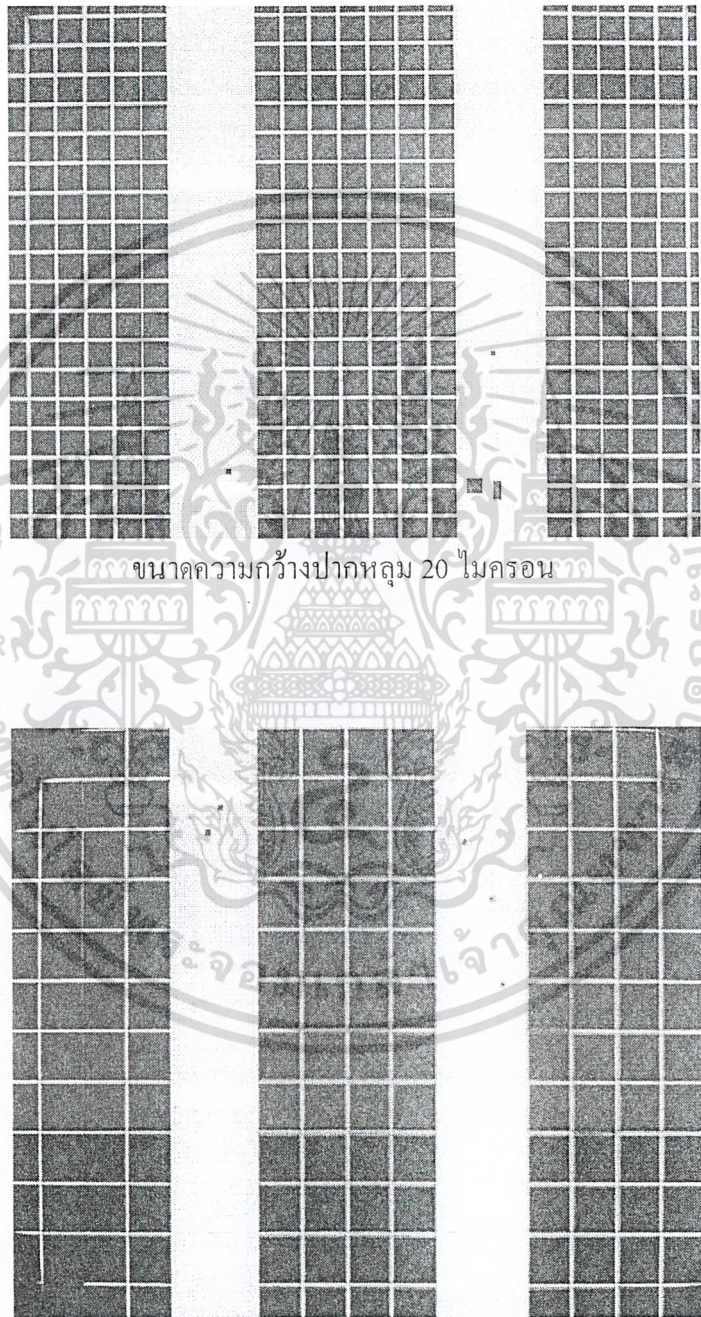
สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
N_D	ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้	cm^{-3}
N_A	ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ	cm^{-3}
N_{AU}	ความหนาแน่นของอะตอมทอง	cm^{-3}
n	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	cm^{-3}
E_A	ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้รับ	ev
E_C	ระดับพลังงานที่ขอบล่างสุดของแถบความ	ev
E_V	ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้ให้	ev
E_C	ระดับพลังงานที่ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์	ev
N_C	effective densities of state ในแถบความนำ	cm^{-3}
N_V	effective densities of state ในแถบวาเลนซ์	cm^{-3}
K	ค่าคงที่ของโบลซ์แมน (Boltzmann's constant) มีค่า $1.38 \times 10^{-16} \text{ erg} / ^\circ\text{K}$ หรือ $1.38 \times 10^{-16} \text{ J} / ^\circ\text{K}$	
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์	($^\circ\text{K}$)
τ_{fo}	ช่วงอายุ (lifetime)	sec
σ_{jo}	capture cross-section	cm^2
V_j	ความเร็วของอุณหภูมิจึงพาหะ	$\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$
σ	ค่าภาคตัดขวางการจับยึด	cm^2
V_{th}	ค่าความเร็วของอิเล็กตรอน	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
P_m	ค่ากำลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์	watt
$F.F$	ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	-
η	ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

