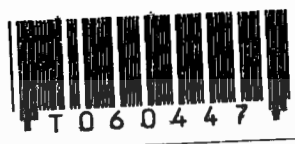


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์

DESIGN AND FABRICATION OF PLANAR Al/n-Si/Al PHOTODETECTOR



เลขหมู่..... 60447  
เลขทะเบียน..... 29 ส.ย. 2549  
วัน,เดือน,ปี.....

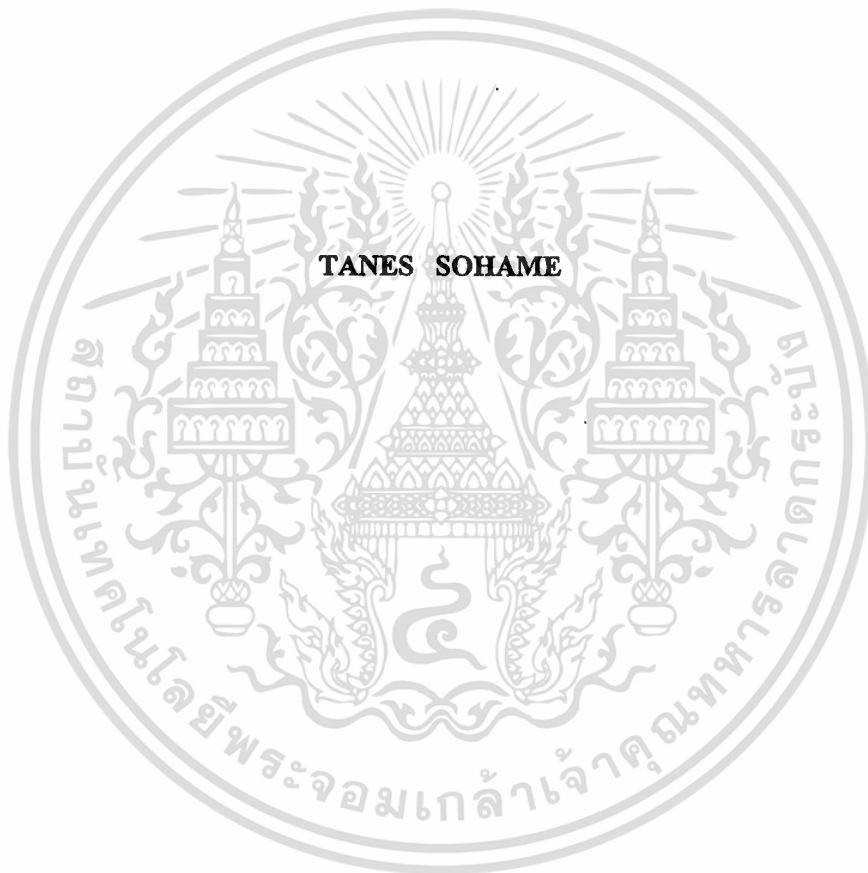
b..... 11685912  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1969-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN AND FABRICATION OF PLANAR Al/n-Si/AI PHOTODETECTOR



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONIC ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2005**

**ISBN 974-15-1969-9**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาานาร์
นักศึกษา	นายธนศ โชะเหม
รหัสนักศึกษา	45060804
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงการออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งมีโครงสร้างแบบพลาานาร์ โดยอลูมิเนียมจะถูกสร้างขึ้นบนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นแล้วทำการเปิดช่องรับแสง จากนั้นทำการปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการใช้ความร้อนเข้าช่วย พบว่าที่อุณหภูมิซินเตอร์ระหว่าง 400-500 °C ในบรรยากาศของไนโตรเจน ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ช็อคกามีค่าประมาณ 0.72 eV เนื่องจากเกิดการฟอร์มตัวแบบยูเทคติก ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอน ทำให้กระแสมีคของตัวตรวจวัดแสงลดลงมีค่าประมาณ 20 nA ที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ จากนั้นทำการศึกษาลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านการซินเตอร์อุณหภูมิ 500 °C ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 ถึง 500  $\mu\text{m}$  ด้วยความถี่ 100 Hz ถึง 4 MHz พบว่าเมื่อให้แสงตกกระทบบริเวณพื้นที่รับแสง จะเกิดกระแสแสงขึ้นสองส่วนจากบริเวณนิวทรัลและบริเวณปลดคพาหะ โดยกระแสแสงที่เกิดขึ้นจากบริเวณนิวทรัลจะเกิดจากผลของการแพร่ของพาหะส่วนน้อยที่อยู่ใกล้ขอบของบริเวณปลดคพาหะ ส่วนกระแสแสงที่บริเวณปลดคพาหะจะขึ้นอยู่กับพื้นที่บริเวณปลดคพาหะ ซึ่งพื้นที่ปลดคพาหะจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบแอสที่ให้ โดยอัตราส่วนของการเกิดกระแสแสงจากบริเวณปลดคพาหะต่อบริเวณนิวทรัล มีค่าประมาณ 3-4:1 ส่วนการเพิ่มขนาดของขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดมากขึ้นเป็นผลให้ได้กระแสแสงมากขึ้น แต่ลักษณะการตอบสนองทางแสงจะมีค่าความถี่คutoffที่ต่ำลง ส่วนการเพิ่มค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนเป็นผลให้ได้กระแสแสงมากขึ้น และลักษณะการตอบสนองทางแสงมีความถี่คutoffที่สูงขึ้น จากผลลัพท์ที่ได้สามารถนำไปอธิบายการเกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ได้ และนำไปพัฒนาให้อุปกรณ์มีลักษณะสมบัติที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Design and Fabrication of Planar Al/n-Si/Al Photodetector
<b>Student</b>	Tanes Sohame
<b>Student ID</b>	45060804
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Microelectronic Engineering
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Surasak Niemcharoen

### ABSTRACT

The purpose of this thesis is to present the design and fabrication of planar Al/n-Si/Al photodetectors. Aluminium film deposited on n-type silicon substrate by vacuum evaporator. The electrical characteristics are improved by the heat treatment process. The experimental results reveal that schottky barrier height is approximately 0.72 eV at 400-500 °C range in nitrogen atmosphere due to the formation of eutectic layer between aluminium and silicon. The dark current is reduced to 20 nA at 4 V. Photoresponse characteristics of 500 °C sintered photodetector with 20-500 µm electrode gap are measured at frequency 100 Hz to 4 MHz, schemes. It is found that the presence of electrode gap under optical illumination can enhance the device photocurrent from neutral region and depletion region. Photocurrent from neutral region reflects within the diffusion length of minority carriers from the boundary with depletion region. On the other hand, photocurrent from depletion region reflects depletion area from applied bias which the ratio of photocurrent generation from depletion region to neutral region is 3-4:1. The increment of pad area caused more photocurrent but photoresponse had cutoff frequency lower while the increment of silicon resistivity caused more photocurrent and photoresponse had cutoff frequency higher. The experimental results can be explained photocurrent generation and improved characteristics of Al/n-Si/Al photodetector with wide electrode gap.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุกเดช และ รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง กรรมการสอบหัวข้อและ โครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ Prof. Dr. Kazunori Sato และ อาจารย์ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณสรายุทธ์ วิศวแสวงสุขจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ช่วยวัดผลของความจุไฟฟ้า

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ขอขอบคุณ คุณณัฐพงษ์ ถ้อยมัน คุณปรีชา เทียนงาม คุณคมสันต์ พนมสิ และคุณชาญชัย บุญมา ที่ช่วยวัดผลการทดลองบางส่วน

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดามารดา พี่และอาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง และเป็นผู้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นสถานที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

ธเนศ โชะเหม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อ.....	XVI
รายการสัญลักษณ์.....	XVII
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XIX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำและตัวตรวจวัดแสง.....	6
2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	6
2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง.....	6
2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง.....	7
2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	8
2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	8
2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	9
2.1.4 การตอบสนองทางแสง.....	10
2.2 ชนิดของตัวตรวจวัดแสง.....	11
2.2.1 โฟโตคอนดักเตอร์.....	11
2.2.2 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n.....	13
2.2.4 โฟโตไดโอดแบบอะวาแลนซ์.....	14
<b>บทที่ 3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....</b>	<b>16</b>
3.1 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....	16
3.1.1 รอยสัมผัสในภาวะสมดุลความร้อน.....	17
3.1.1.1 ก่อนการสัมผัส.....	17
3.1.1.2 หลังการสัมผัส.....	18
3.1.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบแอส.....	19
3.1.2.1 รอยสัมผัสขณะได้รับไบแอสตรง.....	19
3.1.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบแอสย้อนกลับ.....	20
3.1.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดทีไอโอด.....	21
3.1.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีไอโอด.....	22
3.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	23
3.2.1 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน.....	23
3.2.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบแอส.....	24
3.2.2.1 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบแอส.....	24
3.2.2.2 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบแอส.....	25
3.2.3 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ.....	27
<b>บทที่ 4 การออกแบบ การสร้างและการทดลอง.....</b>	<b>29</b>
4.1 โครงสร้างและการออกแบบ.....	29
4.2 กระบวนการสร้าง.....	30
4.3 การทดลอง.....	34
4.3.1 การศึกษากำแพงศักย์ซีดที.....	34
4.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Al/n-Si/Al.....	34
4.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบ สัญญาณแสงกระแสตรง.....	35
4.3.5 การศึกษาลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Al/n-Si/Al ในแบบ สัญญาณแสงกระแสกลับ.....	36
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
5.1 ผลการทดลองกำแพงศักย์ชี้ชัด.....	37
5.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง.....	42
5.2.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อผ่านการขึ้นเตอรริงในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	42
5.2.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al.....	44
5.2.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสงตกกระทบแบบสัญญาณแสงกระแสตรง.....	45
5.2.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 $\mu\text{m}$ .....	46
5.2.5 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 $\mu\text{m}$ .....	49
5.2.6 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส.....	50
5.3 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสงกระแสกลับ.....	52
5.3.1 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นกับ โหลดความต้านทาน.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 $\mu\text{m}$ .....	56
5.3.3 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส.....	58
5.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นอยู่กับ ขนาดของขั้วไฟฟ้า.....	61
5.4.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	62
5.4.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง.....	63
5.4.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป.....	64
5.4.4 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ.....	65
5.5 ผลการทดลองลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นอยู่กับ สภาพด้านทานของซิลิคอน.....	67
5.5.1 ผลการทดลองรอยสัมผัสของอุปกรณ์ในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่ออุปกรณ์มีสภาพด้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป.....	67
5.5.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีสภาพด้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ไม่ได้รับแสง ตกกระทบ.....	69
5.5.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีสภาพด้านทานแผ่นซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป ในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

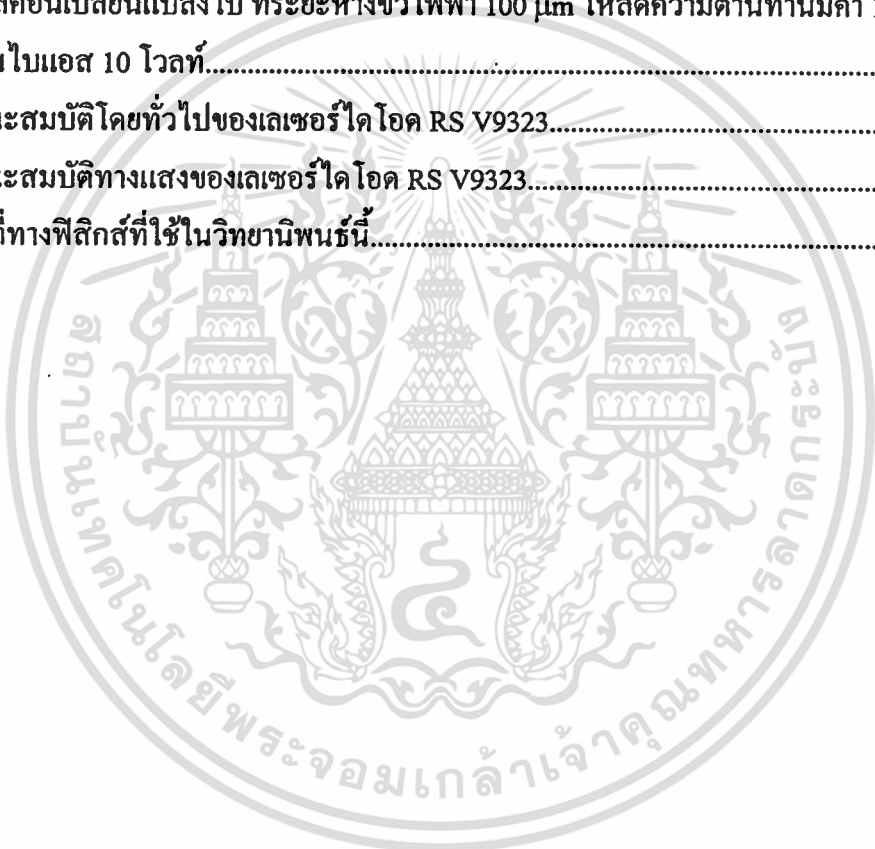
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่ออุปกรณ์มีสภาพด้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป.....	73
5.5.5 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีสภาพด้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป ในแบบสัญญาณแสงกระแสลับ...74	
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก ก. ลักษณะสมบัติเลเซอร์ไดโอดของบริษัท RS รุ่น V9323.....	82
ภาคผนวก ข. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	84
ภาคผนวก ค. ชุดทดลองลักษณะสมบัติทางแสง.....	85
ค.1 ชุดทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง.....	85
ค.2 ชุดทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง กระแสลับ.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ โพลความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ .....	60
5.2 การเปรียบเทียบแรงดันภายในที่ได้จากการวัดและการคำนวณ เมื่ออุปกรณ์มีสภาพต้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนไป.....	69
5.3 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่ออุปกรณ์มีสภาพต้านทาน ของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ โพลความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ แรงดันไบแอส 10 โวลต์.....	75
ก.1 ลักษณะสมบัติโดยทั่วไปของเลเซอร์ไดโอด RS V9323.....	83
ก.2 ลักษณะสมบัติทางแสงของเลเซอร์ไดโอด RS V9323.....	84
ข.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ภาพด้านบนโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al (ข) ภาคตัดขวางโครงสร้าง MSM.....	2
2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ (ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง.....	7
2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	9
2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ (ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี.....	9
2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม.....	10
2.5 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ.....	11
2.6 (ก) โครงสร้างของโฟโตคอนดักเตอร์ (ข) แถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์เมื่อได้รับแสง.....	12
2.7 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็นเมื่อได้รับแสง.....	13
2.8 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n เมื่อได้รับแสง.....	14
2.9 โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ชนิดรีซทรู.....	15
3.1 แสดงลักษณะรอยสัมผัสระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ (ก) รอยสัมผัสโอห์มิก (ข) รอยสัมผัสช็อคกี.....	16
3.2 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส.....	17
3.3 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำหลังการสัมผัส.....	18
3.4 (ก) การให้แรงดันไบแอสตรง (ข) แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบแอสตรง.....	19
3.5 (ก) การให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ (ข) แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ.....	21
3.6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อคกีไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น.....	22
3.7 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อคกีไดโอด.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 (ก) ภาพภาคตัดขวางของ โครงสร้าง MSM	
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน	
(ค) สัญลักษณ์ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM.....	23
3.9 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบแอส.....	24
3.10 ความจุไฟฟ้าของ โครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบแอส.....	25
3.11 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM.....	26
3.12 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ.....	27
3.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	28
4.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al.....	29
4.2 ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al.....	32
4.3 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่สร้างเสร็จแล้ว.....	33
4.4 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการตัดแยกชิ้นงาน โดยมีระยะห่างขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 100 $\mu\text{m}$ .....	33
4.5 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al อุปกรณ์ที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน	
(ก) อุปกรณ์ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1 x 1 $\text{mm}^2$	
(ข) อุปกรณ์ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2 x 2 $\text{mm}^2$ .....	33
4.6 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองหาค่าแรงแงกซ์ช็อคกี.....	34
4.7 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน.....	34
4.8 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน.....	35
4.9 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง.....	35
4.10 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสง ในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ.....	36
5.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ผ่านการชินเตอริง.....	37
5.2 การหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสที่ผ่านการชินเตอริง.....	38
5.3 การหาค่า $J_s$ จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส.....	39
5.4 ความสูงของค่าแรงแงกซ์ช็อคกีได้จากเทคนิคการวัดกระแส-แรงดัน.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 ภาพถ่ายพื้นผิวอลูมิเนียมที่ผ่านการชินเตอริง	
(ก) อุณหภูมิ 300 °C และ (ข) อุณหภูมิ 500 °C.....	41
5.6 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการชินเตอริง โดยทำการลอกอลูมิเนียมออก	
(ก) อุณหภูมิ 300 °C และ (ข) อุณหภูมิ 500 °C.....	41
5.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการชินเตอริงอุณหภูมิ	
ระหว่าง 100 °C ถึง 500 °C โดยที่อุปกรณ์มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ .....	43
5.8 ลักษณะสมบัติกระแส-อุณหภูมิของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการชินเตอริงอุณหภูมิ	
ระหว่าง 100 °C ถึง 500 °C ที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์.....	43
5.9 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า	
100 $\mu\text{m}$ เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ.....	44
5.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$	
เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน.....	45
5.11 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า	
100 $\mu\text{m}$ เมื่อได้รับแรงดันไบแอส 4 โวลต์.....	46
5.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 $\mu\text{m}$	
เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน.....	47
5.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 500 $\mu\text{m}$	
เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน.....	47
5.14 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า	
ระหว่าง 20 ถึง 500 $\mu\text{m}$ .....	48
5.15 แผนภาพแถบพลังงานของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้างเมื่อได้รับ	
แรงดันไบแอส.....	49
5.16 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า	
ระหว่าง 20 ถึง 500 $\mu\text{m}$ เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบแอสกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ.....	50
5.18 ความกว้างปลอดพาหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบแอสสูงขึ้น.....	51
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ.....	51
5.20 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ให้แรงดันไบแอส ( $V_A$ ) คงที่ที่ 10 โวลต์.....	52
5.21 กราฟจากออสซิลโลสโคปของโพลความต้านทาน 10 k $\Omega$ แรงดันไบแอส 10 โวลต์.....	53
5.22 กราฟจากออสซิลโลสโคปของโพลความต้านทาน 100 k $\Omega$ แรงดันไบแอส 10 โวลต์.....	53
5.23 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu$ m โพลความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ , 500 $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ และ 100 k $\Omega$ .....	54
5.24 ลักษณะการตอบสนองทางแสง (ก) กระแสแสงไดโอด (ข) กระแสแสงคอนดักเตอร์ (ค) การตอบสนองทางแสงรวม.....	55
5.25 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 $\mu$ m โพลความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ , 500 $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ และ 100 k $\Omega$ .....	56
5.26 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 500 $\mu$ m โพลความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ , 500 $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ และ 100 k $\Omega$ .....	57
5.27 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า ระหว่าง 20 ถึง 500 $\mu$ m โพลความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ , 1k $\Omega$ และ 10 k $\Omega$ .....	58
5.28 กราฟจากออสซิลโลสโคปของโพลความต้านทาน 100 k $\Omega$ ที่แรงดันไบแอส (ก) 1.5 โวลต์ (ข) 10 โวลต์.....	59
5.29 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu$ m โพลความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ แรงดันไบแอส 1.5, 3, 5 และ 10 โวลต์.....	59
5.30 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบแอสสูงขึ้น ส่วนบริเวณนิวทรัลมีความกว้างที่ลดลงเมื่อแรงดันไบแอสสูงขึ้น ซึ่งบริเวณทั้งสองส่วนรวมกันเท่ากับระยะห่างขั้วไฟฟ้า.....	60
5.31 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิ 500 $^{\circ}$ C ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยที่อุปกรณ์มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ	

เอกสารนี้  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  ขนาดให้เฉพาะคือกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ได้ 62 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.32 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ และมีขนาดขั้วไฟฟ้า $2 \times 2 \text{ mm}^2$ เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	63
5.33 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ ขนาดขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$ และ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ .....	64
5.34 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้า เท่ากับ $1 \times 1 \text{ mm}^2$ และ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ.....	65
5.35 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ โดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$ และ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ตามลำดับ.....	66
5.36 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ ที่สภาพต้านทานของซิลิคอน 21 $\Omega\text{-cm}$ , 50 $\Omega\text{-cm}$ และ 100 $\Omega\text{-cm}$ .....	67
5.37 การหาแรงดันภายในของรอยสัมผัส ที่สภาพต้านทานของซิลิคอน 21 $\Omega\text{-cm}$ , 50 $\Omega\text{-cm}$ และ 100 $\Omega\text{-cm}$ .....	68
5.38 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยที่อุปกรณ์มีสภาพต้านทานของซิลิคอน มีค่าเท่ากับ 21 $\Omega\text{-cm}$ , 50 $\Omega\text{-cm}$ และ 100 $\Omega\text{-cm}$ .....	70
5.39 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ และมีสภาพต้านทานของซิลิคอน 50 $\Omega\text{-cm}$ เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	71
5.40 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ และมีสภาพต้านทานของซิลิคอน 100 $\Omega\text{-cm}$ เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	71
5.41 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu\text{m}$ และมีสภาพต้านทานของซิลิคอน 21 $\Omega\text{-cm}$ , 50 $\Omega\text{-cm}$ และ 100 $\Omega\text{-cm}$ เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบแอสกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ที่ได้จากการคำนวณ โดยที่สภาพด้านทานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21 $\Omega$ -cm, 50 $\Omega$ -cm และ 100 $\Omega$ -cm.....	73
5.43 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีสภาพด้านทานของ ซิลิคอน 21 $\Omega$ -cm, 50 $\Omega$ -cm และ 100 $\Omega$ -cm เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ.....	74
5.44 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 $\mu$ m แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า 100 $\Omega$ โดยที่สภาพด้านทาน ของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21 $\Omega$ -cm, 50 $\Omega$ -cm และ 100 $\Omega$ -cm.....	75
ค.1 ชุดทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง.....	85
ค.2 ชุดทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง กระแสสลับ.....	86
ค.3 ชุดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด.....	87
ค.4 ชุดอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ในกล่องทึบแสง.....	88

## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
ac	alternating current	กระแสสลับ
Al	Aluminium	อลูมิเนียม
AlGaAs	Aluminium Gallium Arsenide	อลูมิเนียมแกเลียมอะไซด์
APD	Avalanche Photodiode	อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด
dc	direct current	กระแสตรง
DI	De-Ionization water	น้ำปลอดไอออน
GaAs	Gallium Arsenide	แกเลียมอะไซด์
Ge	Germanium	เยอรมันเนียม
InGaAs	Indium Gallium Arsenide	อินเดียมแกเลียมอะไซด์
Mo	Molybdenum	โมลิบดีนัม
Mo/n-Si/Mo	Molybdenum/n - Silicon/Molybdenum	โมลิบดีนัม/เอ็น-ซิลิคอน/ โมลิบดีนัม
MSM	Metal-Semiconductor-Metal	โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
R-center	Recombination center	ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่
Si	Silicon	ซิลิคอน
Al/n-Si/Al	Aluminium/n - Silicon/Aluminium	อลูมิเนียม/เอ็น-ซิลิคอน/อลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

- A คือ ขั้วอาโนด
- $A$  คือ พื้นที่รอยสัมผัส
- $c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ
- $C_A$  คือ ความจุไฟฟ้าด้านขั้วอาโนด
- $C_C$  คือ ความจุไฟฟ้าด้านขั้วคาโทด
- $C_j$  คือ ความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ
- $C_T$  คือ ความจุไฟฟ้ารวม
- D คือ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า
- $E_A$  คือ ระดับผู้รับ
- $E_C$  คือ ระดับพลังงานขอบล่างของแถบความนำ
- $E_D$  คือ ระดับผู้ให้
- $E_{FM}$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ
- $E_{FS}$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
- $E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงาน
- $E_i$  คือ ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
- $E_O$  คือ ระดับสุญญากาศ
- $E_T$  คือ ระดับพลังงานแทรก
- $E_V$  คือ ระดับพลังงานขอบบนของแถบเวเลนซ์
- $f_c$  คือ ความถี่คัทออฟ
- $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์
- $h\nu$  คือ โฟตอน หรือพลังงานของแสง
- $I_C$  คือ กระแสแสงคอนดักเตอร์
- $I_D$  คือ กระแสแสงไดโอด
- $I_{Dark}$  คือ กระแสมืด
- $I_{Mea}$  คือ กระแสที่ได้จากการวัด
- $I_{MS}$  คือ กระแสที่มีทิศทางไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ
- $I_p$  คือ กระแสรวม
- $I_{SM}$  คือ กระแสที่มีทิศทางไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ประกอบการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$J_s$	คือ ความหนาแน่นกระแสที่แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์
$k$	คือ เลขคลื่น
$k$	คือ ค่าคงที่โบสตันน์
$K$	คือ ขั้วคาโทด
$n_i$	คือ ความหนาแน่นอินทรินซิก
$N$	คือ ความกว้างบริเวณนิวทรัล
$N_D$	คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้
$N_A$	คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้รับ
$q$	คือ ประจุอิเล็กตรอน
$R$	คือ ค่าคงที่ริดชาร์ดสัน
$R_L$	คือ ความต้านทาน โหลดภายนอก
$V_A$	คือ แรงดันไบแอส
$V_{bi}$	คือ แรงดันภายใน
$T$	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
$v$	คือ ความถี่ของแสง
$W$	คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ
$W_C$	คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วคาโทด
$W_A$	คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอนโนด
$W_T$	คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม
$\epsilon_s$	คือ เปรอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
$\epsilon_o$	คือ เปรอร์มิติวิตีในสุญญากาศ
$\phi_{bn}$	คือ ความสูงกำแพงศักย์
$\phi_M$	คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_s$	คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$\chi$	คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นแสง
$\rho$	คือ สภาพต้านทานของซิลิคอน
$\mu_n$	คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กรดกัดแก้ว	hydrofluoric acid
กระจกกันแบบ	mask
กระบวนการรวมตัวใหม่	recombination process
กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง	direct recombination process
กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม	indirect recombination process
กระแสมืด	dark current
กระแสรั่วไหล	leakage current
กระแสแสง	photocurrent
กระแสอิ่มตัว	saturation current
การเคลือบโลหะในสุญญากาศ	vacuum evaporation
การแยกสัญญาณ	demodulation
ครอบแก้ว	glass chamber
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	depletion width
ความต้านทานโหลดภายนอก	load resistance
ความถี่คัทออฟ	cutoff frequency
ความสูงของกำแพงศักย์	barrier height
ค่าคงที่ของเวลา	time constant
คู่อิเล็กตรอน-โฮล	electron-hole pairs
เครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน	electron beam evaporator
จุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	half power point
จุดพังทลาย	breakdown point
ชัตเตอร์	shutter
ช่องว่างแถบพลังงาน	energy band gap
ซีดคีย์แบร์ริเออร์	Schottky barrier
ซินเตอริง	sintering
ไตรโคลโรเอทรีน	trichloroethylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
นอร์มอลไลซ์	normalized
บริเวณนิวทรัล	neutral region
บริเวณปลอดพาหะ	depletion region
พลาเนียร์	planar
ฟังก์ชันงาน	work function
ฟิลาเมนต์	filament
ฟิงเกอร์	finger
โฟตอน	photon
โฟนอน	phonon
โฟโตคอนดักเตอร์	photoconductor
โฟโตลิโธกราฟี	photolithography
โฟโตดีเทกเตอร์	photodetector
โฟโตไดโอด	photodiode
โฟโตไดโอดความไวสูง	high sensitive photodiode
ไมโครเวฟออสซิลเลชัน	microwave oscillation
ยูเทกติก	eutectic
รอยสัมผัสช็อคกี้	schottky contact
รอยสัมผัสแบบโอห์มิก	ohmic contact
ระบบสื่อสารด้วยคลื่นแสงผ่านใยแก้วนำแสง	optical fiber telecommunication
เรกติไฟร์	rectifier
แรงดันภายใน	built in voltage
ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสง	photoresponse
ลักษณะสมบัติทางด้านแสง	optical property
แลตทิซ	lattice
ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่	recombination center
สถานะพื้นผิว	surface state
สภาพต้านทาน	resistivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

สารกึ่งตัวนำ

semiconductor

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

n-type semiconductor

ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี

p-type semiconductor

สารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง

direct band gap semiconductor

สารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง

indirect band gap semiconductor

สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก

extrinsic semiconductor

แสงมองเห็น

visible light

หลอดฮาโลเจน

halogen lamp

อะซิโตน

acetone

อะวาลานซ์

avalanche

อินเตอร์ดิจิต

interdigitate

อิเล็กตรอน

electron

อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี

electron affinity

อิเล็กทรอนิกส์ไอริส

electronic iris

อุปกรณ์ด้านแสง

optical devices

โฮล

hole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

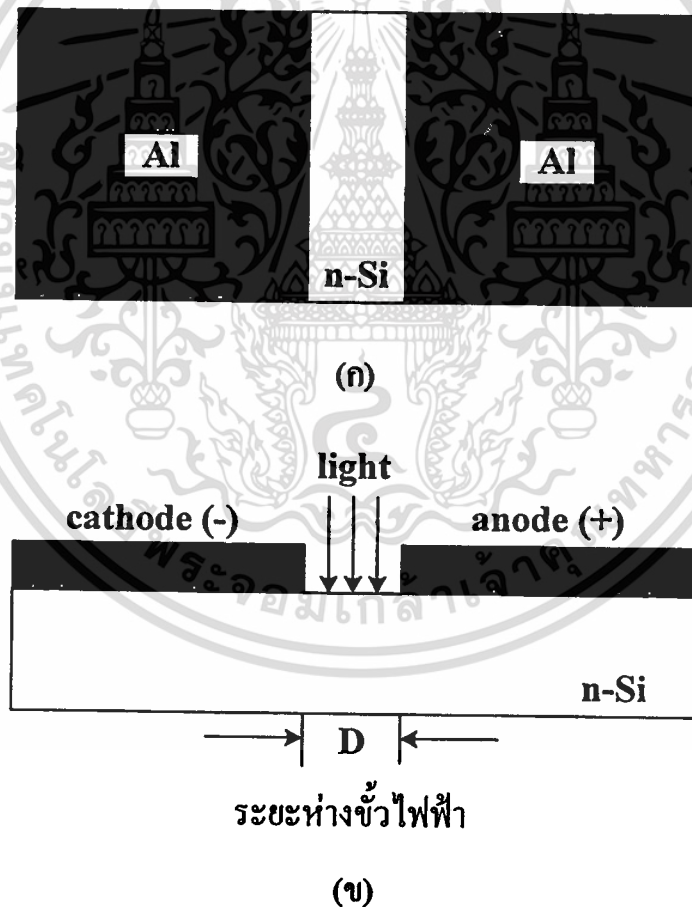
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ซึ่งมีการนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จึงได้มีการศึกษาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง และได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วมาโดยตลอด สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงที่สำคัญได้แก่ โฟโตดีเทกเตอร์ (photodetector) หรือตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสงที่มีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ตัวตรวจวัดแสงมีโครงสร้างหลายลักษณะแตกต่างกันไปเช่น พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode), พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode) และโฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) [1,2] เป็นต้น

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาแนร์ (planar Metal-Semiconductor-Metal photodetector) หรือโครงสร้าง MSM ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นโฟโตไดโอดชนิดหนึ่งประกอบด้วยกำแพงศักย์ช็อตกี (Schottky barrier:  $\phi_{bn}$ ) ที่ปลายสุดทั้งสองด้าน ซึ่งต่อแบบหันหลังชนกัน [3] เป็นตัวตรวจวัดแสงที่ได้รับความสนใจอย่างมากตัวหนึ่ง และคาดว่าน่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคตอันใกล้นี้ เพราะมีจุดเด่นหลายประการ เช่น มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำทำให้มีการตอบสนองสัญญาณที่ความถี่สูง หรือ มีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ที่สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ถึงแม้ว่าในขณะนี้โครงสร้าง MSM โดยส่วนมากนิยมใช้สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบที่อยู่ในกลุ่ม III-V เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ (GaAs) [4,5] หรือ อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์ (InGaAs) [6] เพื่อต้องการใช้งานด้านความถี่สูง อย่างไรก็ตามในการใช้งานบางอย่างไม่จำเป็นต้องใช้งานที่ความถี่สูงๆ เช่น งานระบบเก็บข้อมูล [7] หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อิริส (electronic iris) [8] จึงไม่จำเป็นต้องใช้สารประกอบในกลุ่ม III-V ซึ่งมีราคาแพง และในขณะนี้เทคโนโลยีซิลิคอน (Si) มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก การเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนเพื่อสร้างเป็นโครงสร้าง MSM จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจ ซึ่งซิลิคอนสามารถตอบสนองในช่วงแสงที่ตามองเห็น คือ 400-700 นาโนเมตร ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากมาย และที่สำคัญยังมีราคาถูกกว่าการสร้างขึ้นจากสารประกอบกลุ่ม III-V อีกด้วย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงนำเสนอตัวตรวจวัดแสงที่มีสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนและโลหะที่ใช้เป็นอลูมิเนียม (Al) ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยใช้เทคโนโลยีซิลิคอนที่รู้จักกันดี และมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สร้างเป็นวงจรรวมต่อไปในอนาคต

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมามีการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีฐานรองเป็นซิลิคอน ส่วนโลหะที่ใช้เป็นโมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งเป็นโครงสร้างชนิด Mo/n-Si/Mo [9] แต่กระบวนการสร้างมีความยุ่งยากซับซ้อน โดยขั้วโลหะโมลิบดีนัมจะถูกสร้างด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporator) ส่วนงานวิจัยนี้ใช้ขั้วโลหะอลูมิเนียมที่ถูกสร้างโดยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศแบบใช้ไส้ฟิลาเมนต์ (filament) ซึ่งมีการสร้างที่ง่ายกว่าและสามารถสร้างได้ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ได้โครงสร้างชนิด Al/n-Si/Al จากนั้นทำการทดลองเพื่อยืนยันว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดแสงได้ และศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในแบบสัญญาณแสงกระแสตรงและสัญญาณแสงกระแสสลับ เพื่อศึกษาการเกิดกระแสแสงของอุปกรณ์เมื่อเปลี่ยนโลหะที่ใช้เป็นอลูมิเนียม



