

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษากระบวนการสร้างและสมบัติทางแสง  
ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

**THE STUDY OF FABRICATION AND OPTICAL  
CHARACTERISTICS OF Al/n-Si/Al PHOTODIODE**



โดย

กมลรัตน์ พนมลี  
ชาลุชัย บุญมา

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61780  
วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2549

b. 11603306  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากระบวนการสร้างและสมบัติทางแสง  
ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

THE STUDY OF FABRICATION AND OPTICAL  
CHARACTERISTICS OF Al/n-Si/Al PHOTODIODE

โดย



กมลันต์ พนมลี 45015186

ชาญชัย บุญมา 45015189

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2547

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

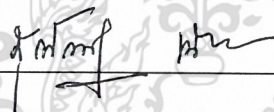
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษากระบวนการสร้างและสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด  
โครงสร้าง Al/n-Si/Al

คณะผู้จัดทำ นาย คมสันต์ พนมสี รหัส 45015186

นาย ชาญชัย บุญมา รหัส 45015189

รายงานนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

ในการนำเสนอหัวข้อปริญญานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงการศึกษาระบบการสร้างและสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยอลูมิเนียมจะถูกสร้างขึ้นบนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นแล้วทำการเปิดช่องรับแสง จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการใช้ความร้อนเข้าช่วยที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500 °C ในบรรยากาศของไนโตรเจน ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ช็อคกีมีค่าประมาณ 0.72 eV ทำให้กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงลดลงมีค่าประมาณ 20 nA ที่แรงดันไบอัส 4 V จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิ 500°C มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 ถึง 500  $\mu\text{m}$  และที่สภาพความต้านทานของฐานรอง(n-Si) ต่างๆ คือ 17, 40 และ 100  $\Omega\text{-cm}$  แบบกระแสตรงและกระแสสลับ ด้วยความถี่ 100 Hz ถึง 4 MHz พบว่าเมื่อให้แสงตกกระทบบริเวณพื้นที่รับแสงจะเกิดกระแสโฟโตขึ้นสองส่วน คือ จากบริเวณนิวทรัลและจากบริเวณปลอดพาหะ โดยกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นจากบริเวณนิวทรัลจะเกิดจากผลกระทบจากการแพร่ภายในเนื้อสาร ส่วนกระแสที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ปลอดพาหะ ซึ่งพื้นที่บริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบอัสที่ให้และสภาพความต้านทานของฐานรอง(n-Si) จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปอธิบายการเกิดกระแสโฟโตของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ABSTRACT

The purpose of this report is to present the study on fabrication and optical characteristics of Al/n-Si/Al photodiode. Aluminium film is deposited on n-type silicon substrate by vacuum evaporation. The electrical characteristics are improved by the heat treatment process. The experimental results show that schottky barrier height is approximate 0.72 eV at 500 °C in nitrogen atmosphere. The dark current is reduced to 20 nA at 4 V. Optical characteristics of 500 °C sintered photodiode with 20-500  $\mu\text{m}$  distance between electrode and with 17, 40 and 100  $\Omega\text{-cm}$  resistivity of n-type silicon substrate are considered for direct current(DC) and alternating current(AC) at frequency 100 Hz to 4 MHz. It was found that the presence of distance between electrode under optical illuminations can enhance the device photocurrent from neutral region and depletion region. Photocurrent from neutral region due to carriers optically generated in neutral region within the diffusion length of substrate. On the other hand, photocurrent from depletion region reflects the applied bias and resistivity of silicon substrate. The experimental results can be explained photocurrent generation of Al/n-Si/Al photodetector.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา รวมทั้งรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท สำหรับความช่วยเหลือและดูแลการทำงาน ในทุกๆ เรื่อง ทั้งคำปรึกษา ตลอดจนคำชี้แนะ รวมทั้งรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริญญา นิพนธ์ รวมถึงเพื่อนๆ ทุกคน และทุกกำลังใจที่ให้ตลอดมา

ขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี  
สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

( นาย คมสันต์ พนมลี )

( นาย ชาญชัย บุญมา )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	V
สารบัญรูปภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง	3
2.2 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ	5
2.3 การรวมตัวและการเกิดพาหะ (Recombination and Generation)	7
2.3.1 กระบวนการ R-G โดยตรง ( Direct R-G Process )	7
2.3.2 กระบวนการ R-G โดยอ้อม ( Indirect band gab )	8
2.4 ชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตัวตรวจวัดแสง	9
2.4.1 โฟโตไดโอด (photodiode)	9
2.4.2 พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode)	11
2.4.3 โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor)	12
2.5 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	13
2.5.1 ระดับพลังงานก่อนการสัมผัส	13
2.5.2 ระดับพลังงานหลังจากสัมผัสกัน ที่สมดุลความร้อน	14
2.5.3 รอยสัมผัสเมื่อได้รับไบอัสตรง (forward bias)	15
2.5.4 รอยสัมผัสเมื่อได้รับไบอัสกลับ (reverse bias)	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ตัวตรวจวัดแสง MSM	16
2.6.1 โครงสร้างและหลักการทำงานในสถานะสมดุลความร้อน	17
2.6.2 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมิได้รับแสง ตกกระทบ	18
2.6.3 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมีแสงตกกระทบ	20
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง	22
3.1 การออกแบบโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al	22
3.2 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al	23
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	26
4.1 การทดลอง	26
4.1.1 การศึกษาสมบัติโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al ทางกระแสตรง (DC)	26
4.1.2 การศึกษาสมบัติโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al ทางกระแสสลับ (AC)	26
4.2 ผลการทดลอง	27
4.2.1 ผลการทดลองสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสตรง (DC)	27
4.2.1.1 ผลการทดลองสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al ทางกระแสตรง (DC) ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน	27
4.2.1.2 ผลการทดลองค่าความจุไฟฟ้าแรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	30
4.2.1.3 ผลการทดลองสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al ทางกระแสตรง (DC) เมื่อเปลี่ยนฐานรอง	32
4.2.2 ผลการทดลองสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al ทางกระแสสลับ (AC)	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.1 ผลการทดลองสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al ทางกระแสสลับ (AC) ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน	35
4.2.2.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสสลับ (AC) ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่แรงดันแรงดันค่าต่างๆ	38
4.2.2.3 ผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสสลับ (AC) ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ความต้านทานโหลดต่างๆ กัน	48
4.2.2.4 ผลการทดลองสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al ทางกระแสสลับ (AC) เมื่อเปลี่ยนสภาพความต้านทานฐานรอง	43
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	45
เอกสารอ้างอิง	47

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	2
2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	4
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าๆ หนึ่ง	4
2.3 แสดงลักษณะกราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ (ก) แถบช่องตรง และ (ข) แถบช่องไม่ตรง	5
2.4 (ก) การเกิดพาหะโดยตรง หรือ Band to Band Generation	8
(ข) การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ หรือ Band to Band Recombination	8
2.5 (ก) แสดงการเกิดพาหะโดยอ้อม หรือ R-G Center Generation	9
(ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ หรือ R-G Center Recombination	9
2.6 ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n	11
2.7 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n	11
2.8 โครงสร้างพื้นฐานพินโฟโตไดโอด	12
2.9 โครงสร้างพื้นฐานโฟโตทรานซิสเตอร์ แสงอินพุตเข้าที่ผิวของชั้นเบสซึ่งรับแสงโดยตรง	13
2.10 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส	14
2.11 ระดับพลังงานหลังจากการสัมผัสกันระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	14
2.12 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสตรง	15
2.13 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสกลับ	16
2.14 โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM	17
2.15 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM	17
(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน	18
2.16 แสดงการไบอัสโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM	20
2.17 กลไกการเกิดกระแสแสง เนื่องจากการแพร่ของพาหะโฮล	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al	22
3.2 การออกแบบโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al	22
3.3 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al	25
3.4 ภาพถ่ายรูปอุปกรณ์ MSM ที่สร้างเสร็จแล้ว	25
4.1 การวัดค่ากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสตรง (DC)	26
4.2 การวัดค่ากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสสลับ (AC)	27
4.3 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 20 $\mu\text{m}$ เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน	27
4.4 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่ระยะความกว้าง 40 $\mu\text{m}$ เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน	28
4.5 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 100 $\mu\text{m}$ เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน	28
4.6 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 500 $\mu\text{m}$ เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน	29
4.7 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 20 $\mu\text{m}$ , 40 $\mu\text{m}$ , 100 $\mu\text{m}$ และ 500 $\mu\text{m}$ เมื่อได้รับความเข้มแสง 18000 Lux	29
4.8 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะ ความกว้าง 100 $\mu\text{m}$	31
4.9 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะ ความกว้างค่าต่างๆ	31

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความ- ต้านทานฐานรอง 40 $\Omega$ -cm, 17 $\Omega$ -cm, 100 $\Omega$ -cm เมื่อไม่ได้รับแสง	32
4.11 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความ- ต้านทานฐานรอง 17 $\Omega$ -cm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน	33
4.12 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความ- ต้านทานฐานรอง 40 $\Omega$ -cm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน	33
4.13 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความ- ต้านทานฐานรอง 100 $\Omega$ -cm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน	34
4.14 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความ- ต้านทานฐานรอง 40 $\Omega$ -cm, 17 $\Omega$ -cm, 100 $\Omega$ -cm ที่เข้มแสง 18000 Lux	34
4.15 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะ ความกว้าง 20 $\mu$ m	35
4.16 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะ ความกว้าง 40 $\mu$ m	36
4.17 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะ ความกว้าง 100 $\mu$ m	36
4.18 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะ ความกว้าง 500 $\mu$ m	37
4.19 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะ ความกว้าง 20 $\mu$ m, 40 $\mu$ m, 100 $\mu$ m ,500 $\mu$ m	37
4.20 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่แรงดัน 1.5 V และเปลี่ยนความต้านทานตามค่าต่างๆ	38

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

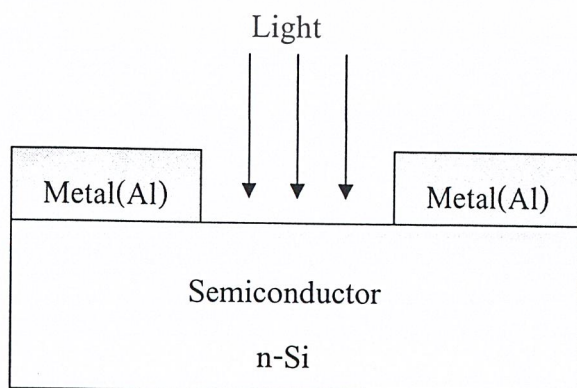
รูปที่	หน้า
4.21 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่แรงดัน 3 V และเปลี่ยนความต้านทานตามค่าต่างๆ	39
4.22 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่แรงดัน 5 V และเปลี่ยนความต้านทานตามค่าต่างๆ	39
4.23 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่แรงดัน 10 V และเปลี่ยนความต้านทานตามค่าต่างๆ	40
4.24 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ความต้านทาน 100 $\Omega$ ที่แรงดันค่าต่างๆ	41
4.25 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ความต้านทาน 500 $\Omega$ ที่แรงดันค่าต่างๆ	41
4.26 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ความต้านทาน 1k $\Omega$ ที่แรงดันค่าต่างๆ	42
4.27 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ความต้านทาน 10 k $\Omega$ ที่แรงดันค่าต่างๆ	42
4.28 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ความต้านทาน 100 k $\Omega$ ที่แรงดันค่าต่างๆ	43
4.29 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทานฐานรอง 17 $\Omega$ -cm, 40 $\Omega$ -cm, 100 $\Omega$ -cm	44

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์พัฒนาไปได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีความรวดเร็วและแม่นยำ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง ซึ่งก็ได้แก่ โฟโตดีเทคเตอร์ (photo detector) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสงมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและจะนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในงานสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงจะมีคุณลักษณะที่มีความไวต่อแสงได้ดีและสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งาน เช่น เจอร์มาเนียม (Ge), ซิลิคอน (Si) และแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) เป็นต้น ซึ่งแกเลียมอาเซไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงมากที่สุดเพราะสามารถตอบสนองความถี่ที่สูงๆ ได้ดีกว่าซิลิคอนและเจอร์มาเนียม โฟโตดีเทคเตอร์นั้นมีโครงสร้างหลายลักษณะแตกต่างกันไป เช่น พีเอ็นโฟโตไดโอด, พินโฟโตไดโอด, โฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM, อะวาลานซ์โฟโตไดโอด [7,8] เป็นต้น ในการเลือกใช้โฟโตไดโอดควรเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่จะนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งในโครงงานนี้ได้ทำการศึกษาโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ MSM คือ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำและโลหะ ซึ่งมีรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะสองรอยสัมผัสดังรูปที่ 1.1 โดยจะมีการเปิดช่องระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (gap) ซึ่งเป็นบริเวณซิลิคอนทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ข้อดีของโฟโตไดโอดชนิดนี้คือ มีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ (planar structure) ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาในกระบวนการสร้างเป็นอุปกรณ์ร่วมในวงจรรวมได้



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอด  
โครงสร้าง Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง คือ แกลเลียมอาเซไนด์ เพราะว่ามีคุณสมบัติที่ดีคือมีแถบพลังงานแบบช่องตรง (direct band gap) ซึ่งแตกต่างจากซิลิคอนที่แถบพลังงานเป็นแบบช่องไม่ตรง (indirect band gap) พลังงานแสงที่ต้องการจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระในการนำกระแสของแกลเลียมอาเซไนด์จึงน้อยกว่าของซิลิคอนและการตอบสนองความถี่ก็ดีกว่าอีกด้วย แต่ถึงอย่างไรซิลิคอนก็มีข้อดีที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น กระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า ราคาที่ถูกกว่า ถึงแม้ว่าซิลิคอนจะมีแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรง (indirect band gap) แต่ในปัจจุบันซิลิคอนถูกใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างวงจรรวมและมีราคาถูก สำหรับในโครงการนี้ได้เลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็นและอุมิเนียม เนื่องจากกระบวนการสร้างชั้นโลหะที่เป็นอุมิเนียมนั้นสามารถทำได้ง่ายและไม่อันตราย อีกทั้งยังเป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างวงจรรวม

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานมีดังต่อไปนี้

1. ศึกษากระบวนการสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM (Al/n-Si/Al)
2. ศึกษาสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM (Al/n-Si/Al) ทางกระแสตรง (DC)
3. ศึกษาสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM (Al/n-Si/Al) ทางกระแสสลับ (AC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” ปรากฏการณ์ที่แสงแสดงคุณสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด เป็นต้น

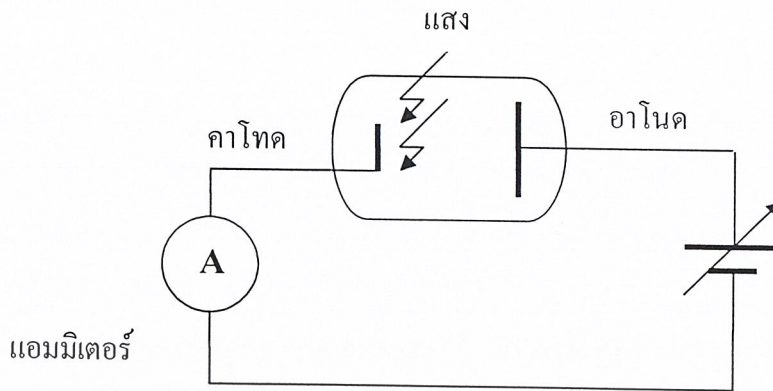
ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีคุณสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสง โดย

$$E_{\text{photon}} = hv = hc/\lambda = 1.24/\lambda_{(\mu\text{m})} \text{ eV} \quad (2.1)$$

- v คือความถี่  
 $\lambda$  คือความยาวคลื่นแสง  
 h คือค่าคงที่ของพลังค์  
 c คือความเร็วแสง

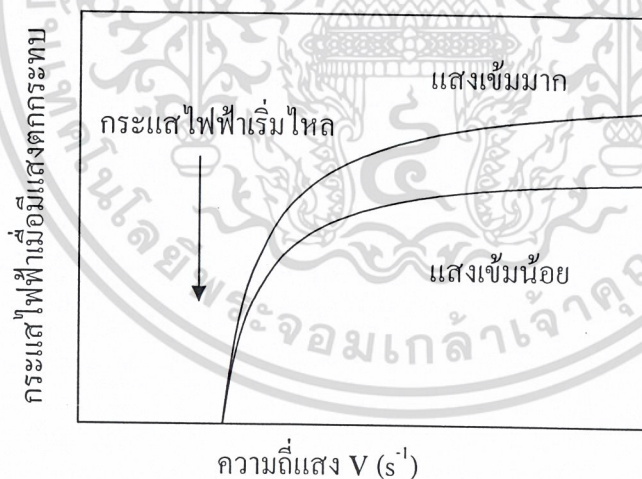
เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap : $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ  $E_{\text{photon}} \geq E_{g(\text{semi})}$  สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง แต่กรณีที่  $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{semi})}$  การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศแล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะกระเด็นหลุดออกจากผิวโลหะ ดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ในหลอดสุญญากาศมีแผ่นขั้วไฟฟ้าอาโนดและคาโทดบรรจุอยู่และขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ถูกต่อออกไปสู่วงจรภายนอกซึ่งมีแบตเตอรี่ไบแอสอยู่ เมื่อส่องแสงลงบนขั้วคาโทดจะพบว่า ถ้าแสงมีความถี่สูงกว่าค่าๆ หนึ่งจะทำให้กระแสไหลในวงจร แต่ถ้าแสงมีความถี่ต่ำกว่าเกินไปก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรวงศ์แสดงผลการทดลองรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก  
กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าๆ หนึ่ง

