

การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง

โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิตัล

STUDY ON DESIGN FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF
INTERDIGITATED ITO/n-Si/ITO PHOTODETECTORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่สนับสนุนโดยศูนย์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-043-033

การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง
โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิตเทท

STUDY ON DESIGN FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF
INTERDIGITATED ITO/n-Si/ITO PHOTODETECTORS



T105284



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-043-033

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 105284

วัน เดือน ปี 18 พ.ย. 2552

b. 12168695

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**STUDY ON DESIGN FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF
INTERDIGITATED ITO/n-Si/ITO PHOTODETECTORS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-043-033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิตเทท

Thesis Title Study on Design Fabrication and Characteristics of Interdigitated ITO/n-Si/ITO Photodetectors

นักศึกษา นางสาวกุลวรางค์ นุตะมาน






รหัสประจำตัว 50061308

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-043-033

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	สุภเดช	
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	
ดร.สัญญา	คุณขาว	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเทอร์ดิเจิต
นักศึกษา	นางสาวกุลวรางค์ นุตะมาน
รหัสนักศึกษา	50061308
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต โดยมีความมุ่งหมายที่ต้องการเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ให้มากขึ้น โดยนำวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าลงบนซิลิคอนชนิดเอ็นด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง ให้ ITO มีความหนาที่เหมาะสม คือ มีสภาพการนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่สูง โดยออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีขนาดขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างๆ กันตั้งแต่ 20, 40, 60 และ 80 μm เมื่อศึกษาถึงลักษณะสมบัติการตอบสนองทางแสงกระแสตรงและกระแสสลับของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO พบว่าลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขณะที่การตอบสนองทางความถี่มีค่าลดลง เมื่อขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ITO เพิ่มขึ้น โดยจากผลการทดลองพบว่าที่ขนาดขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm นั้นมีลักษณะสมบัติการตอบสนองทางแสง กระแสตรงและกระแสสลับเหมาะสมกันมากที่สุด โดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง 25,000 lux ภายใต้แรงดันไบอัส 10 V เท่ากับ 1,900 เท่า มีประสิทธิภาพควอนตัม 6.3% สภาพการตอบสนองทางแสง 0.042 A/W และมีค่าความถี่คัทออฟเท่ากับ 350 kHz เมื่อนำตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO ไปผ่านกระบวนการแอนนัลในบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที พบว่ากระแสแสงของตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงขึ้น โดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง 25,000 lux แรงดันไบอัส 10 V เท่ากับ 3,600 เท่า และมีค่าความถี่คัทออฟเท่ากับ 800 kHz

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO สามารถนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงที่ความเข้มแสงต่ำได้เป็นอย่างดี มีกระแสรั่วไหลต่ำ มีค่ากระแสแสงที่สูง และมีผลการตอบสนองทางความถี่ที่อยู่ในระดับที่น่าพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study on Design Fabrication and Characteristics of Interdigitated ITO/n-Si/ITO Photodetectors
Student	Kulwarang Nutaman
Student ID	50061308
Degree	Master of Engineering
Programme	Microelectronics Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assist. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

ABSTRACT

This thesis is a study on design, fabrication and characteristics of interdigitated ITO/n-Si/ITO photodetectors. The purpose of this thesis is to increase the photocurrent of MSM structure. By using transparent conducting oxide ITO as the electrodes deposit on the n-type silicon by R.F. sputtering. The thickness conditions for ITO film were optimized to get both high conductivity and transmission. In this thesis, ITO/n-Si/ITO photodetector were designed to have electrode width and electrode spacing 20, 40, 60 and 80 μm . When studied the optical response characteristics in both direct current and alternating current of the ITO/n-Si/ITO photodetector found that the current-voltage characteristics, quantum efficiency and responsivity are increased while the frequency response is decreased, when increasing the electrode width. The experimental results shown that electrode width and electrode spacing 40 μm were optimized between optical response direct current and alternating current. The photo/dark current at illuminance 25,000 lux under 10 V bias voltage is 1,900 times, quantum efficiency 6.3%, responsivity 0.042A/W and cutoff frequency 350 kHz. When the ITO/n-Si/ITO photodetector is improved by the heat treatment or annealing process in nitrogen atmosphere for 15 minute at 300°C is found that photocurrent and frequency response are higher. The photo/dark current at illuminance 25,000 lux under 10 V bias voltage is 3,600 times and frequency response is 800 kHz.

Experimental results indicate that the interdigitated ITO/n-Si/ITO photodetector, can be used as good detector in lower light intensity. Because of low leakage current, high photocurrent and satisfying frequency response.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะตลอดจนอบรมสั่งสอน และให้ความอนุเคราะห์ในทุกๆ ด้านจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ สุขเกษ, รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง, รองศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงเจริญ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ คุณอวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ คุณรัตนาวรรณ สันบุญตัน และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองบางส่วน

ขอขอบคุณ คุณอภิรักษ์ ฤกษ์รัตน์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานทุกด้าน

ขอขอบคุณ คุณสุรชาติ เมืองอ่ำ และ คุณอิสระ ศรีธนะชัย ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ และขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง รวมถึงนักศึกษาปริญญาโทที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน และที่ขาดเสียมิได้ขอขอบคุณ คุณคงกฤษณ์ ไพรวลัยที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือในการค้นคว้าข้อมูลบางส่วน และให้คำแนะนำในการวัดผลการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณสุรชน อกุลเศรษฐพงศ์, คุณอภิวัฒน์ นิยมพานิช นักศึกษาปริญญาตรีชั้นปีที่ 3 และนักศึกษาปริญญาตรีในปีการศึกษา 2551 ทุกท่านที่ช่วยวัดผลการทดลองบางส่วน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้อง ที่ให้ความรักความเมตตา อบรมสั่งสอน และสนับสนุนทางด้านการศึกษาแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

กฤษกรรังค์ นุตะมาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XV
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XIX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	6
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	7
2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง.....	7
2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง.....	10
2.1.3 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	11
2.1.4 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	12
2.2 อินเดียมทिनออกไซด์.....	14
2.2.1 สมบัติทั่วไปของอินเดียมทिनออกไซด์.....	14
2.2.2 สมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า.....	14
2.3 รอยสัมผัส肖ตกี.....	16
2.3.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัส肖ตกี.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2	รอยสัมผัสช็อคก็ช์ขณะได้รับ ไปอัส.....	19
3.1.2.1	รอยสัมผัสขณะได้รับ ไปอัสตรง.....	19
3.1.2.2	รอยสัมผัสขณะได้รับ ไปอัสย้อนกลับ.....	20
2.3.3	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคก็ช์.....	21
2.3.4	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคก็ช์.....	21
2.3.5	รอยสัมผัสช็อคก็ช์ของอินเดียมทินออกไซด์และซิลิคอนชนิดเอ็น.....	22
2.4	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM.....	23
2.4.1	โครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล.....	23
2.4.2	โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดัน ไปอัส.....	24
2.4.3	โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ.....	26
2.4.4	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....	27
2.4.5	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....	28
2.4.6	ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพการตอบสนองทางแสง และผลตอบสนอง ต่อสเปกตรัม.....	29
2.4.7	ความเร็วในการตอบสนองและแบนด์วิดท์.....	30
บทที่ 3	การออกแบบและกระบวนการตัวตรวจวัดแสง.....	32
3.1	การออกแบบลวดลายและการสร้างกระจกต้นแบบ.....	32
3.1.1	ลวดลายที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO.....	33
3.1.1.1	ลวดลายการวัดระยะการส่งผ่านหรือการวัดแบบ TLM.....	34
3.1.1.2	ลวดลายการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์.....	35
3.1.2	ลวดลายตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al.....	36
3.2	กระบวนการสร้าง.....	39
บทที่ 4	การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO และตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO.....	47
4.1.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO.....	48
4.1.1.1 สภาพต้านทานไฟฟ้าของ ITO ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม.....	48
4.1.1.2 ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของ ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม.....	51
4.1.2 การทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง.....	57
4.1.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเทอร์ดิจิต.....	60
4.1.4 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสงกระแสตรง.....	63
4.1.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิต.....	63
4.1.4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสง.....	63
4.1.4.1.2 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน.....	66
4.1.4.1.3 ผลของจำนวนขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน.....	69
4.1.4.1.4 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน.....	70
4.1.4.1.5 ผลของความกว้างของขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน.....	73
4.1.4.2 สภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิต.....	76
4.1.5 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสงกระแสสลับ เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่.....	81
4.2 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีกต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO และ ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ของ ITO.....	86
4.2.2 การทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีลต่อสมบัติของรอยสัมผัส ซีดก็ย์.....	88
4.2.3 การทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีลต่อลักษณะสมบัติความจุ ไฟฟ้า-แรงดัน.....	90
4.2.4 การทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีล ต่อการตอบสนองทางแสง ด้วยสัญญาณแสงกระแสตรง และสัญญาณแสงกระแสสลับ.....	91
4.2.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน.....	91
4.2.4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีลต่อลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสง.....	91
4.2.4.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีลต่อลักษณะสมบัติกระแส แสง-แรงดัน.....	92
4.2.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีลต่อผลตอบสนองทางความถี่.....	95
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	97
เอกสารอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก ลักษณะสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์.....	107
ภาคผนวก ข ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	108
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเกิดรอยสัมผัสโอห์มมิก และรอยสัมผัสเรกติไฟร์ ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ในอุดมคติ.....	22
4.1 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีสปีดเตอริงต่างๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
4.2 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงจากการทดลอง.....	57
4.3 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีความกว้าง ของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ความยาวของ ขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ที่ได้รับแรงดันไบอัส 5 V.....	85
4.4 ลักษณะสมบัติของฟิล์มบาง ITO ที่ความหนา 500 nm โดยแอนนีสลในบรรยากาศ ในโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน.....	87
4.5 ลักษณะสมบัติของฟิล์มบาง ITO ที่ความหนา 500 nm ก่อน และหลังทำการ แอนนีสลในบรรยากาศในโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที.....	88
4.6 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ชนิดต่างๆ ที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว และได้รับแรงดันไบอัส 5 V.....	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิฟิเคชัน และบริเวณรับแสงของโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสงของ Al	
(ข) ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิฟิเคชัน และบริเวณรับแสงของโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสของ ITO.....	6
2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ	
(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง.....	10
2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	12
2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	
(ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี.....	12
2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ	
(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม.....	13
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพาหะและเปอร์เซ็นต์การเจือปนในอินเดียมออกไซด์ จากการทดลอง.....	15
2.6 แผนภาพแถบพลังงานของอินเดียมออกไซด์ และ อินเดียมทินออกไซด์.....	16
2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัส肖ตกี.....	17
2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัส肖ตกี.....	18
2.9 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	19
2.10 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	20
2.11 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ肖ตกีไดโอด และไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น.....	21
2.12 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของ肖ตกีไดโอด.....	22
2.13 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัส肖ตกี.....	22
2.14 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM	
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน.....	24
2.15 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	25
2.16 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ.....	26
2.17 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	27
2.18 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....28
2.20	ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของตัวตรวจวัดแสงตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอน.....30
2.21	การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ.....31
3.1	ลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง และลวดลายที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO (ก) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (ข) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้น ITO (ค) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม (ง) ภาพถ่ายกระจกต้นแบบ.....33
3.2	ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM (ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ (ข) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการ สร้างตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า..... 34
3.3	ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (ก) ลักษณะ โครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....35
3.4	ลักษณะ โครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิคิต และตัวแปร ที่ใช้ในการกำหนดขนาดต่างๆ..... 36
3.5	ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิคิต (ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....37
3.6	ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มี ขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิคิต (ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....38
3.7	ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็่นระนาบ (100) สภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ 39
3.8	แผนผังกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO..... 39
3.9	ความแตกต่างระหว่างกระบวนการสกัดชั้นฟิล์มแบบลิฟออฟและการสกัดชั้นฟิล์มทั่วไป.. 44
3.10	ภาพถ่ายฟิล์ม ITOที่เคลือบบนฐานรองที่เป็นกระจก โดยมีความหนาประมาณ 500 nm..... 45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่มีการสกัดชั้นฟิล์มด้วยวิธีต่างกันในกำลังขยาย 100 เท่า (ก) การสกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ (ข) การสกัดชั้นฟิล์มแบบทั่วไป.....	45
3.12 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO.....	46
3.13 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล (ก) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน (ข) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	46
4.1 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนชั้นฟิล์ม ITO ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (ก) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอน ไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการสร้าง ตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี TLM และตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง.....	49
4.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่ ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาค่าสภาพต้านทาน โดยเทคนิค TLM.....	50
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความหนาของฟิล์ม ITO.....	50
4.4 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ (ก) แสดงขั้วโลหะอลูมิเนียมของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัด.....	51
4.5 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1324})$ กับค่าสนามแม่เหล็กที่ความหนา ของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของ พาหะ.....	53
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะและ สภาพ คล่องของพาหะ กับ ความหนาของฟิล์ม ITO.....	53
4.7 แผนภาพแสดงสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ, สารกึ่งตัวนำ และฉนวน.....	55
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า และ เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสง กับความ หนาฟิล์ม ITO.....	56
4.9 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัสซีออกไซด์.....	57
4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดอื่น.....	58
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแส	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการแจ้งหนังสือสงวนลิขสิทธิ์ไว้แล้ว ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล โดยมี ITO หนา 500 nm, ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 60 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และ จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว
(ก)	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า
(ข)	ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อดัวยกาวเงิน..... 60
4.13	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และ จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว
(ก)	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า
(ข)	ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อดัวยกาวเงิน..... 60
4.14	แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM..... 61
4.15	ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al..... 61
4.16	แถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดกึ่งในภาวะสมดุลความร้อน
(ก)	แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็น
(ข)	แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็น..... 62
4.17	แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ..... 63
4.18	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า..... 64
4.19	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง..... 65
4.20	แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM..... 66
4.21	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในช่วง 5,000 – 25,000 lux..... 66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงที่แรงดัน ไบอัส 5 V และ 10 V.....	67
4.23 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al.....	68
4.24 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ตั้งแต่ 2, 4 และ 8 ขั้ว.....	69
4.25 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า.....	70
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า.....	70
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไบอัส และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ.....	71
4.28 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าต่างกัน ขณะให้แรงดัน ไบอัส (ก) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง (ข) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น.....	72
4.29 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ตั้งแต่ 20 – 80 μm	73
4.30 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ตั้งแต่ 20 – 80 μm	73
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความกว้างของขั้วไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al.....	74
4.32 การสะท้อน และทะลุผ่านของแสงที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM (ก) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะ โปร่งใสชนิด ITO/n-Si/ITO (ข) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะทึบแสงชนิด Al/n-Si/Al.....	75
4.33 แผนภาพการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500 Ω และ แรงดัน ไบอัส (V) เท่ากับ 5 V.....	76
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่นในช่วง 500 – 1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20 – 80 μm	77
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....	78
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัม กับความยาวคลื่นในช่วง 500 – 1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20 – 80 μm	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสดตรง กับความยาวคลื่น เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al..... 80
4.38	แผนภาพการทดลอง เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500 Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V..... 82
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เพื่อหา ความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ ขั้วไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al..... 83
4.40	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คutoffและความจุไฟฟ้า กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า... 83
4.41	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความถี่คutoff กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า..... 85
4.42	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็น ก่อนและ หลังทำการแอนนีส..... 89
4.43	ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีส และ ตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al..... 90
4.44	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับ แสงตกกระทบ เปรียบเทียบระหว่างก่อน และหลังทำการแอนนีส..... 92
4.45	ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ที่ความเข้มแสงในช่วง 5,000 – 25,000 lux..... 93
4.46	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงที่แรงดัน ไบอัส 5 V และ 10 V เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีส..... 93
4.47	ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีส..... 94
4.48	ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เพื่อหา ความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีส..... 95

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
ac	alternating current	กระแสสลับ
Al	Aluminium	อลูมิเนียม
Cr	Chromium	โครเมียม
Cu	Copper	ทองแดง
dc	direct current	กระแสตรง
DI	De-ionization water	น้ำไร้ประจุ
FET	Field Effect Transistor	ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานด้วยสนามไฟฟ้า
GaAs	Gallium Arsenide	แกลเลียมอะไซด์
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
HNO ₃	Nitric acid	กรดไนตริก
In ₂ O ₃	Indium Oxide	อินเดียมออกไซด์
ITO	Indium Tin Oxide	อินเดียมทินออกไซด์
Mo	Molybdenum	โมลิบดีนัม
MSM	Metal-Semiconductor-Metal	โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
Ni	Nickel	นิกเกิล
R-center	Recombination center	ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่
Si	Silicon	ซิลิคอน
SiO ₂	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
Sn	Tin	ดีบุก
Ti	Titanium	ไทเทเนียม
TLM	Transmission line method	วิธีการวัดระยะการส่งผ่าน

รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ
B	คือ	สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
C_A	คือ	ความจุไฟฟ้าด้านแอนโนด
C_C	คือ	ความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด
C_T	คือ	ความจุไฟฟ้ารวม
d	คือ	ความหนาของฟิล์ม ITO
E_0	คือ	ระดับสูญญากาศ
E_A	คือ	ระดับผู้รับ
E_C	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
E_D	คือ	ระดับผู้ให้
E_F	คือ	ระดับเฟอร์มิ
E_{FM}	คือ	ระดับเฟอร์มิของโลหะ
E_{FS}	คือ	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
E_g	คือ	ช่องว่างพลังงาน
E_{photon}	คือ	พลังงานของโฟตอน
E_v	คือ	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
F_C	คือ	ความถี่คัทออฟ
I_c	คือ	กระแสคอนดักเตอร์
I_d	คือ	กระแสไดโอด
I_{dark}	คือ	กระแสมืด
I_{MS}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
I_{SM}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
I_{photo}	คือ	กระแสแสง
I_{total}	คือ	กระแสรวม
J	คือ	ความหนาแน่นกระแส
k	คือ	ค่าคงที่โบสตันน์
L	คือ	ความยาวของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต
L	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM
n	คือ	ความหนาแน่นของพาหะ

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

N	คือ	จำนวนขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต
N_D	คือ	อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
P_{in}	คือ	กำลังไฟฟ้าอินพุต
q	คือ	ประจุอิเล็กตรอน
R	คือ	ค่าคงที่ของริชาร์ดสัน
R_c	คือ	ความต้านทานที่รอยต่อ
R_H	คือ	สัมประสิทธิ์ของฮอลล์
R_L	คือ	ความต้านทานโหลด
R_s	คือ	ความต้านทานในเนื้อสาร
S	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต
S	คือ	ความกว้างของขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM
V_A	คือ	แรงดันไบอัส
V_{bi}	คือ	แรงดันภายใน
V_{bi1}	คือ	แรงดันภายในด้านขั้วแคโทด
V_{bi2}	คือ	แรงดันภายในด้านขั้วแอนโนด
V_H	คือ	แรงดันฮอลล์
V_1	คือ	แรงดันไบอัสขั้วแคโทด
V_2	คือ	แรงดันไบอัสขั้วแอนโนด
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
W	คือ	ความกว้างของขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต
W	คือ	ความยาวของขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM
W_A	คือ	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอนโนด
W_C	คือ	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด
W_d	คือ	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ
W_{d1}	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด
W_{d2}	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอนโนด
α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
\mathcal{R}	คือ	สภาพการตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

\mathcal{E}_s	คือ	เปอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
\mathcal{E}_0	คือ	เปอร์มิติวิตีในสุญญากาศ
η	คือ	ประสิทธิภาพควอนตัม
η_{ext}	คือ	ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก
η_{int}	คือ	ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน
λ	คือ	ความยาวคลื่นแสง
λ_p	คือ	ความยาวคลื่นคัทออฟ หรือความยาวคลื่นมากที่สุด
ν	คือ	ความถี่ของแสง
ϕ_{bn}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ของอิลีกตรอน
ϕ_{bn1}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ด้านขั้วแคโทด
ϕ_{bn2}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ด้านขั้วแอโนด
ϕ_M	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_s	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
χ	คือ	อิลีกตรอนแอฟฟินิตี
μ	คือ	สภาพคล่องของพาหะ
ρ	คือ	สภาพต้านทานไฟฟ้า

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

กระบวนการรวมตัวใหม่

กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง

กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม

กระแสมืด

กระแสรั่วไหล

กระแสแสง

การส่องผ่านทางแสง

การจำกัดเวลาการส่องผ่าน

การดูดกลืนแบบแถบและสารเจือ

การดูดกลืนแบบอินทรินซิกจากแถบถึงแถบ

กำแพงศักย์ช็อตกีย์

กลไกการเคลื่อนที่แบบการแพร่

กล่องป้องกันแสง

ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

ความต้านทานโหลดภายนอก

ความยาวคลื่นคัทออฟ

ความไว

ความสูงของกำแพงศักย์

ความหนาแน่นพาหะ

ค่าคงที่ของเวลา

คู่อิเล็กตรอน-โฮล

เครื่องระเหยโลหะด้วยความร้อนในสุญญากาศ

เครื่องรับทางแสง

จุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

ช่วงใกล้อินฟราเรด

ช่องรับแสงเดี่ยว

ภาษาอังกฤษ

recombination process

direct recombination process

indirect recombination process

dark current

leakage current

photocurrent

transmittance

transit-time-limited

band and impurity absorption

intrinsic band to band absorption

schottky barrier

diffusion mechanism

dark shield

depletion width

load resistance

long wavelength cutoff

sensitivity

barrier height

carrier concentration

time constant

electron-hole pairs

vacuum evaporator

optical receiver

half power point

near infrared

single slit

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

ช่องว่างแถบพลังงาน

ดีมอดูเลท

ทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน

นอร์มอลไรซ์

บริเวณนิวทรัล

บริเวณปลดลอคพาหะ

แบนด์วิดท์

ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก

ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน

ปรากฏการณ์ฮอลล์

จุดเชื่อมต่อ

พาหะส่วนน้อย

พาหะส่วนมาก

ฟังก์ชันงาน

โฟตอน

โฟนอน

โฟโตลิโธกราฟี

โฟโตไดโอด

ตัวตรวจวัดแสง

รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสแบบช็อคกี

รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

ระยะการแพร่

เรกติไฟร์

แรงดันภายใน

เวลาการแพร่

ภาษาอังกฤษ

energy band gap

demodulate

thermionic emission theory

normalized

neutral region

depletion region

bandwidth

quantum efficiency

external quantum efficiency

internal quantum efficiency

hall effect

bonding pad

minority carriers

majority carriers

work function

photon

phonon

photolithography

photodiode

photodetector

metal-semiconductor contact

schottky contact

ohmic contact

diffusion length

rectifier

built in voltage

diffusion time

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
เวลาส่งผ่าน	transit time
ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่	recombination center
สถานะผิว	surface state
สภาพการตอบสนอง	responsivity
สภาพคล่องของพาหะ	mobility
สภาพต้านทานไฟฟ้า	resistivity
สมบัติด้านแสง	optical property
สัญญาณคลื่นรูปไซน์	sinusoidally waveform
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	light absorption coefficient
แสงในช่วงที่ตามองเห็น	visible light
สารกึ่งตัวนำ	semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง	direct band gap semiconductor
สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง	indirect band gap semiconductor
สารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก	intrinsic semiconductor
แหล่งจ่ายแสง	light source
อินเตอร์ดิจิตเท	interdigitated
ขั้วไฟฟ้า	electrode
อิเล็กตรอน	electron
อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี	electron affinity
อุปกรณ์ด้านแสง	optical devices
โฮล	hole

แกเลียมอาเซไนด์นั้นมีราคาสูง ต่างจากสารกึ่งตัวนำจำพวกซิลิคอนที่สามารถพบได้จำนวนมาก เนื่องจากซิลิคอนมีส่วนประกอบของทรายเป็นหลัก อีกทั้งกระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก และถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการสร้างวงจรรวม จึงทำให้ซิลิคอนมีราคาต่ำกว่าแกเลียมอาเซไนด์มาก และถึงแม้ว่าซิลิคอนจะเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบแถบไม่ตรง (indirect band gap) ซึ่งมีความสามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้ด้อยกว่าแกเลียมอาเซไนด์ แต่ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงบางประเภทต้องการการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ซิลิคอนสามารถตอบสนองได้พอดีคือ 400-1000 นาโนเมตร และไม่จำเป็นต้องใช้งานที่ความถี่สูงๆ เช่น งานระบบเก็บข้อมูล [1] หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไอริส (electronic iris) [2, 3] เป็นต้น ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่ใช้ซิลิคอนทำหน้าที่เป็นฐานรองหรือส่วนของการดูดกลืนแสง

โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา เช่น การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al [4] ในปีค.ศ. 2002, การออกแบบ และการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาตาร์ [5] ในปีค.ศ. 2004, การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด ชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาตาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง [6] ในปีค.ศ. 2005, การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิต เพื่อเป็นการเพิ่มกระแสแสงขึ้นเป็นจำนวนเท่าของลวดลายแบบช่องเดี่ยว [7] ในปี ค.ศ. 2005 หรือแม้กระทั่งการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของอุปกรณ์ตรวจจับแสง MSM ที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะ [8] ในปี ค.ศ. 2008 ทำให้ทราบได้ว่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นจากตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM นั้น ถูกจำกัดด้วยบริเวณพื้นที่รับแสง เนื่องจากพื้นที่ที่แสงจะสามารถตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ได้ มีเพียงบริเวณที่ไม่มีขั้วไฟฟ้าอยู่เท่านั้น เนื่องจากโลหะที่นำมาใช้สร้างขั้วไฟฟ้านั้นมักจะมีลักษณะทึบแสง เช่น ทองแดง (Cu) [9], โมลิบดีนัม (Mo) [10], อลูมิเนียม (Al) [5 - 7], โครเมียม (Cr) [8], นิกเกิล (Ni) [11] และไทเทเนียม (Ti) [12] เป็นต้น แสงจึงไม่สามารถส่องผ่านขั้วไฟฟ้าเหล่านั้นได้ หรือ ส่องผ่านได้น้อยมากก็ต่อเมื่อขั้วโลหะเหล่านั้นมีลักษณะค่อนข้างบาง และเมื่อโลหะที่ใช้สร้างขั้วไฟฟ้าบนสารกึ่งตัวนำมีลักษณะบางก็จะทำให้เกิดรอยสัมผัสช็อคติย์ที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น เป็นผลให้ตัวตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติที่ไม่ดีตามไปด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ด้วยการเพิ่มพื้นที่ที่แสงจะสามารถตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสง โดยใช้โลหะที่มีลักษณะโปร่งใส หรือ “ตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส” (transparent conducting oxide; TCO) แทนโลหะจำพวกวัสดุทึบแสง ซึ่งตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสนั้นมีอยู่ด้วยกันหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น ชนิดสารประกอบ 2 ชนิด หรือ

ชนิดสารประกอบ 3 ชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), แคดเมียมออกไซด์ (CdO), แกลเลียมอินเดียมออกไซด์ (GaInO₃) และ อินเดียมทินออกไซด์ (In_xSn_{1-x}O₂ ; ITO) เป็นต้น [13] แต่ตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสที่เป็นที่นิยมใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงไม่ว่าจะเป็นจอแสดงผลแบบแอลซีดี, การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ รวมไปถึงขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ชนิดต่างๆ มากที่สุด ส่วนใหญ่จะเป็นอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) [14] ที่เกิดจากการเจือทินก (Sn) ลงในสารประกอบอินเดียมออกไซด์ (In₂O₃) เนื่องจาก ITO เป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการนำไฟฟ้า [15] คือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 10^{-3} - 10^{-4} Ω-cm. มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงที่สุดถึง 95% มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 3.3-4.3 eV. ทำให้แสงสามารถส่องผ่าน ITO ได้ดีในหลายความยาวคลื่น หรือตั้งแต่ความยาวคลื่นช่วงของตามองเห็นไปจนถึงแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด (380 – 2000 นาโนเมตร) [16] อีกทั้งมีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นความร้อน หรือ มีคุณสมบัติเป็นชั้นป้องกันการสะท้อน โดยมีค่าดัชนีหักเหประมาณ 2.0 [17] ที่สำคัญสามารถสร้างเป็นรอยสัมผัสขั้วที่ดีดีทั้งกับซิลิคอนชนิดอื่นและซิลิคอนชนิดพี [18] รวมถึงคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ และสามารถเตรียมฟิล์ม ITO ได้หลากหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอริง (sputtering), วิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (evaporation), วิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporation) และ วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) เป็นต้น [19]

ดังที่กล่าวไว้แล้วในข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสลงบนซิลิคอนชนิดอื่น เพื่อสร้างรอยสัมผัสขั้วที่ดีด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์ม ITO ได้ดี โดยทำการออกแบบโครงสร้างให้มีลักษณะเป็นแบบอินเตอร์ดิจิต เพื่อเป็นการเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงให้สูงขึ้น อีกทั้งลดพื้นที่ของอุปกรณ์บนชิ้นสารกึ่งตัวนำลง [20] จากนั้นทำการทดลองโดยทำการศึกษาจากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในลักษณะสัญญาณแสงกระแสตรง และสัญญาณแสงกระแสสลับ เปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิต และมีบริเวณรับแสงเท่ากัน เพื่อเป็นการยืนยันว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO นั้น สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพได้ และ ให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วโลหะที่บดแสงทั่วไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความมุ่งหมายที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสง MSM ให้มีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้น ด้วยการนำ ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสลงบนซิลิคอนชนิดอื่น เพื่อให้เกิดเป็นตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สามารถนำไปตรวจวัดแสงที่มีความเข้มน้อยๆ ได้

โดยมีวัตถุประสงค์ตามลำดับขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง และ หาความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีการสกัดชั้นโลหะโปร่งใส ITO ด้วยเทคนิคการลิฟออฟ (lift off technique) โดยมีซิลิคอนชนิดเอ็นเป็นฐานรอง
3. เพื่อศึกษาการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล ซึ่งมีข้อได้เปรียบ คือ ให้กระแสแสงที่สูงในขณะที่ใช้พื้นที่บนสารกึ่งตัวนำน้อยกว่าขั้วไฟฟ้าแบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit)
4. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO เมื่อได้รับแรงดันไบอัส หรือความเข้มแสงค่าต่างๆ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า และ จำนวนขั้วไฟฟ้า
5. เพื่อศึกษาผลของประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล รวมถึงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า
6. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล รวมถึงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า
7. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงในลักษณะสัญญาณกระแสตรง และ กระแสสลับ รวมถึงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยกระบวนการแอนนีส

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ในการศึกษา จะสามารถสรุปสมมติฐานต่างๆ ได้ดังนี้ อินเดียมทินออกไซด์ หรือ ITO เป็นวัสดุโปร่งใสที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง In_2O_3 และ SnO_2 แล้วทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ หรือ ช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancy) ขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระและช่องว่างของออกซิเจนเหล่านั้นจะเป็นตัวช่วยในการนำไฟฟ้าของฟิล์ม [21] ดังนั้น ITO จึงน่าจะมีสภาพนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงและสามารถนำไฟฟ้าได้ดีใกล้เคียงกับโลหะ โดยความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM น่าจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 300-400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความหนาที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าทั่วไป [5 - 12] โดยคาดว่าจะจะเป็นความหนาที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และ สมบัติทางแสงที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

เนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของ ITO นั้นมีความขัดแย้งกัน คือ เมื่อ ITO มีสมบัติทางไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้มีสมบัติทางแสงลดลง หรือเมื่อมีสมบัติทางไฟฟ้าลดลงกลับทำให้มีสมบัติทางแสงที่สูงขึ้นนั่นเอง [21]

จากฟังก์ชันงาน (work function : ϕ_M) ของ ITO ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 4.6 – 5.1 eV [18] และซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีค่าฟังก์ชันงาน (ϕ_s) ประมาณ 4.2 eV จึงอาจคาดได้ว่ารอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็น จะมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสแบบรือตักกี ($\phi_M > \phi_s$; n-type semiconductor: rectifying) [22] ดังนั้น ITO จึงน่าจะนำมาใช้แทนโลหะในการสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ได้ โดยการออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสงมีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิเจคทีฟนั้น จะทำให้กระแสแสงที่ได้มีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบช่องรับแสงเดี่ยว อีกทั้งขนาดของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจคทีฟมีขนาดเล็กจึงมีความจุไฟฟ้าแฝงที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงน้อย ทำให้สามารถทำงานที่ความเร็วสูงได้ดีกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบช่องรับแสงเดี่ยว [23]

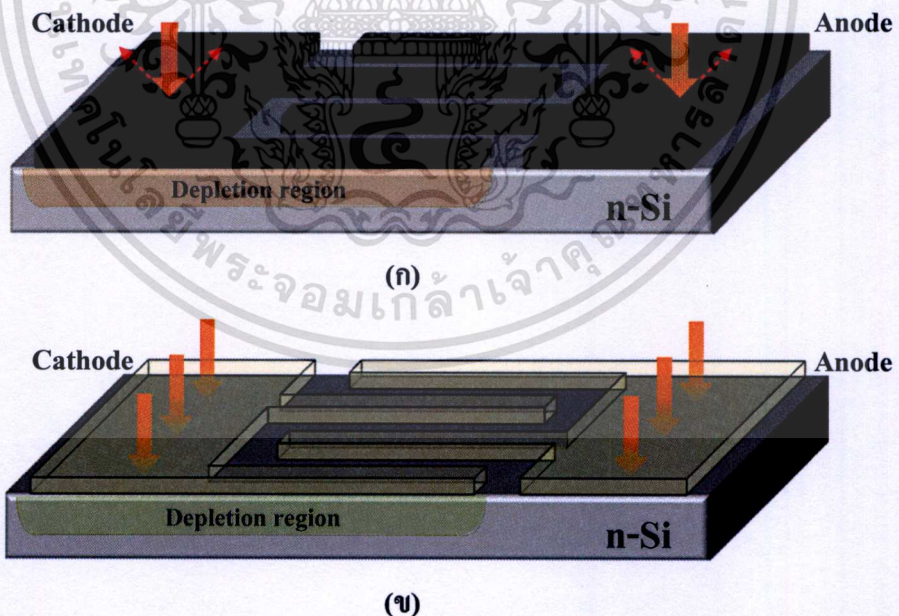
โดยเมื่อสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO แล้ว คาดว่าตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้น่าจะทำงานเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณทางแสงที่ดี มีกระแสมืด (dark current) ต่ำ และมีกระแสแสงสูงขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบอัส หรือ ความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะเฉพาะทางกระแส-แรงดันที่สมมาตรกัน ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงน่าจะทำให้ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้าให้มากขึ้นจะทำให้มีพื้นที่บริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น โดยแสงจะสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้า ITO และไปกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮลในซิลิคอนทำให้เกิดกระแสแสงขึ้นได้ ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ทั่วไป ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง โดยคาดว่ากระแสแสงที่ได้จะมีค่ามากกว่าสองเท่าของกระแสแสงจากตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีขนาดของความกว้าง, ระยะห่าง และ จำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และ จำนวนขั้วไฟฟ้า น่าจะให้ผลเหมือนกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้างต่างๆ ไป [7]

ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มบาง ITO และรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็นด้วยกระบวนการแอนนัลแล้ว น่าจะมีกระแสแสงที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดีขึ้นด้วย เนื่องจากฟิล์มบาง ITO ที่ผ่านการแอนนัลแล้วน่าจะมีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่ดีขึ้น อีกทั้งการนำตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ไปผ่านกระบวนการแอนนัลอาจทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำมีความสมบูรณ์มากขึ้นเช่นเดียวกับการซินเทอโรยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอน ที่ทำให้ความสูงของกำแพงศักย์รือตักกีมีค่าเพิ่มขึ้น [24] และส่งผลให้กระแสรั่วไหลที่ได้มีค่าน้อยลง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

โดยทั่วไปตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM จะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจำนวนสองรอยสัมผัส และมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัส หรือ บริเวณที่เป็นซิลิคอนทำหน้าที่เป็นช่องรับสัญญาณทางแสงและเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า หรือ กระแสแสงนั่นเอง ซึ่งการนำเอาโครงสร้างแบบอินเทอร์ดิเจตมาประยุกต์ใช้เป็นลักษณะของขั้วไฟฟ้าเพื่อเป็นการเพิ่มบริเวณปลอดพาหะ หรือ พื้นที่รับแสง เพื่อเป็นการเพิ่มกระแสแสงให้สูงขึ้นกว่าลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบช่องรับแสงเดิวนั้น ก็ยังทำให้บริเวณรับแสงมีเพียงบริเวณที่เป็นซิลิคอนหรือบริเวณที่ไม่มีขั้วไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากการเลือกใช้โลหะที่มีลักษณะที่บดแสง ทำให้แสงที่ตกกระทบลงบนขั้วไฟฟ้าเกิดการสะท้อนกลับ เมื่อโฟตอนไม่สามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะลงไปได้ การกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในซิลิคอนภายใต้ขั้วไฟฟ้าจึงไม่เกิดขึ้น [7] ดังรูปที่ 1.1(ก)

การสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่โปร่งใสดังรูปที่ 1.1(ข) จะเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากแสงที่ตกกระทบจะสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าลงไปในซิลิคอน หรือ บริเวณปลอดพาหะภายใต้ขั้วไฟฟ้าได้ และไปกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ส่งผลให้เกิดกระแสแสงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งใส และมีโครงสร้างแบบอินเทอร์ดิเจต ชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วโลหะทึบแสงทั่วไป



รูปที่ 1.1 (ก) ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แบบอินเทอร์ดิเจต และบริเวณรับแสงของโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสงของ Al

(ข) ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO แบบอินเทอร์ดิเจต และบริเวณรับแสงของโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสของ ITO

1.5 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ ในการศึกษาตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีชั้นไฟฟ้าโปร่งใสชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิเจคทีฟนั้น จึงได้มีการวางขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO เพื่อหาความหนาของฟิล์ม ITO ที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปสร้างเป็นชั้นไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM จากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยคำนึงถึงสมบัติทางแสง คือ เปอร์เซ็นการส่องผ่านแสงควบคู่ไปด้วย จากนั้นทำการออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีชั้นไฟฟ้าโปร่งใสชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิเจคทีฟ โดยการเคลือบฟิล์ม โลหะโปร่งใส ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคเตอร์ริงลงบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็็น ระนาบ (100) สภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ ซึ่งบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกันนั้นได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิเจคทีฟที่มีระยะห่างระหว่างชั้นไฟฟ้า, ขนาดชั้นไฟฟ้า และจำนวนชั้นไฟฟ้าที่เท่ากับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้า, กระแสแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพการตอบสนองทางแสง และผลตอบสนองทางความถี่ ระหว่างตัวตรวจวัดแสงที่มีชั้นไฟฟ้าแบบทึบแสง และตรวจวัดแสงที่มีชั้นไฟฟ้าแบบโปร่งใส โดยในการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะมีการศึกษาเงื่อนไขในการออกแบบโครงสร้าง ชั้นไฟฟ้าโปร่งใสแบบอินเตอร์ดิเจคทีฟร่วมด้วย คือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างชั้นไฟฟ้า, ขนาดชั้นไฟฟ้าตั้งแต่ 20, 40, 60 และ 80 μm และจำนวนชั้นไฟฟ้าตั้งแต่ 2, 4 และ 8 ชั้น เพื่อเป็นการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ จากนั้นนำตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะของชั้นไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิเจคทีฟตามเงื่อนไขที่ดีที่สุดไปผ่านกระบวนการแอนนัลเพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของฟิล์มบาง ITO และรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็็น จากนั้นจะได้ทำการศึกษาถึงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน, ลักษณะกระแส-แรงดัน และผลตอบสนองทางความถี่ เปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านการแอนนัล

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM
2. ศึกษาเทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะโปร่งใส ITO ด้วยการวัดระยะการส่งผ่าน (transmission line method; TLM) และปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect)
3. ศึกษาลักษณะ โครงสร้างแบบอินเตอร์ดิเจคทีฟ และตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อโครงสร้างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มี ITO เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส
5. ออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดีจิทเพื่อใช้ในการทดลอง
6. ศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพการตอบสนองทางแสง และผลตอบสนองทางความถี่ ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO
7. นำตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ไปผ่านกระบวนการแอนนีสและ ศึกษาลักษณะกระแส-แรงดัน, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพการตอบสนองทางแสง, ผลตอบสนองทางความถี่ และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน
8. วิเคราะห์ผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างก่อน และหลังนำตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ไปผ่านกระบวนการแอนนีสและสรุปผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของตัวตรวจวัดแสง หัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ที่ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเทอร์ดีจิท สมมติฐานและแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย และส่วนสุดท้ายคือขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 กระบวนการทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เช่น การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ การเกิด และการรวมตัวของพาหะ รวมถึงโครงสร้าง สมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของ ITO รอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ รอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำระหว่าง ITO กับซิลิคอน และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ ในภาวะสมดุลความร้อนและเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ซึ่งเป็นพื้นฐานของโครงสร้าง MSM รวมถึงโครงสร้างและการทำงานตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

บทที่ 3 การออกแบบ และกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเทอร์ดีจิท รวมถึงโครงสร้างต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO

บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยกล่าวถึงผลของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น กำแพงศักย์ชนิดกึ่งตัวนำ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และผลการทดลองลักษณะสมบัติทางแสงในกรณีที่ถูกปรับให้รับแสงแบบกระแสตรง และแบบกระแสสลับ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่เกิดจากรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎี และหลักการเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ สมบัติต่างๆ ของอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) รอยสัมผัสชนิดกึ่ง และ โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM เพื่อเป็นพื้นฐานในการอธิบายถึงกลไกการเกิดกระแสแสง รวมถึงหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประกอบไปด้วย การดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้เรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 400-700 nm โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” โดยปรากฏการณ์ที่แสงแสดงลักษณะสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห และการแทรกสอด เป็นต้น แต่ในฟิสิกส์ควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{\lambda} \quad (\text{J}) \quad (2.1)$$

หรือ

$$E_{\text{photon}} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{q\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{eV}) \quad (2.2)$$

โดยที่ ν คือ ความถี่ (Hz)

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (μm)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-sec

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

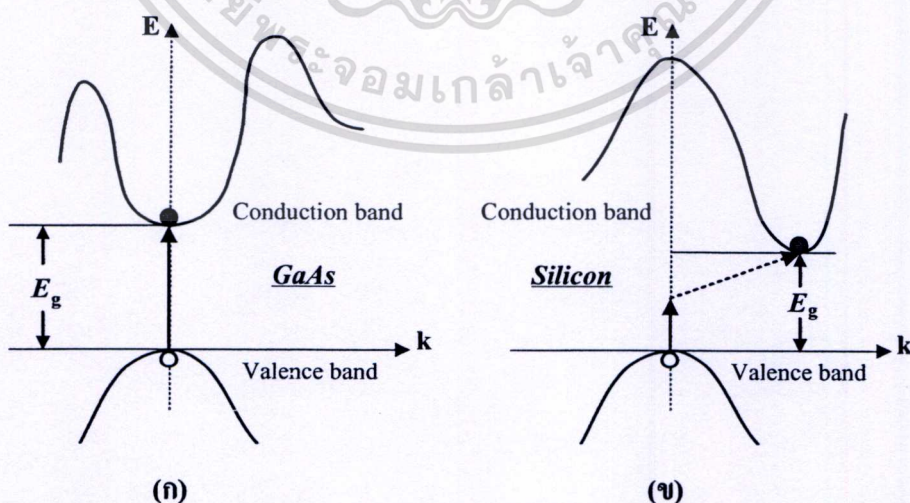
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap ; E_g) ของสารกึ่งตัวนำ ($E_{\text{photon}} \geq E_{g(\text{semi})}$) สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{semi})}$ การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น

2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง [25]

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่สามารถอธิบายถึงสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) และสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor) ได้เป็นอย่างดีคือกราฟ E-k diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งของค่าพลังงานที่สำคัญ 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าหรือจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า กับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยพบว่าในสารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs), อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAs), อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์จะอยู่ตรงกัน ดังรูปที่ 2.1 (ก) เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า ช่องแถบตรง (direct band gap) และสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง ส่วนกรณีที่สารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น ซิลิคอน (Si), เยอรมันเนียม (Ge) หรือสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุอื่นๆ ซึ่งตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์จะอยู่ไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า ช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) โดยที่สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้จะถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง โดยปกติจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง $k = 0$



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ

(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

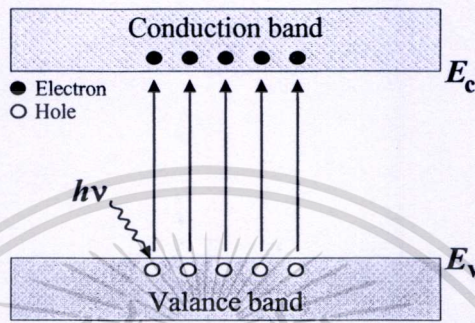
แต่จากรูปที่ 2.1 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าจะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือ จุดทั้งสองนี้มีค่า k หรือค่าโมเมนตัมที่ต่างกัน ดังนั้นลักษณะสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะแตกต่างกันมาก เช่นลักษณะสมบัติทางด้านแสง (optical properties) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงโฟตอนจากแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (E_g) และเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบนี้เกิดได้ง่ายทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดีจึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (optical devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง เลเซอร์ไดโอด และตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกกลับลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อนแล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด ในทำนองเดียวกันพลังงานโฟตอนจากแสงไม่สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรงถึงแม้ว่าพลังงานจากโฟตอนจะมีค่าเพียงพอ แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า จึงทำให้สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงมีการดูดกลืนหรือการคายพลังงานแสงไม่คืนัก สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงนี้จึงไม่นิยมนำมาทำเป็นไดโอดเปล่งแสง หรือเลเซอร์ไดโอด แต่สำหรับตัวตรวจวัดแสงยังคงมีการใช้งานอยู่ โดยเฉพาะซิลิคอน

2.1.3 การดูดกลืนแสง และการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล [25]

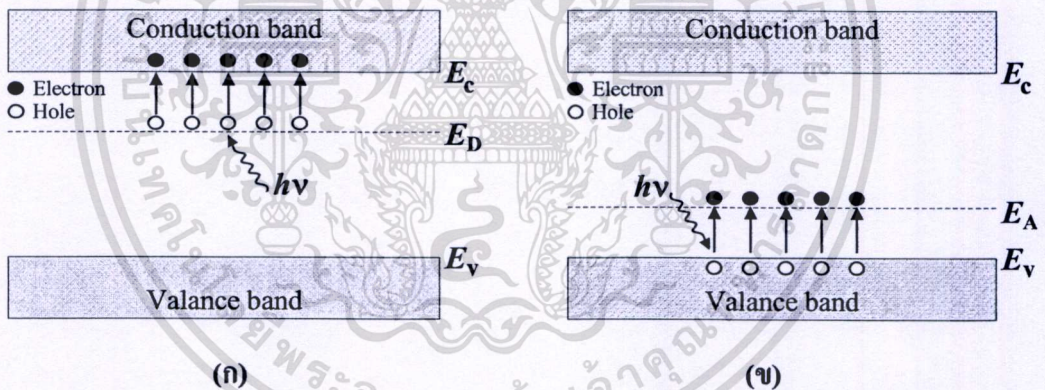
กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดจากการให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ($> E_g$) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ($E = h\nu$) ที่มีพลังงานมากพอ ($> E_g$) ที่จะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อดูดกลืนแสงเข้าไปแล้วสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ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

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส จะทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (donor level; E_D) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิด

พาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ในส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level; E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำการกักตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก)



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

(ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี

2.1.4 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

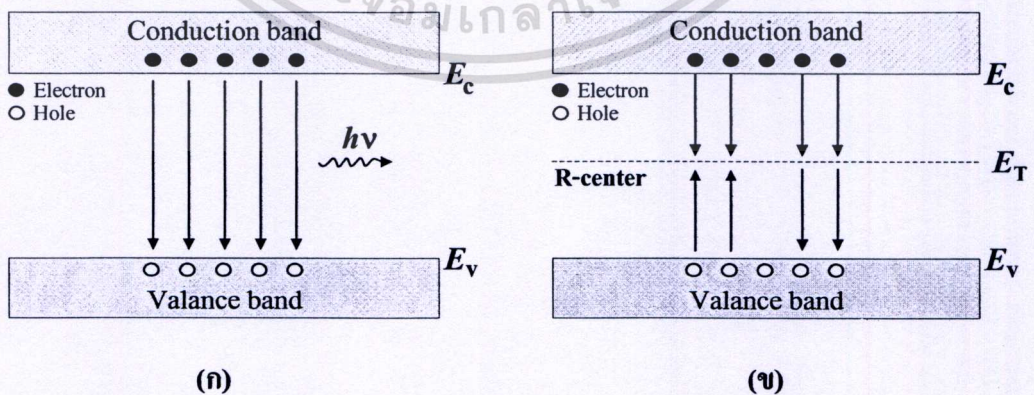
การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะ คือ โฮล และอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลตทิซ (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่ และการเกิดของพาหะ (recombination and generation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

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

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือ หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด



รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 อินเดียมทินออกไซด์ [13, 15, 18-19, 21]

ตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ (transparent conducting oxide; TCO) ชนิดอินเดียมทินออกไซด์ หรือ ITO ได้ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 เป็นต้นมา โดยมีจุดประสงค์ของการคิดค้นตัวนำชนิดนี้ขึ้น เพื่อต้องการได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่าฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ทั่วไป สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆ ไม่จะเป็นจอแสดงผลแบบแอลซีดี, การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแม้กระทั่งนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ดังเช่นในงานวิจัยนี้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการคิดค้นวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสชนิดใหม่ๆ ขึ้นมากมาย แต่ยังไม่มียานวิจัยใดปรากฏว่ามีวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ITO โดยสามารถอธิบายถึงสมบัติโดยทั่วไปของ ITO รวมถึงสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO ได้ดังนี้

2.2.1 สมบัติทั่วไปของอินเดียมทินออกไซด์

อินเดียมทินออกไซด์ (Tin-doped indium oxide; ITO) เกิดจากการเจือดีบุก (Sn) ลงไปในอินเดียมออกไซด์ (Indium (III) oxide; In_2O_3) ซึ่งดีบุกจะเข้าไปแทนที่อะตอมของอินเดียมไอออน (In^{3+}) และเมื่อดีบุกเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างดังกล่าวแล้วก็จะไปสร้างพันธะกับออกซิเจน จนทำให้เกิดเป็นทินออกไซด์แบบ SnO_2 ขึ้น เนื่องจากดีบุกแต่ละตัวนั้นมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ +4 ซึ่งค่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้มีผลโดยตรงกับสภาพความนำไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ เนื่องจากการที่ In^{3+} ถูกแทนที่ด้วย $\text{Sn}^{4+} + e^-$ จึงทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่ามีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ ITO นำไฟฟ้าได้ดี นอกจากนี้ยังมีการเกิดช่องว่างของออกซิเจนขึ้นในโครงสร้างของ ITO ด้วย โดยช่องว่างของออกซิเจนเหล่านี้ยังเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้สภาพความนำไฟฟ้าของ ITO มีค่าสูงขึ้นด้วย

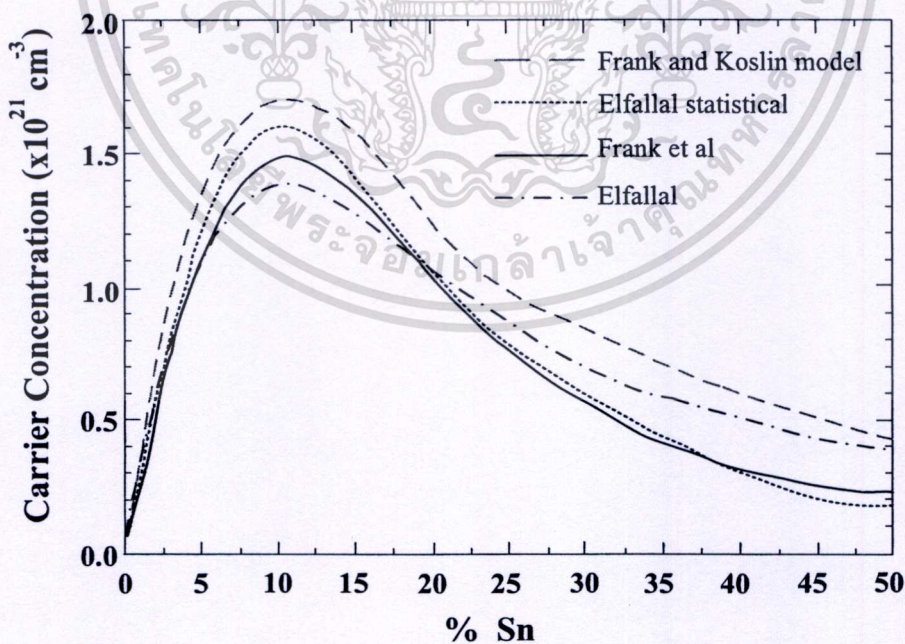
โดยจากงานวิจัยของ I. Hamberg และ C.G. Granqvist ซึ่งได้ศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีต่างๆ กัน ด้วยเครื่อง Transmission electron microscope (TEM) พบว่าอินเดียมทินออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างในการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบ Body Centered Cubic (BCC) โดยมีค่าคงที่ผลึก (lattice constant) ประมาณ 10.118 Å และสีของฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีสีเหลืองสว่าง โดยขึ้นกับระดับการเกิดซิเคชัน [32]

2.2.2 สมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์

อินเดียมทินออกไซด์จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานที่ค่อนข้างกว้าง มีค่าอยู่ที่ประมาณ 3.3-4.3 eV โดยมีคุณสมบัติทางแสงเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำทั่วไป กล่าวคือ มีการดูดกลืนพลังงานแสง และการส่องผ่านของแสงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 ข้างต้น โดยจากช่องว่างแถบพลังงานของอินเดียมทินออกไซด์ จึงทำให้อินเดียมทินออกไซด์สามารถให้แสงส่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

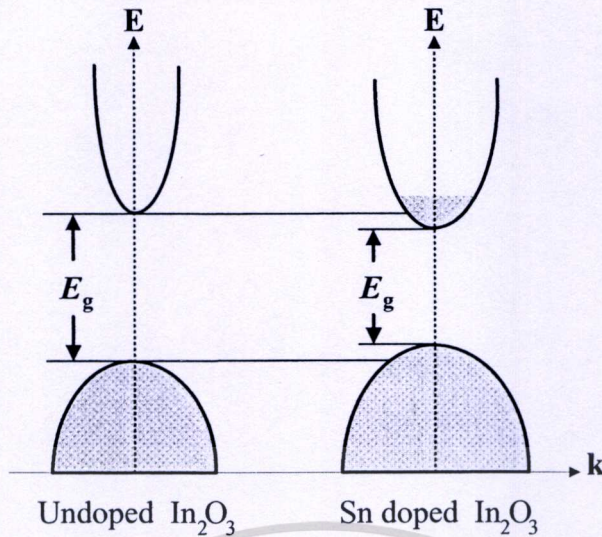
ผ่านได้ตั้งแต่ 380 – 2000 นาโนเมตร หรือตั้งแต่ความยาวคลื่นช่วงของตามองเห็นไปจนถึงแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด และมีค่าดัชนีหักเหแสงในช่วงการมองเห็นประมาณ 2 โดยที่ค่าดัชนีหักเหเหล่านี้ไม่ขึ้นกับตัวแปรใดๆ ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม เช่น อุณหภูมิชิ้นงาน, ความดันก๊าซออกซิเจนในกระบวนการเคลือบ และอัตราการเคลือบ เป็นต้น

โดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์นั้นจะถูกกำหนดด้วยตัวแปรที่สำคัญคือระดับความเข้มข้นในการเจือสาร ซึ่งเมื่อมีการเจือดีบุกลงในอินเดียมออกไซด์มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของพาหะ (carrier concentration) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวค่าหนึ่ง แล้วความหนาแน่นของพาหะเหล่านั้นก็จะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความน่าจะเป็นในการเข้าครอบครองของประจุบวกที่อยู่ตำแหน่งข้างเคียงของอะตอมดีบุก ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าในอินเดียมทินออกไซด์ลดลง โดยจากรูปที่ 2.5 นั้น อินเดียมทินออกไซด์มีความหนาแน่นของพาหะสูงที่สุดอยู่ที่ระดับ 10^{21} ที่ความเข้มข้นของดีบุกประมาณ 10% โดยความหนาแน่นของพาหะนี้มีความสัมพันธ์ และเกี่ยวข้องกับสภาพนำไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ที่มีค่ามากกว่า $10^3 (\Omega\text{-cm})^{-1}$ โดยระดับความเข้มข้นในการเจือดีบุกลงในอินเดียมออกไซด์จะทำให้ระดับพลังงานของอินเดียมออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งทำให้อินเดียมทินออกไซด์มีคุณสมบัติที่คล้ายโลหะ กล่าวคือ มีพาหะนำไฟฟ้า หรือ อิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบนำไฟฟ้าพร้อมที่จะนำไฟฟ้าได้เสมอ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพาหะ และ เปอร์เซ็นต์การเจือดีบุก ลงในอินเดียมออกไซด์ จากการทดลอง [26 - 28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบพลังงานของอินเดียมออกไซด์ และ อินเดียมทินออกไซด์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าในช่วงต้นจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นงาน, ความดันก๊าซออกซิเจนในกระบวนการเคลือบ และ อัตราการเคลือบ เป็นต้น

2.3 รอยสัมผัสชนิดช็อตกีย์ [22]

เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยรอยสัมผัสชนิดช็อตกีย์สองรอยสัมผัสที่เชื่อมต่อแบบหันหลังชนกัน ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้าง และ หลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในหัวข้อนี้จึงเป็นการกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ ในลักษณะของรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ เสียก่อน เพื่อให้เป็นพื้นฐานในการอธิบายถึงตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM หัวข้อถัดไป

รอยสัมผัสโลหะ และสารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor contact) เป็นรอยสัมผัสที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ รอยสัมผัสชนิดช็อตกีย์ (Schottky contact) หรือ เร็คติไฟร์ และรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างตัวอุปกรณ์ภายใน และอุปกรณ์ภายนอกต่างๆ ซึ่งจะต้องมีความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมากๆ โดยรอยสัมผัสที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_M), ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_S) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (χ) ของสารกึ่งตัวนำที่มาสร้างเป็นรอยสัมผัส และเนื่องจากเป้าหมายของวิทยานิพนธ์นี้ต้องการศึกษาถึงตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้ฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดเอ็นเท่านั้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงจะขอกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสแบบเร็คติไฟร์

2.3.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสช็อคกีย์

แถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.7 ระดับสุญญากาศ (vacuum level; E_0) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศนี้ นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ

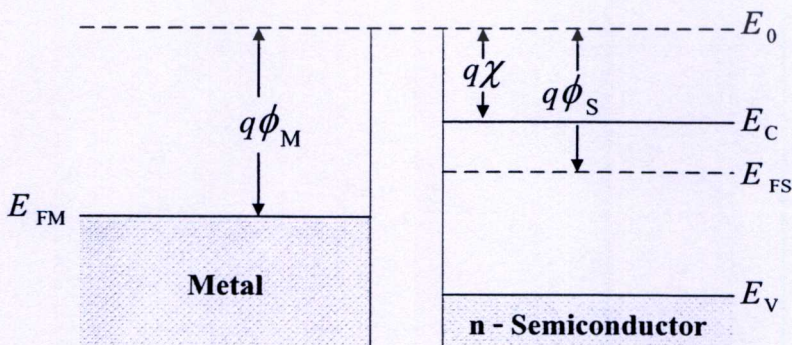
ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มี (fermi level; E_{FM}) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มีและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ เขียนแทนด้วย ϕ_M มีค่าดังสมการที่ 2.3 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \tag{2.3}$$

ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มีจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย ϕ_s มีค่าเท่ากับความต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มีดังสมการที่ 2.4

$$q\phi_s = E_0 - E_{FS} \tag{2.4}$$

ส่วนค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity; χ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.01 eV



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อคกีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

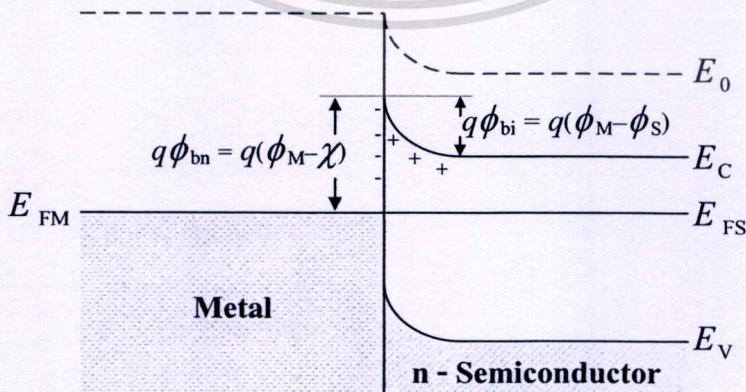
การเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M > q\phi_S$) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงเกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D^+) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะหารอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อนดังรูปที่ 2.8

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier; V_{bi}) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.5