รูปที่ 1.1 (ก) ภาพด้านบนโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al  
(ข) ภาคตัดขวาง โครงสร้าง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีสารกึ่งตัวนำคือซิลิคอนและโลหะที่ใช้เป็นอลูมิเนียม ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายโดยใช้ลวดลายต้นแบบเพียงแผ่นเดียวเท่านั้น
2. เพื่อศึกษาการออกแบบตัวตรวจวัดแสงที่มีขนาดของขั้วโลหะต่างกัน
3. เพื่อศึกษาการลดกระแสมืด (dark current) ของอุปกรณ์โดยใช้เทคนิคการเพิ่มความสูงกำแพงศักย์ช็อคกี ( $\phi_{bn}$ ) ด้วยวิธีการเปลี่ยนค่าของอุณหภูมิจากกระบวนการซินเทอริง (sintering)
4. เพื่อศึกษาการเกิดกระแสแสง (photocurrent) ของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al โดยให้ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (Distance between electrode :D) มีขนาดระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$
5. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงกระแสแสง โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และ/หรือการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส
6. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของอุปกรณ์ในแบบกระแสตรง (dc) และแบบกระแสสลับ (ac) ที่ขึ้นอยู่กับสภาพด้านทานของซิลิคอน

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือ มีกระแสรั่วไหลที่ต่ำซึ่งเกิดจากการนำอุปกรณ์ไปทำการซินเทอริงที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นผลให้อลูมิเนียมสามารถแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้ ซึ่งเป็นการลดผลของสถานะพื้นผิว (surface state) ระหว่างรอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอน ทำให้รอยสัมผัสมีความสมบูรณ์มากขึ้น [10,11] และทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ามีความความสอดคล้องกันเมื่อให้แรงดันไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ ส่วนกระแสแสงที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเข้มแสงมากขึ้น และการควบคุมกระแสแสงทำได้โดยการเปลี่ยนแรงดันไบแอส, ความยาวของพื้นที่รับแสง และสภาพด้านทานแผ่นซิลิคอน จากนั้นนำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  มาศึกษาการเกิดกระแสแสง ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้าง MSM โดยทั่วไปที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่า 3  $\mu\text{m}$  [5,6] เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันไบแอสทำให้บริเวณสนามไฟฟ้าครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมดเป็นผลให้กระแสแสงที่ได้เป็นผลจากบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ทั้งหมด ส่วนอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบแอสแล้วสนามไฟฟ้าจะครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าบางส่วน ทำให้กระแสแสงที่ได้เกิดจากบริเวณปลอดพาหะ และบริเวณนิวทรัล (neutral region)

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

จากสมมติฐานที่กล่าวข้างต้น การเพิ่มลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการซินเตอร์ ซึ่งจะทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ช็อคกามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วไหลที่ได้มีค่าน้อยลง ส่วนกระแสแสงที่ได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสงเนื่องจากเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่มากขึ้น และกระแสแสงสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงของบริเวณปลอดพาหะซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอสที่ให้และสภาพด้านทานของซิลิคอน กระแสแสงรวม ( $I_p$ ) ที่ได้จะประกอบด้วยกระแสแสงสองส่วน [12,13] คือ กระแสแสงที่มาจากริเวณปลอดพาหะซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าเรียกว่ากระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) และกระแสแสงที่มาจากริเวณนิวทรัลซึ่งเกิดจากการแพร่เรียกว่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ )

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตอยู่ที่การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำและโลหะที่ใช้เป็นอคูมิเนียม โดยมีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20-500  $\mu\text{m}$  และมีขนาดขั้วไฟฟ้า  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ที่มีสภาพด้านทานของซิลิคอนประมาณ 7-21  $\Omega\text{-cm}$  โดยนำอุปกรณ์ที่ได้ไปทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคกัลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน จากนั้นนำอุปกรณ์มาทดสอบลักษณะสมบัติทางแสงแบบกระแสตรงภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มค่าต่างๆ ส่วนการทดสอบแบบกระแสลับ จะใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 670 nm, กำลังงาน 2.68 mW ซึ่งถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด 400 mV<sub>pp</sub> เข้ากับเลเซอร์ที่ความถี่ต่ำในช่วง 100 Hz-4 MHz แล้วอธิบายการเกิดกระแสแสงของอุปกรณ์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จากนั้นเปลี่ยนขนาดของขั้วไฟฟ้าให้มีขนาด  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  และค่าสภาพด้านทานของซิลิคอนให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป แล้วทำการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าและสภาพด้านทานของซิลิคอนที่เปลี่ยนแปลงไป

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM
2. ออกแบบ โครงสร้าง MSM แบบช่องเดี่ยว (single slit)
3. ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al
4. ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al
5. ศึกษาลักษณะสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. ศึกษาการเกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะแบ่งเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงความจำเป็นมาของตัวตรวจวัดแสง และความสำคัญของงานวิจัยที่ได้ศึกษา หัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ที่ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al สมมติฐาน และแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนสุดท้ายคือ ขอบเขตของงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 กระบวนการทางแสงและตัวตรวจวัดแสง เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เช่น การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ การเกิดและการรวมตัวของพาหะ และตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ

บทที่ 3 ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ซึ่งจะกล่าวถึงรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นรอยสัมผัสชนิดอครี ในภาวะสมดุลความร้อนและเมื่อได้รับแรงดันไบแอส และทฤษฎีของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบแอสและได้รับแสงตกกระทบ

บทที่ 4 การออกแบบ การสร้างและการทดลอง เป็นการกล่าวถึงการออกแบบ และกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al รวมถึงวิธีการทดลองหาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และการหาลักษณะสมบัติทางแสงแบบกระแสตรงและแบบกระแสสลับ

บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะกล่าวถึงผลทดลองเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น กำแพงศักย์ช็อคกี ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และผลการทดลองลักษณะสมบัติทางแสงในกรณีที่ถูกปรณได้รับแสงแบบกระแสตรง และแบบกระแสสลับ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

# กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำและตัวตรวจวัดแสง

ทฤษฎีเรื่องกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำมีความสำคัญในการใช้เป็นพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งตัวตรวจวัดแสงจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการทางแสง และหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างในแบบต่างๆ

### 2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประกอบไปด้วย การดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

#### 2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง

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

ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสงโดย

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \text{ eV} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\nu$  คือ ความถี่ (Hz)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง ( $\mu\text{m}$ )

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  J-sec

$c$  คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/sec

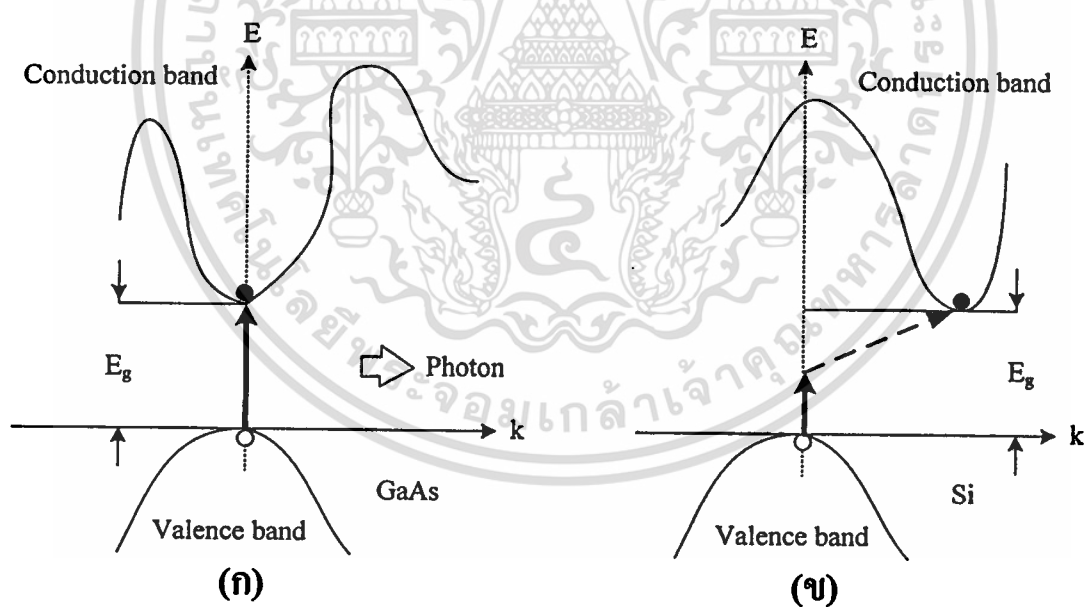
เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap :  $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ  $E_{\text{photon}} \geq E_{g(\text{semi})}$  สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณี  
ที่  $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{semi})}$  การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น ในกรณีซิลิคอนมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ  
1.12 eV

### 2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง [14]

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ คือ กราฟ E-k diagram ดังแสดงใน  
รูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งของค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าหรือก็คือจุดต่ำสุดของแถบนำ  
ไฟฟ้า กับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยพบว่า  
ในสารกึ่งตัวนำบางชนิดตำแหน่งทั้งสองนี้จะอยู่ตรงกัน เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) หรือสาร  
กึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ดังรูปที่ 2.1 (ก) เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า ช่องแถบตรง (direct band  
gap) และสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap  
semiconductor) ส่วนกรณีที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap  
semiconductor) ส่วนกรณีที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap  
semiconductor) ส่วนกรณีที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap  
semiconductor) ส่วนกรณีที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap  
semiconductor) โดยที่  
ในรูปที่ 2.1 (ข) เช่น ซิลิคอน ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า ช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) โดยที่  
สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้จะถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor)



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ

(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง  $k = 0$  แต่จากรูปที่ 2.1 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าจะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือก็คือ จุดทั้งสองนี้มีค่า  $k$  ที่ต่างกันหรือก็คือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกัน ดังนั้นลักษณะสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะแตกต่างกันมาก เช่นลักษณะสมบัติทางด้านแสง (optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงพลังงานของโฟตอนจากแสงสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบนี้เกิดได้ง่ายทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดีจึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (optical devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง และตัวตรวจจับแสง ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ทำให้สารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้ไม่นิยมนำมาทำเป็นอุปกรณ์ทางด้านแสง

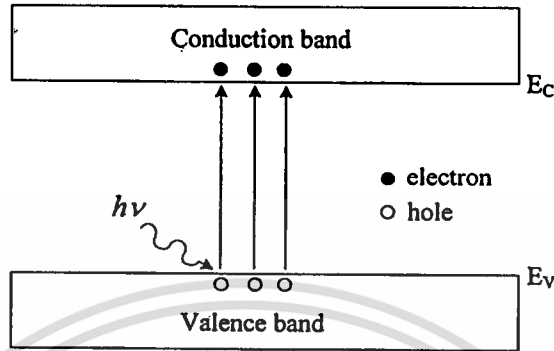
### 2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ [14]

#### 2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

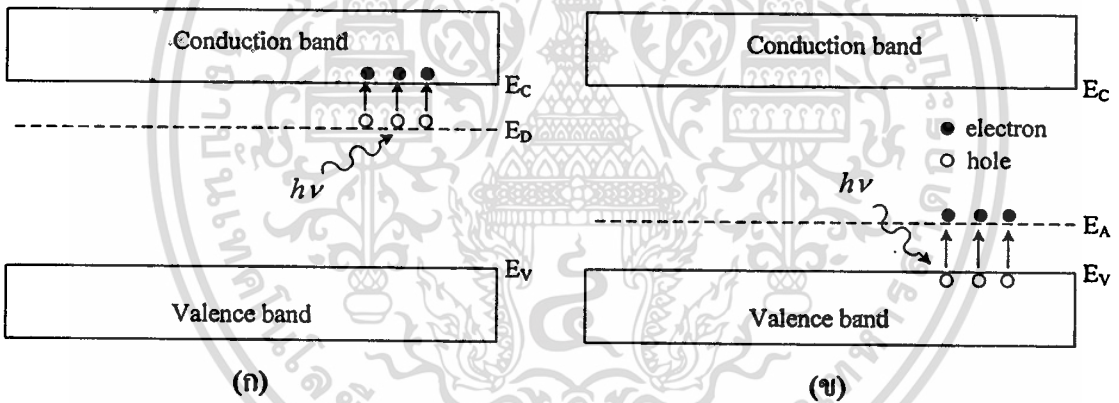
กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดจากการให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ( $> E_g$ ) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ( $E=h\nu$ ) ที่มีพลังงานมากพอ ( $> E_g$ ) ที่จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้นที่แถบวาเลนซ์ซึ่งก็คือ โฮล ซึ่งการเกิดอิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (donor level :  $E_D$ ) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ในส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level :  $E_A$ ) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้รับหลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)

ได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก)



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ  
(ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี

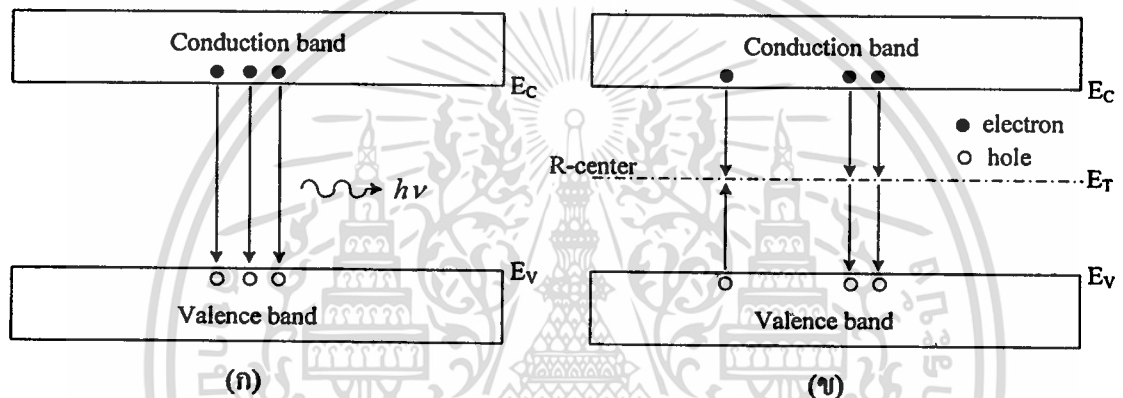
### 2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลตทิซ (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (recombination and generation process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาติให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือโฟตอนได้ง่าย



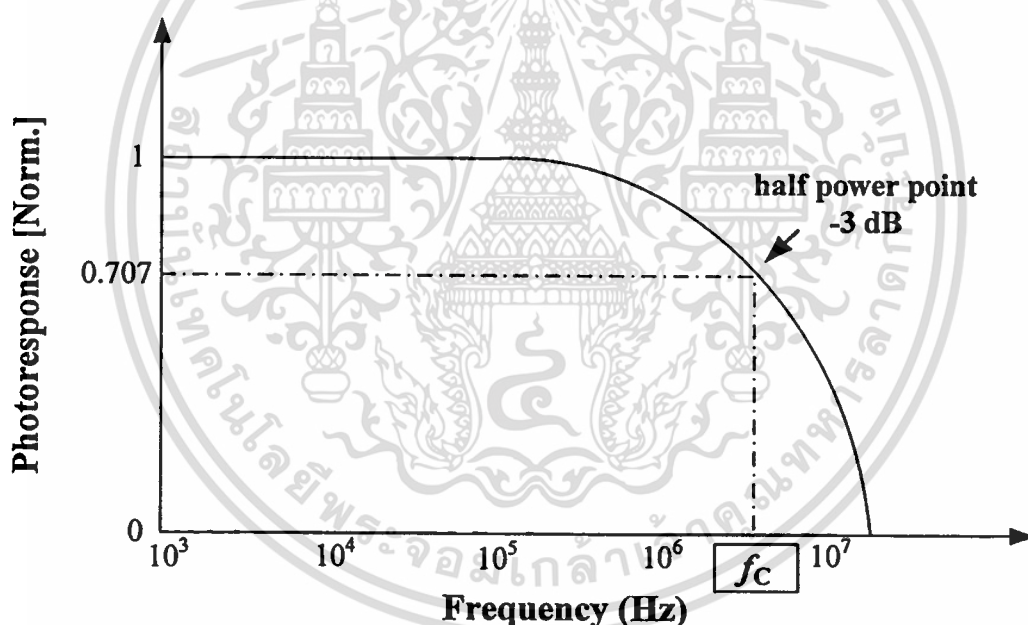
รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

### 2.1.4 การตอบสนองทางแสง

การตอบสนองทางแสง (photoresponse) [1] คือ อัตราความเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณความถี่ต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางอย่างของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.5 ในทางปฏิบัติการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่นี้ถูกเรียกว่าความถี่คัทออฟ (cutoff frequency :  $f_c$ ) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (half power point) หรือมีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงมีความหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่ตัวตรวจวัดแสงสามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานของตัวตรวจวัดแสงมีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

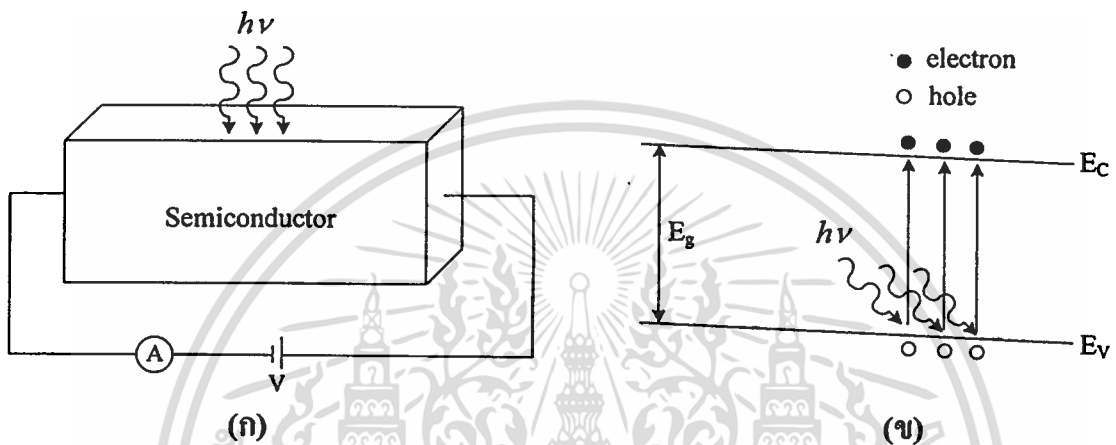
## 2.2 ชนิดของตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีความไวต่อแสงและสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานระบบสื่อสารด้วยใยแก้ว หรือถูกใช้เป็นตัววัดความเข้มแสงในวงจรสวิตช์แสง ซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 โฟโตคอนดักเตอร์

โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) เป็นตัวตรวจวัดแสงที่ง่ายที่สุด เพราะว่ามีเพียงแท่งสารกึ่งตัวนำเพียงอย่างเดียว เมื่อโฟโตคอนดักเตอร์ได้รับแสงตกกระทบ จะทำให้มีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแสงได้ ซึ่งกระแสแสงจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดของพาหะ โดยมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ และความสามารถในการดูดกลืนแสง ส่วนการใช้งานจะป้อนแรงดันไบแอสให้แก่โฟโตคอนดักเตอร์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

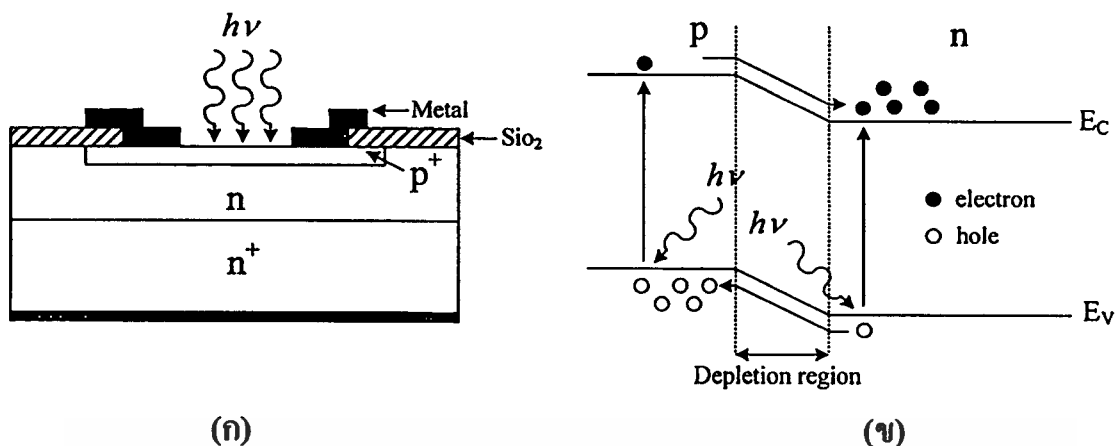


รูปที่ 2.6 (ก) โครงสร้างของโฟโตคอนดักเตอร์

(ข) แถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์เมื่อได้รับแสง

### 2.2.2 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น หรือ พี-เอ็น โฟโตไดโอด (p-n photodiode) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ p-n เมื่อมีแสงตกกระทบที่รอยต่อ p-n จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น หลักการทำงานของ โฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานชนิดรอยต่อ p-n ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) แสดงภาพตัดขวางของพี-เอ็น โฟโตไดโอด ที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และต่อติดกับสารกึ่งตัวนำชนิด n เป็นรอยต่อ p-n ที่รอยต่อ p-n นี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิคอนนั้น ชั้น p เตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ซิลิคอนด้วยความลึกประมาณ  $1 \mu\text{m}$  ที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ p-n เป็นย่านปลอดพาหะ เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $h\nu > E_g$ ) แสงก็จะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืนโดยพลังงานโฟตอนของแสงซึ่งจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้า และที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่



รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็นเมื่อได้รับแสง

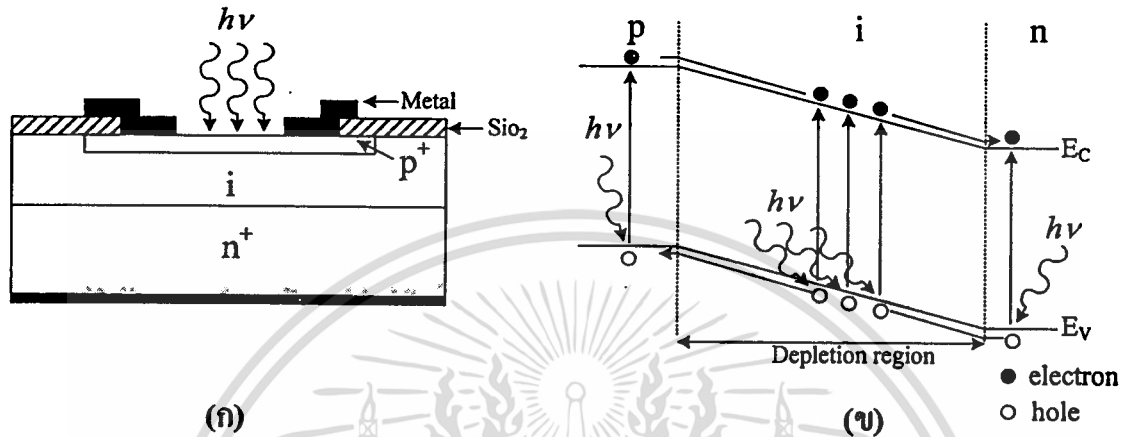
ในรูปที่ 2.7 (ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p ชั้นปลดคพาหะและชั้น n อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นปลดคพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในพัดพาให้วิ่งไปสู่ชั้น n ส่วนกรณีโฮลจะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจากแถบวาเลนซ์ในชั้น n หรือชั้นปลดคพาหะไปสู่ชั้น p และทำให้ชั้น n จะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและโฮลที่ไปสะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ถ้าต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอกคู่อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลก็จะไหลออกจากชั้น p ไปสู่วงจรภายนอก

ลักษณะสมบัติเด่นของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น พบว่าจะทำงานได้เร็วกว่า โฟโตคอนดักเตอร์ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสที่เกิดจากการแพร่ จึงมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ช้าเมื่อเทียบกับโฟโตไดโอดที่จะกล่าวต่อไป

### 2.2.3 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n

โฟโตไดโอดแบบ p-i-n หรือ ฟินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงและความเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 (ก) ประกอบด้วยส่วน p<sup>+</sup> ส่วน i (intrinsic) และส่วน n<sup>+</sup> แต่มีขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ขั้ว คือขั้ว p<sup>+</sup> เป็นอานอดและขั้ว n<sup>+</sup> เป็นคาโทด ส่วนชั้น i จะมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการโด๊ปด้วยสารเจือปนด้วยปริมาณที่น้อยมากเพื่อให้มีสภาพต้านทานสูง ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบนจะถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดที่บางมากๆ เพื่อให้โฟตอนในแสงทะลุผ่านไปถึงชั้น i และที่ชั้น i นี้มีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้ และโฟตอนเหล่านี้มีพลังงานมากพอที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนและโฮลที่สร้างขึ้นสามารถเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้

เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้ เนื่องจากชั้น  $i$  มีสภาพต้านทานสูงกว่าด้าน  $p^+$  และด้าน  $n^+$  เป็นผลให้ โดไดโอดเมื่อได้รับแรงดันไบแอส จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้น  $i$  และเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมที่ส่วน  $i$  จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น  $i$  ซึ่งลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ  $p-i-n$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 (ข)



รูปที่ 2.8 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ  $p-i-n$

(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ  $p-i-n$  เมื่อได้รับแสง

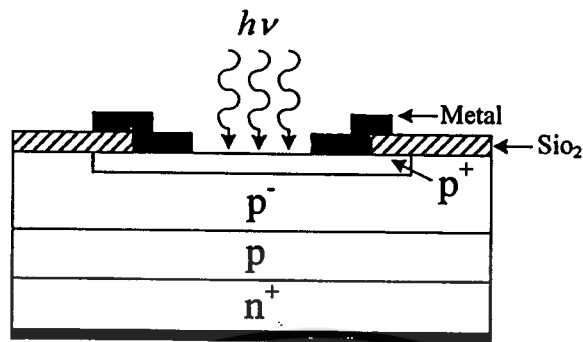
ข้อดีของโฟโตไดโอดแบบ  $p-i-n$  คือมีการทำงานที่ความถี่ที่สูง เนื่องจากการที่มีชั้น  $i$  จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมากถึงระดับพิโกวินาที ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารด้วยคลื่นแสงผ่านใยแก้วนำแสง (optical fiber telecommunication)

#### 2.2.4 โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์

โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ คือ โฟโตไดโอดแบบพี-เอ็น หรือ แบบ  $p-i-n$  แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษ นั่นคือให้โดไดโอดทำงานใกล้ๆ กับจุดพังทลาย (breakdown point) เนื่องจากที่ใกล้จุดพังทลายของรอยต่อพี-เอ็น สนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะหรือในชั้น  $i$  จะมีค่าสูงจนกระทั่งสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์การทวีคูณของพาหะได้ ดังนั้นในภาวะนี้กระแสแสงจะมีค่าสูงมาก โดไดโอดจึงมีสมบัติเป็น โฟโตไดโอดความเร็วสูง (high sensitive photodiode) และเนื่องจากสนามไฟฟ้าในช่วงนี้สูงมาก ความเร็วของพาหะจึงมีค่าสูง ทำให้ความไวในการทำงานจึงสูงมาก ในรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ชนิดรีซทู เมื่อให้แรงดันไบแอสแบบย้อนกลับแก่อุปกรณ์ จะเกิดบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ  $pn^+$  แล้วขยายกว้างไปจนถึงส่วน  $p^-$  ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามา โสลจะเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อ  $pn^+$  ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้จะเร่งให้อิเล็กตรอนวิ่งไปชนกับ โครงร่างผลึกและทำให้เกิดปรากฏการณ์ อะวาแลนซ์ขึ้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาแลนซ์ชนิดรีทารู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

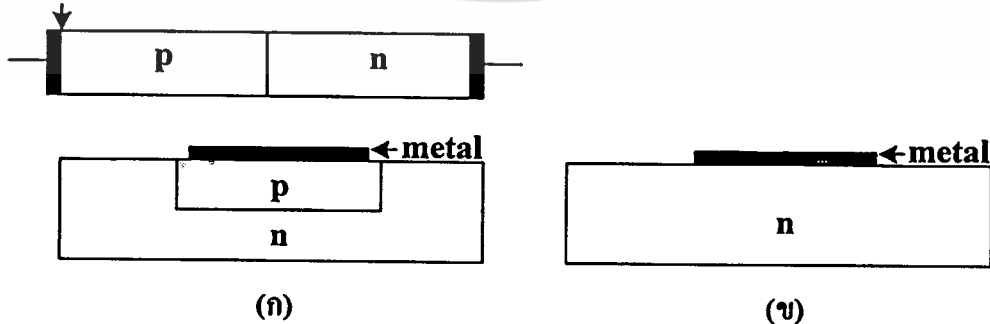
## ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาแนรี (planar Metal-Semiconductor-Metal photodetector) หรือ โครงสร้าง MSM ประกอบด้วยกำแพงศักย์ช็อตคกี (Schottky barrier:  $\phi_m$ ) ที่ปลายสุดทั้งสองด้าน ซึ่งต่อแบบหันหลังชนกัน [3] เป็นตัวตรวจวัดแสงชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานทางแสงให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้าในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ-โลหะ และ โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM

### 3.1 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะให้ลักษณะสมบัติแรงดันไฟฟ้าที่แบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ รอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) และรอยสัมผัสช็อตคกี (schottky contact) [1,2,15] โดยปกติการใช้งานเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกจะเป็นลักษณะของรอยสัมผัสโอห์มิก ซึ่งจะไม่มีผลเกี่ยวกับทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแสสามารถไหลได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง ไม่มีแรงดันตกคร่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) ส่วนรอยสัมผัสช็อตคกี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) จะแสดงลักษณะสมบัติเป็นเรกติไฟร์ (rectifier) คือ จะยินยอมให้กระแสไหลได้ทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น บางครั้งเรียกว่าช็อตคกีไดโอด ซึ่งจะมีอัตราเร็วในการสวิตช์สูงกว่าไดโอดแบบพี-เอ็น ซึ่งการแบ่งรอยสัมผัสว่าจะเป็นอย่างใดนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ ( $\phi_m$ ) ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_s$ ) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำ ( $\chi$ ) ที่นำมาสัมผัส ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งแสดงลักษณะสมบัติเรกติไฟร์เท่านั้น

Ohmic contact



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

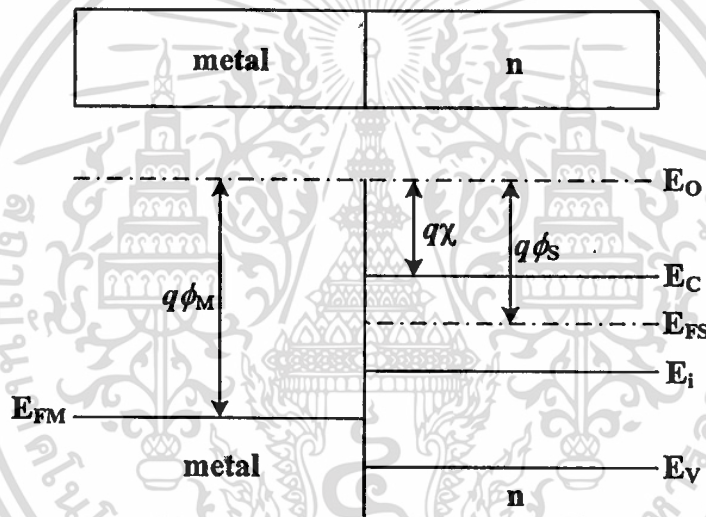
(ก) รอยสัมผัสโอห์มิก (ข) รอยสัมผัสช็อตคกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 รอยสัมผัสในภาวะสมดุลความร้อน

3.1.1.1 ก่อนการสัมผัส

แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นก่อนการสัมผัส แสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีระดับพลังงานที่เรียกว่า ระดับสุญญากาศ (vacuum level :  $E_0$ ) หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของของแข็ง และหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกเนื้อสาร ในด้านโลหะจะมีระดับเฟอร์มิของโลหะ ( $E_{FM}$ ) จะอยู่สูงกว่าค่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศ เรียกว่า ฟังก์ชันงานของโลหะ ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งหมายถึง ค่าพลังงานน้อยสุด ที่อิเล็กตรอนต้องการเพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะ



รูปที่ 3.2 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \tag{3.1}$$

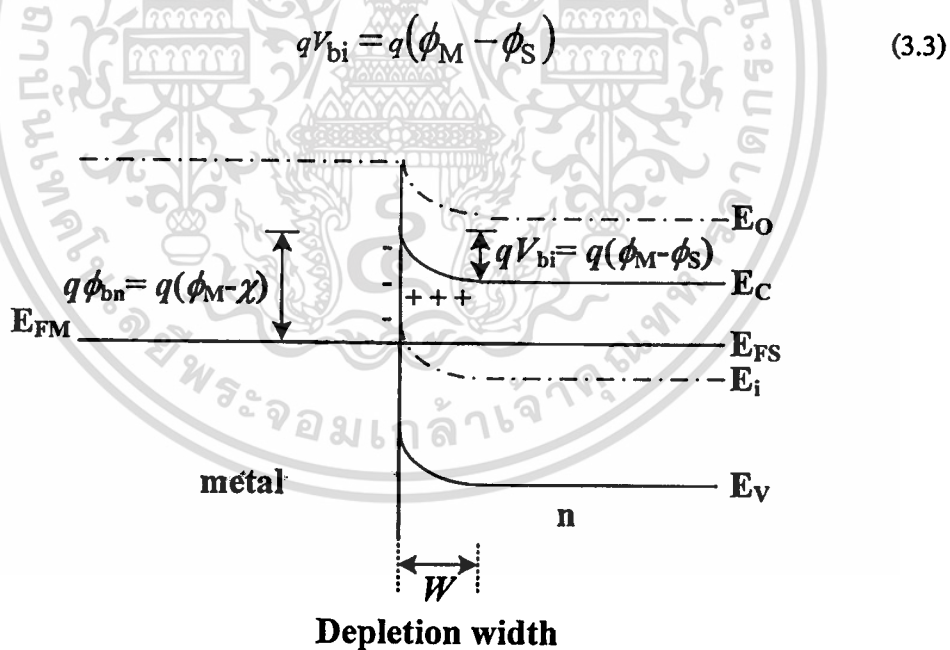
ส่วนด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นระดับเฟอร์มิจะอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน ( $E_i$ ) ซึ่งค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับสุญญากาศ และระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ( $E_{FS}$ ) ดังสมการที่ 3.2 ส่วนค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ ( $\chi$ ) คือ ความแตกต่างของพลังงานระดับสุญญากาศ กับระดับนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าต้องการเพื่อที่จะเคลื่อนที่ไปหยุดนิ่งที่ผิวด้านนอกของสารกึ่งตัวนำ โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน มีค่า 4.03 eV เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q\phi_S = E_O - E_{FS} \quad (3.2)$$

### 3.1.1.2 หลังการสัมผัส

เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของทั้งสองไม่เท่ากัน โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_m > \phi_s$ ) ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะ จนเกิดเป็นไอออนบวกทางด้านสารกึ่งตัวนำและเกิดไอออนลบทางด้านโลหะ และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส โดยมีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไม่ให้แพร่เข้าไปในโลหะ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้ทำให้แถบพลังงานบริเวณรอยสัมผัสของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้น โดยที่การโค้งงอของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ มีความหมายว่ามีศักย์สัมผัส (contact potential :  $V_{bi}$ ) หรือกำแพงศักย์ภายใน (potential barrier) เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำและทำหน้าที่ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ให้เข้าไปในด้านโลหะ มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (3.3)



รูปที่ 3.3 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำหลังการสัมผัส

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะซึ่งจะเคลื่อนที่ไปด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ช็อตтки (Schottky barrier:  $\phi_{bn}$ ) มีค่าดังสมการที่ (3.4) โดยรอยสัมผัสของอลูมิเนียม กับซิลิคอนชนิดเอ็นมีค่ากำแพงศักย์ช็อตтки เท่ากับ 0.72 eV [1]

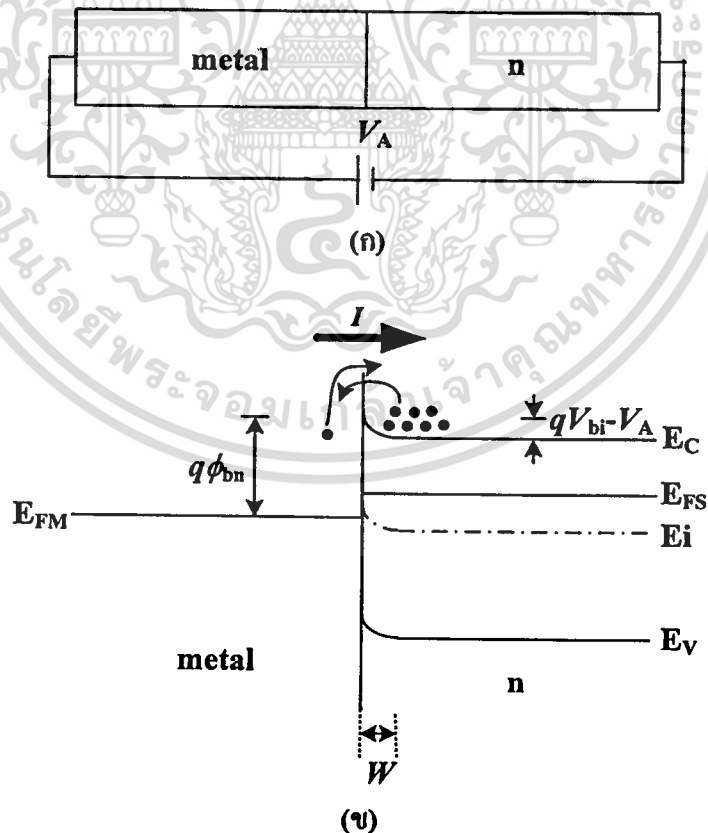
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \tag{3.4}$$

3.1.2 รอยสัมผัสสภาวะได้รับไบแอส

3.1.2.1 รอยสัมผัสสภาวะได้รับไบแอสตรง

เมื่อให้แรงดันไบแอส ( $V_A$ ) แก่รอยสัมผัส โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 3.4 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายใน ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น ( $V_{bi} - V_A$ ) และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้น อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อคกีเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงช็อคกีมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบแอสตรงมีค่าดังสมการที่ (3.5)



รูปที่ 3.4 (ก) การให้แรงดันไบแอสตรง

(ข) แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบแอสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในพ็อกเก็ตบุ๊กเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่รอยสัมผัส ( $\text{cm}^2$ )

$R$  คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (Richardson constant) ของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ  $110 \text{ Acm}^{-3}\text{K}^{-2}$

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

$k$  คือ ค่าคงที่โบสตันน์ มีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

### 3.1.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบแอสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ ( $-V_A$ ) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $(V_{bi} + V_A)$  และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคกี เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบแอสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ (3.6)

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (3.6)$$

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width :  $W$ ) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบแอสค่าต่างๆ ดังสมการที่ (3.7) โดยเมื่อแรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

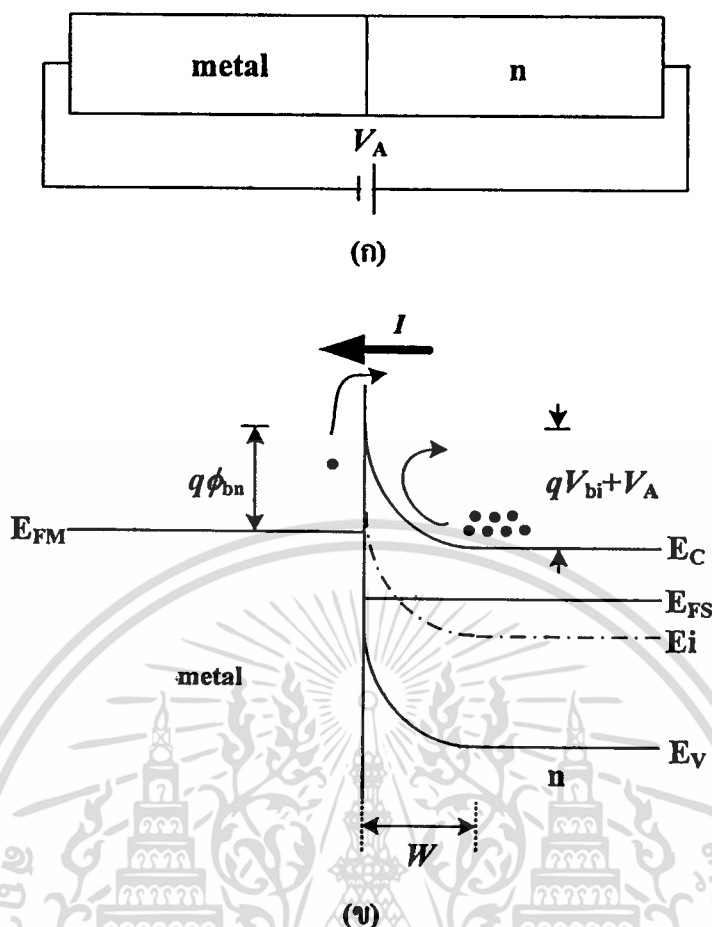
$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S (V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (3.7)$$

โดยที่  $\epsilon_S$  คือ เปรอริมิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ ของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ  $11.8 \epsilon_0$  (F/cm)

$\epsilon_0$  คือ เปรอริมิติวิตีในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-14}$  (F/cm)

$N_D$  คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $\text{cm}^{-3}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

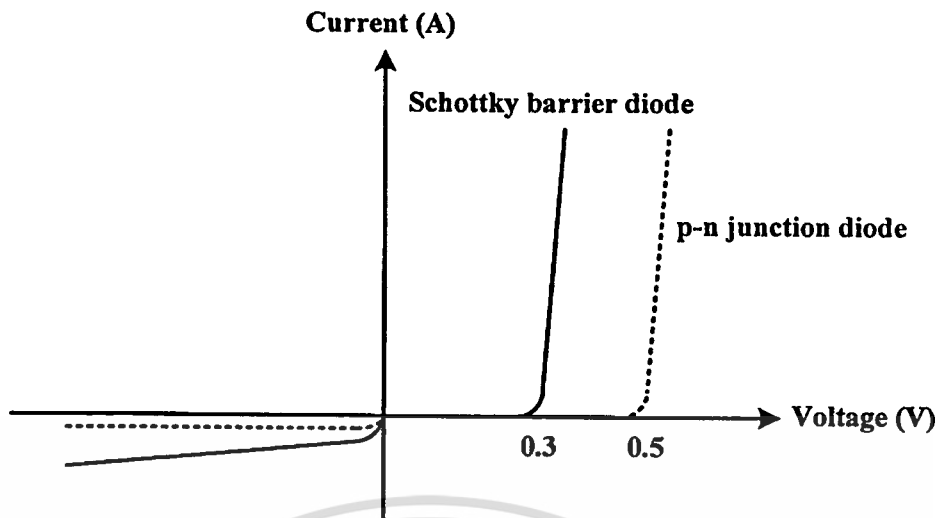


รูปที่ 3.5 (ก) การให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ

(ข) แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ

### 3.1.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดทีไอโอด

จากการให้แรงดันไบแอสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสเรกติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ก็ยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือไบแอสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พบว่าแรงดันภายในของซีดทีไอโอดมีค่าต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว มีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V ส่วนกระแสรั่วไหลของซีดทีไอโอดมีค่าสูงกว่าไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น เป็นผลมาจากรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดยจะมีค่ามากกว่ารอยต่อพี-เอ็น ประมาณ  $10^4$  เท่า

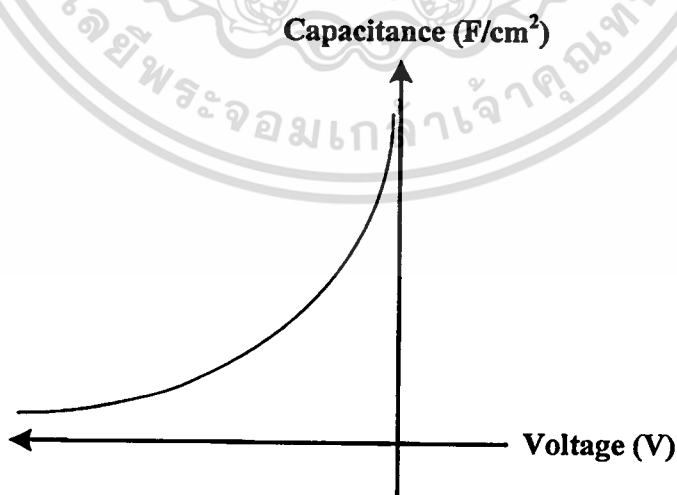


รูปที่ 3.6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดกทีไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

### 3.1.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดกทีไดโอด

ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบแอสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ มีค่าดังสมการที่ (3.8)

$$C = \frac{\epsilon_S}{w} = \sqrt{\frac{q\epsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.7 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดกทีไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

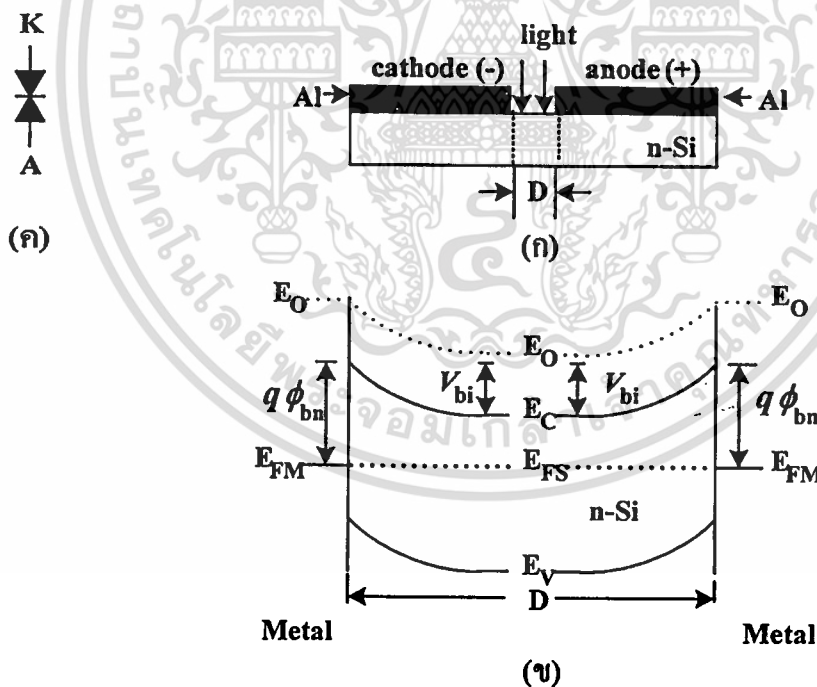
### 3.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ตัวตรวจวัดแสง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสชนิดคีระหว่างโลหะอุณหภูมิต่ำกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นจำนวนสองรอยสัมผัส ซึ่งหัวข้อต่อ ปลายนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างและหลักการ ทำงานของตัวตรวจวัดแสงชนิด MSM

#### 3.2.1 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส โดยมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (D) หรือระยะห่างขั้วไฟฟ้า เป็นส่วนแยก รอยสัมผัสทั้งสองของโครงสร้าง MSM ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นซิลิคอนจะทำหน้าที่เป็นส่วน รับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก)

แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในสภาวะสมดุลความร้อน จะเกิด บริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสที่ได้ กล่าวมาแล้ว โดยมีค่าที่เท่ากันเนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบสมมาตร และใช้วัสดุชนิดเดียวกัน ดัง แสดงในรูปที่ 3.8 (ข) ส่วนในรูปที่ 3.8 (ค) เป็นสัญลักษณ์ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM



รูปที่ 3.8 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM

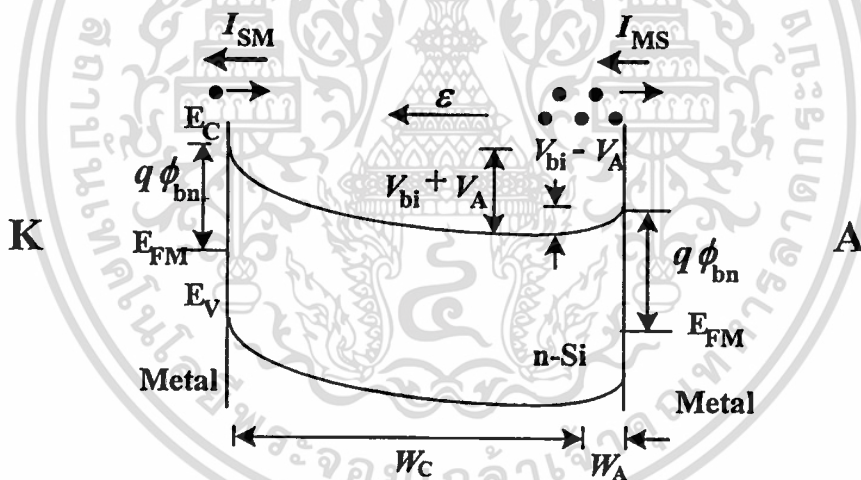
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน

(ค) สัญลักษณ์ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบแอส

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบแอสดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสแบบช็อคกีแบร์เรียอร์ทางด้านคาโทด ( $W_C$ ) มีขนาดกว้างขึ้นเนื่องจากได้รับการไบแอสย้อนกลับ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณปลอดพาหะทางด้านอโนด ( $W_A$ ) กลับมีขนาดลดลงจากการไบแอสตรง สำหรับด้านที่ ได้รับ ไบแอสย้อนกลับจะมีค่าของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $V_{bi} + V_A$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในด้านที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ( $I_{SM}$ ) ส่วนด้านที่ ได้รับการไบแอสตรงจะมีค่าของกำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ  $V_{bi} - V_A$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า ( $I_{MS}$ ) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านคาโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current) ของ โครงสร้าง MSM



รูปที่ 3.9 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบแอส

#### 3.2.2.1 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบแอส

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม ( $W_T$ ) ของ โครงสร้าง MSM เป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด ( $W_C$ ) ที่ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านอโนด ( $W_A$ ) ที่ได้รับแรงดันไบแอสตรง ดังสมการที่ 3.9

$$W_T = W_C + W_A \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

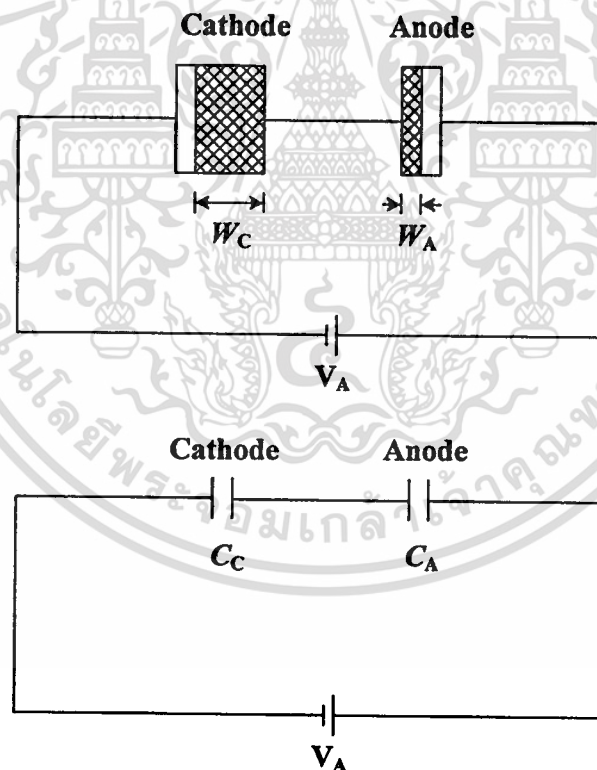
โดยที่

$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_S (V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (3.10)$$

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_S (V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (3.11)$$

### 3.2.2.2 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบแอส

ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบแอส ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยความจุไฟฟ้ารวม ( $C_T$ ) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านคาโทด ( $C_C$ ) ที่ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านอโนด ( $C_A$ ) ที่ได้รับแรงดันไบแอสตรง ดังสมการที่ (3.15)



รูปที่ 3.10 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบแอส

$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

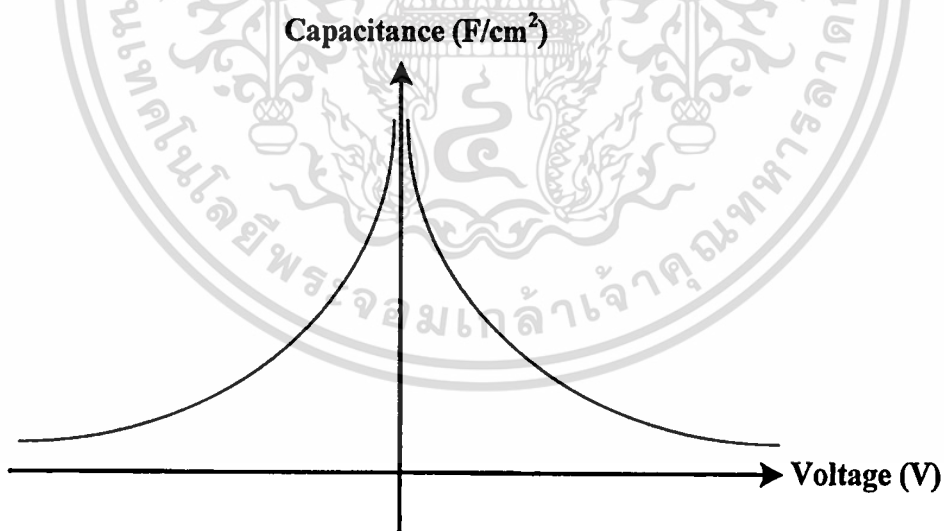
$$C_C = \sqrt{\frac{q\epsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (3.13)$$

$$C_A = \sqrt{\frac{q\epsilon_S N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (3.14)$$

เมื่อแทนค่า  $C_C$  และ  $C_A$  ในสมการที่ 3.12 ทำให้ได้ความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ

$$C_T = \sqrt{\frac{q\epsilon_S N_D}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{(V_{bi} - V_A)} + \sqrt{(V_{bi} + V_A)}} \right]} \quad (3.15)$$

รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบแอส โดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบแอสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบแอสตรงและแรงดันไบแอสย้อนกลับ



รูปที่ 3.11 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

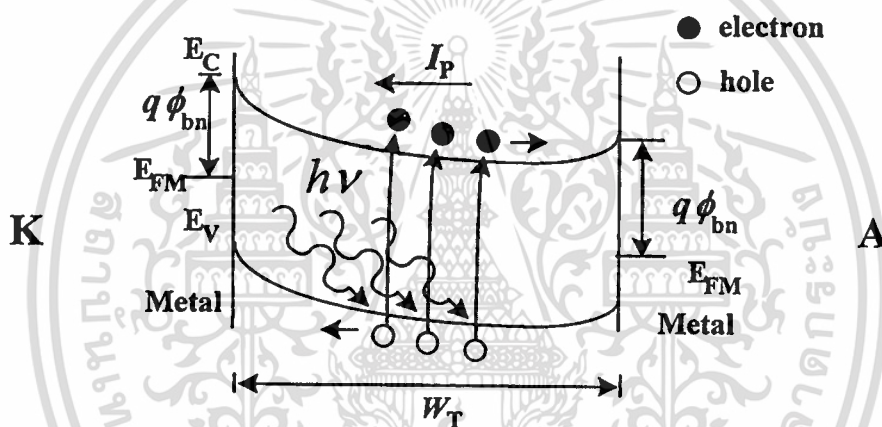
### 3.2.3 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงแล้ว จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโนด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกไปภายนอกอุปกรณ์ โดยกระแสแสง ( $I_p$ ) ของโครงสร้าง MSM มีค่าดังสมการที่ (3.16)

$$I_p = I_{\text{mea}} - I_{\text{dark}} \quad (3.16)$$

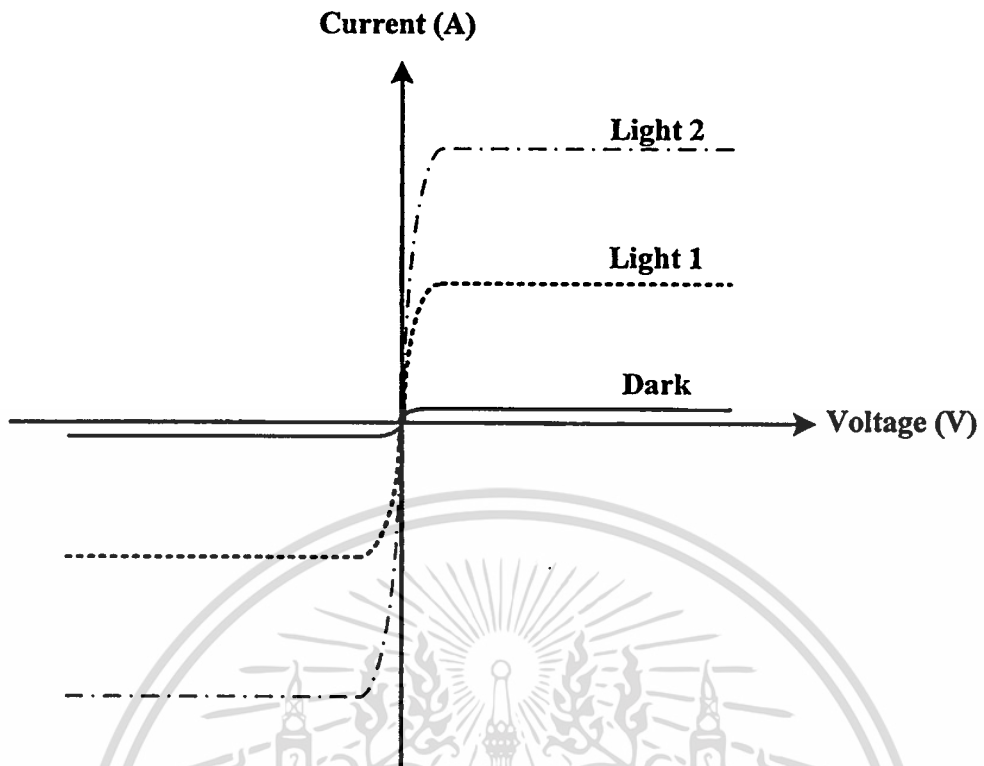
โดยที่  $I_{\text{mea}}$  คือ กระแสที่ได้จากการวัด

$I_{\text{dark}}$  คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดของ MSM



รูปที่ 3.12 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ

ในรูปที่ 3.13 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของ MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับไบแอสตรงและด้านที่รับไบแอสย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบมีความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 3.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

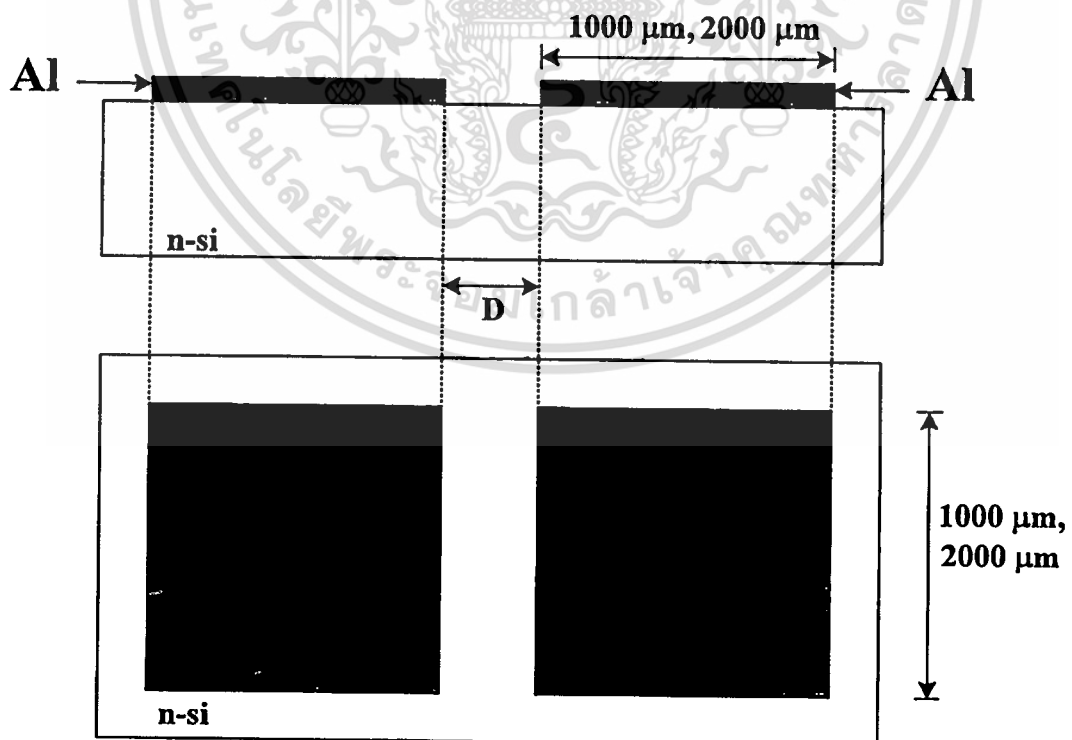
## บทที่ 4

### การออกแบบ การสร้างและการทดลอง

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาเนอร์ สามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งมีกระบวนการสร้างด้วยกระจกต้นแบบเพียง 1 แผ่น โดยมีการออกแบบให้มีพื้นที่รับแสงต่างๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะ โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา กระบวนการสร้างและการทดลองต่างๆ เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติของ โครงสร้าง MSM ต่อไป

#### 4.1 โครงสร้างและการออกแบบ

โครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม-ซิลิคอน จำนวนสองรอยสัมผัส ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ขั้วโลหะที่มีขนาดเท่ากันทั้งสองด้านเป็นอลูมิเนียมมีขนาด  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  ส่วนสารกึ่งตัวนำจะเลือกใช้เป็นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานของซิลิคอน (resistivity) ค่าต่างๆ ซึ่งวัสดุทั้งสองหาสามารถได้ง่ายและยังเป็นวัสดุที่สำคัญในการสร้างวงจรรวม สำหรับระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) ที่ใช้เป็นส่วนของพื้นที่รับแสง มีค่า 20, 40, 100 และ 500  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมเป็นหลัก โดยหลังจากการเตรียมกระจกต้นแบบ (mask) แล้ว จะนำแผ่นซิลิคอนมาทำการสร้าง ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

- Ultrasonic ด้วยน้ำจืด ไอออนแล้ว (de-ionization water : DI) 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่น
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดไนตริก (Nitric Acid) 2 แก้วๆ ละ 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะ
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- ต้มใน DI 2 แก้วๆ ละ 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลเอทรีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน
- Ultrasonic ในอะซิโตน (Acetone) 2 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric) ที่มีความเข้มข้น 5 % (HF 5 %) 10–30 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 2. กระบวนการเคลือบโลหะ

เคลือบอลูมิเนียมด้านหน้าของแผ่น ด้วยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  Torr

- วางแผ่นเวเฟอร์ในครอบแก้ว (glass chamber)
- ดูดอากาศออกจากรอบแก้ว
- เมื่อความดันลดต่ำลงจนถึง  $2 \times 10^{-6}$  Torr เริ่มให้กระแสเพื่อทำให้อลูมิเนียมละลาย
- เปิดชัตเตอร์ (shutter) เพื่อเริ่มทำการเคลือบอลูมิเนียม

### 3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography)

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้ทำการเคลือบอลูมิเนียมแล้ว มาสร้างเป็นส่วนขั้วไฟฟ้าและพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เคลือบนำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 40 วินาที

- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้นำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที

- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่อง mask aligner

- การขึ้นลวดลาย (develop)

- จุ่มใน AZ developer 2 แก้วๆ ละ 15 วินาที

- จุ่มใน DI 2 แก้ว

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้นำฟิล์มนำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที

4. การกัดชั้นอลูมิเนียม

ทำการสกัดชั้นของอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยสารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching) ที่มีส่วนผสมของ  $H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : H_2O$  ในอัตราส่วน 8 : 5 : 5 : 10 [16]

- จุ่มใน Al etching ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 20 วินาที

- จุ่มใน DI 2 แก้ว

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. การลอกฟิล์มนำยาไวแสง

- จุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที

- จุ่มใน DI 2 แก้ว

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

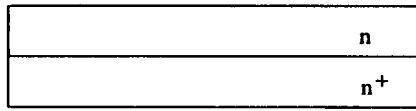
6. เคลือบอลูมิเนียมด้านหลังของแผ่น เพื่อสร้างขั้วโหม้มิคสำหรับวัดลักษณะสมบัติของซีดทีแบเรียม โดยมีการเคลือบด้านหลังที่ 2

7. กระบวนการซินเตอริง (sintering)

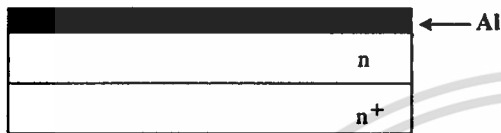
กระบวนการซินเตอริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซีดทีคอนสุมบูรณ์ขึ้น

- นำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร/นาทิต เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดีและมีกระแสรั่วไหลต่ำ [17] โดยมีอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 100 °C ถึง 500 °C

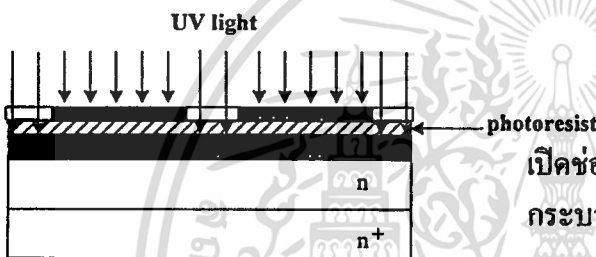
ในรูปที่ 4.2 แสดงภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al และรูปที่ 4.3 เป็นรูปด้านบนของอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้ว



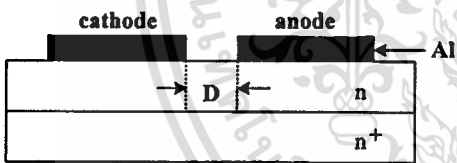
แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นบนเอ็น+  
ที่มีความหนาของชั้นอีพิแทกเซียล  
ประมาณ 7-15  $\mu\text{m}$



เคลือบอลูมิเนียมด้านบน



เปิดช่องอลูมิเนียมด้วย  
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

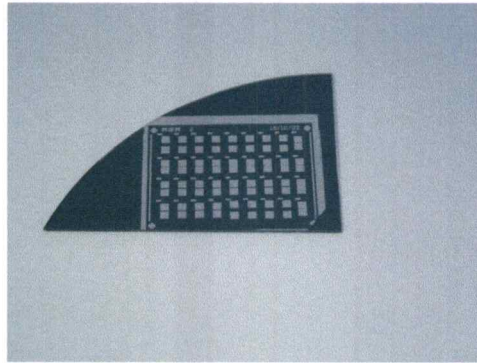


ขั้วไฟฟ้าที่ได้ คือ คาโทด และ อนโอด  
มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า D ระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$

