

ผลของอะตอมทองคำในรอยต่อ พี - เอ็น

Effect of Gold Atoms in p-n junction



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขที่.....

เลขทะเบียน 46289

วัน, เดือน, ปี 2 1 ส.ค. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ผลของอะตอมทองคำในรอยต่อ พี - เอ็น

Effect of Gold Atoms in p-n junction

โดย

นายชาณณรงค์ สมทอง เลขประจำตัว 42015172

นางสาวประภากร ชื่นทองคำ เลขประจำตัว 42015184

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเดช

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานเรื่อง      ผลของอะตอมทองคำในชนิดรอยต่อ พี-เอ็น  
Effect of Gold Atoms in p-n junction  
จัดทำโดย        นายชาญณรงค์ สมทอง เลขประจำตัว 42015172  
นางสาวประภากร จันทร์ทองดี เลขประจำตัว 42015184  
อาจารย์ที่ปรึกษา   รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช



รายงานนี้ได้ผ่านการตรวจสอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ.....*สมเกียรติ ศุภเดช*.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช)

วันที่ ๒๐ / ๗ / ๒๕๕๕

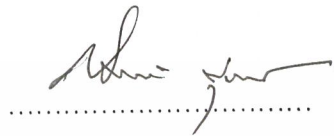
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของอะตอมทองคำในชนิดรอยต่อ พี-เอ็น

Effect of Gold Atoms in p-n junction

นายชาตยณรงค์ สมทอง เลขประจำตัว 42015172

นางสาวประภากร ชันทองดี เลขประจำตัว 42015184



(.....)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ผลของอะตอมทองคำใน ชนิดรอยต่อ พี-เอ็น

## Effect of Gold Atoms in p-n junction

นายชาญณรงค์ สมทอง

นางสาวประภากร ชันทองคี

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2544

### บทคัดย่อ

ในไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไป ในรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้คุณสมบัติของไดโอดเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้มีความเร็วในการทำงานสูงขึ้น เนื่องจากอะตอมทองคำมีคุณสมบัติเป็นศูนย์กลางการรวมตัว ( Recombination center ) ทำหน้าที่จับโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นอายุของพาหะโฮลและอิเล็กตรอนจึงลดลง

ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ที่มีการเติมอะตอมทองคำจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลมากขึ้นซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนแปลงไป

ในโครงการนี้จะได้เสนอผลการศึกษาและวิจัยคุณสมบัติไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งถูกเติมด้วยอะตอมทองคำโดยพิจารณาคุณสมบัติการนำกระแสของไดโอด ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง และไบอัสย้อนกลับรวมทั้งคุณสมบัติขณะได้รับแสงส่วนเซลล์แสงอาทิตย์จะพิจารณาคุณสมบัติไบอัสตรงขณะไม่ได้รับแสงและได้รับแสงที่มีความเข้มต่างกันเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็น ผลของการเกิดกระแส Generation Recombination current เนื่องจากทองคำ ได้อย่างชัดเจน

# Effect of Gold Atoms in p-n junction

Mr.Channarong Somthong

Miss. Prapakron Knthongdee

Assoc.Prof.Dr.Somkiat Supadech

2<sup>nd</sup> Semester, Education Year 2001

## Abstract

The property of diode which we add atoms of gold to PN junction will be changed to work faster. Because of atoms of gold have the recombination center property to catch hole and electron. Therefore the life time of hole and electron will be decrease.

In the PN solar cell which atoms of gold was added, the leakage current will be occur more which will be make the property of solar cell is change.

In this project, we propose the study result about the property of diode and solar cell which we add atoms of gold to PN junction . On this study we will make the concentrate to consider about the current conductivity property of diode when we add forward and reverse bias. For the solar cell, we will make consider about the property of the solar cell when we add forward bias on the difference light density. Anyway the result when we add atoms of gold to PN junction will be compared with the result when we don't add atoms of gold to PN junction.

Finally, the experimental result will be shown the clearly result of generation combination current which occurred by additional of gold.

## สารบัญ (ต่อ)

4.1.4	ทองคำเป็นตัวควบคุม lifetime	33
4.2	ข้อตั้งเขปการจับยึด (Trap Concept)	34
4.2.1	การจับยึด (Trapping)	
4.2.2	กระบวนการการจับยึด (Trapping Process)	35
บทที่ 5	การออกแบบและกระบวนการสร้าง	36
5.1	การออกแบบ	
5.1.1	การออกแบบไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น	
5.1.2	การออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น	38
5.2	ขั้นตอนการสร้างไดโอด	
5.2.1	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอนและการเจ็ทคุณภาพดี	
5.2.2	การทำความสะอาดผิวของซิลิกอนครั้งแรก	39
5.2.3	การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน	
5.2.4	การ Slite etching	
5.2.5	กระบวนการออกซิเดชัน	
5.2.6	กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์ที่ 1	
5.2.7	การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ ( Oxide Etching )	40
5.2.8	กระบวนการลอกฟิล์ม	
5.2.9	การทำความสะอาดผิวหน้า	
5.2.10	การ Slice etching	41
5.2.11	กระบวนการ Predeposition	
5.2.12	ลอกชั้น Boron glass	
5.2.13	ทำความสะอาดผิวหน้า	
5.2.14	กระบวนการ Drive-in	
5.2.15	กระบวนการแพร่ทอง	42
5.2.16	กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี มาร์คที่ 2	
5.2.17	Oxide Etching	
5.2.18	กระบวนการลอกฟิล์ม	
5.2.19	การทำความสะอาดผิวหน้า	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

5.2.20	การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator	
5.2.21	กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์คที่ 3	
5.2.22	การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)	
5.2.23	กระบวนการลอกฟิล์ม	
5.2.24	กระบวนการ Sintering ที่ 500 °c	44
5.3	ขั้นตอนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น	45
5.3.1	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอนและการใช้คุณสมบัติ	
5.3.2	การทำความสะอาดผิวของซิลิกอนครั้งแรก	
5.3.3	การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน	
5.3.4	การ Slite etching	
5.3.5	กระบวนการออกซิเดชัน	
5.3.6	กระบวนการ Predeposition ด้านล่าง	46
5.3.7	กระบวนการ Predeposition ด้านบน	
5.3.8	การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ ( Oxide Etching )	
5.3.9	กระบวนการแพร์ทอง	
5.3.10	กระบวนการออกซิเดชัน	
5.3.11	การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator	
5.3.12	กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์คที่ 1	47
5.3.13	การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)	
5.3.14	กระบวนการลอกฟิล์ม	
5.3.15	กระบวนการ Sintering ที่ 500 °c	
บทที่ 6	การทดลองและผลการทดลอง	49
6.1	ผลการทดลองของไดโอด	
6.1.1	การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอด	
6.1.2	การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของ ไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำ	50
6.1.3	การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของ ไดโอดที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน	54

## สารบัญ (ต่อ)

6.1.4 การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของ ไดโอดที่ความเข้มระดับเดียวกัน	60
6.2 ผลการทดลองของเซลล์แสงอาทิตย์	63
6.2.1 การวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	
6.2.2 การวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน	69
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์	71
ภาคผนวก	73
ศัพท์เทคนิค	
กิตติกรรมประกาศ	
บรรณานุกรม	



# สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อพี-เอ็น	4
รูปที่ 2.2	แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน	
รูปที่ 2.3	แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งให้ไบอัสตรง	5
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง $V_A$	6
รูปที่ 2.5	แสดงรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	
รูปที่ 2.6	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ $V_A$	7
รูปที่ 2.7	แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	8
รูปที่ 3.1	แสดงระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์	10
รูปที่ 3.2	แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ที่สามารถเข้ามาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้	11
รูปที่ 3.3	แสดงลักษณะ โครงสร้างอย่างง่าย ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ และ แสดงภาพตัดด้านข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง	13
รูปที่ 3.4	แสดงการเกิดกระแสของอิเล็กตรอนและ โฮลเนื่องจากแสง	15
รูปที่ 3.5	แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์อาทิตย์ ขณะที่เซลล์ได้รับแสง	
รูปที่ 3.6	แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่ได้รับ แสงและได้รับแสง	16
รูปที่ 3.7	แสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่สำคัญ	17
รูปที่ 3.8	แสดงผลของความต้านทานอนุกรม และ แสดงผลของความต้านทานขนาน	20
รูปที่ 3.9	แสดงการลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น	21
รูปที่ 3.10	แสดงผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	
รูปที่ 4.1	แสดงค่าความดันไอของทองคำ palladium ทองแดง และเงิน	23
รูปที่ 4.2	แสดงค่าความดันไอและอัตราการ evaporation ของทองคำ	24
รูปที่ 4.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำในซิลิกอน	25
รูปที่ 4.4	แสดงการแพร่ของอะตอมทองคำที่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิกอน	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.5	แสดงค่า Solid solubility ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิกอน	27
รูปที่ 4.6	แสดงระดับพลังงานแบบลึก deep energy level ในซิลิกอน	28
รูปที่ 4.7	แสดงระดับพลังงานแบบลึกของอะตอมทองคำในซิลิกอน	29
รูปที่ 4.8	แสดงไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ	30
รูปที่ 4.9	แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และค่าพิกัดความต้านทานของซิลิกอนชนิดพีเมื่ออุณหภูมิของการแพร่ทองเปลี่ยนแปลงไป	31
รูปที่ 4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานและความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำ	32
รูปที่ 4.11	แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ lifetime เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ทองเปลี่ยนแปลงไป	34
รูปที่ 4.12	แสดงกระบวนการการจับยึดและกำเนิดของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง $E_T$	35
รูปที่ 5.1	แสดงรูปมาส์คที่ 1	36
รูปที่ 5.2	แสดงมาส์คที่ 2	37
รูปที่ 5.3	แสดงมาส์คที่ 3	
รูปที่ 5.4	แสดงรูปเมื่อนำมาส์คมาวางเรียงทับกัน	
รูปที่ 5.5	ต้นแบบไดโอดที่ใช้ในการสร้าง	38
รูปที่ 5.6	แสดงมาส์คที่ใช้ทำขั้วสัมผัส	
รูปที่ 6.1	เครื่องมือที่ใช้วัดคุณสมบัติ	49
รูปที่ 6.2	แสดงกราฟกระแสและแรงดันของไดโอดที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ	50
รูปที่ 6.3	แสดงกราฟกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำ	51
รูปที่ 6.4	แสดงการเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อไบอัสตรง	52
รูปที่ 6.5	แสดงการเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อไบอัสกลับ	53
รูปที่ 6.6	แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)	54
รูปที่ 6.7	แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับ ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)	55
รูปที่ 6.8	แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (เติมอะตอมทองคำที่ $950^{\circ}\text{C}$ )	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.5	แสดงค่า Solid solubility ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิกอน	27
รูปที่ 4.6	แสดงระดับพลังงานแบบลึก deep energy level ในซิลิกอน	28
รูปที่ 4.7	แสดงระดับพลังงานแบบลึกของอะตอมทองคำในซิลิกอน	29
รูปที่ 4.8	แสดงไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ	30
รูปที่ 4.9	แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และค่าพิกัดความต้านทานของซิลิกอนชนิดพีเมื่ออุณหภูมิของการแพร่ทองเปลี่ยนแปลงไป	31
รูปที่ 4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานและความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำ	32
รูปที่ 4.11	แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ lifetime เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ทองเปลี่ยนแปลงไป	34
รูปที่ 4.12	แสดงกระบวนการการจับยึดและกำเนิดของอิเล็กตรอนและ โฮลที่ตำแหน่ง $E_T$	35
รูปที่ 5.1	แสดงรูปมาส์คที่ 1	36
รูปที่ 5.2	แสดงรูปมาส์คที่ 2	37
รูปที่ 5.3	แสดงรูปมาส์คที่ 3	37
รูปที่ 5.4	แสดงรูปเมื่อนำมาส์คมาวางเรียงทับกัน	38
รูปที่ 5.5	ต้นแบบไดโอดที่ใช้ในการสร้าง	38
รูปที่ 5.6	แสดงมาส์คที่ใช้ทำขั้วสัมผัส	38
รูปที่ 6.1	เครื่องมือที่ใช้วัดคุณสมบัติ	49
รูปที่ 6.2	แสดงกราฟกระแสและแรงดันของไดโอดที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ	50
รูปที่ 6.3	แสดงกราฟกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำ	51
รูปที่ 6.4	แสดงการเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อไบอัสตรง	52
รูปที่ 6.5	แสดงการเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อไบอัสกลับ	53
รูปที่ 6.6	แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)	54
รูปที่ 6.7	แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับ ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)	55
รูปที่ 6.8	แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (เติมอะตอมทองคำที่ $950^\circ\text{C}$ )	56

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 6.25	กราฟแสดงคุณสมบัติของเซตๆลวดลาย C ขณะได้รับแสง	68
รูปที่ 6.26	กราฟแสดงคุณสมบัติของเซตๆลวดลาย A ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)	69
รูปที่ 6.27	กราฟแสดงคุณสมบัติของเซตๆลวดลาย A ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (มีการเติมอะตอมทองคำ)	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในยุคปัจจุบันได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีความทันสมัยและรวดเร็ว เพื่อให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางขึ้น ซึ่งอาจจะมีกลวิธีมากมายที่จะทำให้อุปกรณ์ชนิดนั้นทำงานได้ดีขึ้น เช่น ในทรานซิสเตอร์ทำให้ความกว้างในส่วนเบสแคบลงเพื่อทำให้ทรานซิสเตอร์มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น ในมอสเฟตใช้โพลีซิลิกอนเข้ามาเป็นส่วนเกตแทนโลหะ (อะลูมิเนียม) เพื่อทำให้มอสเฟตมีค่าแรงดันขีดเริ่มประมาณ 1 V ส่วนในไดโอดพยายามลดค่าความต้านทานภายในแผ่น (tc) โดยการสร้างชั้นอีพี ซึ่งจะเห็นว่าได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กันมากมายเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานมากขึ้น

การเติมอะตอมของค่าลงไปในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์อย่างหนึ่ง ดังนั้นจึงเกิดความสนใจและศึกษาถึง เรื่องผลกระทบของอะตอมของค่าในรอยต่อพี-เอ็น และในปริภูมิกึ่งตัวนำชนิดนี้ศึกษาถึงอุปกรณ์ 2 ชนิด ที่สร้างมาจากรอยต่อพี-เอ็นนั่นก็คือ ไดโอด และ เซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีการเติมอะตอมของค่าเข้าไปในรอยต่อพี-เอ็น ทองคำจะแพร่เข้าไปในลักษณะแบบแทรก ซึ่งอาจจะต่างกับอะตอมบางชนิด เมื่อทองคำเข้าไปในซิลิกอนด้วยคุณสมบัติที่ว่าทองคำเป็นสารเจือแบบลึก จึงทำให้เกิดระดับพลังงานแบบลึก 2 ระดับ คือ ระดับพลังงานเสมือนผู้รับ (Acceptor like level) ที่ระดับพลังงานได้แถบความนำลงมา 0.54 eV และระดับพลังงานเสมือนผู้ให้ (Donor like level) ที่ระดับพลังงานเหนือจากแถบวาเลนซ์ 0.35 eV ซึ่งระดับพลังงานทั้งสองนี้จะทำหน้าที่จับอิเล็กตรอนและโฮล ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนจากแถบความนำก็จะตกลงมารวมตัวกับโฮลที่ระดับพลังงานเสมือนผู้รับ ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนในแถบความนำลดลง ส่งผลทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นและยังทำให้อายุพาหะของอิเล็กตรอนลดลงด้วย เนื่องจากว่าเวลาที่อิเล็กตรอนใช้รวมตัวกับโฮลน้อยลงเพราะมีระดับพลังงานของทองคำและ ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานผู้ให้จะตกลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ส่งผลทำให้จำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์ลดลง ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น และทำให้อายุพาหะของโฮลลดลง และเนื่องจากที่ทองคำเป็นตัวทำให้อายุพาหะลดลงนี้เอง ดังนั้นไดโอดที่มีการเติมทองคำเข้าไปสามารถนำมาใช้งานในด้านความเร็ว เช่น สวิตชิงไดโอด สวิตชิงทรานซิสเตอร์ ได้เป็นอย่างดี

จากการศึกษา ซิลิกอนไดโอดที่เติมอะตอมของค่าในรอยต่อพี-เอ็น จะเป็นไดโอดที่มีคุณสมบัติการทำงานดีกว่าไดโอดแบบรอยต่อที่ไม่มีอะตอมของค่า คือ จะทำให้มีความเร็วในการแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานสูงขึ้น ส่วนในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเติมอะตอมทองคำในรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้มีกระแสมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งเกิดมาจากคุณสมบัติของทองคำที่เติมเข้าไป เนื่องจากทองคำมีคุณสมบัติเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (Recombination) ทำหน้าที่จับโฮลและอิเล็กตรอนจึงทำให้อายุพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลลดลง และในขณะที่รับแสงจะทำให้กระแสที่เกิดจากแสงมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ดังนั้นจึงเป็นผลดีสำหรับอุปกรณ์แสงต่าง ๆ

ในโครงการนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ที่ไม่ถูกเติมด้วยทองคำและที่ถูกเติมด้วยอะตอมทองคำ ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาว่าผลปริมาณของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ของกระแสแรงดัน ของไดโอด ในขณะที่ให้แรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสกลับ ขณะที่ได้รับแสงที่ความเข้มแสงต่างกัน ระหว่างไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำและไดโอดที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และในส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์จะศึกษาถึงในส่วนของคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ การให้ไบอัสตรง ผลของความต้านทานอนุกรม และผลของความเข้มแสงที่แตกต่างกัน ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเติมอะตอมทองคำและไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

## บทที่ 2

### ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

#### 2.1 ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น

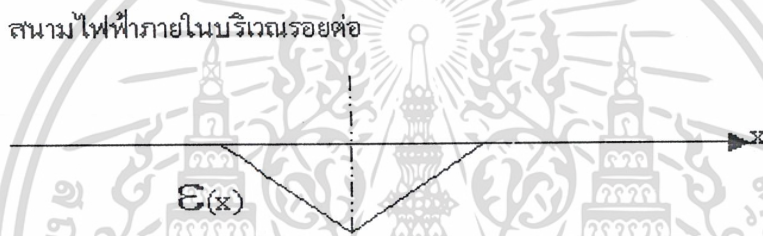
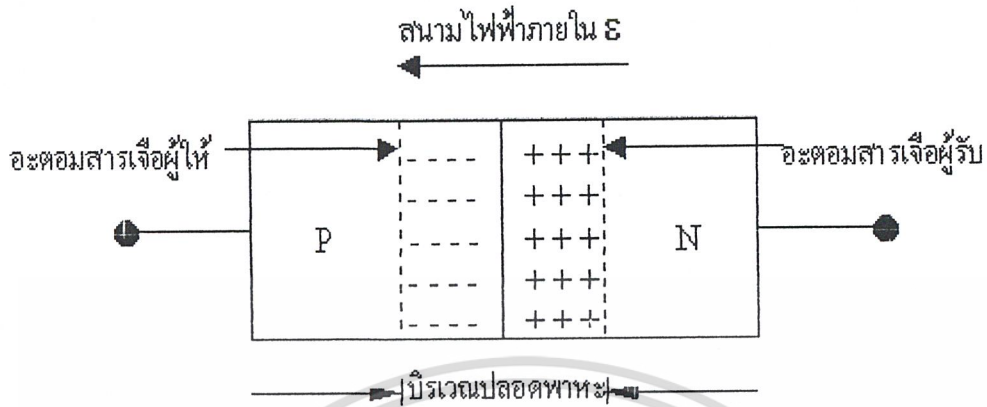
วิธีการที่จะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไปใช้งานได้อย่างคุ้มค่าและมีประโยชน์อย่างยิ่งก็คือ การเติมสารเจือให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิด พีและเอ็น ที่รอยต่อระหว่างสารชนิดพีและสารชนิดเอ็น เราเรียกว่า "รอยต่อพี-เอ็น" (p-n junction) ที่รอยต่อพี-เอ็น นี้จะมีลักษณะทางไฟฟ้าต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษอื่น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

##### 2.1.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

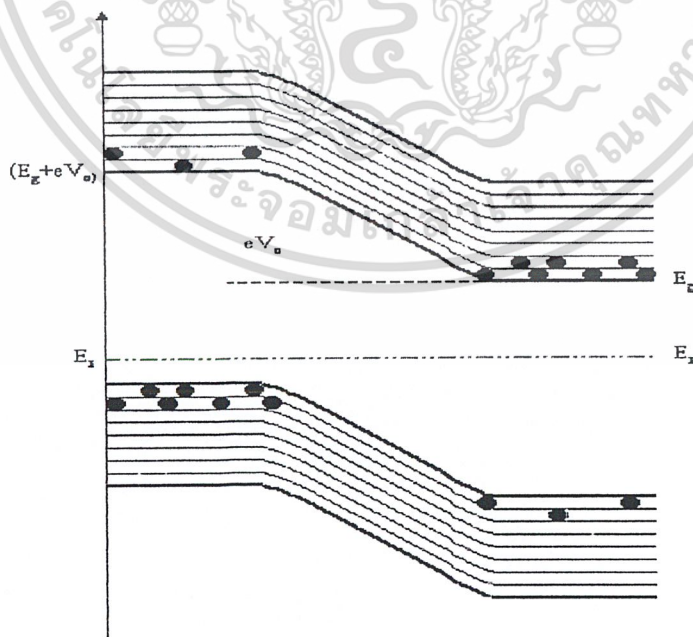
เมื่อรอยต่อพี-เอ็น ถูกสร้างขึ้น จะเห็นว่ามีความแตกต่างของความหนาแน่นของพาหะ โดยโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีความหนาแน่นมากกว่าโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก็มีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านพี ดังนั้นทำให้เกิดการแพร่ของพาหะ จากด้านที่มีความหนาแน่นมากกว่าไปสู่ด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า เพื่อให้ด้านทั้งสองของรอยต่อมีความหนาแน่นของพาหะเท่ากัน การแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อพี-เอ็น และจะเกิดมีการรวมตัวกัน (recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอน กล่าวคือ อะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านเอ็น จะสูญเสียอิเล็กตรอน อะตอมจึงแสดงตัวเป็นไอออนบวก และอะตอมของสารเจือชนิดพีทางด้านพี จะสูญเสียโฮล อะตอมจึงแสดงตัวเป็นไอออนลบ ทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ เรียกว่า สนามไฟฟ้าภายใน (built-in-voltage) ดังรูปที่ 2.1

จากรูปจะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และในที่สุดสนามไฟฟ้านี้จะมีผลพอดีทำให้โฮลและอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อได้ เรียกว่า "ภาวะสมดุล" ที่บริเวณรอยต่อที่สนามไฟฟ้าจะไม่มีพาหะใด ๆ อยู่ เนื่องจากถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าปิดออกไปเรียกว่า "บริเวณปลอดพาหะ" (Depletion Region) ที่บริเวณปลอดพาหะนี้มีความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น เรียกว่า "ศักย์สัมผัส" (Contact Potential,  $V_0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อพี-เอ็น

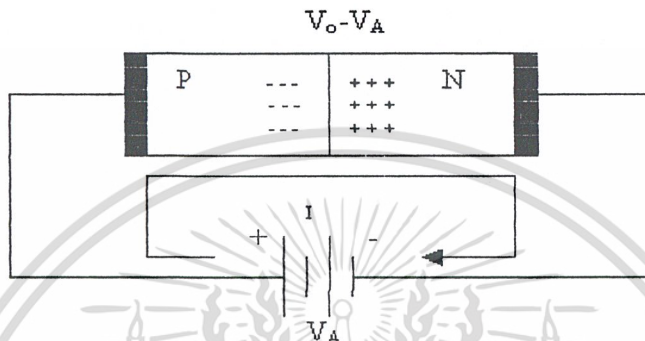


รูปที่ 2.2 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ในการให้แรงดันแก่รอยต่อพี-เอ็นนั้น จะให้ด้านพีมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็นตามรูปที่ 2.3



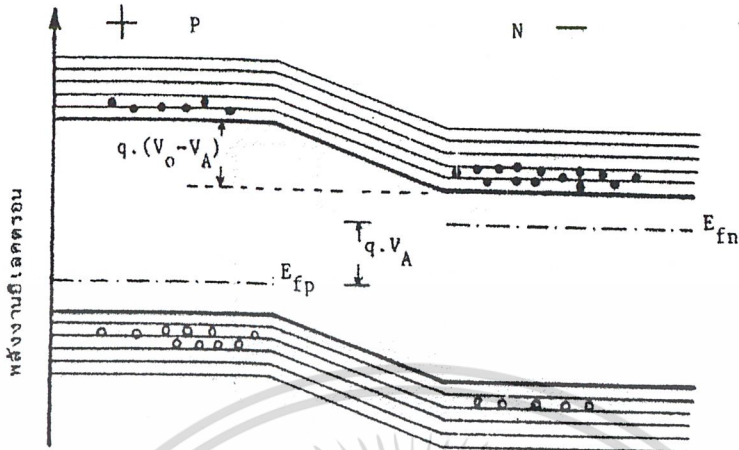
รูปที่ 2.3 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งให้ไบอัสตรง

แรงดันไบอัสจากภายนอก  $V_A$  จะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็น และอยู่ในลักษณะที่หักล้างกับแรงดันไฟฟ้าภายในที่บริเวณรอยต่อ นั่นก็คือค่าแรงศักย์ที่รอยต่อจะลดลง จึงมีผลทำให้โฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นถูกฉีด (injection) ข้ามรอยต่อพี-เอ็นได้ ปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนี้ จะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสในลักษณะของเอ็กโปเนนเชียล (exponential function) จากการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เองจะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ซึ่งแสดงดังสมการ (2.1)

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่ยูนิโตนได้รับแรงดันไบอัสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของด้านพีและด้านเอ็นจะไม่เท่ากัน และค่าแรงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ เป็นผลทำให้มีกระแสไหลในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



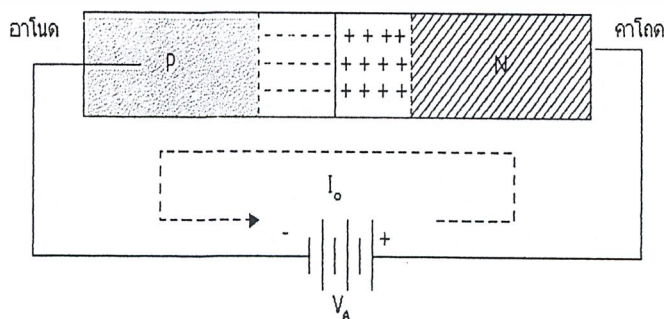
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง  $V_A$

ดังนั้นเมื่อนำไดโอดไปใช้เป็นอุปกรณ์แสงต่าง ๆ นั้นสมการของไดโอดก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยแสงไปมีผลทำให้ค่ากระแสในกรณีไบอัสตรงลดลง เนื่องจากทิศทางของกระแสแสงมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสไบอัสตรง ดังสมการ (2.2)

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right) - I_p \quad (2.2)$$

2.1.3 รอยต่อ พี-เอ็น ในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

การให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อพี-เอ็น นั้นทำได้ โดยการให้ทางพีมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางเอ็นดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกัการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

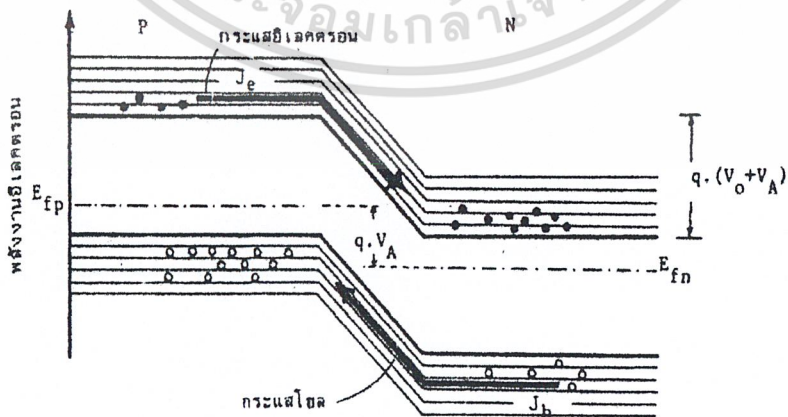
ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อ มีค่า  $V_A$  แรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายในที่รอยต่อ ดังนั้นจะทำให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากก้านเอ็น และโฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้ รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวน ไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ ดังนั้นจึงปรากฏมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อ ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก ซึ่งอาจพิจารณาได้จากสมการ (2.1) ค่าของ  $V_A$  ด้วย  $-V_A$  และพิจารณาว่าที่อุณหภูมิห้อง

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

ดังนั้นกระแสที่ไหลในขณะที่ได้รับไบอัสกลับ

$$I \approx -I_0 \quad (2.3)$$

ซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ลักษณะของแถบพลังงานในขณะนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ  $V_A$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำไดโอดไปใช้เป็นอุปกรณ์แสงต่าง ๆ นั้นสมการของไดโอดก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยแสงไปมีผลทำให้ค่ากระแสในกรณีไบอัสกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากทิศทางของกระแสแสงมีทิศทางเดียวกับกระแสไบอัสกลับ สมการ (2.4)

$$I \approx - (I_0 + I_p) \quad (2.4)$$

### ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในทางอุดมคติ



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

#### 2.1.4 กระแสรั่วไหลที่รอยต่อพี-เอ็น

กระแสรั่วที่รอยต่อพี-เอ็น คือ กระแสอิมิตัวย้อนกลับในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งมีค่าประมาณ  $I_0$  ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$I_0 = A.q.ni^2 \left( \frac{D_h}{L_h n_n} + \frac{D_e}{L_e P_p} \right) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลย์

$$p = n = ni = K.T \frac{3}{2} . e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (2.6)$$

และนอกจากกระแสอิมิตัวที่เกิดขึ้นที่รอยต่อแล้วก็ยังมีกระแสรั่วที่บริเวณปลอดพาหะเกิดขึ้นอีกด้วย โดยกระแสรั่วจะถูกเรียกว่า Depletion-layer generating recombination current หรือเรียกว่ากระแส G-R ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแส G-R ก็คือความไม่สมบูรณ์ของผลึก

### 2.1.5 ปรากฏการณ์พังทลายที่รอยต่อ

ขณะที่ให้ไบอัสกลับแก่รอยต่อพี-เอ็น ที่แรงดันไบอัสสูงค่าหนึ่ง กระแสรั่วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เข้าสู่ค่าอนันต์ และไม่อาจควบคุมได้ด้วยแรงดันไบอัส ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ ปรากฏการณ์การพังทลาย ” ( Breakdown Phenomena ) โดยจะแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ คือ

#### 1) การพังทลายแบบซีเนอร์ ( Zener Breakdown )

การพังทลายแบบซีเนอร์ ( Zener Breakdown ) เป็นผลอันเนื่องมาจาก ปรากฏการณ์ การทะลุกำแพงศักย์ของคลื่นอนุภาค เมื่อรอยต่อได้แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าหนึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าสูง จนมีผลทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์สามารถที่จะทะลุกำแพงศักย์ ทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ

#### 2) การพังทลายแบบอะวาแลนซ์ ( Avalanche Breakdown )

การพังทลายแบบอะวาแลนซ์ ( Avalanche Breakdown ) เมื่อกระแสของพาหะแต่ละชนิด ในบริเวณปลอดพาหะ มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการชนกัน และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลขึ้น ทั้งอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่เกิดขึ้นนี้ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า ในบริเวณปลอดพาหะ ทำให้มีความเร่ง เกิดการชนกับอะตอมอื่นๆ ทำให้เกิดมีอิเล็กตรอนอิสระและโฮลขึ้นใหม่ ทวีคูณ คล้ายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ค่าแรงดันพังทลายนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่รอยต่อด้วย ซึ่งแตกต่างจากการพังทลายแบบซีเนอร์ที่ขึ้นอยู่กับความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ เท่านั้น

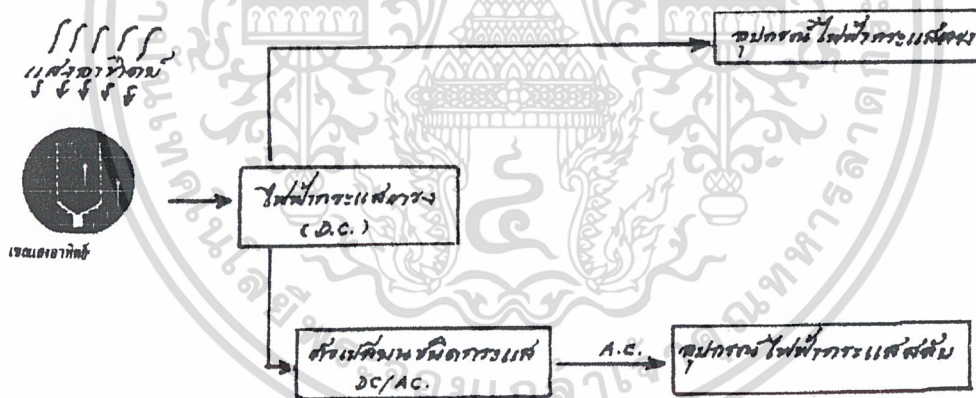
ปรากฏการณ์พังทลายแบบอะวาแลนซ์นี้ จะเกิดขึ้นในกรณีรอยต่อได้รับค่าแรงดันไบอัสสูงๆ

## บทที่ 3

### เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

#### 3.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง เซลล์จะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันที หรืออาจจะมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current) แล้วจึงนำไปใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ทำงานได้ต่อไป ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับกันมาก ทั้งนี้เนื่องมาจาก

1. ธาตุซิลิกอน เป็นธาตุที่หาได้ง่าย และมีมากที่สุดบริเวณผิวโลกราคาจึงถูก
2. เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับธาตุซิลิกอนเป็นที่เข้าใจกันอย่างดี เนื่องจากพัฒนามาเป็นเวลานาน และใช้กันอย่างกว้างขวางอยู่แล้วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ ปรากฏว่า วัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีค่าของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ประมาณ 1.5 eV ซึ่ง สารกึ่งตัวนำชนิด GaAs มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.43 และจากการทดลองสร้างก็ปรากฏว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก GaAs ด้วยโครงสร้างที่เหมาะสม จะสามารถให้ประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานได้สูงถึง 20% แต่ว่าแกเลียมอาเซนายด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาแพง ซึ่งเป็นข้อที่เสียเปรียบสารซิลิกอน

**SOLAR CELL MATERIAL CANDIDATES (FROM BYLANDER [13])**

Material	Major materials					
	Energy gap (eV)	Mobility (300 K) (cm <sup>2</sup> · V <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> )		Lifetime (s)		Experimental diffusion length (μ)
		μ <sub>n</sub>	μ <sub>p</sub>	τ <sub>n</sub>	τ <sub>p</sub>	
Si	1.1	1450	500	400		100
GaAs	1.4	8500	400	50	110 <sup>-2</sup>	5
CdS	2.6	340	815	100	10 <sup>-2</sup>	~1
B	1.5	8000	4000			
Se (Max)	1.6	2	17			
SiC(β)	2.6	1000	10			
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	1.6	15	45			
Sb <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	1.2	15	45			
AlSb	1.6	400	400			
GaP	2.2	>200	150			
CdAs <sub>2</sub>	1.0		100			
InP	1.2	4000	>600	2000	2	
ZnSe	2.6	500	16			
ZnTe	2.2	500	900			
CdSe	1.7	800				
CdTe	1.4	700	65			

**Other materials**

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

รูปที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ที่สามารถเข้ามาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ลำแสงหรือรังสีของแสงอาทิตย์ ที่ตกลงบนพื้นผิวโลก จะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วนคือ

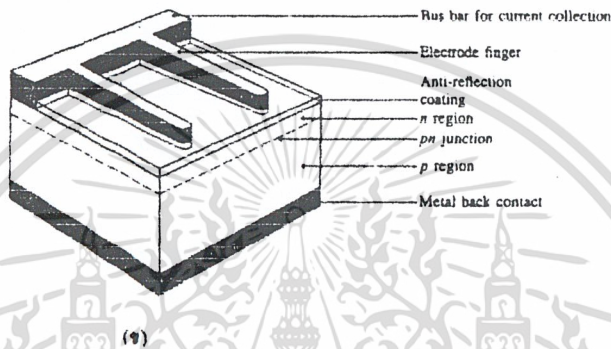
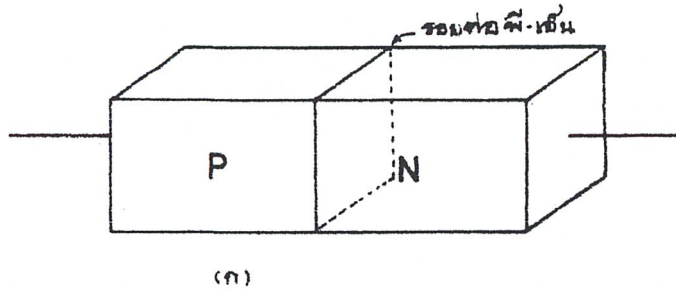
1. Direct sunlight หรือ ลำแสงอาทิตย์โดยตรง
2. Indirect or Diffused sunlight หรือ ลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย

ลำแสงอาทิตย์โดยตรง หรือ Direct sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจายหรือ diffused sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลกประมาณกันว่า แม้แต่ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10-20% ของรังสีทั้งหมดที่ได้รับได้ ยิ่งในวันที่มีเมฆหมอกปกคลุมมาก ๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายนี้จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

สเปกตรัมของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจาย จะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงแบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อนและแพร่กระจาย

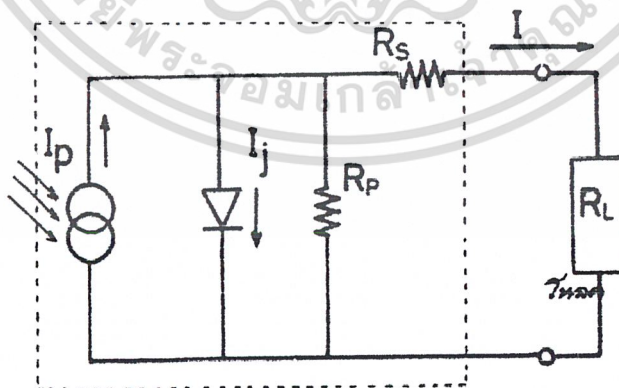
### 3.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

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



รูปที่ 3.3 (ก) แสดงลักษณะ โครงสร้างอย่างง่าย ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์  
 (ข) แสดงภาพตัดด้านข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง

3.3.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น



โดยที่  $I_p$  คือ กระแสเนื่องจากแสง

$I_j$  คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ pn ขณะไม่มีแสง

$I$  คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านโหลดในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_L$  คือ โหลด

$R_s$  คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

$R_p$  คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.3.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็น

#### 1) ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมากและกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ และจากกราฟแสดงให้เห็นคุณลักษณะในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนี้

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

#### 2) ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (illumination)

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแสง จะพิจารณาว่าในลำแสงประกอบด้วยกลุ่มของโฟตอน(Photon) ซึ่งมีพลังงานแสดงดังสมการ (3.2)

$$E_{\text{photon}} = hv \quad (3.2)$$

โดย

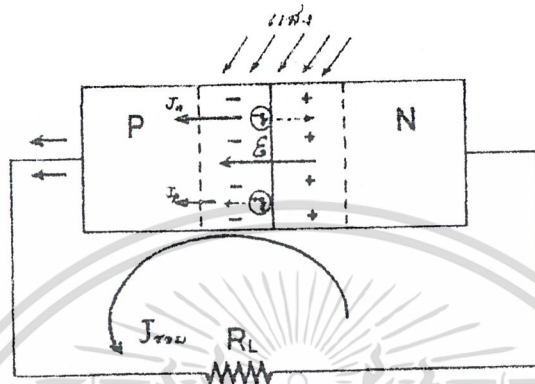
$E_{\text{photon}}$  คือ พลังงานของโฟตอน

$h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ =  $6.624 \times 10^{-34}$  joule-sec.

$v$  คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) อยู่ในแถบความนำ (conduction band) ได้ และทำให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิสรที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้ ๆ กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ

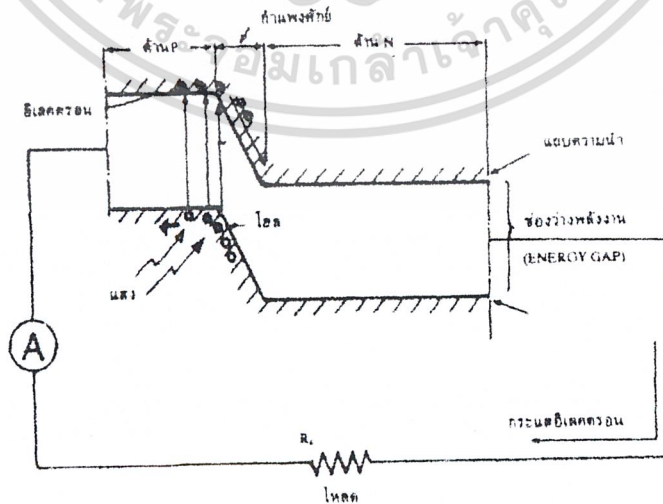
เลกตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่ย่อยต่อได้รับไบอัสตรง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการเกิดกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสง

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง” (photo current) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า  $I_p$  ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแสง แสดงดังรูปที่ 3.5 และแสดงสมการได้ดังสมการ (3.3)

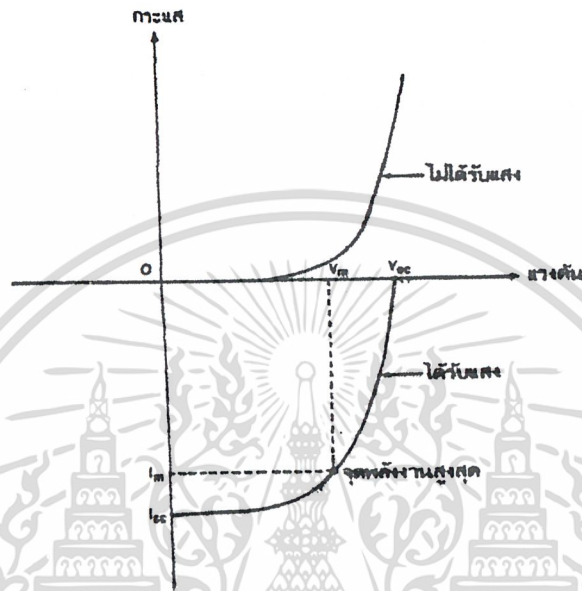
กรณีที่รอยต่อได้รับแสง (illumination) 
$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{KT}} - 1 \right) - I_p \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.5 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์อาทิตย์ ขณะที่เซลล์ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแสงและไม่ได้รับแสงสามารถเขียนแสดงเปรียบเทียบดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่ได้รับแสงและได้รับแสง

### 3.4 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ และโดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือก็คือเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งจะต้องให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสง จะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสงไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจรในภาวะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า “กระแสลัดวงจร” (Short circuit current) เขียนย่อ ๆ ว่า  $I_{sc}$  ค่าของกระแสลัดวงจรนี้ หาได้จากสมการ (3.3) เมื่อกำหนดให้

ขณะลัดวงจร,  $V_A = 0$  ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการ  $I_{ph}$  แทน  $I_{sc}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจรออก (open circuit) และที่รอยต่อได้รับแสง จะพบว่ากระแสที่ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรถูกเปิด แรงดันที่ปรากฏคร่อมรอยต่อพี-เอ็น ขณะนี้ถูกเรียกว่า “แรงดันวงจรเปิด” (open circuit voltage) เขียนย่อ ๆ ว่า  $V_{oc}$  ค่า  $V_{oc}$  หาได้โดยพิจารณาว่า

เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร,  $I = 0$  สามารถเขียนสมการ (3.3) ได้ใหม่ว่า

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

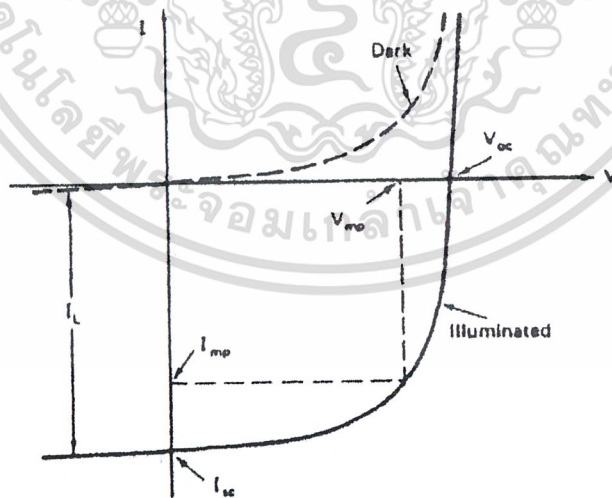
ดังนั้น

$$V_A = V_{oc} = \frac{KT}{q} \left( \ln \frac{I_P}{I_0} + 1 \right)$$

หรือ

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \left( \ln \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.5)$$

ค่าของ  $I_{sc}$  และ  $V_{oc}$  แสดงในกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิด จะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง, สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสง เพื่อเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล, ระยะความลึกของรอยต่อพีเอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว, และค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไป ๆ กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน จะมีค่าประมาณ  $35-40 \text{ mA/cm}^2$  และกรณีของแกลเลียมอาเซนไนด์ค่า  $I_{sc}$  จะอยู่ในราว  $20 \text{ mA/cm}^2$

ส่วนค่าของแรงดันวงจรเปิด (Open circuit voltage)  $V_{oc}$  จะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap)  $E_g$  ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์ อย่งไรค่า  $V_{oc}$  นี้จะมีขนาดจำกัด คือสูงสุดไม่เกินค่าของความกว้างของช่องว่างพลังงานและปกติ ค่าของ  $V_{oc}$  ในเซลล์แบบซิลิกอนมีค่าประมาณ 0.5-0.6 โวลต์ และในกรณีของสารแกลเลียมอาเซนไนด์  $V_{oc}$  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  $V_m$

$$\text{นั่นคือ } P_m = I_m \times V_m \quad (3.6)$$

และค่าความต้านทานของ โหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการ (3.7)

$$R_{LOAD} = \frac{V_m}{I_m} \quad (3.7)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F.F = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (3.8)$$

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

นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนตัวย่อเป็น  $\eta$  ประสิทธิภาพของเซลล์ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์

$$\eta = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์} \times 100\%}{\text{พลังงานแสงที่เซลล์ได้รับ}} \quad (3.9)$$

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

โดยที่  $P_{in}$  คือพลังงานรวมของแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์

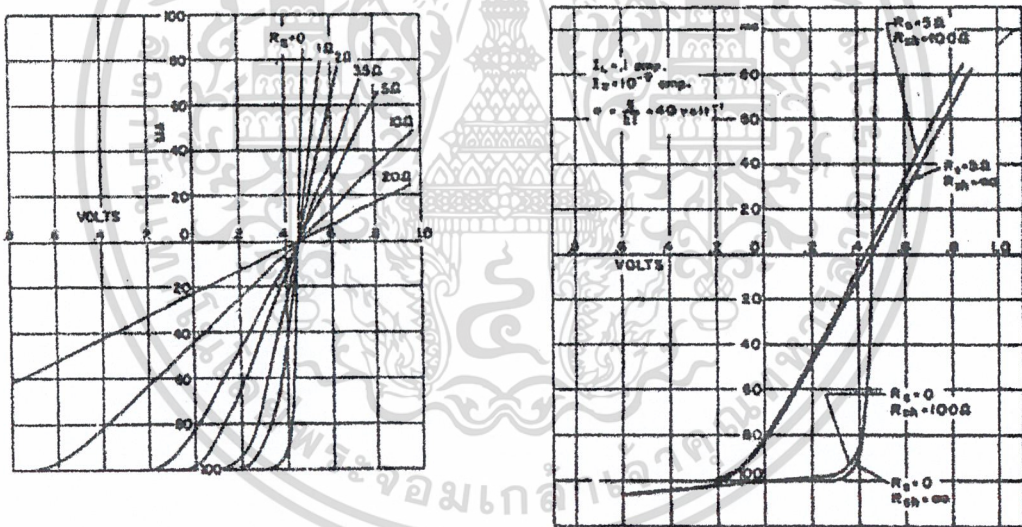
ในปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอนที่ใช้งานกัน โดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในช่วง 12 ~ 14%

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_m$ ,  $F.F$  และ  $\eta$  ซึ่งมีค่าสูง ๆ อย่างไรก็ดีพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ก็ถูกจำกัดด้วยแฟคเตอร์อื่น ๆ มากมาย ซึ่งบางแฟคเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟคเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

### 3.5 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ใช้งาน จะเห็นว่า กระแสเนื่องจากแสง (Photo current) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (current source)  $I_p$  ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ในทางอุดมคติ  $I_p$  ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance)  $R_s$  เกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความต้านทานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

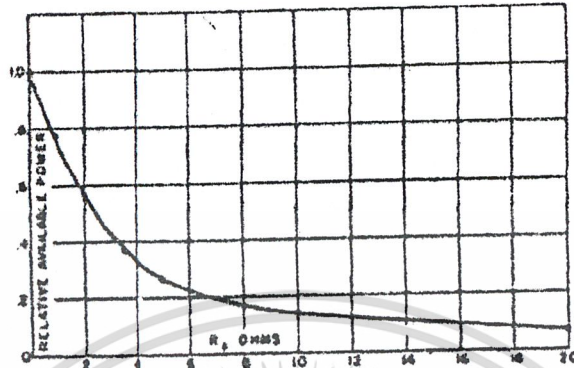
ของบริเวณรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) ระหว่างโลหะกับส่วนพีและส่วนเอ็นค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมดเขียนตัวย่อได้เป็น  $R_s$ , ค่าความต้านทานขนานหรือ  $R_p$  (parallel resistance หรือ shunt resistance) เป็นค่าความต้านทานสมมุติที่ขนานกับรอยต่อในรอยต่อพี-เอ็น ที่สมบูรณ์ในทางอุดมคติค่าของ  $R_p$  จะมีค่าเป็นค่าอนันต์ ( $\infty$ ) 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 3.8



รูปที่ 3.8 (ก) แสดงผลของความต้านทานอนุกรม

(ข) แสดงผลของความต้านทานขนาน

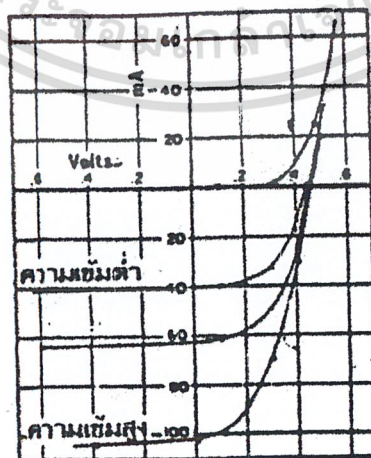
โดยทั่วไปแล้วจะพบในเซลล์แสงอาทิตย์ใช้งานค่าความต้านทานขนาน  $R_p$  จะมีค่าสูงพอที่ไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม  $R_s$  จะมีผลและบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อคุณสมบัติของเซลล์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง, การสร้าง จึงต้องพิจารณาผลของค่า  $R_s$  อย่างรอบคอบ และพยายามให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ขณะที่ค่า  $R_s$  สูงขึ้นพลังงานเอกสสูงสุดซึ่งเซลล์จะสามารถจ่ายได้จะมีค่าลดลงแสดงดังรูปที่ 3.9 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

### 3.6 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงานจำเป็นต้องมีแสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอที่จะเป็นอิสระและทิ้งโฮลให้เกิดขึ้น ดังนั้นถ้าหากแสงที่มากกระทบ มีความเข้มสูงมาก หรือก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮล เป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสง ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### คุณสมบัติของทองคำ

#### 4.1 คุณสมบัติของทองคำ

##### 4.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

ทองคำเป็นธาตุในกลุ่มโลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 1 และ 3 มีอะตอมมิกนัมเบอร์เท่ากับ 79 และมีจุดหลอมเหลว (Melting point) ที่อุณหภูมิ 1063 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าจุดเดือดของทองคำ คือ 2808 องศาเซลเซียส (3081 องศาเคลวิน)

สำหรับค่าความดันไอ (Vapor Pressure) ของทองคำที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราการ evaporate แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

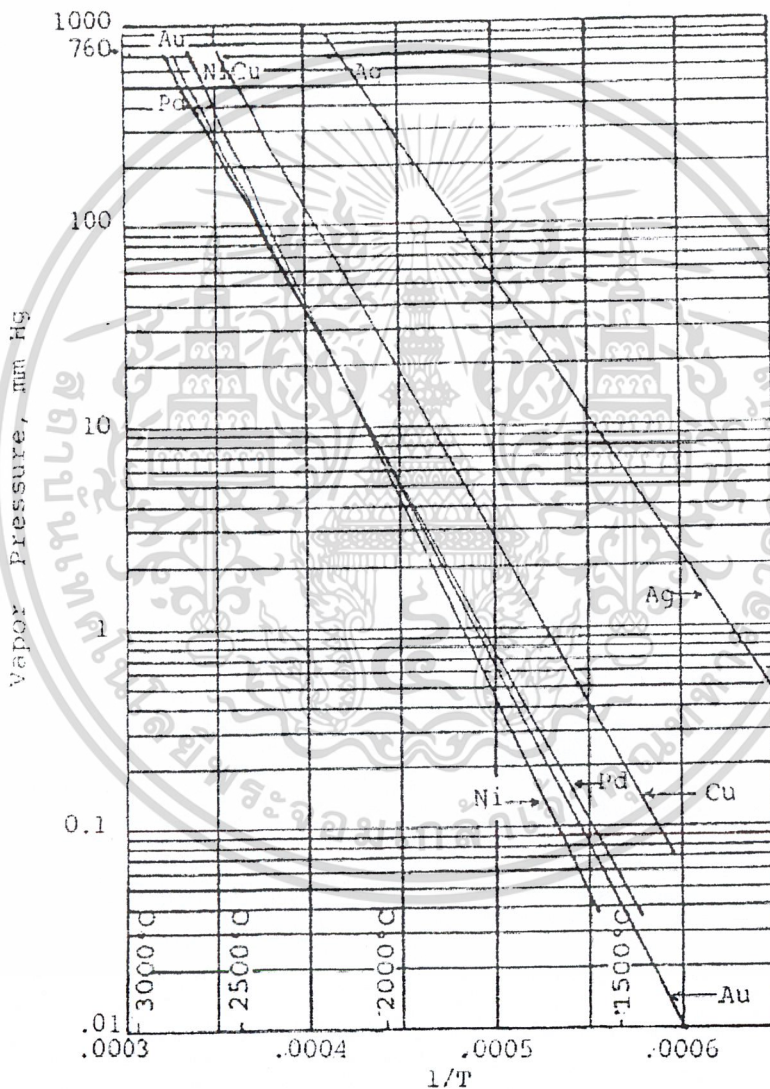
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความดันไอและอัตราการ evaporation ของทองคำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ T (K)	Vapor pressure	Rate of evaporation
1300	0.0000088	$2.7 \times 10^{-7}$
1336	0.000022	$4.82 \times 10^{-7}$
1600	0.0036	$7.3 \times 10^{-5}$
1700	0.176	$3.3 \times 10^{-5}$
1900	0.210	$4.0 \times 10^{-3}$
2300	8.81	$1.5 \times 10^{-1}$
2400	18.40	$3.08 \times 10^{-1}$
2800	204.1	3.2
3081	760	11.2

จากการศึกษาธาตุหลาย ๆ ตัว จะเห็นว่าความดันไอของทองคำมีค่าใกล้เคียงกับ palladium และมีค่าน้อยกว่าทองแดงและเงิน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ Raub และ Plate ได้รายงานไว้ว่าทองคำเป็นโลหะเพียงชนิดเดียวที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ๆ

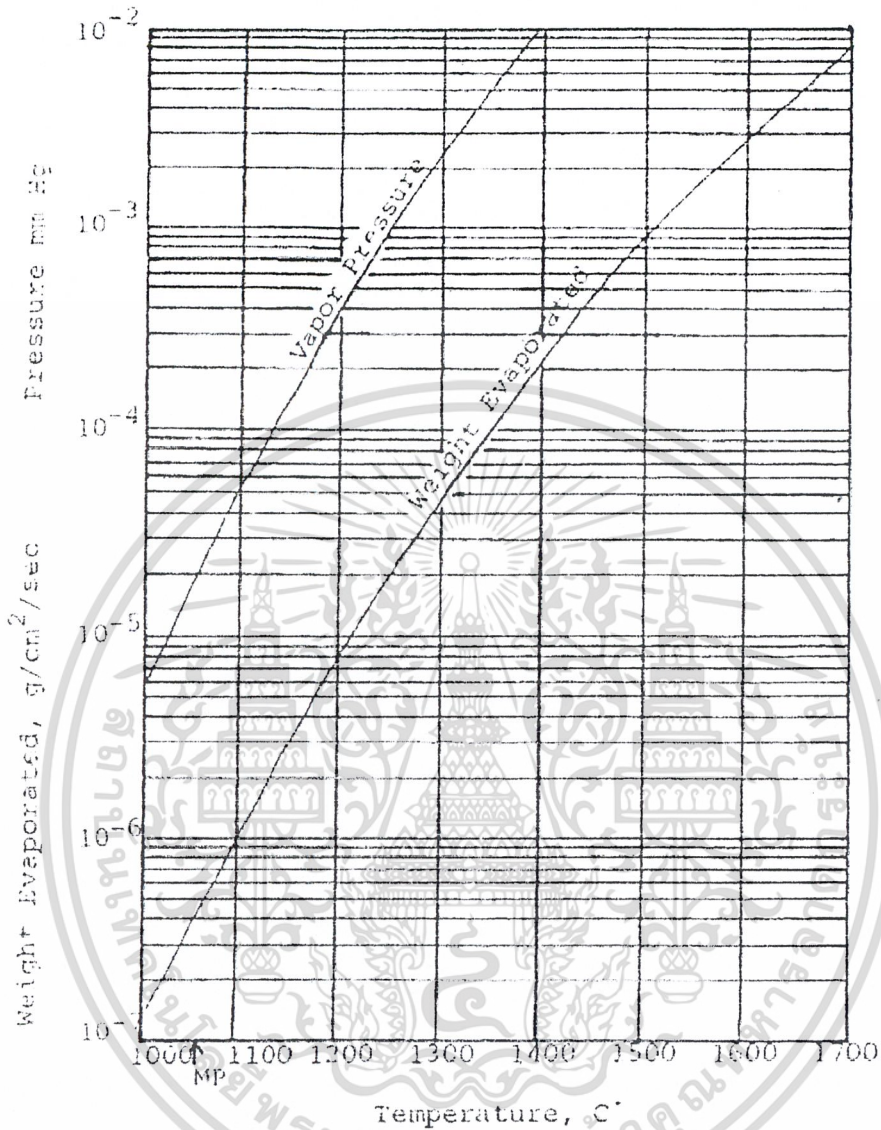
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าความต้านทาน (Resistivity) ของทองคำบริสุทธิ์ ตามรายงานของ Linde ที่อุณหภูมิ 0 และ 20 องศาเซลเซียส จะมีค่า 2.06 และ 2.125 ไมโครโอห์ม.ซม. (Microohm.cm.) ตามลำดับ ส่วนค่าความต้านทานของทองคำที่จุดหลอมเหลวจะมีค่าเป็น 6 เท่า ของที่ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.68 ไมโครโอห์ม.ซม.



รูปที่ 4.1 แสดงค่าความดันไอของทองคำ palladium ทองแดง และเงิน

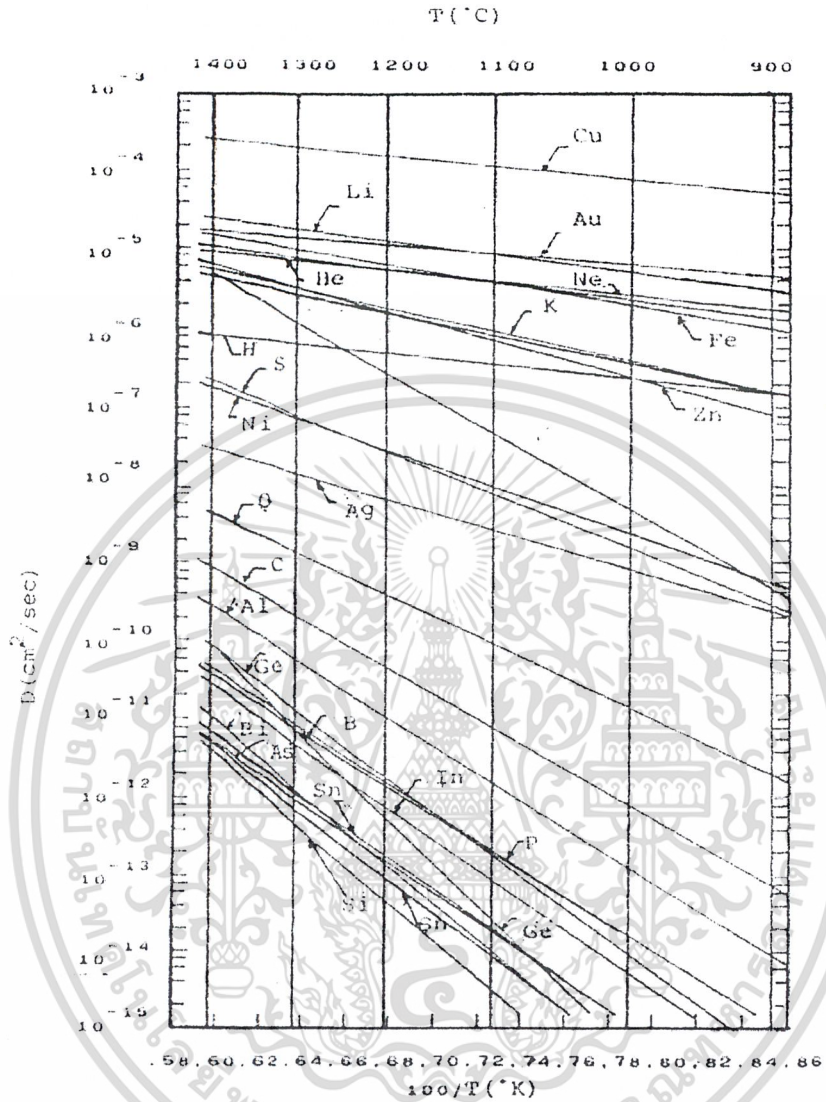
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงค่าความดันไอและอัตราการ evaporation ของทองคำ

ทองคำเป็นสารเจือจับลึก (deep impurity) ที่สำคัญในซิลิกอน เนื่องจากว่ามีสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) สูง มีค่าประมาณ  $2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$  ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.3

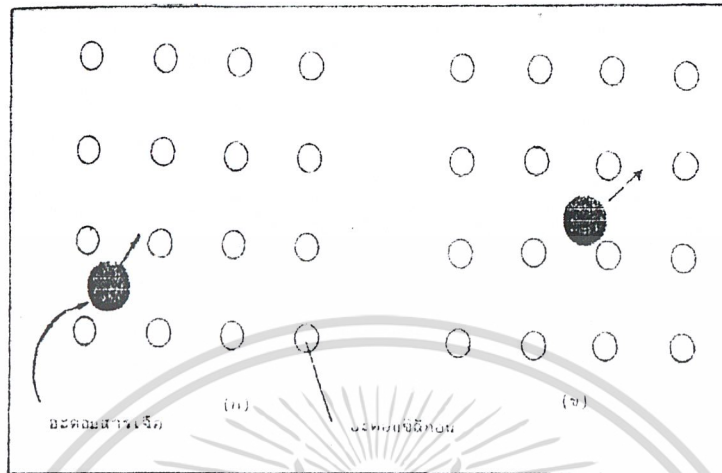
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำในซิลิกอน

ดังจะเห็นได้ว่าเราสามารถที่จะควบคุมปริมาณของอะตอมทองคำในซิลิกอนได้โดยการควบคุมอุณหภูมิ อะตอมของทองคำจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมของซิลิกอนโดยไม่มีบอนด์ใดๆ ยึดกับอะตอมของซิลิกอน ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งการแพร่แบบนี้จะมีอัตราการแพร่ที่เร็วกว่าการแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (Substitutional diffusion)