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \quad (2.5)$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ชนิดกึ่ง (schottky barrier; ϕ_{bn}) มีค่าดังสมการที่ 2.6 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ชนิดกึ่งต่างๆกัน

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

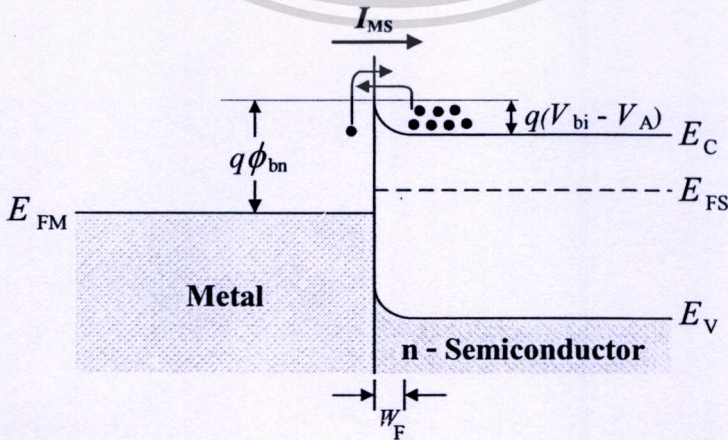
2.3.2 รอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วจะได้รับไบอัส [22]

2.3.2.1 รอยสัมผัสชนิดขั้วจะได้รับไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.9 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายใน ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงศักย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรง (I_F) มีค่าดังสมการที่ 2.7

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

โดยที่ A	คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
R	คือ ค่าคงตัวรีซาร์ดสัน มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (n-Si) [12]
ϕ_{bn}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ชนิดกึ่งขั้ว
q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
k	คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

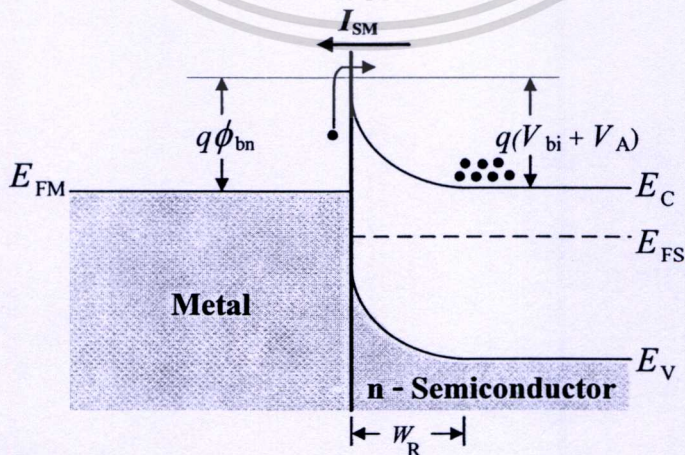
เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น ($V_{bi} + V_A$) และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคติคัลเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ (I_R) มีค่าดังสมการที่ 2.8

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.8)$$

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width; W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ (2.9) โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.9)$$

- โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
 N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
 V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
 V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ

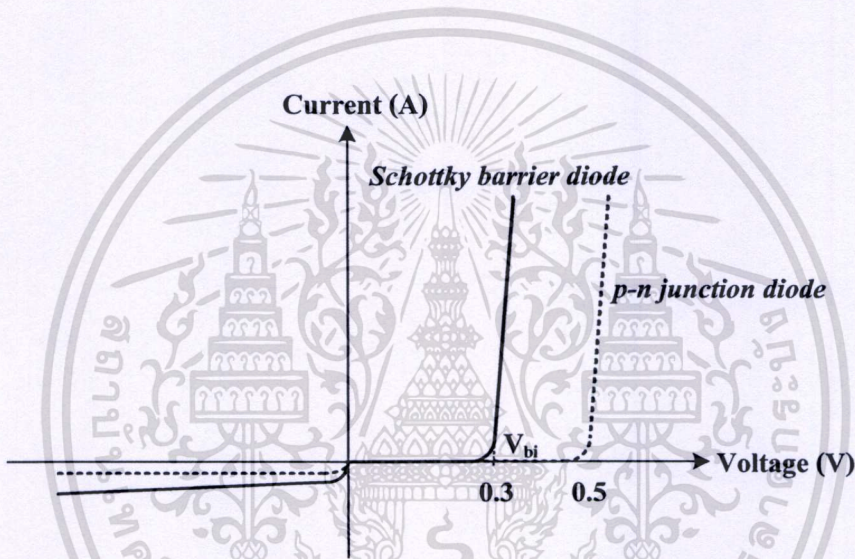


รูปที่ 2.10 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่โรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดซีดกี

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสเรกติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น คือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 พบว่าแรงดันภายในของซีดกีไคโอดมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็นที่มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V และเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนกระแสรั่วไหลของซีดกีไคโอดมีค่าสูงกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.11 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดกีไคโอด และไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

2.3.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดซีดกี

ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้า (C) มีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ ดังสมการที่ 2.10

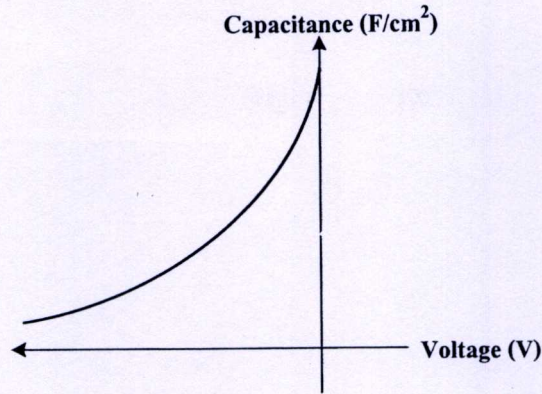
$$C = \frac{A\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.10)$$

โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

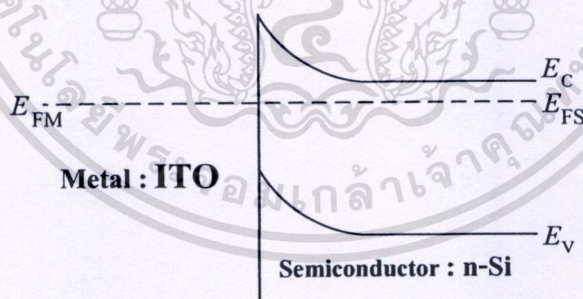
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีด็อกซ์ไโคไดโอด

2.3.5 รอยสัมผัสซีด็อกซ์ของอินเดียมทินออกไซด์ และซิลิคอนชนิดเอ็น [18, 29 - 30]

จากลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ที่เคลือบโลหะ คือ มีพาหะนำไฟฟ้าหรือ อิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบนำไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2.6 ทำให้อินเดียมทินออกไซด์ถูกพิจารณาให้เป็นโลหะ เมื่อถูกนำไปสร้างเป็นรอยสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากฟังก์ชันงานของ ITO ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 4.6 – 5.1 eV กับซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีค่าฟังก์ชันงานอยู่ที่ 4.2 eV จากความสัมพันธ์ในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่ารอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างอินเดียมทินออกไซด์ และซิลิคอนชนิดเอ็น จะมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ หรือรอยสัมผัสแบบซีด็อกซ์นั่นเอง โดยสามารถแสดงแถบพลังงานของรอยสัมผัสซีด็อกซ์ระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นในสถานะสมดุลความร้อนได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสซีด็อกซ์

ตารางที่ 2.1 การเกิดรอยสัมผัสโอห์มมิก และรอยสัมผัสเรกติไฟร์ ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ
ในอุดมคติ

work function	n – type semiconductor	p – type semiconductor
$\phi_M > \phi_S$	Rectifying	Ohmic
$\phi_M < \phi_S$	Ohmic	Rectifying

2.4 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ จะประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ หรือรอยสัมผัสชนิดกึ่ง 2 รอยสัมผัสที่ ต่อแบบหันหลังชนกัน ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนที่ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มี ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง และตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วสั้น ซึ่ง ความหมายของโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง คือ โครงสร้าง MSM ที่ได้รับ แรงดันไบอัสย้อนกลับที่เหมาะสมกับการใช้งาน แล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ในขณะเดียวกัน ยังคงเหลือส่วนบริเวณที่เป็นกลางที่เรียกว่าบริเวณนิวทรัล (neutral region) ระหว่างบริเวณปลอด พาหะกับรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ ได้รับการต่อแบบไบอัสตรง จากโครงสร้าง MSM รูปแบบนี้ พบว่า กระแสแสงจะเกิดขึ้นสองส่วนเป็นกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ (I_C) และ กระแสแสงโฟโต ไดโอด (I_D) จึงทำให้เกิดจุดเด่น คือ สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน ในทางกลับกัน โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นจะหมายถึงโครงสร้าง MSM ที่ได้รับการไบอัส แล้วบริเวณปลอดพาหะจะครอบคลุมช่องรับแสงทั้งหมดไม่มีบริเวณนิวทรัล ซึ่งทำให้มีจุดเด่น ตรงที่ ได้รับกระแสแสงมากขึ้น ในขณะเดียวกัน จะได้รับการตอบสนองทางความถี่เพิ่มขึ้น ด้วยแต่ โครงสร้างแบบนี้จะไม่สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน

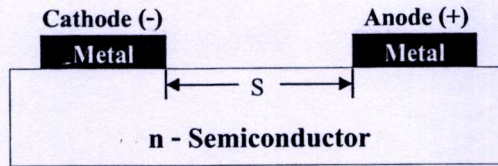
สำหรับในส่วนของทฤษฎีต่อจากนี้ไปจะขอกล่าวถึงเฉพาะโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่าง ขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างที่ได้ทำการศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้เท่านั้น

2.4.1 โครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล

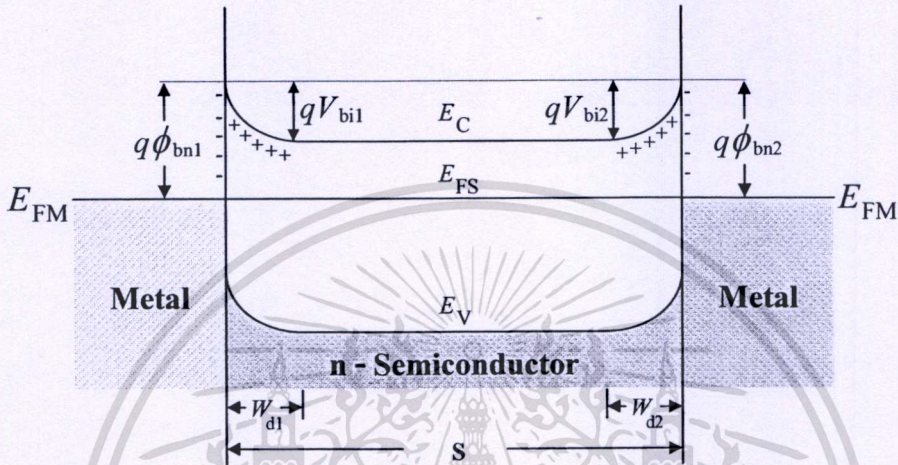
ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ จำนวนสองรอยสัมผัส ต่อกันแบบหันหลังชนกันมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (S) โดยสาร กึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองทั้งสอง จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยน ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล ความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.14 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่ง เป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็น ขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะ ที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและ กระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ชนิดกึ่งของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มี ขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มี ขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{a1}) และด้าน แอโนด (W_{a2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{a1} = W_{a2} = W_a$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารทวงเงินเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นใบเซอร์โชนดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.14 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน

2.4.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคติย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคติย์ ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่

เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current; I_{dark}) ของโครงสร้าง MSM โดยกระแสมืดของโครงสร้าง MSM จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอนโอดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก [33]

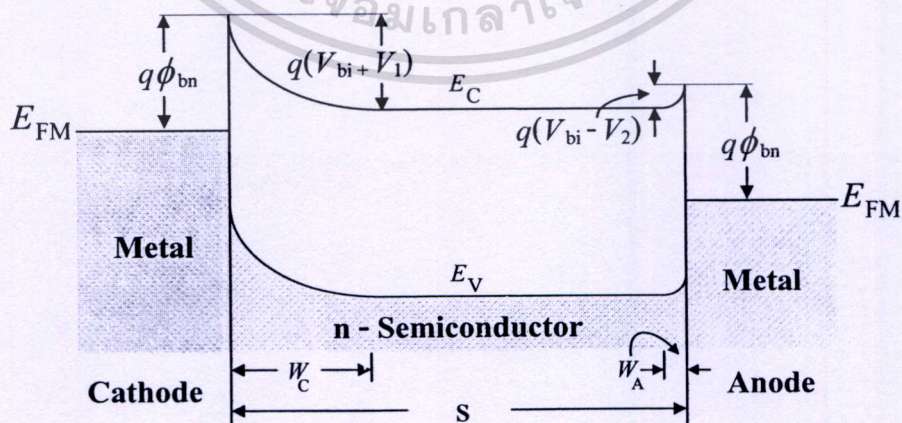
ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้าง MSM กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง คือ มีผลรวมความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดและด้านแอนโอดน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจึงทำให้เกิดมีบริเวณนิวทรัลขึ้น ซึ่งบริเวณนิวทรัลนี้จะพิจารณาว่ามีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด สามารถหาได้จากที่ 2.10

$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_1)}{qN_D}} \quad (2.10)$$

ส่วนที่รอยสัมผัสด้านแอนโอด กำแพงศักย์ภายในมีค่าลดลงเป็น $V_{bi} - V_2$ และบริเวณปลอดพาหะด้านแอนโอด (W_A) มีขนาดแคบลง ดังสมการที่ 2.11

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V_2)}{qN_D}} \quad (2.11)$$

โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
 q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
 N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
 V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

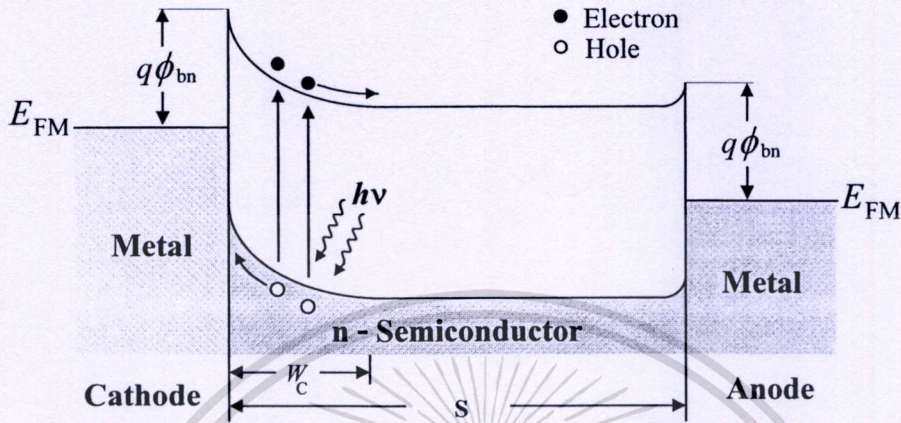


รูปที่ 2.15 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ

โครงสร้าง MSM สามารถใช้ทำหน้าที่ตรวจจับแสงได้เช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสงชนิดอื่นๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกระแสแสงในตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM



รูปที่ 2.16 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับ โฟตอนและมีแสงตกกระทบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.16 เมื่อแสงตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงาน โฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent; I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัล เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [2,3]

2.4.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยความจุไฟฟ้ารวม (C_T) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสองประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด (C_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านแอโนด (C_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.12, 2.13 และ 2.14

$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \quad (2.12)$$

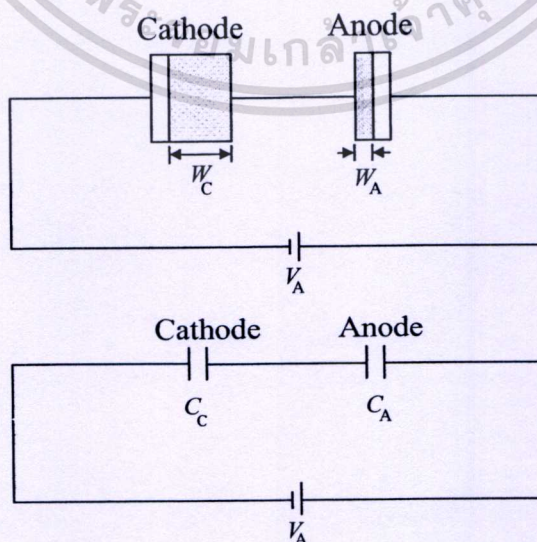
โดยที่

$$C_C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.13)$$

$$C_A = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.14)$$

โดย

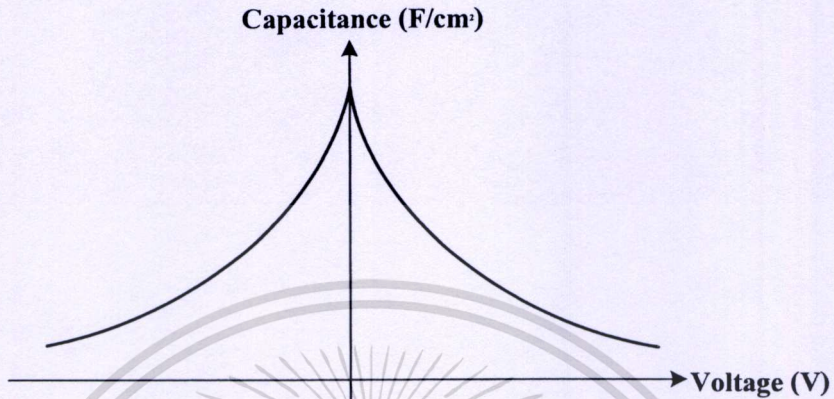
- ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
- N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
- V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
- V_A คือ แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสด้านแคโทด



รูปที่ 2.17 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

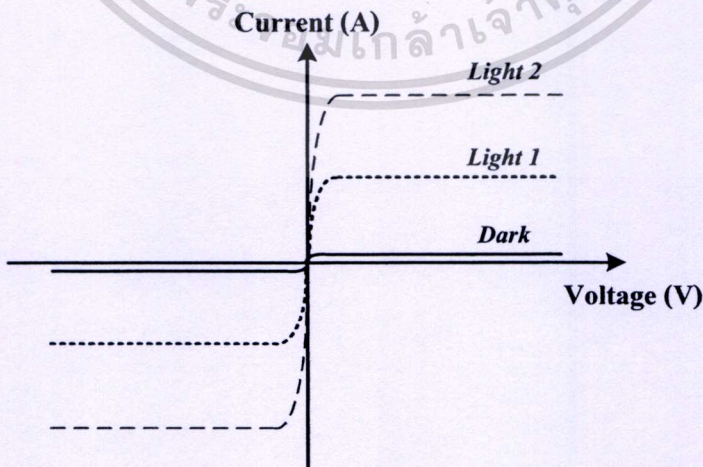
จากรูปที่ 2.18 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส โดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.18 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

2.4.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ในรูปที่ 2.19 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของ MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่ ได้รับ ไบอัสตรงและด้านที่ ได้รับ ไบอัสย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบบมีความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 2.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพการตอบสนอง และผลตอบสนองต่อสเปกตรัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency; η) หมายถึง จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสออกสู่วงจรภายนอก แบ่งได้เป็น ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency; η_{int}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency; η_{ext}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงต้องรวมผลของการสะท้อน และค่าคงที่การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ (absorption coefficient; α) ด้วย โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึง ประสิทธิภาพควอนตัมจะหมายถึงประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.15 คือ

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / hv} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{hv}{P_{inc}} \quad (2.15)$$

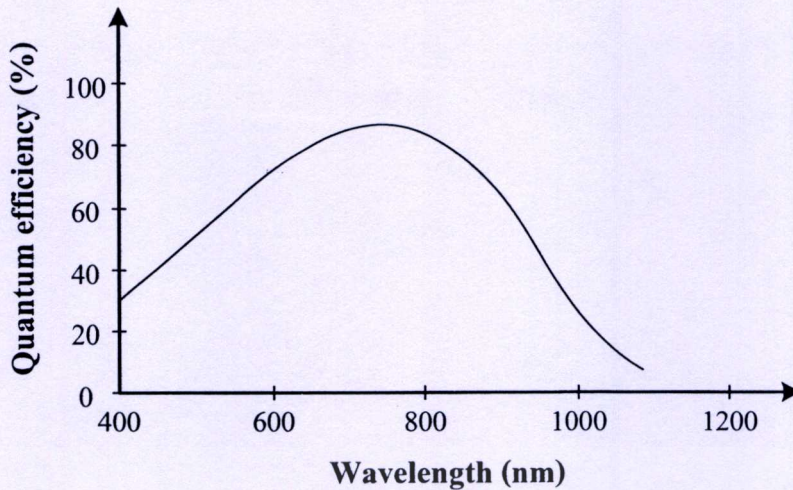
โดยที่	P_{inc}	คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
	I_p	คือ กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์
	ν	คือ ความถี่ของคลื่น

ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในโดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 90% แต่ถ้าไม่มีการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนบนผิวของตัวตรวจวัดแสง แสงที่ตกกระทบชั้นสารกึ่งตัวนำจะสะท้อนออกไปประมาณ 30% เนื่องจากดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำและอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกจะถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 70% [31]

สภาพการตอบสนอง (responsivity; \mathfrak{R}) หมายถึง กระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสง ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม สามารถหาได้จากสมการที่ 2.16 คือ

$$\mathfrak{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{hv} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.16 พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน



รูปที่ 2.20 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของตัวตรวจวัดแสงตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอน

ผลตอบสนองของสเปกตรัมของแสง หมายถึง คุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืนโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นมากขึ้นและมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้า เมื่อความยาวคลื่นลดลงค่าคงที่ในการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการดูดกลืนโฟตอนเฉพาะบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์รวมตัวที่ผิวทำให้ผลตอบสนองตัวตรวจวัดแสงลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน สำหรับตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอนจะมีผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงดังรูปที่ 2.20

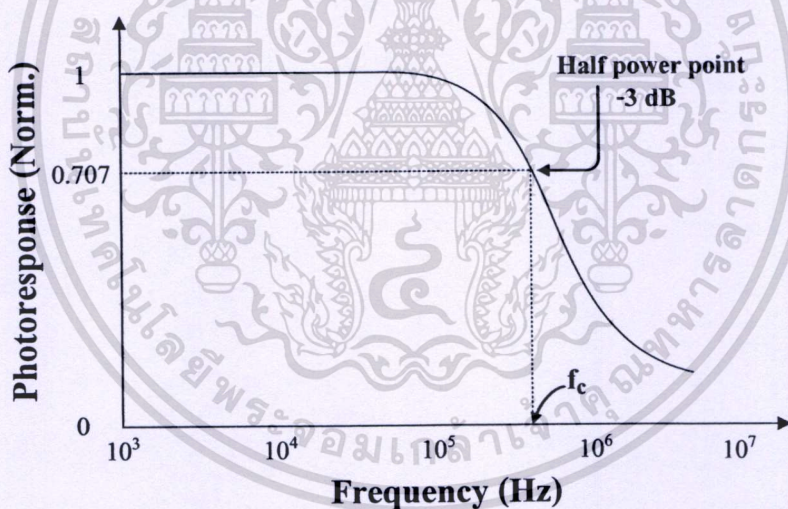
จากรูปที่ 2.20 จะพบว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น โดยมีผลตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared) และการตอบสนองจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นความยาวคลื่นสูงสุดที่สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถตอบสนองได้คือ 1110 nm

2.4.7 ความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอกตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น (t_r) และช่วงเวลาลง (t_f) โดยช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นกับแพ็คเกจต่างๆ คือ เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ, เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ และค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัดแสงกับค่าโหลด ความต้านทานภายนอก ดังนั้นถ้าต้องการให้ตัวตรวจวัดแสงตอบสนอง ความถี่ที่ความเร็วสูงๆ จะต้องพิจารณาถึงแฟกเตอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มี พื้นที่ขนาดเล็กๆ เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น

แบนด์วิธ (bandwidth) คือ อัตราความเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณ ความถี่ค่าต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบาง ประการของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่ สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.21 ในทางปฏิบัติการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มี ค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่นี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency; f_c) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุด กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (half power point) หรือมีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงมีความหมายถึง ค่าความถี่สูงสุดที่ตัวตรวจวัดแสงสามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานตัว ตรวจวัดแสงมีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

บทที่ 3

การออกแบบ และกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียด และขั้นตอนในการออกแบบลวดลายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจเทชนิค ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al รวมถึงลวดลายต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO จากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการสร้าง และเทคนิคที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานต่างๆ ตามที่กล่าวมาข้างต้น ณ ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยอุปกรณ์ทั้งหมดที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้ จะถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.1 การออกแบบลวดลาย และการสร้างกระจกต้นแบบ

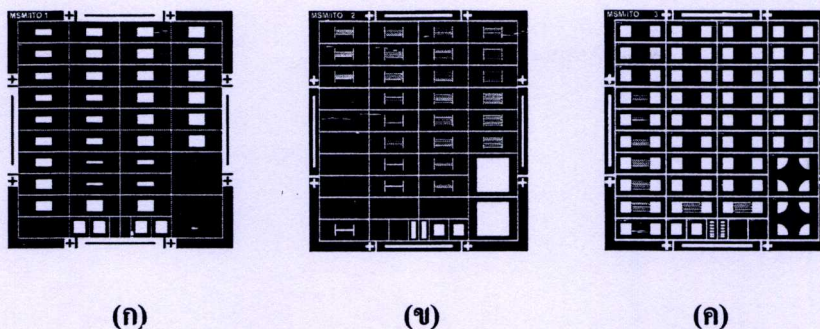
การออกแบบลวดลาย ถือเป็นขั้นตอนแรกสำหรับกระบวนการสร้างทั้งหมด เนื่องจากการออกแบบนั้น จะต้องเริ่มจากการศึกษาถึงข้อจำกัดต่างๆ ของลวดลายที่จะทำการออกแบบ รวมถึงข้อจำกัดในกระบวนการสร้างที่แตกต่างกันของแต่ละห้องปฏิบัติการ โดยหลังจากการออกแบบลวดลายแล้ว ยังจะต้องทำการจัดวางลวดลายให้อยู่ในตำแหน่งที่มีความเหมาะสมสำหรับในกระบวนการสร้าง และให้สามารถบรรจุอยู่ในพื้นที่ของฐานรองที่จำกัดได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายโดยใช้โปรแกรม CorelDRAW X4 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ออกแบบไว้ไปทำการสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์มป้องกันแสง แล้วนำไปติดลงบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างต่อไป

โดยลวดลายทั้งหมดที่ได้ทำการออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบให้รวมอยู่ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจเทชนิค ITO/n-Si/ITO ทั้งหมด เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองที่มีเงื่อนไขในการสร้างเดียวกันได้ ซึ่งในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้นั้น จะต้องมีกระจกต้นแบบจำนวน 3 แผ่นด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 คือ

- 1 กระจกต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (oxide mask) ใช้ในการลอกชั้นออกไซด์เพื่อให้เกิดพื้นที่รับแสง และให้มีบริเวณที่ยังคงเป็นชั้นป้องกันไม่ให้เกิดรอยสัมผัสที่ไม่ต้องการ
- 2 กระจกต้นแบบสำหรับชั้น ITO (contact mask) ใช้เป็นต้นแบบในการสร้างลวดลายชั้น ITO เพื่อให้เกิดรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ
- 3 กระจกต้นแบบสำหรับใช้สร้างลวดลายของชั้นอลูมิเนียม (metal mask) เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของชิ้นงาน

โดยมีลวดลายที่ได้ทำการออกแบบไว้เพื่อใช้ในการทดลองต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mask 1 : oxide mask

Mask 2 : contact mask

Mask 1 - Oxide Mask [11/8/2008]
(MSM Interdigitated ITO¹)Mask 2 - Lift off ITO [11/8/2008]
(MSM Interdigitated ITO¹)Mask 3 - Lift off Al [11/8/2008]
(MSM Interdigitated ITO¹)

Mask 3 : metal mask

(ง)

รูปที่ 3.1 ลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง และลวดลายที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO

- (ก) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (ข) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้น ITO
(ค) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม (ง) ภาพถ่ายกระจกต้นแบบ

3.1.1 ลวดลายที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO

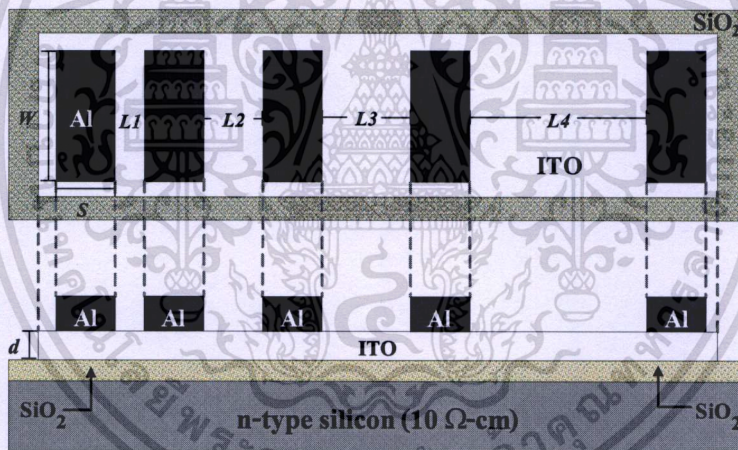
จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาถึงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำไปพิจารณาเลือกความหนาของฟิล์ม ITO ที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส และพิจารณาเลือกอุณหภูมิในการปรับปรุงคุณภาพของ ITO และ รอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดอื่น โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษานั้นประกอบไปด้วยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพคล่องของพาหะ ซึ่งลักษณะสมบัติของ ITO ต่างๆ เหล่านี้สามารถหาได้ด้วยการวัดจากระยะการส่งผ่าน (transmission line method; TLM) และ การวัด โดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) โดยรูปแบบของลวดลายที่ใช้ในการวัด และสิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบสำหรับเทคนิคการวัดด้วยวิธี TLM และ ปรากฏการณ์ของฮอลล์มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

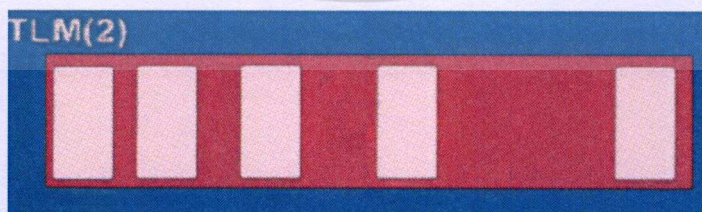
3.1.1.1 ลวดลายการวัดระยะการส่งผ่าน หรือ การวัดแบบ TLM

เทคนิคการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM เป็นเทคนิคการวัดเพื่อหาค่าความต้านทานภายในเนื้อสาร โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก เพื่อหาค่าความต้านทานในเนื้อสารที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าจากโลหะอลูมิเนียมเพื่อให้เกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกกับ ITO [34] โดยมีรูปแบบของลวดลาย และโครงสร้างของชิ้นงานที่ใช้ในการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยจากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่า ITO จะถูกกำหนดให้มีความหนาเท่ากับ d ขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า (S) ที่สร้างจากโลหะอลูมิเนียมเท่ากับ $200\ \mu\text{m}$ ความยาวของขั้วไฟฟ้า (W) เท่ากับ $400\ \mu\text{m}$ โดยจะต้องมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (L) เป็นระยะทาง $L1 < L2 < L3 < L4$ เท่ากับ $80, 160, 320$ และ $640\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ โดยวิธีการทดลอง และการคำนวณผลจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.1.1

เทคนิคการวัดแบบ TLM ถือเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ความแม่นยำที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และขนาดของขั้วไฟฟ้าที่แน่นอน อีกทั้งมีขนาดของลวดลายที่ค่อนข้างเล็ก [35]



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM

(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนงำที่ใช้ในการออกแบบ

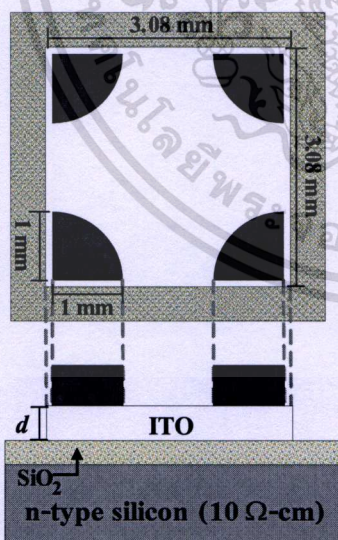
(ข) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการ

สร้างตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

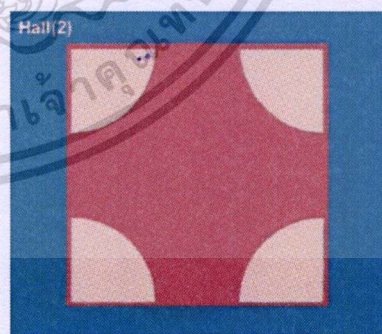
3.1.1.2 ลวดลายการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์

ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นเทคนิคการวัดที่มีความสำคัญ และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการทดลองนี้สามารถหาพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของวัสดุ หรือสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดได้ เช่น ค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยมีหลักการง่าย ๆ คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุ หรือแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ขณะให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านวัสดุ หรือแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับทิศของกระแส จะทำให้มีสนามไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ ทางด้านขวางเกิดขึ้น โดยมีทิศตั้งฉากกับทิศของกระแส และทิศของสนามแม่เหล็ก ซึ่งความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะได้ [25] โดยวิธีการทดลอง และการคำนวณผลจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.1.2

จากหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าจำเป็นต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า และวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวขวาง ดังนั้นการออกแบบชิ้นงานที่จะนำมาทำการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์นี้ จะต้องทำการออกแบบใช้ชิ้นงานมีขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในการทดลองทั้งหมด 4 ขั้ว และเพื่อให้ค่าที่ทำการวัด มีความถูกต้อง ขั้วไฟฟ้าทั้งหมดจะต้องมีระยะห่างที่เท่ากัน และมีขนาดที่เล็กที่สุดเพื่อลดผลของความต้านทานที่บริเวณขั้วไฟฟ้า โดยมีรูปแบบของลวดลาย และโครงสร้างของชิ้นงานที่ใช้ในการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยจากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า ITO จะถูกกำหนดให้มีความหนาเท่ากับ d ขนาดรัศมีของขั้วไฟฟ้าที่สร้างจากโลหะอลูมิเนียมเท่ากับ 1 mm และขนาดของ ITO เท่ากับ 3.08×3.08 mm



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์

(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

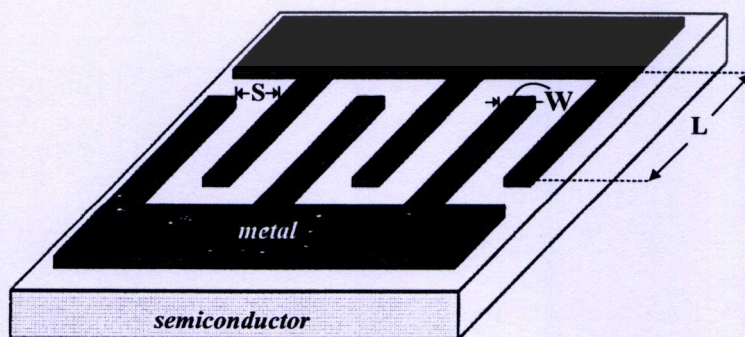
3.1.2 ลวดลายตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทชนิด

ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทชนิดนั้นจะมีลักษณะคล้ายส้อม (fork shape) หรือ นิ้วมือ (finger shape) สลับกัน 2 ด้านดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตเทชนิดนั้นมีตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาดที่สำคัญ 3 ตัวแปรด้วยกัน คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) และความยาวของขั้วไฟฟ้า (L) ซึ่งการออกแบบขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทให้มีความยาวและจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ที่เหมาะสมจะทำให้ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแสงได้สูงที่สุด [7, 23]

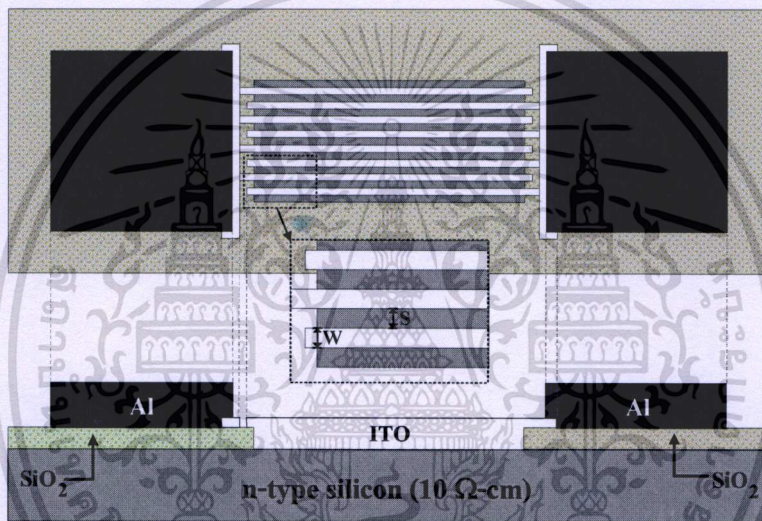
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al โดยให้มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาด และจำนวนขั้วไฟฟ้าต่างๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง ดังนี้

- 1 ออกแบบให้มีจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) เปลี่ยนแปลง เท่ากับ 2, 4 และ 8 ขั้ว โดยที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าคงที่เท่ากับ $40 \mu\text{m}$ และความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm เพื่อใช้ในการศึกษาผลของจำนวนขั้วไฟฟ้า
- 2 ออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) เปลี่ยนแปลง เท่ากับ 20, 40, 60 และ $80 \mu\text{m}$ โดยที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าคงที่เท่ากับ $40 \mu\text{m}$, ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว เพื่อใช้ในการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า
- 3 ออกแบบให้มีความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 20, 40, 60 และ $80 \mu\text{m}$ โดยที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าคงที่เท่ากับ $40 \mu\text{m}$, ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว เพื่อใช้ในการศึกษาผลของความกว้างของขั้วไฟฟ้า

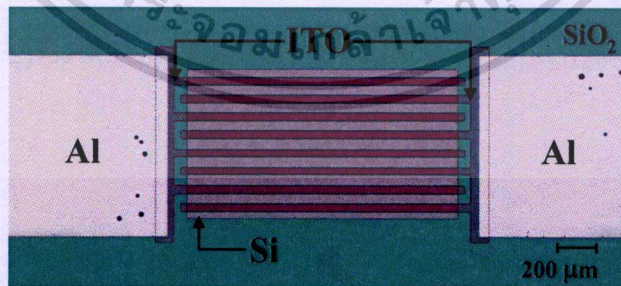


รูปที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเท และตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาดต่างๆ

โดยโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับ ซิลิคอนชนิดเอ็็น (n-Si) โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นที่ใช้ในการกำหนดขนาดของพื้นที่รับแสง (active area) และมีโลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (bonding pad) อยู่บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้จะต้องทำการออกแบบลวดลายต้นแบบด้วยกัน 3 ลวดลาย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 โดยจากลวดลายดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหนึ่งในนั้นเป็นลวดลายของโลหะอลูมิเนียม ซึ่งทำให้ในงานวิจัยนี้สามารถออกแบบตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัลให้อยู่ในลวดลายต้นแบบเดียวกันกับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัล

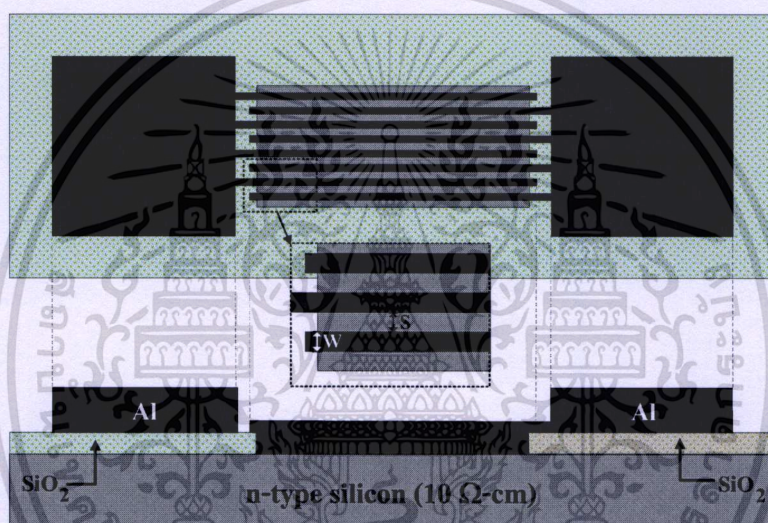
(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

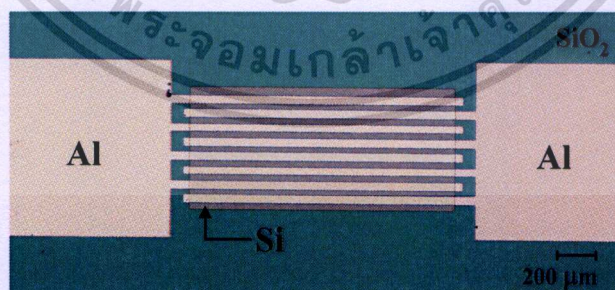
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในวงจำกัดเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al นั้นจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม กับ ซิลิคอนชนิดเอ็น โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นที่ใช้ในการกำหนดขนาดของพื้นที่รับแสงเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และมีส่วนของขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ภายนอกอยู่บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีรูปร่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

หลังจากทำการออกแบบลวดลายทั้งหมด และทำการสแกนลวดลายดังกล่าวลงบนแผ่นฟิล์มป้องกันแสงแล้ว จากนั้นได้ทำการตรวจสอบลวดลายบนกระจกต้นแบบด้วยกล้องไมโครสโคป พบว่าลวดลายที่ได้มีความคมชัด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นกระจกต้นแบบสำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต

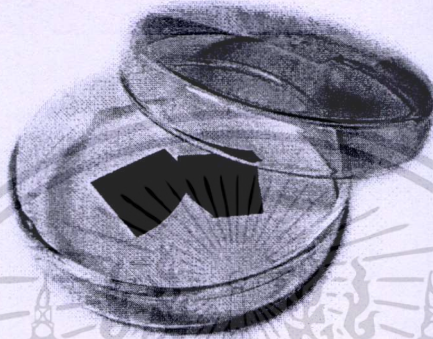
(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

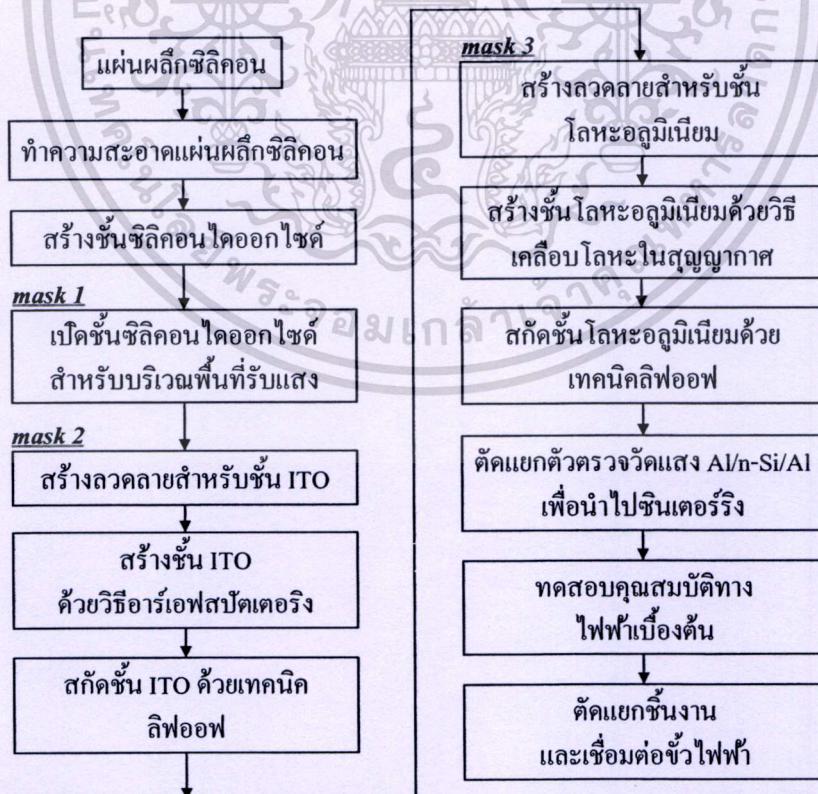
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบอินเทอร์ดิเจิตในงานวิจัยนี้ จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวม ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยหลังจากขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างกระจกต้นแบบแล้วจึงจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการสร้าง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฐานรองเป็นแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 100 นาโนเมตร สภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 มาเข้าสู่กระบวนการสร้าง โดยมีขั้นตอนทั้งหมดแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นหนา 100 นาโนเมตร สภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$



รูปที่ 3.8 แผนผังกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในขั้นตอนของกระบวนการสร้างจะได้กล่าวถึงลำดับ และขั้นตอนรวมถึงเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 5 กระบวนการ คือ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน กระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงาน ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีพื้นฐาน หรือกระบวนการลิฟออฟ กระบวนการเคลือบโลหะด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง หรือ วิธีเคลือบโลหะด้วยความร้อนในสุญญากาศ และ กระบวนการซินเตอร์ริง ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนเบื้องต้น

การทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันที่ผิวของแผ่นผลึกออก จะทำเป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการสร้างทั้งหมดเสมอ โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อุลตราโซนิก (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water ; DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ดั้มในกรดไนตริก (nitric acid : HNO_3) จำนวน 2 แก้วๆ ละ 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- ดั้มใน DI 2 แก้วๆ ละ 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึกแบบมาตรฐาน

- ดั้มในไตรโคโลเอทธีรีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน
- อุลตราโซนิกในอะซิโตน (Acetone) 2 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ (slide etching) ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนสร้างชั้นออกไซด์

- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ที่มีความเข้มข้น 5 % ใช้เวลา 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการออกซิเดชัน

ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation) เพื่อให้ได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 4000 Å โดยให้แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1000°C โดยมีเงื่อนไข และกระบวนการสร้างดังนี้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้น (wet oxidation) เป็นเวลา 30 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที

3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 1

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 1 (oxide mask) เป็นการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้น เพื่อให้เกิดบริเวณรับแสง หรือเปิดช่องให้เกิดพื้นที่ของรอนสัมผัสระหว่างโลหะ กับสารกึ่งตัวนำ (ITO/n-Si, Al/n-Si) โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบที่ 1 ด้วยเครื่องปรับช้อนมาส์ค (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 10 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer) จำนวน 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสง โดยการจุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH₃F ในอัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 Å/นาที เป็นเวลาประมาณ 4 นาที

- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยการจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 2 สำหรับเทคนิคลิฟออฟ (lift off technique) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 2 (contact mask) เป็นการสร้างลวดลายสำหรับ ITO ที่จะทำการสร้างในขั้นตอนต่อไป โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 2 นี้ จะมีเงื่อนไขของกระบวนการที่สอดคล้องสำหรับการสกัดชั้นฟิล์ม ITO ด้วยเทคนิคลิฟออฟ โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (PFI 34 A) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงมีความหนาประมาณ 1.5 μm
- อบแผ่นครั้งแรก ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 45 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ที่ 2 ด้วยเครื่องปรับชั้นมาสก์ ใช้เวลาในการฉายแสง 30 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย 2 แก้ว แก้วละ 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

5. กระบวนการเคลือบฟิล์ม ITO

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยฟิล์ม ITO โดยเทคนิคอาร์เอฟสปีตเตอริง (r.f. sputtering) ด้วยสารเคลือบ (target) อินเดียมทินออกไซด์บริสุทธิ์ 99.99% เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 นิ้ว มีอัตราส่วนระหว่าง In_2O_3 90 wt% กับ SnO_2 10 wt% ด้วยกำลังอาร์เอฟ (r.f. power) 100 W เป็นเวลา 30 นาที ให้มีความหนาประมาณ 500 nm

6. กระบวนการสกัดชั้นฟิล์ม ITO ด้วยเทคนิคลิฟออฟ

- จุ่มในอะซิโตน 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 1 นาที
- จุ่มลงในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 สำหรับเทคนิคการลิฟออฟ

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 (metal mask) เป็นการสร้างลวดลายสำหรับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมที่จะทำการสร้างในขั้นตอนต่อไป โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 นี้ จะมีเงื่อนไขของกระบวนการที่สอดคล้องสำหรับการสกัดชั้นฟิล์มอลูมิเนียมด้วยเทคนิคลิฟออฟ โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (PFI 34 A) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที่ เป็นเวลา 40 วินาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงมีความหนาประมาณ 1.5 μm
- อบแผ่นครั้งแรก ให้ น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 45 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ที่ 2 ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาส์ค ใช้เวลาในการฉายแสง 30 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย 2 แก้ว แก้วละ 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

8. กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr

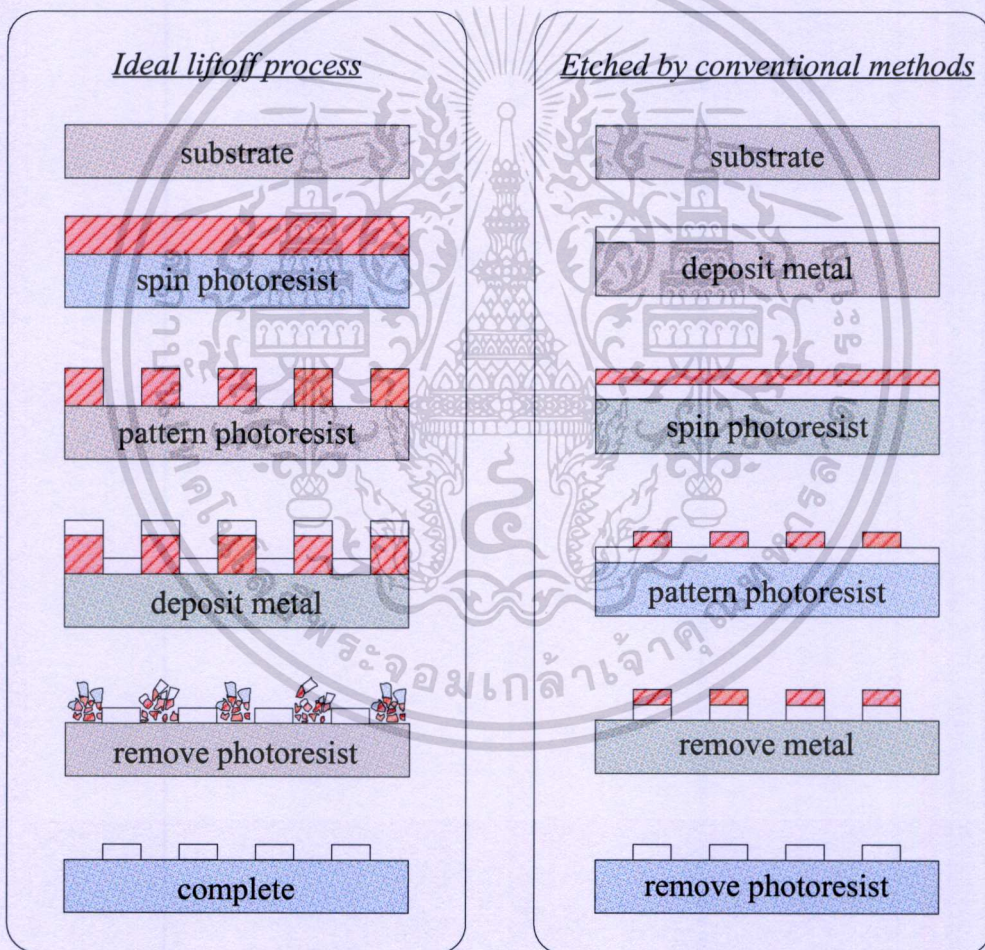
9. กระบวนการสกัดชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม ด้วยเทคนิคลิฟออฟ

- จุ่มในอะซิโตน 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 1 นาที
- จุ่มลงในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ตัดแยกเฉพาะตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เพื่อเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริงต่อไป

10. กระบวนการซินเตอร์ริงสำหรับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al

กระบวนการซินเตอร์ริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500°C โดยให้มีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1000 cc/นาที่ เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดี และมีกระแสรั่วไหลต่ำที่สุด [36]

จากกระบวนการสร้าง จะเห็นได้ว่าในขั้นตอนของการสกัดชั้นฟิล์ม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการสกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ ซึ่งแตกต่างไปจากการสกัดชั้นฟิล์มโลหะในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา [4, 8] กล่าวคือ ในกระบวนการสกัดชั้นฟิล์มโดยทั่วไป (etched by conventional methods) นั้นจะมีการเคลือบฟิล์มที่ทำการสร้างลงก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี แต่ในกรณีของกระบวนการลิฟออฟนั้นจะทำการสร้างลงด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคต่างๆ กัน โดยสามารถเปรียบเทียบกระบวนการสร้างสำหรับการสกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ และกระบวนการสกัดชั้นฟิล์มโดยทั่วไปได้ดังแสดงในรูปที่ 3.9 [37,38]

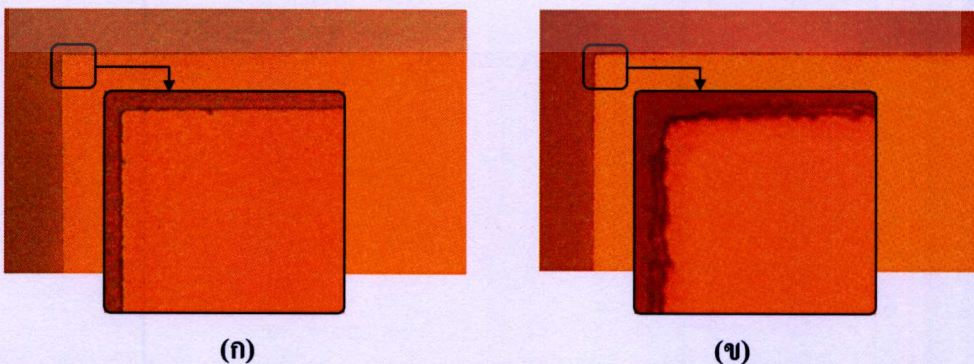


รูปที่ 3.9 ความแตกต่างระหว่างกระบวนการสกัดชั้นฟิล์มแบบลิฟออฟ และการสกัดชั้นฟิล์มทั่วไป

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่ากระบวนการลิฟออฟนั้นเป็นกระบวนการสร้างลวดลายของชั้นฟิล์มโลหะที่ง่าย และไม่ซับซ้อน ซึ่งมีฟิล์มโลหะจำนวนมากที่มักใช้การสร้างลวดลายด้วยวิธีนี้ เช่น แพลทินัม (Pt), แทนทาลัม (Ta), นิกเกิล (Ni) หรือ ฟิล์มบางอื่นๆ ที่มีความยุ่งยากในการสกัดชั้นฟิล์มด้วยวิธีทั่วไป โดยกระบวนการลิฟออฟแบบพื้นฐานนั้นลวดลายจะถูกสร้างลงบนฐานรองด้วยน้ำยาไวแสง โดยชั้นฟิล์มโลหะ หรือฟิล์มบางอื่นๆ จะถูกเคลือบลงบนชั้นของน้ำยาไวแสง และบางส่วนจะครอบคลุมลงมายังบริเวณที่เปลือกลวดลายของน้ำยาไวแสงไว้ ดังนั้นเมื่อทำการล้างน้ำยาไวแสงออกจึงจะเหลือเพียงชั้นฟิล์มที่ต้องการเท่านั้น [37 - 39] และเนื่องจากตัวตรวจวัดแสง MSM ที่จะได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ มีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสจากฟิล์ม ITO ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟิล์ม ITO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์นั้นมีลักษณะโปร่งใสจนกระทั่งสามารถมองเห็นตัวอักษรที่อยู่ด้านหลังของฟิล์ม ITO ได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของ ITO ในขั้นตอนการสกัดชั้นฟิล์ม ITO แบบทั่วไปได้ค่อนข้างยาก จึงทำให้มีการสกัดชั้นฟิล์มเกินจากลวดลายต้นแบบ (over etched) เป็นเหตุให้ลวดลายของชิ้นงานที่ได้ไม่คมชัด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้กระบวนการลิฟออฟในการสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสงนั่นเอง



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่เคลือบบนฐานรองที่เป็นกระจก โดยมีความหนาประมาณ 500 nm

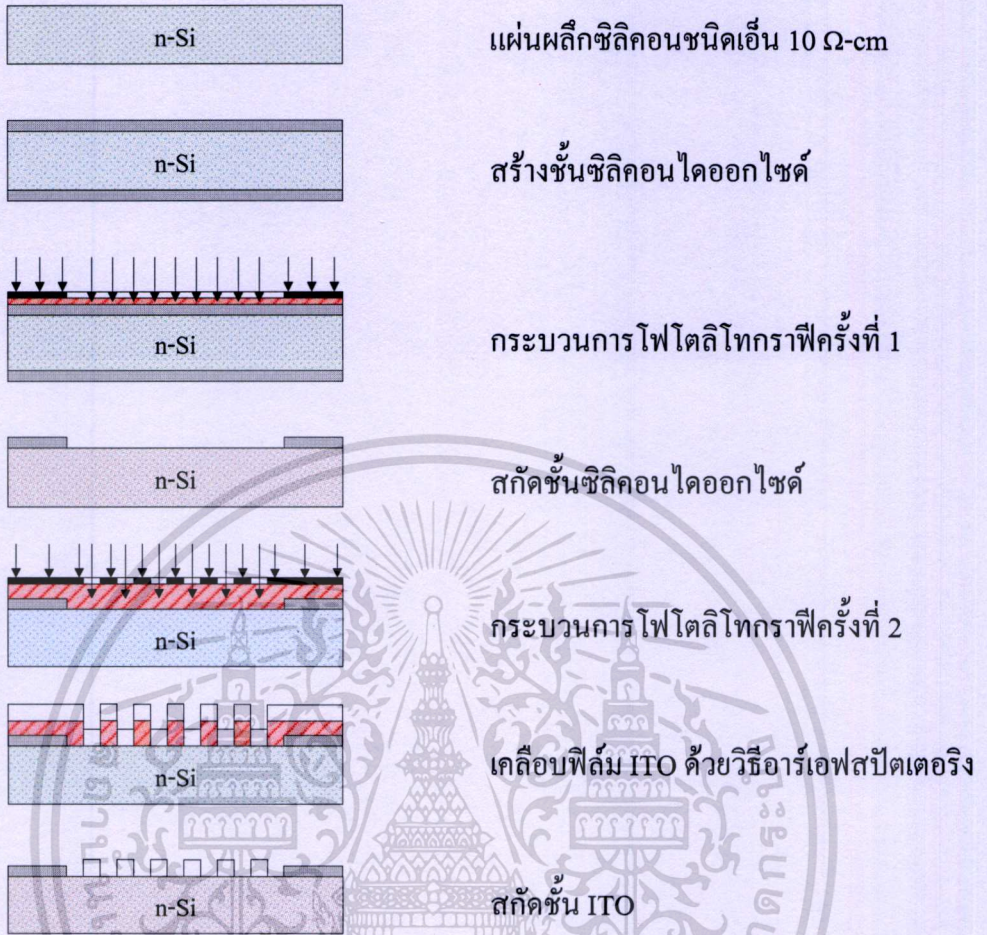


รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่มีการสกัดชั้นฟิล์มด้วยวิธีต่างกัน ที่กำลังขยาย 100 เท่า

(ก) การสกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ (ข) การสกัดชั้นฟิล์มแบบทั่วไป

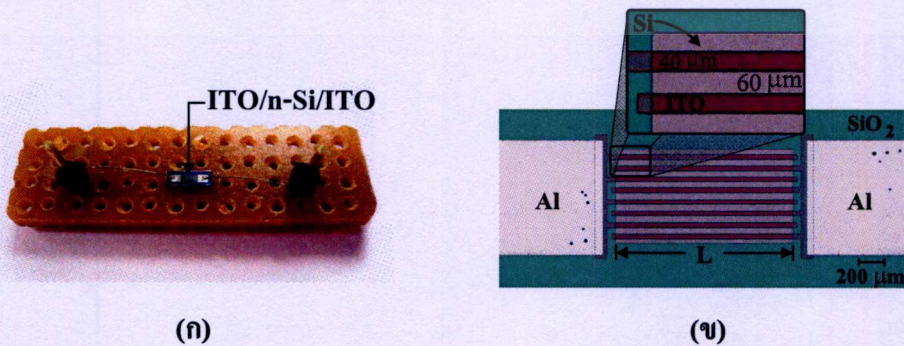
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถสรุปกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO

หลังกระบวนการในรูปที่ 3.12 แผ่นผลึกซิลิคอนจะถูกนำไปเคลือบโลหะอลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า และนำไปตัดแยกชิ้นงานออกจากกัน โดยชิ้นงานจะถูกนำไปเชื่อมต่อขาเพื่อใช้ในการทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ ต่อไปดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดีจิต

(ก) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน (ข) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 100 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การสงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ เพื่อคุ้มครองสิทธิและประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงลำดับขั้นตอนของการทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งในส่วนของ การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามลำดับขั้นตอนของการศึกษา โดยในการทดลองแรกจะทำการศึกษาถึงสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง ITO ที่มีความหนาต่างๆกัน เพื่อหาถึงความเหมาะสมของฟิล์มบาง ITO ที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิท (interdigitated) ตามที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 4 จากนั้นจะนำเสนอผลการทดลองการวัดสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ในลักษณะของรอยสัมผัสช็อคกี, ความจุไฟฟ้า และการศึกษาผลกระทบของลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพการตอบสนองทางแสง และ ผลตอบสนองทางความถี่ที่เกิดขึ้นของตัวตรวจวัดแสงที่ได้มีการออกแบบไว้เพื่อเป็นการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ ส่วนการทดลองตอนที่สองนั้น จะเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงด้วยกระบวนการแอนนัล (anneal) โดยทำการศึกษาถึงสมบัติของฟิล์มบาง ITO เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เพื่อหาถึงความเหมาะสมของฟิล์มบาง ITO ที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง จากนั้นจะเป็นการนำเสนอถึงผลการศึกษาสมบัติของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการแอนนัลแล้ว และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับการทดลองในตอนแรก สำหรับทุกการทดลองในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO และ ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO

ในงานวิจัยนี้ลักษณะของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่ง ITO นั้นทั่วไปมีสมบัติเป็นวัสดุตัวนำออกไซด์ (metallic oxide หรือ transparent conducting oxide; TCO) ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีใกล้เคียงกับโลหะ อีกทั้งมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น คือ มีลักษณะโปร่งใส จนในบางครั้งจึงเรียก ITO ว่าโลหะโปร่งใส ดังนั้นในการทดลองนี้ในขั้นแรกจึงเป็นการศึกษาสมบัติเฉพาะตัวต่างๆ ของ ITO เพื่อหาความเหมาะสมของฟิล์มบาง ITO ที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกี, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าของ

MSM ที่สร้างขึ้น และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ความกว้างของขั้วไฟฟ้า และจำนวนของขั้วไฟฟ้า ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, สภาพการตอบสนองทางแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม และผลตอบสนองต่อความถี่ของตัวตรวจวัดแสง ข้อมูลจากผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้

4.1.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO

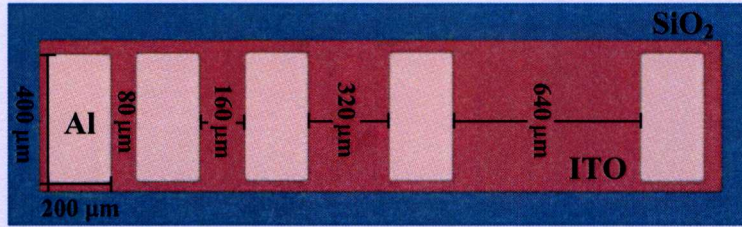
ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานที่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของ ITO ได้ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ), ความหนาแน่นของพาหะ (n) และ สภาพคล่องของพาหะ (μ) ที่ความหนาของฟิล์มต่างๆกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการหาความหนาที่เหมาะสมของ ITO เพื่อที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง MSM นั่นเอง โดยค่าต่างๆที่กล่าวมานี้สามารถหาได้ด้วยการทดลองวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) และ การวัดด้วยวิธีระยะการส่งผ่าน (transmission line method; TLM) ดังนี้

4.1.1.1 สภาพต้านทานไฟฟ้าของ ITO ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

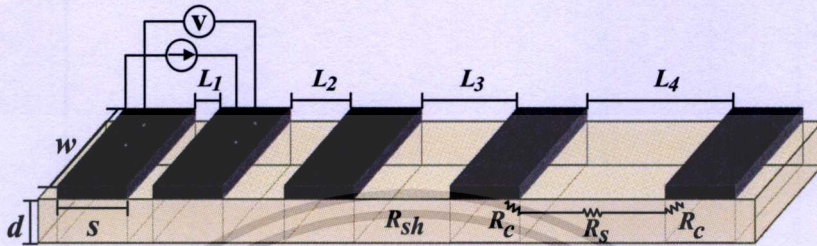
จากที่ได้กล่าวมาแล้วในกระบวนการสร้างถึงลวดลายที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า หรือ ลวดลายในการวัด TLM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็น โลหะอะลูมิเนียมเพื่อสร้างให้เกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกโดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้า ($S \times W$) เท่ากับ $200 \times 400 \mu\text{m}$ และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (L) ต่างๆ กันคือ 80, 160, 320 และ $640 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) ความหนา (d) ของฟิล์ม ITO นั้นจะถูกกำหนดด้วยเวลาในการสปัตเตอร์คือ 15, 30, 45, และ 60 นาที โดยสามารถหาความหนาของชั้นฟิล์มที่เวลาในการสปัตเตอร์ต่างๆ นี้ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีความหนาของฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ [40]

ในการทดลองได้นำชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาทำการทดสอบ เพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1(ข) ซึ่งในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธี TLM ในการทดลองนี้จะใช้ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ และระบบวัดความต่างศักย์ (source meter) ของบริษัท Keithley รุ่น 2400 โดยจ่ายกระแสค่าคงที่เท่ากับ 10 mA

จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างๆ กัน นำมาคำนวณหาความต้านทานจากกฎของโอห์ม ($V=IR$) จากนั้นนำค่าความต้านทานที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าง่ายๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ ρ/dW ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอคูมิเนียบบนชั้นฟิล์ม ITO ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

(ก) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการ

สร้างตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี TLM และตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง

จากรูปที่ 4.1(ข) จะได้ว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ [41 - 44]

$$R = 2R_c + R_s \quad (4.1)$$

โดยความต้านทานในเนื้อสาร R_s มีค่าเท่ากับ

$$R_s = \frac{\rho}{(d)(W)} L \quad (4.2)$$

แทนสมการที่ 4.2 ลงในสมการที่ 4.1

จะได้ R อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นที่มีความชันเท่ากับ ρ/dW ดังสมการที่ 4.3

$$R = 2R_c + \frac{\rho}{(d)(W)} L \quad (4.3)$$

โดยที่ R_c คือ ความต้านทานที่รอยต่อ (contact resistance)

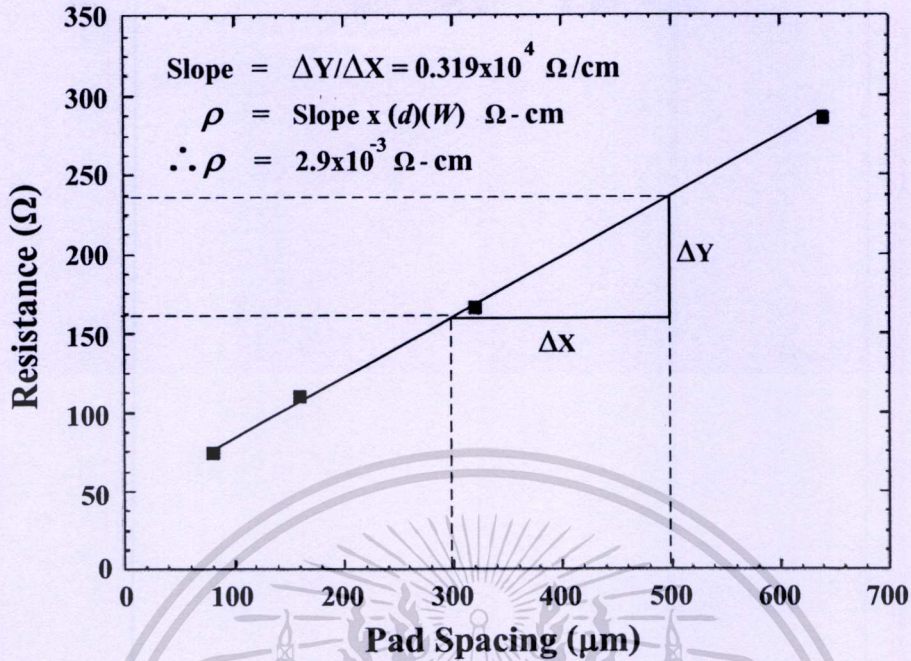
R_s คือ ความต้านทานในชั้นฟิล์ม ITO (resistance of ITO)

d คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม ITO

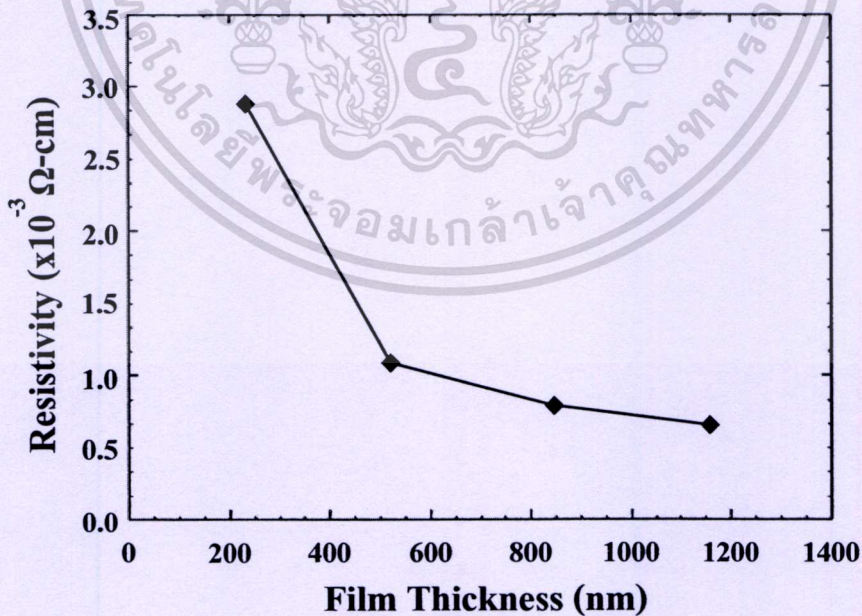
W คือ ความกว้างของขั้วไฟฟ้า

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาค่าสภาพต้านทาน โดยเทคนิค TLM



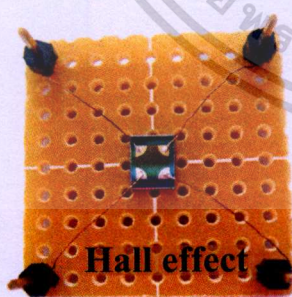
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความหนาของฟิล์ม ITO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

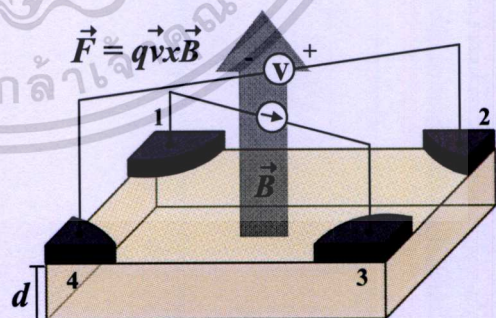
จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.2 เพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO ที่มีความหนาต่างๆ กัน จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 230 nm เป็น 500 nm และมีการเปลี่ยนแปลงลดน้อยลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 500 nm เป็นต้นไป โดยมีค่าเท่ากับ 2.9×10^{-3} , 1.1×10^{-3} , 0.8×10^{-3} และ $0.6 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ ซึ่งการทดลองนี้มีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ทำการศึกษาดังโครงสร้างผลึกของ ITO และพบว่าเมื่อเตรียมฟิล์มบาง ITO ให้มีความหนาของฟิล์มมากขึ้นจะทำให้ ITO มีความเป็นผลึกสูงขึ้น และมีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น เช่นเมื่อฟิล์มบาง ITO มีความหนาเท่ากับ 230 nm จะมีขนาดของเกรนเท่ากับ 32 nm และเมื่อฟิล์มบาง ITO มีความหนาเท่ากับ 500 nm จะมีขนาดของเกรนเท่ากับ 48 nm เป็นต้น[45] โดยอาจกล่าวได้ว่าขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นนั้นเป็นเหตุให้การกระเจิงหรือการชนของอิเล็กตรอนที่บริเวณขอบของเกรนลดลงได้ จึงส่งผลให้สภาพการนำไฟฟ้าดีขึ้น หรือมีค่าสภาพต้านทานลดลงนั่นเอง

4.1.1.2 ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของ ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

การหาความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพคล่องของพาหะในการทดลองนี้จะใช้การวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งการออกแบบลวดลายที่ใช้ในการวัดนั้นได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยมีลักษณะของลวดลายดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) คือ มีรัศมีของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมเท่ากับ 1 mm โดยความหนา (d) ของฟิล์มบาง ITO นั้นจะถูกกำหนดด้วยเวลาในการสปัตเตอร์คือ 15, 30, 45, และ 60 นาที เช่นเดียวกับการหาค่าสภาพต้านทานที่ผ่านมา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ

(ก) แสดงขั้วโลหะอลูมิเนียมของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อกับขั้ว

(ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำชิ้นงานที่สร้างขึ้น มาทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่าง ๆ ก่อนและหลังให้สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับชิ้นงานดังรูปที่ 4.4(ข) โดยใช้ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ และระบบวัดความต่างศักย์ของบริษัท Keithley รุ่น 2400 และเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กของบริษัท Ohsomi Electric manufacture

จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ นำมาหาความต้านทานจากกฎของโอห์มดังสมการที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 นำค่าความต้านทานที่ได้ ($R_{13} - R_{24} = \Delta R_{1324}$) คูณกับความหนาของฟิล์ม จากนั้นทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (d)(ΔR_{1324}) กับค่าสนามแม่เหล็ก (B) ตามสมการเชิงเส้นที่ 4.9 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ R_H แทนค่า R_H ลงในสมการที่ 4.10 และ 4.11 เพื่อเป็นการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะตามลำดับ [25,41]

ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก

$$R_{1324} = \frac{V_{24}}{I_{13}} \quad (4.4)$$

ขณะมีสนามแม่เหล็ก

$$R'_{1324} = \frac{V'_{24}}{I_{13}} \quad (4.5)$$

เมื่อ

$$V'_{24} = V_H + V_{24}$$

นำสมการที่ 4.5 ลงด้วยสมการที่ 4.4 จะได้

$$\Delta R_{1324} = R'_{1324} - R_{1324} = \frac{V'_{24} - V_{24}}{I_{13}} = \frac{V_H}{I_{13}} \quad (4.6)$$

จากสมการ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (4.7)$$

โดยที่ V_H คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage)

R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

B คือ ค่าสนามแม่เหล็ก (Tesla)

แทนสมการที่ 4.6 ลงสมการที่ 4.7 จะได้

$$R_H = (\Delta R_{1324}) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (4.8)$$

จัดรูปให้สมการที่ 4.9 อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น โดยมีความชันเท่ากับ R_H

$$(d)(\Delta R_{1324}) = R_H B \quad (4.9)$$

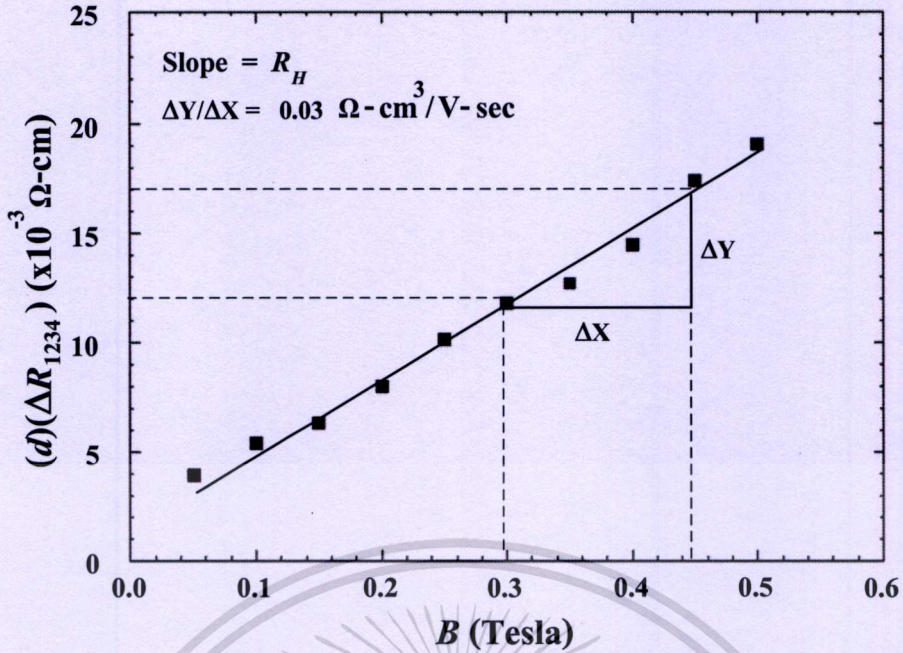
ความหนาแน่นของพาหะสามารถหาได้จาก (เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน)

$$n = \frac{1}{R_H q} \quad (4.10)$$

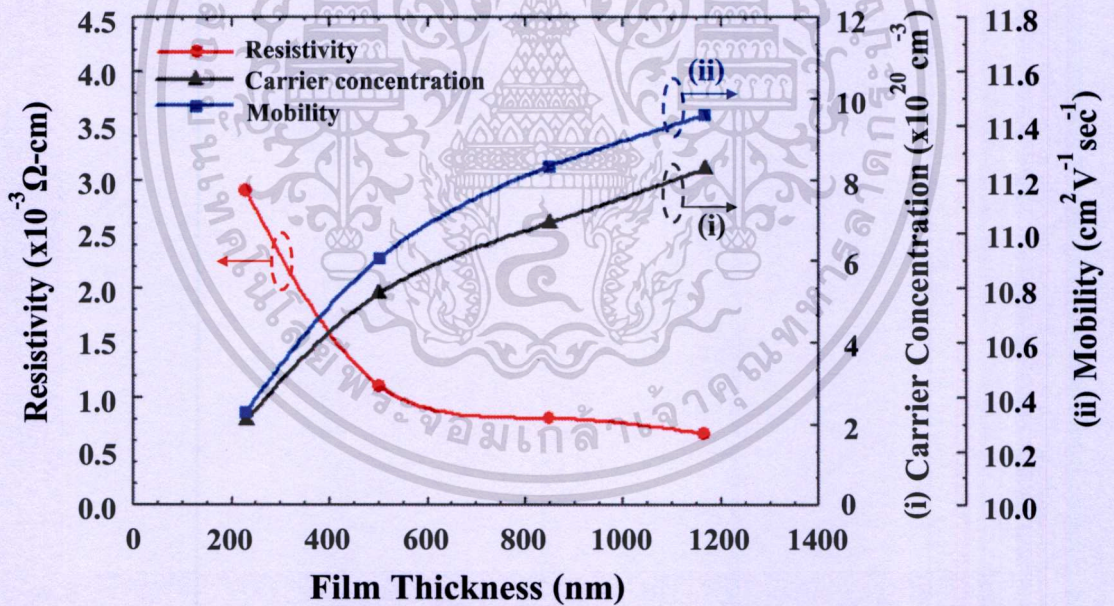
สภาพคล่องของพาหะสามารถหาได้จาก (สภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากการทดลองที่ผ่านมา) นั่นคือ

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1324})$ กับค่าสนามแม่เหล็กที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ กับ ความหนาของฟิล์ม ITO

จากตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(d)(\Delta R_{1324})$ กับสนามแม่เหล็กในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟมีลักษณะเป็นฟังก์ชันที่เพิ่ม ซึ่งหมายถึงค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก จากการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์นี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ITO ที่สร้างขึ้นในการทดลองนี้มีประจุพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน หรือเป็นสารกึ่ง

ตัวนำชนิดอื่น เนื่องจากในการทดลองได้ทำการให้กระแสไฟฟ้าคงที่จากขั้ว 1 ไปยังขั้ว 3 ดังนั้น อิเล็กตรอนภายในเนื้อสารจึงมีการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้า คือมีการเคลื่อนที่จากขั้ว 3 ไปขั้ว 1 ต่อมาเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับชิ้นงานจึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยมีทิศเบี่ยงเบนมาขั้วที่ 2 ซึ่งเมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนก็จะถูกแรงกระทำของสนามแม่เหล็กมากขึ้นทำให้มีการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาขั้วที่ 2 มากยิ่งขึ้น จึงทำให้ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงลอเรนซ์ $F = qv \times B$ นั่นเอง

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแบบสี่แกน โดยแกนด้านซ้ายมือเป็นแกนสภาพต้านทานไฟฟ้าจากการทดลองที่ 4.1.1.1 ส่วนแกนด้านขวามือ (i) เป็นแกนความหนาแน่นของพาหะ และ (ii) แกนสภาพคล่องของพาหะกับความหนาของฟิล์ม ITO ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะนั้นขึ้นกับความหนาของฟิล์ม ITO นั่นเอง โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของพาหะและ สภาพคล่องของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกันกล่าวคือ เมื่อ ITO มีความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้นจึงทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น หรือมีสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยการที่สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงนั้น อาจเนื่องมาจากขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นส่งผลทำให้การกระเจิงหรือการชนของอิเล็กตรอนที่บริเวณขอบของเกรนลดลง ซึ่งการลดการกระเจิงของอิเล็กตรอนนั้นยังทำให้สภาพคล่องตัวของพาหะดีขึ้นอีกด้วย โดยมีความหนาแน่นของพาหะเท่ากับ 2.1×10^{20} , 4.2×10^{20} , 6.9×10^{20} และ $8.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และสภาพคล่องของพาหะ เท่ากับ 10.3, 10.9, 11.3 และ 11.5 $\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ ที่ความหนาฟิล์ม 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ

โดยความหนาแน่นของพาหะและ สภาพคล่องของพาหะจากการทดลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลองที่ได้มีการศึกษาไว้แล้วดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งทำให้ทราบได้ว่าฟิล์ม ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง และกรวัดผลในการทดลองนี้เป็นที่ยอมรับได้ในระดับที่ดี

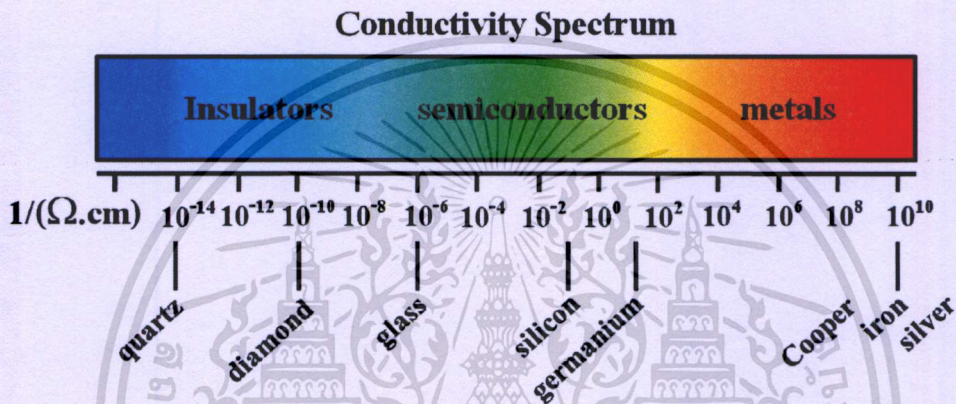
ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีสปีดเตอริงต่างๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Deposition Technique	Thickness (nm)	Carrier concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	Transmittance (%)	Ref.
r.f. sputtering	750	6.0×10^{20}	34.7	3.0×10^{-4}	90	[46]
r.f. sputtering	500	1.2×10^{21}	13.0	4.0×10^{-4}	95	[47]
magnetron sputtering	80	6.0×10^{20}	26.0	4.0×10^{-4}	85	[48]
ion beam sputtering	60	2.0×10^{20}	26.0	1.2×10^{-3}	-	[49]
d.c. sputtering	100	9.0×10^{20}	34.7	2.0×10^{-4}	85	[50]

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการนำ ITO ไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการนำไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้ด้วย โดยสามารถหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของ ITO ได้จากส่วนกลับของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ($1/\rho$) จากการทดลองที่ 4.1.1.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.35×10^3 , 0.91×10^3 , 1.3×10^3 และ 1.5×10^3 ($\Omega\text{-cm}$)⁻¹ ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ITO มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงซึ่งอาจจัดได้ว่าอยู่ในช่วงต้น หรือเริ่มจะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าเข้าใกล้การนำไฟฟ้าของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ITO ที่สร้างขึ้นในการทดลองนี้สามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแทนโลหะได้จริง

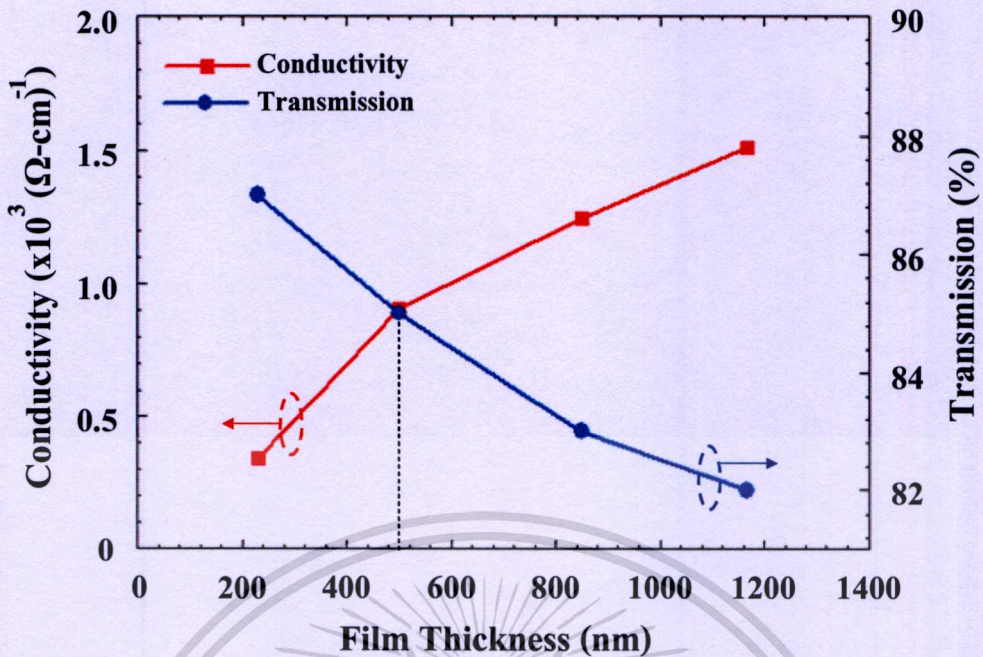


รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ, สารกึ่งตัวนำ และฉนวน

หลังจากทำการศึกษารามิเตอร์พื้นฐานของฟิล์มบาง ITO แล้ว และพบว่า ITO ที่ทำการเตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอสพีตเตอร์ที่เวลาต่างๆ นั้นสามารถที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงได้ เนื่องจากมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และมีค่าความหนาแน่นพาหะใกล้เคียงกับโลหะ แล้ว [51] แต่ก็ยังคงมีอีกหนึ่งปัจจัยที่จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกเงื่อนไขที่จะใช้ในการสปีดเตอร์ ITO เพื่อนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส คือ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (%T) ซึ่งมีค่าที่แปรผกผันกับการนำไฟฟ้า และความหนาของฟิล์มกล่าวคือ เมื่อเวลาในการสปีดเตอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 87%, 85%, 83% และ 82% ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ [45] ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการเลือกความหนาของ ITO ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูง เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณแสงที่จะตกกระทบลงบนซิลิคอนให้มากขึ้น โดยคาดว่าจะสามารถเพิ่มกระแสแสงแก่ตัวตรวจวัดแสงได้

เพื่อเป็นการหาความหนาของฟิล์ม ITO ที่มีสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่เหมาะสมที่สุด จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความหนาของฟิล์ม ITO ดังแสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า และ เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสง กับความหนาฟิล์ม ITO

จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความหนาฟิล์มประมาณ 500 nm นั้น มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส เนื่องจากมีทั้งสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงสูง อีกทั้งความหนาของฟิล์มยังมีค่าใกล้เคียงกับความหนาของชั้นโลหะในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา [5 - 12] ดังนั้นในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริงเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้มีความหนาของฟิล์ม ITO ประมาณ 500 nm สภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $1.1 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ความหนาแน่นของพาหะเท่ากับ $4.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ สภาพคล่องของพาหะเท่ากับ $10.9 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ และเปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงเท่ากับ 85% ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริงจากการทดลอง

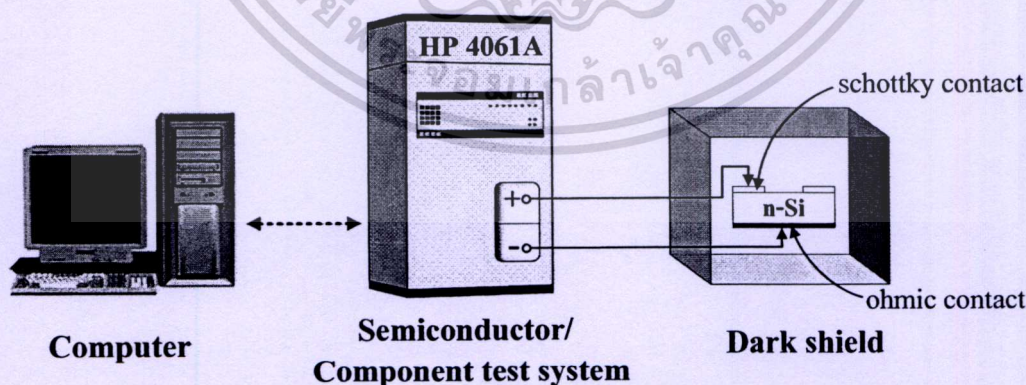
Thickness (nm)	Carrier concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	Transmittance (%) [45]
230	2.2×10^{20}	10.3	2.9×10^{-3}	87
500	4.2×10^{20}	10.9	1.1×10^{-3}	85
850	6.9×10^{20}	11.3	0.8×10^{-3}	83
1160	8.3×10^{20}	11.5	0.6×10^{-3}	82

ในการทดลองที่ 4.1.1.1 และ 4.1.1.2 ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์ม ITO ลงบนฐานรองที่เป็นกระจกเพื่อเป็นการประหยัด และสะดวกในการทดลอง โดยหลังจากที่ได้เงื่อนไขความหนาฟิล์มที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการทดลองอีกครั้ง โดยสร้างลวดลายรวมอยู่ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 กล่าวคือ สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 4,000 Å พบว่าผลต่างๆ ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