จากปรากฏการณ์นี้พลังงานสูงสุดที่หลุดออกจากผิวโลหะ มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวของโลหะ ลบด้วยงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก และเขียนสมการได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

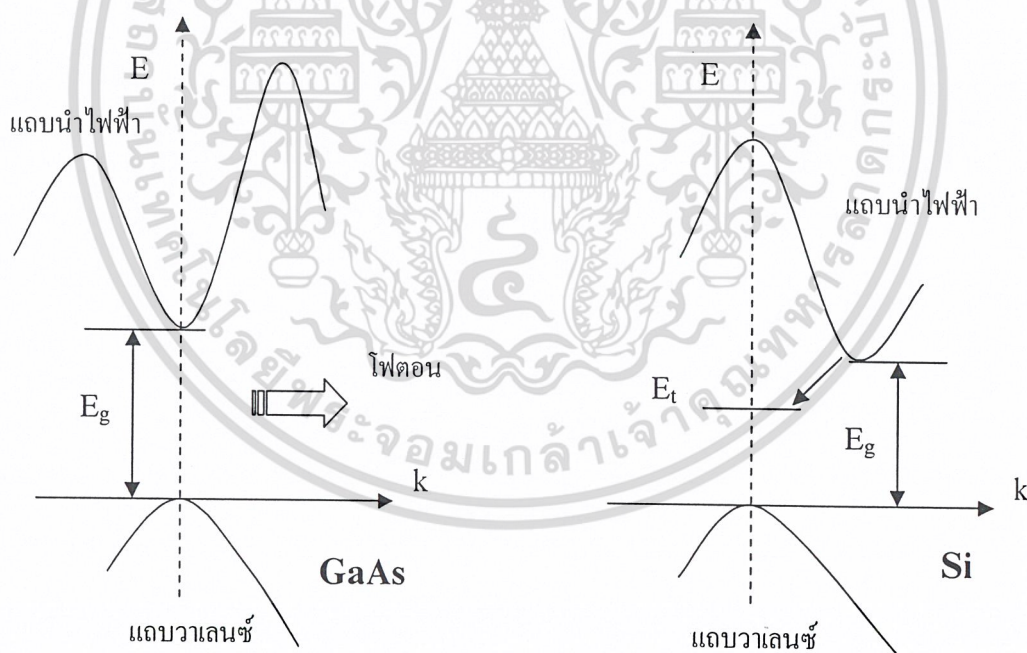
$$E = hv - q\phi \quad (2.2)$$

โดยที่  $\phi$  จะถูกเรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน (work function) และ  $q\phi$  มีหน่วยเป็น eV

สำหรับแสงที่มีความเข้มสูง หมายถึง แสงที่โฟตอนมีความหนาแน่นสูง นอกจากนี้โฟตอนแต่ละโฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนเพียงหนึ่งอิเล็กตรอนเท่านั้น และเป็นการให้พลังงานทั้งหมดที่โฟตอนมีอยู่ หากมีจำนวนโฟตอนมากจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระได้มาก ดังนั้นกระแสแสง (photo current) จึงเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มของแสง

## 2.2 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่สำคัญในกราฟ E-k ก็คือ ตำแหน่งของค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าหรือก็คือจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ เราจะพบว่าในสารกึ่งตัวนำบางชนิดตำแหน่งทั้งสองนี้จะอยู่ตรงกัน เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ดังรูป



(ก) Direct energy band gap

(ข) Indirect energy band gap

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะกราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ (ก) แถบช่องตรง และ (ข) แถบช่องไม่ตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 (ก) เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “แถบพลังงานช่องตรง” หรือแถบช่องตรง (direct energy band gap) และสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำแถบช่องตรง” (direct energy band gap semiconductor) และยังมีสารกึ่งตัวนำอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งตำแหน่งของจุดสำคัญทั้งสองนี้จะอยู่ไม่ตรงกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) เช่น ซิลิคอน และ เยอรมันเนียม เป็นต้น ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “แถบพลังงานช่องไม่ตรง” หรือแถบช่องไม่ตรง (indirect energy band gap) สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง” (indirect energy band gap)

โดยปกติจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง  $k = 0$  แต่จากรูปที่ 2.3 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าจะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้หรือก็คืออยู่ไม่ตรงกัน อีกนัยหนึ่งก็คือ จุดทั้งสองนี้มีค่า  $k$  ที่ต่างกันหรือก็คือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกันนั่นเอง ดังนั้น คุณสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะแตกต่างกันมาก เช่นคุณสมบัติทางด้านแสง (optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบช่องตรง (GaAs) พลังงานของโฟตอน (photon) จากแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ  $h\nu$  สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง (direct) และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็จะสามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม และกรณีนี้จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแสงสีต่างๆ ได้ และเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบโดยตรงเช่นนี้จะเกิดได้โดยง่าย ทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี จึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (optical device) เช่น ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) เลเซอร์ไดโอด และตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนพลังงานก่อนซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปแบบของความร้อนจึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้น ในทำนองเดียวกันพลังงานโฟตอนจากแสงก็ไม่สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยง่าย ถึงแม้ว่าพลังงานจากโฟตอนจะมีค่าเพียงพอก็ตาม แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสถานะ อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าในกรณีนี้จะเกิดได้ก็ขึ้น ถ้าหากในช่องว่างพลังงานนั้นมีระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานใดๆ ปรากฏอยู่ ซึ่งจะช่วยให้โอกาสที่จะเกิดกระบวนการนี้เป็นไปได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การรวมตัวและการเกิดพาหะ (Recombination and Generation)

การเกิดของพาหะ (carrier generation) หมายถึง กระบวนการซึ่งทำให้มีพาหะเกิดขึ้นใหม่โดยจะเป็นการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (recombination) หมายถึง กระบวนการตรงข้ามหรือย้อนกลับกับการเกิด กล่าวคือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนหายไป กระบวนการทั้งสองนี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกัน และถูกเรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (recombination and generation process) บางครั้งเรียกสั้น ๆ ว่า กระบวนการ R-G สำหรับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใด ๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ความหนาแน่นของพาหะมีค่าคงที่ได้

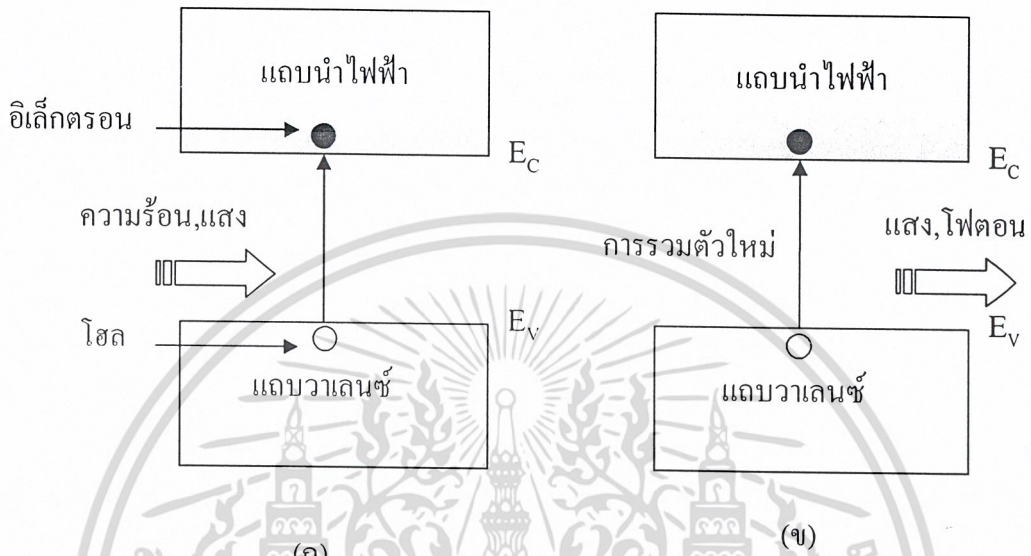
ในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิคความหนาแน่นของพาหะถูกกำหนดด้วยปริมาณของอะตอมสารเจือ และความหนาแน่นของพาหะอินทรินซิค อย่างไรก็ตามในภาวะสมดุลความร้อนอัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะต้องมีค่าเท่ากัน และสมการตามกฎของแมสแอ็คชัน (mass action law)  $n_i^2 = n_i p_i$  ยังคงใช้ได้แต่สารกึ่งตัวนำนั้นต้องเป็นสารนอนดีเจเนอเรต (nondegenerate) โดยทั่วไปกระบวนการ R-G ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ อาจพิจารณาจัดแบ่งเป็นแบบใหญ่ ได้ทั้ง 2 แบบ ดังนี้คือ

### 2.3.1 กระบวนการ R-G โดยตรง (Direct R-G Process)

กระบวนการเกิด R-G โดยตรง เป็นกระบวนการเกิดและรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง (direct band gap) เช่น สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบกลุ่ม III-V ได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ แกลเลียมฟอสไฟด์ และอินเดียมแอนติโมนายด์ ซึ่งลักษณะของกราฟ E-k diagram จะเป็นแบบช่องตรง การรวมตัวใหม่โดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอน (photon) ได้ง่าย กระบวนการเกิดและการรวมตัวใหม่โดยตรงแสดงได้ดังในรูปที่ 2.4 กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานมากพอจากความร้อนหรือแสงคือต้องมากกว่าขนาด  $E_g$  อิเล็กตรอนจะสามารถย้ายขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการข้ามช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า การเกิดพาหะโดยตรง (direct generation) ซึ่งเป็นลักษณะการย้ายที่อยู่จากแถบพลังงานแถบหนึ่งไปยังอีกแถบหนึ่งซึ่งบางครั้งเรียกว่า การเกิดพาหะจากแถบหนึ่งไปยังอีกแถบหนึ่ง (band to band generation) ซึ่งจะทำได้คู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น ในทางกลับกันเมื่ออิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรงลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การรวมตัวใหม่โดยตรง (direct recombination) ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะ กระบวนการเกิดและรวมตัวของพาหะเช่นนี้ถูกเรียกว่า กระบวนการ R-G โดยตรง



รูปที่ 2.4 (ก) การเกิดพาหะโดยตรง หรือ Band to Band Generation

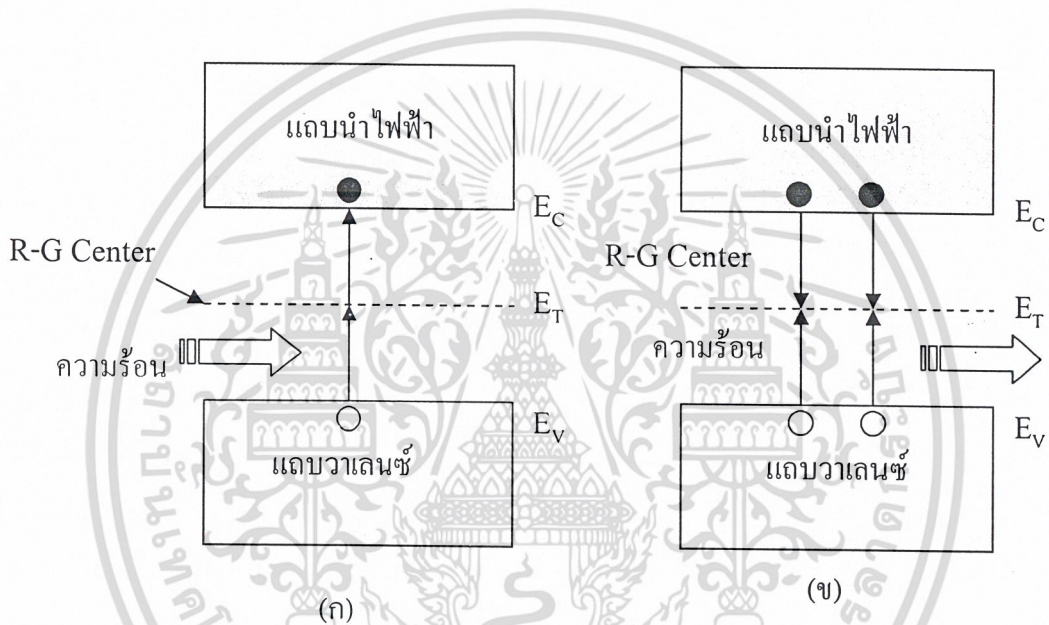
(ข) การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ หรือ Band to Band Recombination

### 2.3.2 กระบวนการ R-G โดยอ้อม ( Indirect band gap )

กระบวนการ R-G โดยอ้อมจะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) เช่น ซิลิคอน เยอรมันเนียม โดยเมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ได้รับพลังงานจะมีการย้ายระดับพลังงานแต่ไม่สามารถที่จะข้ามช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ไปยังแถบไฟฟ้าได้โดยตรงแต่จะเกิดขึ้นเป็นสองขั้นตอน โดยในขั้นแรก อิเล็กตรอนจะอาศัยระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นที่พักก่อนที่จะข้ามต่อไปยังแถบนำไฟฟ้าในขั้นที่สองซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า การเกิดพาหะโดยอ้อม และในทางกลับกันการรวมตัวใหม่โดยอ้อมก็คือ กระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยอ้อมนั่นเอง โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ในที่สุด ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ถูกเรียกว่า การเกิดและการรวมตัวโดยอ้อมของพาหะหรือกระบวนการ R-G โดยอ้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานเป็นสถานะพลังงานที่อะตอมซิลิคอนและอะตอมเยอรมันเนียมไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆหรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย ระดับพลังงานซึ่งช่วยให้เกิดกระบวนการ R-G แบบนี้ถูกเรียกว่า ศูนย์กลางการเกิด-และการรวมตัวใหม่ของพาหะ หรือ R-G Center ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาแลอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลททิซได้และการสั่นของแลททิซจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานเรียกว่า โฟนอน ( phonon ) ออกมาในที่สุด



รูปที่ 2.5 (ก) แสดงการเกิดพาหะโดยอ้อม หรือ R-G Center Generation

(ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ หรือ R-G Center Recombination

## 2.4 ชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตัวตรวจวัดแสง

สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง (light detector) หมายถึง สิ่งประดิษฐ์ที่มีความไวต่อแสงและสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้

### 2.4.1 พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode)

พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริก มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ p-n [6] เมื่อมีแสงตกกระทบบนที่รอยต่อ p-n จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจวัดความเข้มแสง

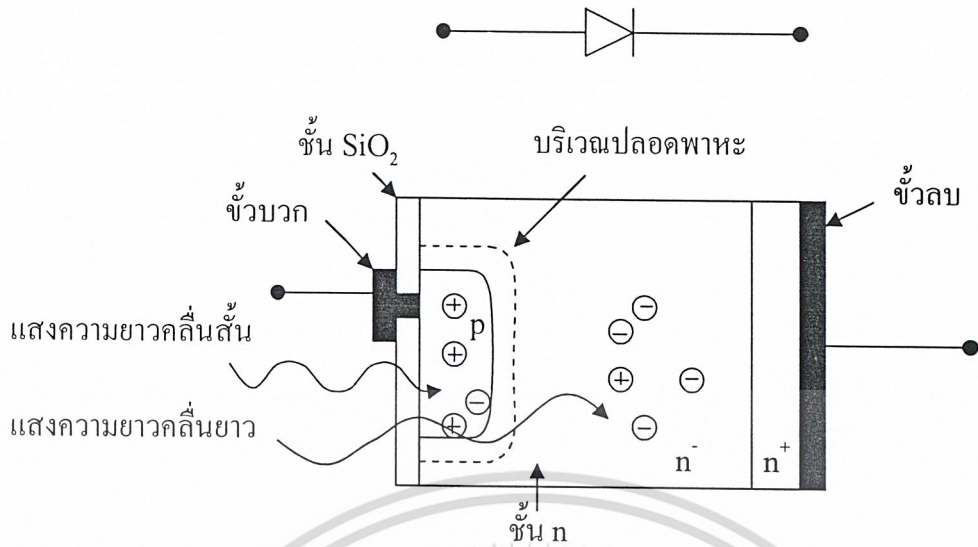
หลักการการทำงานของโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานชนิดรอยต่อ p-n ดังรูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางของพี-เอ็นโฟโตไดโอดที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และต่อติดกับชนิด n เป็นรอยต่อ p-n ที่รอยต่อ p-n นี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิคอนนั้น ชั้น p เตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ซิลิคอนด้วยความลึกประมาณ  $1 \mu\text{m}$  ที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ p-n เป็นย่านปลอดพาหะ ในการผลิตจริงจะมีการควบคุมความหนาและปริมาณการโดปสารเจือปนของชั้น p ชั้น n และชั้นล่างสุด ( $n^+$ ) ให้เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้โฟโตไดโอดไวต่อแสงในย่านที่ต้องการได้และสามารถทำงานที่ความถี่สูงที่ต้องการได้

เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

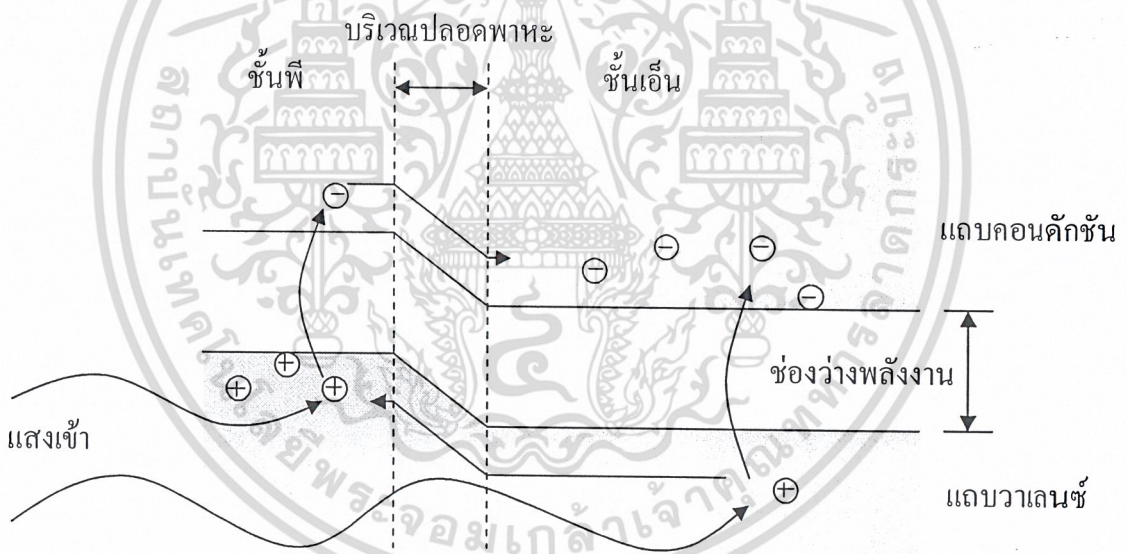
$$h\nu > E_g \quad (2.3)$$

แสงก็จะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันและที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่

ในรูปที่ 2.7 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p ชั้นปลอดพาหะและชั้น n อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) พัดพาให้วิ่งไปสู่ชั้น n ส่วนกรณีโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจากแถบวาเลนซ์ในชั้น n หรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ชั้น p จำนวนของการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนของแสง (photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืนอิเล็กตรอนที่สะสมในชั้น n จะทำให้ชั้น n จะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและโฮลที่ไปสะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ต่อจากนั้นถ้าเราต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอกอิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลก็จะไหลออกจากชั้น p ไปสู่วงจรภายนอก



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n

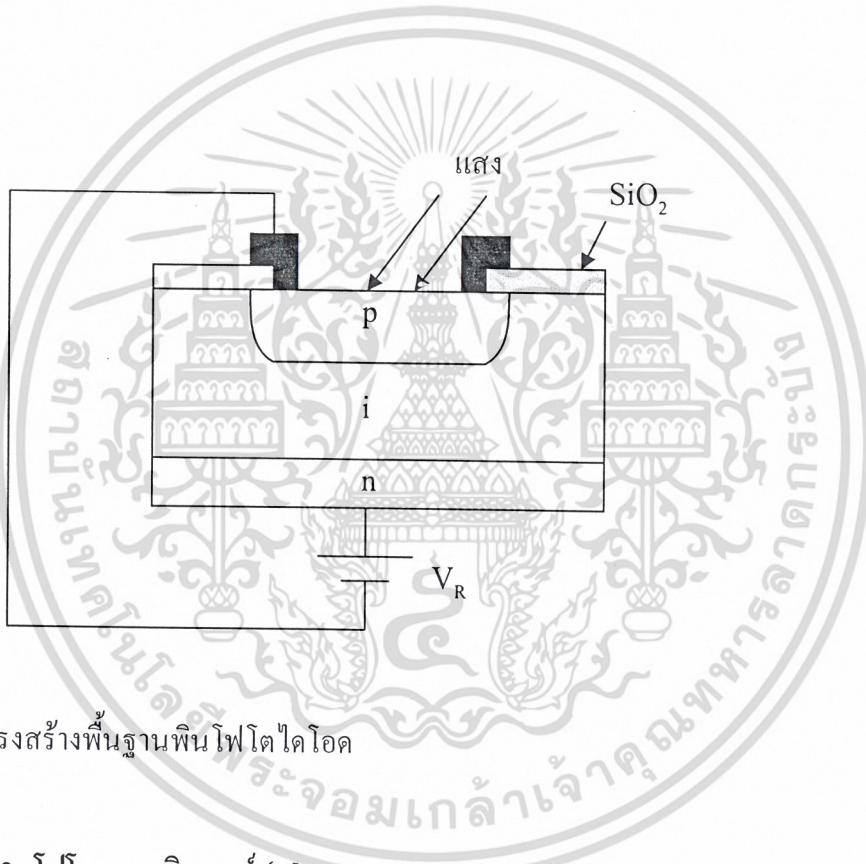
### 2.4.2 พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode)

พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) คือโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากโฟโตไดโอดธรรมดาตรงที่ระหว่างชั้น p และชั้น n จะมี i คั่นอยู่ ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการโด๊ปด้วยสารเจือปนด้วยปริมาณที่น้อยมาก ลักษณะเด่นของพินโฟโตไดโอดคือ จากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าของรอยต่อ (junction capacitance) มีค่าน้อย จึงทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก (ultra-fast response speed) ถึงระดับพิโกวินาที ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว

หลักการทำงานพื้นฐานของพินโฟโตไดโอดนั้นคล้ายกับกรณีของโฟโตไดโอด เพียงแต่แตกต่างกันตรงจุดที่ในพินโฟโตไดโอดนั้น จะมีชั้น  $i$  อยู่ระหว่างชั้น  $p$  และ  $n$  และผู้ผลิตสามารถสร้างชั้น  $i$  ซึ่งเป็นชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) จากวัสดุต่าง ๆ และให้มีความหนาต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ ซึ่งในกรณีโฟโตไดโอดนั้น ความหนาของชั้นปลอดพาหะจะถูกกำหนดแต่เพียงด้วยปริมาณและวิธีการ โด๊ปสารเจือปนของรอยต่อ  $p-n$



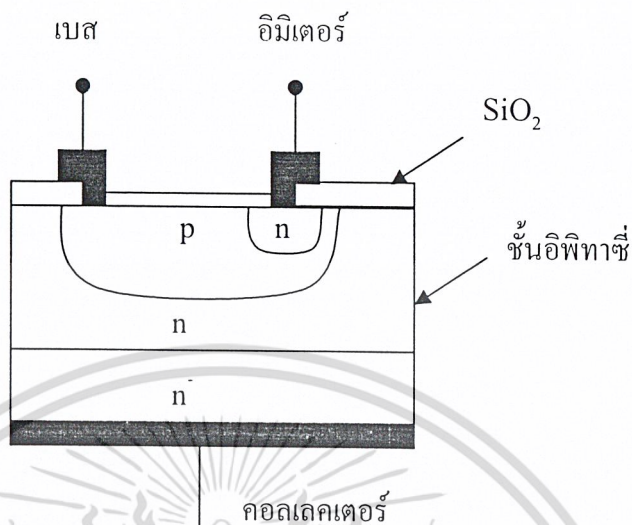
รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานพินโฟโตไดโอด

### 2.4.3 โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor)

โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor) คือสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงที่มีโครงสร้างเป็นทั้งโฟโตไดโอด (photodiode) และทรานซิสเตอร์ (transistor) ในตัวเดียวกัน โดยทั่วไปมีโครงสร้างคล้ายทรานซิสเตอร์กล่าวคือ มีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อ  $pnp$  หรือ  $npn$  หรืออาจออกแบบให้มีโครงสร้างแบบทรานซิสเตอร์คาร์ลิงตันก็ได้

โฟโตทรานซิสเตอร์มีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูป 2.9 (ก) ได้แก่อรอยต่อ  $npn$  หรือ  $pnp$  ของสารกึ่งตัวนำคล้ายทรานซิสเตอร์ แต่จะออกแบบพิเศษให้ชั้นเบสถูกเปิดหน้าออก เพื่อให้

ชั้นเบสรับแสงอินพุตได้โดยตรง และพยายามให้พื้นผิวรับแสงของเบสมีพื้นที่ขนาดใหญ่ ๆ เพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าโฟโตมาก ๆ



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานโฟโตทรานซิสเตอร์ แสงอินพุตเข้าที่ผิวของชั้นเบสซึ่งรับแสงโดยตรง

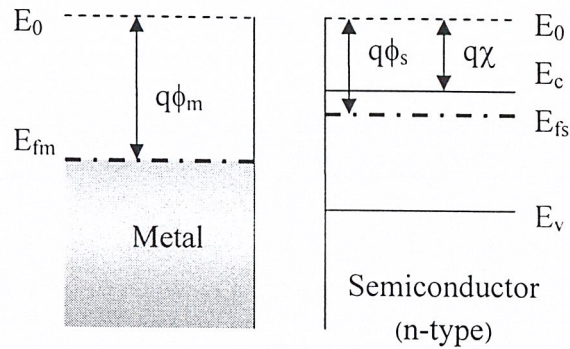
## 2.5 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะให้คุณสมบัติของแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ รอยสัมผัสแบบโอห์มมิกและรอยสัมผัสแบบชอตต์กี [3,4,7] โดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะ ( $\phi_m$ ) ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_s$ ) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ ( $\chi_s$ ) ที่นำมาสัมผัส

### 2.5.1 ระดับพลังงานก่อนการสัมผัส

ก่อนการสัมผัส แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชิลิคอนชนิดเอ็นแสดงดังรูป 2.10 โดยที่ระดับพลังงาน  $E_0$  หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน นิยมเรียกว่า “ระดับสุญญากาศ” (vacuum level) และนิยามได้ว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของของแข็ง และหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกสาร และค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศเรียกว่า “ฟังก์ชันงาน” (work function) ของโลหะ มีค่าเท่ากับ  $q\phi_m$  ซึ่งหมายถึง ค่าพลังงานน้อยสุด ที่อิเล็กตรอนต้องการเพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะ

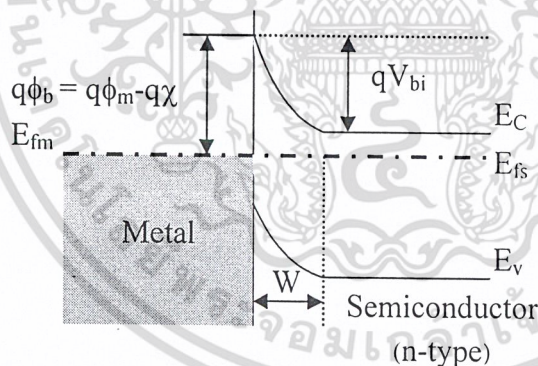
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส

### 2.5.2 ระดับพลังงานหลังจากสัมผัสกัน ที่สมดุลความร้อน

ภายหลังการสัมผัสจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของทั้งสองไม่เท่ากัน โดยฟังก์ชันงานของโลหะค่ามากกว่าของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจะเห็นว่า ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงทำให้เกิดมีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสอง ทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D^+$ ) ปรากฏอยู่บริเวณรอยสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ และกลายเป็นบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างเท่ากับ  $W$  ในภาวะสมดุลความร้อนนี้



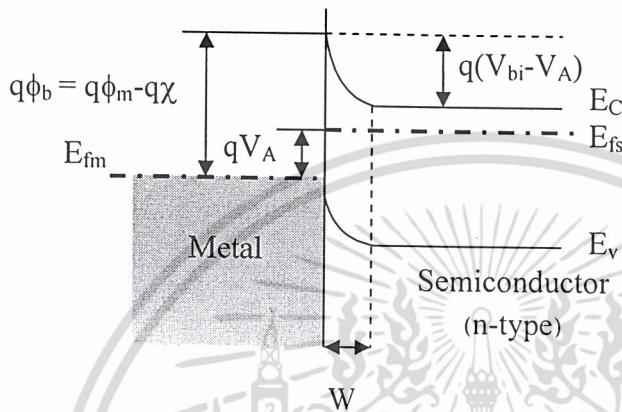
รูปที่ 2.11 ระดับพลังงานหลังจากการสัมผัสกันระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสอง จะปรับอยู่ในระดับเดียวกันโดยตลอด การงอโค้งของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ มีความหมายว่ามีศักย์สัมผัส (contact potential :  $V_{bi}$ ) หรือกำแพงศักย์ (potential barrier) เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำและทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ให้เข้าไปในด้านโลหะ การงอโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะมีผลทำให้เกิดการงอโค้งของระดับสุญญากาศในสารกึ่งตัวนำด้วยการงอโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งผิวสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดนี้จะมีค่ามากที่สุด ขณะที่รอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล กระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะและจากโลหะไปสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเท่ากัน กระแสสุทธิที่ผ่านรอยสัมผัสจึงมีค่าเป็นศูนย์

### 2.5.3 รอยสัมผัสเมื่อได้รับไบอัสตรง (forward bias)



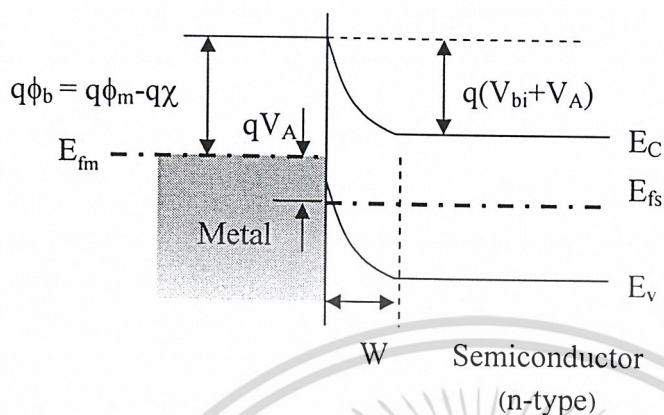
รูปที่ 2.12 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส ( $V_A$ ) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำดังรูป 2.12 ในกรณีนี้จะทำให้ความสูงของศักย์สัมผัสหรือกำแพงศักย์  $V_{bi}$  ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น  $(V_{bi} - V_A)$  และทำให้ระดับพลังงาน  $E_{fs}$  สูงกว่าระดับ  $E_{fm}$  ดังนั้น อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล จากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงขอตักเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสแรก โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงขอตักก็มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล

### 2.5.4 รอยสัมผัสเมื่อได้รับไบอัสกลับ (reverse bias)

เมื่อเราไบอัสแรงดัน ( $-V_A$ ) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ กรณีนี้จะทำให้ระดับ  $E_{fm}$  อยู่สูงกว่าระดับ  $E_{fs}$  กำแพงศักย์  $V_{bi}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $(V_{bi} + V_A)$  และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น สนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัสมีค่าสูงขึ้น ดังรูป 2.13 ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้

แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงชอตต์กี ( $q\phi_b$ ) เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ กระแสนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล

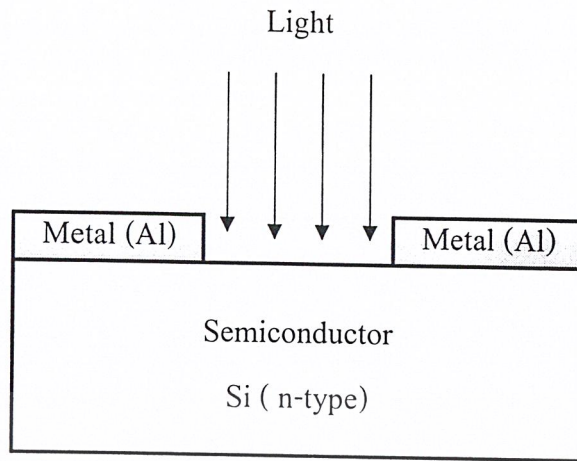


รูปที่ 2.13 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสกลับ

ความร้อน ซึ่งมีค่าน้อยมากและเป็นกระแสที่โดยประมาณไม่เปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส และเนื่องจากกระแสนี้มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสไบอัสตรง จึงถูกเรียกว่า “กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ” (reverse saturation current) กระแสนี้จะมีค่าน้อยกว่ากระแสไบอัสตรงมาก