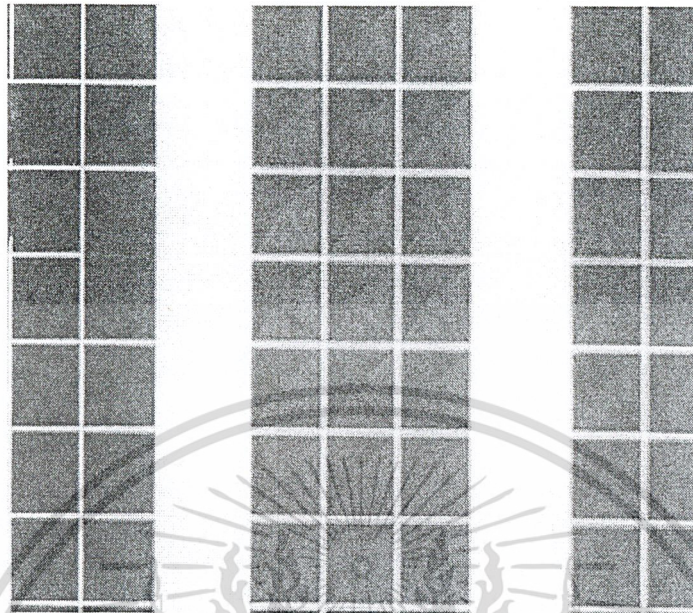
ภาคผนวก ก

ขนาดความกว้างของปากหลุมเซลล์แสงอาทิตย์



ขนาดความกว้างปากหลุม 40 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ขนาดความกว้างปากหลุม 60 ไมครอน