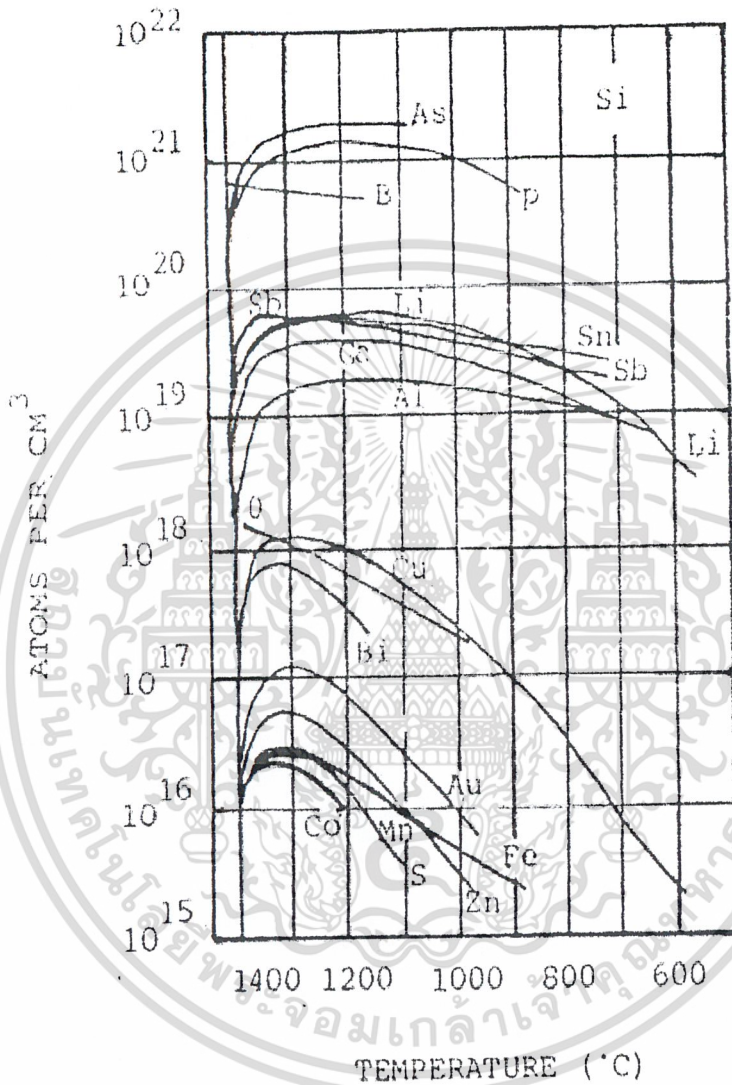
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการแพร่ของอะตอมทองคำที่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิกอน

เมื่ออะตอมทองคำแพร่เข้าไปในซิลิกอนจะไปควบคุมช่วงอายุ (lifetime) และพิกัดความต้านทาน (Resistivity) ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี โดยจะทำให้อายุพาหะ (carrier lifetime) ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำมีค่าลดลง เราจึงเรียกทองคำว่า carrier lifetime killer

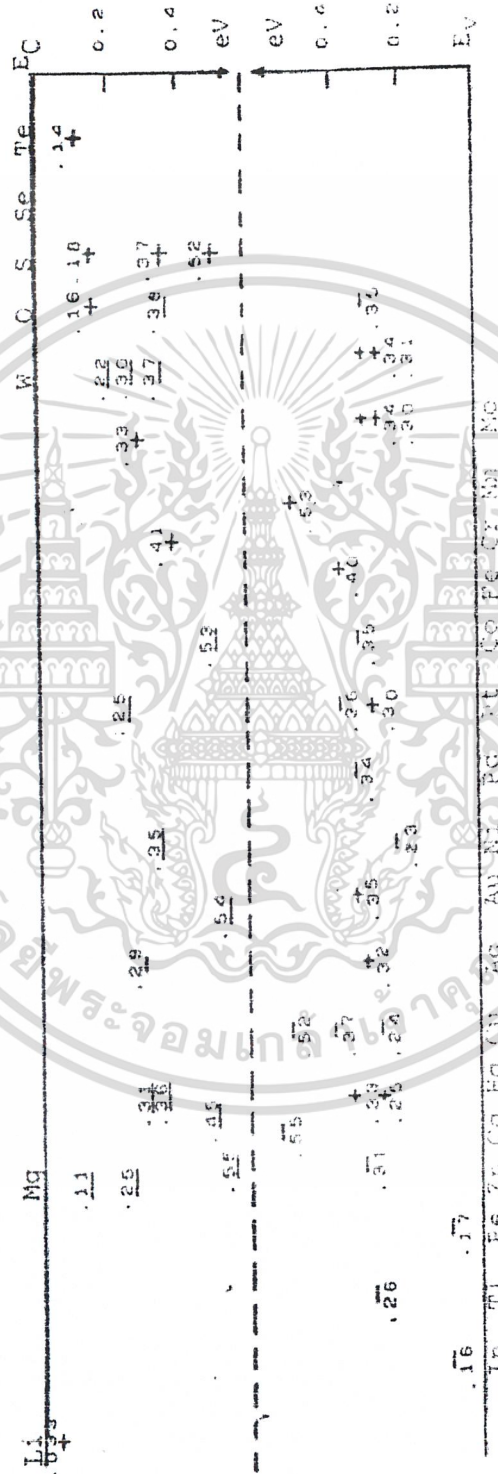
ค่าโซลิดโซลูบิลิตี (Solid solubility) คือ ความสามารถในการแพร่ของทองคำในของแข็ง โดยในซิลิกอนจะมีค่าสูงสุดประมาณ  $10^{17}$  อะตอม / ลบ.ซม. แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงค่า Solid solubility ของสารเจือชนิดต่างๆ ในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

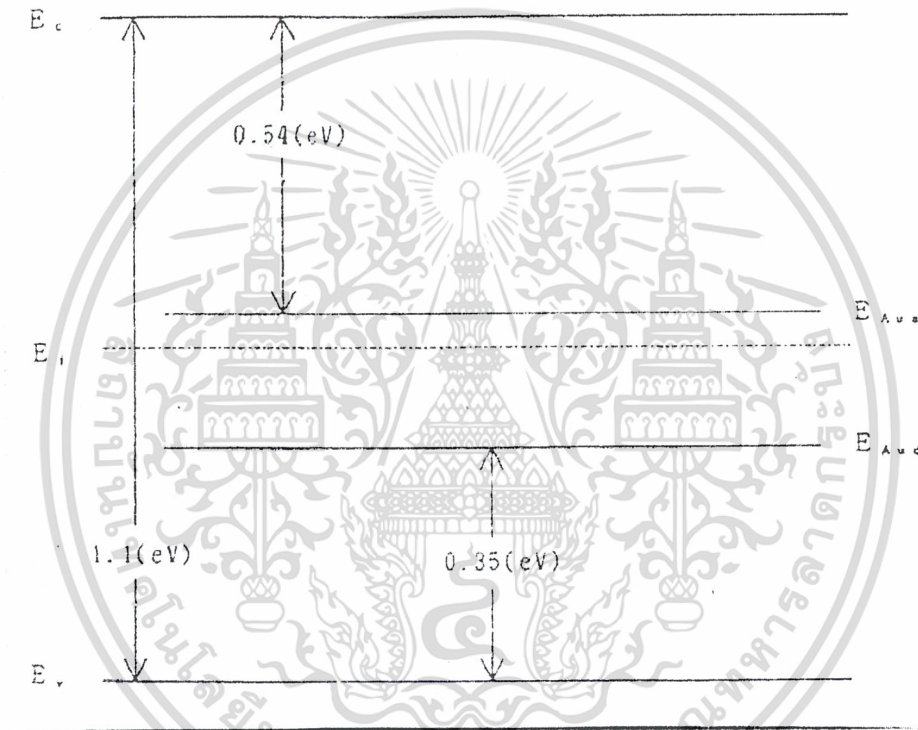
4.1.2 ระดับพลังงานของทองคำในซิลิกอน



รูปที่ 4.6 แสดงระดับพลังงานแบบลึก deep energy level ในซิลิกอน

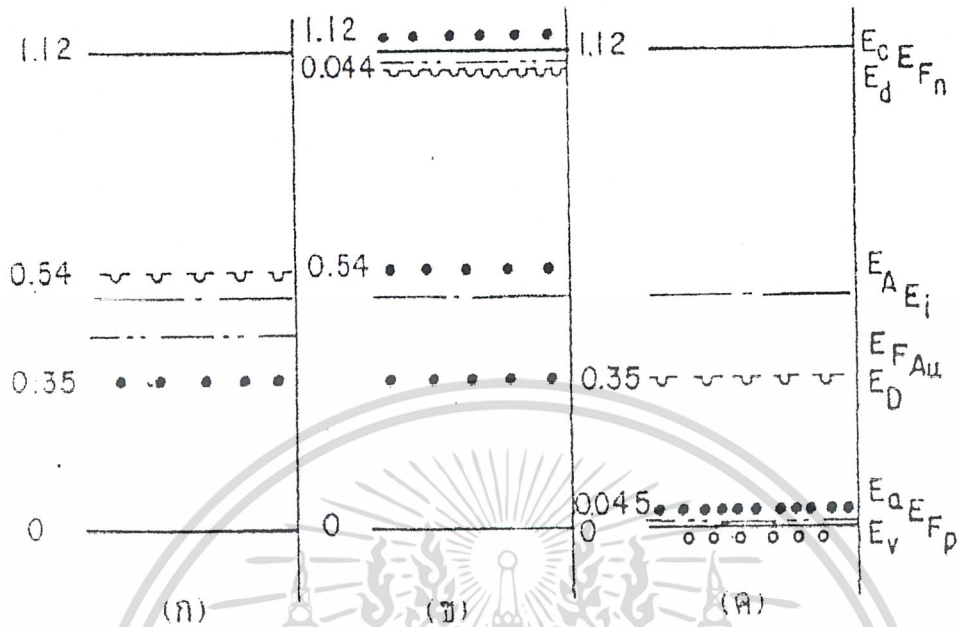
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงงานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแปะประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเติมของค้ำลงในซิลิกอน จะเกิดระดับพลังงานแบบลึก 2 ระดับ ได้แก่ระดับพลังงาน deep donor like level โดยมีตำแหน่งอยู่เหนือแถบวาเลนซ์ (Valence band) ประมาณ 0.35 eV และอีกระดับพลังงานได้แก่ deep acceptor like level ที่ตำแหน่งอยู่ใต้แถบความนำ (Conduction band) ลงมาประมาณ 0.54 eV แสดงชัดเจนดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงระดับพลังงานแบบลึกของอะตอมของค้ำในซิลิกอน

ดังรูปด้านบนจะเห็นว่าเมื่อเติมอะตอมของค้ำลงในซิลิกอนสามารถที่จะเกิดระดับพลังงานแบบลึกได้ แต่ก็สามารถที่จะทำให้เกิดระดับพลังงานแบบตื้นได้ โดยการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่นหรือที่ซึ่งสมมุติให้มีค่ามากกว่าอะตอมของ ค้ำ แสดงดังรูปที่ 4.8

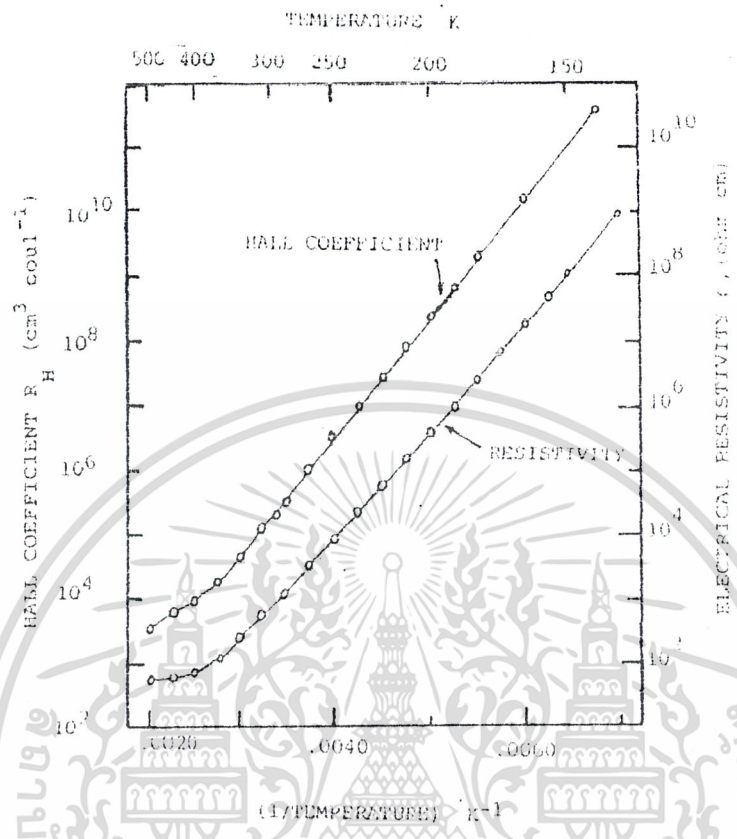


รูปที่ 4.8 แสดงไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำเมื่อ

- ก. ไม่เติมอะตอมสารเจือ
- ข. เติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นซึ่งสมมุติให้มีค่ามากกว่าอะตอมทอง
- ค. เติมอะตอมสารเจือชนิดพีซึ่งสมมุติให้มีค่ามากกว่าอะตอมทอง

4.1.3 ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ

สัมประสิทธิ์ของฮอลล์และค่าพิกัดความต้านทานของซิลิกอนชนิดพี ซึ่งถูกแพร่ด้วยทองคำ จะเป็นสัดส่วนกลับของอุณหภูมิดังรูปที่ 4.9

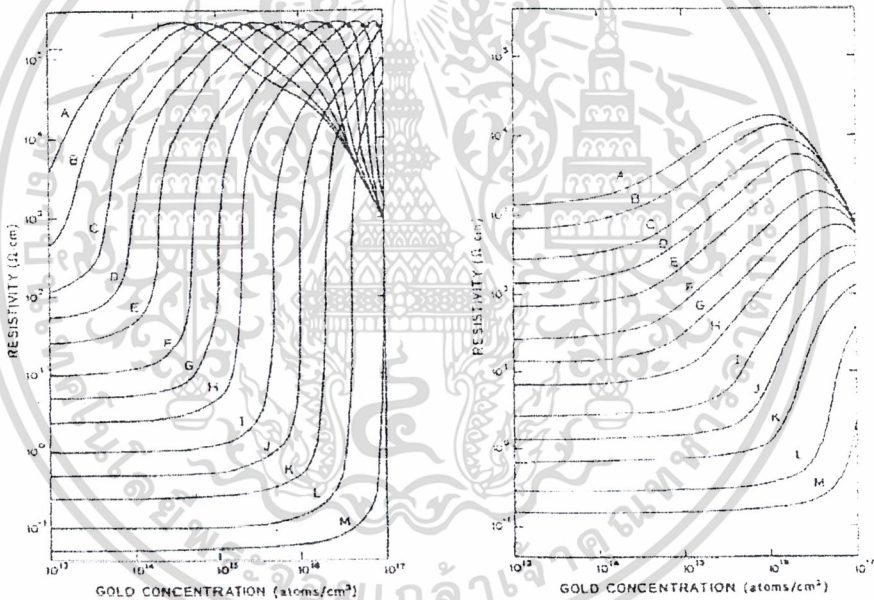


รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และค่าพิกัดความต้านทานของซิลิกอนชนิดพีเมื่ออุณหภูมิของการแพร่ทองเปลี่ยนแปลงไป

ในซิลิกอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยทองคำ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำตกลงมาในระดับพลังงาน (Deep acceptor) ซึ่งอยู่ห่างจากได้แถบความนำประมาณ  $0.54 \pm 0.02$  eV หรือก็คือ อิเล็กตรอนในแถบความนำจะถูกจับ (trap) acceptor level คือเกิดปรากฏการณ์ชดเชย (compensation) ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวลดลง ค่าพิกัดความต้านทานจึงเพิ่มขึ้นและช่วงอายุ (life time) ของพาหะจะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของทองคำให้มากขึ้น จะทำให้ Deep acceptor level มีจำนวนมากพอที่จะจับอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำได้เกือบหมด ค่าพิกัดความต้านทานจะมีค่าสูงขึ้น จนกลายเป็นอินทริคซิค (Intrinsic) และถ้ายังเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของอะตอมทองคำขึ้นไปอีก จะทำให้ค่าพิกัดความต้านทานลดลง ซึ่งแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) โดยพาหะส่วนใหญ่จะเป็นโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในซิลิกอนชนิดพี เมื่อแพรวอะตอมของทองคำลงไป จะทำให้เกิดระดับพลังงานที่เรียกว่า Deep Donor Level ที่ตำแหน่งสูงสุดจากแถบวาเลนซ์ประมาณ 0.35 eV ซึ่งอยู่เหนือกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ ดังนั้นอิเล็กตรอนจาก Deep Donor Level จะตกลงมายังระดับพลังงานที่ต่ำกว่าในแถบวาเลนซ์ซึ่งรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ทำให้จำนวนโฮลลดลง ค่าพิกัดความต้านทานจึงสูงขึ้น ถ้าเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของอะตอมทองคำเข้าไปอีกจนกระทั่งโฮลในแถบวาเลนซ์รวมตัวกับอิเล็กตรอน จนเกือบหมด จะทำให้ค่าพิกัดความต้านทานลดลง ซึ่งแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานกับความหนาแน่นของอะตอมทองคำในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานและความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำ

ก. ชนิดเอ็น

ข. ชนิดพี

$$A = 1 \times 10^{13} ; B = 2 \times 10^{13} ; C = 5 \times 10^{13} ; D = 1 \times 10^{14}$$

$$E = 2 \times 10^{14} ; F = 5 \times 10^{14} ; G = 1 \times 10^{15} ; H = 2 \times 10^{15}$$

$$I = 5 \times 10^{15} ; J = 5 \times 10^{16} ; K = 2 \times 10^{16} ; L = 5 \times 10^{16}$$

$$M = 1 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ทองคำเป็นตัวควบคุม lifetime

ทองคำจะแสดงคุณสมบัติเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ของพาหะส่วนน้อยในซิลิกอนชนิดเอ็นและพี ดังรูปที่ 4.8

ในซิลิกอนชนิดเอ็นที่มี  $N_D \gg N_{AU}$  จะทำให้ระดับพลังงาน deep acceptor level ทำให้อิเล็กตรอนของทองมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม จนกลายเป็น acceptor ชนิดที่มีประจุลบ ( $N_{AU}^-$ ) จะทำหน้าที่เป็น hole trapping คือจับโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยทำให้  $\tau_p$  จะลดลง ขณะที่มีการจับโฮลอาจมีอิเล็กตรอนจากแถบความนำเคลื่อนลงมายัง recombination center

สำหรับซิลิกอนชนิดพี ที่มี  $N_A \gg N_{AU}$  จะทำให้ระดับพลังงาน deep donor level จะจับโฮลจนกลายเป็น donor ชนิดที่มีประจุบวก ( $N_{AU}^+$ ) และสามารถจับหรือแตรป (trap) กับอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยทำให้  $\tau_n$  มีค่าลดลง

ค่า lifetime ของพาหะส่วนน้อย แสดงได้โดย

$$\tau_{\text{to}} = \frac{1}{(\sigma_{j0} V_j N)}$$

โดยที่

$\tau_{\text{to}}$  = ช่วงอายุ (lifetime) มีหน่วยเป็น sec

$\sigma_{j0}$  = capture cross-section มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2$

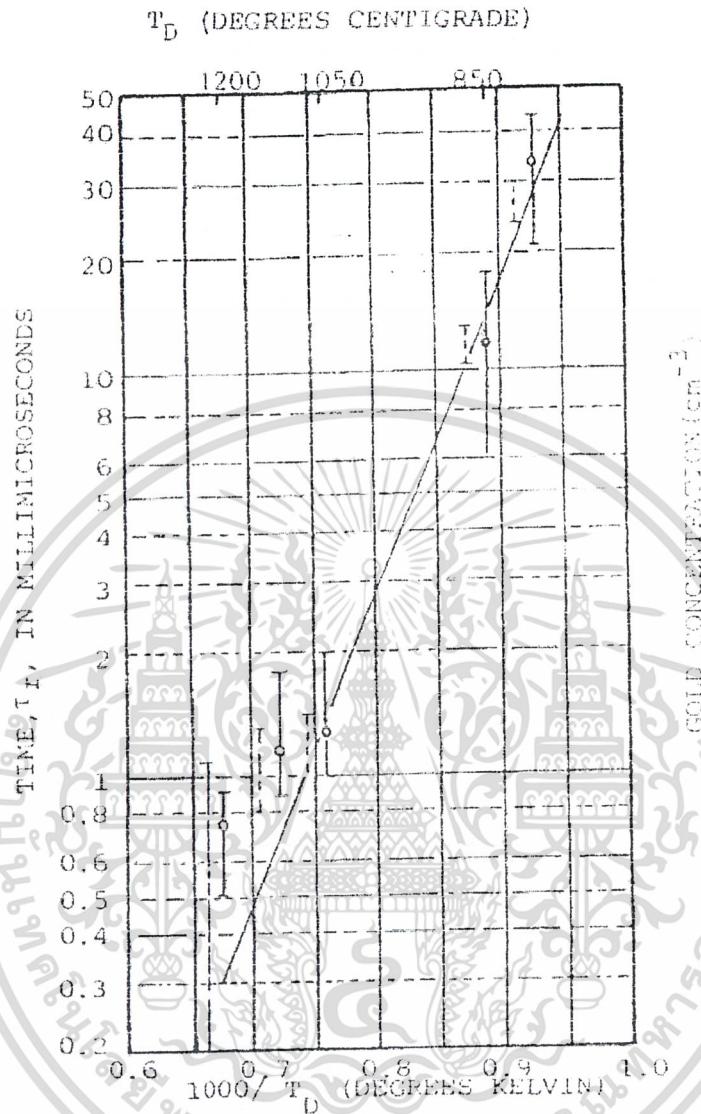
$V_j$  = ความเร็วของอุณหภูมิตัว (thermal velocity) ของพาหะ มีหน่วย

เป็น  $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$

$N$  = ความหนาแน่นของ trapping center มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-3}$

สำหรับค่า capture cross-section ของพาหะที่อุณหภูมิ 300 องศาเคลวิน จะอยู่ในช่วง  $10^{-14} - 10^{-16} \text{ cm}^2$  และค่าความเร็วของอุณหภูมิตัว (thermal velocity) ของพาหะที่อุณหภูมิ 300 องศาเคลวิน จะอยู่ในช่วง  $10^7 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$

ส่วนค่าของ lifetime หลังจากแพร่ทองคำ จะเป็นส่วนกลับของอุณหภูมิตัวที่ใช้ในการแพร่สารเจือทองคำ หรือก็คือ ค่า lifetime จะลดลงเมื่อปริมาณของทองคำเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ lifetime เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ทองเปลี่ยนไป