## 2.6 ตัวตรวจวัดแสง MSM

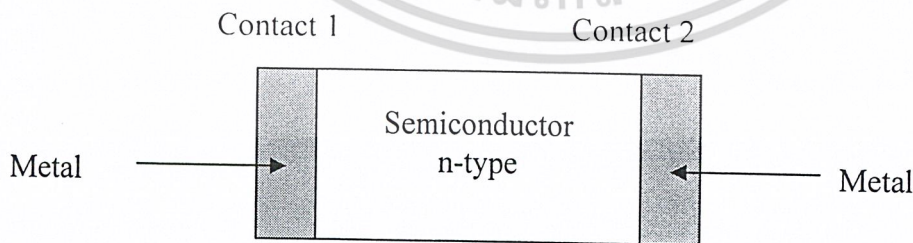
ตัวตรวจวัดแสงหรือโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM [2] ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นจำนวนสองรอยสัมผัสสองขั้วที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำ และแสงที่จะทำการตรวจจับจะถูกกำหนดให้กระทบบริเวณพื้นที่ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วโลหะอลูมิเนียมทั้งสอง เป็นอุปกรณ์ที่มีกระบวนการสร้างที่ง่ายใช้เพียงไม่กี่ขั้นตอนและมีโครงสร้างเป็นแบบพลาเนอร์ ทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรรวมทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยปกติแล้วอุปกรณ์แสงนิยมใช้สารประกอบประเภทแกเลียมอาแซไนซ์เป็นส่วนใหญ่ แต่ปัจจุบันเทคโนโลยีซิลิคอนมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก การเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนเพื่อสร้างเป็นโครงสร้าง MSM จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจอย่างมากซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

### 2.6.1 โครงสร้างและหลักการทำงานในสถานะสมดุลความร้อน

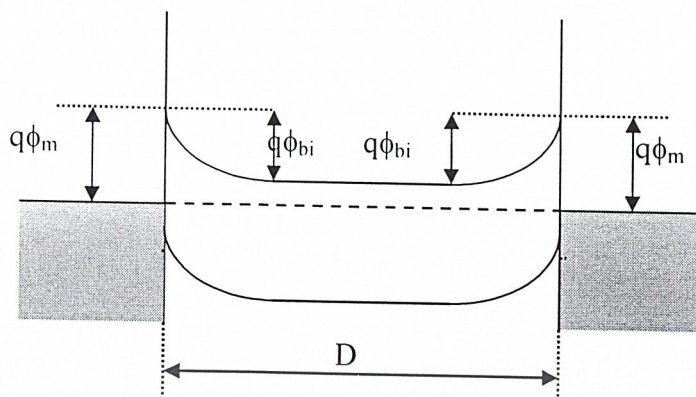
โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แสดงในรูปที่ 2.15 (ก) ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่มีการแพร่สารเจือชนิดเอ็นอย่างสม่ำเสมอและขั้วโลหะสองขั้ว โดยลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุลความร้อนระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีระดับเดียวกันกับระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_{fm}$ ) ของอลูมิเนียม โดยถ้าพื้นที่ของทั้งสองรอยสัมผัสมีค่าเท่ากันและค่าความสูงกำแพงศักย์เท่ากัน กล่าวได้ว่าเป็นโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แบบสมมาตร (Symmetrical MSM Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)



(ก)

61780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.15 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน

โดยที่  $\phi_m$  คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนของรอยสัมผัส  
 $V_{bi}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยสัมผัส  
 $D$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส

### 2.6.2 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัส จะเห็นว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสแบบขอตักเบริเออร์ทางด้านที่รับแรงดันไบอัสกลับจะมีขนาดกว้างขึ้น เนื่องจากแรงดันไบอัสที่ได้รับในขณะเดียวกันที่บริเวณปลอดพาหะทางด้านไบอัสตรงจะมีขนาดลดลง เนื่องจากการได้รับไบอัสตรงและสำหรับด้านที่รับแรงดันไบอัสกลับ จะมีค่ากำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $(V_{bi} + V_A)$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนจากด้านโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในด้านที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ส่วนด้านที่ได้รับการไบอัสตรงจะมีค่าของกำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ  $V_{bi} - V_A$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านไบอัสกลับเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดของโครงสร้าง MSM ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = I_0 (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.4)$$

$$I_0 = A_n^* T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right)} \quad (2.5)$$

โดย  $I$  คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัส  
 $I_0$  คือ กระแสอิ่มตัวของรอยสัมผัส  
 $V$  คือ แรงดันไบอัสภายนอก  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบสท์มันน์  
 $T$  คือ อุณหภูมิสมบูรณ์  
 $A_n^*$  คือ ค่าคงที่ริชาร์ดสันของอิลีกตรอน

และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยสัมผัสนี้ หาได้จากสมการ

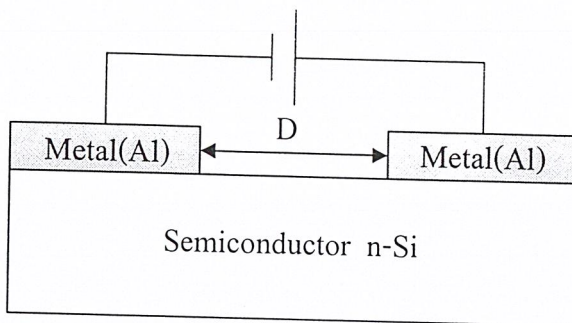
$$W = \left[ \frac{2\epsilon}{qN_D} (V_{bi} \pm V_A) \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

โดย  $W$  คือ ความกว้างของบริเวณพื้นที่ปลอดพาหะ  
 $N_D$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้  
 $V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์ภายใน  
 $V_A$  คือ แรงดันไบอัสภายนอก  
 $q$  คือ ประจุไฟฟ้า

หรือความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนั้น อาจคำนวณได้จากคุณสมบัติความจุไฟฟ้าที่รอยต่อได้ ซึ่งหาได้จากสมการ

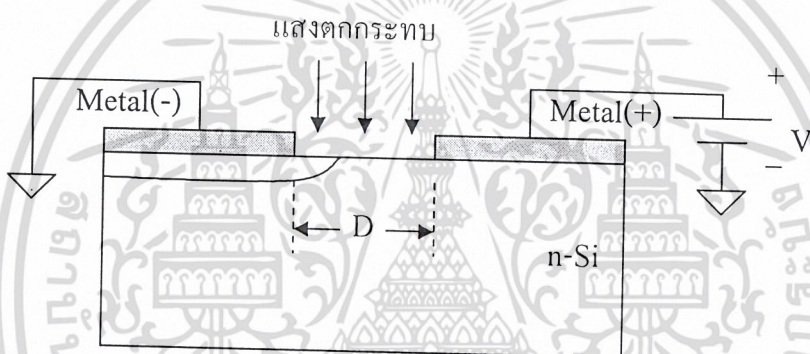
$$C_j = \frac{\epsilon A}{W} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

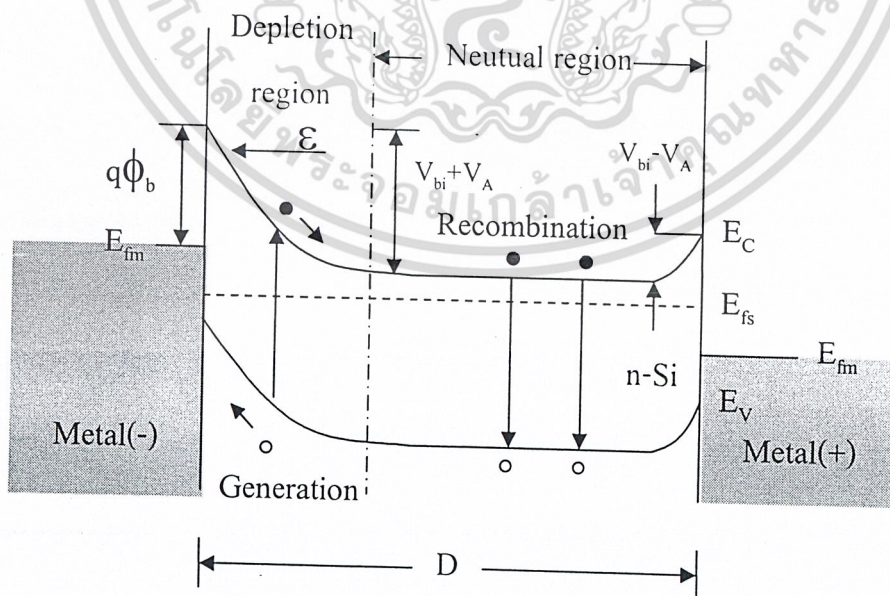


รูปที่ 2.16 แสดงการไบอัสโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

2.6.3 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมีแสงตกกระทบ



(ก) ลักษณะของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อมีแสงตกกระทบขณะได้รับแรงดันไบอัส



(ข) ลักษณะแถบพลังงานของการเกิดกระแสแสง

รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดกระแสแสง เนื่องจากการแพร่ของพาหะโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสง [1,5] โดยพื้นที่รับแสงจะอยู่ระหว่างขั้วโลหะทั้งสอง เมื่อได้รับไบอัสจะเห็นว่าพื้นที่รับแสงจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ พื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ปลอดประจุพาหะจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงเพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้มากกว่าพื้นที่เป็นกลางซึ่งจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วโลหะ ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลซึ่งจะมีค่าแปรตามแรงดันภายนอกที่ทำการไบอัสและความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนยิ่งแรงดันไบอัสมากขึ้น ความเข้มของแสงตกกระทบบนเพิ่มขึ้นกระแสก็จะยิ่งไหลมากขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

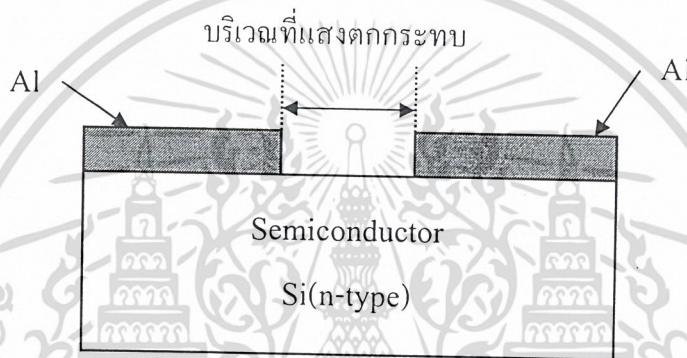
## บทที่ 3

### การออกแบบและกระบวนการสร้าง

#### 3.1 การออกแบบโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

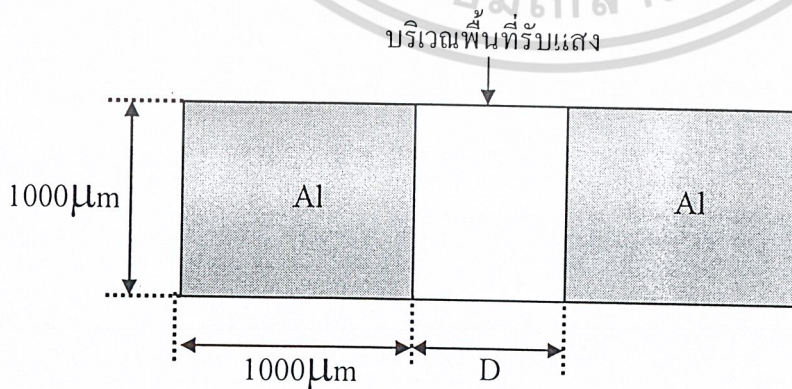
โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ความต้านทาน  $21 \Omega\text{-cm}$  จำนวน 2 รอยสัมผัสและมีพื้นที่รับแสงอยู่ระหว่างขั้วสัมผัส โดยโครงสร้างของโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al แสดงได้ดังรูปที่

3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

ในการออกแบบนี้สามารถแบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ขั้วสัมผัสโลหะที่เป็นอลูมิเนียม และพื้นที่รับแสงที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น การออกแบบบริเวณที่เป็นพื้นที่ของขั้วสัมผัสแต่ละด้านถูกกำหนดให้มีพื้นที่ของรอยสัมผัสหนึ่งด้านเท่ากับพื้นที่รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งการออกแบบโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การออกแบบโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย D คือ ความกว้างของพื้นที่รับแสงหรือระยะห่างระหว่างข้อสัมผัสที่ความกว้าง 20  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  และ 500  $\mu\text{m}$

### 3.2 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์คต้นแบบทั้งหมด 1 มาส์ค ด้วยกันซึ่งจะใช้สำหรับกระบวนการสร้างโดยมีลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างดังนี้

#### 1. การทำความสะอาดผิวซิลิคอนเบื้องต้น

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (De-ionnized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic Cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าแผ่นผลึกด้วยกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน (Trichloethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก ประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 2. กระบวนการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

ในการเคลือบชั้นอลูมิเนียมโดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) ทำการเคลือบแผ่นซิลิคอนด้วยอลูมิเนียมที่ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  Torr

#### 3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ในระจกมาส์คเป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของอลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออกขั้นตอนนี้ใช้ตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ

โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 15-20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก AZ โดยใช้เครื่องสปีนเนอร์ขนาด 3000 รอบต่อ นาทีเป็นเวลา 40 นาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาไวแสงแห้งที่อุณหภูมิ 85-90°C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบมาส์คด้วยอุปกรณ์ Mask Aligner เป็นเวลา 12 นาที
- การล้างภาพ จุ่มในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ครั้งละ 15 นาทีล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ให้แผ่นฟิล์มที่เคลือบอยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90°C เป็นเวลา 20-30 นาที

#### 4. การกัดชั้นอลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้ละลายชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายผสมซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- จุ่มแผ่นซิลิคอนที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลายซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 40°C เป็นเวลาประมาณ 10-20 วินาที
- ล้างในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 5. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก AZ

มีลำดับขั้นตอนดังนี้

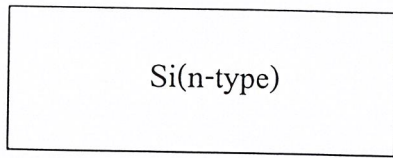
- จุ่มแผ่นซิลิคอนลงในอะซิโตน 2 ครั้ง ครั้งละประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 6. กระบวนการซินเตอร์ริง

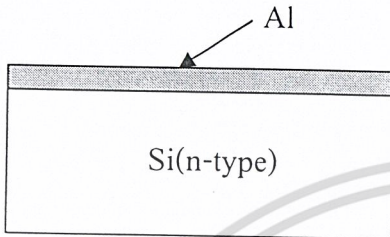
กระบวนการซินเตอร์ริง(Sintering) เป็นกระบวนการที่ทำให้การสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ โดยจะนำแผ่นซิลิคอนไปในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 15 นาที ส่วนอุณหภูมิที่ใช้คือ 500 °C

#### 7. เปลี่ยนฐานรองซิลิคอนให้มีค่า 6, 17, 40, 100, 2000 $\Omega$ -cm

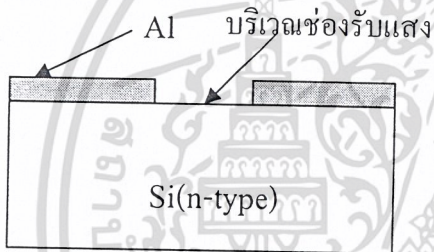
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100)

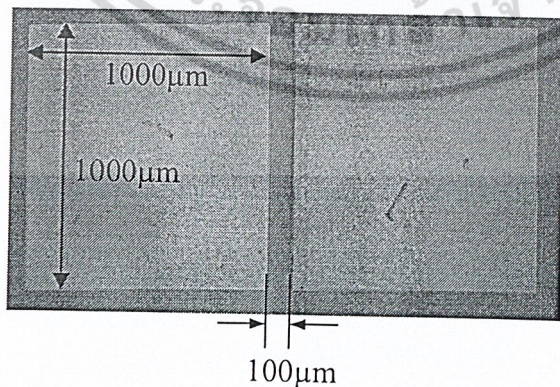


เคลือบอลูมิเนียมบริเวณผิวด้านหน้า ด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศที่ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  Torr



เปิดช่องอลูมิเนียมโดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และนำไปซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที

รูปที่ 3.3 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายรูปอุปกรณ์ MSM ที่สร้างเสร็จแล้ว ที่ขนาดความกว้างของช่องรับแสง 100 µm ขนาดขั้วไฟฟ้า 1000 x 1000µm

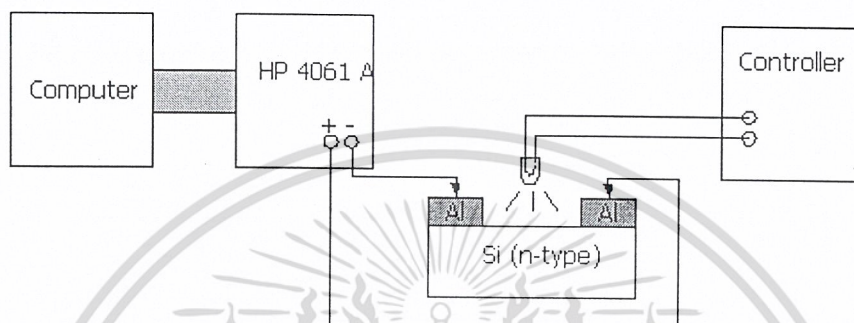
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลอง

##### 4.1.1 การศึกษาสมบัติโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสตรง (DC)



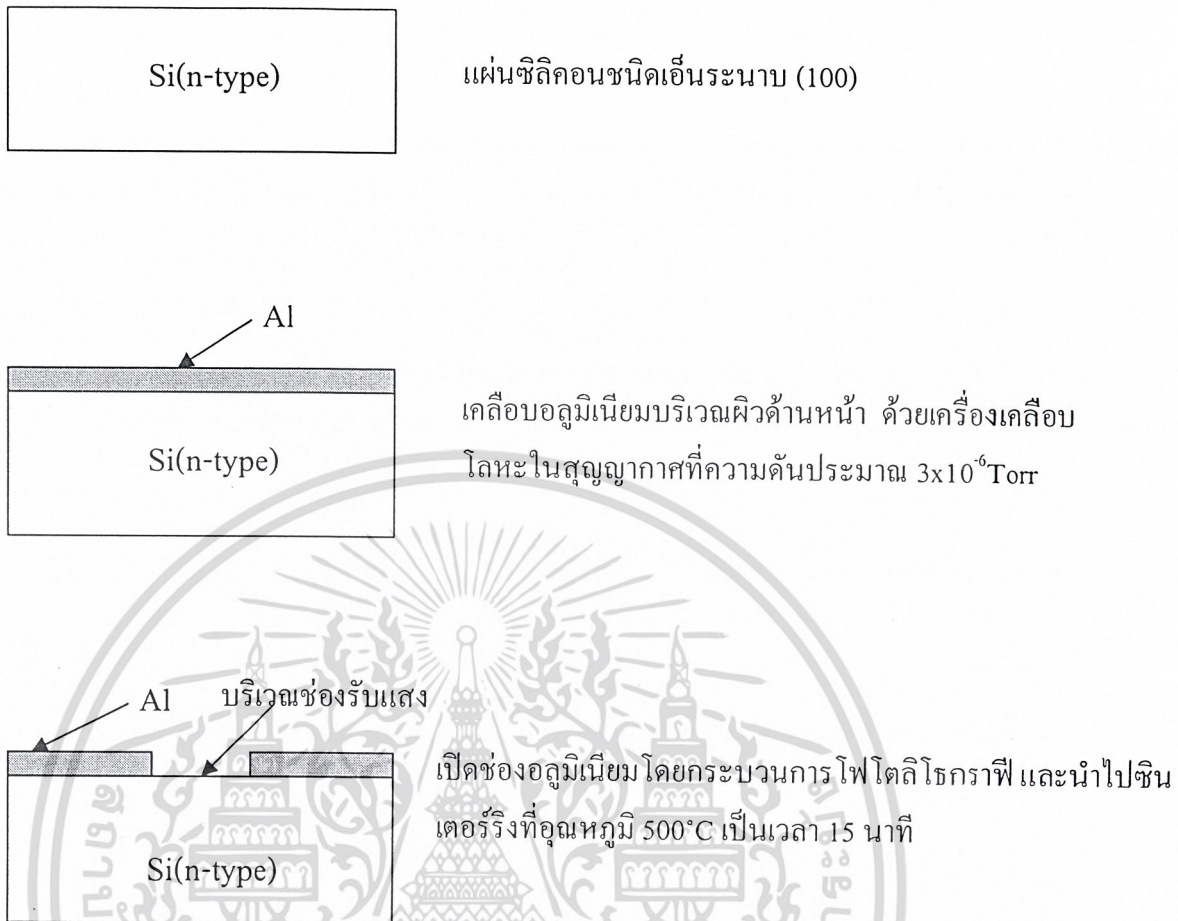
รูปที่ 4.1 การวัดค่ากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสตรง (DC)

การศึกษาในหัวข้อที่ 4.1.1 เป็นการศึกษาความเข้มของแสงที่มีผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยการฉายแสงที่มีความเข้มต่างๆกัน โดยอุปกรณ์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฮาโลเจน (Halogen Lamp) ขนาด 150 W และมีชุดควบคุมสำหรับปรับความเข้มแสง ทำการฉายแสงลงบนชิ้นงานที่ต่ออยู่กับเครื่อง HP 4061A โดยจะฉายแสงที่มีความเข้มแสงต่างๆกันคือ 4500 Lux , 9000 Lux และ 18000 Lux ลงบนชิ้นงานที่นำมาต่อในวงจร เพื่อทำการทดลองและศึกษาผลตอบสนองของกระแสที่เกิดขึ้นที่ความเข้มแสงต่าง ส่วนชิ้นงานที่นำมาทดลองศึกษาผลตอบสนองของกระแสก็จะมีพื้นที่รับแสงที่แตกต่างกันคือ 20  $\mu\text{m}$  , 40  $\mu\text{m}$  , 100  $\mu\text{m}$  และ 500  $\mu\text{m}$  โดยจะทำการฉายแสงลงบนชิ้นงานตรงบริเวณพื้นที่รับแสง แล้วทำการวัดผลการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นที่พื้นที่รับแสงค่าต่างๆ

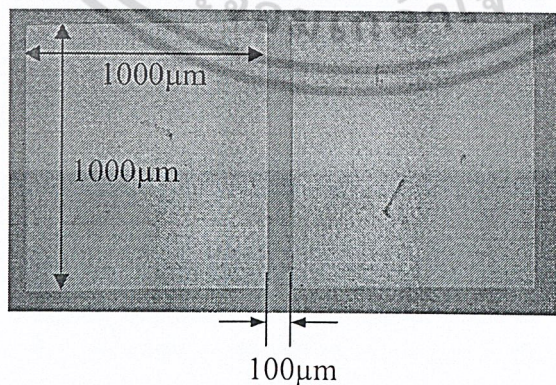
##### 4.1.2 การศึกษาสมบัติโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสสลับ (AC)

แหล่งจ่ายแสงที่ให้แก่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al จะใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm และมีมอดูเลทสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด 400 mV<sub>p-p</sub> เข้ากับแสงเลเซอร์ โดยความถี่ของคลื่นรูปไซน์จะเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 100 Hz - 4 MHz โหลดความต้านทานมีค่า 100  $\Omega$  , 500  $\Omega$  , 1 k $\Omega$  , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$  และแรงดันไบอัส 1.5V, 3V, 5V และ 10 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

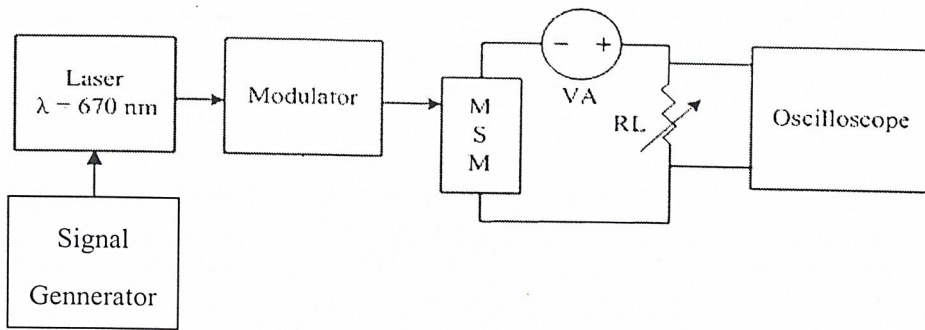


รูปที่ 3.3 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายรูปอุปกรณ์ MSM ที่สร้างเสร็จแล้ว ที่ขนาดความกว้างของช่องรับแสง  $100\mu\text{m}$  ขนาดขั้วไฟฟ้า  $1000 \times 1000\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



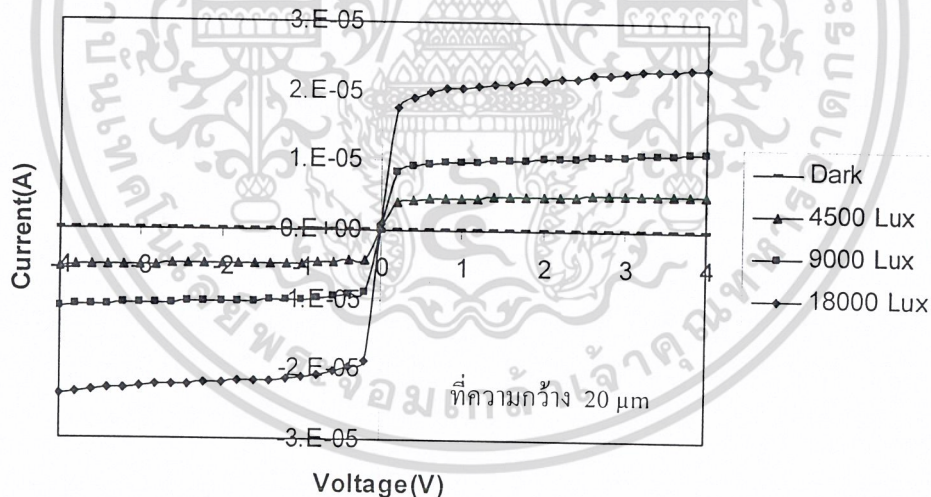
รูปที่ 4.2 การวัดค่ากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสสลับ (AC)

## 4.2 ผลการทดลอง

### 4.2.1 ผลการทดลองสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสตรง (DC)

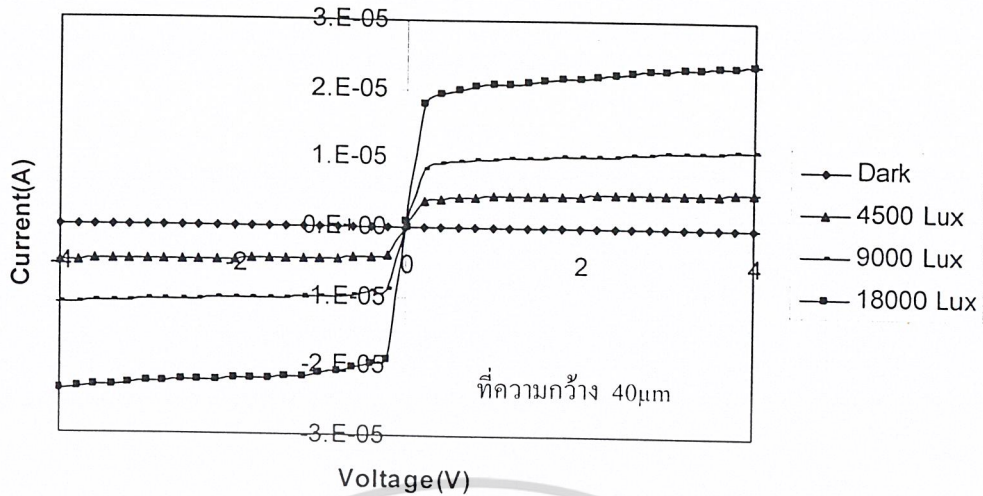
4.2.1.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางดิสซี (DC) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน

โดยมีความกว้างของพื้นที่รับแสง  $20\ \mu\text{m}$ ,  $40\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$  และ  $500\ \mu\text{m}$  โดยการฉายแสงที่มีความเข้มแสงต่างๆ แสดงได้ดังรูป

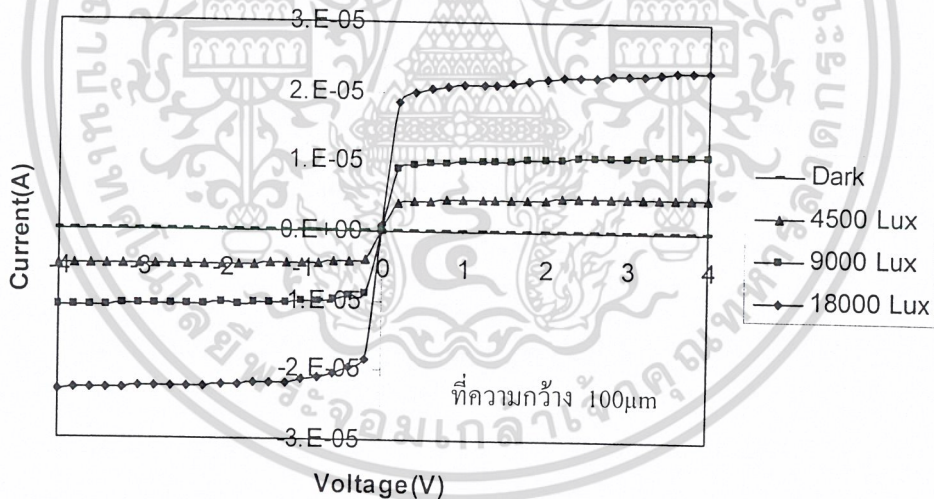


รูปที่ 4.3 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง  $20\ \mu\text{m}$  เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

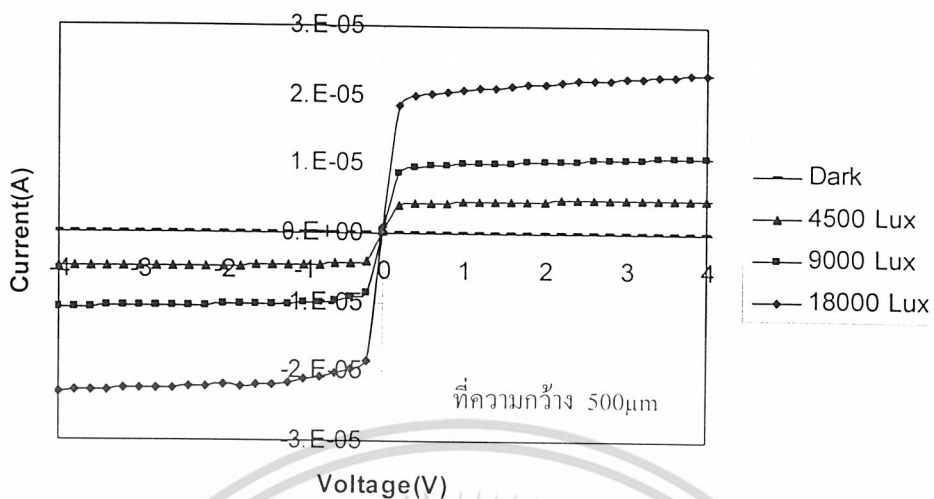


รูปที่ 4.4 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 40µm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน

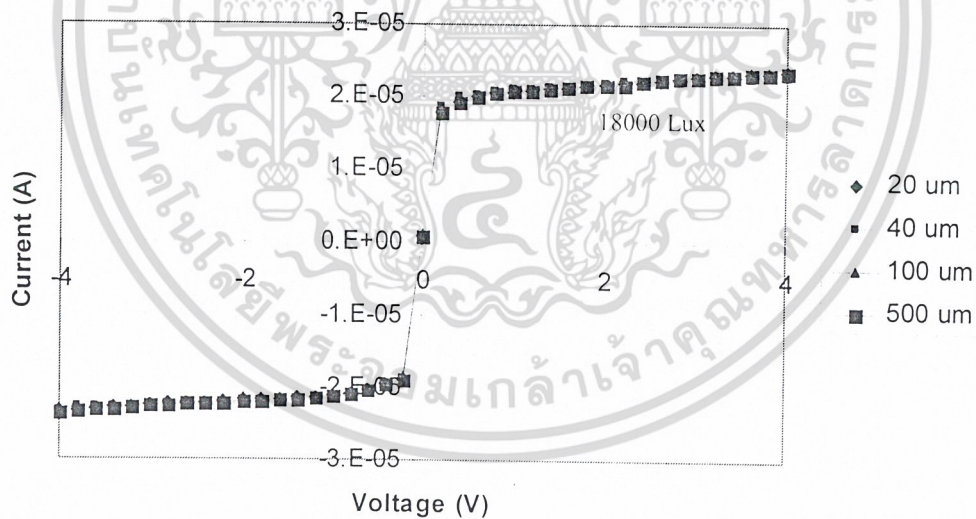


รูปที่ 4.5 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 100µm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 500 μm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน



รูปที่ 4.7 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 20 μm , 40 μm , 100 μm และ 500 μm เมื่อได้รับความเข้มแสง 18000 Lux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