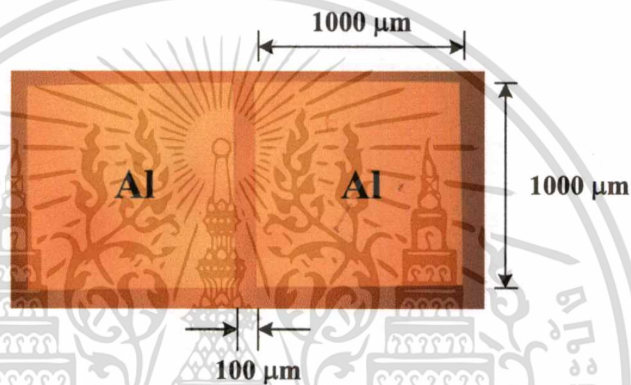


เคลือบอลูมิเนียมด้านล่างเพื่อสร้างขั้วโอห์มมิก  
สำหรับวัดลักษณะสมบัติของซีดทีแบเรออร์

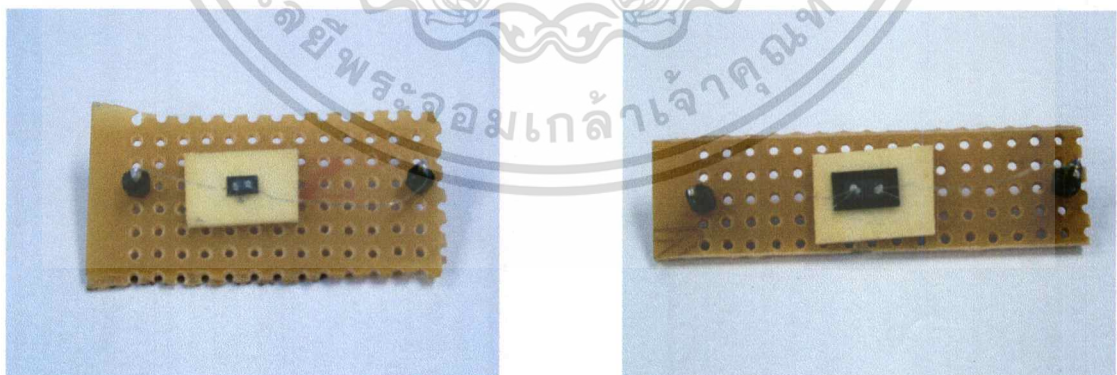
รูปที่ 4.2 ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่สร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการตัดแยกชิ้นงาน โดยมีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 100  $\mu\text{m}$



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al อุปกรณ์ที่ผ่านการเชื่อมต่อดัวยกาวเงิน

(ก) อุปกรณ์ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$

(ข) อุปกรณ์ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$

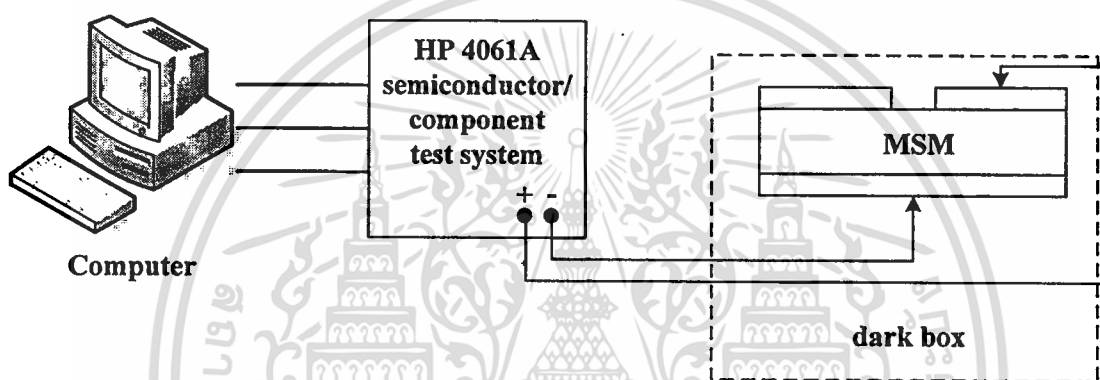
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดลอง

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ ซึ่งจะมีการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การศึกษากำแพงศักย์ซีกตึก

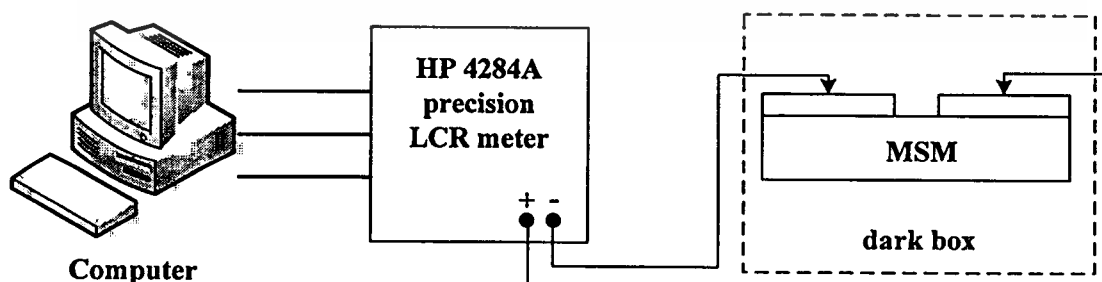
การศึกษากำแพงศักย์ซีกตึก เป็นการทดลองเพื่อหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่เป็นโครงสร้างซีกตึกไดโอด โดยผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิระหว่าง  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสูงกำแพงศักย์ต่อไป และเป็นการหาค่าแรงดันภายในของอุปกรณ์ โดยใช้เครื่อง HP 4061A semiconductor/component test system ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองหาคำแพงศักย์ซีกตึก

#### 4.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Al/n-Si/Al

นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านกระบวนการสร้างมาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ด้วยเครื่อง HP 4284A precision LCR meter ดังแสดงในรูปที่ 4.7

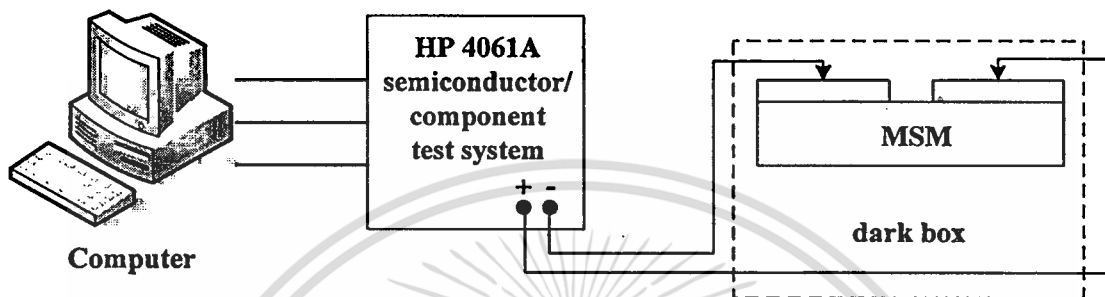


รูปที่ 4.7 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al

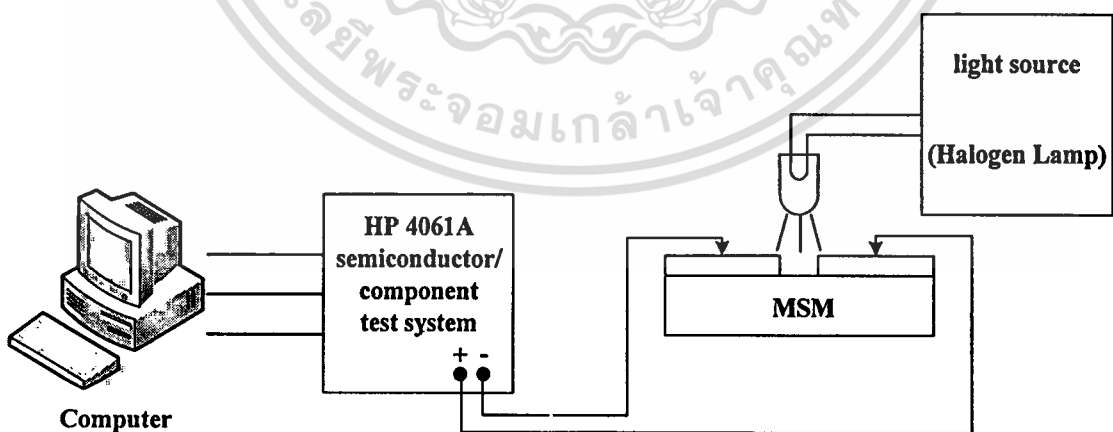
นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านกระบวนการสร้าง และผ่านการชินเตอริงที่อุณหภูมิระหว่าง 100 °C ถึง 500 °C มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

### 4.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ซึ่งมีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง (dc) ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนของบริษัท STOCKER & YALE รุ่น 20 Series ที่มีความเข้มค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

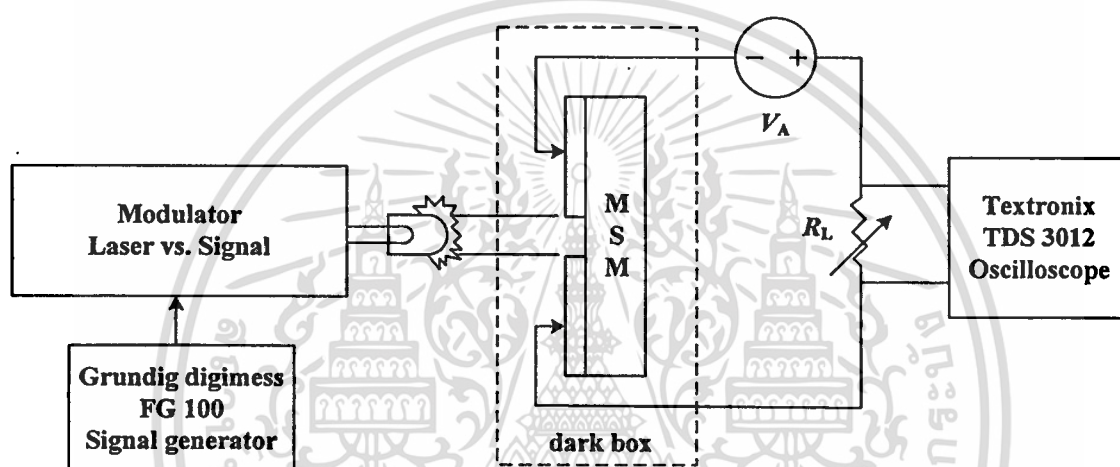


รูปที่ 4.9 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 การศึกษาลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง กระแสสลับ

นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al จากหัวข้อที่กล่าวมา นำมาทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสง ในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ (ac) โดยใช้เลเซอร์ไดโอดของบริษัท RS รุ่น V9323 (194-004) ที่มีความยาวคลื่น 670 nm, กำลังงาน 2.68 mW (วัดจากเครื่อง laser power meter รุ่น N54-018 ของบริษัท Edmund Optics) ซึ่งถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด  $400 \text{ mV}_{pp}$  เข้ากับเลเซอร์ ที่ความถี่ต่ำในช่วง 100 Hz-4 MHz ที่แรงดันไบแอส ( $V_A$ ) ระหว่าง 1.5-10 โวลต์ และให้โหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) มีค่าระหว่าง  $100 \Omega - 100 \text{ k}\Omega$  ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงในแบบสัญญาณแสง กระแสสลับ

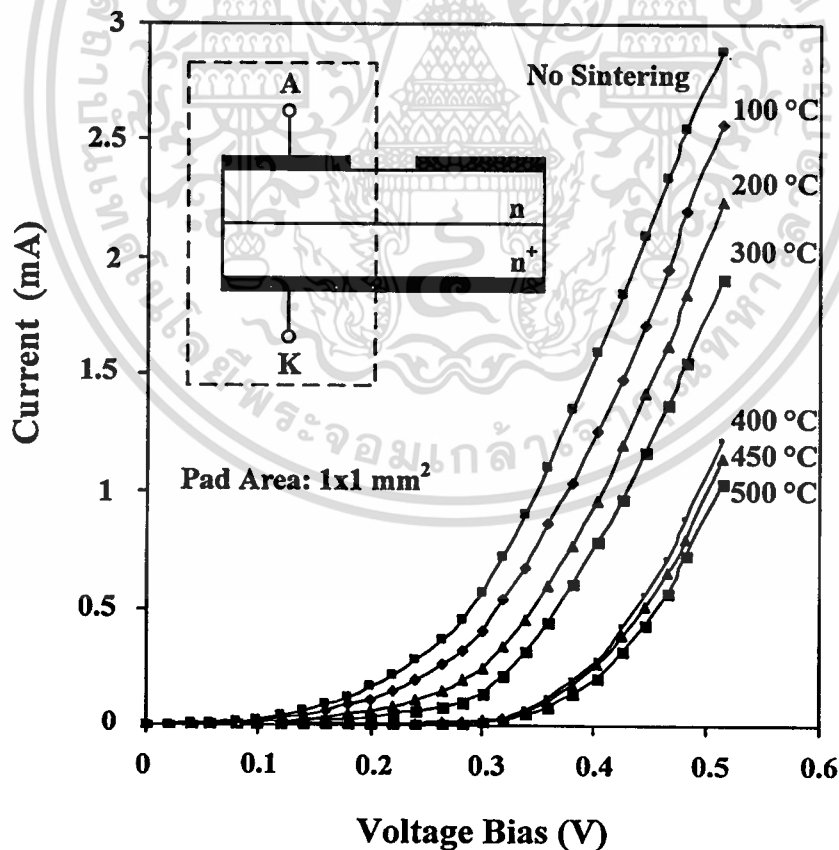
## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในบทที่กล่าวมา ประกอบด้วย การศึกษากำแพงสัทยึดขั้ว, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน แบบสัญญาณแสงกระแสตรงและสัญญาณแสงกระแสสลับ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ถึงผลการทดลองที่เกิดขึ้น

#### 5.1 ผลการทดลองกำแพงสัทยึดขั้ว

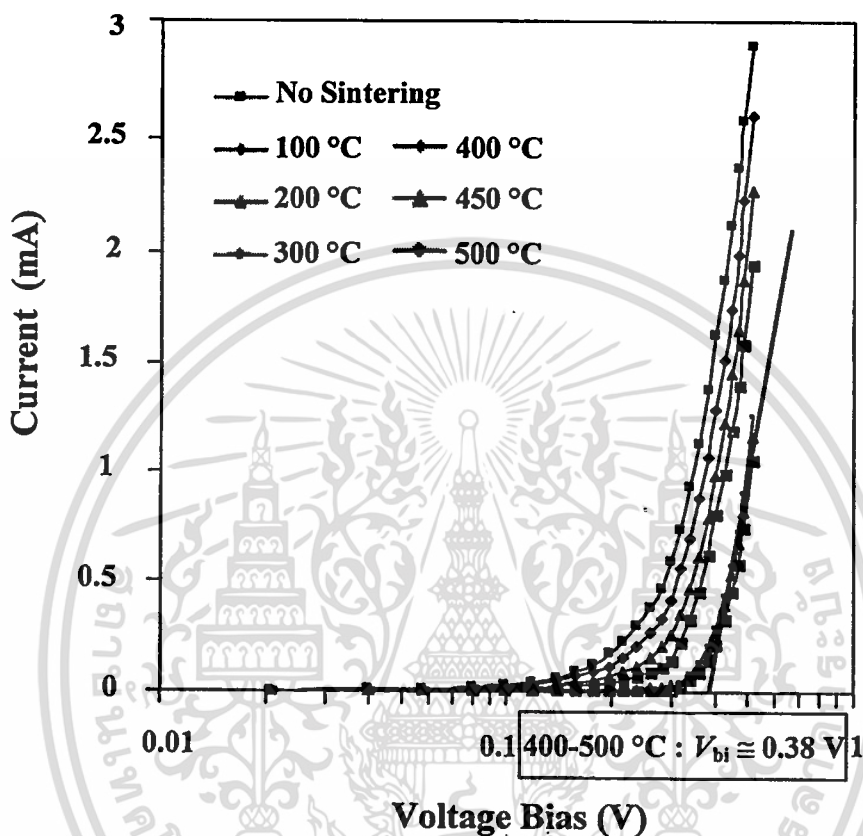
เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยกำแพงสัทยึดขั้วจำนวนสองรอยสัมผัส ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วและผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง  $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $500^{\circ}\text{C}$  ดังการทดลองที่ 4.3.1 ซึ่งลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ผ่านการซินเตอร์

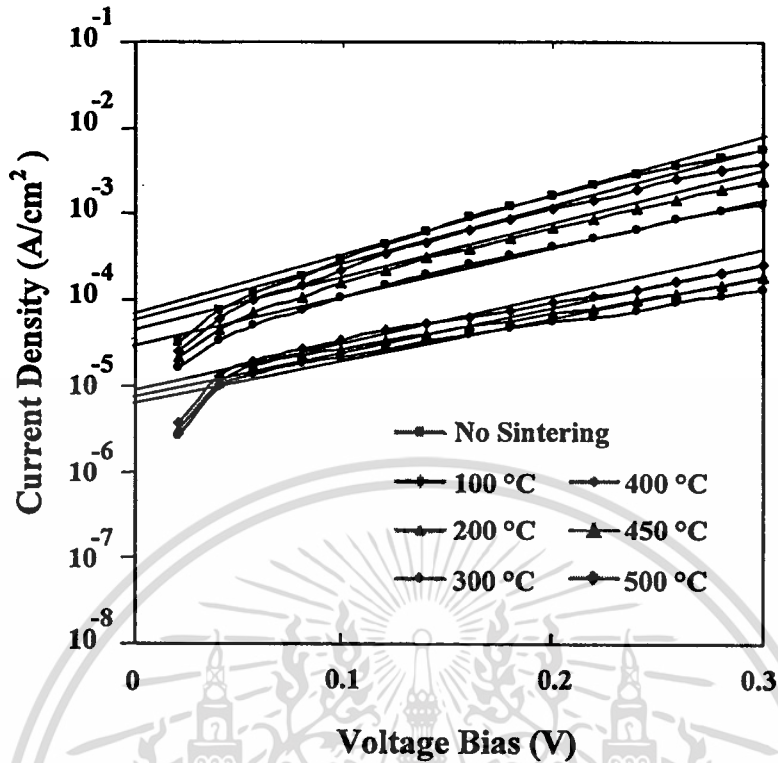
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่ได้มาทำการหาค่าแรงดันภายใน ( $V_{bi}$ ) โดยแกนตั้งของกราฟเป็นค่ากระแส ส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบแอสในแบบกึ่งล็อก (semi-log) ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสที่ผ่านการซินเตอร์ริง

จากรูปที่ 5.2 พบว่าอุณหภูมิซินเตอร์ริงมีผลต่อแรงดันภายใน โดยรอยสัมผัสของอุปกรณ์ที่ไม่ผ่านการซินเตอร์ริงจนถึงอุณหภูมิซินเตอร์ริง 300 °C มีค่าแรงดันภายในประมาณ 0.2-0.3 V และที่อุณหภูมิซินเตอร์ริงระหว่าง 400 °C ถึง 500 °C มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไบแอสเล็กน้อยโดยมีค่าแรงดันภายในประมาณ 0.38 V จากการทดลองที่ได้แรงดันภายในมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งเป็นลักษณะของรอยสัมผัสแบบช็อคกี [1] (ไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V) จากนั้นนำอุปกรณ์ที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิระหว่าง 100 °C ถึง 500 °C มาทำการหาค่าพวงศักย์ช็อคกีด้วยเทคนิคกระแส-แรงดัน [10,17,18] ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การหาค่า  $J_S$  จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส

รูปที่ 5.3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส โดยแกนตั้งเป็นความหนาแน่นกระแส ส่วนแกนนอนเป็นแรงดันไบแอส ซึ่งความหนาแน่นของกระแสที่แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์ ( $J_S$ ) หาได้ดังสมการที่ (5.2) จากนั้นนำค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้จากรูปที่ 5.3 มาหาความสูงของกำแพงศักย์ช็อคติด้วยเทคนิคกระแส-แรงดัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3)

$$J = J_S \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (5.1)$$

เมื่อ  $V_A = 0$  เป็นผลให้  $J$  มีค่าเท่ากับ  $J_S$  และ  $J_S$  มีค่าเท่ากับ

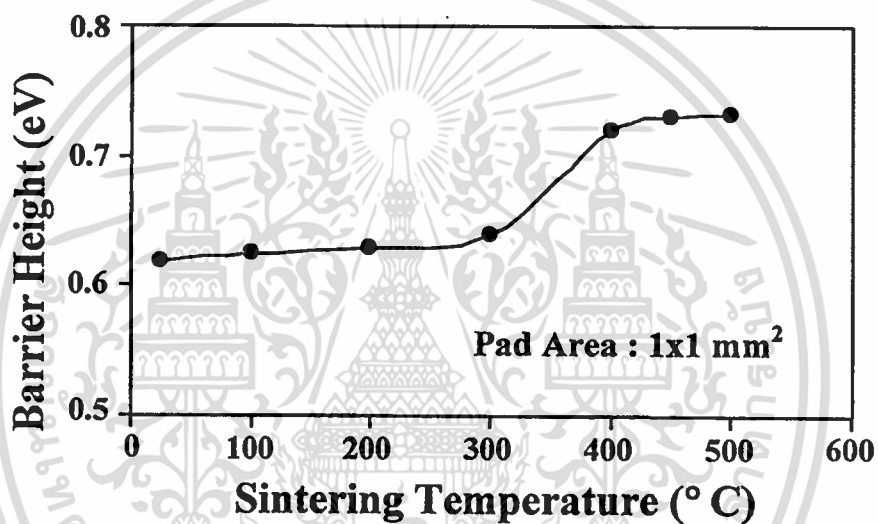
$$J_S = \frac{I_S}{A} = RT^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (5.2)$$

นำค่า  $J_S$  ที่ได้แทนในสมการ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{RT^2}{J_S} \right) \quad (5.3)$$

โดยที่  $J_S$  คือกระแสอิ่มตัว (saturation current) ซึ่งกระแสอิ่มตัวนี้จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์ริงมีค่าสูงขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่ากระแสอิ่มตัวจะมีค่าลดลงเมื่อค่าพวงศักร์ช็อคกีมีค่าสูงขึ้น [14-16],  $R$  คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (Richardson constant),  $q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน,  $k$  คือ ค่าคงที่โบสค์มันน์,  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และ  $\phi_{bn}$  คือ ความสูงของค่าพวงศักร์ช็อคกี

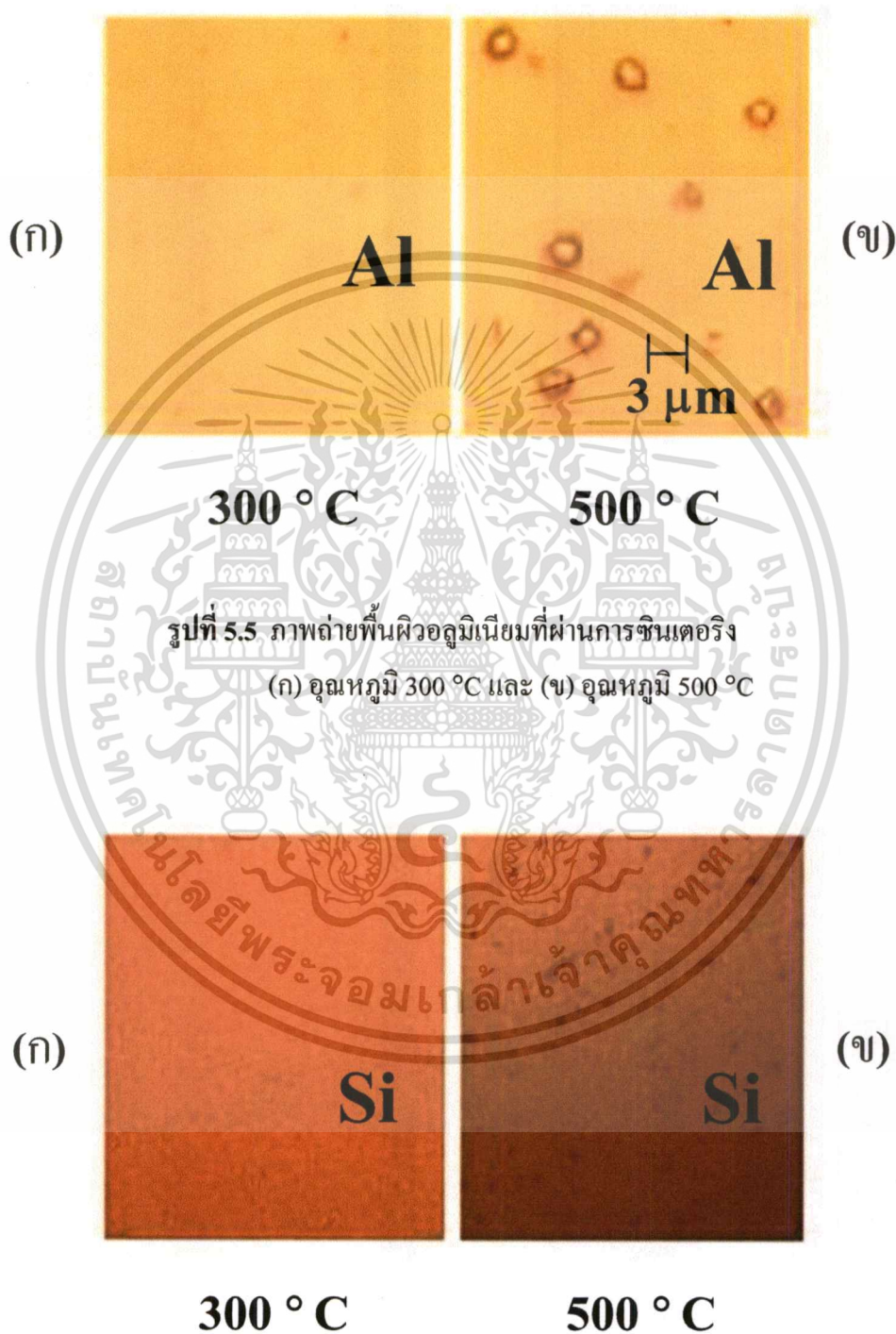


รูปที่ 5.4 ความสูงของค่าพวงศักร์ช็อคกีซึ่งได้จากเทคนิคการวัดกระแส-แรงดัน

ความสูงของค่าพวงศักร์ช็อคกีในรูปที่ 5.4 จะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่ทำการซินเตอร์ริง เนื่องจากความหนาแน่นกระแสแสดงในสมการที่ (5.2) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิซินเตอร์ริง โดยความหนาแน่นกระแสจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์ริงมีค่าสูงขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่ของอลูมิเนียมเข้าไปในซิลิคอน โดยความสูงของค่าพวงศักร์ช็อคกีจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงที่ไม่ผ่านการซินเตอร์ริงจนถึงอุณหภูมิ 300 °C คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.62-0.64 eV และมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 400 °C ซึ่งความสูงค่าพวงศักร์ช็อคกีเกือบคงที่ จนถึงการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.72-0.73 eV

เมื่อพิจารณาจากพื้นผิวอลูมิเนียมและพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการลอกอลูมิเนียมออก จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยเป็นผลมาจากการซินเตอร์ริง ซึ่งจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวแบบยูเทคติก (eutectic) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนเกิดเป็นชั้นฟิลบางๆขึ้น มีค่าประมาณ 70 ถึง 100 Å ที่อุณหภูมิ 400 °C [19] ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ที่เป็นรูปพื้นผิวของอลูมิเนียม และรูปที่ 5.6 เป็นรูปพื้นผิวซิลิคอนที่ลอกอลูมิเนียมออก โดยที่อุณหภูมิขึ้นเตอริงเท่ากับ 300 °C และ 500 °C ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายพื้นผิวอลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นเตอริง  
(ก) อุณหภูมิ 300 °C และ (ข) อุณหภูมิ 500 °C

รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการขึ้นเตอริง โดยทำการลอกอลูมิเนียมออก

(ก) อุณหภูมิ 300 °C และ (ข) อุณหภูมิ 500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

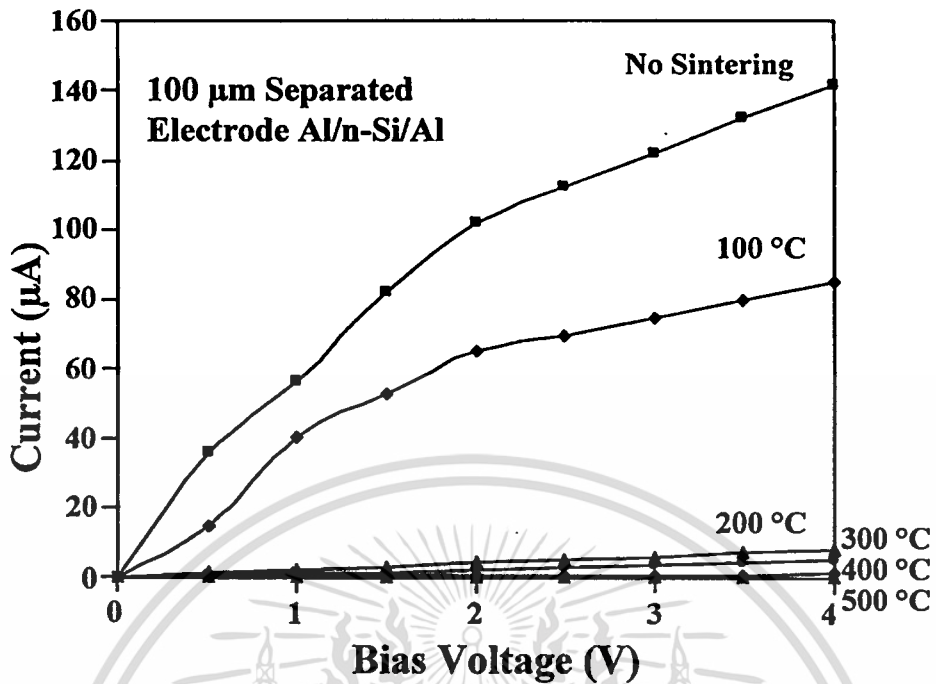
จากรูปที่ 5.6 พบว่าพื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านการลอกอลูมิเนียมออกแล้ว โดยชิ้นงานที่ไม่ผ่านการขึ้นเตอริงจนถึงอุณหภูมิขึ้นเตอริงน้อยกว่า 300 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.6 (ก) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่อุณหภูมิขึ้นเตอริง 300 °C พื้นผิวที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากอลูมิเนียมแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้น้อย แต่จะเห็นผลของการเปลี่ยนแปลงชัดเจนเมื่ออุณหภูมิขึ้นเตอริงมากกว่า 400 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.6 (ข) เป็นอุณหภูมิขึ้นเตอริงที่ 500 °C ซึ่งอลูมิเนียมสามารถแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้มากขึ้น เนื่องจากอลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวที่ 660 °C ดังนั้นที่อุณหภูมิขึ้นเตอริงที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวอลูมิเนียมจะสามารถแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้มากกว่าที่อุณหภูมิขึ้นเตอริงค่าต่ำๆ ทำให้ได้รอยสัมผัสสมบูรณ์ขึ้นและยังเป็นการลดผลของสถานะพื้นผิว (surface state) ของรอยสัมผัสช็อคกี เป็นผลให้กระแสอิ่มตัวมีค่าลดต่ำลง [10,11,17,18]

## 5.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

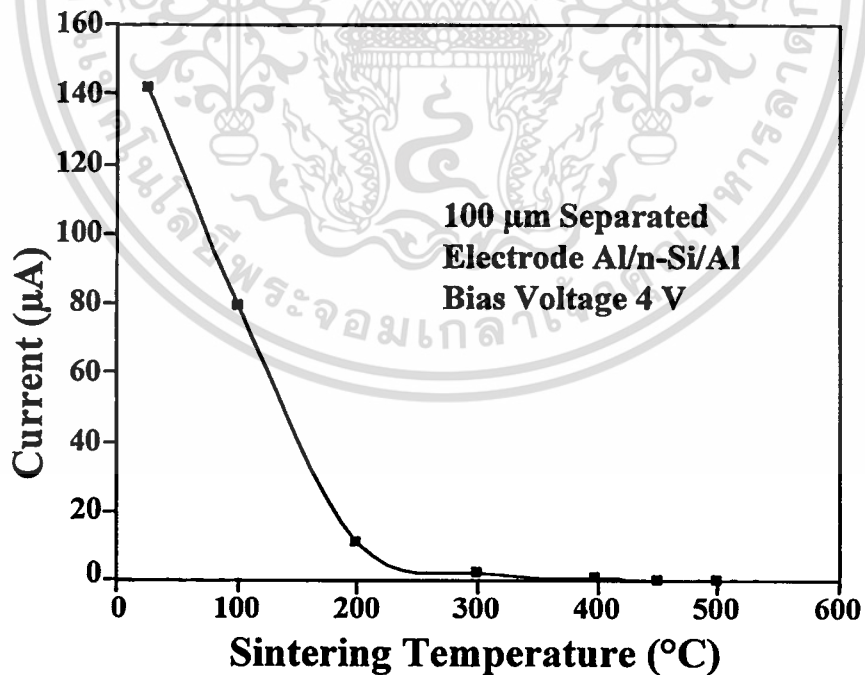
นำเอาอุปกรณ์มาทำการหาความสัมพันธ์ของกระแสเมื่อได้รับแรงดันไบแอสเพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบและเมื่อได้รับแสงตกกระทบในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

### 5.2.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อผ่านการขึ้นเตอริง ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