## 4.2 ข้อสังเกตการจับยึด (Trap Concept)

### 4.2.1 การจับยึด (Trapping)

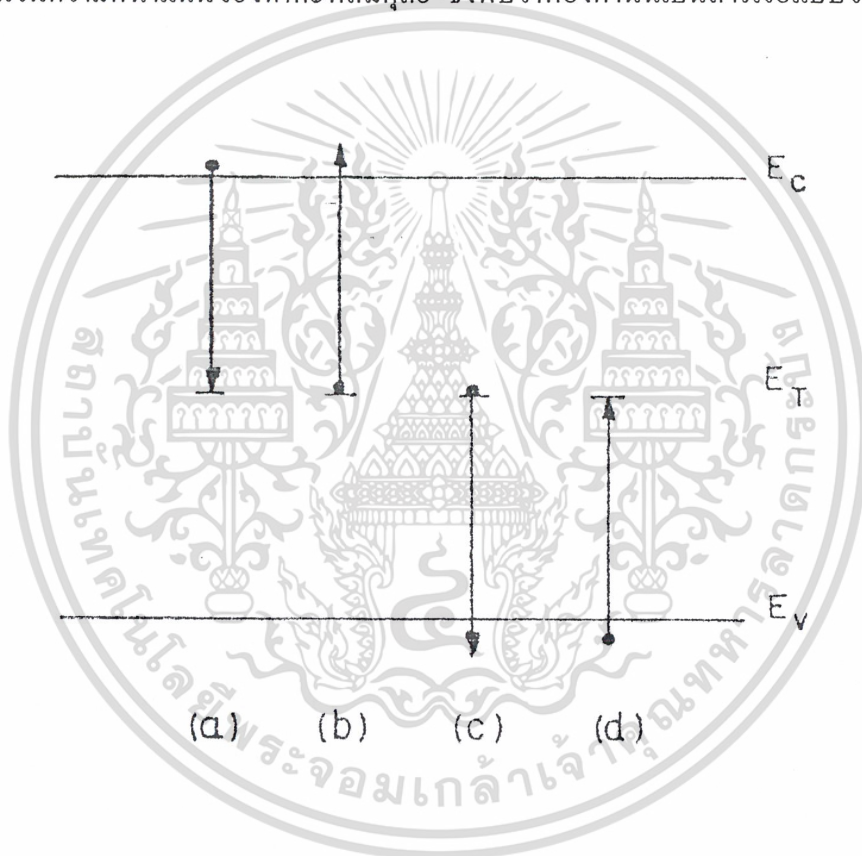
สารเจือจับลึกในสารกึ่งตัวนำนั้น จะเป็นทั้งศูนย์กลางการจับยึดและศูนย์กลางการรวมตัว กล่าวคือ พาหะข้างน้อยถูกจับยึดที่ศูนย์กลาง ถ้าพาหะข้างน้อยนี้ใช้เวลาช่วงชีวิตอยู่ในสถานะการจับยึดแล้วถูกปลดปล่อยไปที่แถบที่มานั้นเราถือว่าเป็น การจับยึด (Trap) แต่ก่อนที่จะมีการปลดปล่อยเกิดขึ้นนั้นพาหะข้างมากถูกจับยึด จะทำให้เกิดการรวมตัวขึ้น ซึ่งการจับยึดนี้จะขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นพาหะข้างมากและภาคตัดขวางการจับยึด (Capture Cross Section) ทั้งของพาหะข้างมากและของพาหะข้างน้อย

#### 4.2.2 กระบวนการการจับยึด (Trapping Process)

สำหรับสารเจือแบบขัปลีกกันนั้น จะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว เมื่อมีความหนาแน่นของพาหะมากในสารกึ่งตัวนำ และจะเป็นศูนย์กลางการกำเนิดเมื่อความหนาแน่นของพาหะมีน้อยกว่าจำนวนความหนาแน่นของพาหะที่สมดุล ซึ่งพบว่าทองคำนั้นเป็นสารเจือแบบขัปลีกด้วย



รูปที่ 4.12 แสดงกระบวนการการจับยึดและกำเนิดของอิเล็กตรอนและ โฮลที่ตำแหน่ง  $E_T$

- การจับยึดอิเล็กตรอน จากแถบความนำมาจากศูนย์กลาง
- การปลดปล่อยอิเล็กตรอน จากศูนย์กลางไปที่แถบความนำ
- การปลดปล่อยโฮลจากศูนย์กลางจากศูนย์กลางไปที่แถบวาเลนซ์
- การจับยึดโฮล จากแถบวาเลนซ์มาที่ศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การออกแบบและกระบวนการสร้าง

#### 5.1 การออกแบบ

##### 5.1.1 การออกแบบไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

ในการทดลองนี้ต้องการที่จะศึกษาผลของอะตอมทองคำนำไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ที่อุณหภูมิของการแพร่ต่าง ๆ กัน โดยใช้ค่าอุณหภูมิ

- 950 °C
- 1000 °C
- 1050 °C
- 1100 °C

เปรียบเทียบกับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

โดยเริ่มต้นต้องทำการออกแบบมาส์คที่จะใช้ก่อน แต่ในที่นี้ใช้มาส์คที่ออกแบบไว้แล้ว ซึ่งมาส์คที่ใช้ในการสร้างไดโอดทั้งแบบรอยต่อพี-เอ็น และทั้งแบบมีการเติมอะตอม จะใช้มาส์คแบบเดียวกัน แตกต่างกันตรงการแพร่ทองคำเท่านั้น

มาส์คที่ใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 มาส์ค คือ

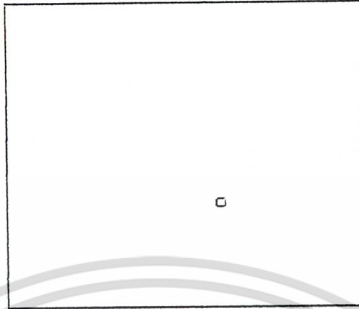
- 1) มาส์คที่ใช้ในการเจาะช่องแพร่สารเจือ



รูปที่ 5.1 แสดงรูปมาส์คที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วัสดุที่ใช้ในการเจาะช่องขั้วสัมผัส

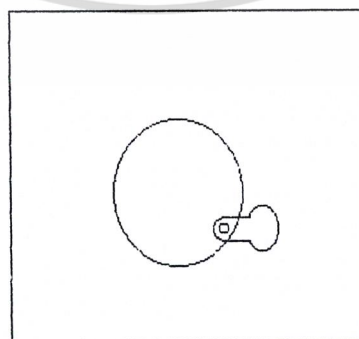


รูปที่ 5.2 แสดงวัสดุที่ 2

3) วัสดุที่ใช้ในการสร้างลวดลายอะลูมิเนียม

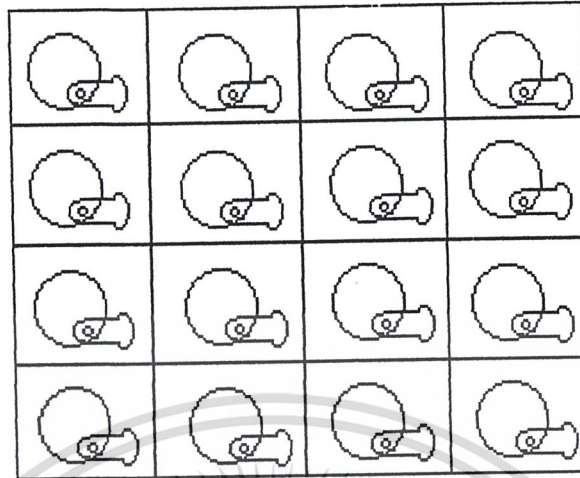


รูปที่ 5.3 แสดงวัสดุที่ 3



รูปที่ 5.4 แสดงรูปเมื่อนำมาตีความวางเรียงทับกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ต้นแบบไดโอดที่ใช้ในการสร้าง

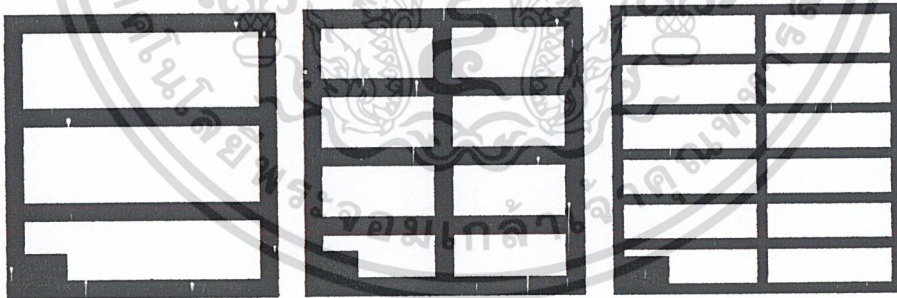
### 5.1.2 การออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ในที่นี้จะใช้มาส์ค เพียงมาส์คเดียวซึ่งใช้ในการทำขั้วสัมผัส แต่จะทำให้เกิดลวดลายที่แตกต่างกัน เพื่อให้พื้นที่ที่รับแสงไม่เท่ากัน

ลวดลาย A

ลวดลาย B

ลวดลาย C



รูปที่ 5.6 แสดงมาส์คที่ใช้ทำขั้วสัมผัส

## 5.2 ขั้นตอนของการสร้างไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

### 5.2.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอนและการเช็ควัสดุสมบัติ

- แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ(111)
- พิกัดความต้านทาน  $3.5-4.5 \Omega - \text{cm}$
- ความหนา  $400 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 การทำความสะอาดผิวของซิลิกอนครั้งแรก

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ ( Deionized Water : DI ) 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรด  $\text{HNO}_3$  ( กรดไนตริก ) 10 นาที กำจัดโลหะหนัก
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

### 5.2.3 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที กำจัดไขมัน
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

### 5.2.4 การ Slite etching กำจัดออกไซด์ที่ผิว

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

### 5.2.5 กระบวนการออกซิเดชัน

- Dry Oxidation ด้วย  $\text{O}_2$  1200 cc/min นาน 6 ชั่วโมง
- ใช้อุณหภูมิเตา  $1100^\circ\text{C}$  อุณหภูมิน้ำ  $90-95^\circ\text{C}$

### 5.2.6 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 1

- อบแผ่นไล่ความชื้นในเตาอบที่  $120^\circ\text{C}$  นาน 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ ( way coat ) นำไป spin ที่ความเร็ว 5000 rpm
- อบฟิล์มที่  $95^\circ\text{C}$  นาน 30 นาที ( prebake )
- Alignment Expose นำมาร์คมาถ่ายลงบนแผ่นผลึก
- Develop ฟิล์ม โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่  $95^\circ C$  นาน 10 นาที ( post bake )
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่  $95^\circ C$  นาน 30 นาที

#### 5.2.7 การใช้สารละลายกัดชั้นออกไซด์ ( Oxide Etching )

- จุ่มในสารละลาย Buffer 3.5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 5.2.8 กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มใน  $H_2SO_4$  แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มใน  $H_2SO_4$  แก้วที่สอง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 5.2.9 การทำความสะอาดผิวหน้า

เพื่อขจัดคราบไขมันจากน้ำยาไวแสงที่ตกค้างอยู่

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.10 การ Slice etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์สองแก้ว
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 5.2.11 กระบวนการ Predeposition

Boron deposition ที่  $950^{\circ}C$

- Activate ด้วย  $O_2$  700 cc/min นาน 30 นาที
- Stabilize ด้วย  $N_2$  700 cc/min นาน 30 นาที
- Deposic ด้วย  $N_2$  700 cc/min นาน 25 นาที
- Deposic ด้วย  $O_2$  700 cc/min นาน 5 นาที

### 5.2.12 ลอกชั้น Boron glass

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 5.2.13 ทำความสะอาดผิวหน้า

- ดมใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 5.2.14 กระบวนการ Drive-in

Boron drive-in ที่  $1100^{\circ}C$

- Dry  $O_2$  1200 cc/min 10 นาที
- Wet  $O_2$  1000 cc/min 20 นาที
- Dry  $O_2$  1200 cc/min 10 นาที

### 5.2.15 กระบวนการแพร่ทอง

- Au Evaporation ที่ความดัน  $1.6 \times 10^{-6}$  Torr
- Au Diffusion นาน 15 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ  $950^{\circ}\text{C}$  ,  $1000^{\circ}\text{C}$  ,  $1050^{\circ}\text{C}$  ,  $1100^{\circ}\text{C}$

### 5.2.16 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2

- อบแผ่นไลต์ความชื้นในเตาอบที่  $120^{\circ}\text{C}$  นาน 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มไลต์ความชื้นที่  $95^{\circ}\text{C}$  นาน 30 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง นาน 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม นาน 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
  - เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$
  - อบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  30 นาที (prebake)

### 5.2.17 Oxide Etching

- จุ่มในสารละลาย Buffer 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

### 5.2.18 กระบวนการลอกฟิล์ม

- ดัมใน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ดัมใน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  แก้วที่สอง 5 นาที
- ดัมในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ดัมในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.19 การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 5.2.20 การเคลือบชั้นอนุกรมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator

ที่ความดัน  $1.6 \times 10^{-6}$  Torr

#### 5.2.21 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์กที่ 3

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ( Az ) แล้วนำไปสปินที่ความเร็ว 5000 rpm
- อบฟิล์มที่  $85^{\circ}C$  นาน 20 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย
  - จุ่มลงใน Az Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Az Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
  - อบฟิล์มที่  $85^{\circ}C$  นาน 30 นาที ( postbake )

#### 5.2.22 การสกัดชั้นอนุกรม (Al-Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ  $40^{\circ}C$
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 5.2.23 กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

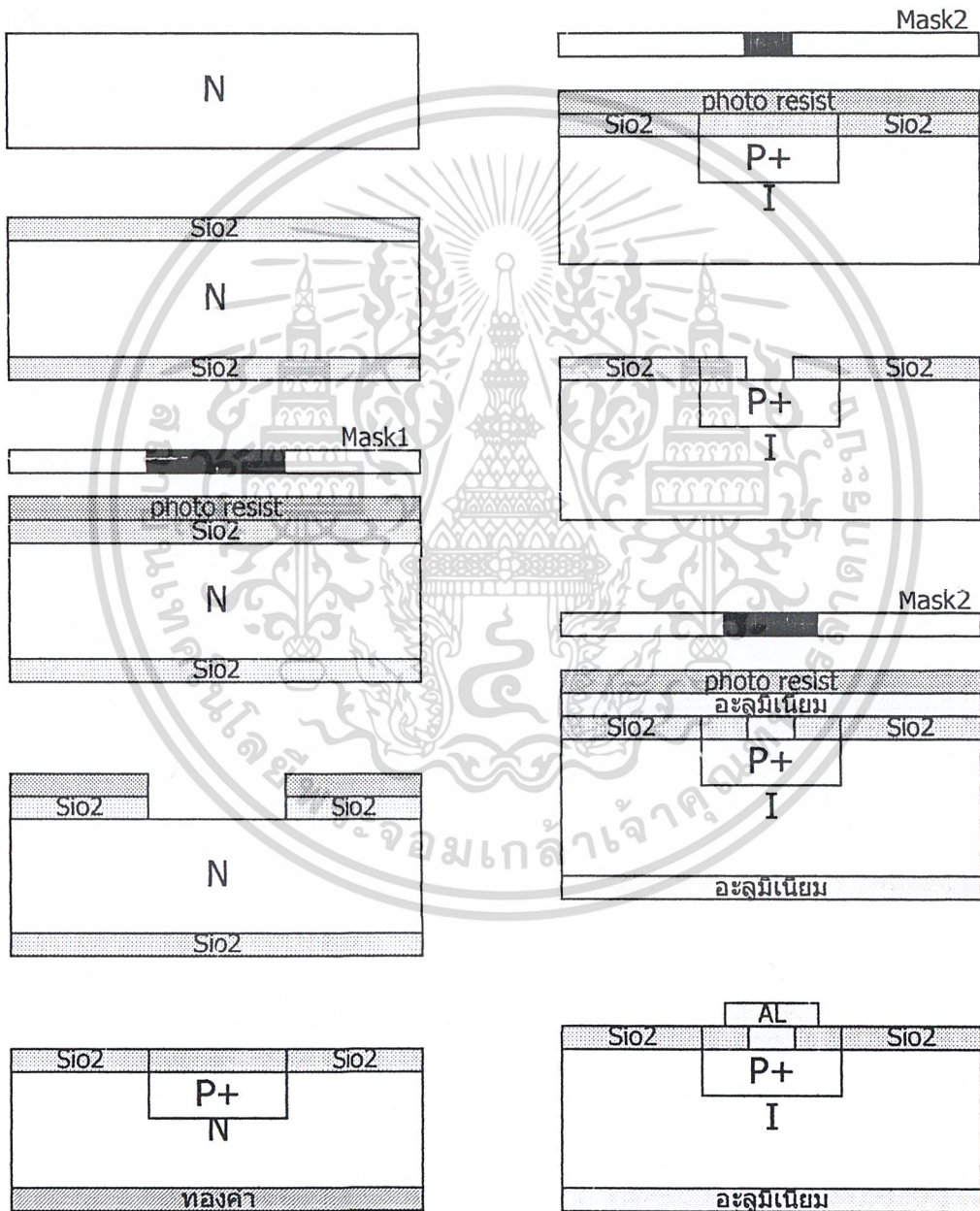
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.24 กระบวนการ Sintering ที่ 500 °c

เพื่อให้ได้ส่วนสัมผัสที่เป็นโอห์มมิก โดยทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจน

- Dry N<sub>2</sub> 1000 cc/min นาน 12 นาที

ขั้นตอนการสร้างไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น



แผ่นสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ขั้นตอนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น

#### 5.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอนและการเช็กคุณสมบัติ

- แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ(111)
- พิกัดความต้านทาน  $0.1-0.3 \Omega - \text{cm}$
- ความหนา  $400 \mu\text{m}$

#### 5.3.2 การทำความสะอาดผิวของซิลิกอนครั้งแรก

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ ( Deionized Water : DI ) 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรด  $\text{HNO}_3$  ( กรดไนตริก ) 10 นาที กำจัดโลหะหนัก
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

#### 5.3.3 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มใน Trichloethylene 5 นาที กำจัดไขมัน
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

#### 5.3.4 การ Slite etching กำจัดออกไซด์ที่ผิว

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

#### 5.3.5 กระบวนการออกซิเดชัน

- Dry Oxidation ด้วย  $\text{O}_2$  1200 cc/min นาน 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย  $\text{O}_2$  1200 cc/min นาน 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย  $\text{O}_2$  1200 cc/min นาน 1 ชั่วโมง

ใช้อุณหภูมิ  $1100^\circ\text{C}$  อุณหภูมิ  $90-95^\circ\text{C}$

ทำการลอกชั้นซิลิกอนออกไซด์เฉพาะด้านล่างออก

### 5.3.6 กระบวนการ Predeposition ด้านล่าง

Boron deposition ( $P^+$ ) ที่  $1100^{\circ}C$

- Deposition ด้วย  $N_2$  700 cc/min นาน 45 นาที
- Drive in

Dry ด้วย  $O_2$  700 cc/min นาน 10 นาที

Wet ด้วย  $O_2$  700 cc/min นาน 80 นาที

ทำการลอกชั้นซิลิกอนออกไซด์เฉพาะด้านบนออก

### 5.3.7 กระบวนการ Predeposition ด้านบน

Phosphorus deposition ที่  $1100^{\circ}C$

- Deposition ด้วย  $N_2$  700 cc/min นาน 30 นาที
- Drive in ด้วย  $O_2$  700 cc/min นาน 10 นาที

จะได้ชั้นออกไซด์ หนาประมาณ  $1500 \text{ \AA}$

### 5.3.8 การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer 3.5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 5.3.9 กระบวนการแพร่ทอง

- Au Evaporation ที่ความดัน  $1.6 \times 10^{-6}$  Torr
- Au Diffusion นาน 15 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ  $950^{\circ}C$

### 5.3.10 กระบวนการออกซิเดชัน

- Dry Oxidation ด้วย  $O_2$  1200 cc/min นาน 1 ชั่วโมง

ใช้อุณหภูมิเตา  $1100^{\circ}C$  อุณหภูมิน้ำ  $90-95^{\circ}C$  ความหนา  $1500 \text{ \AA}$

เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนของแสง

### 5.3.11 การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator

ที่ความดัน  $1.6 \times 10^{-6}$  Torr

### 5.3.12 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 1

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ( Az ) แล้วนำไปสปินที่ความเร็ว 5000 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<sub>2</sub>
  - อบฟิล์มที่ 85 ° c นาน 30 นาที ( postbake )

### 5.3.13 การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 ° c
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