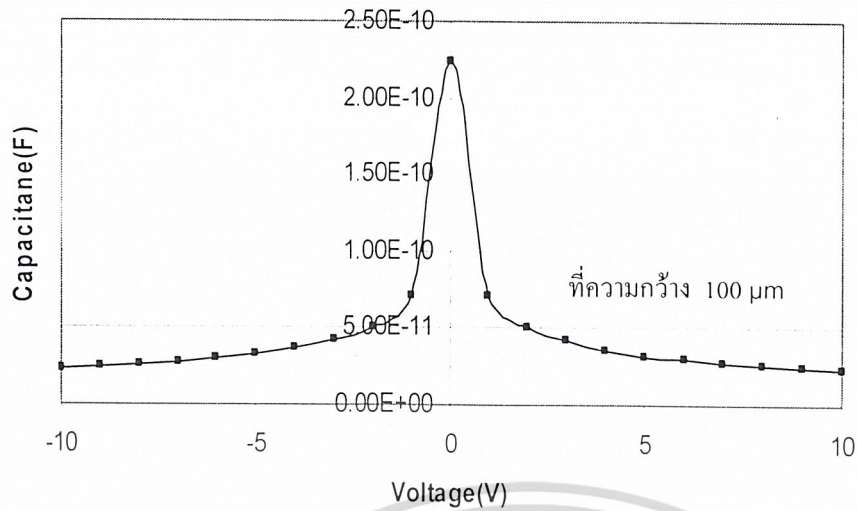
จากรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al พบว่าที่ความกว้างของพื้นที่รับแสงเดียวกันแต่ความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่รับแสงมีค่าความเข้มแสงต่างกัน คือ 4500 Lux , 9000 Lux และ 18000 Lux ปริมาณกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าต่างกัน โดยจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่รับแสง เนื่องจากความเข้มของแสงที่ฉายลงไปจะกระตุ้นให้เกิดคูพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจำนวนคูพาหะอิสระที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำก็จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกระแสโฟโตก็ขึ้นอยู่กับจำนวนคูพาหะอิสระที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงกล่าวได้ว่ากระแสโฟโตเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยความเข้มของแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีค่าเดียวกันคือ 18000 Lux ฉายลงบนช่องรับแสงที่มีค่าความกว้างต่างกันคือ 20  $\mu\text{m}$  , 40  $\mu\text{m}$  , 100  $\mu\text{m}$  และ 500  $\mu\text{m}$  กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับทุกๆ ความกว้างของช่องรับแสงและกระแสทั้งสองด้านมีความสมมาตรกัน เราจึงกล่าวได้ว่ากระแสโฟโตที่เกิดขึ้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความกว้างของช่องรับแสงที่เพิ่มขึ้น และเนื่องจากโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al มีโครงสร้างเป็นแบบสมมาตรคือ พื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนทั้ง 2 ด้านเท่ากัน ดังนั้นกระแสโฟโตที่วัดได้ขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง(Forward bias)และแรงดันไบอัสกลับ(Reverse bias) จึงมีลักษณะสมมาตรกัน

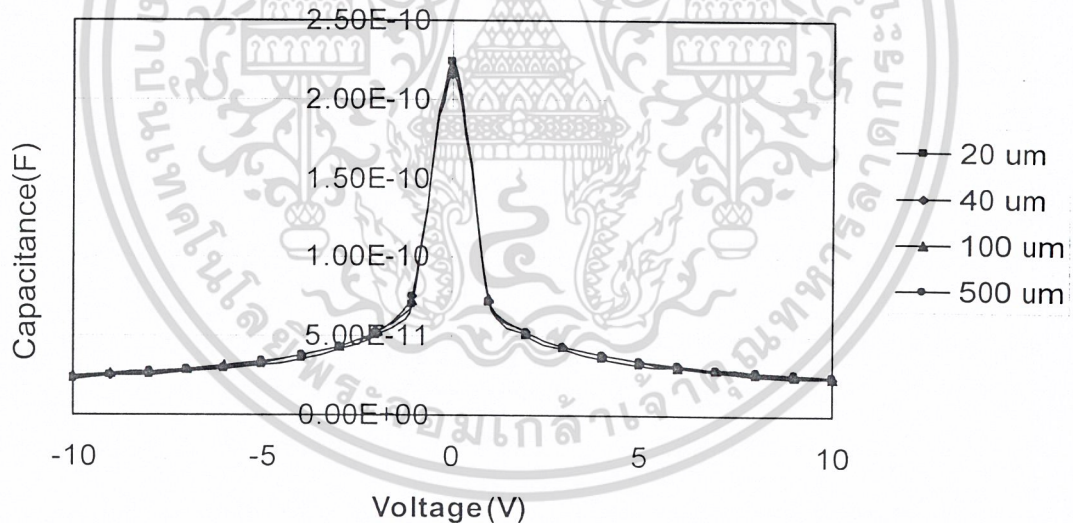
จากการทดลองคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสตรง ไม่ว่าเราจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่องรับแสง กระแสโฟโตก็จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสภายนอก โดยกระแสโฟโตจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มขึ้นเสมอ เนื่องจากโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสกลับจึงทำให้เกิดบริเวณปลอดประจุพาหะซึ่งถ้าแรงดันไบอัสเพิ่มมากขึ้นบริเวณปลอดพาหะก็ขยายเพิ่มมากขึ้น เมื่อบริเวณปลอดพาหะขยายเพิ่มมากขึ้นกระแสโฟโตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

#### 4.2.1.2 ผลการทดลองค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

จากรูปที่ 4.8 เป็นกราฟความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ซึ่งโฟโตไดโอดโครงสร้างเป็นแบบสมมาตร ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับจึงมีความสมมาตรกันและจะมีค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดัน 0 V และจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้น



รูปที่ 4.8 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ระยะความกว้าง 100  $\mu\text{m}$  ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al



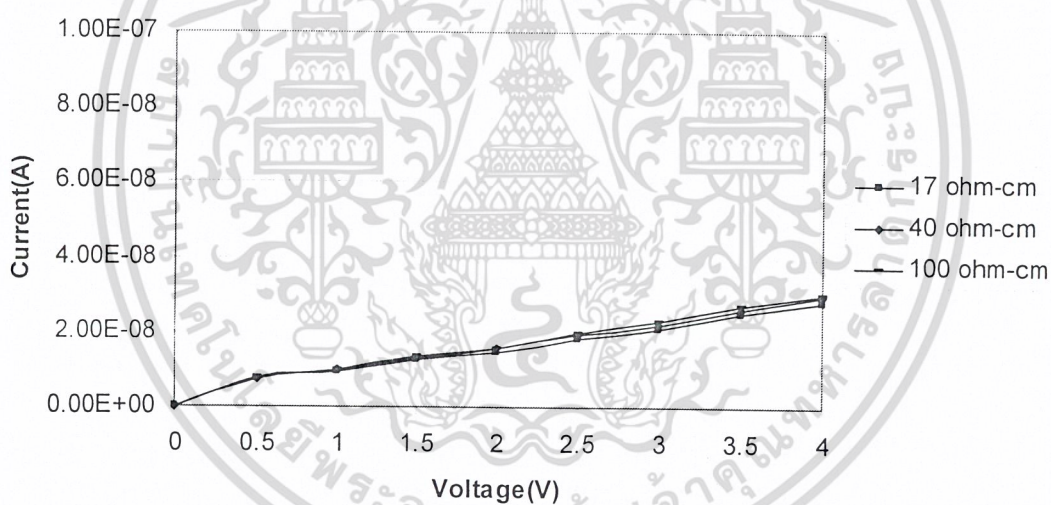
รูปที่ 4.9 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้างค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้างพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ ผลที่ได้จากการวัดคือ ที่ระยะความกว้างของพื้นที่รับแสงต่างๆ กันค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีลักษณะที่สมมาตรกัน เนื่องจากโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al เป็นโครงสร้างที่สมมาตรกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นไม่ขึ้นอยู่กับความกว้างของพื้นที่รับแสงแต่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้กับ MSM

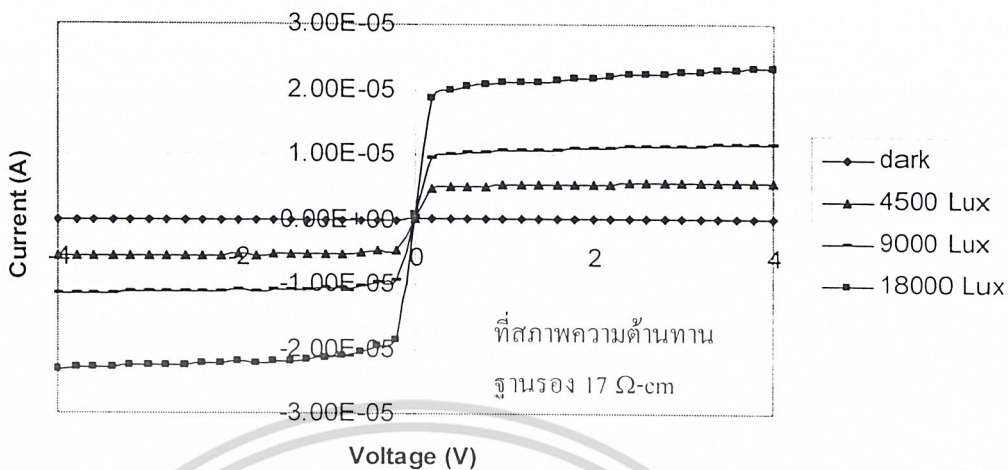
4.2.1.3 ผลการทดลองคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสตรง (DC) เมื่อเปลี่ยนสภาพความต้านทานฐานรอง

ผลการทดลองคุณสมบัติทางดีซี (DC) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทานของฐานรอง 17  $\Omega$ -cm, 40  $\Omega$ -cm, 100  $\Omega$ -cm โดยการฉายแสงที่มีความเข้มแสงต่างๆ แสดงได้ดังรูป

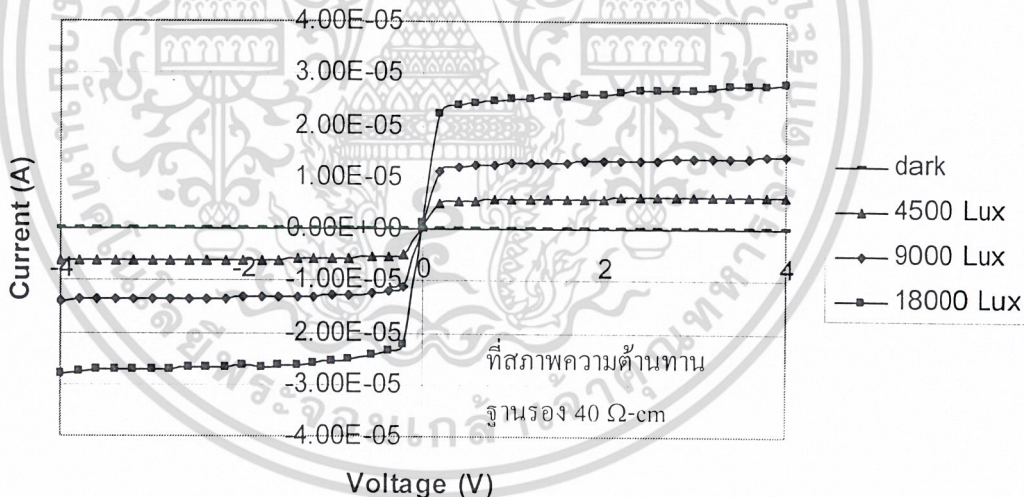


รูปที่ 4.10 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทานฐานรอง 17 , 40 และ 100  $\Omega$ -cm เมื่อไม่ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

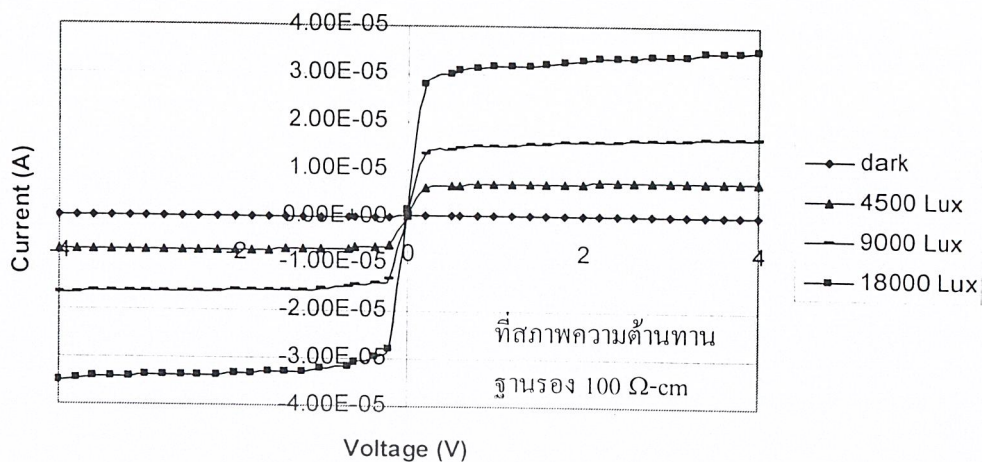


รูปที่ 4.11 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทาน ฐานรอง 17 Ω-cm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน

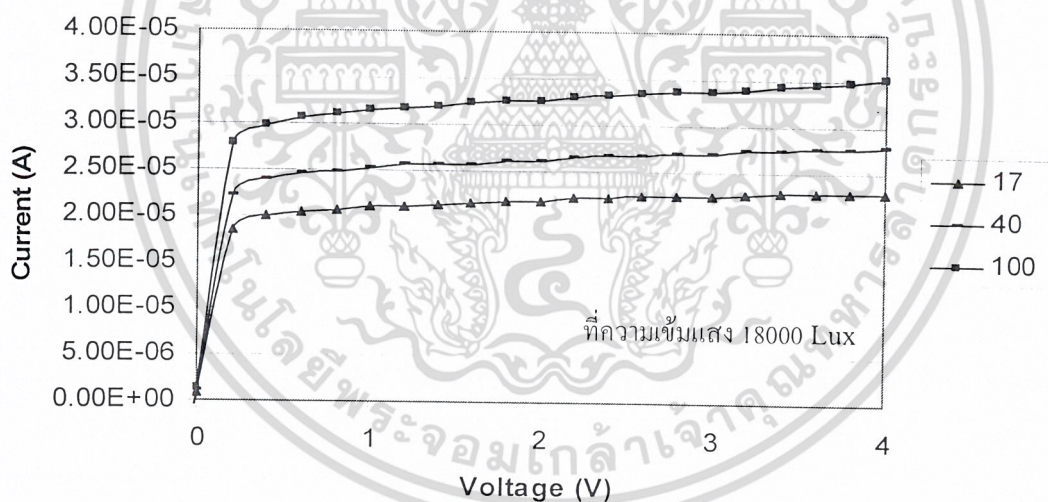


รูปที่ 4.12 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทาน ฐานรอง 40 Ω-cm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทานฐานรอง 100 Ω-cm เมื่อได้รับความเข้มแสงต่างๆกัน



รูปที่ 4.14 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทานฐานรอง 17 Ω-cm , 40 Ω-cm , 100 Ω-cm เมื่อได้รับความเข้มแสง 18000 Lux

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสแต่ไม่ได้รับแสงนั้นพบว่าที่ฐานรองที่มีค่าสภาพความต้านทานต่างกันกระแสรั่วไหล(Dark Current)จะมีค่าใกล้เคียงกัน และจากรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al พบว่าที่สภาพความต้านทานของฐานรองเดียวกันแต่ความเข้มแสงที่ฉายลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

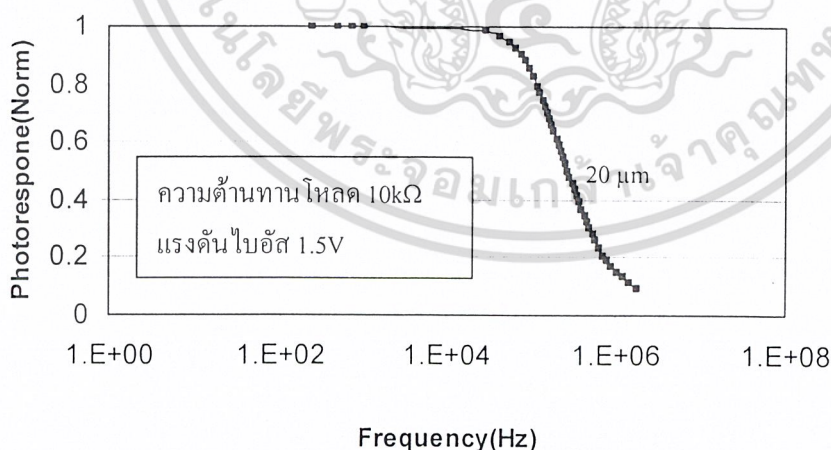
บนพื้นที่รับแสงมีค่าความเข้มแสงต่างกัน คือ 4500 Lux , 9000 Lux และ 18000 Lux ปริมาณกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าต่างกัน โดยจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่รับแสง เนื่องจากความเข้มของแสงที่ฉายลงไปจะกระตุ้นให้เกิดคู่อิทธิประจุในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจำนวนคู่อิทธิประจุที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำนั้นก็เพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงที่ฉายลงบนพื้นที่ซึ่งรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกระแสโฟโตก็ขึ้นอยู่กับจำนวนคู่อิทธิประจุที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ แต่จากผลการทดลองจากกราฟรูปที่ 4.14 พบว่าที่แรงดันไบอัสและความเข้มแสงเท่ากันนั้น เมื่อสภาพความต้านทานของฐานรองไม่เท่ากันก็จะให้กระแสแสงที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน เนื่องจากบริเวณปลอดพาหะมีพื้นที่ไม่เท่ากัน ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดพาหะหาได้จากสมการที่ (2.6) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นอะตอมผู้ให้ ( $N_D$ ) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ากระแสโฟโตที่เกิดขึ้นนั้นจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะ จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าที่สภาพความต้านทานฐานรองที่มีค่าสูงๆจะให้กระแสแสงมากกว่าฐานรองที่มีสภาพความต้านทานต่ำๆ

#### 4.2.2 ผลการทดลองสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ทางกระแสสลับ (AC)

##### 4.2.2.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสสลับ (AC) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง