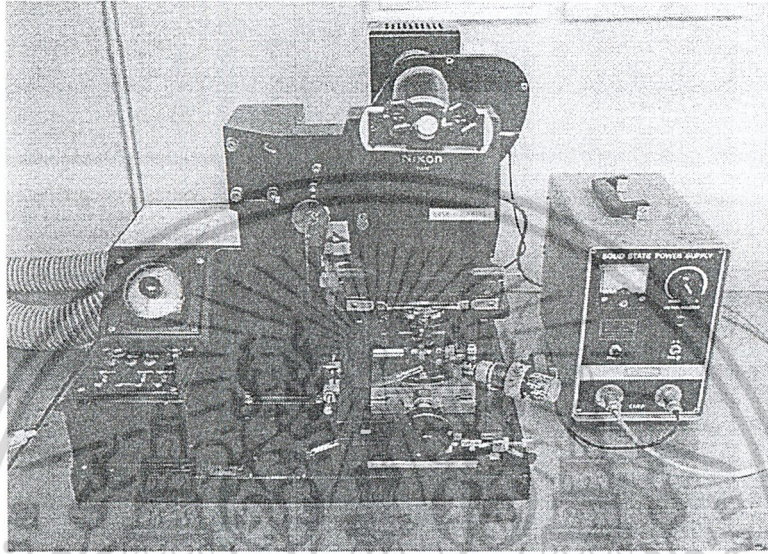


ขนาดความกว้างปากหลุม 80 ไมครอน

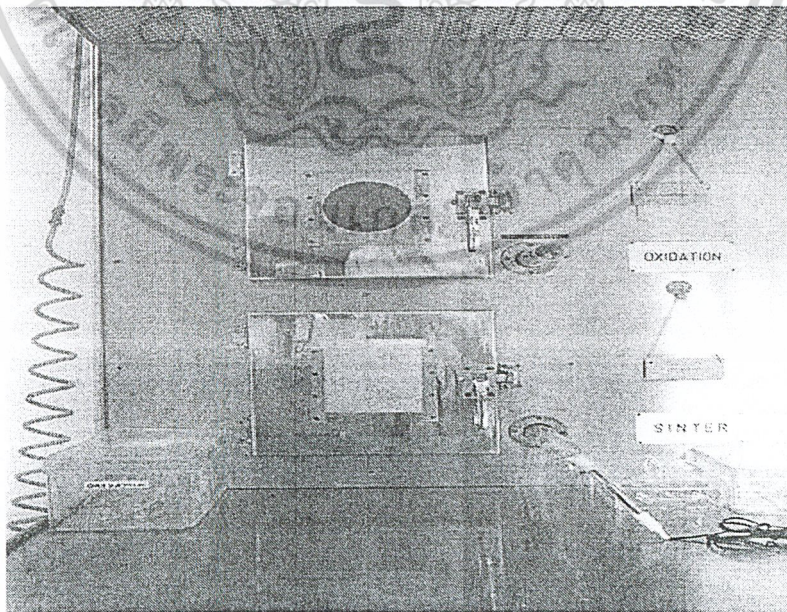
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

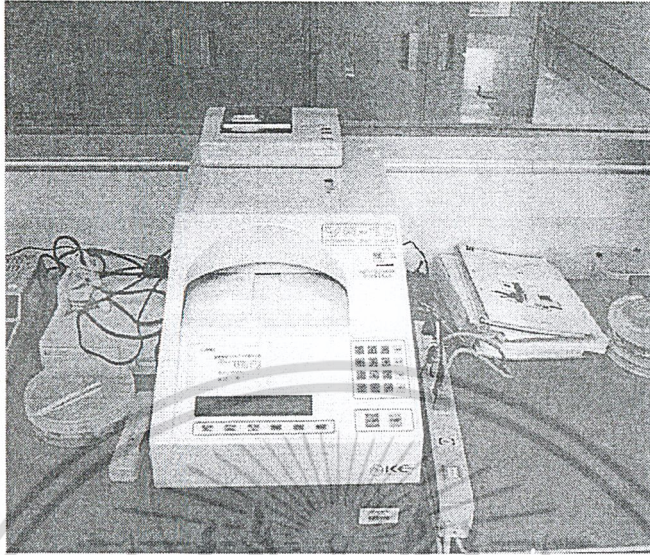
อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์