### 5.3.14 กระบวนการลอกฟิล์ม

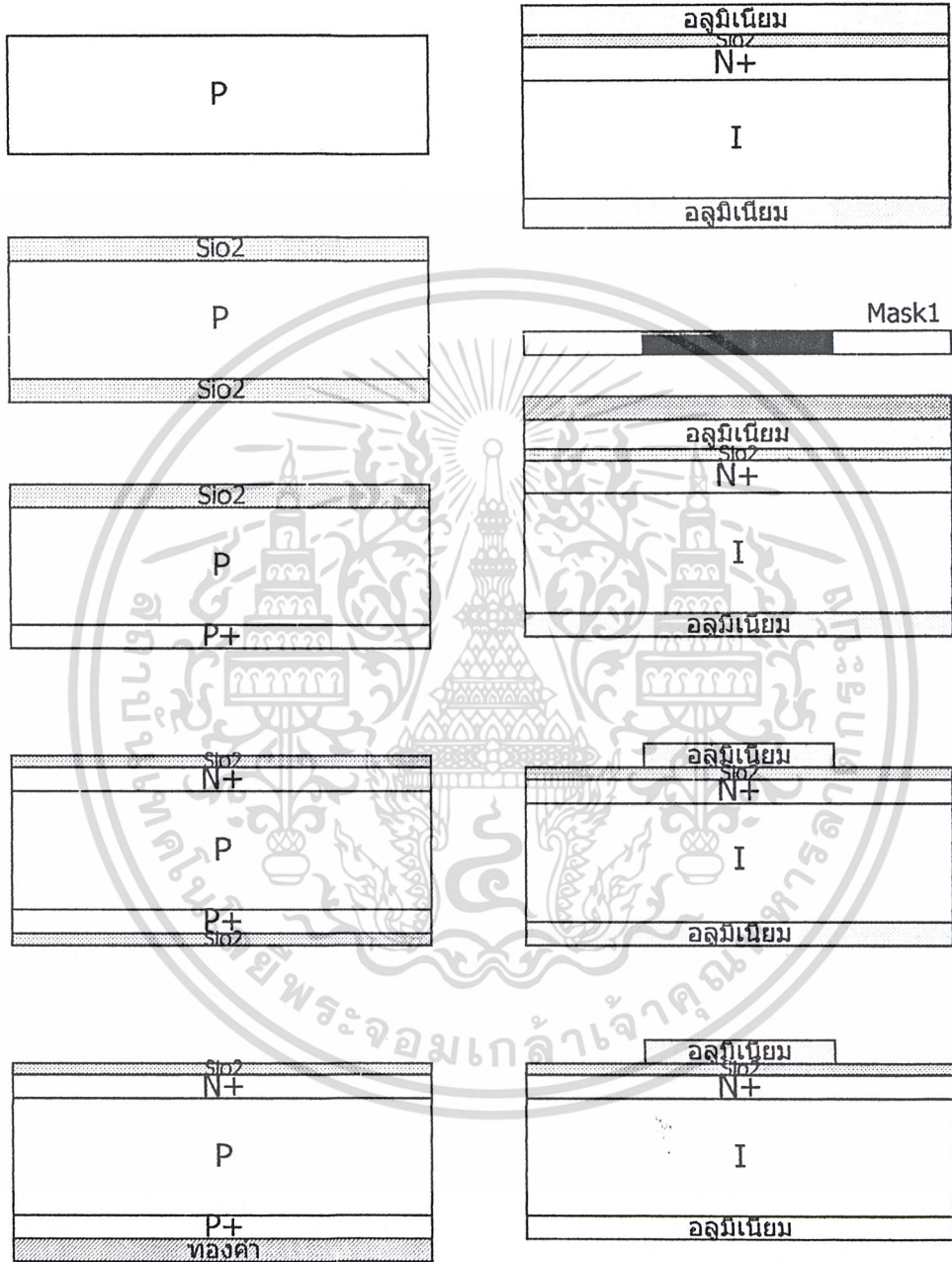
- จุ่มใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

### 5.3.15 กระบวนการ Sintering ที่ 500 ° c

เพื่อให้ได้ส่วนสัมผัสที่เป็น โอห์มมิก โดยทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจน

- Dry N<sub>2</sub> 1000 cc/min นาน 12 นาที

ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น



แผ่นสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การทดลองและผลการทดลอง

เมื่อเสร็จกระบวนการสร้างแล้ว ขั้นตอนต่อไปเราจะทำการวัดคุณสมบัติสำคัญต่าง ๆ ของ ไดโอด โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคุณสมบัตินี้จะใช้หัวเข็ม (Probe) ของเครื่องวัดมาสัมผัสที่ส่วน ของ อาโนด และ คาโทดและต่อเข้ากับเครื่องมือวัด HP 4061-A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผล และแสดงออกทางหน้าจอ



รูปที่ 6.1 อุปกรณ์ที่ใช้วัดคุณสมบัติ

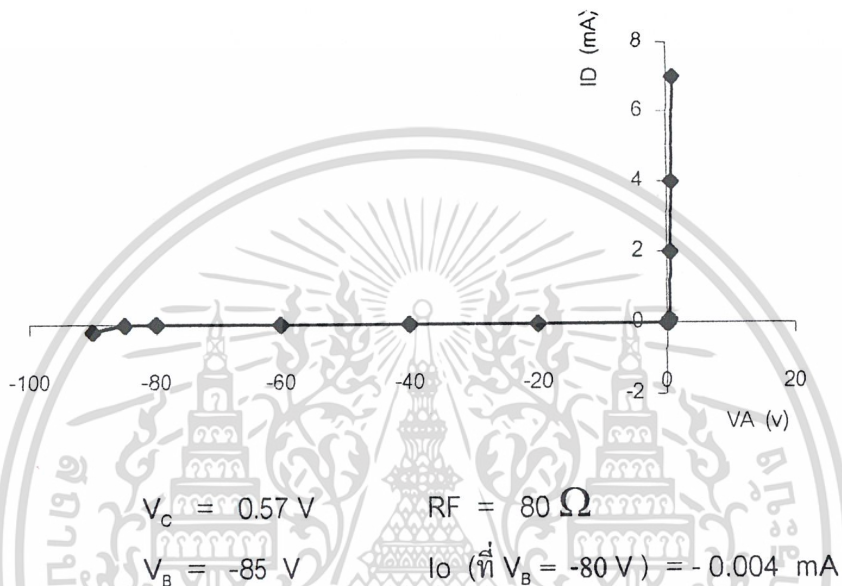
#### 6.1 ผลการทดลองของไดโอด

##### 6.1.1 การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอด

จากการที่เราทำการสร้างไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นแล้วนำมาทำการวัดคุณสมบัติกระแส และแรงดันทั้งเมื่อ ไบอัสตรงและไบอัสกลับจะได้คุณสมบัติใกล้เคียงกับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ในอุดมคติดังรูปที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟกระแส-แรงดัน ของไดโอด  
(ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)



รูปที่ 6.2 แสดงกราฟกระแสและแรงดันของไดโอดที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

### 6.1.2 การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำ

หลังจากที่ทำการวัดคุณสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นแล้วก็จะทำการวัดคุณสมบัติของไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำแสดงดังรูปที่ 5.3

โดยให้

$D_o$  คือ ไดโอดที่ไม่ได้เติมอะตอมทองคำ

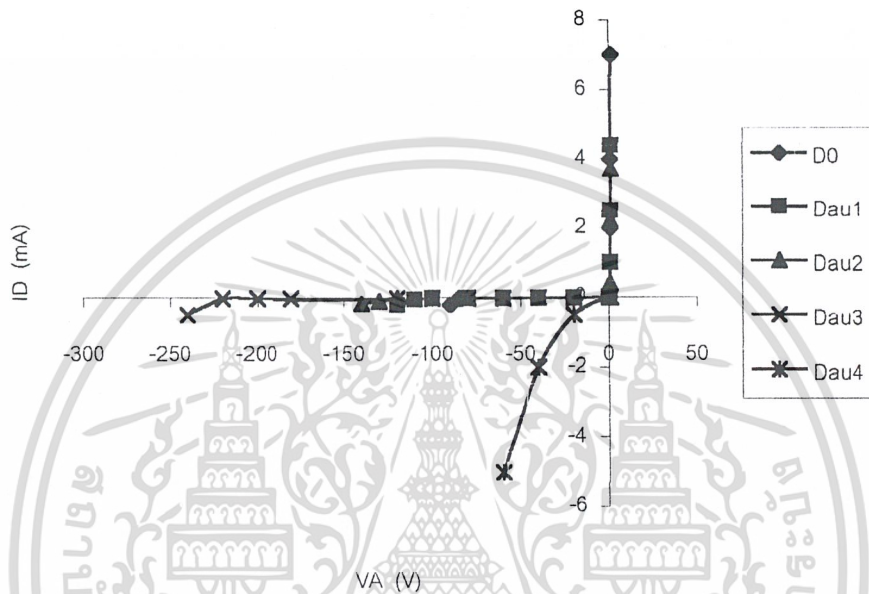
Dau 1 คือ ไดโอดที่เติมอะตอมทองคำที่  $950^\circ \text{C}$

Dau 2 คือ ไดโอดที่เติมอะตอมทองคำที่  $1000^\circ \text{C}$

Dau 3 คือ ไดโอดที่เติมอะตอมทองคำที่  $1050^\circ \text{C}$

Dau 4 คือ ไดโอดที่เติมอะตอมทองคำที่  $1100^\circ \text{C}$

### กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน

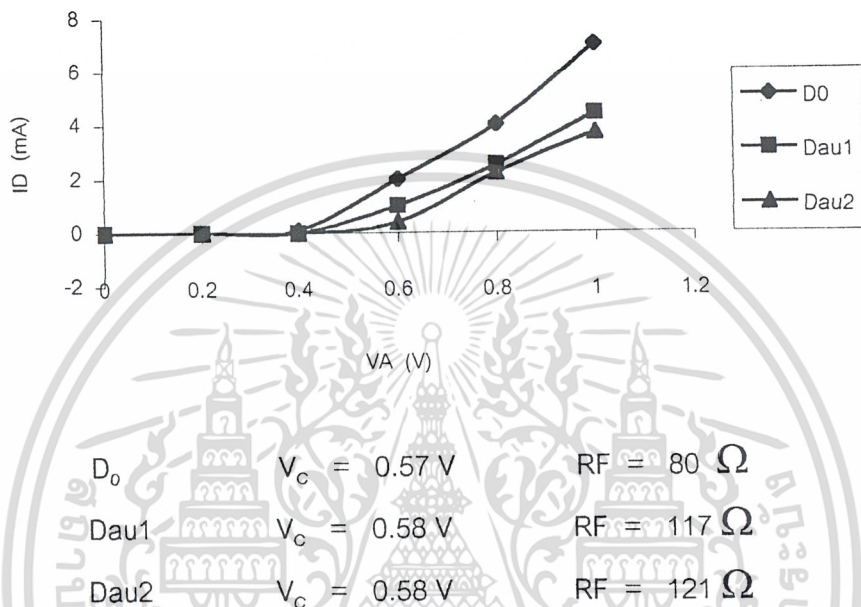


รูปที่ 6.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดันของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น และ ไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำ

จากการทดลองวัดคุณสมบัติทำให้ทราบว่าไดโอดที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ  $1050^{\circ}\text{C}$  และ  $1100^{\circ}\text{C}$  จะเห็นว่าคุณสมบัติของไดโอดทั้งสองกลุ่มนี้ ไม่มีคุณสมบัติเป็นไดโอด เพราะทำให้เกิดความต้านทานขึ้นสูงมาก จึงจะไม่นำมาพิจารณาถึงคุณสมบัติอื่นๆต่อไป

จากรูปที่ 6.3 จะนำคุณสมบัติกระแส-แรงดันมาพิจารณาทีละส่วนเพื่อแสดงให้เห็นคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน  
เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง



รูปที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อไบอัสตรง

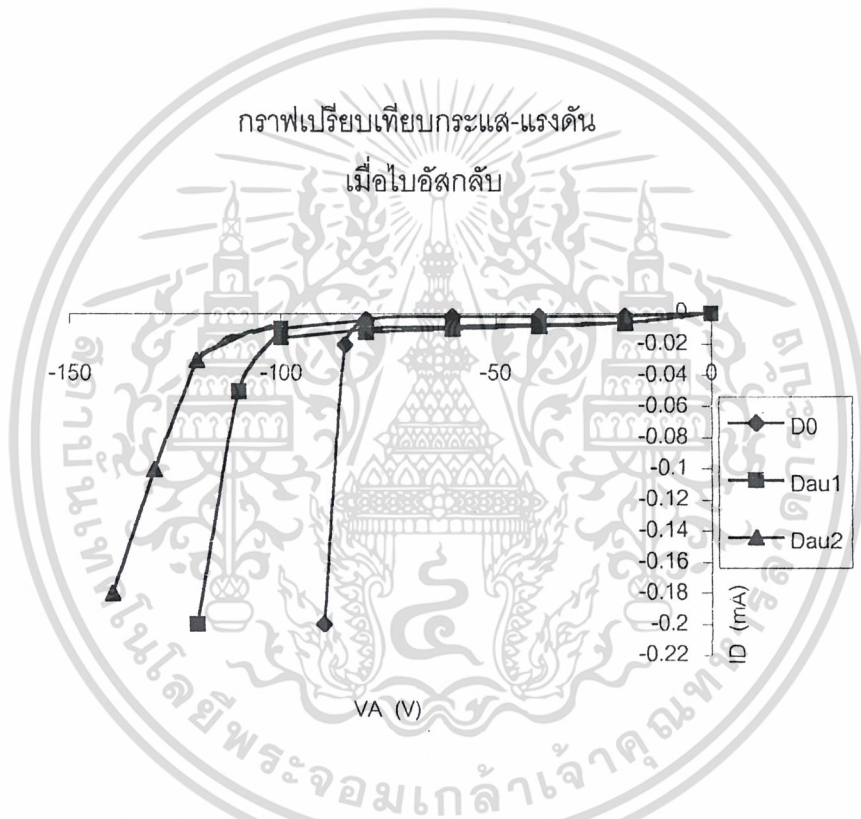
ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าแรงดันนำกระแส ( $V_c$ )

ไดโอด	แรงดันนำกระแส (V)
D <sub>0</sub>	0.57
Dau1	0.58
Dau2	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบค่าความต้านทาน (RF)

ไดโอด	ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )
D <sub>0</sub>	80
Dau1	117
Dau2	121



รูปที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อไบอัสกลับ

D <sub>0</sub>	$V_B = -80 \text{ V}$	$I \text{ (ที่ } V_B = -80 \text{ V)} = -0.004 \text{ mA}$
Dau1	$V_B = -100 \text{ V}$	$I \text{ (ที่ } V_B = -80 \text{ V)} = -0.009 \text{ mA}$
Dau2	$V_B = -130 \text{ V}$	$I \text{ (ที่ } V_B = -80 \text{ V)} = -0.012 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบแรงดันพังทลาย ( $V_B$ )

ไดโอด	ค่าแรงดันพังทลาย (V)
D <sub>0</sub>	-85
Dau1	-100
Dau2	-130

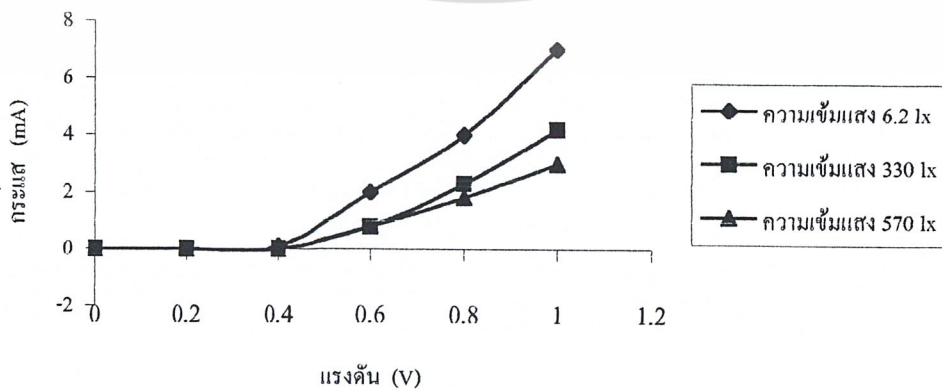
ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบค่ากระแสรั่วไหล (ที่  $V_B = -80$  V)

ไดโอด	ค่ากระแสรั่วไหล (mA)
D <sub>0</sub>	-0.004
Dau1	-0.009
Dau2	-0.012

### 6.1.3 การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน

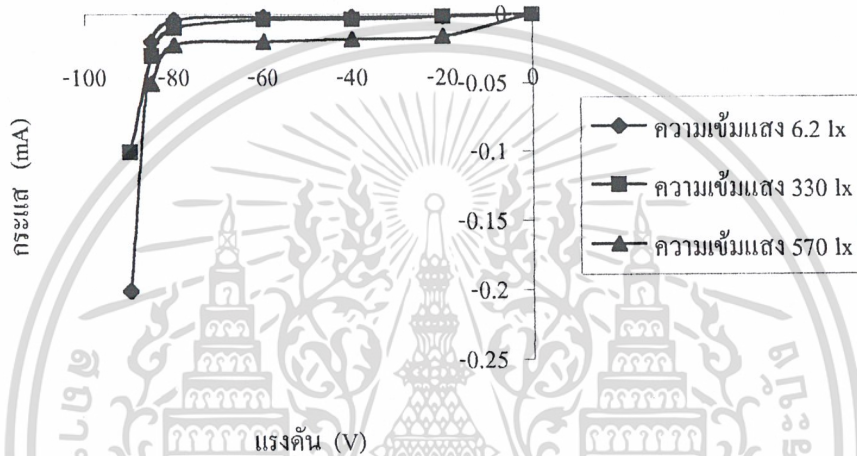
D<sub>0</sub>

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อให้แรงดันไบอัสตรง  
ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน



รูปที่ 6.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน การคำนวณกระแสรั่วไหลเมื่อแรงดันเป็นลบ และการคำนวณกระแสรั่วไหลเมื่อแรงดันเป็นบวก ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อให้แรงดันไบอัสกลับ  
ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน



รูปที่ 6.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับ ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน

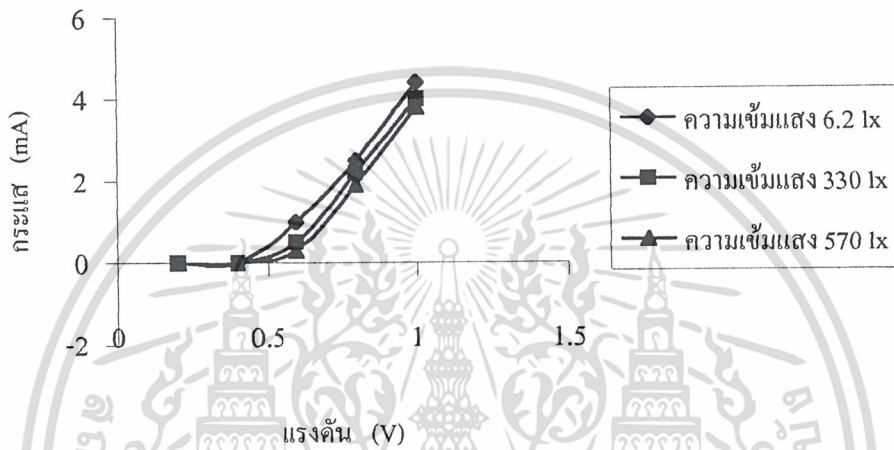
$$\text{ความเข้มแสง } 6.2 \text{ lx } \quad I(\text{ที่ } V_B = -80 \text{ V}) = -0.004 \text{ mA}$$

$$\text{ความเข้มแสง } 330 \text{ lx } \quad I(\text{ที่ } V_B = -80 \text{ V}) = -0.01 \text{ mA}$$

$$\text{ความเข้มแสง } 570 \text{ lx } \quad I(\text{ที่ } V_B = -80 \text{ V}) = -0.022 \text{ mA}$$

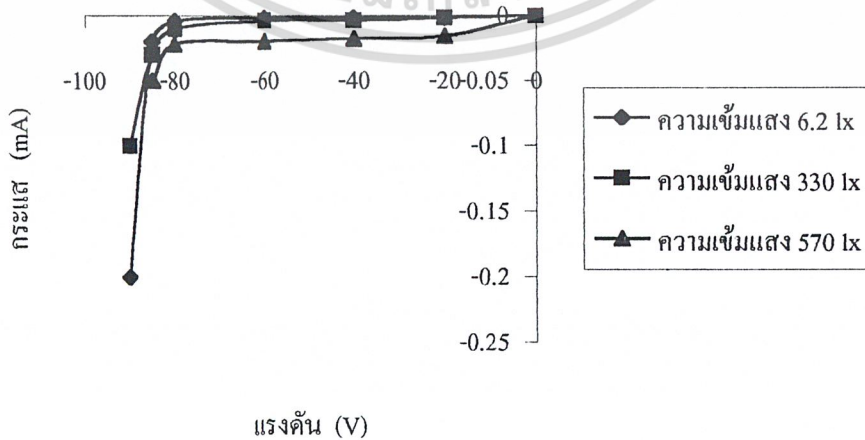
Dau1

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อไบอัสตรง  
ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน



รูปที่ 6.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดัน ไบอัสตรง ที่ความเข้มแสงต่างๆ กัน

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดันเมื่อให้แรงดัน ไบอัสกลับ  
ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน



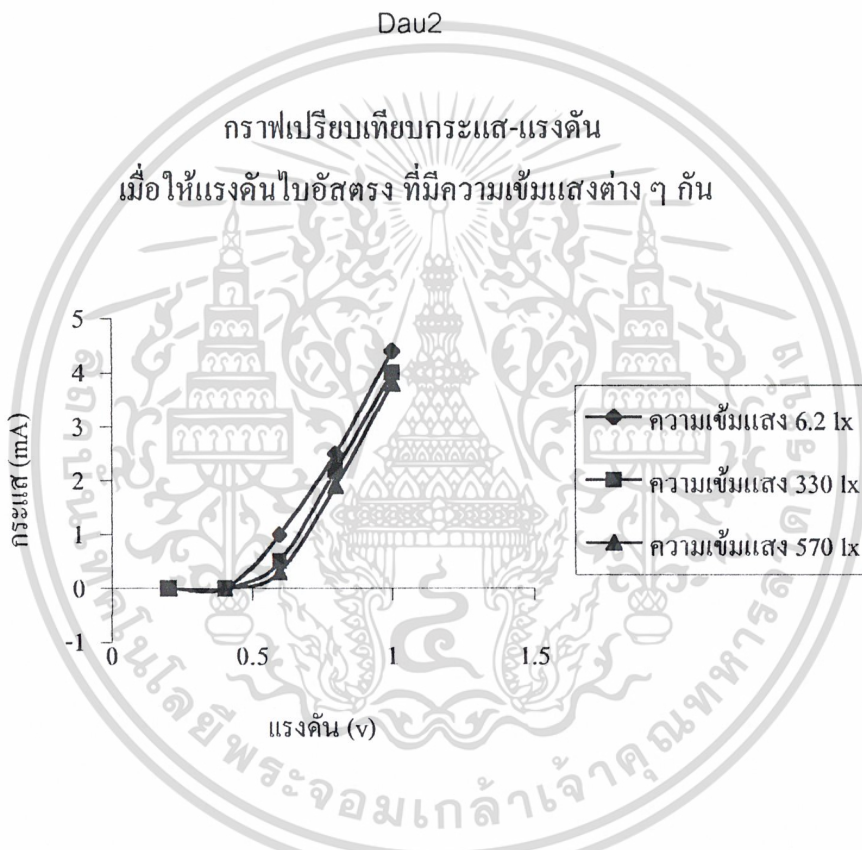
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มแสง 6.2 lx  $I$  (ที่  $V_B = -80$  V) = -0.009 mA