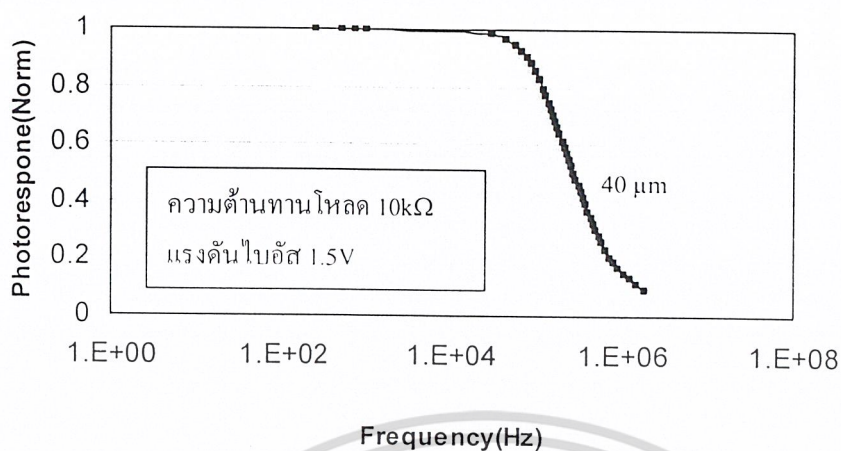
Al/n-Si/Al ที่ระยะขั้วไฟฟ้าต่างๆ กัน

โดยมีความกว้างของพื้นที่รับแสง  $20\mu\text{m}$  ,  $40\mu\text{m}$  ,  $100\mu\text{m}$  และ  $500\mu\text{m}$  และฉายแสงที่มีความเข้มแสง 18000 Lux ลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำของโฟโตไดโอด แสดงได้ดังรูป

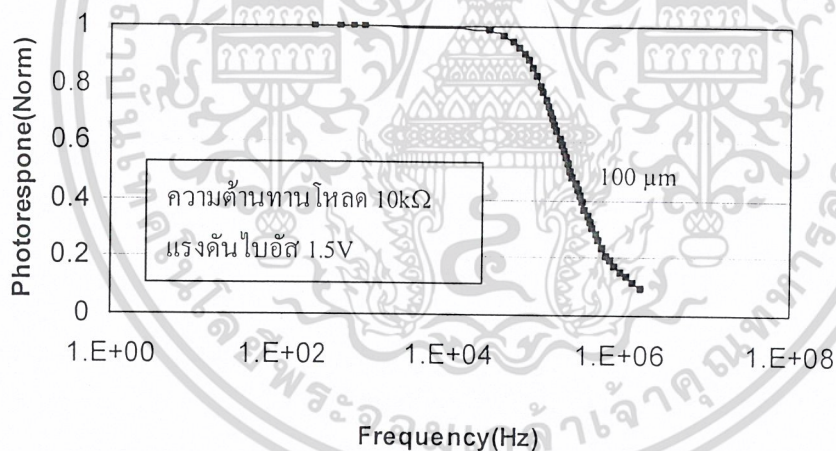


รูปที่ 4.15 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง  $20\mu\text{m}$  ความต้านทานโหลด  $10\text{k}\Omega$  แรงดันไบอัส 1.5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

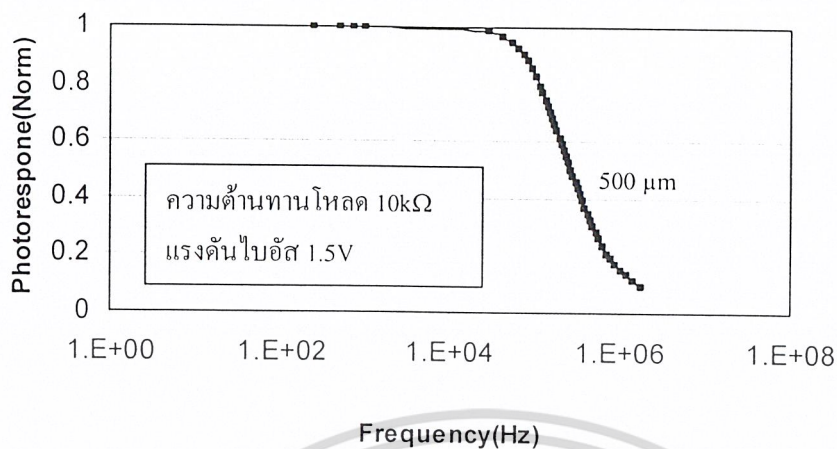


รูปที่ 4.16 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 40 μm ความต้านทานโหลด 10kΩ แรงดันไบอัส 1.5V

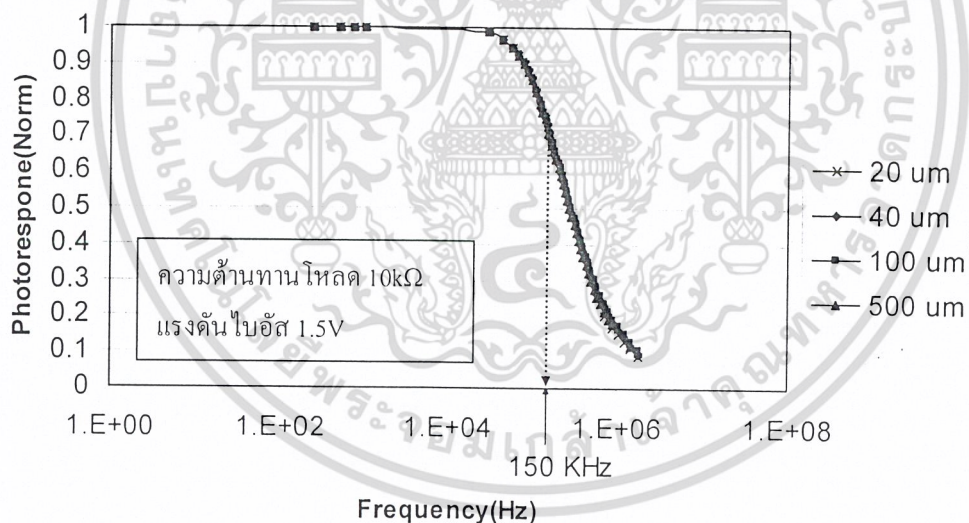


รูปที่ 4.17 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 100 μm ความต้านทานโหลด 10kΩ แรงดันไบอัส 1.5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 500 μm ความต้านทานโหลด 10kΩ แรงดันไบอัส 1.5V



รูปที่ 4.19 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้างต่างๆ ความต้านทานโหลด 10kΩ แรงดันไบอัส 1.5V

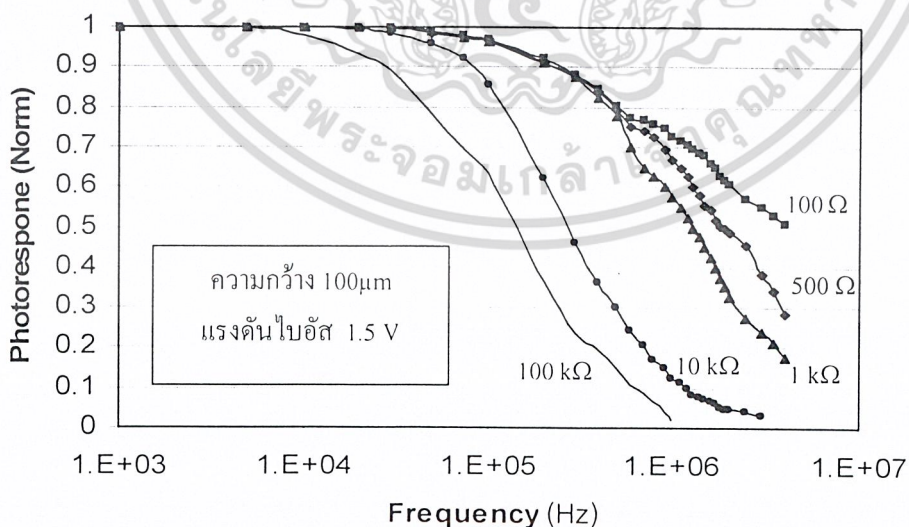
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองรูปที่ 4.15 ถึง รูปที่ 4.18 เป็นกราฟผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสสลับ (AC) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แสดงความสัมพันธ์ของความถี่ (Frequency) และผลการตอบสนองทางแสง Photorespone (Norm) เมื่อทำการเปลี่ยนความกว้างของบริเวณรับแสงเพิ่มขึ้นคือ 20  $\mu\text{m}$  , 40  $\mu\text{m}$  , 100  $\mu\text{m}$  และ 500  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ พบว่าความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกันมากหรือมีค่าเท่ากัน จึงกล่าวได้ว่าความกว้างของบริเวณรับแสงที่เพิ่มขึ้นของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ไม่ทำให้ผลการตอบสนองทางด้านความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 4.19 เป็นการนำกราฟรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.18 มารวมในกราฟเดียวกันเพื่อแสดงแสดงความสัมพันธ์ของความถี่ (Frequency) และผลการตอบสนองทางแสง Photorespone (Norm) จากกราฟผลการตอบสนองความถี่ที่เกิดขึ้นในแต่ละความกว้างของพื้นที่รับแสงจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความถี่ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าประมาณ 150 kHz โดยวัดที่ 70.7% ของแกนผลตอบสนองทางแสง

4.2.2.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสสลับ (AC) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่แรงดันแรงดันค่าต่างๆ

โดยแรงดันที่ใช้ป้อนคือ 1.5 V , 3 V , 5 V และ 10 V และความต้านทานที่นำมาทดลองผลการตอบสนองของโฟโตไดโอดเป็น 100  $\Omega$  , 500  $\Omega$  , 1 k $\Omega$  , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$

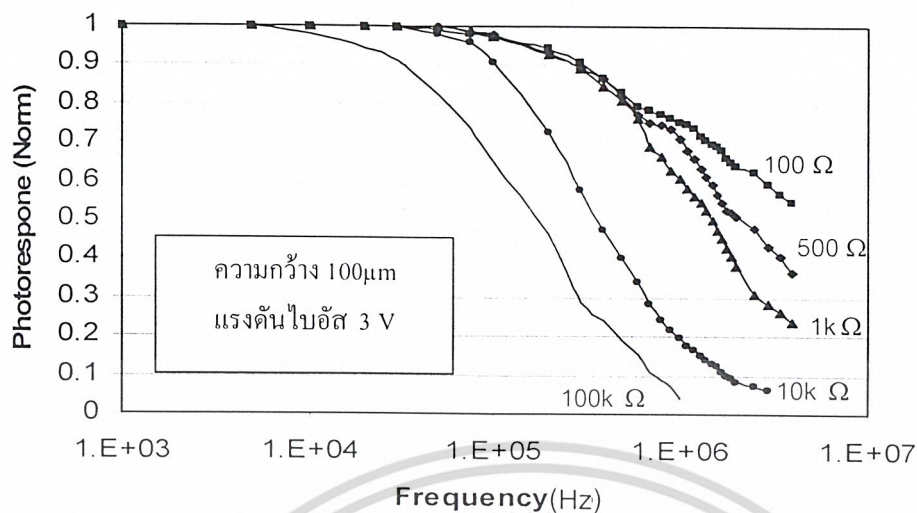


รูปที่ 4.20 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความ

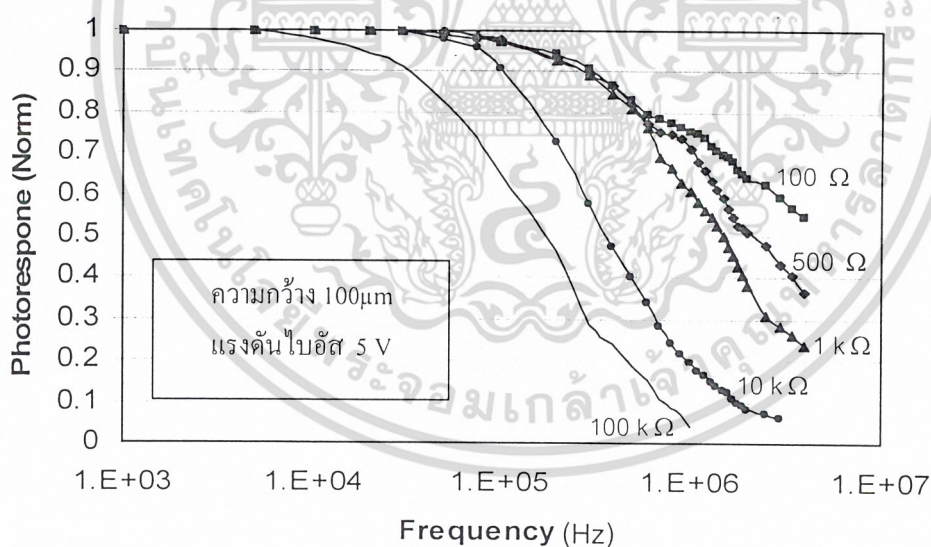
กว้าง 100  $\mu\text{m}$  แรงดัน 1.5 V และเปลี่ยนความต้านทานตามค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

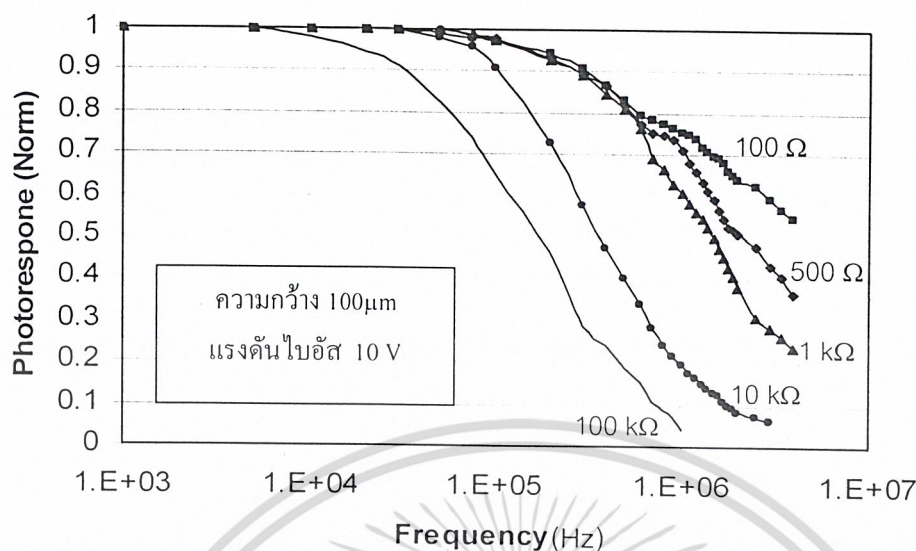


รูปที่ 4.21 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 100µm แรงดันไบอัส 3 V และเปลี่ยนความต้านทานตามค่าต่างๆ



รูปที่ 4.22 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 100µm แรงดันไบอัส 5 V และเปลี่ยนความต้านทานตามค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



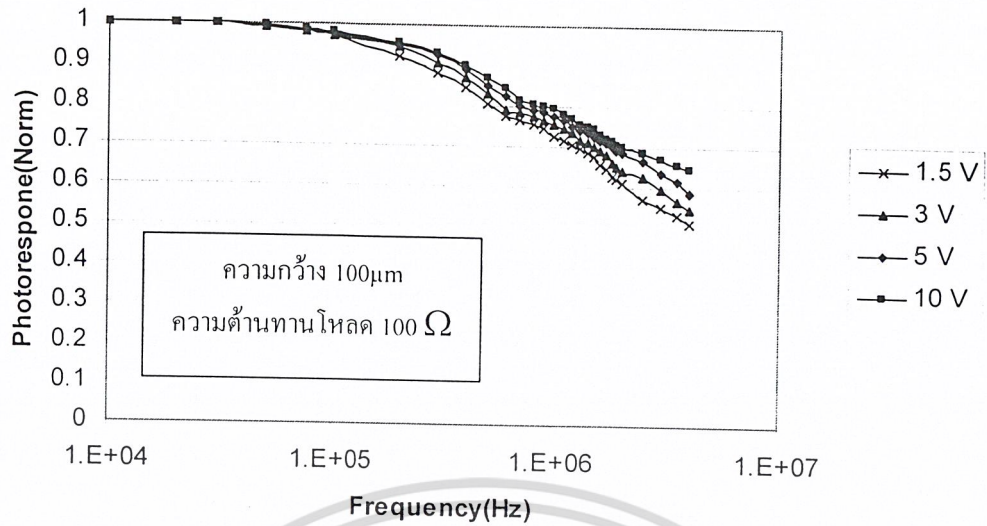
รูปที่ 4.23 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ระยะความกว้าง 100 μm แรงดัน 10 V และเปลี่ยนความต้านทานตามค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.23 เป็นกราฟผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสลับของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แสดงความสัมพันธ์ของความถี่ (Frequency) และผลการตอบสนองทางแสง Photorespon (Norm) จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความต้านทานสูงๆหรือตั้งแต่ 10 kΩ ขึ้นไปความถี่ turn over ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเดียวและความถี่มีค่าต่ำ และจะมีความถี่สูงขึ้นเมื่อความต้านทานมีค่าลดลง โดยที่ค่าความต้านทานต่ำๆหรือต่ำกว่า 10 kΩ ความถี่ turn over ที่เกิดขึ้นจะมี 2 ค่า ซึ่งความถี่แรกเกิดจากบริเวณ Depletion region และความถี่ที่สองเกิดจากพื้นที่เป็นกลาง