จากผลของค่าแพนดักซ์ช็อคกีที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการขึ้นเตอริงเพิ่มขึ้น ดังผลการทดลองที่ 5.1 จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการขึ้นเตอริงอุณหภูมিরะหว่าง 100 °C ถึง 500 °C ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบตัวอุปกรณ์ ดังการทดลองที่ 4.3.3 แสดงในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-อุณหภูมิขึ้นเตอริงของอุปกรณ์ Al/n-Si/A พบว่ากระแสมีคของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al จะมีค่าลดลงเมื่อทำการขึ้นเตอริงที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยอุปกรณ์ที่ไม่ผ่านการขึ้นเตอริง กระแสมีคที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ มีค่าประมาณ 140  $\mu\text{A}$  ที่อุณหภูมิขึ้นเตอริง 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 450 °C และ 500 °C มีค่ากระแสมีคประมาณ 80  $\mu\text{A}$ , 10  $\mu\text{A}$ , 5  $\mu\text{A}$ , 800 nA, 30 nA และ 20 nA ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิขึ้นเตอริง 500 °C มีกระแสมีคน้อยที่สุด ซึ่งกระแสมีคนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่งของตัวตรวจวัดแสง [5] และเป็นอุณหภูมิขึ้นเตอริงที่ใช้กับการสร้างวงจรรวมภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงใช้อุปกรณ์ที่ผ่านการขึ้นเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในการวัดผลการทดลอง



รูปที่ 5.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิระหว่าง 100 °C ถึง 500 °C โดยที่อุปกรณ์มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 µm

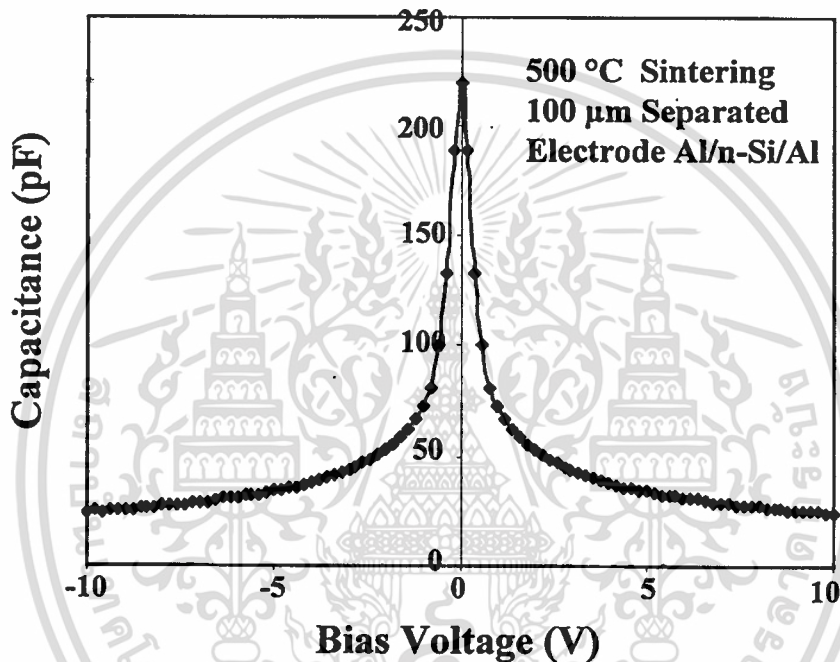


รูปที่ 5.8 ลักษณะสมบัติกระแส-อุณหภูมิของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิระหว่าง 100 °C ถึง 500 °C ที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al

นำเอาอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิ 500 °C ทำการหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดันไบแอส ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบตัวอุปกรณ์ ดังการทดลองที่ 4.3.2 ซึ่งลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 5.9 โดยโครงสร้าง MSM พิจารณาได้ว่าประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุที่บริเวณรอยสัมผัสทั้งสองต่ออนุกรมกัน ดังนั้นความจุไฟฟ้าของ MSM จึงมีค่าใกล้เคียงความจุไฟฟ้าด้านที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับ มีค่าดังสมการที่ (5.4)



รูปที่ 5.9 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (5.4)$$

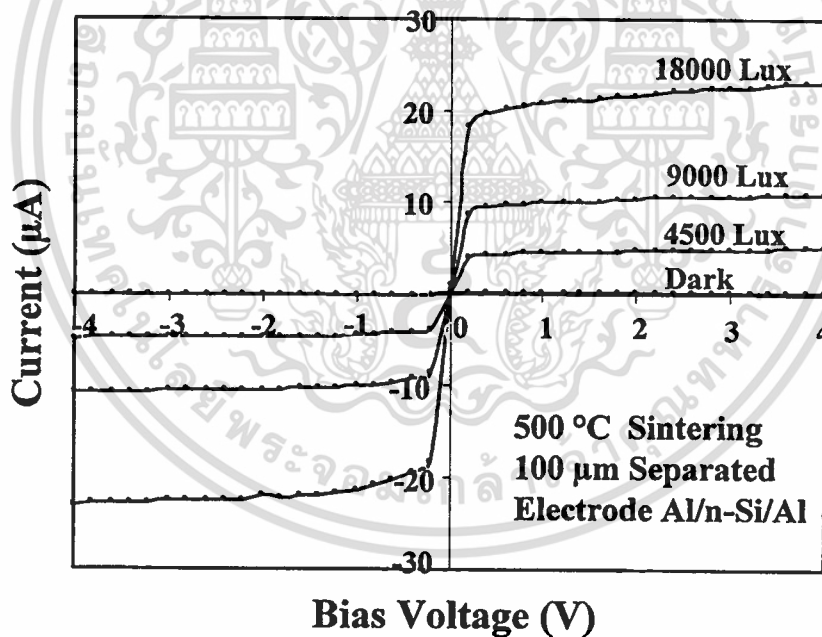
จากรูปที่ 5.9 พบว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al มีความสมมาตรกันซึ่งจะมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบแอสดังความสัมพันธ์ของสมการที่ (5.4) คือเมื่อแรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้นทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่แรงดันไบแอส 10 V ความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 25 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

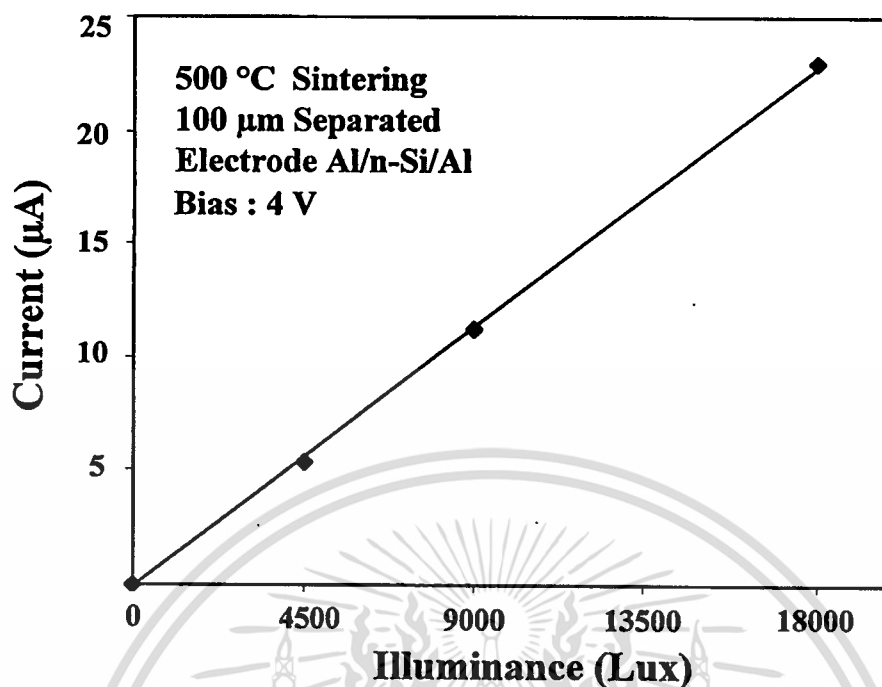
### 5.2.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสงตกกระทบบนแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่า ที่อุณหภูมิซินเทอริง 500 °C จะได้กระแสเมื่อดของอุปกรณ์น้อยที่สุด คือ อุปกรณ์มีกระแสรั่วไหลที่ค่าประมาณ 20 nA ดังนั้นจึงเลือกอุปกรณ์นี้เพื่อทำการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันแบบกระแสตรง ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบบนจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มค่าต่างๆ รวมทั้งกระแสเมื่อด ดังการทดลองที่ 4.3.4 ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.10 พบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้นเมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มแสง 4500 Lux, 9000 Lux และ 18000 Lux ที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ จะมีค่ากระแสประมาณ 6  $\mu\text{A}$ , 12  $\mu\text{A}$  และ 24  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 5.11 และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ได้มีความสมมาตรดีขึ้นกว่าอุปกรณ์ที่ไม่ผ่านการซินเทอริง [18,20]

จากลักษณะสมบัติที่กล่าวข้างต้นทำให้โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ Al/n-Si/Al สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 5.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  เมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน

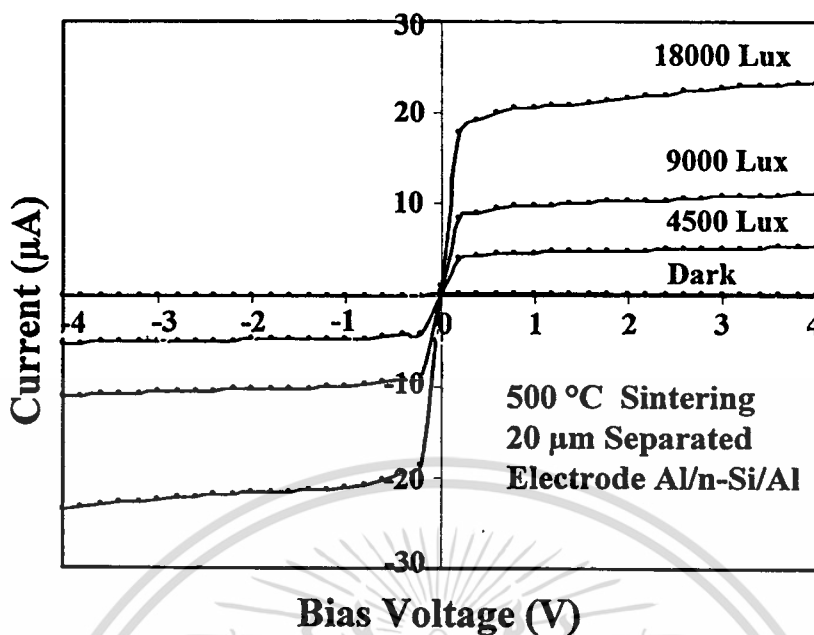


รูปที่ 5.11 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 µm เมื่อได้รับแรงดันไบแอส 4 โวลต์

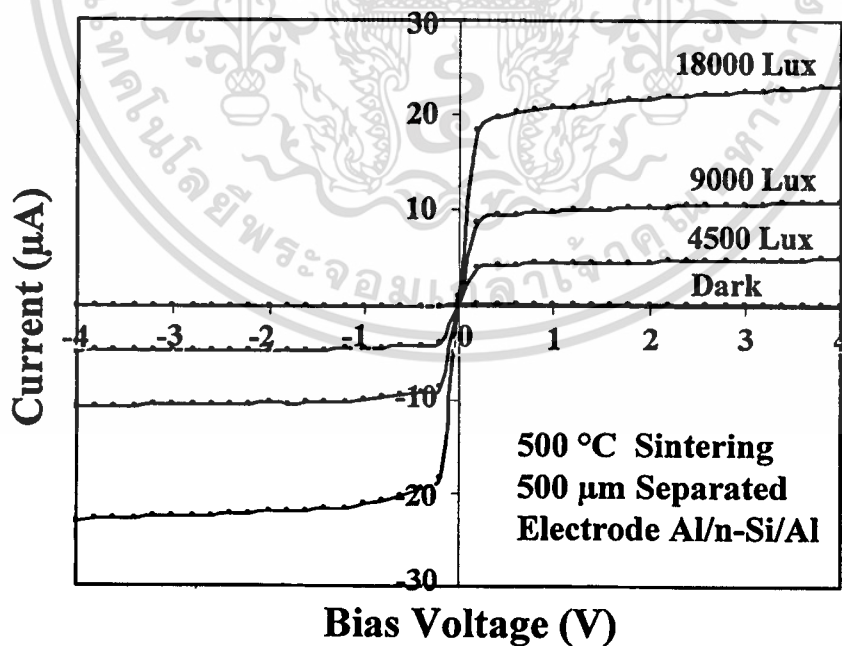
#### 5.2.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 µm

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่วัดได้ดังในรูปที่ 5.10 นำมาทำการหากระแสแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20-500 µm ดังแสดงในรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ซึ่งเป็นตัวอย่างของชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเป็น 20 µm และ 500 µm ตามลำดับ สำหรับกระแสแสงหาได้จากกระแสที่ได้จากการวัด ( $I_{Mea}$ ) ลบด้วยกระแสมืด ( $I_{Dark}$ ) ดังสมการที่ (5.5) [1] จะได้กราฟลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ซึ่งพบว่า กระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าเดียวกัน จะมีค่าเกือบเท่ากันเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างขั้วไฟฟ้าของ โฟโต ไดโอด และกระแสแสงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสง ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 µm ถึง 500 µm จะมีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นน้อยมาก

$$I_P = I_{Mea} - I_{Dark} \quad (5.5)$$



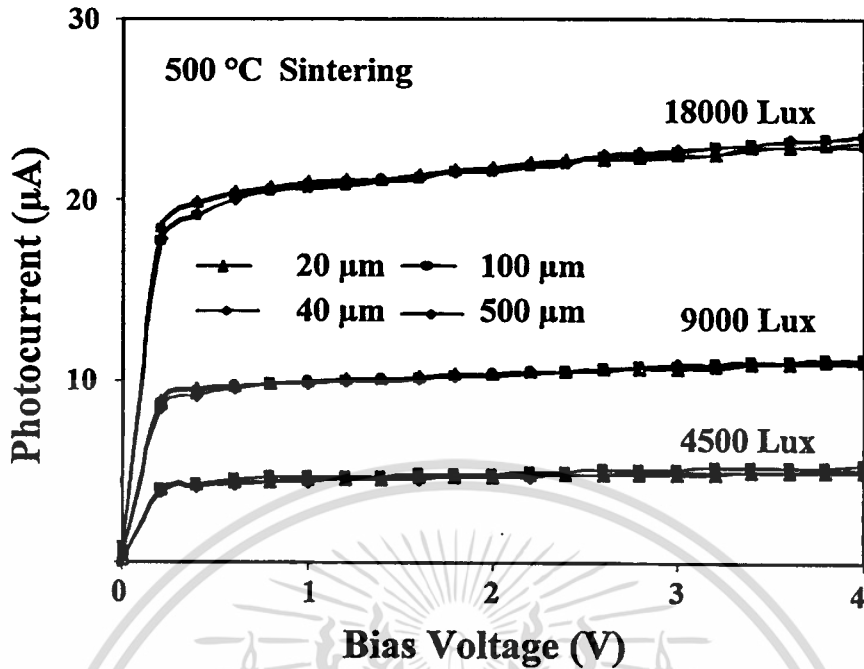
รูปที่ 5.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  เมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน



รูปที่ 5.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 500  $\mu\text{m}$

เมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน

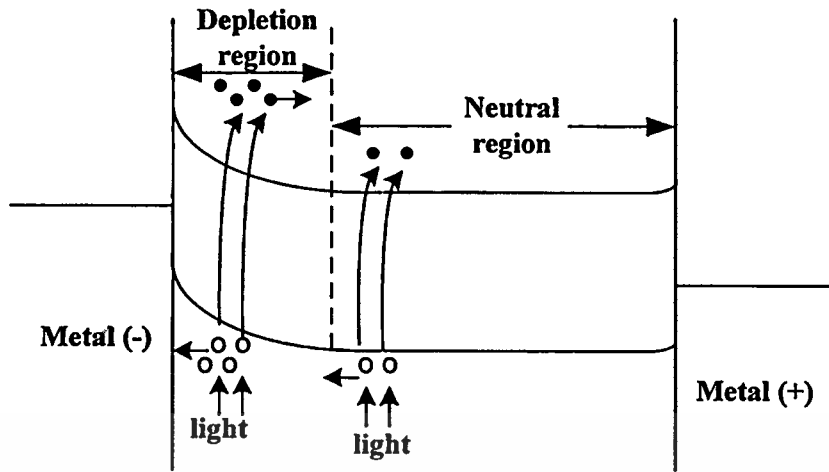
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประกอบการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า ระหว่าง 20 ถึง 500  $\mu\text{m}$

โดยทั่วไปแล้ว โครงสร้าง MSM ที่บริเวณปลดพาหะ ครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมด กระแสแสงที่ได้จะเป็นกระแสแสงไดโอดเพียงอย่างเดียวและปริมาณกระแสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดมากขึ้น [5,6] ส่วนโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง กระแสแสง ( $I_p$ ) ที่ได้เป็นผลรวมของกระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) และกระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ ) ดังสมการที่ (5.6) เมื่อพิจารณาแถบพลังงานในบริเวณนิวทรัล ดังแสดงในรูปที่ 5.15 พบว่ามีลักษณะแบนราบ ดังนั้นส่วนประกอบกระแสแสงคอนดักเตอร์จะขึ้นอยู่กับการแพร่ของพาหะที่อยู่ใกล้ขอบของบริเวณปลดพาหะ ซึ่งเกิดจากกลไกการแพร่ของโฮลที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแสงแล้วแพร่ไปที่ขอบบริเวณปลดพาหะ โดยพบว่าที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  กระแสแสงที่เกิดจากการแพร่ของพาหะส่วนน้อยมีค่าใกล้เคียงกันส่วนกระแสแสงไดโอดที่ได้จากบริเวณปลดพาหะจะมีค่าเท่ากันเนื่องจากรับแรงดันไบแอสค่าเดียวกัน โดยไม่ขึ้นกับระยะห่างขั้วไฟฟ้าเป็นผลให้กระแสแสงรวมมีค่าเท่ากัน [20]

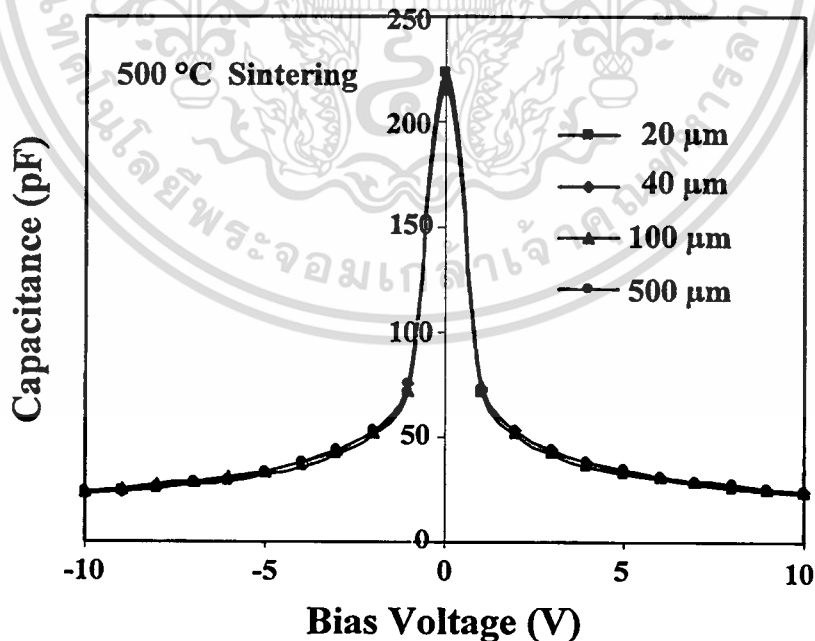
$$I_p = I_C + I_D \quad (5.6)$$



รูปที่ 5.15 แผนภาพแถบพลังงานของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้างเมื่อได้รับแรงดันไบแอส

### 5.2.5 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 $\mu\text{m}$

จากนั้นทำการทดสอบความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า

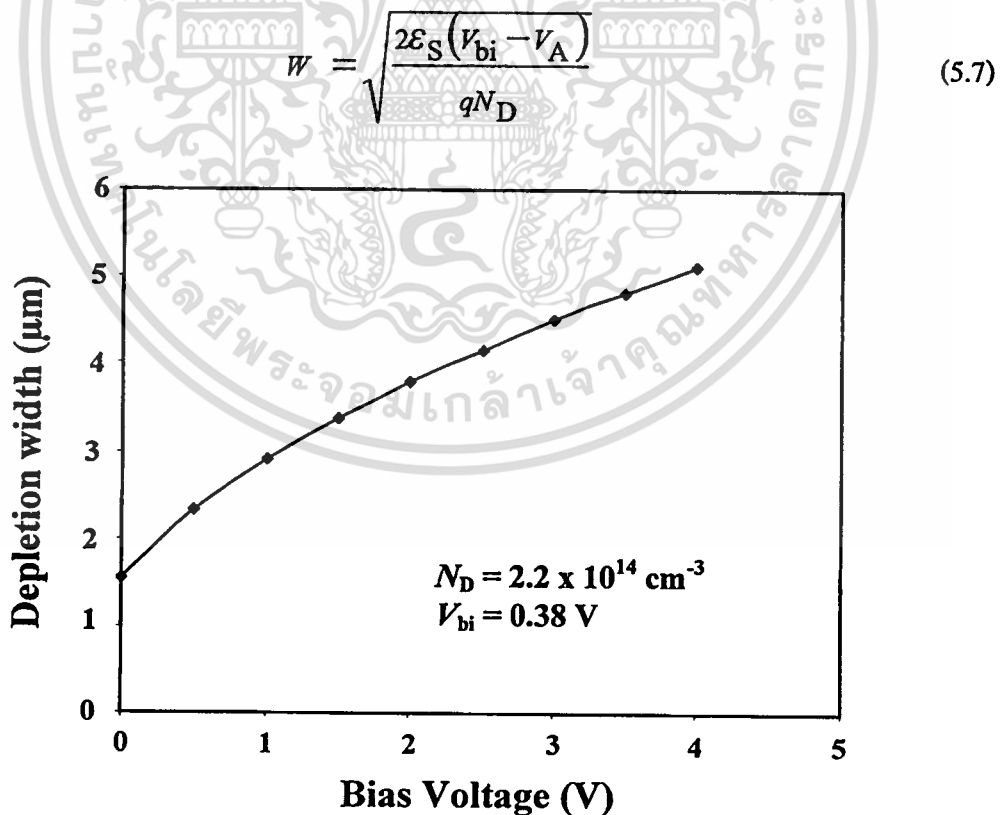
ระหว่าง 20 ถึง 500  $\mu\text{m}$  เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.16 เป็นลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  พบว่ามีค่าความจุไฟฟ้าที่เท่ากัน คือ มีค่าประมาณ 25 pF ที่แรงดันไบแอส 10 V ดังนั้นความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะขึ้นอยู่กับส่วนปลดพาหะของรอยสัมผัสด้านที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับ โดยระยะห่างขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ [20] ดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.2.2.2

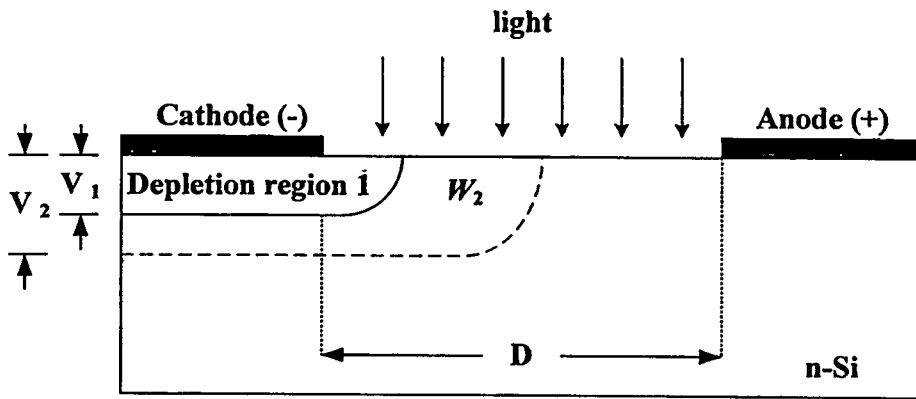
### 5.2.6 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่ากระแสแสงที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดกว้างระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  แต่กระแสแสงจะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบแอสที่ให้กับอุปกรณ์ [8] ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่แตกต่างจากตัวตรวจวัดแสงชนิดอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 โดยแรงดันไบแอสจะมีผลต่อความกว้างบริเวณปลดพาหะ ซึ่งบริเวณปลดพาหะของ MSM จะมีค่าใกล้เคียงกับด้านที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.7) ส่วนในรูปที่ 5.17 เป็นความกว้างของบริเวณปลดพาหะที่มีสภาพต้านทานแผ่นประมาณ 7-21  $\Omega\text{-cm}$  พบว่าความกว้างบริเวณปลดพาหะมีค่ามากขึ้นเมื่อแรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.18



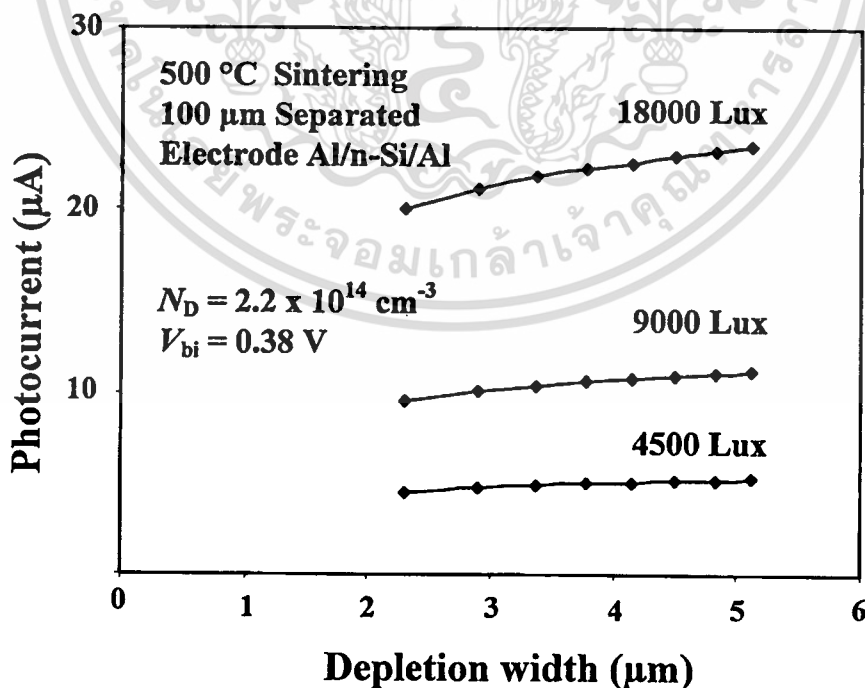
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบแอสกับความกว้างบริเวณปลดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ความกว้างปอดคพาหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบแอสสูงขึ้น

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากรูปที่ 5.14 มาทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปอดคพาหะ ( $W$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5.19 พบว่า กระแสแสงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แรงดันไบแอสมากขึ้น โดยเป็นผลมาจากกระแสแสงไดโอดที่เกิดจากบริเวณปอดคพาหะมีค่ามากขึ้นตามบริเวณปอดคพาหะที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบแอส และเป็นกระแสแสงส่วนที่เกิดผลมากต่ออุปกรณ์ ส่วนกระแสแสงคอนดักเตอร์ที่เกิดจากบริเวณนิวทรัลจะมีค่าเท่าเดิม จึงกล่าวได้ว่ากระแสแสงมีค่ามากขึ้นเมื่อแรงดันไบแอสที่ให้มามีค่ามากขึ้น ทำให้การควบคุมกระแสแสงทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสที่ให้กับอุปกรณ์ [8]



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปอดคพาหะ

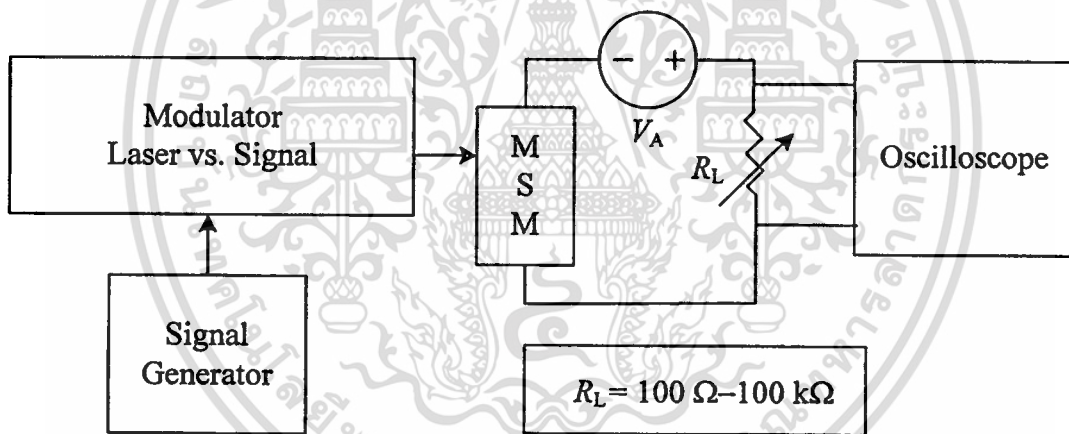
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ

นำเอาอุปกรณ์มาทำการหาลักษณะการตอบสนองทางแสงเมื่อได้รับแรงดันไบแอส ดังการทดลองที่ 4.3.4 เพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ

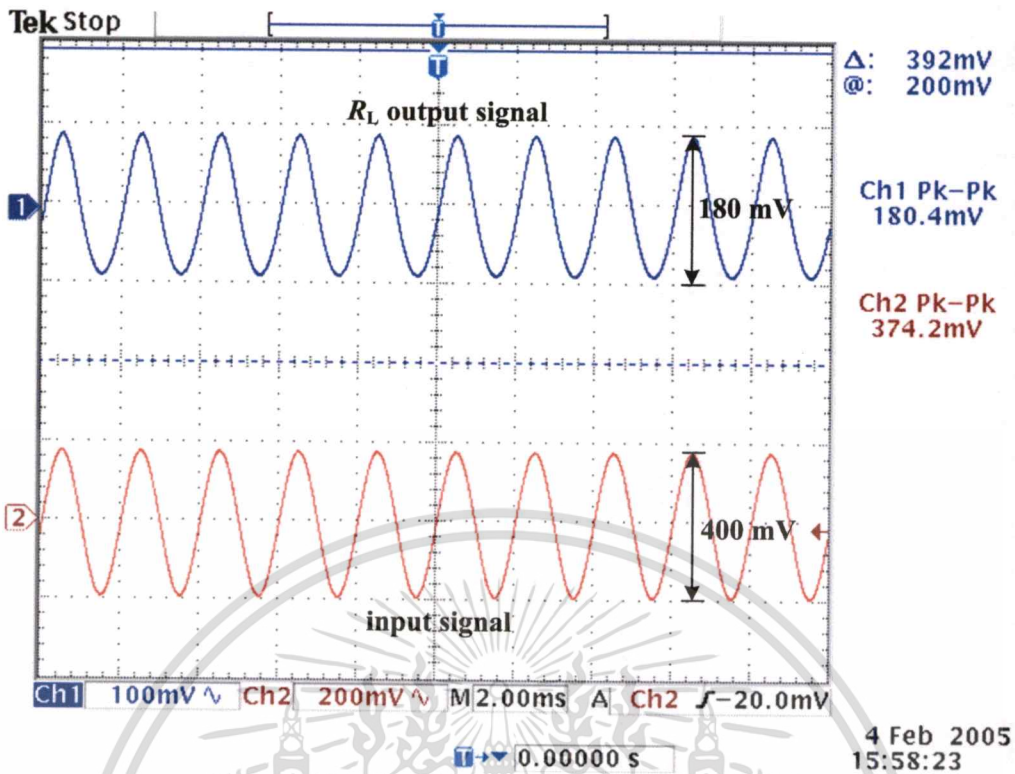
#### 5.3.1 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นกับโหลดความต้านทาน

ทำการวัดลักษณะการตอบสนองสัญญาณรูปไซน์ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm, กำลังงาน 2.68 mW ซึ่งถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด  $400 \text{ mV}_{pp}$  เข้ากับแสงเลเซอร์ ซึ่งความถี่ของคลื่นรูปไซน์จะเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 100 Hz-4 MHz โหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) มีค่าระหว่าง 100  $\Omega$ , 500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$  ที่แรงดันไบแอส ( $V_A$ ) เท่ากับ 10 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.20

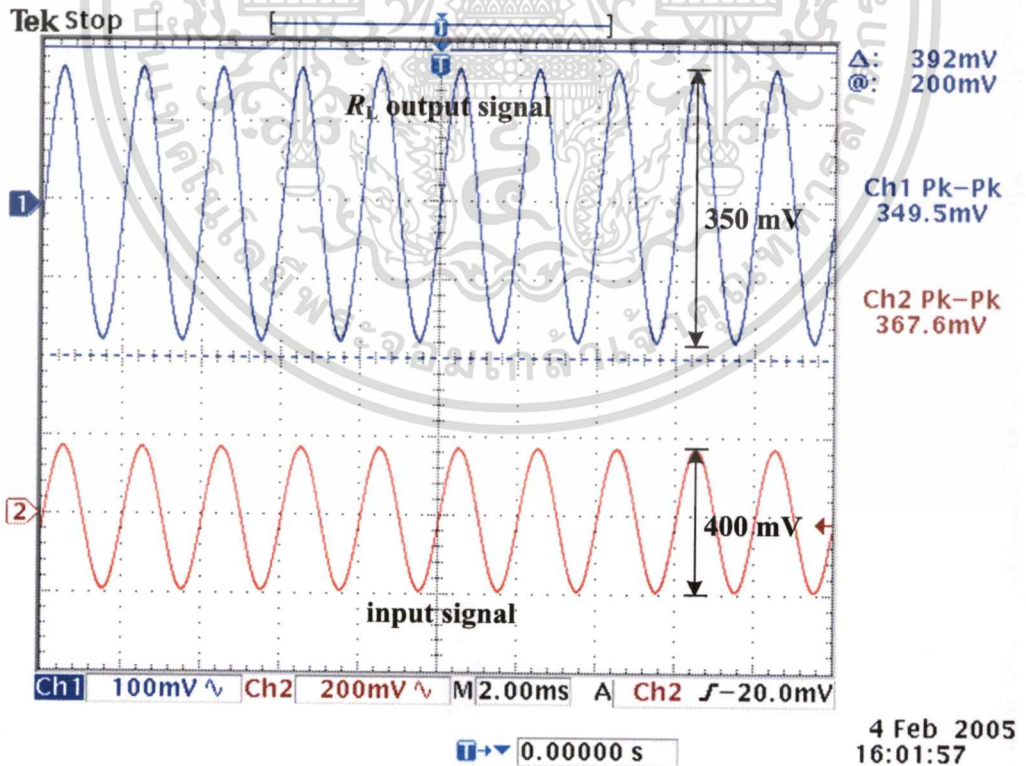


รูปที่ 5.20 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ให้แรงดันไบแอส ( $V_A$ ) คงที่ที่ 10 โวลต์