ความเข้มแสง 330 lx  $I$  (ที่  $V_B = -80$  V) = -0.016 mA

ความเข้มแสง 570 lx  $I$  (ที่  $V_B = -80$  V) = -0.026 mA

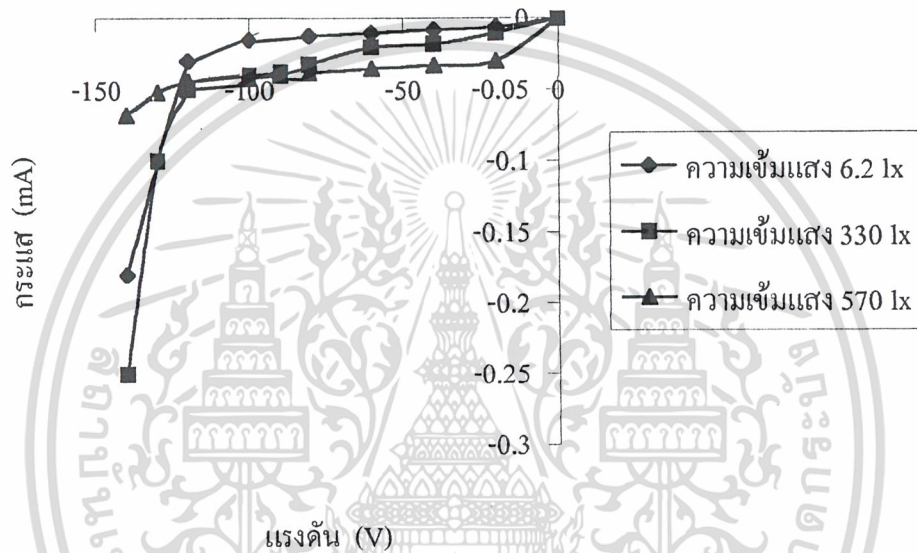
**รูปที่ 6.9** แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับ ที่ความเข้มแสงต่างๆ กัน



**รูปที่ 6.10** แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง ที่ความเข้มแสงต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน  
เมื่อ ให้อิสกัลป์ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน



ความเข้มแสง 6.2 lx  $I$  (ที่  $V_B = -80$  V) = -0.012 mA

ความเข้มแสง 330 lx  $I$  (ที่  $V_B = -80$  V) = -0.032 mA

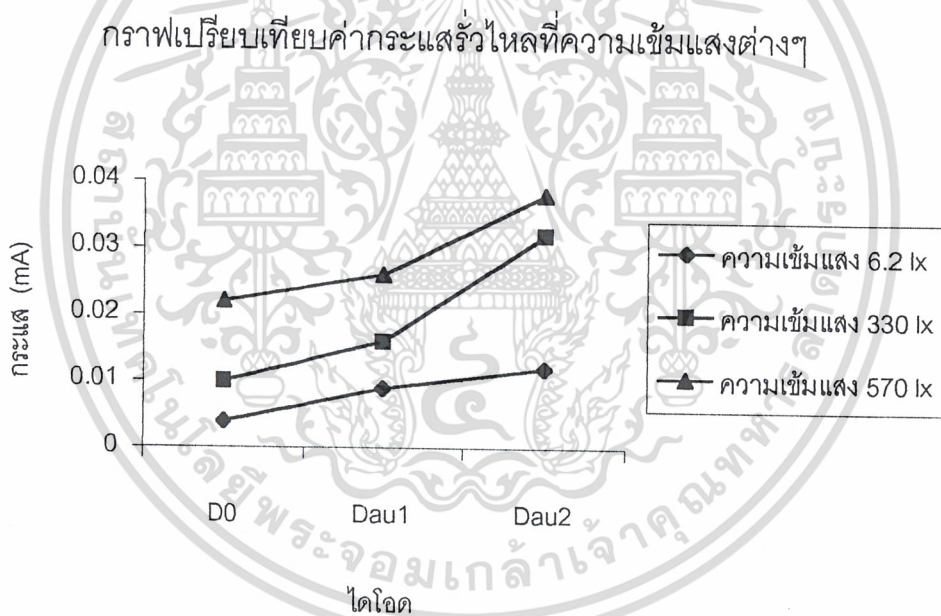
ความเข้มแสง 570 lx  $I$  (ที่  $V_B = -80$  V) = -0.038 mA

รูปที่ 6.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดัน ไบอัสตรงที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบค่ากระแสรั่วไหล (ที่  $V_B = -80 \text{ V}$ ) ที่ความเข้มแสงต่างๆกัน

ไดโอด	ค่ากระแสรั่วไหล (mA) ที่ความเข้มแสง 6.2 lx	ค่ากระแสรั่วไหล (mA) ที่ความเข้มแสง 330 lx	ค่ากระแสรั่วไหล (mA) ที่ความเข้มแสง 570 lx
D <sub>0</sub>	0.004	0.01	0.022
Dau1	0.009	0.016	0.026
Dau2	0.012	0.032	0.038

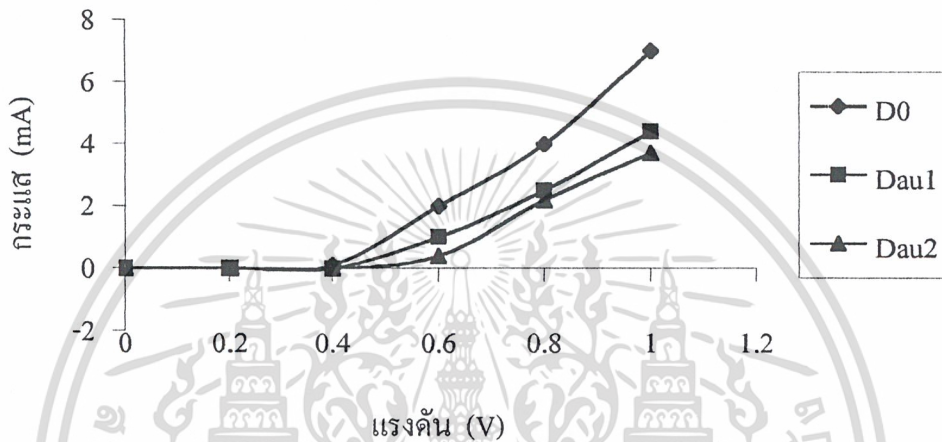


รูปที่ 6.12 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแสรั่วไหล เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับที่ความเข้มแสง ต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

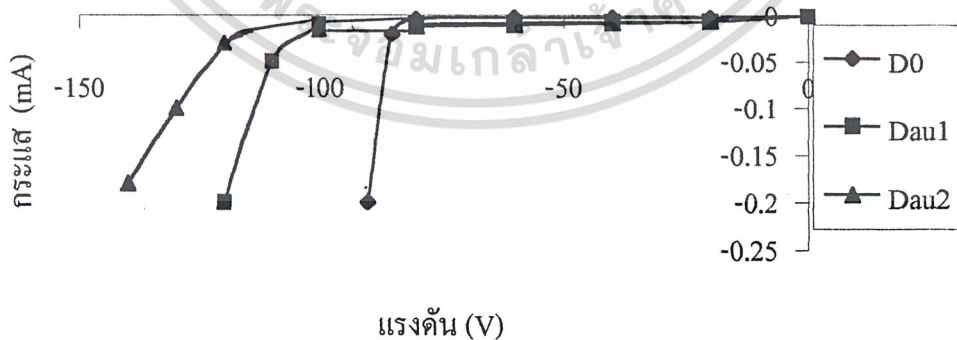
### 6.1.4 การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่ความเข้มระดับเดียวกัน

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน  
เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง (ที่ความเข้มแสง 6.2 lx)



รูปที่ 6.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงที่ความเข้มแสง 6.2lx

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน  
เมื่อไบอัสกลับ (ที่ความเข้มแสง 6.2 lx)



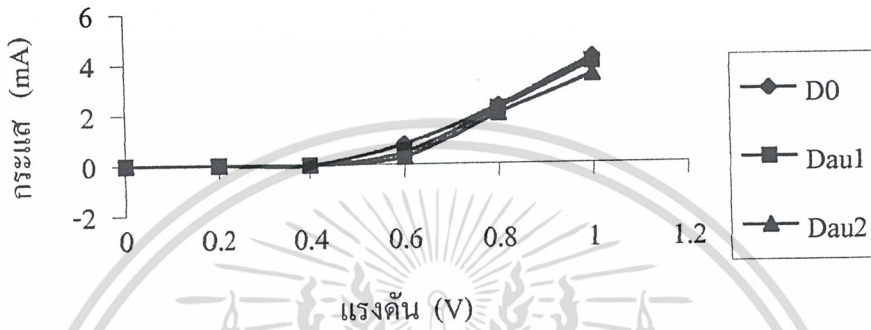
$$D_0 \quad I \text{ (ที่ } V_B = -80 \text{ V)} = -0.004 \text{ mA}$$

$$Dau1 \quad I \text{ (ที่ } V_B = -80 \text{ V)} = -0.009 \text{ mA}$$

$$Dau2 \quad I \text{ (ที่ } V_B = -80 \text{ V)} = -0.012 \text{ mA}$$

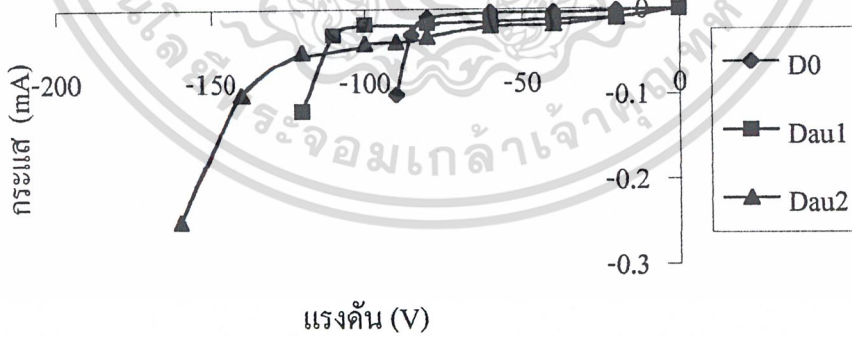
รูปที่ 6.14 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับที่ความเข้มแสง 6.2lx

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน  
เมื่อไบอัสตรง(ที่ความเข้มแสง 330 lx)



รูปที่6.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงที่ความเข้มแสง 330 lx

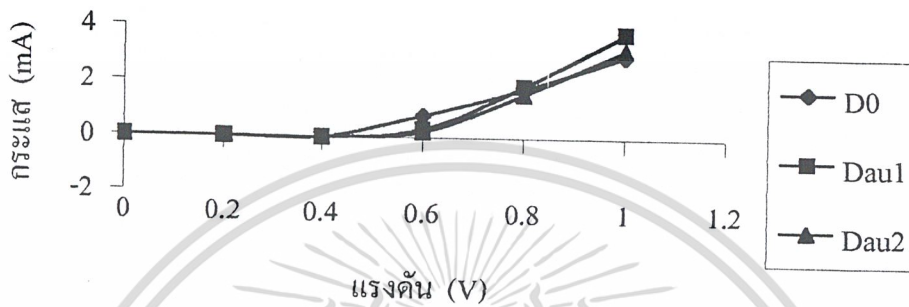
กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน  
เมื่อไบอัสกลับ (ความเข้มแสง 330 lx)



D <sub>0</sub>	I (ที่ V <sub>B</sub> = -80 V) = -0.01 mA
Dau1	I (ที่ V <sub>B</sub> = -80 V) = -0.016 mA
Dau2	I (ที่ V <sub>B</sub> = -80 V) = -0.032 mA

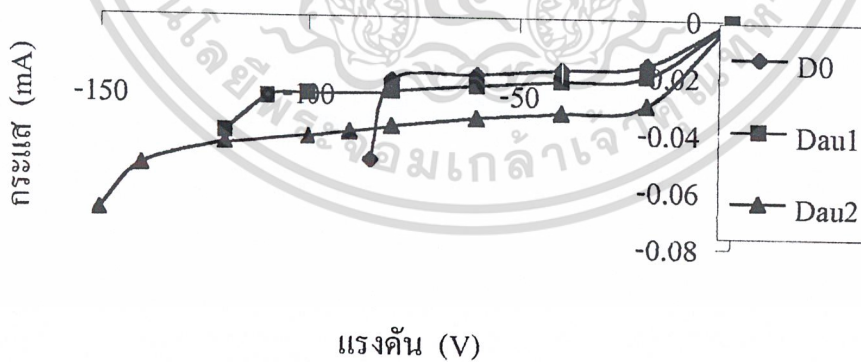
รูปที่6.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับที่ความเข้มแสง 330 lx  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน  
เมื่อแรงดันไบอัสกลับ(ที่ความเข้มแสง 570 lx)



รูปที่ 6.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงที่ความเข้มแสง 570 lx

กราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน  
เมื่อไบอัสกลับ (ที่ความเข้มแสง 570 lx)



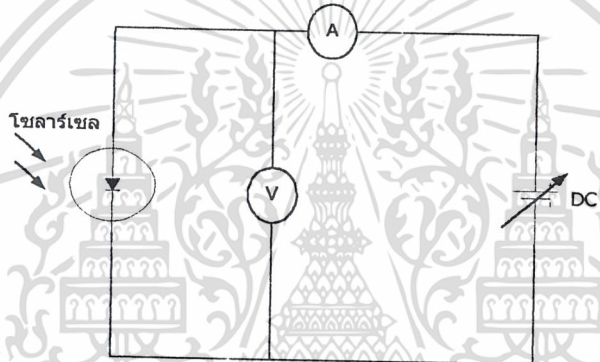
D <sub>0</sub>	$I$ (ที่ $V_B = -80$ V) = -0.022 mA
Dau1	$I$ (ที่ $V_B = -80$ V) = -0.026 mA
Dau2	$I$ (ที่ $V_B = -80$ V) = -0.038 mA

รูปที่ 6.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแส-แรงดัน เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับที่ความเข้มแสง 570 lx  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

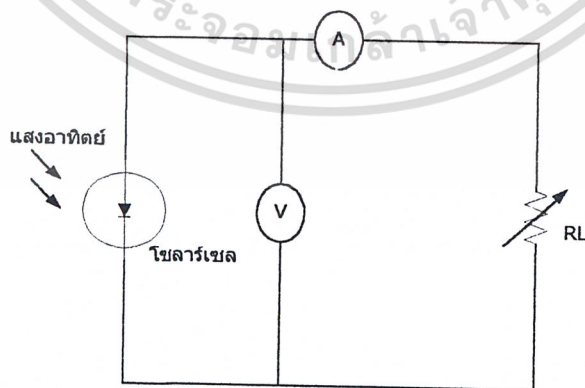
## 6.2 ผลการทดลองของเซลล์แสงอาทิตย์

### 6.2.1 การวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

ในที่นี้จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีความเข้มประมาณ 100 มิลลิวัตต์ ต่อ 1 ตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการต่อวงจรดังรูปที่ 6.19 เพื่อทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์ฯ ขณะไปอัสตรงและไม่ได้รับแสงและจากนั้นก็นำเซลล์มาต่อคั้งวงจรในรูปที่ 6.20 เพื่อวัดคุณสมบัติของเซลล์ฯ ขณะได้รับแสงที่มีความเข้มแสงประมาณ 100 มิลลิวัตต์ต่อ 1 ตารางเซนติเมตร



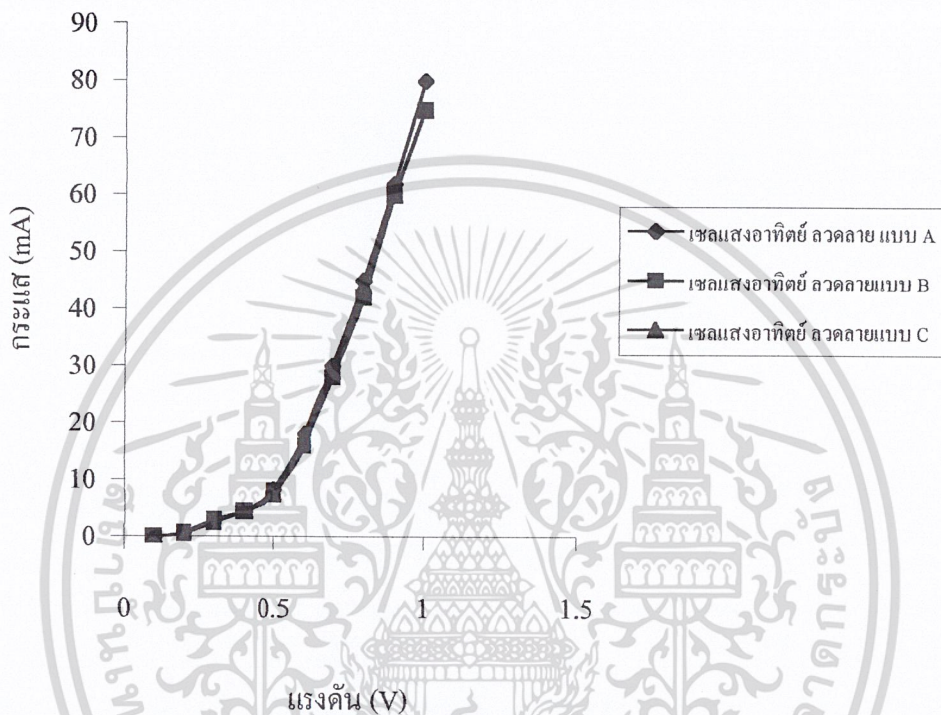
รูปที่ 6.19 การวัดคุณสมบัติของเซลล์ฯ ขณะได้รับไปอัสตรง



รูปที่ 6.20 การวัดคุณสมบัติของเซลล์ฯ ขณะได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน ขณะได้รับไป้อตรง



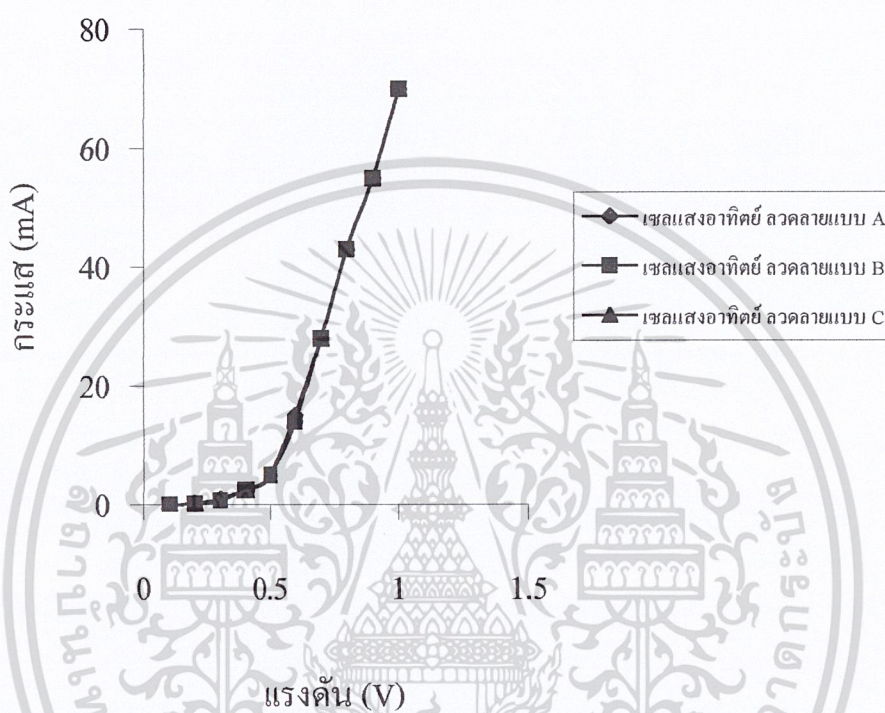
รูปที่ 6.21 แสดงกราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ฯ ขณะได้รับไป้อตรง (ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)

ตารางที่ 6.6 ตารางแสดงค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์ฯ (ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)

$\Delta V$ (โวลต์)	เซลล์ฯ ลวดลาย A		เซลล์ฯ ลวดลาย B		เซลล์ฯ ลวดลาย C	
	$\Delta I$ (มิลลิแอมป์)	$R_s$ (โอห์ม)	$\Delta I$ (มิลลิแอมป์)	$R_s$ (โอห์ม)	$\Delta I$ (มิลลิแอมป์)	$R_s$ (โอห์ม)
0.4	62.5	6.4	60	6.66	59	6.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสตรง



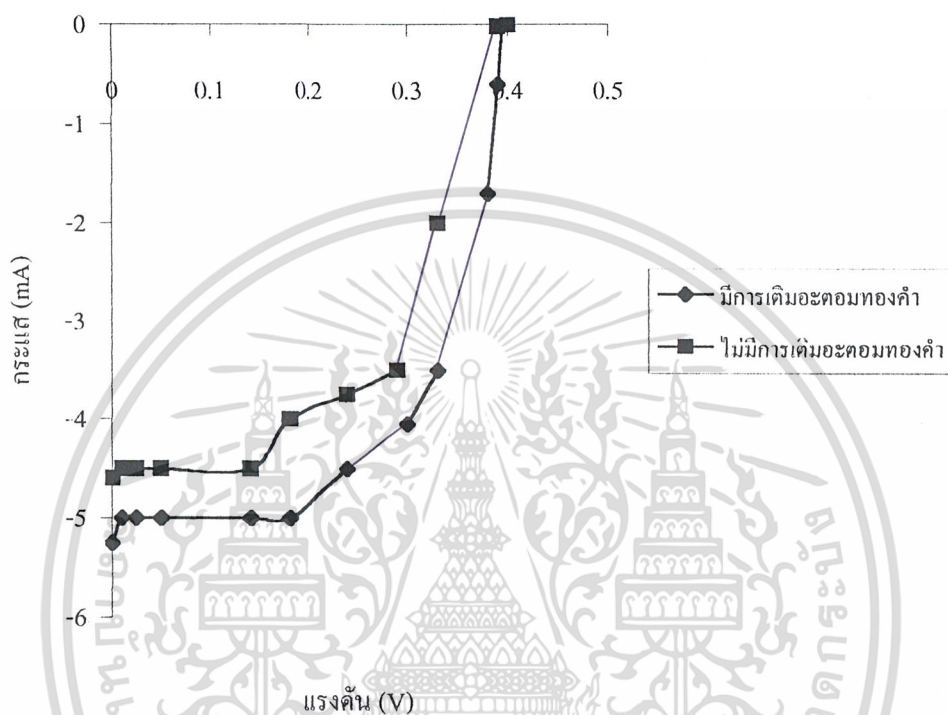
รูปที่ 6.22 แสดงกราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ฯ ขณะได้รับไบอัสตรง (มีการเติมอะตอมทองคำ)

ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์ฯ (มีการเติมอะตอมทองคำ)

$\Delta V$ (โวลต์)	เซลล์ฯ ลวดลาย A		เซลล์ฯ ลวดลาย B		เซลล์ฯ ลวดลาย C	
	$\Delta I$ (มิลลิแอมป์)	$R_s$ (โอห์ม)	$\Delta I$ (มิลลิแอมป์)	$R_s$ (โอห์ม)	$\Delta I$ (มิลลิแอมป์)	$R_s$ (โอห์ม)
0.4	55	7.27	57	7.01	57	7.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟกระแส-แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ ลวดลายแบบ A



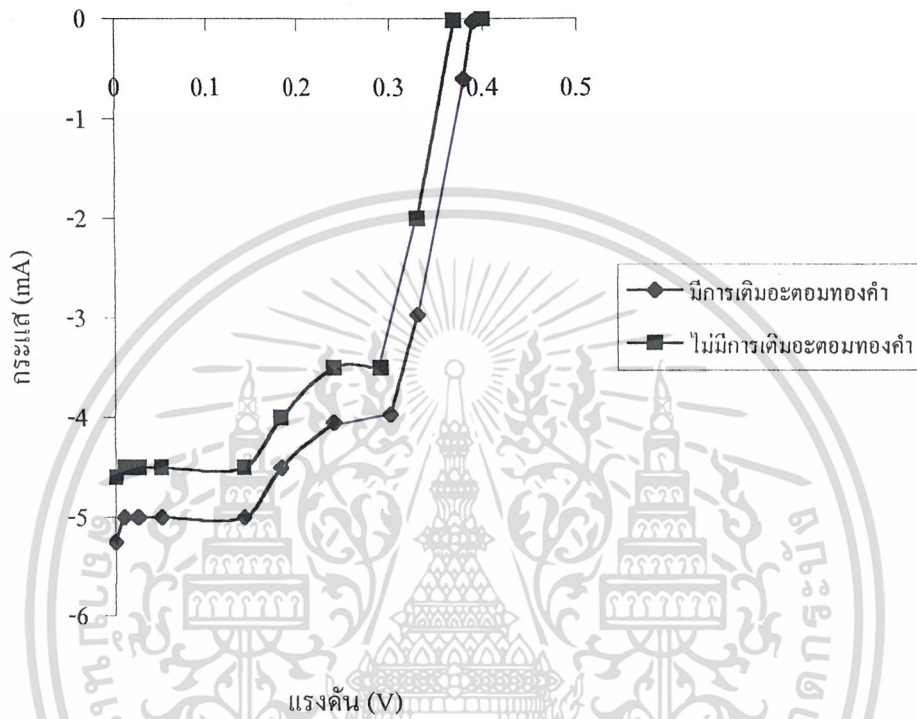
รูปที่ 6.23 กราฟแสดงคุณสมบัติของเซลล์ลวดลาย A ขณะได้รับแสง

ตารางที่ 6.8 ตารางแสดงคุณสมบัติของเซลล์ ลวดลาย A

คุณสมบัติ	มีการเติมอะตอมทองคำ	ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ
Isc (มิลลิแอมป์)	5.25	4.5
Jsc (มิลลิแอมป์/ตร.ซม.)	5.25	4.5
Voc (โวลท์)	0.4	0.4
Pm (มิลลิวัตต์)	1.2	1.044
FF	0.57	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟกระแส-แรงดัน เซลล์แสงอาทิตย์ ลวดลายแบบ B



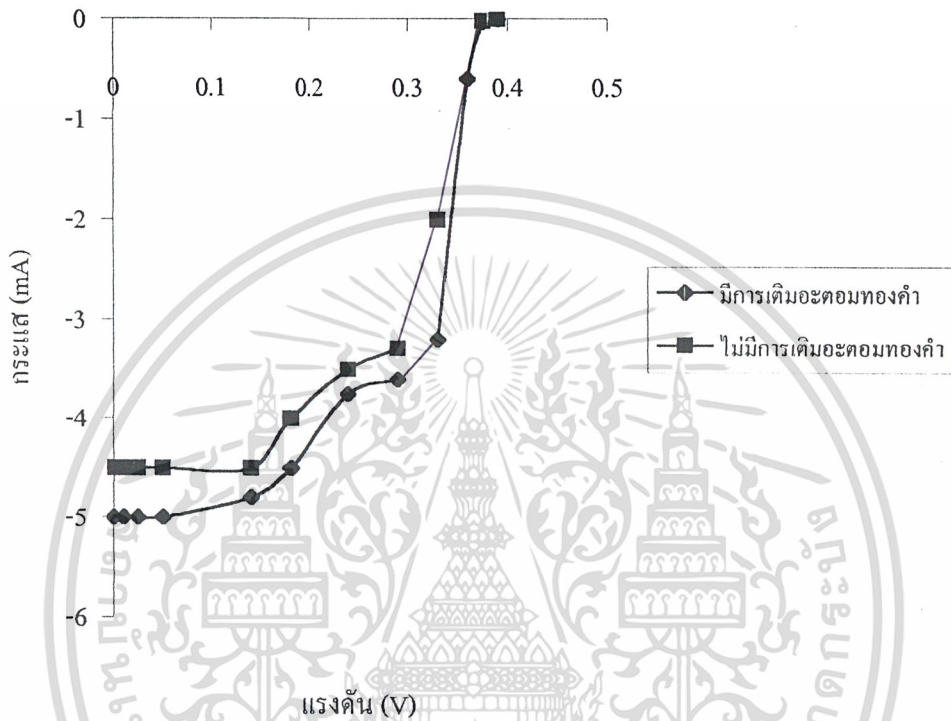
รูปที่ 6.24 กราฟแสดงคุณสมบัติของเซลล์ลวดลาย B ขณะได้รับแสง

ตารางที่ 6.9 ตารางแสดงคุณสมบัติของเซลล์ ลวดลาย B

คุณสมบัติ	มีการเติมอะตอมทองคำ	ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ
Isc (มิลลิแอมป์)	5.25	4.5
Jsc (มิลลิแอมป์/ตร.ซม.)	5.25	4.5
Voc (โวลท์)	0.4	0.39
Pm (มิลลิวัตต์)	1.2	1.02
FF	0.57	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟกระแส-แรงดัน เซลแสงอาทิตย์ ลวดลายแบบ C



รูปที่ 6.25 กราฟแสดงคุณสมบัติของเซลล์ลวดลาย C ขณะได้รับแสง

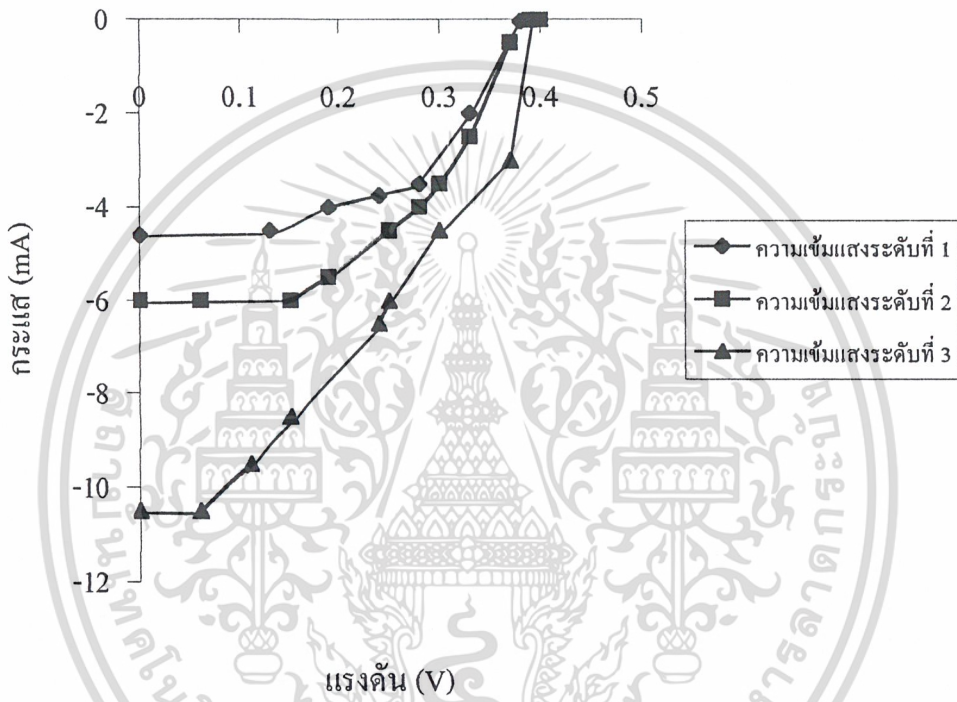
ตารางที่ 6.10 ตารางแสดงคุณสมบัติของเซลล์ ลวดลาย C

คุณสมบัติ	มีการเติมอะตอมทองคำ	ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ
Isc (มิลลิแอมป์)	5	4.5
Jsc (มิลลิแอมป์/ตร.ซม.)	5	4.5
Voc (โวลต์)	0.4	0.39
Pm (มิลลิวัตต์)	1.088	0.992
FF	0.544	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2.2 การวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงต่างๆ กัน

กราฟกระแส-แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์  
ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่ความเข้มแสงต่างๆ

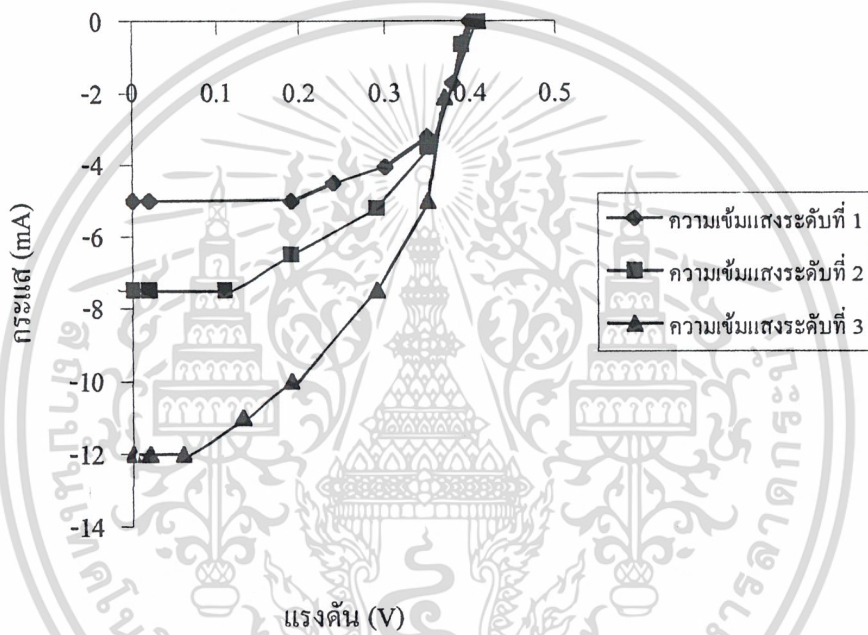


รูปที่ 6.26 กราฟแสดงคุณสมบัติของเซลล์ลวดลาย A ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน  
(ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)

ตารางที่ 6.11 ตารางแสดงค่ากระแสและแรงดันของเซลล์ ลวดลาย A ที่ความเข้มแสงต่างกัน  
(ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ)

ความเข้มแสง	Isc (มิลลิแอมป์)	Voc (โวลต์)
ความเข้มแสงระดับที่ 1	4.6	0.4
ความเข้มแสงระดับที่ 2	6	0.4
ความเข้มแสงระดับที่ 3	10.5	0.4

กราฟกระแส-แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์  
ที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่ความเข้มแสงต่างๆ



รูปที่ 6.27 กราฟแสดงคุณสมบัติของเซลล์ลวดลาย A ที่ความเข้มแสงต่างๆ กัน  
(มีการเติมอะตอมทองคำ)

ตารางที่ 6.12 ตารางแสดงค่ากระแสและแรงดันของเซลล์ ลวดลาย A ที่ความเข้มแสงต่างกัน  
(มีการเติมอะตอมทองคำ)

ความเข้มแสง	Isc (มิลลิแอมป์)	Voc (โวลต์)
ความเข้มแสงระดับที่ 1	5	0.4
ความเข้มแสงระดับที่ 2	7.5	0.4
ความเข้มแสงระดับที่ 3	12	0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น โดยทำการเติมอะตอมทองคำลงไปในอุปกรณทั้ง 2 ชนิด จากการทดลองจะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับผลของอะตอมทองคำได้

ในไดโอดเมื่อให้ไบอัสตรงกับไดโอดที่การเติมอะตอมทองคำ จะเห็นว่าค่ากระแสของไดโอดแต่ละตัวจะมีลักษณะกราฟไม่เหมือนกัน โดยที่ไดโอดตัวที่มีการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิสูง กราฟกระแสของไดโอดที่จะยิ่งค่อนข้างจะเป็น Linear หรือกราฟเกือบจะเป็นเหมือนตัวต้านทาน เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง จะเสมือนเกิดความต้านทานสูงอนุกรมอยู่ในเนื้อสาร เพราะอะตอมทองคำจะมีคุณสมบัติเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนและโฮลในแถบความนำและแถบวาเลนซ์ลดลง ส่งผลทำให้เกิดความต้านทานสูงนั่นเอง

เมื่อให้ไบอัสกลับกับไดโอดที่การเติมอะตอมทองคำ จะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลชัดเจนมากกว่าไดโอดที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ โดยกระแสรั่วไหลรวมจะเกิดมาจากกระแส  $I_0$  และกระแส G-R โดยอะตอมทองคำจะมีผลต่อกระแส G-R มาก คือทำให้กระแส G-R มากขึ้น เนื่องจากอะตอมทองคำไปทำให้ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในบริเวณปลอดพาหะซึ่งมีอยู่แล้ว มากขึ้น

อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ถึงผลของแสง โดยเมื่อให้แสงที่มีปริมาณความเข้มมาก ก็จะมีกระแสรั่วไหลมากขึ้นในขณะที่ไบอัสกลับ อันเนื่องมาจากกระแสแสงมีทิศทางเดียวกับกระแสรั่วไหล ส่วนในทางไบอัสตรงก็มีผล แต่กระแสของแสงนั้นจะมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับกระแสเมื่อไบอัสตรง ดังนั้นจึงไม่เห็นผลของแสง

ในเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเติมอะตอมทองคำในเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีไบอัสตรงขณะที่ไม่ได้รับแสง จะเห็นว่าอะตอมทองคำมีผลต่อความต้านทานแต่ไม่มากนัก และเมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์มาวัดคุณสมบัติในขณะที่ได้รับแสง จะเห็นว่าอะตอมทองคำมีผลทำให้กระแสมีค่ามากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งผลของทองคำในการศึกษาครั้งนี้ทำให้เกิดค่ากระแส G มากขึ้น จึงทำให้เกิดกระแสมากขึ้น แต่หากผลของทองคำทำให้เกิดค่ากระแส R มากก็ จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเติมอะตอมทองคำ มีค่ากระแสน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำได้

จากนั้น เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงที่มีความเข้มต่างๆกันก็จะทำให้ค่ากระแสเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มแสงสูงขึ้นเรื่อยๆ จะมีค่ากระแสมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากกระแสที่ได้จากแสงทำให้ค่ากระแสมากขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเติมอะตอมทองคำซึ่งมีค่ากระแสมากอยู่แล้ว ก็ยังเพิ่มมากขึ้นอีก

จากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ จะมีค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานจริง แต่คุณ

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อเติมอะตอมทองคำในโคโอด จะทำให้โคโอดมีการทำงานเร็วขึ้น เพราะอิเล็กตรอนกับโฮลมีการรวมตัวเร็วขึ้น สามารถทำงานเป็นโฟโตนิกโคโอดได้ดี เพราะมีกระแสรั่วไหลมาก และยังเมื่อได้รับแสงมากกระแสรั่วไหลก็จะยิ่งสูง ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเติมอะตอมทองคำจะทำให้มีกระแสเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะให้มีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น



## ภาคผนวก

### ศัพท์เทคนิค

บริเวณปลอดพาหะ	Depletion Region
ศักย์สัมผัส	Contact Potential
การรวมตัวของพาหะ	Recombination
การเกิดของพาหะ	generation
ปรากฏการณ์การพังทลาย	Breakdown Phenomena
การพังทลายแบบซีเนอร์	Zener Breakdown
การพังทลายแบบอะวาลานช์	Avalanche Breakdown
จุดหลอมเหลว	Melting point
ความดันของไอ	Vapor Pressure
สารเจือขั้วลึก	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
ค่าความเร็วของอุณหภูมิ	thermal velocity
ความต้านทานเชิงลบ	Negative sresistance
ภาคตัดขวางการจับยึด	Capture Cross Section
กระบวนการการจับยึด	Trapping Process
สารเจือแบบตื้น	Shallow Level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$N_D$	ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้	$\text{cm}^{-3}$
$N_A$	ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ	$\text{cm}^{-3}$
$N_{AU}$	ความหนาแน่นของอะตอมทอง	$\text{cm}^{-3}$
$n$	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	$\text{cm}^{-3}$
$E_A$	ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้รับ	ev
$E_C$	ระดับพลังงานที่ขอบล่างสุดของแถบความ	ev
$E_V$	ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้ให้	ev
$E_C$	ระดับพลังงานที่ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์	ev
$N_C$	effective densities of state ในแถบความนำ	$\text{cm}^{-3}$
$N_V$	effective densities of state ในแถบวาเลนซ์	$\text{cm}^{-3}$
$K$	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	( $^\circ\text{K}$ )
$\tau_{jo}$	ช่วงอายุ (lifetime)	sec
$\sigma_{jo}$	capture cross-section	$\text{cm}^2$
$V_j$	ความเร็วของอุณหภูมิจึงพาหะ	$\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$
$\sigma$	ค่าภาคตัดขวางการจับยึด	$\text{cm}^2$
$V_{th}$	ค่าความเร็วของอิเล็กตรอน	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
$P_m$	ค่ากำลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์	watt
$F.F$	ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	-
$\eta$	ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

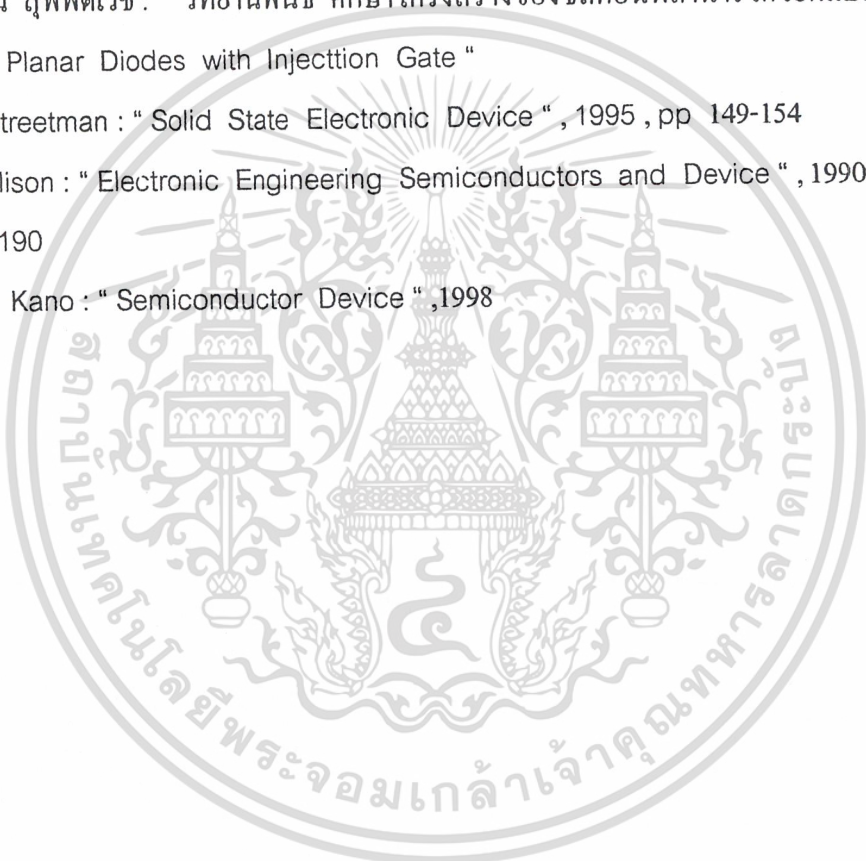
โครงการชิ้นนี้ได้เสร็จสิ้นลงได้ก็ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช และความช่วยเหลือจากรุ่นพี่ปริญญาโท และเจ้าหน้าที่ของห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งบิดาและมารดา ทำให้โครงการได้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

1. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช : " สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ " พิมพ์ครั้งที่ 7 พ.ศ. 2540
2. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช : " เทคโนโลยีการสร้างและการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ " ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
2. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช : " เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ " วารสารอิเล็กทรอนิกส์เว็ลด์ พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2525
3. จินคาร์ตัน สุพัตเวช : " วิทยานิพนธ์ ศึกษาโครงสร้างของซิลิกอนพลานาร์ไดโอดแบบ IG p+-i-n+ Planar Diodes with Injection Gate "
4. Ben G.Streetman : " Solid State Electronic Device " ,1995 ,pp 149-154
5. John Allison : " Electronic Engineering Semiconductors and Device " ,1990 , pp 184-190
6. Kanaan Kano : " Semiconductor Device " ,1998



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้