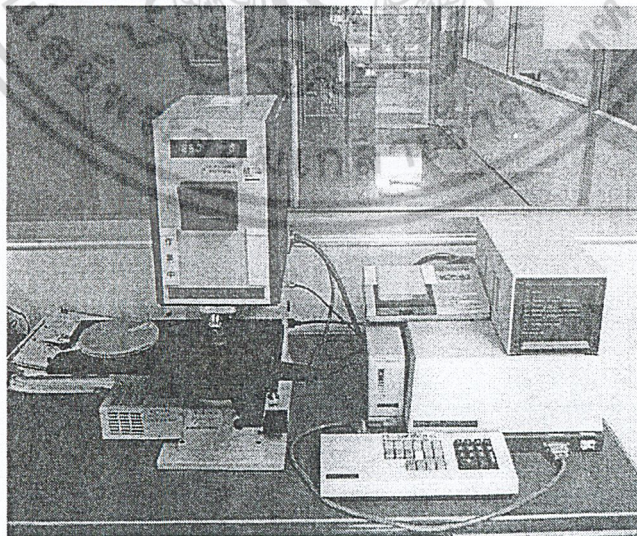
Mask Allignment



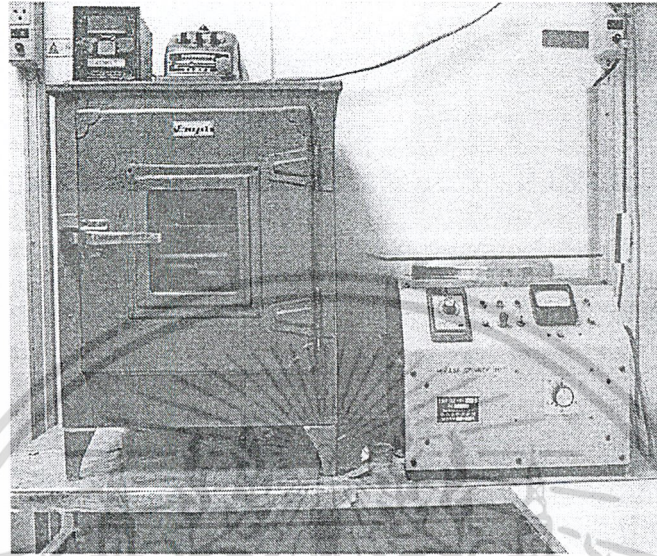
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการสร้างออกไซด์ และการ sintering ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



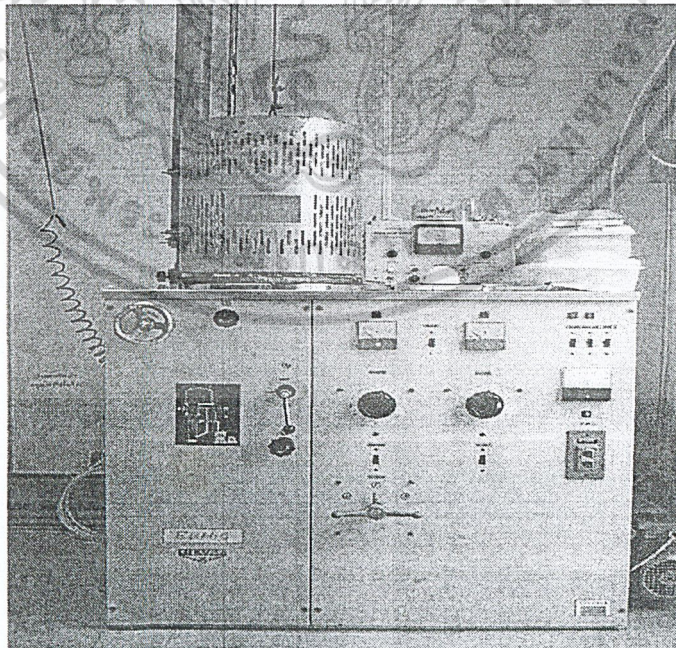
เครื่องวัดความต้านทานแผ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