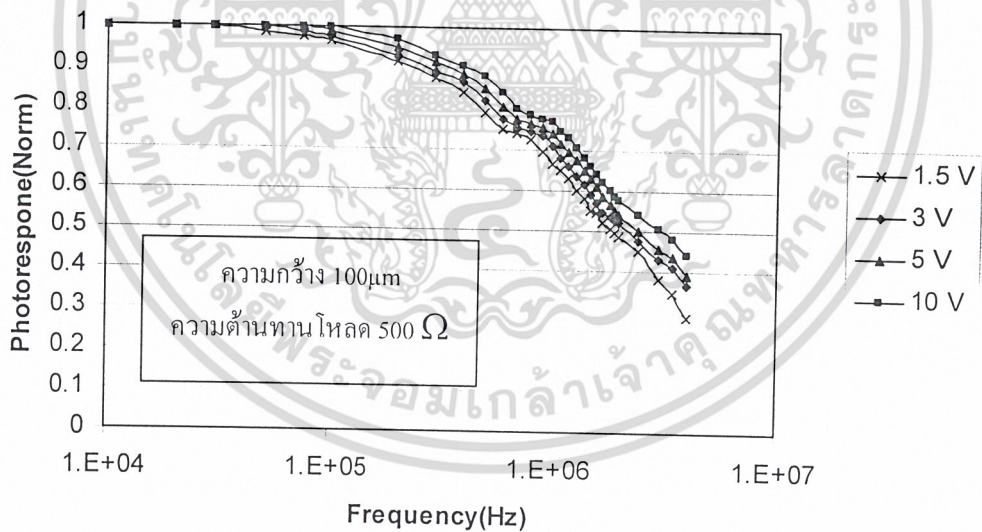
4.2.2.3 ผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสลับ (AC) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ความต้านทาน โหลดต่างๆ กัน

โดยความต้านทาน โหลดที่ใช้มีค่าต่างๆ กัน คือ 100 Ω, 500 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ และ 100kΩ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบอัสเป็น 1.5 V, 3 V, 5 V และ 10 V ในแต่ละค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

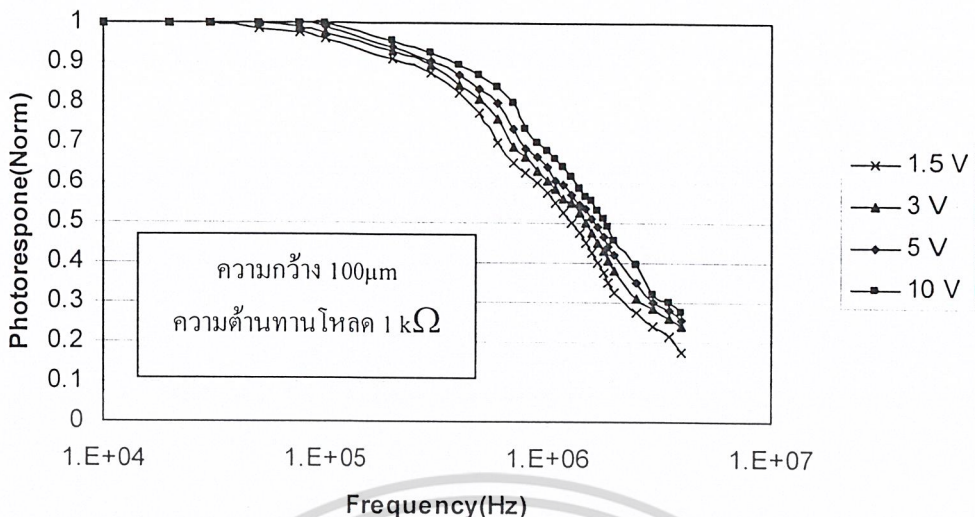


รูปที่ 4.24 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ระยะความกว้าง 100μm ความต้านทานโหลด 100 Ω ที่แรงดันค่าต่างๆ

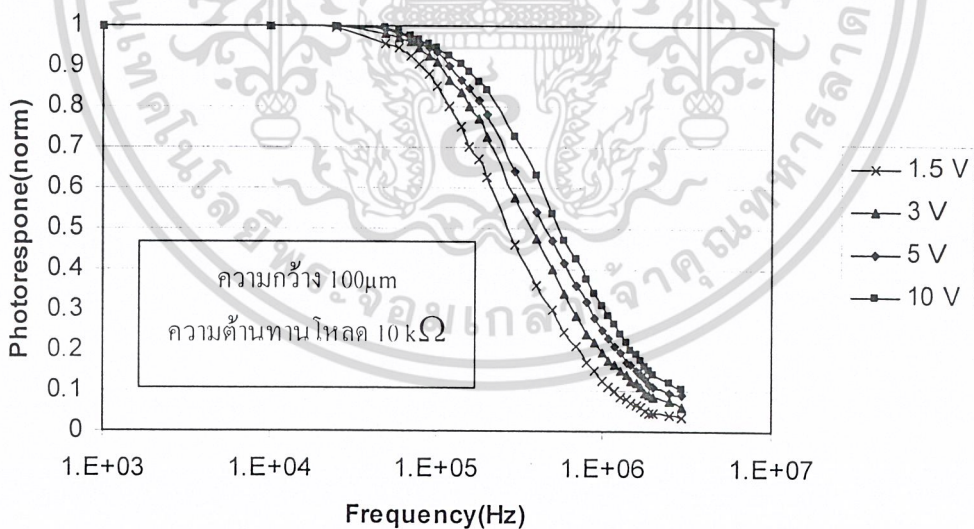


รูปที่ 4.25 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ระยะความกว้าง 100μm ความต้านทานโหลด 500 Ω ที่แรงดันค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

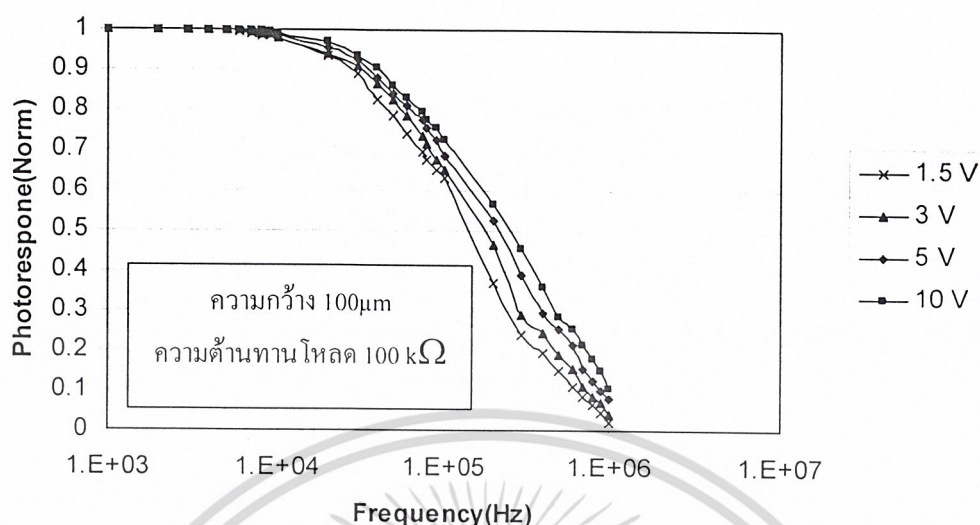


รูปที่ 4.26 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ระยะความกว้าง 100µm ความต้านทานโหลด 1 kΩ ที่แรงดันค่าต่างๆ



รูปที่ 4.27 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ระยะความกว้าง 100µm ความต้านทานโหลด 10 kΩ ที่แรงดันค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ระยะความกว้าง 100 μm ความต้านทานโหลด 100 kΩ ที่แรงดันค่าต่างๆ

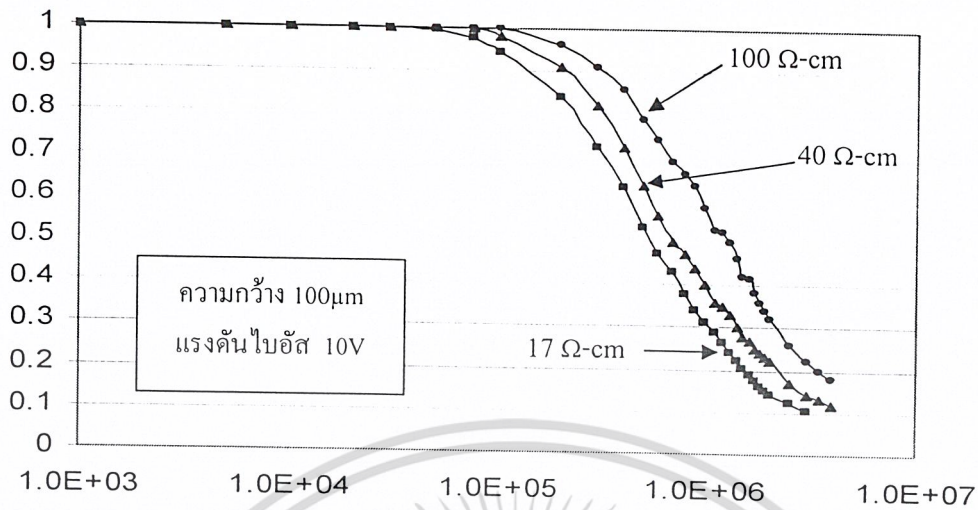
จากรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.28 เป็นกราฟผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสลับของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แสดงความสัมพันธ์ของความถี่ (Frequency) และผลการตอบสนองทางแสง Photorespon (Norm) จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัส เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้บริเวณปลดพาหะขยายมากขึ้นจึงทำให้ความถี่เพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสหรืออาจกล่าวได้ว่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสเป็นความถี่ที่เกิดจาก Depletion Region

เมื่อพิจารณาการเกิดความถี่ที่ความต้านทานค่าต่างๆโดยเปลี่ยนค่าแรงดันไบอัสเป็น 1.5 V, 3 V, 5 V และ 10 V ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในแต่ละค่าความต้านทานหรือในแต่ละกราฟความถี่จะมีค่าไม่เท่ากัน โดยความถี่จะลดลงเมื่อค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้น

4.2.2.4 ผลการทดลองคุณสมบัติทางกระแสลับ (AC) ของโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al เมื่อเปลี่ยนสภาพความต้านทานของฐานรอง

ผลการทดลองการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทานฐานรอง 17, 40 และ 100 Ω-cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ลักษณะการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สภาพความต้านทานฐานรอง 17, 40 และ 100 Ω-cm

จากกราฟการตอบสนองความถี่ของโฟโตไดโอด ผลการตอบสนองความถี่จะเพิ่มขึ้นตามค่าสภาพความต้านทานของฐานรอง ยิ่งสภาพความต้านทานของฐานรองมีค่ามากขึ้นการตอบสนองความถี่ก็เพิ่มขึ้นตาม

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยเรื่องกระบวนการสร้างและคุณลักษณะทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al (MSM) โดยในส่วนแรกนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของโฟโตไดโอดทางกระแสตรงโดยทดลองศึกษาผลตอบสนองของกระแสที่มีความกว้างของพื้นที่รับแสงที่ต่างกันคือ  $20\mu\text{m}$  ,  $40\mu\text{m}$  ,  $100\mu\text{m}$  และ  $500\mu\text{m}$  แล้วทำการฉายแสงลงบนชิ้นงานตรงบริเวณพื้นที่รับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type) โดยใช้ความเข้มแสง คือ  $4500\text{ Lux}$  ,  $9000\text{ Lux}$  และ  $18000\text{ Lux}$  แล้ววัดค่ากระแสเปรียบเทียบกับแรงดัน ผลที่ได้จากการทดลองคือ ที่ความกว้างของพื้นที่รับแสงเดียวกันแต่ความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่รับแสงมีค่าความเข้มแสงที่ต่างกันปริมาณกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าต่างกัน โดยจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่รับแสง จากนั้นทำการทดลองฉายความเข้มของแสงลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีค่าเดียวกันคือ  $18000\text{ Lux}$  ลงบนช่องรับแสงที่มีค่าความกว้างต่างกัน กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากันสำหรับทุกๆ ความกว้างของช่องรับแสง ต่อมาเมื่อเปลี่ยนฐานรองให้มีค่าสภาพความต้านทานที่ต่างกัน โดยให้แรงดันไบอัสและความเข้มแสงเท่ากัน ผลการทดลองที่ได้คือ กระแสที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงตามสภาพความต้านทานของฐานรอง เนื่องจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นอะตอมผู้ให้ ( $N_D$ ) ดังนั้นสภาพความต้านทานฐานรองที่มีค่าสูงๆบริเวณปลอดพาหะก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้กระแสแสงที่ได้มีค่าสูงขึ้นด้วย

จึงกล่าวได้ว่ากระแสโฟโตที่เกิดขึ้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความกว้างของช่องรับแสงแต่จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส ความเข้มแสง และสภาพความต้านทานของฐานรอง

ส่วนความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงมีความสมมาตรกันเนื่องจากโครงสร้างมีความสมมาตรและจะมีค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดัน  $0\text{ V}$  เนื่องจากที่แรงดันค่านี้ทำให้บริเวณพื้นที่ปลอดพาหะมีความกว้างน้อยที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดจะมีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะความกว้างพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ

ส่วนที่สองเป็นการศึกษาคุณสมบัติของโฟโตไดโอดทางกระแสลับ โดยทดลองศึกษาผลตอบสนองทางความถี่กับความเข้มของแสงที่ฉายลงบนความกว้างของบริเวณรับแสง  $20\mu\text{m}$  ,  $40\mu\text{m}$  ,  $100\mu\text{m}$  และ  $500\mu\text{m}$  ตามลำดับจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความถี่จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าความกว้างของบริเวณรับแสงที่เพิ่มขึ้นของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al นั้นไม่ได้ทำให้ผลการตอบสนองทางด้านความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามความกว้างของบริเวณพื้นที่รับแสง จากนั้นเราก็ทดลองศึกษาผลการตอบสนองทางความถี่โดยป้อนค่าแรงดันไบอัส 1.5V, 3V, 5V และ 10V แล้วทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานโหลดเป็น 100  $\Omega$ , 500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$  สำหรับทุกๆค่าแรงดันไบอัส จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ความต้านทานสูงๆความถี่ที่ได้จะมีค่าเดียวและความถี่นั้นจะมีค่าต่ำมากและความถี่จะลดลงเรื่อยๆเมื่อความต้านทานที่นำมาต่อมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อค่าความต้านทานต่ำๆความถี่ที่เกิดขึ้นจะมี 2 ค่า ซึ่งความถี่แรกเกิดจากบริเวณ Depletion region และความถี่ที่สองเกิดจากพื้นที่เป็นกลาง จากนั้นศึกษาผลการตอบสนองทางความถี่โดยใช้ค่าความต้านทาน 100  $\Omega$ , 500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$  แล้วทำการเปลี่ยนค่าแรงดันไบอัสเป็น 1.5V, 3V, 5V และ 10V สำหรับทุกๆค่าความต้านทานผลที่เกิดขึ้นคือเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสเนื่องจากบริเวณพื้นที่ปลอดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ต่อมาทำการเปลี่ยนค่าสภาพความต้านทานฐานรองต่างๆกัน โดยให้ความเข้มแสงเดียวกันผลที่ได้คือ ฐานรองที่มีสภาพความต้านทานค่าสูงๆ จะตอบสนองความถี่ได้สูงกว่าฐานรองที่มีสภาพความต้านทานต่ำ เนื่องจากฐานรองที่มีสภาพความต้านทานค่าสูงๆมีจำนวนอะตอมของสารเจือผู้ให้น้อยกว่าฐานรองที่มีสภาพความต้านทานต่ำ โดยความกว้างของพื้นที่บริเวณปลอดพาหะขึ้นอยู่กับจำนวนของอะตอมของสารเจือผู้ให้ดังสมการ (2.6) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเมื่อความกว้างของพื้นที่ปลอดพาหะมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลง จึงทำให้สามารถตอบสนองความถี่ได้มากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Desmarais Louis. **Applied Electro-optics**. Upper Sadle River.NJ : Pprentice Hall PTR. 1998.
- [2] Sze S M. Coleman D.J.JR. and Loya A. “Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structures.” *Solid-State Electronic*. 1971. Vol.14. pp. 1209-1248.
- [3] Sze S M. **Physics of Semiconductor Device 2<sup>nd</sup> Edition**.1981
- [4] Rhoderick E.H. William R.H. **Metal-Semiconductor Contact 2<sup>nd</sup> Edition** Oxford University Press. New York. 1988.
- [5] Takano H. Kimura M. Ando T. Niemcharoen S. Yasamara Y. and Sato K. “Optical Response Of Planar Mo/n-si/MO Structure With Long Neutral Region m and Schottky Barriers at Both Ends.”, *Solid-State Electronic* 44 (2000). pp.216-2164.
- [6] Gerikd W. Neudeck. **The PN junction diode**. 2<sup>nd</sup> ed. Reading MA : Addison-Wesle. c1989.
- [7] รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2542.
- [8] คุณิต เครื่องงาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ : ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งาน**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้