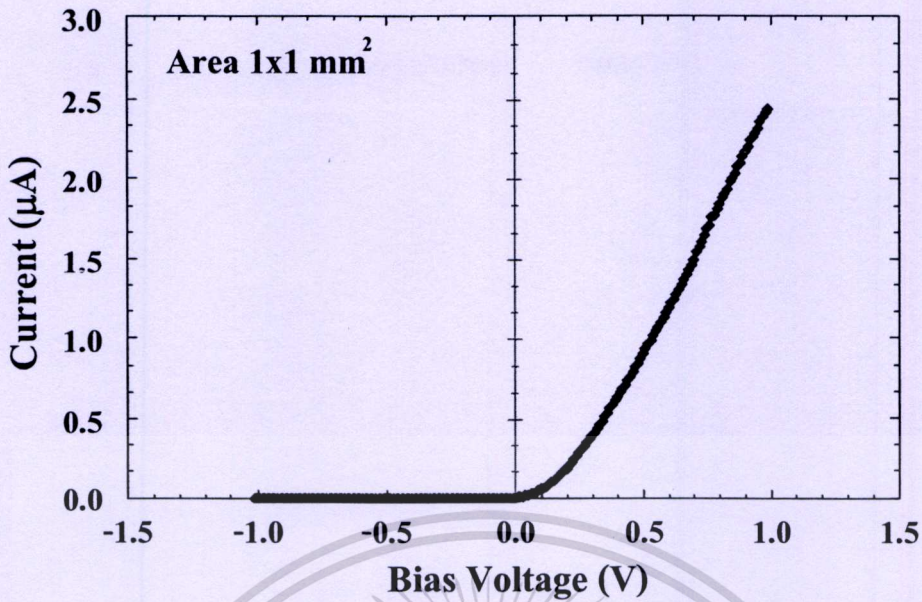
4.1.2 การทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสช็อคกี

จากการทดลองที่ผ่านมาได้ทำการหาความหนาของฟิล์ม ITO ที่เหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM แล้ว ในการทดลองนี้จึงเป็นการกล่าวถึงตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM ที่สร้างขึ้น และเนื่องจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM นั้นประกอบไปด้วยรอยสัมผัสช็อคกี 2 รอยสัมผัสด้วยกัน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาถึงสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสช็อคกีที่สำคัญซึ่งได้แก่ แรงดันภายใน (V_{bi}) และความสูงกำแพงศักย์ช็อคกี (ϕ_{bn})

รอยสัมผัสช็อคกีระหว่าง ITO และ ซิลิคอนชนิดเอ็น ในการทดลองนี้มีลักษณะของลวดลายเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดของพื้นที่ (A) เท่ากับ 1 mm^2 ซึ่งการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor/Component test system) HP 4061A ของบริษัท Agilent ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ร่วมกับการคำนวณจะทำให้สามารถทราบถึงแรงดันภายใน และความสูงกำแพงศักย์ช็อคกีได้ ซึ่งลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกีจะแสดงในรูปที่ 4.10

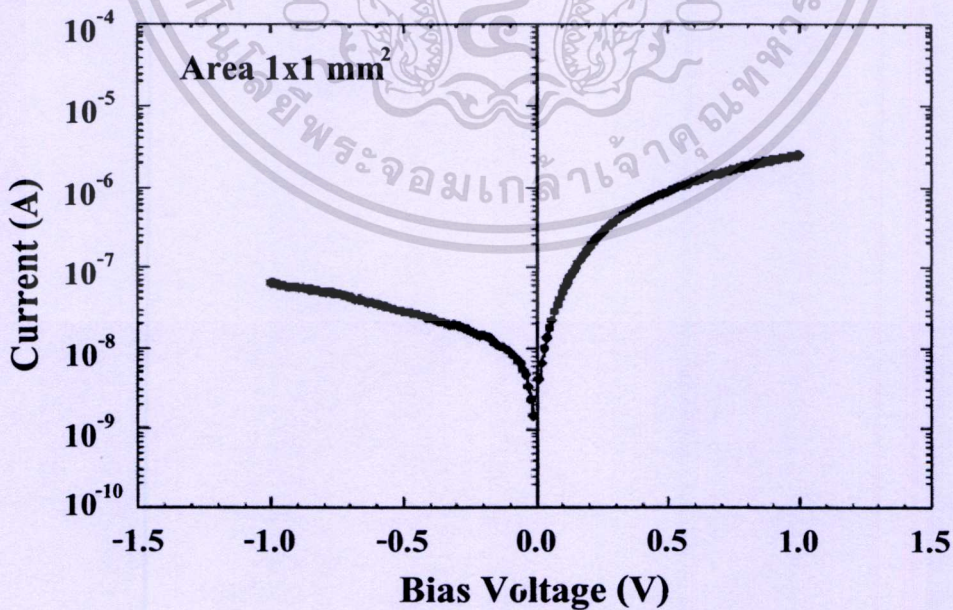


รูปที่ 4.9 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี



รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็น

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าลักษณะของความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบเรกติไฟร์ หรืออาจกล่าวได้ว่ารอยสัมผัสที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกี้นั้นเอง ซึ่งสามารถหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคกี้นี้ได้ โดยพบว่ารอยสัมผัสช็อคกี้นี้มีแรงดันภายในประมาณ 0.34 V ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคกี้นี้ทั่วไปที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.2 - 0.4 V [22]



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัส

เพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าแกงศักย์ช็อคติย์สามารถหาได้ด้วยเทคนิคกระแส-แรงดันเช่นกัน [38] โดยการนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (แกนตั้ง) ในแบบกึ่งล็อก (semi-log) กับแรงดันไบอัส (แกนนอน) ในลักษณะเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.11 จากนั้นทำการประมาณค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (J_0) หรือ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสที่มีขนาดพื้นที่ 1 mm^2 ที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ จากจุดตัดแกนแรงดันเท่ากับศูนย์ โวลต์ของกราฟด้านไบอัสตรง โดยจะได้กระแสรั่วไหลมีค่าเท่ากับ $1 \times 10^{-8} \text{ A}$ และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 จะสามารถหาค่าค่าแกงศักย์ช็อคติย์ได้

เมื่อ $J_0 = I_0/A$ ความหนาแน่นกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$J = J_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (4.12)$$

เมื่อ $V_A = 0 \text{ V}$ เป็นผลให้ J มีค่าเท่ากับ J_0

โดย J_0 คือ ความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

$$J_0 = RT^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (4.13)$$

ดังนั้น ความสูงค่าแกงศักย์ช็อคติย์จึงสามารถหาได้จาก

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{RT^2}{J_0}\right) \quad (4.14)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของโบสตันน์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่าเท่ากับ $110 \text{ A.cm}^2 \cdot \text{K}^{-2}$ (n-Si)

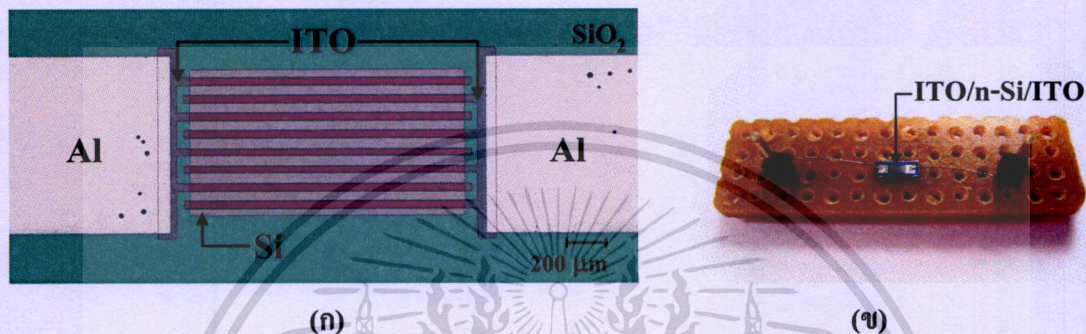
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 4.14 จะได้ค่าค่าแกงศักย์ช็อคติย์ของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็น โดยมีค่าเท่ากับ 0.76 V ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี และงานวิจัยอื่นๆ [22,18] โดยงานวิจัยนี้ในหัวข้อการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงด้วยสัญญาณแสงกระแสตรง และกระแสกลับจะได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิคิเตท ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาสมบัติของรอยสัมผัสช็อคติย์ระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีขนาดพื้นที่รอยสัมผัสเท่ากับ 1 mm^2 และซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาทีด้วยเช่นกัน โดยพบว่ารอยสัมผัสช็อคติย์ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนนั้นมีค่าแรงดันภายในประมาณ 0.38 V และค่าค่าแกงศักย์ช็อคติย์เท่ากับ 0.72 V ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี และผลการทดลองที่มีมาก่อนหน้านี้ [4-8]

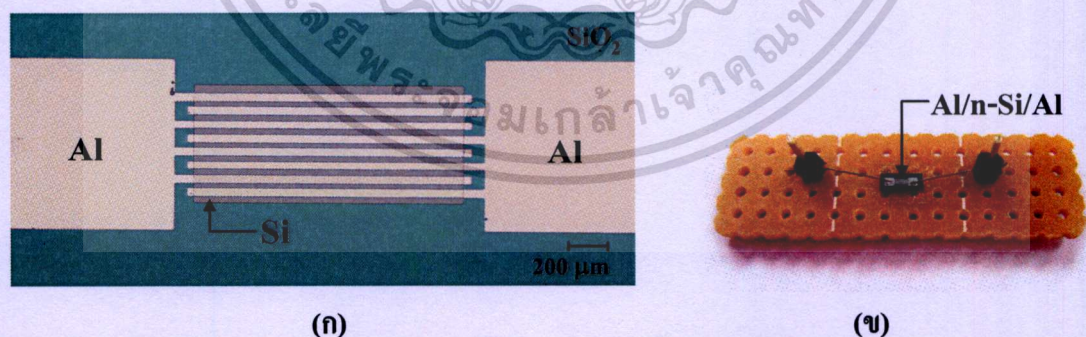
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตเท

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตเท หลังจากทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำมาตัดแยกชิ้นงาน และเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน (silver paste) เพื่อใช้ในการวัดผลการทดลองด้วยเครื่องมือวัด หรือ อุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

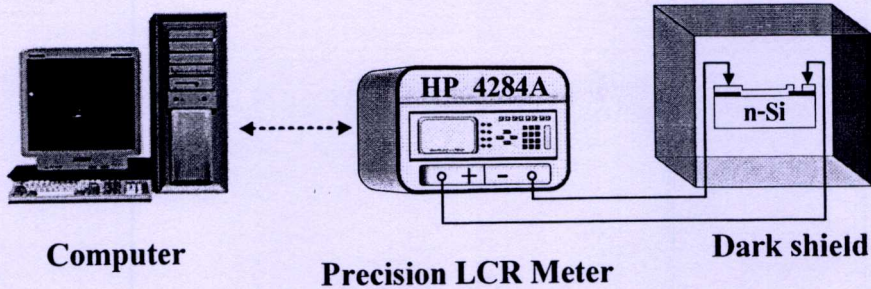


รูปที่ 4.12 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตเท โดยมี ITO หนา 500 nm, ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 60 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และ จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว
(ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า
(ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน



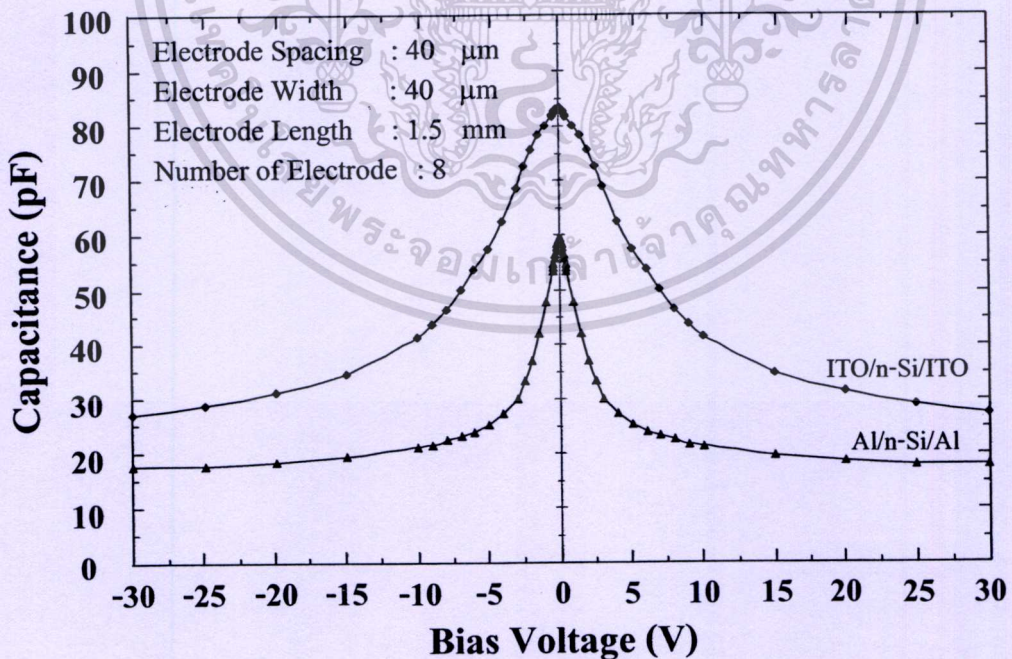
รูปที่ 4.13 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตเท โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และ จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว
(ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า
(ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM

การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ในการทดลองนี้ จะทำการต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยใช้เครื่องมือวัด HP 4284A ของบริษัท Agilent และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นจึงได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังรูปที่ 4.15 โดยที่ตัวตรวจวัดแสงมีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ $40\ \mu\text{m}$, ขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40\ \mu\text{m}$, ความยาวขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $1.5\ \text{mm}$ และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว



รูปที่ 4.15 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่สร้างขึ้นนั้นมีความสมมาตรกัน และมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัสตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.15 กล่าวคือ เมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มี ค่าประมาณ 40 pF และ 21 pF ตามลำดับ โดยตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO นั้นมีความจุไฟฟ้าสูงกว่า ตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ทั้งที่ตัวตรวจวัดแสงทั้งสองมีขนาดพื้นที่ (A) เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ดังเช่น การเกิดชั้นออกไซด์บางๆ (interface oxide ; SiO_x) ที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน เนื่องจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอน และออกซิเจนส่วนเกิน (excess oxygen) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเคลือบฟิล์ม ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง [17, 52, 53] หรือ เกิดขึ้นเนื่องจากผลการกระจายของสถานะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน (interface state) มีปริมาณมาก [17, 52] เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของแถบพลังงานระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็น ได้ดังรูปที่ 4.16

$$C = \frac{A \epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (4.15)$$

โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

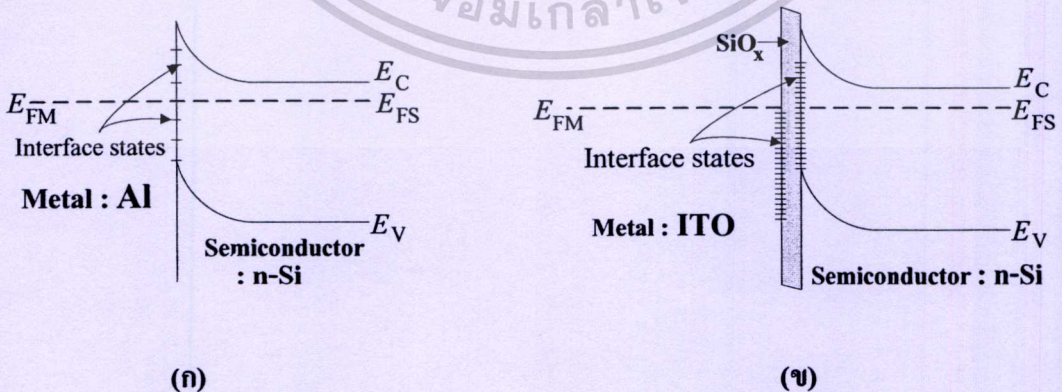
q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ

W คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ



รูปที่ 4.16 แถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อน

(ก) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็น

(ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็น

4.1.4 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสง กระแสตรง

การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงด้วยสัญญาณแสงกระแสตรงนี้ จะได้
ทำการศึกษาถึงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน สภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพ
ควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง โดยจะได้กล่าวต่อไปดังนี้

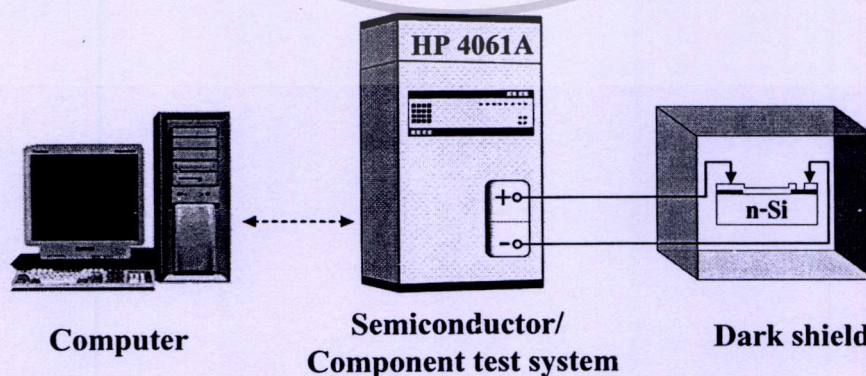
4.1.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบ อินเตอร์ดิจิต

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด
ITO/n-Si/ITO ทั้งขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสงเพื่อเป็นการหาค่ากระแสมืด และกระแสแสง
โดยมีการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S), ความกว้างของขั้วไฟฟ้า
(W), จำนวนขั้วไฟฟ้า (N) และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al
ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน และมีขนาด, ระยะห่าง และจำนวนของขั้วไฟฟ้าเท่ากัน

4.1.4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสง

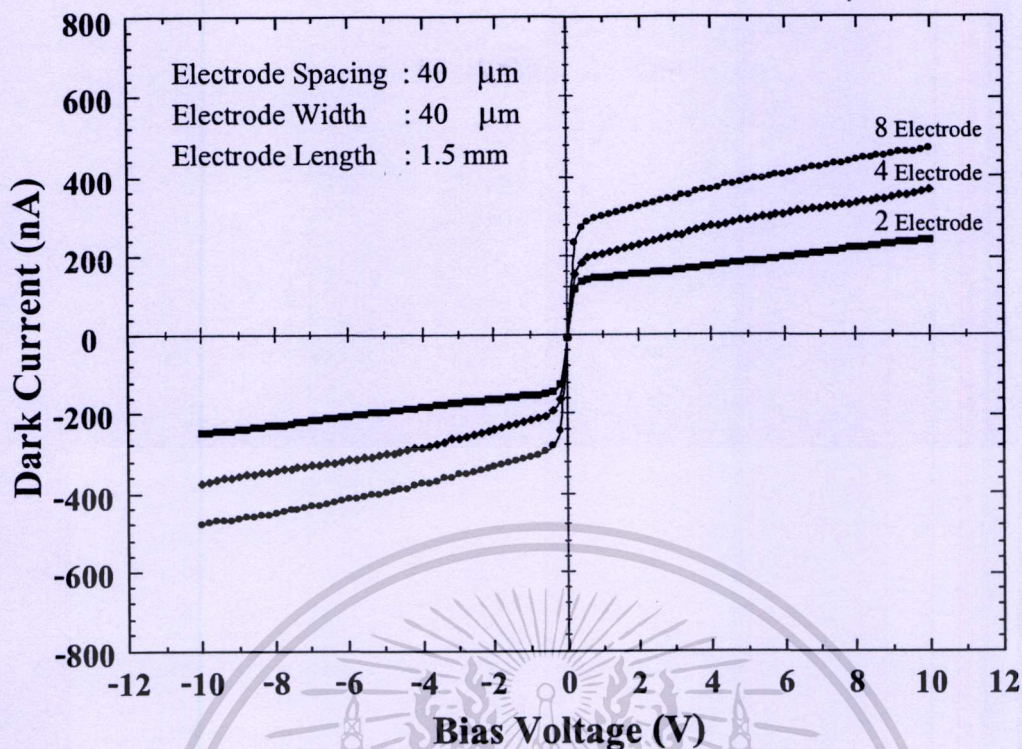
การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหาค่ากระแส
มืด (I_{dark}) ของตัวตรวจวัดแสงนั้น จะทำการต่อวงจรเพื่อใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดย
ใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ของบริษัท Agilent

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะ
ไม่ได้รับแสงตกกระทบแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่ากระแสมืดมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส
โดยมีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการป้อนแรงดันไบอัส
ย้อนกลับแก่รอยสัมผัสขั้วของตัวตรวจวัดแสงทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้น จึงส่งผลให้
กระแสมืดที่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.17 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง
ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงนั้น มีผลทำให้กระแสมืดเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับการเพิ่มแรงดันไบอัส คือกระแสมืดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีจำนวนขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้า 2, 4 และ 8 ขั้ว จะมีกระแสมืดเท่ากับ 180 nA, 290 nA, และ 380 nA ตามลำดับ ทั้งนี้การที่กระแสมืดเปลี่ยนแปลงตามจำนวนของขั้วไฟฟ้านั้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพื้นที่ของรอยสัมผัส肖ตกี ซึ่งจากสมการที่ 4.16 กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส肖ตกีจะแปรผันตรงกับขนาดของพื้นที่รอยสัมผัส

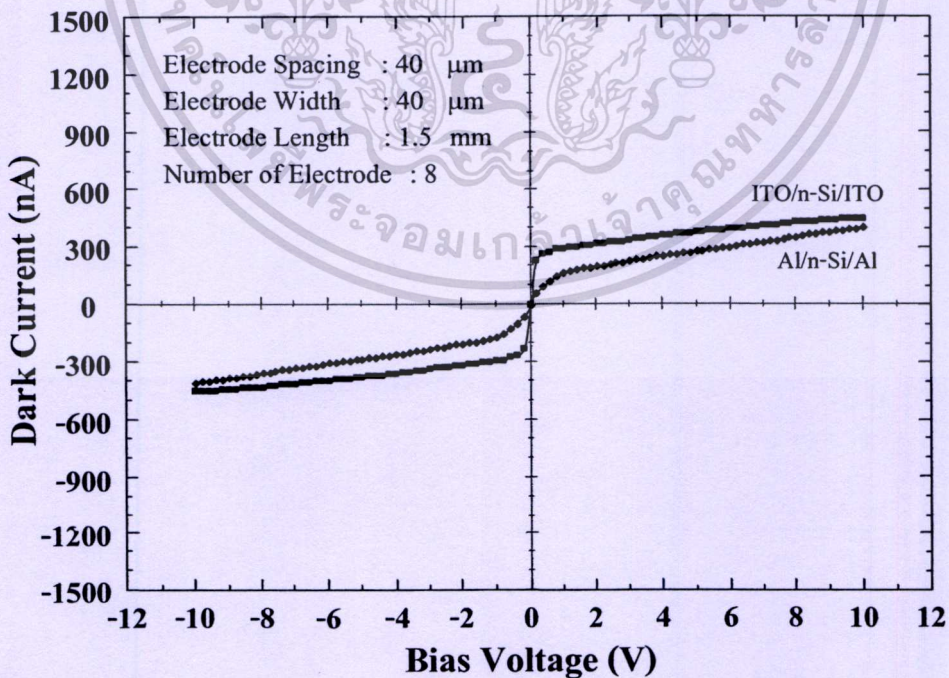
$$I_0 = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (4.16)$$

- โดยที่
- A คือ พื้นที่รอยสัมผัส
 - R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (n-Si)
 - T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 - q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
 - ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์肖ตกี
 - k คือ ค่าคงที่โบสค์มันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล และขนาดของพื้นที่ของรอยสัมผัสจึงคาดได้ว่าการเพิ่มขนาดพื้นที่รอยสัมผัสด้วยการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้า, จำนวนขั้วไฟฟ้า และความยาวของขั้วไฟฟ้าจะทำให้มีค่ากระแสมืดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง ดังรูปที่ 4.19 โดยที่ตัวตรวจวัดแสงมีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ $40\ \mu\text{m}$, ขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40\ \mu\text{m}$, ความยาวขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $1.5\ \text{mm}$ และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้วตามลำดับ พบว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al นั้นมีกระแสมืดต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO โดยที่แรงดันไบอัส $5\ \text{V}$ มีค่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เท่ากับ $290\ \text{nA}$ ส่วนของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าเท่ากับ $380\ \text{nA}$ ซึ่งการที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al มีกระแสมืดต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ทั้งที่มีค่าแพนดิกซ์ซีอติวต่ำกว่า อาจมีสาเหตุมาจากที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ได้ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $500\ ^\circ\text{C}$ แล้ว ซึ่งกระบวนการซินเตอร์นี้ทำให้รอยสัมผัสซีอติวระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็นมีความสมบูรณ์มากขึ้น อีกทั้งช่วยลดผลของสถานะพื้นผิวอีกด้วย เป็นผลให้กระแสมืดมีค่าต่ำกว่า [24] ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการดังกล่าว จึงยังคงมีผลของสถานะพื้นผิว ที่เกิดจากการไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึก (lattice mismatch) ระหว่างซิลิคอนชนิดเอ็น และ ITO จึงเป็นผลให้มีกระแสมืดสูงกว่านั้นเอง [17, 54]



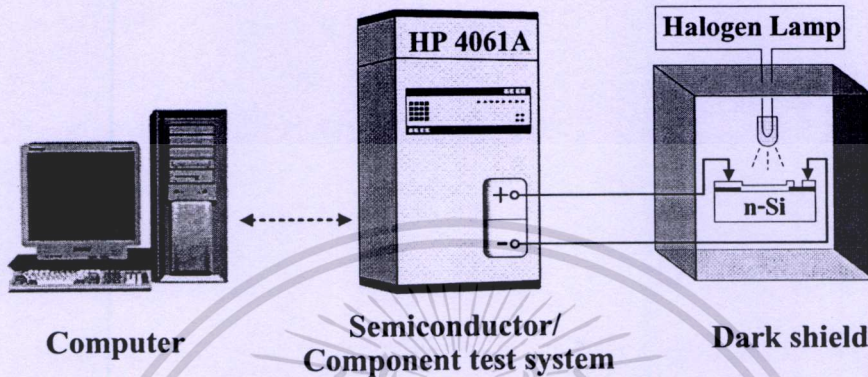
รูปที่ 4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO

และ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง

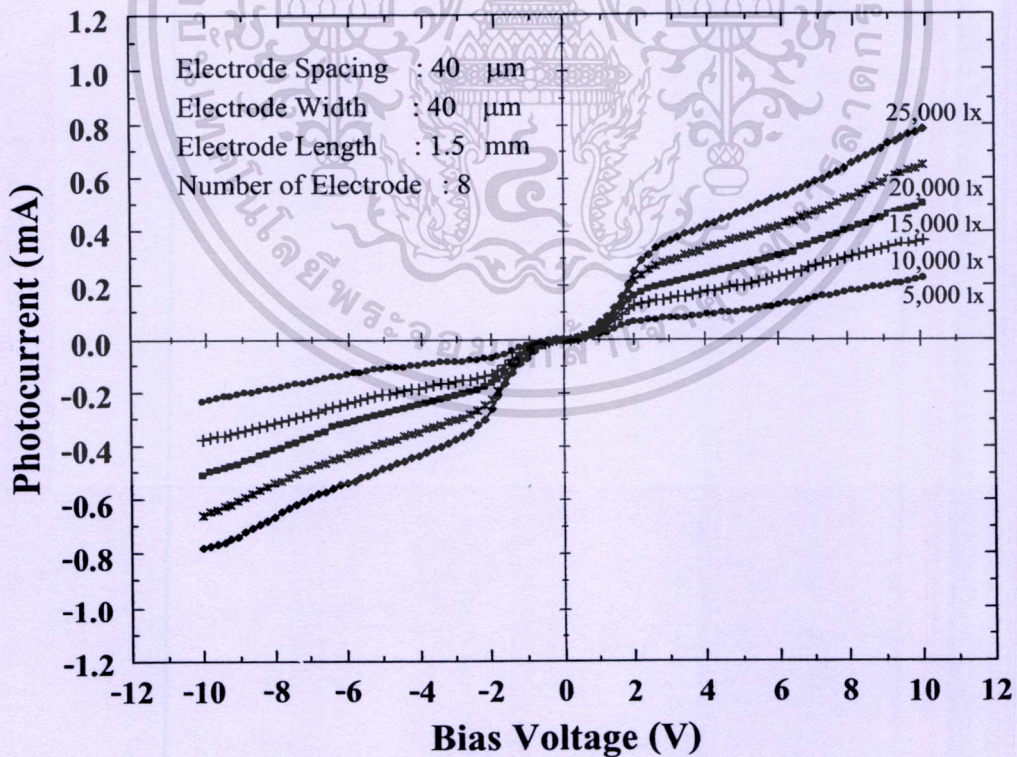
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.1.2 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเพื่อหาค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ และตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของกระแสแสงกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไป จะทำการต่อวงจร โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน (halogen lamp) ของบริษัท Stocker & Yale รุ่น 20 Series ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM