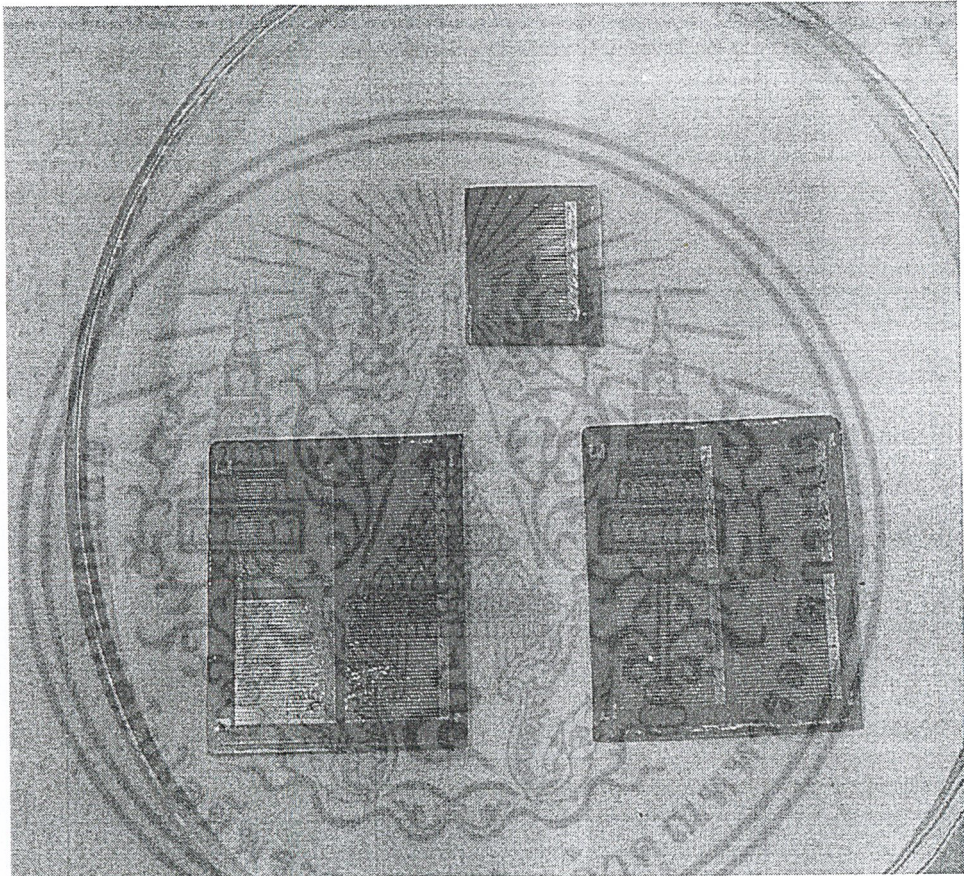


เครื่อง spin และเตาอบแผ่น ที่ใช้ในการ pre deposition



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาเครื่องเคลือบโลหะในศตวรรษที่ ๒๑ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง



เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทดลองสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการสร้างและการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์สำเร็จลงได้ก็ต้องขอบคุณ
นาย ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์ นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีส่วน
ช่วยในการสร้าง การวัด และการทดลอง รวมทั้งให้คำปรึกษาต่างๆ

ขอขอบคุณ รศ. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำและ
แนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์ วีระศักดิ์ สนั่นภา นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง สมศักดิ์ เขียวศิริกุล,
”การศึกษาคุณลักษณะการกัดแบบค้ำหนึ่งทิศทางของซิลิคอนในสารละลาย TMAH”, การ
ประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 พ.ศ.2543, หน้า 725-728.
2. “เทคโนโลยีการสร้างและการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์”, ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
3. สมชัย วงษ์เมตตา, “ การสร้างและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน”
4. Adolf Goetzberger , Joachim Knobloch , Bernhard Voß , Fraunhofer Institute for Solar Energy
Systems , Freiburg , Germany , “Crystalline Silicon Solar Cells”
5. Martin A.Green ,”Solar Cells Operating Principles,Technology and System Applications”
6. Richrd C.Jaeger ,”Volume V Introduction to Microelectronic Fabrication”
7. Thomas Krygowski and Ajeet Rohatgi, Fellow,”A Simultaneously Diffused, Textured, In Situ
Oxide AR-Coated Solar Cell Process (STAR Process) for High-Efficiency Silicon Solar
Cells”,IEEE transactions on electron devices,vol .45,NO. 1,january 1998,p 194-199.
8. Yoon, S., Turner, G., Garboushian, V. “Thin , Lightweight , 18% Efficient Space Silicon Solar
Cell and Array”, 25th PVSC ; May 13-17 , 1996 :Washington , D.C.
9. Zhao Yuwen , Li Zhongming , Mo Chundong , Lu Kun , Li Zhiming,”High Efficiency Silicon
Solar Cells”,Frist WCPEC;Dec. 5-9,1994 ;Hawaii.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้