รูปที่ 5.21 และ 5.22 เป็นกราฟที่ได้จากการวัดโดยออสซิลโลสโคปโดยโหลดความต้านทานมีค่าเท่ากับ 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$  ตามลำดับ โดยมีแรงดันไบแอสที่คงที่ที่แรงดัน 10 โวลต์ ซึ่งสัญญาณที่ป้อนให้กับเลเซอร์ ดังแสดงใน CH 1 เป็นสัญญาณรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดความถี่ (function generator) มีค่าแรงดันประมาณ 400 mV p-p และสัญญาณที่ได้จากการวัด ดังแสดงใน CH 2 ซึ่งสัญญาณที่ได้จะเป็นในลักษณะรูปไซน์เหมือนกับแหล่งจ่าย



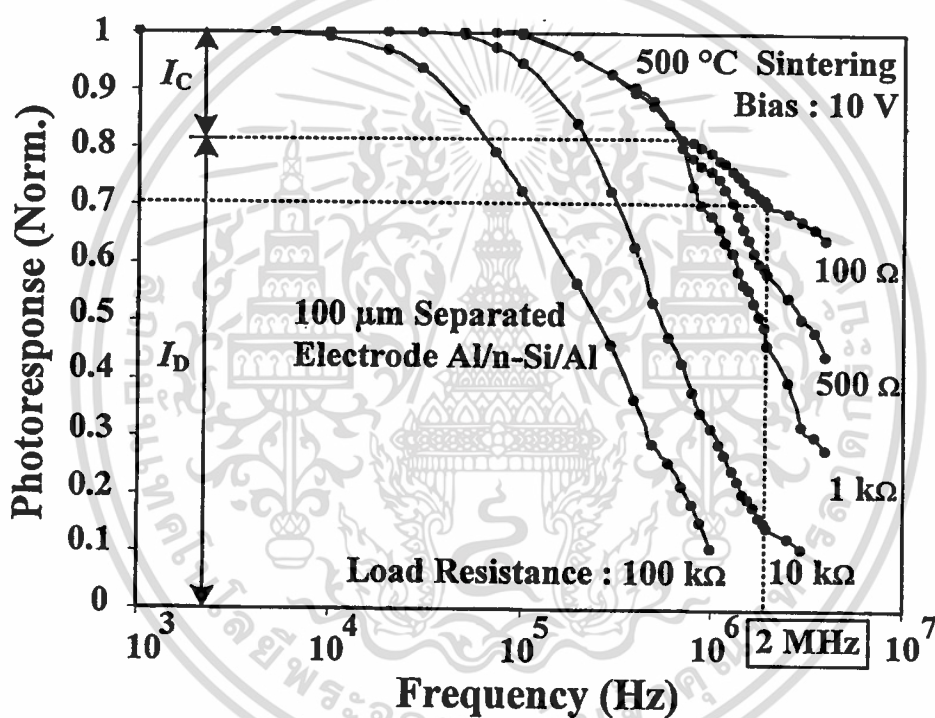
รูปที่ 5.21 กราฟจากออสซิลโลสโคปของโหลดความต้านทาน  $10\text{ k}\Omega$  แรงดันไบแอส 10 โวลต์



รูปที่ 5.22 กราฟจากออสซิลโลสโคปของโหลดความต้านทาน  $100\text{ k}\Omega$  แรงดันไบแอส 10 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

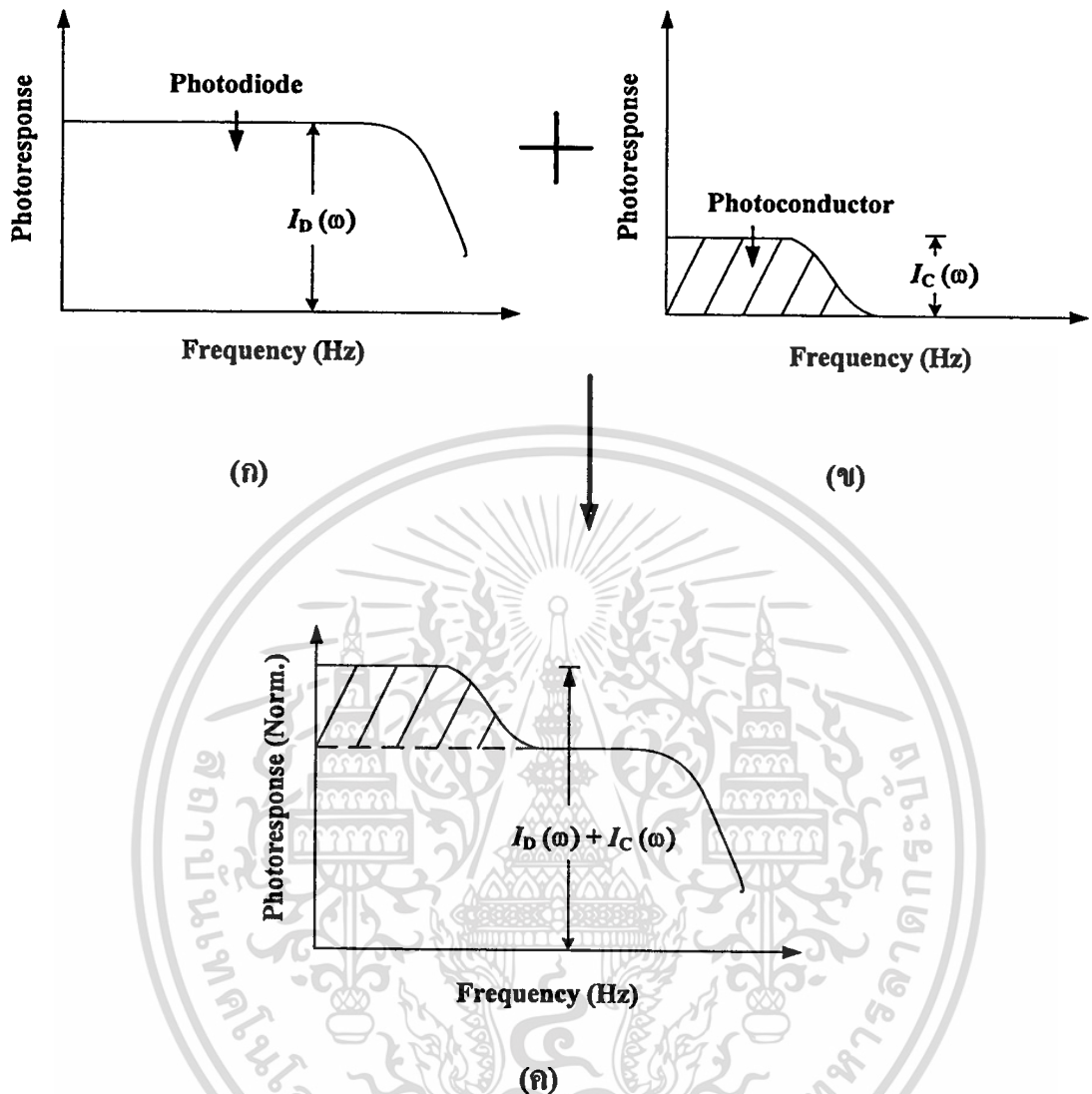
รูปที่ 5.23 แสดงลักษณะการตอบสนองทางแสงสำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  และนำโพลความต้านทานมาต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ โดยให้โพลความต้านทานมีค่าระหว่าง 100  $\Omega$  ถึง 100 k $\Omega$  แรงดันไบแอสเท่ากับ 10 โวลต์ จากการทดลองพบว่าเส้นกราฟของโพลความต้านทานที่มีค่าน้อย คือ ในกรณีที่โพลความต้านทานเป็น 100  $\Omega$ -1 k $\Omega$  การตอบสนองทางแสงจะมีลักษณะที่เป็นสองช่วง โดยช่วงแรกเป็นผลจากบริเวณนิวทรัล ส่วนช่วงที่สองเป็นผลของบริเวณปลอดพาหะ โดยที่โพลความต้านทาน 100  $\Omega$  มีความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) ประมาณ 2 MHz ส่วนที่โพลความต้านทานค่ามาก คือ 10-100 k $\Omega$  ขนาดสัญญาณจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลเนื่องมาจากค่าคงที่ของเวลา (RC time constant) มีค่ามากขึ้นจึงทำให้เห็นการตอบสนองในช่วงเดียว



รูปที่ 5.23 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  โพลความต้านทานมีค่า 100  $\Omega$ , 500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่ากระแสแสงประกอบด้วยสองส่วน คือ กระแสแสงที่มาจากบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นกระแสแสงส่วนมากของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อ normalized แล้วมีค่ากระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) ประมาณ 0.82 ของกระแสรวม และส่วนที่เกิดจากบริเวณนิวทรัล เมื่อ normalized แล้วจะมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ ) ประมาณ 0.18 ดังแสดงในรูปที่ 5.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



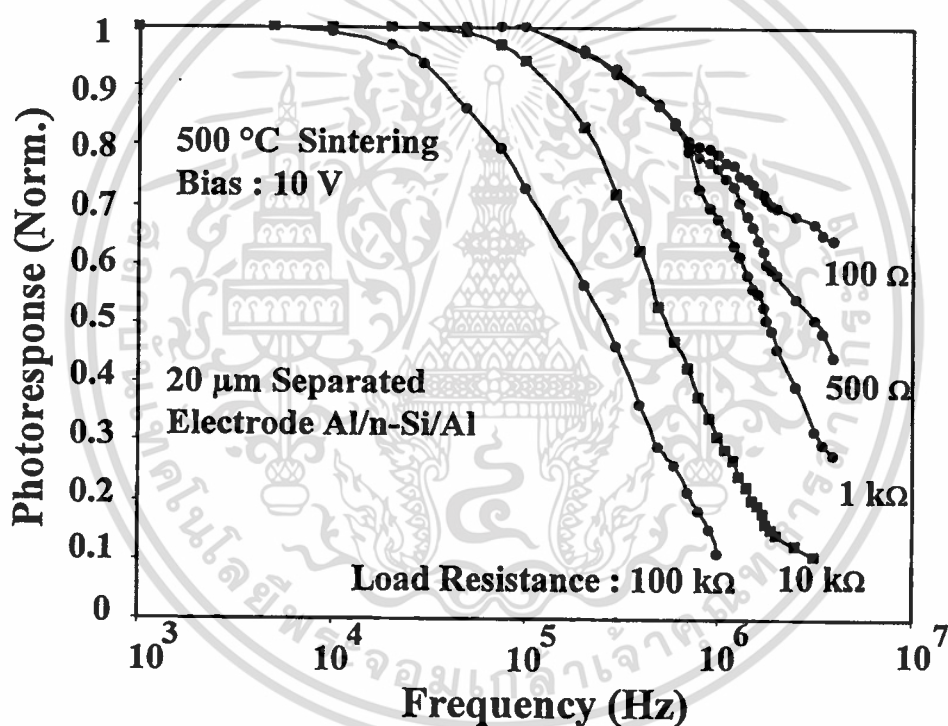
รูปที่ 5.24 ลักษณะการตอบสนองทางแสง (ก) กระแสแสงไดโอด  
 (ข) กระแสแสงคอนดักเตอร์  
 (ค) การตอบสนองทางแสงรวม

รูปที่ 5.24 เป็นกราฟลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ซึ่งประกอบไปด้วย (ก) กระแสแสงไดโอด ที่มีขนาดของสัญญาณมากกว่า กระแสแสงคอนดักเตอร์ (ข) และมีการตอบสนองต่อสัญญาณที่มีความถี่ที่สูงกว่า ส่วนในรูป (ค) เป็นการตอบสนองทางแสงรวมระหว่างกระแสแสงไดโอดและกระแสแสงคอนดักเตอร์ของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 20 ถึง 500  $\mu\text{m}$  ซึ่งจะอธิบายการเกิดส่วนประกอบกระแสทั้งสองส่วน ดังผลการทดลองที่ผ่านมา

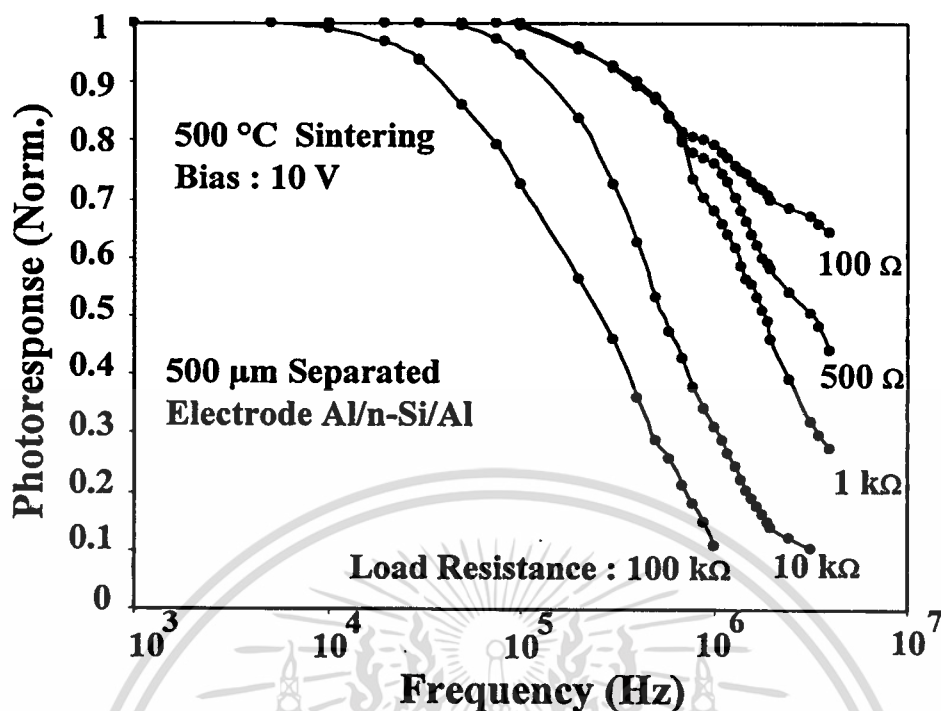
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 $\mu\text{m}$

นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ได้จากการสร้างและผ่านการทดลองการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันแบบกระแสตรง มาทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงเพื่อศึกษาการตอบสนองทางแสงและเพื่อยืนยันถึงผลรวมของกระแสแสงที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  ซึ่งเกิดจากกระแสแสงไดโอดและกระแสแสงคอนดักเตอร์ โดยโหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) มีค่าระหว่าง 100  $\Omega$ , 500  $\Omega$ , 1  $\text{k}\Omega$ , 10  $\text{k}\Omega$  และ 100  $\text{k}\Omega$  ที่แรงดันไบแอส ( $V_A$ ) เท่ากับ 10 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.25 เป็นอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  ส่วนในรูปที่ 5.26 เป็นอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 500  $\mu\text{m}$

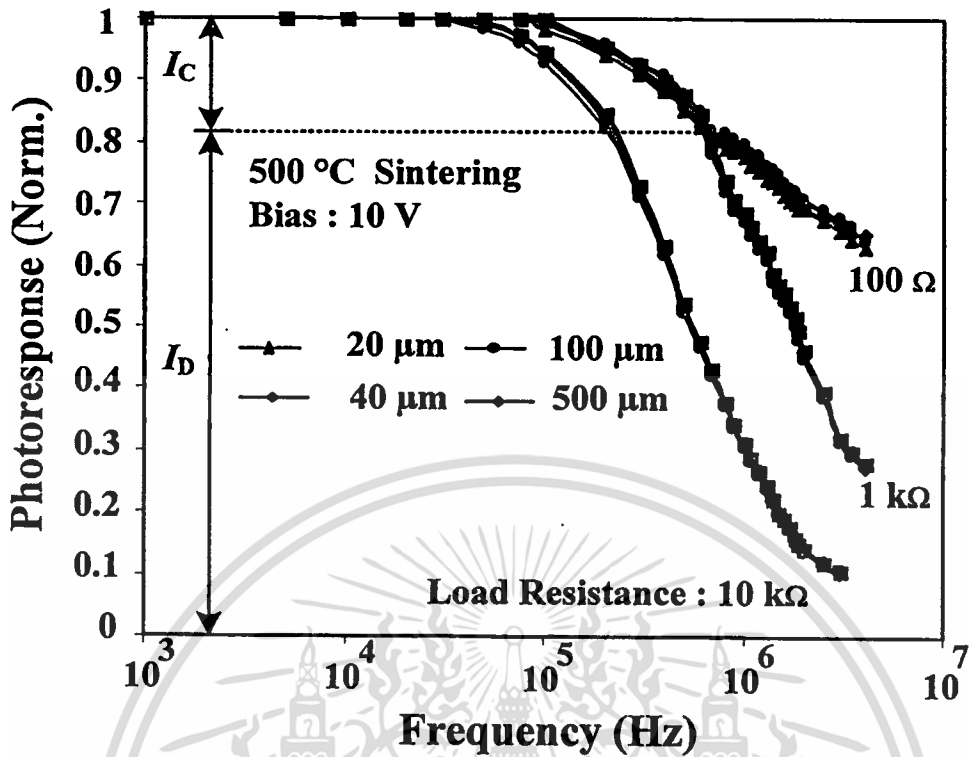


รูปที่ 5.25 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  แรงดัน ไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า 100  $\Omega$ , 500  $\Omega$ , 1  $\text{k}\Omega$ , 10  $\text{k}\Omega$  และ 100  $\text{k}\Omega$  ตามลำดับ



รูปที่ 5.26 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 500  $\mu\text{m}$  แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า 100  $\Omega$ , 500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$  ตามลำดับ

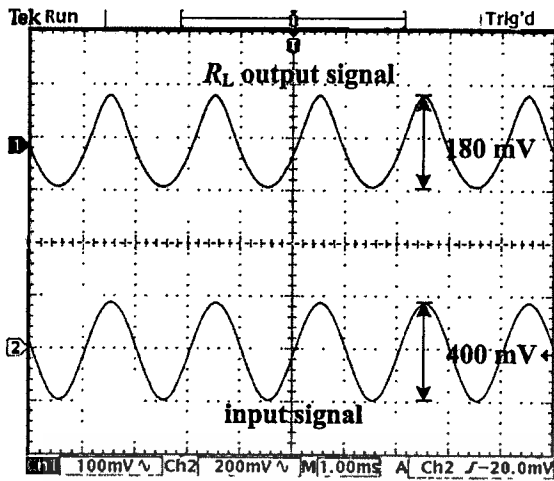
รูปที่ 5.27 เป็นรูปลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า 100  $\Omega$ , 1k $\Omega$  และ 10 k $\Omega$  ตามลำดับ พบว่า ผลการตอบสนองทางแสงเมื่อ نرمอลไลซ์ (normalized) แล้วมีลักษณะการตอบสนองทางแสงเหมือนกัน ประกอบไปด้วยสองช่วง และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ กระแสที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะมีค่ากระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) ประมาณ 0.82 ของกระแสรวม และส่วนที่เกิดจากบริเวณนิวทรัล เมื่อ نرمอลไลซ์แล้วจะมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ ) ประมาณ 0.18 ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะมีค่าเท่าเดิม เนื่องจากแรงดันไบแอสที่ให้กับอุปกรณ์มีค่าคงที่ และกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณนิวทรัลมีค่าเท่าเดิมจะขึ้นอยู่กับระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$



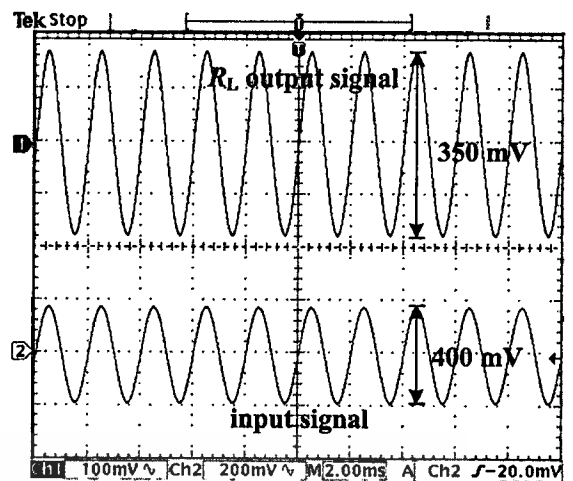
รูปที่ 5.27 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า ระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า 100  $\Omega$ , 1k $\Omega$  และ 10k $\Omega$  ตามลำดับ

### 5.3.3 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส

ทำการวัดลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ซึ่งมีการทดลองดังรูปที่ 5.18 โดยเปลี่ยนแรงดันไบแอส ( $V_A$ ) ที่ให้กับอุปกรณ์มีค่าระหว่าง 1.5, 3, 5 และ 10 โวลต์ ตามลำดับ และ โหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) คงที่มีค่าเท่ากับ 100  $\Omega$  เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงดันไบแอสที่มีต่ออุปกรณ์ ในรูปที่ 5.28 เป็นกราฟที่ได้จากการวัดโดยออกสซิลโลสโคปโดยโหลดความต้านทานมีค่าคงที่เท่ากับ 100 k $\Omega$  โดยมีแรงดันไบแอสที่ 1.5 และ 10 โวลต์ ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 5.29 เป็นอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  โดยแกนตั้งเป็นการตอบสนองของโหลดความต้านทานที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์ ส่วนแกนนอนเป็นความถี่ที่ใช้ในการทดลองในแบบกราฟ log

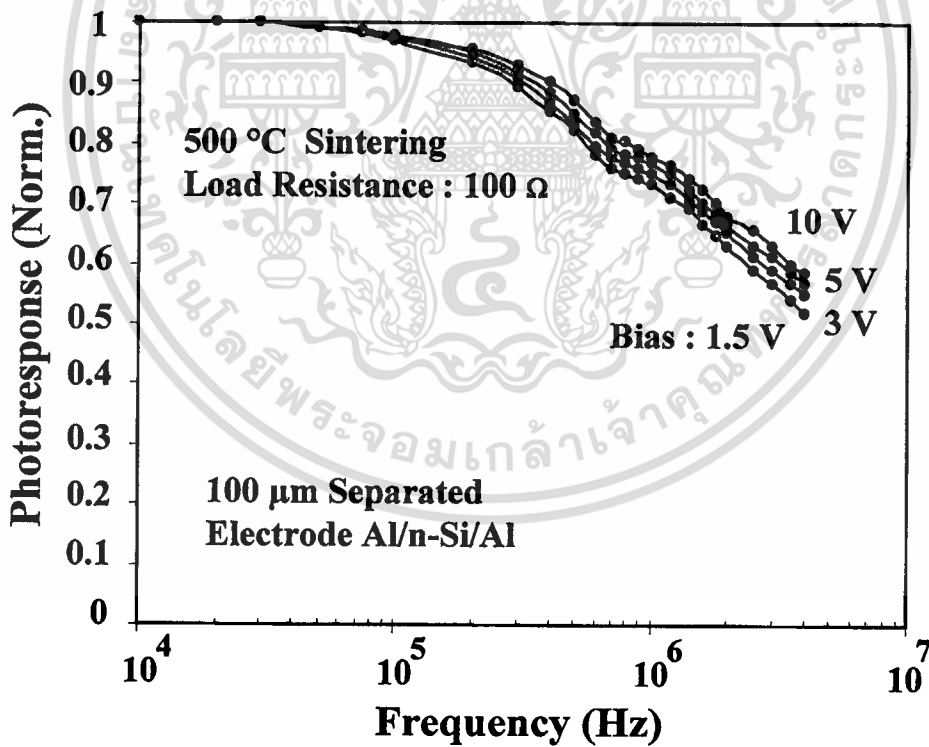


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.28 กราฟจากออสซิลโลสโคปของโหนดความต้านทาน 100 kΩ ที่แรงดันไบแอส (ก) 1.5 โวลต์ (ข) 10 โวลต์



รูปที่ 5.29 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm โหนดความต้านทานมีค่า 100 Ω แรงดันไบแอส 1.5, 3, 5 และ 10 โวลต์ ตามลำดับ

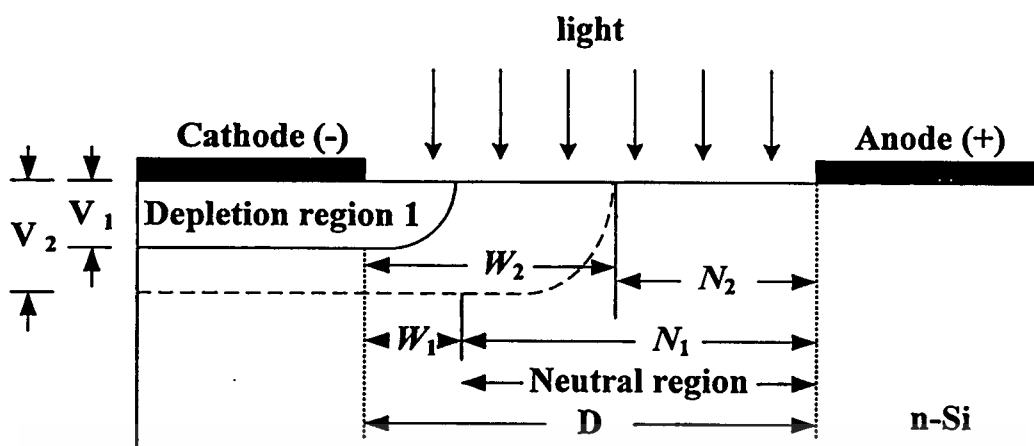
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$   
โหนดความต้านทานมีค่า 100  $\Omega$

Applied Bias (V)	Normalized ( $I_D + I_C = 1$ )		Cutoff frequency (MHz)
	$I_D(\omega)$	$I_C(\omega)$	
1.5	0.76	0.24	1.5
3	0.77	0.23	1.6
5	0.79	0.21	1.7
10	0.82	0.18	2

จากรูปที่ 5.29 พบว่าลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al มีลักษณะการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบแอสที่ให้กับอุปกรณ์ โดยเป็นผลมาจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ( $W$ ) (จากระยะขอบของขั้วไฟฟ้าที่ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบแอส ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรงที่ผ่านมา และจากพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่ากระแสแสงที่ได้จากบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นกระแสส่วนใหญ่ของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงดันไบแอสที่มากขึ้น โดยที่แรงดันไบแอสที่ 1.5 , 3, 5 และ 10 โวลต์ เมื่อนอร์มอลไลซ์ (normalized) แล้วมีค่ากระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) ประมาณ 0.76, 0.77, 0.79 และ 0.82 ตามลำดับ ส่วนกระแสที่ได้จากบริเวณนิวทรัล ( $N$ ) ซึ่งเป็นกระแสส่วนน้อยของอุปกรณ์ เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้ว มีค่าที่ลดลงตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณปลอดพาหะขยายตัวเพิ่มขึ้น เป็นผลให้บริเวณนิวทรัลมีความกว้างลดลง (เนื่องจากระยะห่างขั้วไฟฟ้า ( $D$ ) เป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณนิวทรัล) ดังสมการที่ (5.7) โดยที่แรงดันไบแอสที่ 1.5 , 3, 5 และ 10 โวลต์ เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้วมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ ) ประมาณ 0.24, 0.23, 0.21 และ 0.18 ตามลำดับ

$$D = W + N \quad (5.7)$$



รูปที่ 5.30 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดัน โปแอตสูงขึ้น ส่วนบริเวณนิวทรัลมีความกว้างที่ลดลงเมื่อแรงดัน โปแอตสูงขึ้น ซึ่งบริเวณทั้งสองส่วนรวมกันเท่ากับระยะห่างขั้วไฟฟ้า

ส่วนความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) ของอุปกรณ์มีลักษณะการตอบสนองทางแสงที่เพิ่มขึ้นตามแรงดัน โปแอต เนื่องจากความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ( $C_j$ ) มีค่าแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ ทำให้เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดัน โปแอตมากขึ้นเป็นผลให้ความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าลดลง ดังสมการที่ (5.8) [1] โดยที่แรงดัน โปแอต 1.5, 3, 5 และ 10 โวลต์ เมื่อนอร์มอลไลซ์ แล้วมีลักษณะการตอบสนองทางแสงที่ความถี่คัทออฟประมาณ 1.5, 1.6, 1.7 และ 2 MHz ตามลำดับ

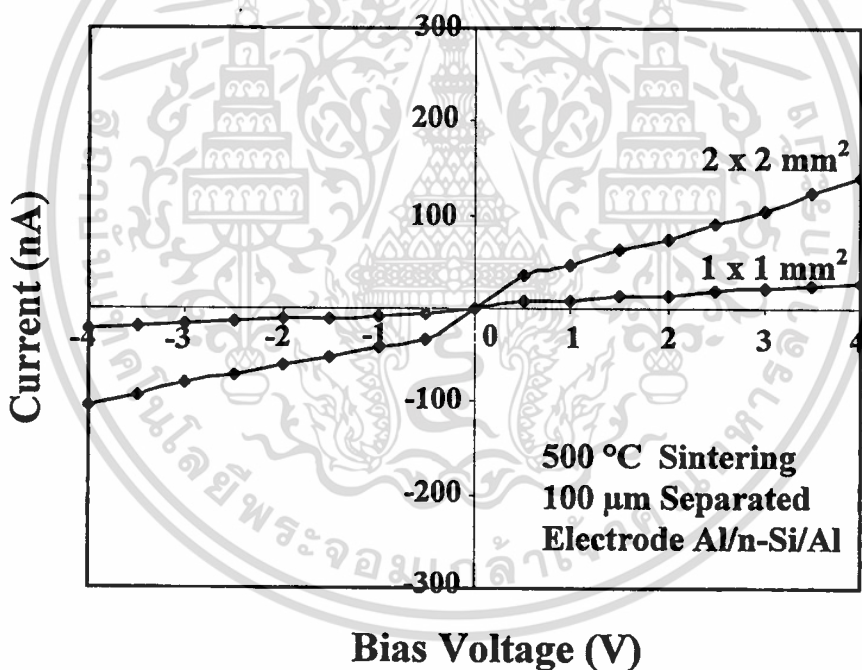
$$C_j = \frac{\epsilon A}{w} \quad (5.8)$$

#### 5.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของขั้วไฟฟ้า

จากการทดลองที่ผ่านมาเป็นการทดลองที่อุปกรณ์มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มกระแสแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ให้มากขึ้น จึงเพิ่มขนาดของพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์ให้มีขนาดมากขึ้น โดยเปลี่ยนขนาดของขั้วไฟฟ้าให้มีขนาด  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  แล้ววัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของอุปกรณ์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่ออุปกรณ์ Al/n-Si/Al มีขนาดของขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป

#### 5.4.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

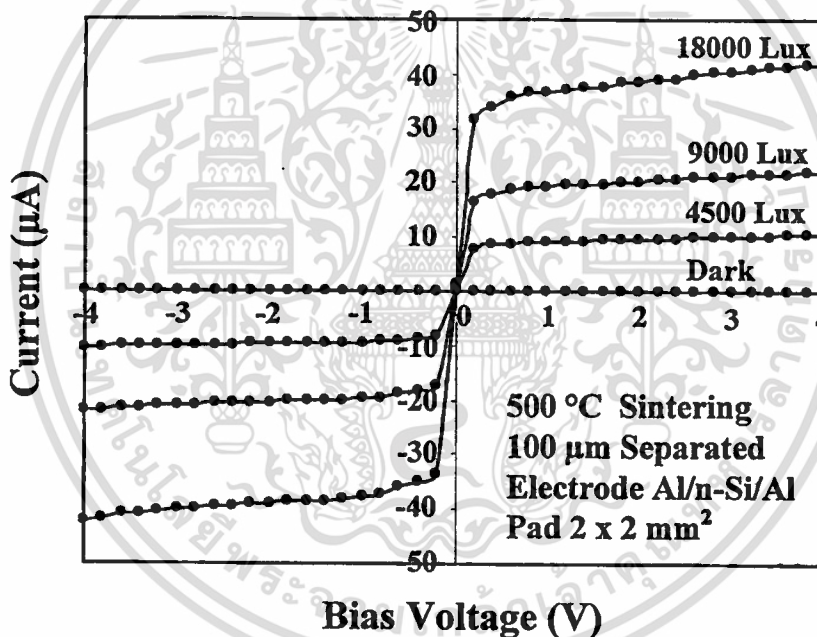
ทำการทดลองหากระแสมีดของอุปกรณ์เมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  และเปรียบเทียบผลของกระแสมีดของอุปกรณ์ที่ได้จากการทดลองที่ 5.3.1 ดังแสดงในรูปที่ 5.31 พบว่ากระแสมีดของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้ามีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังสมการที่ (5.1) ซึ่งกระแสมีดของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของขั้วโลหะที่นำมาสัมผัส เป็นผลให้เมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่รอยสัมผัสเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแสมีดของอุปกรณ์จึงมีค่ามากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  หลังจากทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  กระแสมีดที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ มีค่ากระแสมีดประมาณ  $20 \text{ nA}$  ส่วนอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  เมื่อทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  กระแสมีดที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ มีค่ากระแสมีดประมาณ  $150 \text{ nA}$