รูปที่ 4.21 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

ในช่วง 5,000 – 25,000 lux

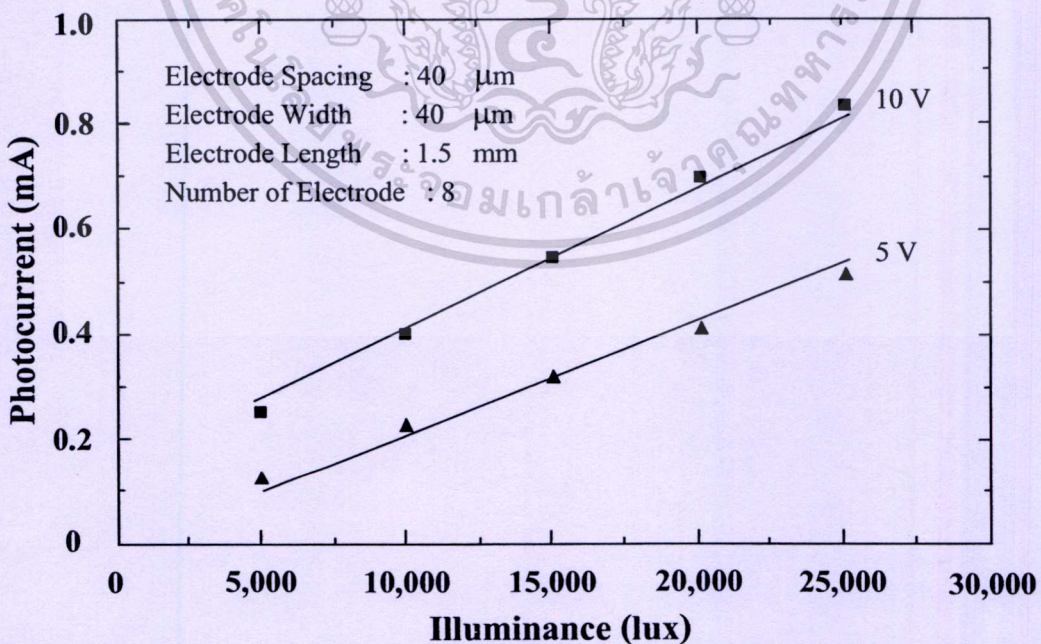
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยที่กระแสแสง (I_{photo}) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.17 คือ

$$I_{\text{photo}} = I_{\text{mea}} - I_{\text{dark}} \quad (4.17)$$

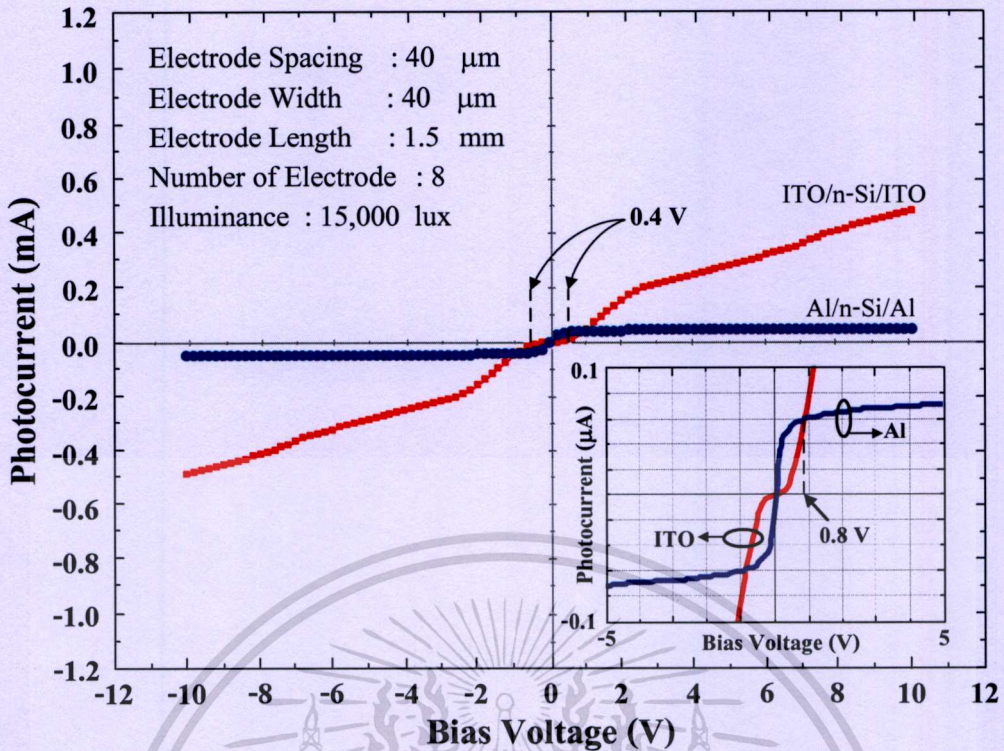
โดยที่ I_{mea} คือ กระแสรวมที่วัดได้จากวงจรที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นสามารถตอบสนองต่อแสง กระแสตรงได้เป็นอย่างดี โดยกระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น ดังความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงได้ในรูปที่ 4.22 ซึ่งที่แรงดันไบอัส 5 V จะมีกระแสแสงที่ความเข้มแสง 5000, 10000, 15000, 20000 และ 25000 lux ประมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 mA ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ค่อนข้างสูง ($I_{\text{photo}}/I_{\text{dark}}$) กล่าวคือ ที่ความเข้มแสง 25,000 lux ให้แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V จะมีอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดประมาณ 1,400 และ 1,900 เท่า ตามลำดับ ซึ่งจากลักษณะสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสงได้ดี แม้ว่าความเข้มแสงที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าน้อยก็ตาม



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

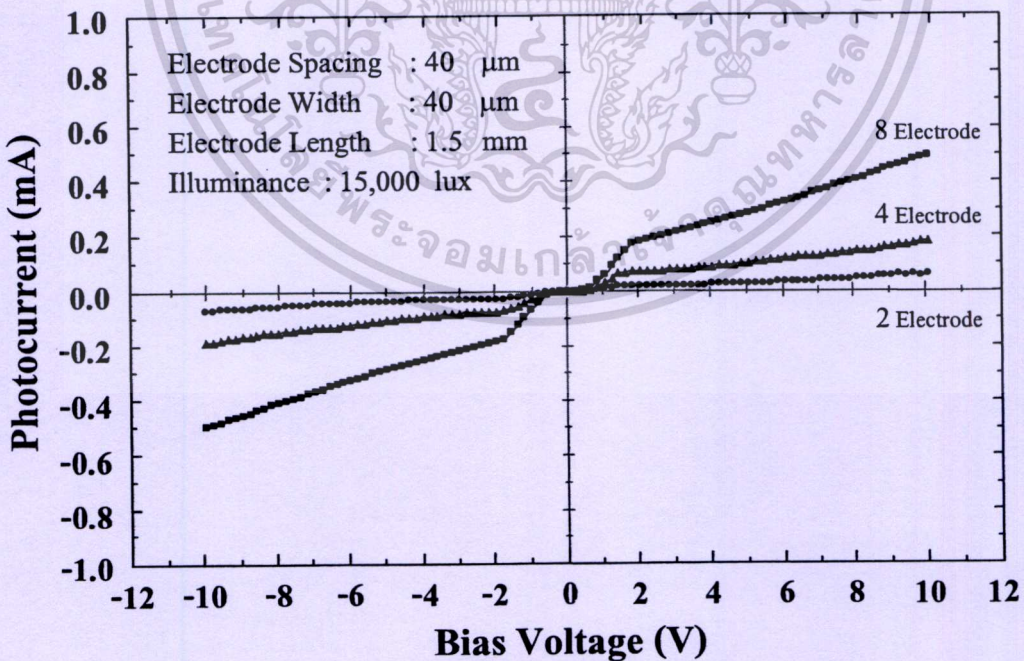
เมื่อเปรียบเทียบกระแสแสงที่ได้จากตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ค่อนข้างมาก โดยที่แรงดันไบอัส 5 - 10 V ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO จะให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ประมาณ 6 - 10 เท่า แต่จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัสประมาณ 0 - 0.4 V กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO จะมีค่าต่ำมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสง แรงดันไบอัสจะไปตกคร่อมที่บริเวณชั้นของออกไซด์บางๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.13 มากกว่าที่บริเวณหลอดพาหะเนื่องจากค่าความต้านทานในชั้นออกไซด์มีค่าสูง [17, 54-56] ดังนั้นในช่วงแรงดันไบอัสต่ำ แรงดันไบอัสจึงมีผลต่อบริเวณหลอดพาหะค่อนข้างน้อย ทำให้ยังคงมีพื้นที่ที่เกิดกระแสแสงน้อย กระแสแสงจึงมีค่าต่ำต่อมาเมื่อให้แรงดันไบอัสสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่ามากพอที่จะส่งผลกระทบต่อบริเวณหลอดพาหะได้ ทำให้บริเวณหลอดพาหะขยายกว้างขึ้นตามแรงดันไบอัส ดังนั้นกระแสแสงที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันจะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัส 0 - 0.8 V กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าน้อยกว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO นั้น ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานที่แรงดันไบอัสค่าต่ำๆ หรือที่แรงดันไบอัสต่ำกว่า 0.8 V

4.1.4.1.3 ผลของจำนวนขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง ตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 ขั้วจะให้กระแสแสงต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าให้มากขึ้นเป็น 4 และ 8 ขั้วกระแสแสงจะเพิ่มสูงมากขึ้นเป็นจำนวนเท่า โดยที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้า 2, 4 และ 8 ขั้ว จะให้ค่ากระแสแสงเท่ากับ 0.045, 0.1 และ 0.2 mA ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าเป็น 2 เท่าจะทำกระแสแสงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนขั้วไฟฟ้าทำให้บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นบริเวณด้านใต้ และด้านข้างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่ามากขึ้นนั่นเอง โดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ต่างก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา [7]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสงมีจำนวนขั้วไฟฟ้ามากที่สุด โดยคำนึงถึงอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืด และข้อจำกัดของแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ขนาดโฟกัสของแสงที่ตกกระทบจะต้องครอบคลุมบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งหมด เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้อย่างถูกต้อง

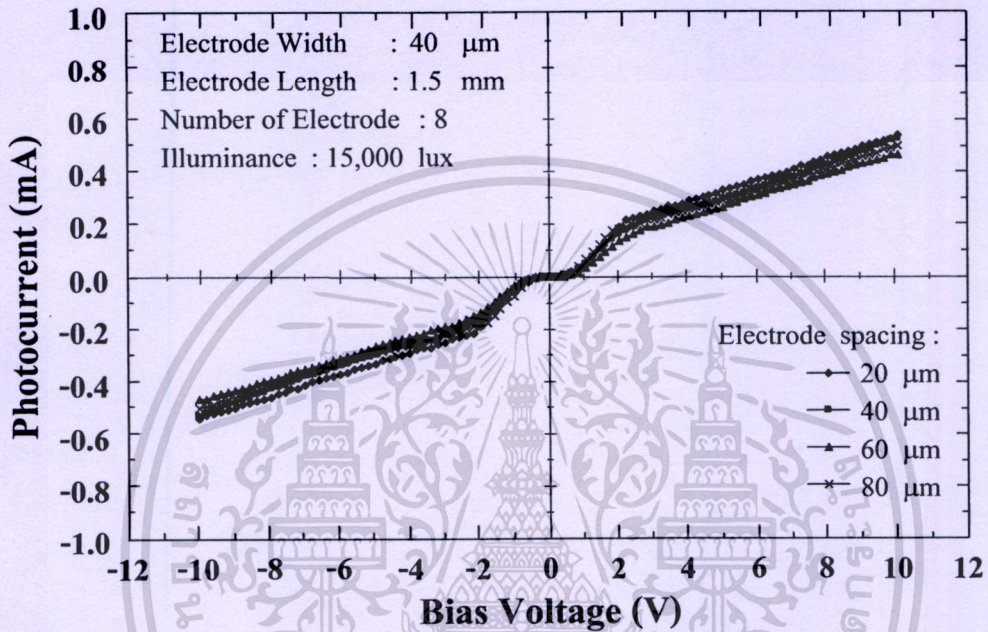


รูปที่ 4.24 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ตั้งแต่ 2, 4 และ 8 ขั้ว

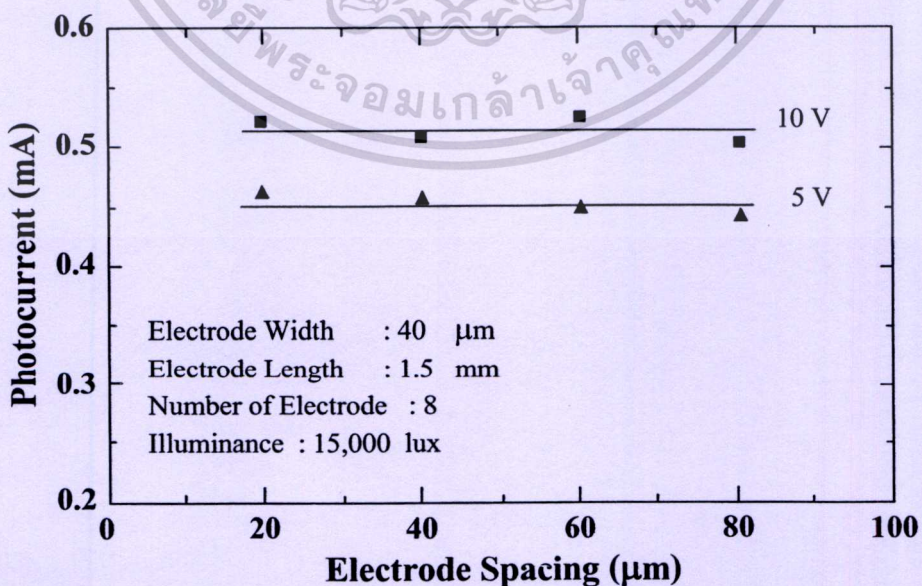
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.1.4 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ที่แรงดัน ไบอัสคงที่ค่าหนึ่งจะให้กระแสแสงที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันไบอัส 5 และ 10 V จะมีกระแสแสงเฉลี่ยเท่ากับ 0.45 และ 0.53 mA ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า



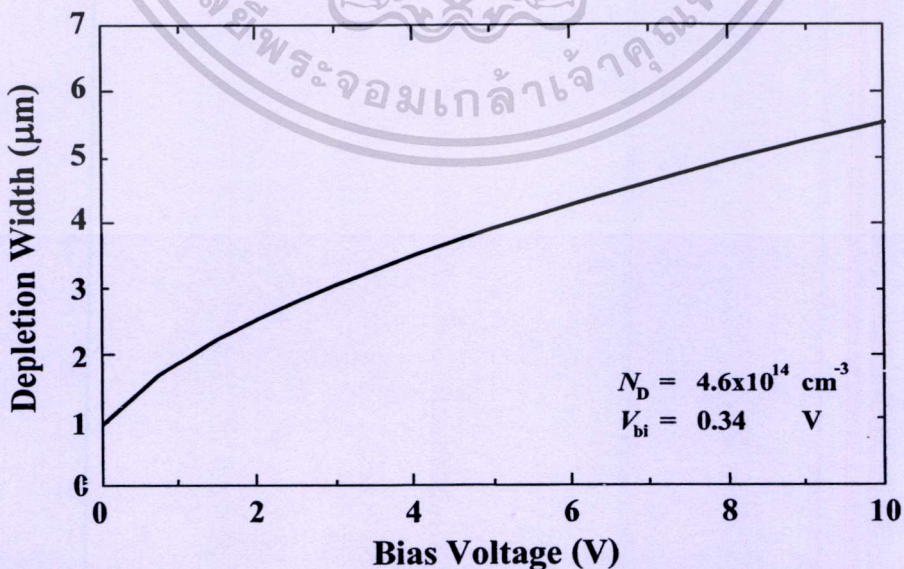
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสาเหตุที่กระแสแสงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) ที่คำนวณเทียบกับแรงดันไบอัสจากสมการที่ 4.18 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัส 10 V จะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวประมาณ $5.4 \mu\text{m}$ ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่น้อยที่สุดของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมีขนาดถึง $20 \mu\text{m}$ ดังนั้นพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วไฟฟ้าจึงประกอบไปด้วยบริเวณปลอดพาหะ และบริเวณที่เป็นกลาง หรือบริเวณนิวทรัลซึ่งแสดงสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า คือไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เนื่องจากพิจารณาว่าแรงดัน ไบอัสทั้งหมดจะตกคร่อมเฉพาะที่บริเวณปลอดพาหะ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระแสแสงส่วนมาก ดังนั้นการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งไม่ได้เป็นการเพิ่มพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะ จึงทำให้กระแสแสงที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง [2, 3, 10] โดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al นั้นให้ผลเช่นเดียวกันกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา [7]

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} + V_A) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

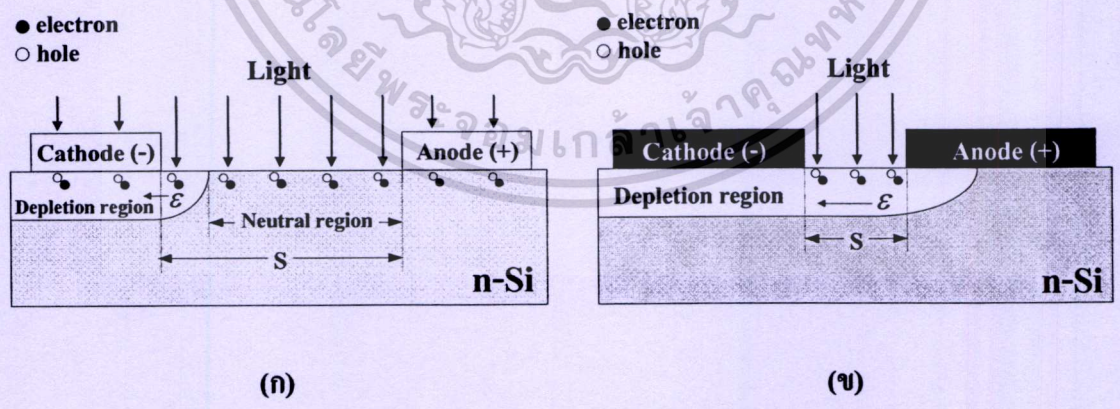
โดยที่	ϵ_s	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
	q	คือ	ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
	N_D	คือ	อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
	V_{bi}	คือ	กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
	V_A	คือ	แรงดัน ไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไบอัส และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการออกแบบขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM ในลักษณะอินเทอร์ดิจิตจึงควรออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดไม่กว้างจนเกินไปเพื่อลดพื้นที่บริเวณนิวทรัล อีกทั้งเป็นการลดขนาดของตัวตรวจวัดแสงได้อีกด้วย แต่การลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจนกระทั่งมีบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะ S ทั้งหมดจะทำให้โครงสร้างรวมถึงหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 4.28 กล่าวคือ โครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง ที่สร้างลงบนซิลิคอนชนิดเอ็็น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ก) กระแสแสงจะเกิดขึ้นเนื่องจากโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทดเป็นส่วนใหญ่ โดยเกิดขึ้นเฉพาะภายในบริเวณปลอดพาหะ ส่วนกรณีโครงสร้าง MSM ที่มีบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะ S ทั้งหมด หรือ MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ข) กระแสแสงจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของทั้งอิเล็กตรอนและโฮล โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้นจึงเป็นอีกหนึ่งโครงสร้างที่สามารถเพิ่มกระแสแสงของตรวจวัดแสง MSM ได้ โดยสามารถให้กระแสแสงสูงกว่า MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างมากกว่า 2 เท่า [57] แต่การออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสงมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้นนั้นจำเป็นต้องใช้กระจกต้นแบบโครเมียมที่มีความคมชัดสูง เนื่องจากมีขนาดลวดลายที่เล็ก ซึ่งกระจกต้นแบบโครเมียมนั้นมีราคาค่อนข้างสูง ต่างจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างที่สามารถสร้างกระจกต้นแบบได้ง่ายและมีราคาถูก อีกทั้งยังสามารถเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงได้เช่นเดียวกัน โดยการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะแบบโปร่งใสดังเช่นในงานวิจัยนี้ เป็นต้น

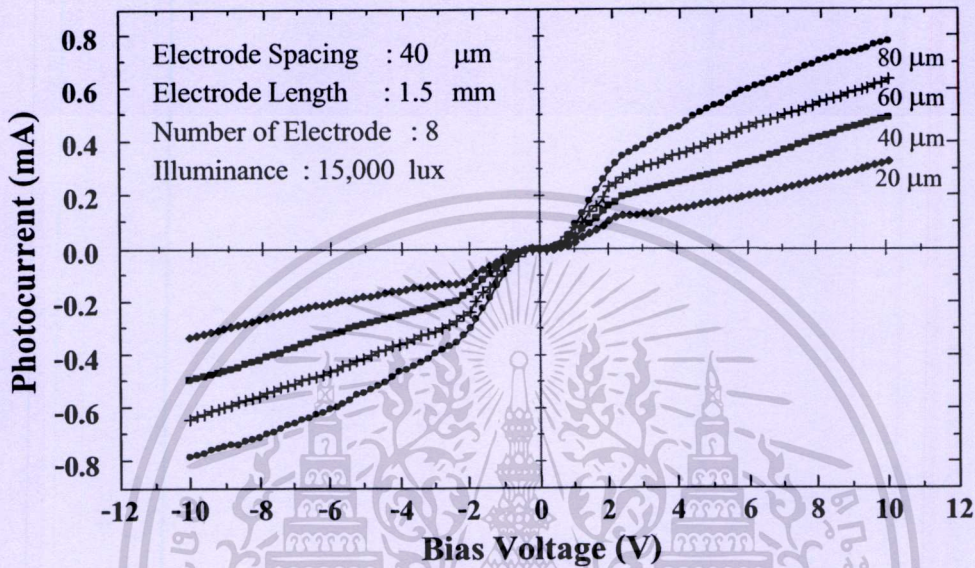


รูปที่ 4.28 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าต่างกัน ขณะให้แรงดันไบอัส
 (ก) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบ โปร่งใส และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง
 (ข) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น

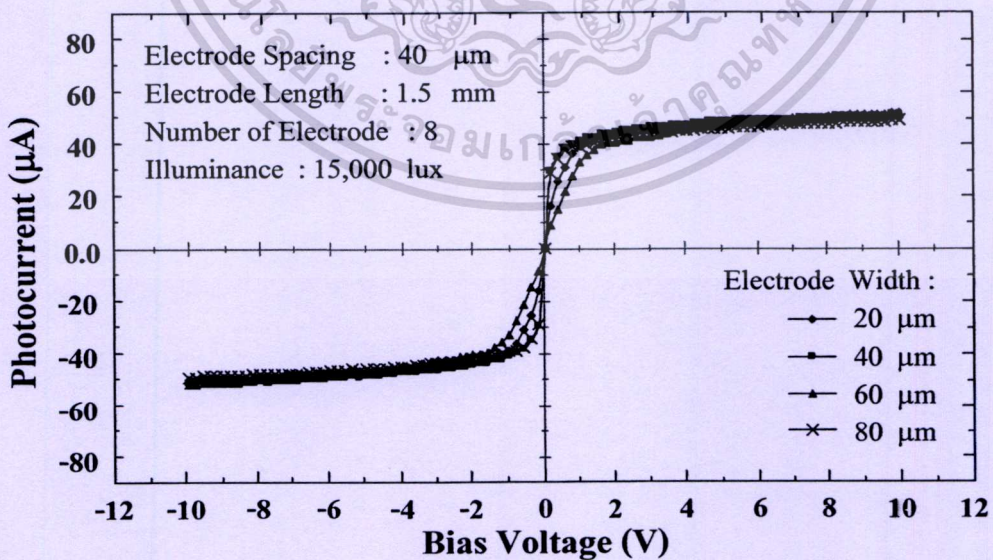
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.1.5 ผลของความกว้างของขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีลักษณะของกระแสแสงแปรผันตามขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ขณะที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al กลับมีลักษณะของกระแสแสงที่คงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.30

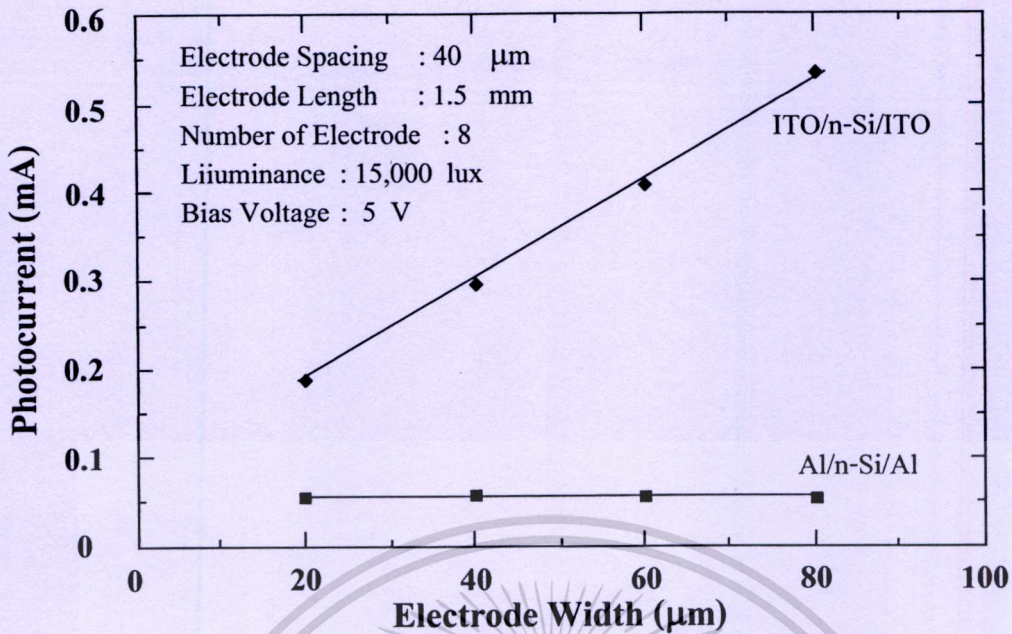


รูปที่ 4.29 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ตั้งแต่ 20 – 80 μm



รูปที่ 4.30 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ตั้งแต่ 20 – 80 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

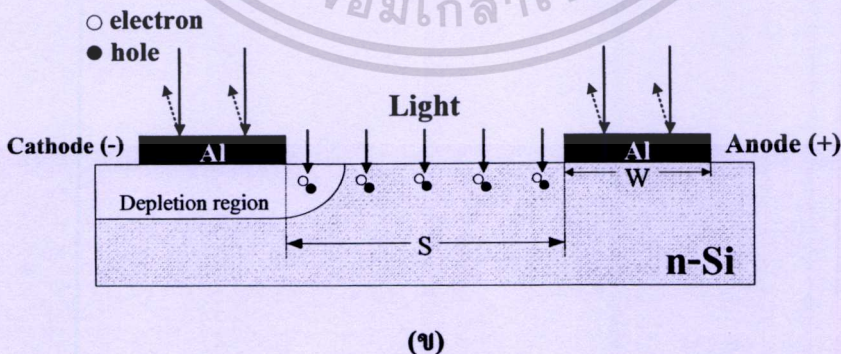
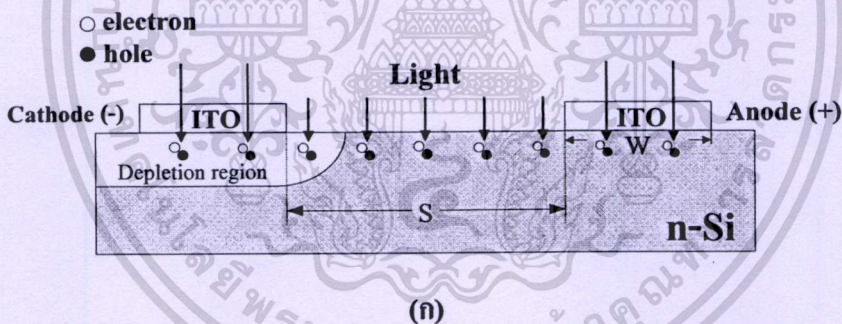


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความกว้างของขั้วไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าต่อกระแสแสง จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความกว้างของขั้วไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสแสงตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ต่างจากตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่กระแสแสงมีลักษณะค่อนข้างคงที่ โดยพบว่าที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO จะมีกระแสแสงประมาณ 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 mA เมื่อตัวตรวจวัดแสงมีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสขึ้น 20 μm จะมีกระแสแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 0.1 mA ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al นั้นมีกระแสแสงที่แรงดันไบอัส 5 V ประมาณ 46.4, 48.4, 46.8 และ 44.7 μA เมื่อตัวตรวจวัดแสงมีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีค่ากระแสแสงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 47 μA เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสแสงระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่แรงดันไบอัส 5 V เมื่อตัวตรวจวัดแสงมีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm พบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีกระแสแสงสูงกว่า Al/n-Si/Al ประมาณ 4, 6, 9 และ 12 เท่าตามลำดับ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการนำวัสดุหน้าไฟฟ้าโปร่งใส ITO มาใช้สร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM นั้นสามารถเพิ่ม

ปริมาณกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ได้ โดยการเพิ่มขนาดของขั้วไฟฟ้าจะยิ่งทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้นต่างจากตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าที่บแสงทั่วไป

โดยปริมาณกระแสแสงที่มีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสง $Al/n-Si/Al$ และการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงเมื่อเพิ่มขนาดความกว้างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง $ITO/n-Si/ITO$ นั้นมีผลมาจากสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุตัวนำโปร่งใส ITO นั่นเอง กล่าวคือ ITO มีลักษณะโปร่งใส และยอมให้แสงส่องผ่านได้ตั้งแต่ความยาวคลื่น 380 – 2000 nm โดย ITO ที่เตรียมขึ้นในการทดลองนี้มีความโปร่งใสมากถึง 85% ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1.2 ดังนั้นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองจึงสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้า ITO จนถึงบริเวณซิลิคอนชนิดเอ็น หรือบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระแสแสงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ก) ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสง $Al/n-Si/Al$ ที่แสงไม่สามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมลงไปได้ เนื่องจากอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นโลหะทึบแสง ดังนั้นเมื่อแสงตกกระทบลงบนขั้วไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนกลับ จึงไม่ทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอน และโฮลภายในบริเวณปลอดพาหะที่อยู่ใต้ขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ข) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสง $ITO/n-Si/ITO$ มีกระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง $Al/n-Si/Al$ ซึ่งการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้านั้นทำให้มีพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มดังนั้นในกรณีของตัวตรวจวัดแสง $ITO/n-Si/ITO$ จึงมีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.32 การสะท้อน และทะลุผ่านของแสงที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

(ก) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะโปร่งใสชนิด $ITO/n-Si/ITO$

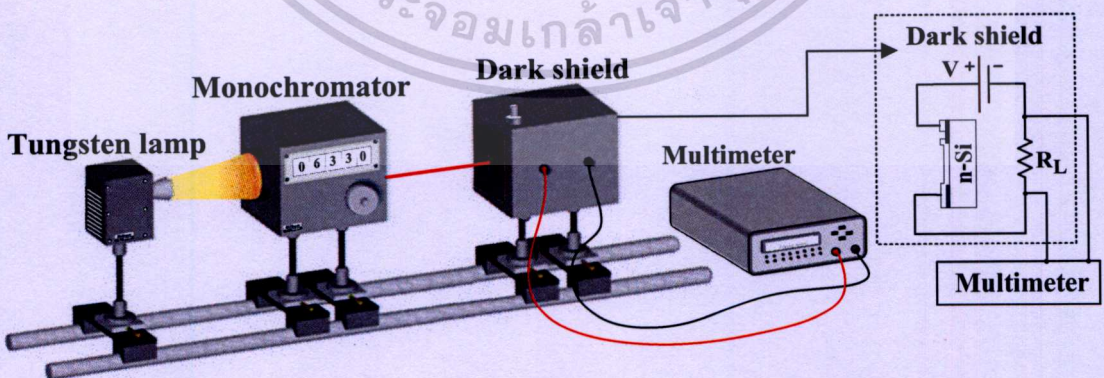
(ข) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะทึบแสงชนิด $Al/n-Si/Al$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสเป็นแบบอินเทอร์ดิเจตในหัวข้อที่ 4.1.4.1 นั้น จะเห็นได้ว่าผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจต ไม่ว่าจะเป็นระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าหรือ จำนวนขั้วไฟฟ้า ต่างก็ให้ผลการทดลองในลักษณะที่ใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าเป็นแบบทึบแสงของโลหะอลูมิเนียมชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น หรือของโลหะทึบแสงชนิดอื่นๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5-12] จึงทำให้ในการทดลองต่อจากนี้ไป ในงานวิจัยนี้จึง ได้ให้ความสนใจศึกษาเฉพาะตัวแปรที่ให้ผลของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันแตกต่างไปจากผลของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าเป็นแบบทึบแสง กล่าวคือจะได้อ่านการศึกษาเฉพาะผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่มีต่อสภาพการตอบสนองทางแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม และการตอบสนองทางความถี่ต่อไป ดังนี้