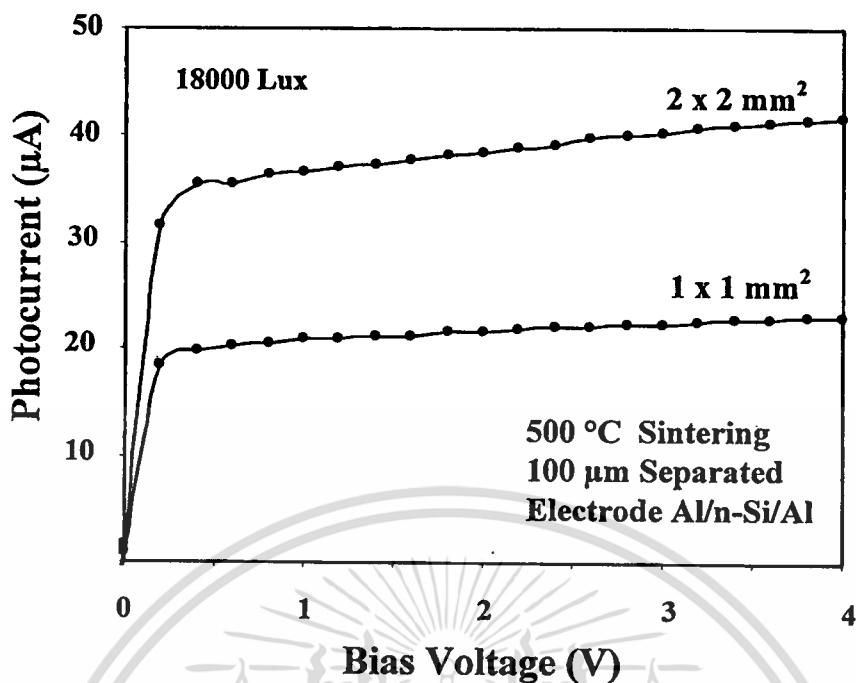
รูปที่ 5.31 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิ  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยที่อุปกรณ์มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$

#### 5.4.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่า อุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้า  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  แม้ว่าจะมีกระแสรั่วไหลที่ประมาณ  $150 \text{ nA}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้า  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  แต่ยังคงมีความสมมาตรของกราฟคืออยู่ ดังนั้นจึงนำอุปกรณ์มาทำการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันแบบกระแสตรง ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ที่มีความเข้มค่าต่างๆ รวมทั้งกระแสมืด ดังการทดลองที่ 4.3.4 ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.32 พบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มแสง  $4500 \text{ Lux}$ ,  $9000 \text{ Lux}$  และ  $18000 \text{ Lux}$  ที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ จะมีค่ากระแสประมาณ  $10 \text{ }\mu\text{A}$ ,  $20 \text{ }\mu\text{A}$  และ  $40 \text{ }\mu\text{A}$  ตามลำดับ และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น เช่นเดียวกับการทดลองที่ 5.3.2



รูปที่ 5.32 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า  $100 \text{ }\mu\text{m}$  และมีขนาดขั้วไฟฟ้า  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 5.33 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  ขนาดขั้วไฟฟ้า 1 x 1  $\text{mm}^2$  และ 2 x 2  $\text{mm}^2$  ตามลำดับ

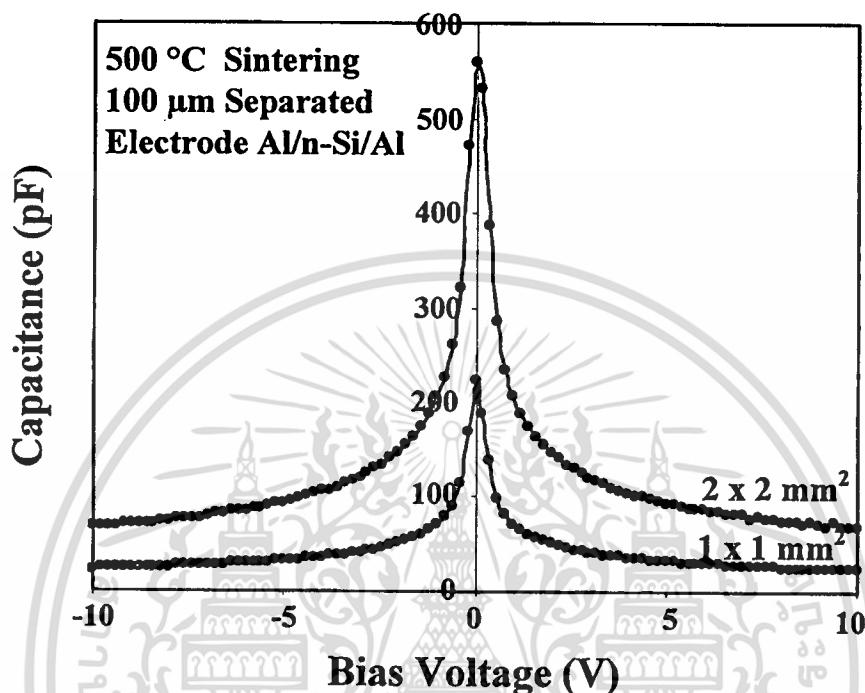
รูปที่ 5.33 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  ขนาดขั้วไฟฟ้า 1 x 1  $\text{mm}^2$  และ 2 x 2  $\text{mm}^2$  พบว่ากระแสแสงของอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าที่ใหญ่กว่าจะได้กระแสแสงที่มากกว่า (โดยกระแสแสงหาได้จากสมการที่ (5.4)) ซึ่งการเพิ่มขนาดขั้วไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์ให้มากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้า 1 x 1  $\text{mm}^2$  และ 2 x 2  $\text{mm}^2$  ที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ มีกระแสแสงประมาณ 24  $\mu\text{A}$  และ 42  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ

5.4.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป

นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้า 2 x 2  $\text{mm}^2$  โดยผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิ 500  $^{\circ}\text{C}$  มาทำการหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดันไบแอส ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบนตัวอุปกรณ์ เพื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้า 1 x 1  $\text{mm}^2$  ที่ได้จากการทดลองที่ 5.2 ซึ่งลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 5.34 โดยพบว่า ความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้ามีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังสมการที่ (5.8) ซึ่งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของขั้วโลหะที่นำมาสัมผัส เป็นผลให้เมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้ามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

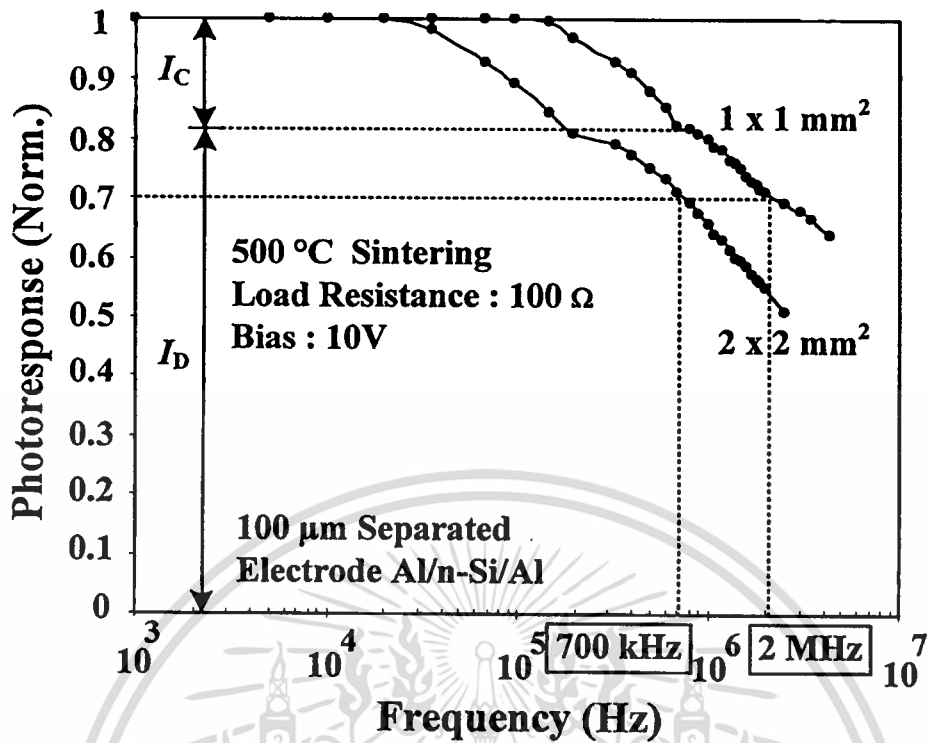
ขนาดเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่รอยสัมผัสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์จึงมีค่ามากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบแอส 10 โวลต์ มีค่าประมาณ 25 pF ส่วนอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  ความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบแอส 10 โวลต์ มีค่าประมาณ 70 pF



รูปที่ 5.34 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ

#### 5.4.4 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปในแบบสัญญาณแสงกระแสลับ

นำเอาอุปกรณ์มาทำการหาลักษณะการตอบสนองทางแสงเมื่อได้รับแรงดันไบแอส เพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า  $100 \mu\text{m}$  แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า  $100 \Omega$  โดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้า  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  ตามลำดับ ในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบในแบบสัญญาณแสงกระแสลับ ดังแสดงในรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu$ m แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า 100  $\Omega$  โดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้า 1 x 1 mm<sup>2</sup> และ 2 x 2 mm<sup>2</sup> ตามลำดับ

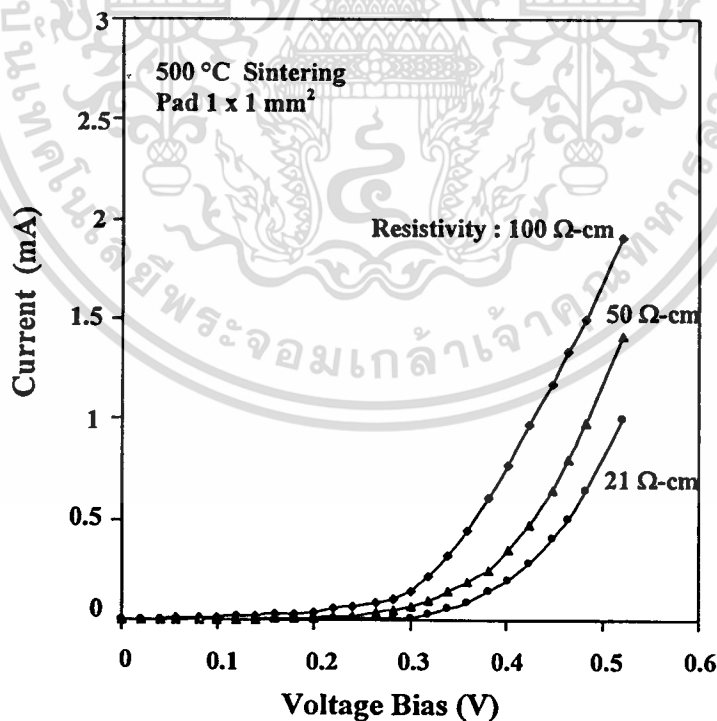
รูปที่ 5.35 เป็นลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al โดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้า 1 x 1 mm<sup>2</sup> และ 2 x 2 mm<sup>2</sup> พบว่าลักษณะการตอบสนองทางแสงจะมีลักษณะเป็นสองช่วงเช่นเดียวกับผลการทดลองที่ 5.3 คือ กระแสแสงที่มาจากบริเวณปลอดพาหะ เมื่อนอร์มอลไลซ์ (normalized) แล้วมีค่ากระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) ประมาณ 0.82 ของกระแสรวม และส่วนที่เกิดจากบริเวณนิวทรัล เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้วจะมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ ) ประมาณ 0.18 แต่ความถี่คัทออฟของอุปกรณ์จะมีค่าต่างกัน โดยอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้า 1 x 1 mm<sup>2</sup> มีลักษณะการตอบสนองทางแสงที่ความถี่คัทออฟประมาณ 2 MHz ส่วนอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าที่ใหญ่ขึ้น คือ 2 x 2 mm<sup>2</sup> มีความถี่คัทออฟที่ต่ำลงมีค่าประมาณ 700 kHz ซึ่งเป็นผลของความจุไฟฟ้าที่มากขึ้นเมื่อขนาดของขั้วโลหะมีค่ามากขึ้น เป็นผลให้ค่าคงที่ของเวลา (RC time constant) มีค่ามากขึ้น

## 5.5 ผลการทดลองลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ขึ้นอยู่กับสภาพต้านทานของซิลิคอน

จากการทดลองที่ผ่านมาเป็นการทดลองที่อุปกรณ์มีสภาพต้านทานของซิลิคอน ( $\rho$ ) เท่ากับ 21  $\Omega$ -cm ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ จึงทำการทดลองโดยเปลี่ยนค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนให้มีค่าเท่ากับ 50  $\Omega$ -cm และ 100  $\Omega$ -cm แล้ววัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของอุปกรณ์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่ออุปกรณ์ Al/n-Si/Al มีสภาพต้านทานของซิลิคอนที่เปลี่ยนแปลงไป

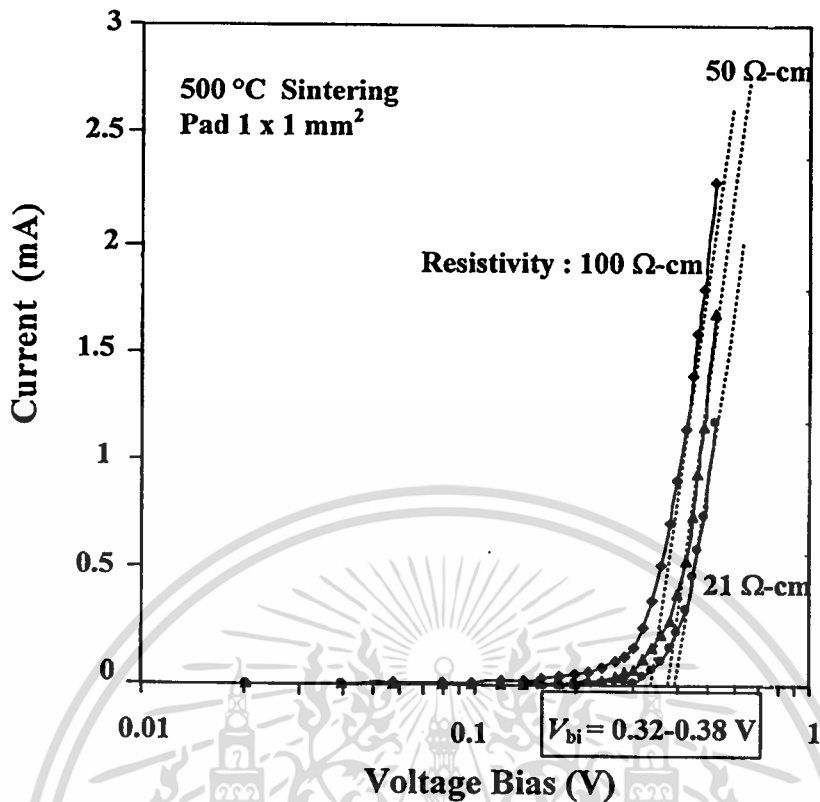
### 5.5.1 ผลการทดลองรอยสัมผัสของอุปกรณ์ในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่ออุปกรณ์มีสภาพต้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป

เนื่องจากตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM เป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกี ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนฐานรองของซิลิคอนให้มีสภาพต้านทานค่าต่างๆ จึงต้องทำการทดสอบอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วและผ่านการขึ้นเตาจริงที่อุณหภูมิ 500  $^{\circ}\text{C}$  ว่ามีรอยสัมผัสแบบใด ซึ่งลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 5.36 ส่วนรูปที่ 5.37 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ โดยเปลี่ยนแกนนอนที่เป็นแรงดัน ไบแอส ให้เป็นกราฟแบบ log เพื่อหาค่าแรงดันภายใน ( $V_{bi}$ ) ของอุปกรณ์



รูปที่ 5.36 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ ที่สภาพต้านทานของซิลิคอน 21  $\Omega$ -cm, 50  $\Omega$ -cm และ 100  $\Omega$ -cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 การหาแรงดันภายในของรอยสัมผัส ที่สภาพต้านทานของซิลิคอน 21  $\Omega$ -cm, 50  $\Omega$ -cm และ 100  $\Omega$ -cm

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.37 พบว่าแรงดันภายใน ( $V_{bi}$ ) ของอุปกรณ์มีค่าลดลงเมื่อสภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (5.10) [1] โดยที่สภาพต้านทานของซิลิคอน 21  $\Omega$ -cm, 50  $\Omega$ -cm และ 100  $\Omega$ -cm มีแรงดันภายในเท่ากับ 0.38, 0.36 และ 0.32 V ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ ดังตารางที่ 5.2 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

$$N_D = \frac{1}{pq\mu_n} \quad (5.9)$$

นำค่า  $N_D$  ที่ได้แทนค่าลงในสมการที่ (5.10)

$$V_{bi} = \frac{1}{q} \left[ q\phi_{bn} - \left( \frac{E_g}{2} - kT \ln \frac{N_D}{n_i} \right) \right] \quad (5.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $N_D$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $\text{cm}^{-3}$ )

$\mu_n$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอน ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ) ซิลิคอนมีค่าเท่ากับ  $1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$

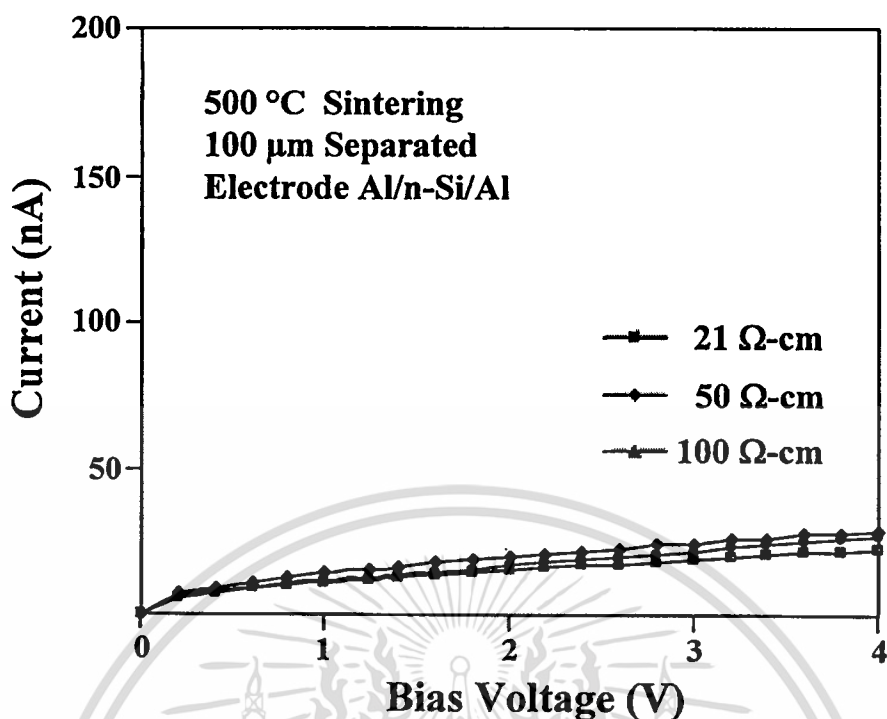
$n_i$  คือ ความหนาแน่นอินทรินซิก ( $\text{cm}^{-3}$ ) ของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ  $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบแรงดันภายในที่ได้จากการวัดและการคำนวณเมื่ออุปกรณ์มีสภาพด้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนไป

$\rho$ ( $\Omega\text{-cm}$ )	$N_D$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$V_{bi}$ (Mea) (V)	$V_{bi}$ (Cal) (V)
21	$2.2 \times 10^{14}$	0.38	0.39
50	$9.2 \times 10^{13}$	0.36	0.37
100	$4.6 \times 10^{13}$	0.32	0.34

### 5.5.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีสภาพด้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

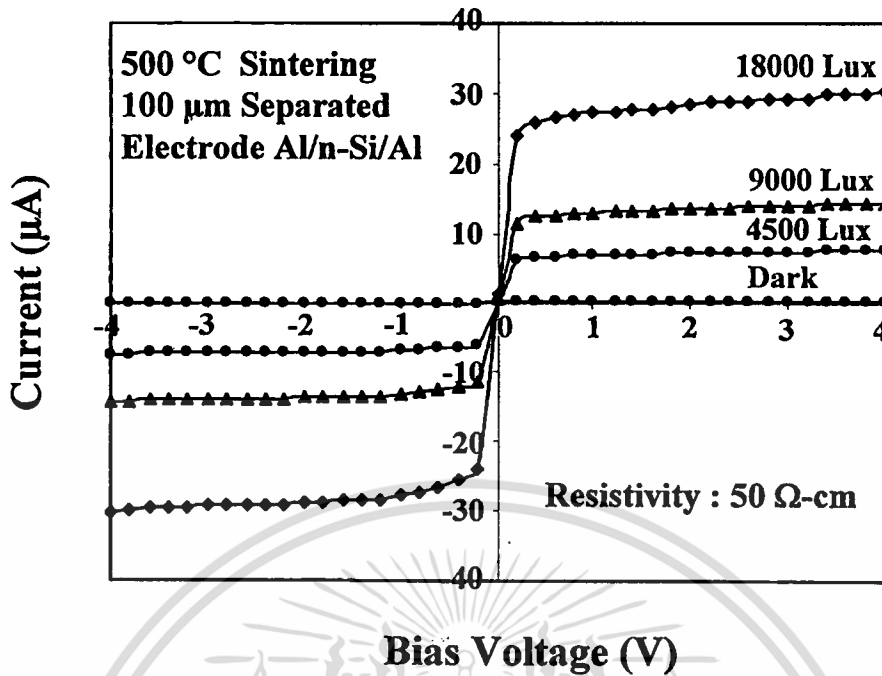
ทำการทดลองหากระแสมีดของอุปกรณ์เมื่อสภาพด้านทานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21  $\Omega\text{-cm}$ , 50  $\Omega\text{-cm}$  และ 100  $\Omega\text{-cm}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.38 พบว่ากระแสมีดของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งกระแสมีดของอุปกรณ์จะขึ้นไม่อยู่กับสภาพด้านทานที่นำมาทำตัวตรวจวัดแสง เป็นผลให้เมื่อสภาพด้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป กระแสมีดของอุปกรณ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่อุปกรณ์หลังจากทำการชินเตอริงที่อุณหภูมิ 500  $^{\circ}\text{C}$  กระแสมีดที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ มีค่ากระแสมีดประมาณ 20 ถึง 30 nA



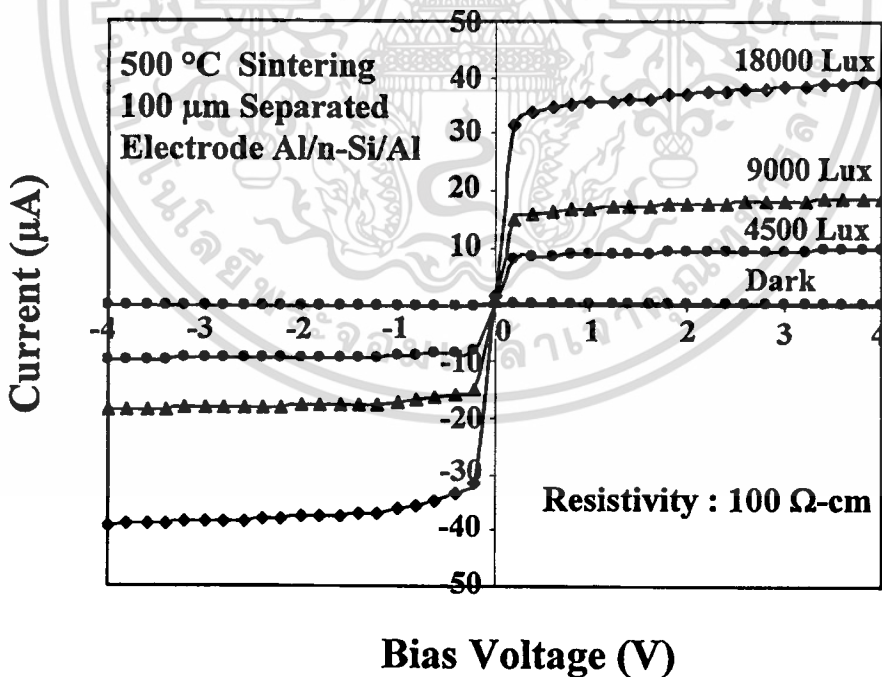
รูปที่ 5.38 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงอุณหภูมิตั้งที่ 500 °C ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยที่อุปกรณ์มีสภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21 Ω-cm, 50 Ω-cm และ 100 Ω-cm ตามลำดับ

### 5.5.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีสภาพต้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไปในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

นำอุปกรณ์ที่ได้จากการสร้างซึ่งมีสภาพต้านทานของซิลิคอนค่าต่างๆ กัน มาทำการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันแบบกระแสตรง ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ที่มีความเข้มค่าต่างๆ รวมทั้งกระแสเสียดังการทดลองที่ 4.3.4 ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.39 เป็นผลการทดลองที่สภาพต้านทาน 50 Ω-cm และรูปที่ 5.40 เป็นผลการทดลองที่สภาพต้านทาน 100 Ω-cm พบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และจะมีกระแสมากขึ้นเมื่อสภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่ามากขึ้น โดยที่ความเข้มแสง 4500 Lux, 9000 Lux และ 18000 Lux ที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ ที่สภาพต้านทาน 50 Ω-cm จะมีค่ากระแสประมาณ 8 μA, 16 μA และ 32 μA ตามลำดับ ส่วนที่สภาพต้านทาน 100 Ω-cm จะมีค่ากระแสประมาณ 9 μA, 18 μA และ 38 μA ตามลำดับ และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับการทดลองที่ 5.3.2



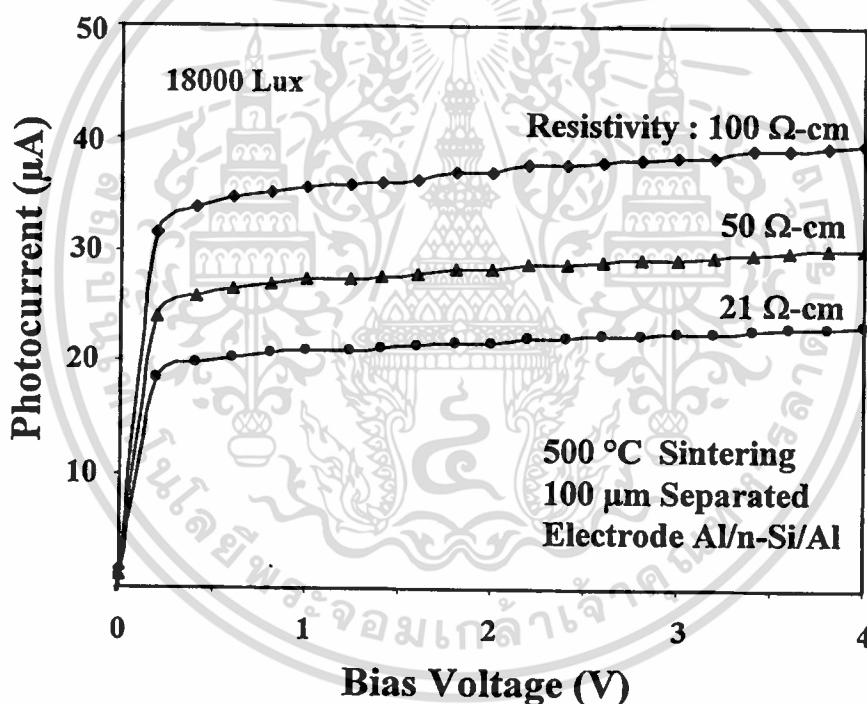
รูปที่ 5.39 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  และมีสภาพต้านทานของซิลิคอน 50  $\Omega\text{-cm}$  เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



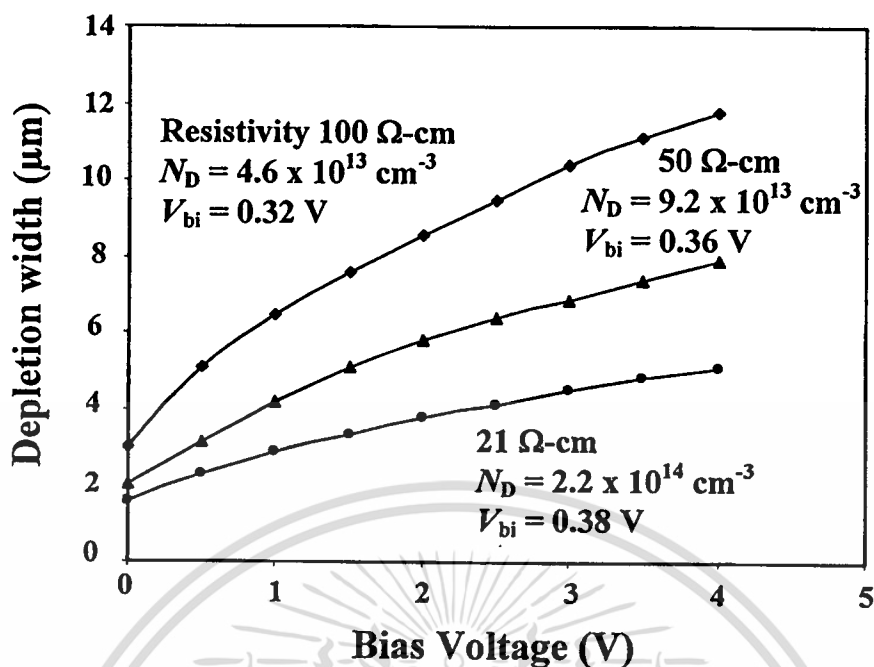
รูปที่ 5.40 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  และมีสภาพต้านทานของซิลิคอน 100  $\Omega\text{-cm}$  เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการหากระแสแสงของอุปกรณ์ โดยใช้สมการกระแสแสงจากสมการที่ (5.4) แล้วทำการหาความสัมพันธ์กระแสแสง-แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 5.41 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  และผ่านกระบวนการซินเทอริงที่อุณหภูมิ 500  $^{\circ}\text{C}$  พบว่ากระแสแสงของอุปกรณ์ที่มีสภาพต้านทานของซิลิคอนค่าที่มากกว่าจะได้กระแสแสงที่มากกว่า โดยเป็นผลมาจากบริเวณปลอดพาหะที่ขยายตัวได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.42 ซึ่งเป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่มีสภาพต้านทานแผ่น 7-21  $\Omega\text{-cm}$ , 50  $\Omega\text{-cm}$  และ 100  $\Omega\text{-cm}$  ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (5.7) เป็นผลให้กระแสแสงที่ได้จากบริเวณปลอดพาหะหรือกระแสแสงไดโอดมีค่ามากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่มีสภาพต้านทานแผ่น 21  $\Omega\text{-cm}$ , 50  $\Omega\text{-cm}$  และ 100  $\Omega\text{-cm}$  จะมีค่ากระแสแสงประมาณ 24  $\mu\text{A}$ , 30  $\mu\text{A}$  และ 40  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ



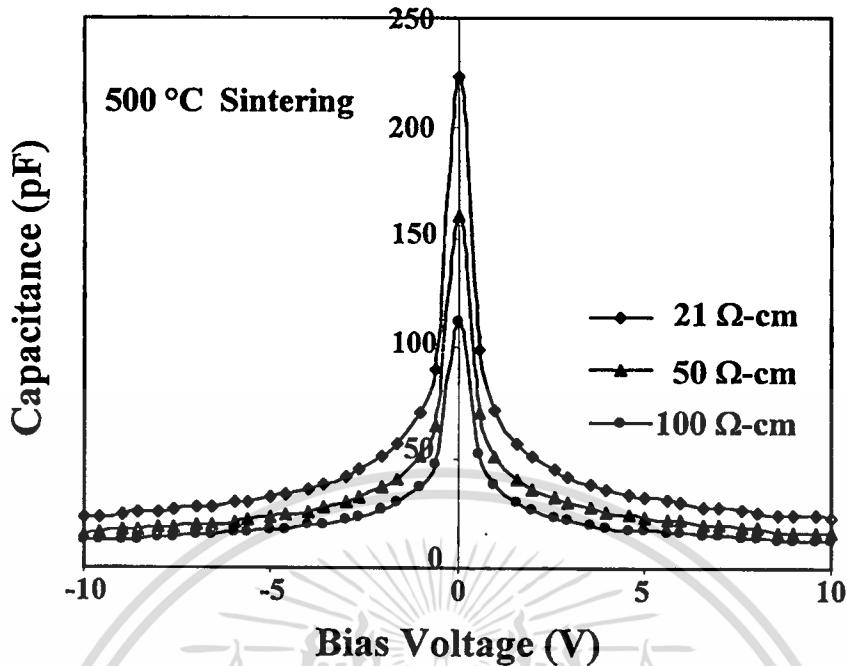
รูปที่ 5.41 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเทอริงอุณหภูมิ 500  $^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  และมีสภาพต้านทานของซิลิคอน 21  $\Omega\text{-cm}$ , 50  $\Omega\text{-cm}$  และ 100  $\Omega\text{-cm}$  เมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบแอสกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่ได้จากการคำนวณ โดยที่สภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21 Ω-cm, 50 Ω-cm และ 100 Ω-cm

#### 5.5.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่ออุปกรณ์มีสภาพต้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป

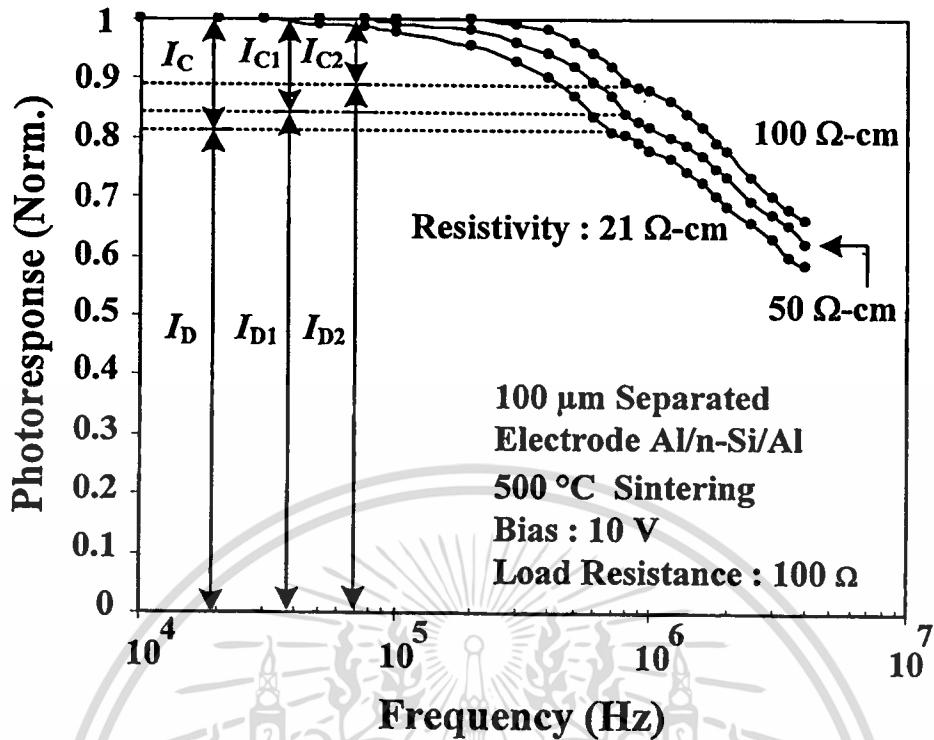
นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีสภาพต้านทาน 50 Ω-cm และ 100 Ω-cm ที่ได้ผ่านการซินเทอริงอุณหภูมิ 500 °C มาทำการหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดันไบแอส ขณะที่ไม่มีการแสดงตกกระทบตัวอุปกรณ์ เพื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีสภาพต้านทาน 21 Ω-cm ซึ่งลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 5.43 โดยพบว่า ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อสภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (5.4) ซึ่งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D$ ) โดยที่สภาพต้านทานค่าที่สูงกว่าจะมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ที่น้อยกว่าเมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าเดียวกัน ดังนั้นความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์จึงมีค่าลดลง โดยอุปกรณ์ที่มีสภาพต้านทานของซิลิคอน 21 Ω-cm, 50 Ω-cm และ 100 Ω-cm มีความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบแอส 10 โวลต์ มีค่าประมาณ 25 pF, 16 pF และ 12 pF ตามลำดับ



รูปที่ 5.43 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีสภาพด้านทานของซิลิคอน 21 Ω-cm, 50 Ω-cm และ 100 Ω-cm เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ

### 5.5.5 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อมีสภาพด้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนไป ในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ

ทำการหาลักษณะการตอบสนองทางแสงเมื่อได้รับแรงดันไบแอส เพื่อยืนยันถึงการเกิดกระแสแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีสภาพด้านทานที่เปลี่ยนไป โดยทดสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ที่ผ่านการซินเตอร์อุณหภูมิ 500 °C โดยมีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm และมีสภาพด้านทานของซิลิคอน 21 Ω-cm, 50 Ω-cm และ 100 Ω-cm ในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ ที่แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทาน 100 Ω โดยแกนตั้งเป็นการตอบสนองของโหลดความต้านทานที่ผ่านกรานอร์มอลไลซ์ ส่วนแกนนอนเป็นความถี่ที่ใช้ในการทดลองในแบบกราฟ log ดังแสดงในรูปที่ 5.44 พบว่าลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al มีลักษณะการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพด้านทานของซิลิคอน โดยเป็นผลมาจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพด้านทาน ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรงที่ผ่านมา



รูปที่ 5.44 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โหลดความต้านทานมีค่า 100 Ω โดยที่สภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21 Ω-cm, 50 Ω-cm และ 100 Ω-cm

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่ออุปกรณ์มีสภาพต้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงไป ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm โหลดความต้านทานมีค่า 100 Ω แรงดันไบแอส 10 โวลต์

Resistivity (Ω-cm)	Normalized ( $I_D + I_C = 1$ )		Cutoff frequency (MHz)
	$I_D(\omega)$	$I_C(\omega)$	
21	0.82	0.18	2
50	0.84	0.16	2.3
100	0.88	0.12	2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่ากระแสแสงที่ได้จากบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นกระแสส่วนใหญ่ของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสภาพต้านทานแผ่นมีค่ามากขึ้น โดยที่สภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21  $\Omega$ -cm, 50  $\Omega$ -cm และ 100  $\Omega$ -cm เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้วมีค่ากระแสแสงไดโอด ประมาณ 0.82, 0.84, 0.88 ตามลำดับ ส่วนกระแสที่ได้จากบริเวณนิวทรัลซึ่งเป็นกระแสส่วนน้อยของอุปกรณ์ เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้วมีค่าที่ลดลงตามสภาพต้านทานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณปลอดพาหะขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยที่สภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21  $\Omega$ -cm, 50  $\Omega$ -cm และ 100  $\Omega$ -cm เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้วมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ประมาณ 0.18, 0.16, 0.12 ตามลำดับ

ส่วนความถี่คัทออฟของอุปกรณ์มีลักษณะการตอบสนองทางแสงที่เพิ่มขึ้นตาม สภาพต้านทานของซิลิคอน เนื่องจากความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ มีค่าแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ ทำให้เมื่ออุปกรณ์มีสภาพต้านทานของซิลิคอนมากขึ้น เป็นผลให้ความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าลดลง โดยที่สภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 21  $\Omega$ -cm, 50  $\Omega$ -cm และ 100  $\Omega$ -cm เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้วมีลักษณะการตอบสนองทางแสงที่ความถี่คัทออฟประมาณ 2, 2.3 และ 2.7 MHz ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลของความจุไฟฟ้าที่ลดลง เมื่อสภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่ามากขึ้น เป็นผลให้ค่าคงที่ของเวลามีค่าลดลง

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอน ส่วนโลหะที่ใช้เป็นอลูมิเนียม ทำให้ได้โครงสร้างชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งมีการสร้างที่ง่าย และมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สร้างเป็นวงจรรวมต่อไปในอนาคต

ตัวตรวจวัดแสงที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 3 แบบ คือ ความกว้างของระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีค่า 20, 40, 100 และ 500  $\mu\text{m}$  ส่วนที่สอง คือ ขนาดของขั้วไฟฟ้า โดยมีขนาดเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  และส่วนสุดท้าย คือ สภาพต้านทานของซิลิคอนที่มีค่าประมาณ 21  $\Omega\text{-cm}$ , 50  $\Omega\text{-cm}$  และ 100  $\Omega\text{-cm}$  จากนั้นนำอุปกรณ์ไปทำการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง

จากการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จจากกระบวนการสร้างโดยไม่ผ่านการซินเตอร์ จะมีกระแสมืดค่าที่สูง และเมื่อได้รับแสงตกกระทบที่พื้นที่รับแสง สามารถใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงได้ แต่จะมีลักษณะที่ไม่สมมาตร ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน โดยใช้โดยใช้เทคนิคการเพิ่มความสูงกำแพงศักย์ช็อคติ ด้วยวิธีการเปลี่ยนค่าของอุณหภูมิจากกระบวนการซินเตอร์ ซึ่งพบว่าสามารถลดกระแสมืดของอุปกรณ์ได้ เนื่องจากอลูมิเนียมสามารถแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้มากขึ้น และทำให้เกิดการฟอร์มตัวแบบยูเทคติกระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนเกิดเป็นชั้นที่บางๆขึ้น ทำให้ได้รอยสัมผัสสมบูรณ์ขึ้น และยังเป็นผลลดผลของสถานะพื้นผิวของรอยสัมผัส ส่วนความสูงกำแพงศักย์ช็อคติจะมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงที่ไม่ผ่านการซินเตอร์ จนถึง 300  $^{\circ}\text{C}$  คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.62-0.64 eV และมีค่าสูงขึ้นไปเมื่ออุณหภูมิ 400  $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งความสูงกำแพงศักย์ช็อคติมีค่าเกือบคงที่ จนถึงการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500  $^{\circ}\text{C}$  โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.72-0.73 eV ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิซินเตอร์ที่ 500  $^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากมีกระแสมืดที่ต่ำที่สุด คือ ประมาณ 20 nA ที่แรงดันไบแอส 4 โวลต์ และสามารถใช้งานได้ เทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และเมื่ออุปกรณ์ได้รับแสงตกกระทบที่พื้นที่รับแสง สามารถใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงได้และมีความสมมาตรมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์มีค่าสูงขึ้น

เมื่อทำการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์พบว่า กระแสแสงที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุปกรณ์ได้รับความเข้มแสงมากขึ้น เนื่องจากเกิดคูพาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้น เมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และกระแสที่ได้จะมีค่าเป็นเส้นตรงกับความเข้มแสง และกระแสแสงสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการให้แรงดันไบแอสกับอุปกรณ์มากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เด่นของอุปกรณ์โครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง นอกจากนี้กระแสแสงยังไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 - 500  $\mu\text{m}$

กระแสแสงที่ได้จากการทดลองหาลักษณะการตอบสนองทางแสงพบว่า ที่เส้นกราฟของโพลความต้านทานที่มีค่าน้อย คือ ในกรณีที่โพลความต้านทานเป็น 100  $\Omega$ -1 k $\Omega$  การตอบสนองทางแสงจะมีลักษณะเป็นสองช่วง โดยช่วงแรกเป็นผลจากบริเวณนิวทรัล ส่วนช่วงที่สองเป็นผลจากบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งทำให้ทราบว่ากระแสแสงประกอบด้วยสองส่วน คือ กระแสแสงที่มาจากบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นกระแสแสงส่วนมากของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อนอร์มอลไลซ์ แล้วจะมีค่ากระแสแสงไดโอด ประมาณ 0.82 ของกระแสรวม และส่วนที่เกิดจากบริเวณนิวทรัล ซึ่งเป็นกระแสแสงส่วนน้อยของอุปกรณ์ เมื่อนอร์มอลไลซ์แล้วจะมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ประมาณ 0.18 ที่แรงดันไบแอส 10 โวลต์ โดยกระแสแสงไดโอดสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มแรงดันไบแอส เนื่องจากบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดกว้างมากขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบแอสมากขึ้น โดยมีอัตราส่วนของการเกิดกระแสแสงจากบริเวณปลอดพาหะต่อบริเวณนิวทรัลประมาณ 3-4 : 1 ส่วน กระแสแสงคอนดักเตอร์ขึ้นอยู่กับกระแสแสงที่อยู่ที่ใกล้ขอบของบริเวณปลอดพาหะ พบว่าที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500  $\mu\text{m}$  กระแสแสงที่เกิดจากการแพร่ของพาหะส่วนน้อยมีค่าใกล้เคียงกันเป็นผลให้กระแสแสงรวมมีค่าเท่ากัน ส่วนความถี่คัทออฟของอุปกรณ์มีลักษณะการตอบสนองทางแสงที่เพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอส เนื่องจากความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ ทำให้เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันไบแอสมากขึ้นเป็นผลให้ความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าลดลง

เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเป็น 2 x 2  $\text{mm}^2$  กระแสมีค่างของอุปกรณ์จะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่รอยสัมผัสให้มีขนาดมากขึ้น และกระแสแสงของอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าที่ใหญ่กว่าจะได้กระแสแสงที่มากกว่าด้วย เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์ให้มากขึ้น ส่วนลักษณะการตอบสนองทางแสงจะมีลักษณะเป็นสองช่วงเช่นเดียวกับอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้า 1 x 1  $\text{mm}^2$  แต่ความถี่คัทออฟของอุปกรณ์จะมีค่าต่างกัน โดยอุปกรณ์ที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้าที่เล็กกว่าจะมีลักษณะการตอบสนองทางแสงที่ความถี่คัทออฟที่สูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากความจุไฟฟ้าที่มากขึ้นเมื่อขนาดของขั้วโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้น 4 เท่า เป็นผลให้ค่าคงที่ของเวลามีค่ามากขึ้น ดังนั้นในการเพิ่มกระแสแสงของอุปกรณ์สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นแบบอินเตอร์ดิจิต (interdigitated) [3-6] เพื่อลดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าและขนาดของตัวอุปกรณ์ได้

ส่วนการเปลี่ยนค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 50  $\Omega$ -cm และ 100  $\Omega$ -cm พบว่า กระแสแสงของอุปกรณ์ที่มีสภาพต้านทานค่าที่มากกว่า จะได้กระแสแสงที่มากกว่า โดยเป็นผลมาจากบริเวณปลอดพาหะที่ขยายตัวได้มากขึ้น เมื่อสภาพต้านทานมีค่ามากขึ้น ในส่วนของลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al จะมีลักษณะการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามสภาพด้านทานของซิลิกอน โดยเป็นผลมาจากความกว้างของบริเวณปลดพาหะที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพด้านทาน โดยกระแสแสงที่ได้จากบริเวณปลดพาหะซึ่งเป็นกระแสส่วนใหญ่ของอุปกรณ์เมื่อนอร์มอล โลสส์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสภาพด้านทานมีค่ามากขึ้น ส่วนกระแสที่ได้จากบริเวณนิวทรัล ซึ่งเป็นกระแสส่วนน้อยของอุปกรณ์ เมื่อนอร์มอล โลสส์แล้วมีค่าที่ลดลงตามสภาพด้านทานที่เพิ่มขึ้น และในส่วนของความถี่คัทออฟของอุปกรณ์มีลักษณะการตอบสนองทางแสงที่เพิ่มขึ้นตามสภาพด้านทานของซิลิกอน เนื่องจากความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าแปรผกผันกับบริเวณปลดพาหะ ทำให้เมื่ออุปกรณ์มีสภาพด้านทานของซิลิกอนมากขึ้น เป็นผลให้ความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าลดลง

จากการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 - 500  $\mu\text{m}$  มีลักษณะการตอบสนองทางแสงเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo แต่มีกระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า และสามารถลดกระแสมืดของอุปกรณ์ด้วยวิธีการเปลี่ยนค่าของอุณหภูมิจากกระบวนการซินเทอริง โดยสามารถนำอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ควบคุมกระแสแสงด้วยการเปลี่ยนแรงดันไบแอส หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไอริสได้ ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้งานที่ความถี่สูง ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปพัฒนาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ให้สามารถเพิ่มกระแสแสงของอุปกรณ์ได้ เช่น การเพิ่มขึ้นป้องกันการสะท้อนแสง ในส่วนของการพัฒนาลักษณะการตอบสนองทางแสงให้มีความถี่ที่สูงขึ้น สามารถทำได้โดยการลดระยะห่างขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดสั้นลงมากๆ หรือการเติมอะตอมสารเจือ เช่น ทองคำ [21] ซึ่งจะช่วยให้ตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีลักษณะสมบัติที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ สุกเดช., **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545.
- [2] คณิต เครื่องงาม., **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน**, เล่ม 1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [3] Berger P. R., “MSM Photodiodes”, *IEEE Potentials*, Vol. 15, No. 2, April/May 1996, pp. 25-29.
- [4] Chou S. Y., Liu Y., Khalil W., Hsiang T. Y. and Alexandrou S., “Ultrafast Nanoscale Metal - Semiconductor-Metal Photodetectors on Bulk and Low-Temperature-Grown GaAs”, *Journal of Applied Physics Letters*, Vol. 61, No. 7, August 1992, pp. 819-821.
- [5] Parker J. S., and Bosman G., “Noise Characterization of GaAs Interdigitated Metal-Semiconductor Metal Photodetector (MSM PD)”, *IEEE Trans. on Electron Device*, Vol. 39, November 1992, pp. 1282-1287.
- [6] Julian B. D. Soole ., and Schumacher H., “Transit-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodiode”, *IEEE Trans. on Electron Device*, Vol. 37, No. 11, November 1990, pp. 2285-2291.
- [7] Seto M., Rochefort C., and van der Mark M.B., “Low Leakage-Current Metal-Insulator Semiconductor-Insulator-Metal Photodiode on Silicon with SiO<sub>2</sub> Barrier- Enhancement Layer”, *Applied Physics Letters*, Vol. 75, 1999, pp. 1976-1978.
- [8] Niemcharoen S., Kobayashi K., Kimura M. and Sato K., “Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Conditions”, *Solid-State Electronics*, Vol. 45, No. 10, October 2001, pp. 1815-1819.
- [9] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ., **ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนร์** วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [10] Chino K., “Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment”, *Solid-State Electronics*, Vol. 16, 1973, pp. 119-121.
- [11] Basterfield J., Shannon J.M. and Gill A., “The Nature of Barrier Height Variations in Alloyed Al-Si Schottky Barrier Diodes”, *Solid-State Electronics*, Vol. 18, 1975, pp.290-291.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Kobayashi K., Niemcharoen S., Supadech S., Yasumura Y., and Sato K., "Intrinsic and Extrinsic Photoresponse of Mo/n-Si/Mo Structures with Wide Electrode Gap", *Solid-State Electronics*, Vol. 46, No. 9, September 2002, pp. 1411-1416.
- [13] Takano H., Kimura M., Ando T., Niemcharoen S., Yasumura Y. and Sato K., "Optical Response of Planar Mo/n-Si/Mo Structures with Long Neutral Region and Schottky Barriers at Both Ends", *Solid-State Electronics*, Vol. 44, No. 12, December 2000, pp. 2161-2164.
- [14] สมเกียรติ สุกเดช., *เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์*, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- [15] Sze S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons Inc., New-York, 1981.
- [16] ชลิตา คูหาเรือง., "กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสร้างลวดลายขนาด 5 ไมครอนบนซิลิคอนไดออกไซด์และอลูมิเนียม", *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2547.
- [17] สราวุธ วิสวแสงสุข, สมชาติ พนาเกษม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, โยอิชิ ยาซุมุระ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง., "การศึกษาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสแบบขดตัวที่ผ่านการซินเตอร์ริง", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 23, พฤศจิกายน 2543, หน้า 721-724.*
- [18] ธเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สราวุธ วิสวแสงสุข., "ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์", *วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน 2547, หน้า 14-19.*
- [19] การุณ แซ่จอก, กิตติ เสนาบุรณ์, สุวัฒน์ ไสภิตพันธ์, ภาวัน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์., "การพัฒนากระบวนการปลูกฟิล์มโลหะหลายชั้นด้วยเทคนิคสปีดเตอร์ริงสำหรับการสร้างวงจรรวม", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 26, พฤศจิกายน 2546, หน้า 1391-1395.*
- [20] ธเนศ โชะเหม, มานิตา ค้วงแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ., "การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง", *วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2548, หน้า 13-18.*
- [21] จักรพงษ์ สุกเดช, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์โย., "ตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/v-Si (Au Doped)/Al", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 27, พฤศจิกายน 2547, หน้า 221-224.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ลักษณะสมบัติเลเซอร์ไดโอดของบริษัท RS รุ่น V9323

ตารางที่ ก.1 ลักษณะสมบัติโดยทั่วไปของเลเซอร์ไดโอด RS V9323

Parameter	RS no. 194-004	Units
Nominal wavelength	670	nm
Maximum power output	3	mW
Typical power output stability (@ 20 °C)	2	%
Typical power output temperature dependence	15	$\mu\text{W}/^{\circ}\text{C}$
Operation voltage	-8 to -12	V
Typical operating current at minimum voltage	75	mA
Typical operating current at maximum voltage	110	mA
Intensity variation with supply variation	0.6	%/V
TTL disable voltage	> 4	V
Maximum TTL pulse rate	10	Hz
Interlock 'enable'	-5 to +2.5-5 to +2.5	V
Modulation type	Analogue or digital	
Modulation signal levels into 50 $\Omega$ for linear response	500 mV pk to pk	
Modulation frequency band width (-3dB points)	100 Hz to 50 MHz	
Frequency range	100 Hz to 100 MHz	
Modulation depth (Pulse)	90	%
Mean time to failure (MTTF) @ 30 °C	20000	Hours
Connections	250 mm flying leads	
Black lead	-ve supply	
Green lead	0	V
Blue lead	TTL disable	
White lead	Interlock	
Yellow and green twisted pair	modulation input	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ลักษณะสมบัติทางแสงของเลเซอร์ไดโอด RS V9323

Parameter	RS no. 194-004	Units
Beam size	4.5 x 2.5	mm
Minimum focus (lens extended)	25	mm
Spot size at minimum focus	100	micron
Polarization ratio	100 : 1	
Pointing stability	< 0.05	mRad
Output aperture diameter	6.0	mm
Angular deviation (beam to case)	< 5	mRad



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ข.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

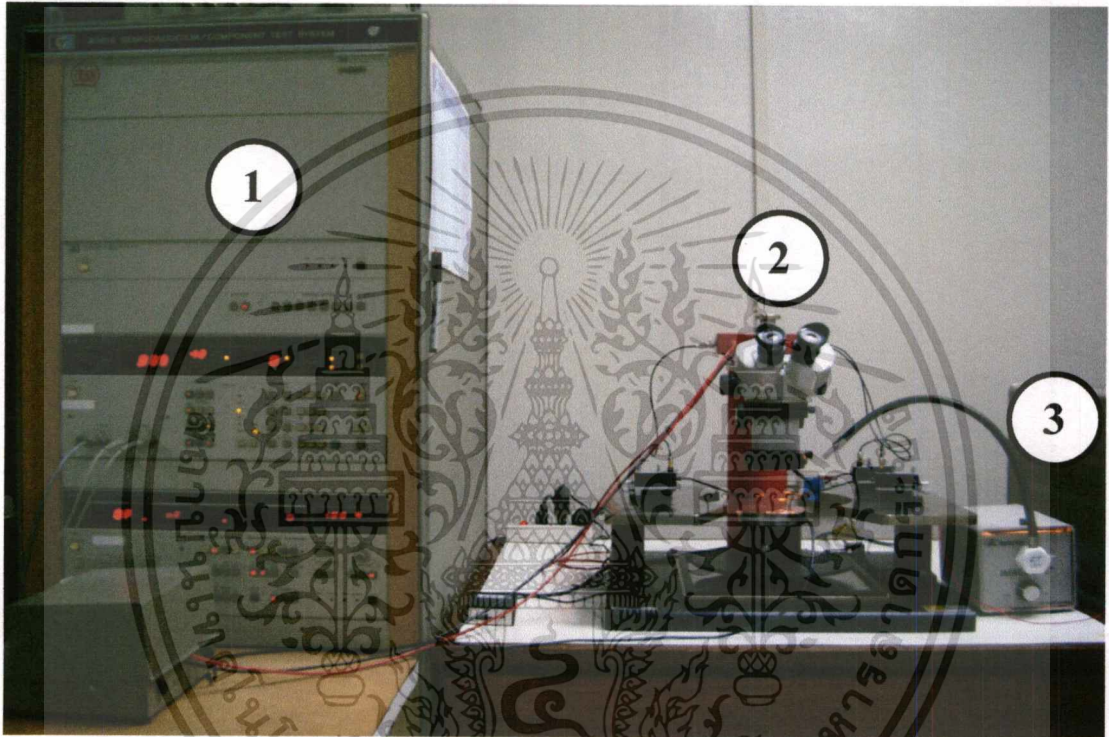
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ค่าคงที่ของพลังค์	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$	J-sec
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	$c$	$3 \times 10^8$	m/sec
ค่าคงที่รีชาร์ดสัน	$R$	110	$\text{Acm}^{-3}\text{K}^{-2}$
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	$q$	$1.602 \times 10^{-19}$	C
ค่าคงที่โบสตันน์	$k$	$1.38 \times 10^{-23}$	J/K
เปอร์มิตทิวิตีในสุญญากาศ	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-14}$	F/cm
เปอร์มิตทิวิตีของสารกึ่งตัวนำ (Si)	$\epsilon_s$	$11.8 \epsilon_0$	F/cm
สภาพคล่องของอิเล็กตรอน (Si)	$\mu_n$	1350	$\text{cm}^2/\text{V-sec}$
ความหนาแน่นอินทรินซิก (Si)	$n_i$	$1.5 \times 10^{10}$	$\text{cm}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ชุดทดลองลักษณะสมบัติทางแสง

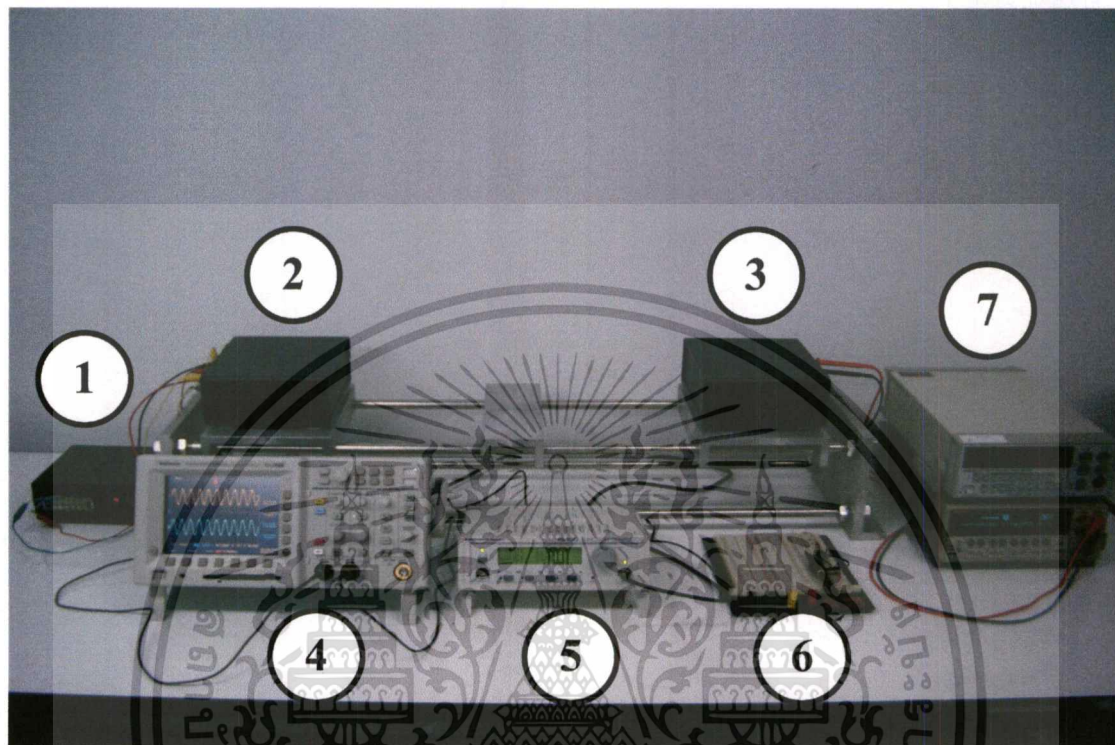
ค.1 ชุดทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง  
กระแสตรง



รูปที่ ค.1 ชุดทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง  
กระแสตรง

- (1) HP 4061A semiconductor/component test system
- (2) Probe & Al/n-Si/Al Photodetector
- (3) Halogen Lamp

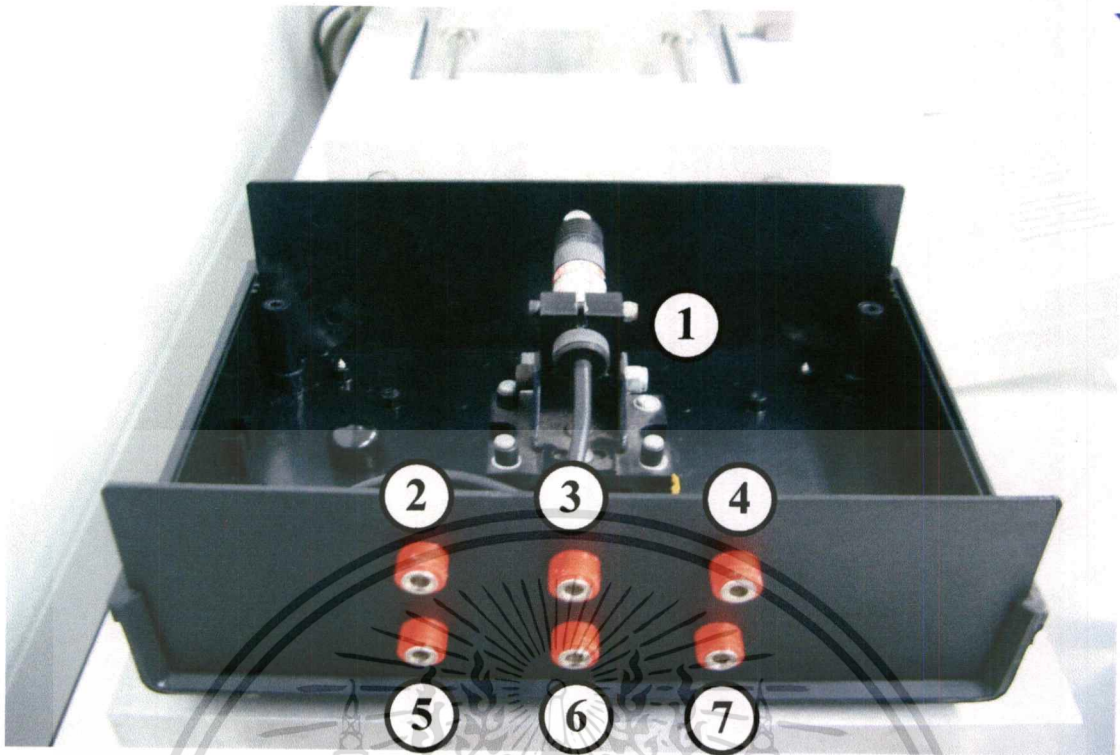
**ค.2 ชุดทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง  
กระแสสลับ**



**รูปที่ ค.2** ชุดทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง  
กระแสสลับ

- (1) Power Supply for Laser Diode
- (2) Laser Diode Module
- (3) Dark Box & Al/n-Si/Al Photodetector
- (4) Oscilloscope
- (5) Function Generator
- (6) Load Resistance
- (7) Power Supply for Al/n-Si/Al Photodetector

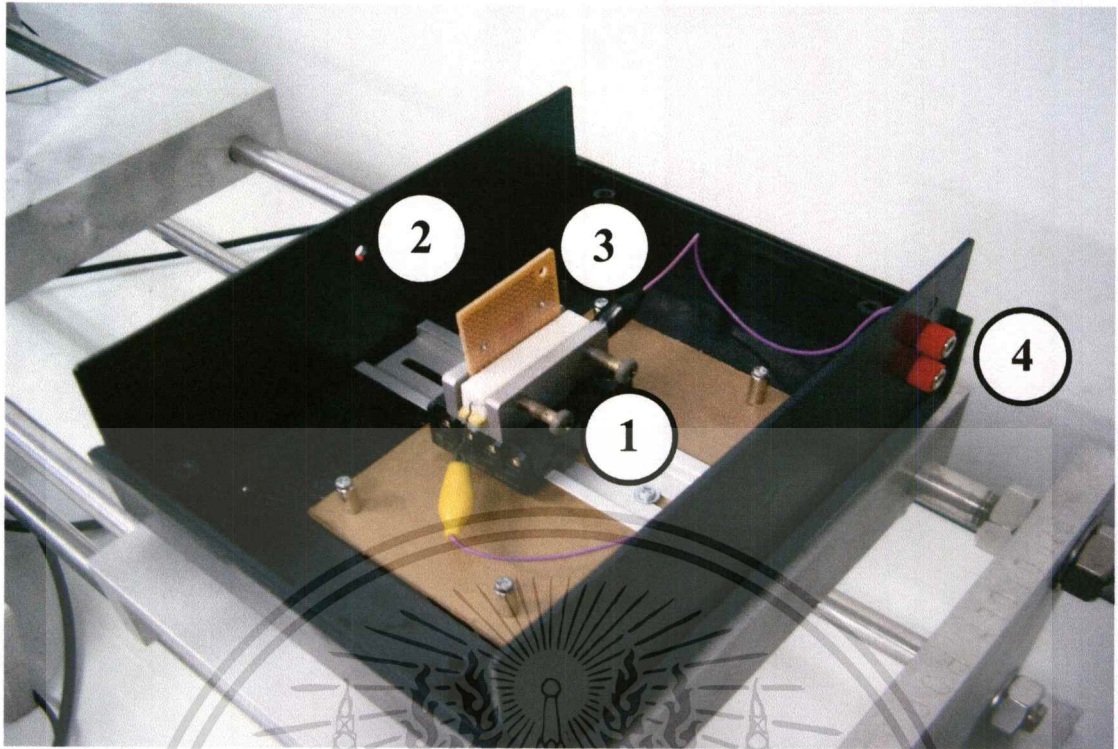
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 ชุดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด

- (1) Laser Diode Module
- (2) Modulation Input (-)
- (3) Ground (0 V)
- (4) Interlock
- (5) Modulation Input (+)
- (6) -Ve Supply (-8 to -12 V)
- (7) TTL disable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 ชุดอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ในกล่องทึบแสง

- (1) แท่นวาง Al/n-Si/Al Photodetector
- (2) ช่องรับแสง
- (3) Al/n-Si/Al Photodetector
- (4) Power Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธเนศ โชะเหม
วัน เดือน ปีเกิด	9 สิงหาคม 2520 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	310/1233 ถ.สรงประภา แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กรุงเทพฯ 10210 โทร.0-2928-9178
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2.) เครื่องมือวัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารในวิทยานิพนธ์นี้

- [1] ธเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สรายุทธ วิศวแสงสุข., “ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน 2547, หน้า 14-19.
- [2] ธเนศ โชะเหม, มานิตา คิ้วแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ., “การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2548, หน้า 13-18.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้