4.1.4.2 สภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจต

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงสภาพการตอบสนองทางแสง (responsivity; \mathcal{R}) และประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency; η) ของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จากลักษณะของอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อพลังงานแสงค่าต่างๆ ที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสง โดยได้ทำการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสที่มีต่อสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม อีกทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา



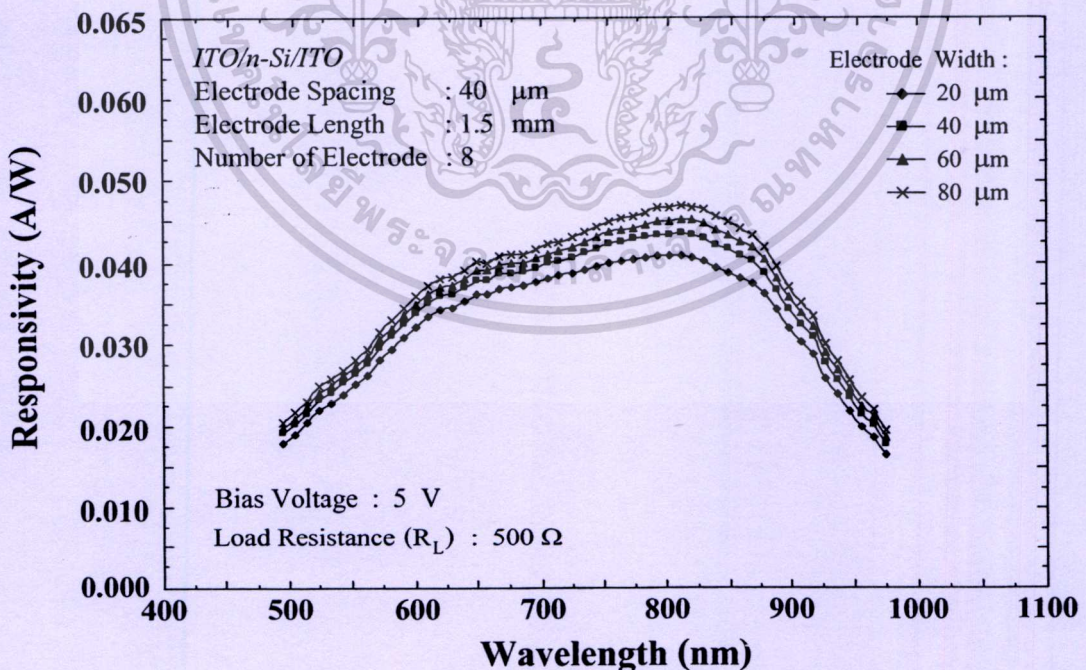
รูปที่ 4.33 แผนภาพการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500 Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการต่อวงจรเพื่อใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.33 โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดทังสเตน (tungsten lamp) แล้วส่งผ่านไปยังเครื่องโมนโครมาเตอร์ (monochromator) ของบริษัท Nikon รุ่น G-250 เพื่อให้แสงสามารถผ่านได้เฉพาะความยาวคลื่นแสงที่กำหนด (500 – 1,000 nm) โดยแสงที่ผ่านจากเครื่องโมนโครมาเตอร์จะถูกวัดพลังงานแสง (พลังงานอินพุต; P_{in}) ด้วยเครื่องเพาเวอร์มิเตอร์ (power meter) ของบริษัท Edmund optics, Inc. รุ่น W54-018 จากนั้นแสงจะไปตกกระทบยังตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ทำให้เกิดกระแสแสงขึ้น (I_p) โดยจะทำการวัดกระแสแสงที่เกิดขึ้นนี้ ด้วยเครื่องมือวัดของบริษัท Keithley รุ่น 2400

นำค่ากระแสแสง และพลังงานอินพุตที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาสภาพการตอบสนองทางแสงจากสมการที่ 4.19 โดยความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500 – 1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความยาวคลื่นแสง 830 nm จะมีสภาพการตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.039, 0.042, 0.044 และ 0.046 A/W เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ

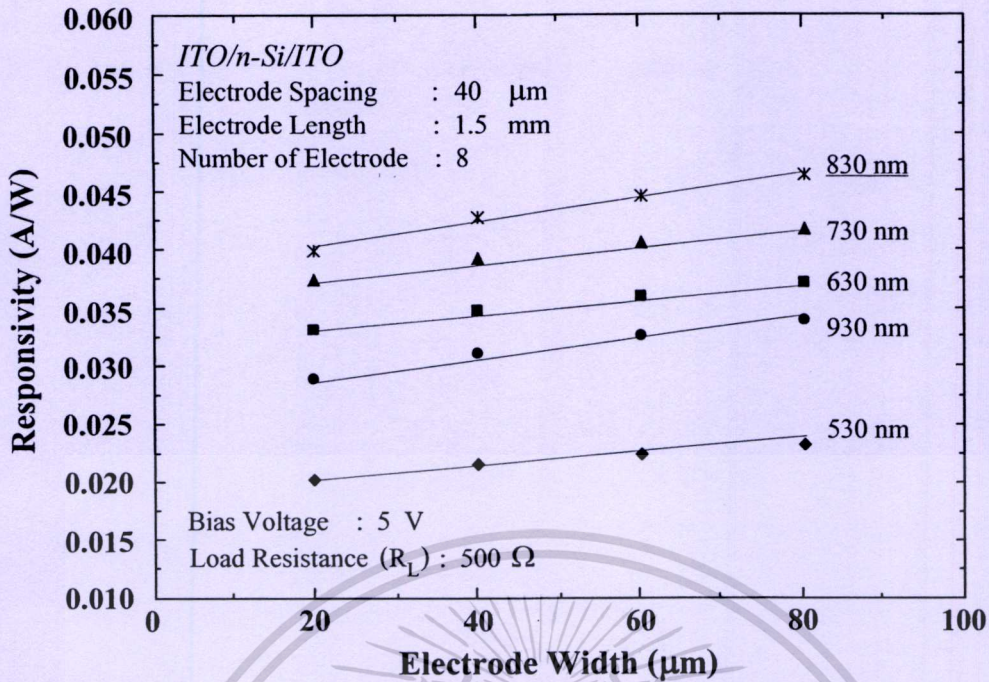
$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{in}} \quad (4.19)$$



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่น

ในช่วง 500 – 1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20 – 80 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

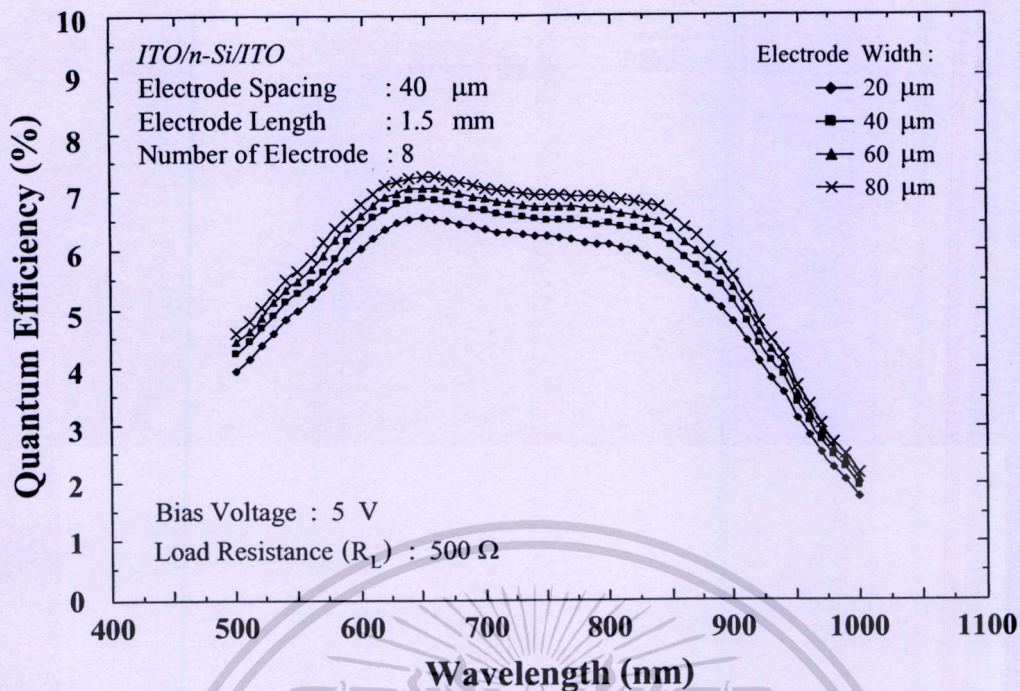
เมื่อนำสภาพการตอบสนองทางแสง มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของสภาพการตอบสนองทางแสงเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.34 ร่วมกับรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าสภาพการตอบสนองทางแสงยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น (λ_p) 830 nm แล้วจึงมีค่าลดลงไม่เพิ่มตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และความสัมพันธ์ของ $E = h\nu$ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4.6

เมื่อนำค่าสภาพการตอบสนองทางแสง ไปคำนวณหาประสิทธิภาพควอนตัม จากสมการที่ 4. 20 จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจจับแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500 – 1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.36

$$\eta = \mathfrak{R} \cdot \frac{hc}{\lambda q} \quad (4.20)$$

โดยที่ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์
 λ คือ ความยาวคลื่นแสง
 c คือ ความเร็วแสง

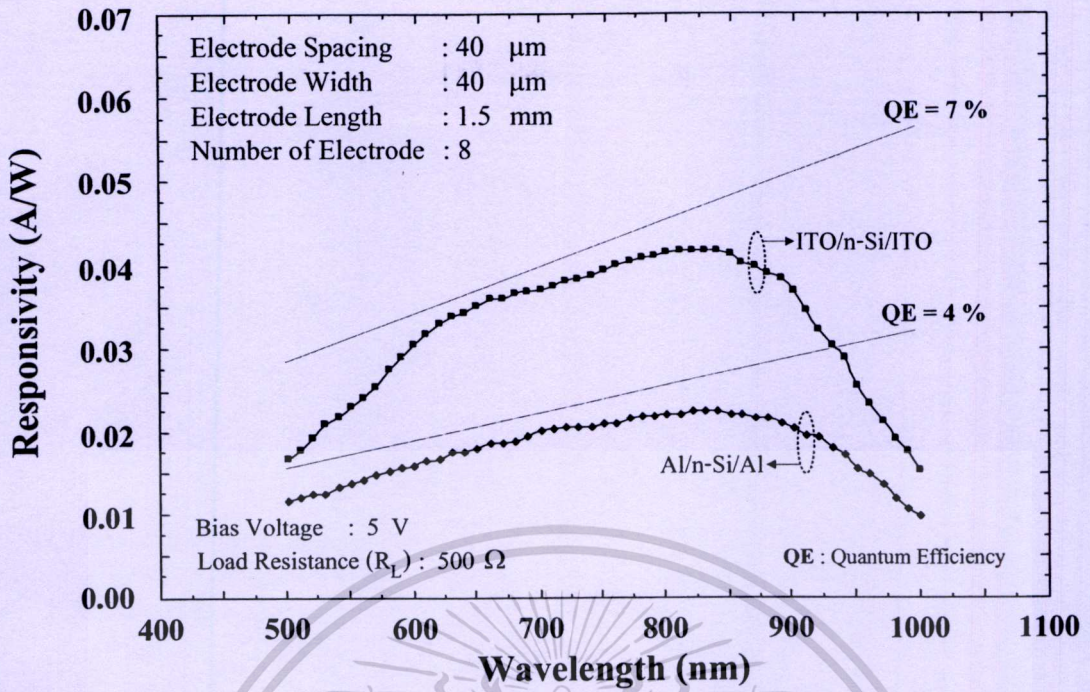
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัม กับความยาวคลื่นในช่วง 500 – 1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20 – 80 μm

โดยจากรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO มีขนาดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันกับการตอบสนองทางแสงที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ความยาวคลื่น 830 nm จะมีประสิทธิภาพควอนตัมเท่ากับ 6.0, 6.3, 6.6 และ 6.8% เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ และเมื่อทำการพิจารณาผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จะสามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 830 nm โดยมีสภาพการตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.046 A/W และประสิทธิภาพควอนตัมสูงสุดเท่ากับ 7.4 % เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 80 μm นั่นเอง

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความยาวขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว จึงได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสง กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500 – 1,000 nm ของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่นเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al

จากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสง กับความยาวคลื่นเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังรูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพควอนตัม และการตอบสนองทางแสงนั้นมีลักษณะที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา โดยที่ตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al นั้นมีสภาพการตอบสนองทางแสงสูงที่สุดที่ความยาวคลื่นเดียวกันคือ 830 nm ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.042 และ 0.023 A/W ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีความสามารถในการตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้ดีกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงที่สุดของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิดพบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยมีค่าเท่ากับ 6.95 และ 3.66% ตามลำดับ

จากสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส นั้น จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับลักษณะกระแสแสง-แรงดันในหัวข้อ 4.1.4.1 กล่าวคือสภาพการตอบสนองทางแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม และกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO กว้างขึ้น และมีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งมีผลมาจากการที่สภาพการ

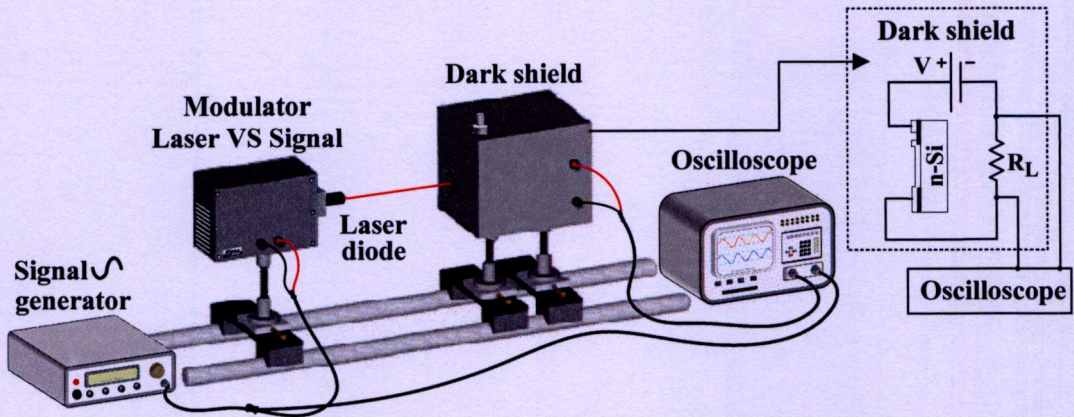
ตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อพลังงานแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายถึงผลของสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมได้เช่นเดียวกับผลของกระแสแสงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ตัวตรวจวัดแสงที่สามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่าในขณะที่มีพลังงานแสงค่าเดียวกันตกกระทบนั้นจะมีสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงกว่านั่นเอง

ถึงแม้ว่าตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จะมีสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แต่สภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ไม่มีส่วนป้องกันการสะท้อน (antireflection) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน หรือจากลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นแบบกว้าง ทำให้กระแสแสงที่เกิดขึ้นนั้นส่วนมากจะเกิดมาจากประจุของพาหะส่วนน้อยหรือโฮลในบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นถ้าพิจารณาถึงประสิทธิภาพควอนตัมที่มีความหมายถึงจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวน โฟตอนที่ตกกระทบ จึงจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ส่วนหนึ่งน่าจะลดลงเนื่องจากโครงสร้างดังกล่าว หรืออาจเกิดขึ้นจากการที่ชั้นออกไซด์บางๆ หรือสถานะพื้นผิวที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดอื่น ทำหน้าที่เป็นกับดักพาหะ (hole traps) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับออกไซด์ (SiO_x) ดังนั้นเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับการกระตุ้นจากแสงที่ตกกระทบและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น โฮลที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะจะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วแคโทดเพื่อเกิดเป็นกระแสแสง แต่พื้นที่ที่โฮลถูกแรงกระทำของสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่โฮลกลับถูกกับดักโฮลที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับออกไซด์จับ ทำให้กระแสแสงที่น่าจะเกิดขึ้นได้อีกส่วนหนึ่งลดลงไป ด้วยเหตุนี้จึงอาจส่งผลให้สภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีค่าน้อยลงนั่นเอง [17, 54]

4.1.5 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสงกระแสสลับ เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่

ในการทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงด้วยสัญญาณแสงกระแสสลับนี้ จะได้ทำการศึกษาถึงผลตอบสนองทางความถี่ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานของตัวตรวจวัดแสงในส่วนของความเร็วในการทำงาน และเชื่อมโยงไปถึงแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ โดยจะทำการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ต่อผลตอบสนองทางความถี่ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา

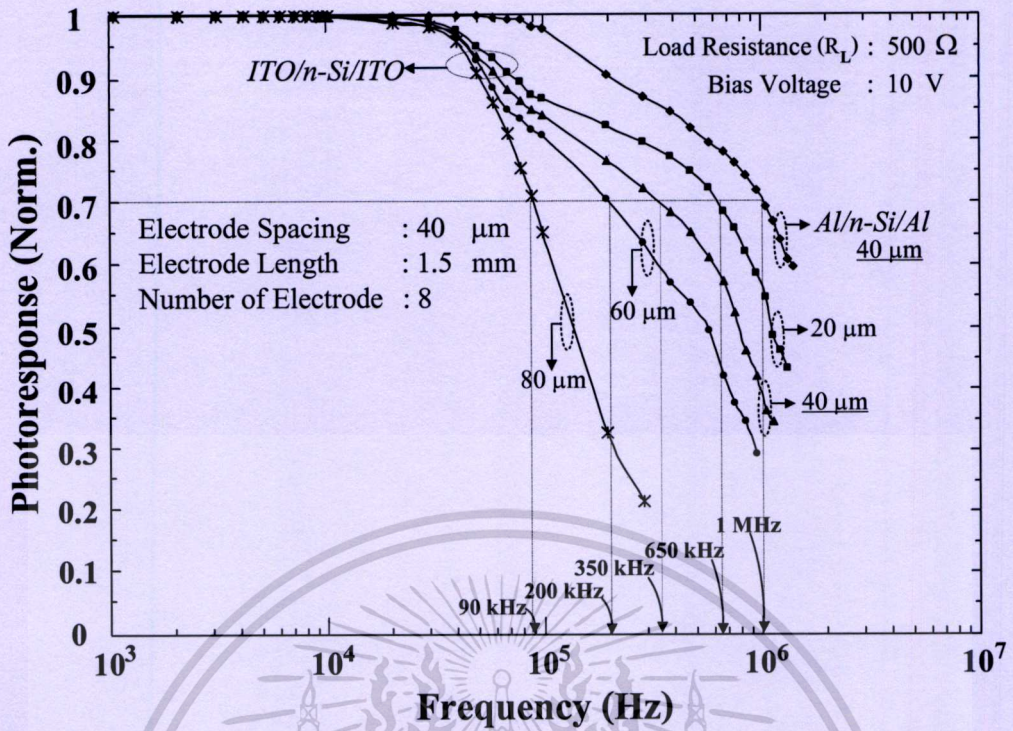
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



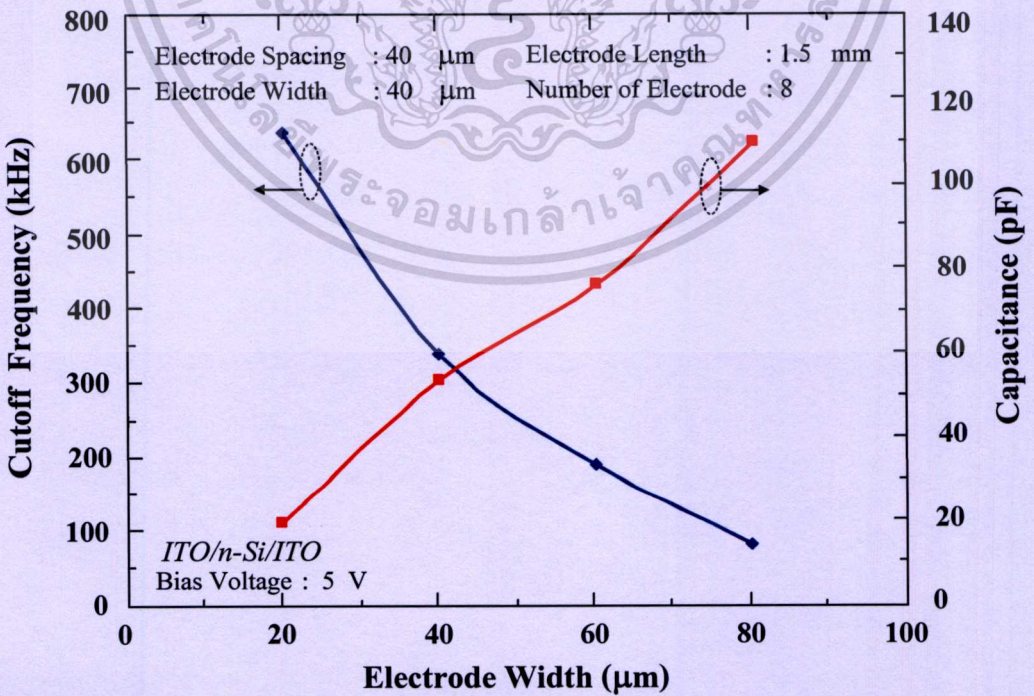
รูปที่ 4.38 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V

ทำการต่อชุดทดลองดังรูปที่ 4.38 โดยใช้แหล่งจ่ายแสงจากเลเซอร์ไดโอด (laser diode) ของบริษัท RS components Co., Ltd. รุ่น Beta TX series no.194-004 ความยาวคลื่น 670 nm กำลังงาน 2.67 mW และทำการมอดูเลท (modulated) สัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sine wave) เข้ากับเลเซอร์ไดโอดด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) ของบริษัท Tektronix Co., Ltd. รุ่น AFG 300 โดยปรับสัญญาณให้มีขนาด 400 mV_{pp} จากนั้นฉายแสงไปยังตัวตรวจวัดแสงที่ถูกต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน 500Ω และป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 5 V เพื่อวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป ขณะป้อนสัญญาณความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณค่าต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตในลักษณะนอร์มอลไลซ์ (normalize) กับความถี่ในแบบกึ่งล็อกเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ที่มีค่าสูงสุด หรือความถี่คัทออฟ (cutoff frequency ; f_c) ดังแสดงในรูปที่ 4.39

ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ต่อผลตอบสนองทางความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นจาก $20, 40, 60$ และ $80 \mu\text{m}$ จะทำให้ความถี่คัทออฟมีการเปลี่ยนแปลงจาก $650 \text{ kHz}, 350 \text{ kHz}, 250 \text{ kHz}$ และ 90 kHz ตามลำดับ กล่าวคือความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าลดลงเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากการที่ความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่ของรอยสัมผัส ทำให้เมื่อความกว้างขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นจึงมีค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ $19, 55, 79$ และ 114 pF ที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $20, 40, 60$ และ $80 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วในการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสง กล่าวคือเป็นส่วนหนึ่งของค่าเวลาคงตัว (RC time constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความต้านทานโหลด (R_L) กับค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสง MSM รวมถึงที่บริเวณขั้วเชื่อมต่อสาย (bonding pad) ดังนั้นเมื่อความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าลดต่าลงนั่นเองดังแสดงในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เพื่อหาความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al



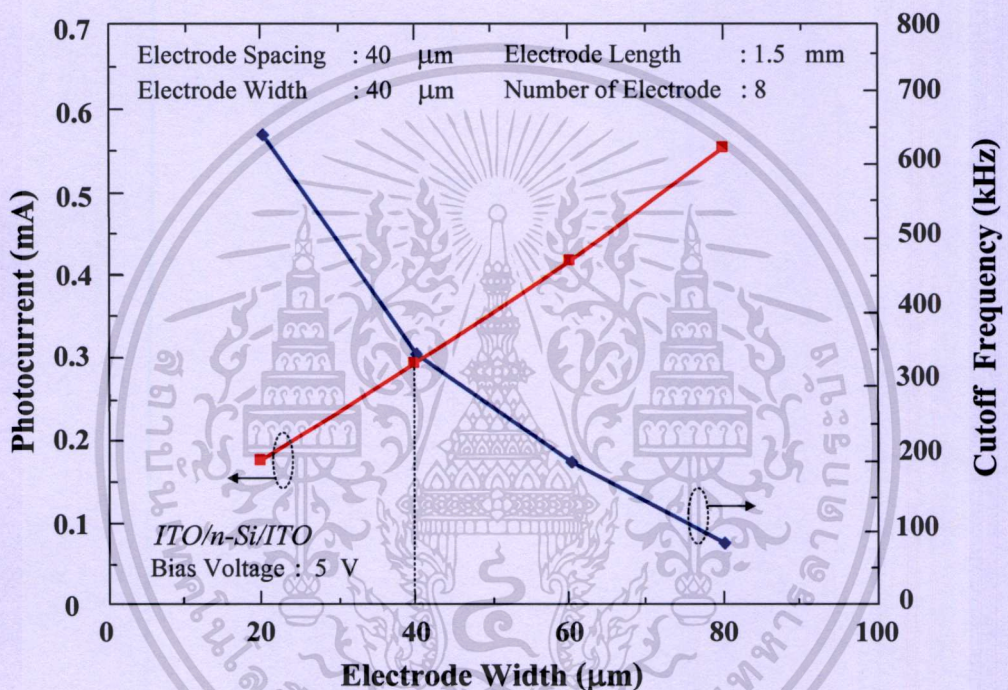
รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คutoffและความจุไฟฟ้า กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ระหว่างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO กับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40\ \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40\ \mu\text{m}$ ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $1.5\ \text{mm}$ และมีจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าความถี่คutoffเท่ากับ $350\ \text{kHz}$ โดยมีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีความถี่คutoffเท่ากับ $1\ \text{MHz}$ ซึ่งผลการตอบสนองทางความถี่นี้มีความสอดคล้องกับผลของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันในหัวข้อ 4.1.3 ที่ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงกว่าของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al จึงส่งผลให้ค่าเวลาคงตัวซึ่งเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเร็วของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า อีกทั้งผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO อาจมีค่าลดลงเนื่องมาจากผลของชั้นออกไซด์ระหว่าง ITO และซิลิคอน ทำให้เวลาในการส่งผ่าน (transit time) และเวลาในการแพร่ (diffusion time) ของพาหะผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นออกไซด์กับซิลิคอนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการล่าช้ากว่าจะได้รับกระแสแสง หรือกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทออกมาทำให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าต่ำนั่นเอง [17, 54]

จากผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า และการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ต่อสัญญาณแสงกระแสตรงและกระแสสลับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของขั้วไฟฟ้าอินเตอร์ดิจิตัล รวมถึงทำการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO สามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้เป็นอย่างดีโดยสามารถให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ถึง 10 เท่าที่แรงดันไบอัส $10\ \text{V}$ รวมถึงมีสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมมากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al อีกด้วย และเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของ ITO จึงทำให้การเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีผลทำให้การตอบสนองทางแสงกระแสตรงเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าทึบแสงทั่วไป แต่ในส่วนของการตอบสนองต่อแสงกระแสสลับนั้นจะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO สามารถให้การตอบสนองได้ต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยจะเห็นได้จากความถี่คutoffที่มีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ซึ่งสอดคล้องกับผลของความจุไฟฟ้าที่ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ให้มีความกว้างของขั้วไฟฟ้ามานั้นจะส่งผลให้การตอบสนองต่อแสงกระแสตรงดีขึ้น แต่กลับทำให้การตอบสนองทางความถี่ลดต่ำลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าขนาดของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ คือ ที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40\ \mu\text{m}$

เนื่องจากที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้ามี่ขนาด 20 μm การตอบสนองต่อแสงกระแสตรงจะมีค่าลดลง และถ้าความกว้างของขั้วไฟฟ้ามี่ขนาด 60 และ 80 μm จะทำให้มีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำ นั้นเอง โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อการตอบสนองทางแสงใดๆ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับกับความกว้างของขั้วไฟฟ้าคือ 40 μm จึงมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้ ดังนั้นการทดลองต่อจากนี้ไปจะได้ทำการศึกษาถึงตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีความกว้าง และระยะห่างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และมีจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว



รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความถี่คutoff กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ที่ได้รับแรงดันไบอัส 5 V

MSM Photodetectors	Capacitance (pF)	Dark current (nA)	Photocurrent [15,000 lux] (mA)	Responsivity [$\lambda_p = 830 \text{ nm}$] (A/W)	Frequency cut off (MHz)
ITO/n-Si/ITO	55	380	0.30	0.042	0.35
Al/n-Si/Al	26	290	0.05	0.023	1.00

จากผลการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอนชนิดเอ็นมีผลอย่างมากในทุกๆ ลักษณะสมบัติที่ได้ทำการศึกษาไม่ว่าจะเป็นลักษณะของ ความจุไฟฟ้า, กระแสมืด, กระแสแสงในช่วงแรงดันต่ำ หรือแม้กระทั่งผลตอบสนองทางความถี่ก็ตาม ดังนั้นการปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการใช้ความร้อน (heat treatment) เช่นเดียวกับ ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น และจากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา [5-12] จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการทดลอง แต่เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ตัวตรวจวัดแสงจะทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเป็นการศึกษาถึงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO และ ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO หลังจากได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ความร้อน

4.2 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแอนนिलต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO และ ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO และตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางความร้อน ซึ่งทั่วไปสามารถเรียกกระบวนการทางความร้อนที่เป็นการปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม ITO และสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำให้มีความสมบูรณ์ขึ้นว่ากระบวนการซินเตอริง (sintering) หรือกระบวนการแอนนिल (anneal) เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเรียกกระบวนการทางความร้อนสำหรับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ว่ากระบวนการซินเตอริง ส่วนกระบวนการทางความร้อนสำหรับฟิล์ม ITO หรือสำหรับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO จะเรียกว่ากระบวนการแอนนिल

4.2.1 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแอนนिलต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะสมบัติต่างๆ ของ ITO หลังจากผ่านกระบวนการแอนนिल ได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ที่ความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 500 nm ซึ่งเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอุณหภูมิแอนนिलที่สามารถทำให้ ITO มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด และเป็นอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ด้วย โดยทำการทดลองวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ และการวัดด้วยวิธี TLM เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 4.1.1.1 และ 4.1.1.2 ตามลำดับ

โดยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ด้วยความร้อน [24] ที่สร้างขึ้น ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา พบว่ากระบวนการซินเตอริงเพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอูมิเนียมและซิลิคอนมีความสมบูรณ์มากที่สุดจะต้องทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการสร้างระหว่างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al และตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีความสอดคล้องกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาเงื่อนไขจากกระบวนการซินเตอร์นี้ไปทำการแอนนัลฟิล์มบาง ITO โดยกำหนดให้บรรยากาศที่ใช้ในการแอนนัลเป็นบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน และทำการแอนนัลเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิแอนนัลต่างๆ กันคือ 200 °C, 300 °C, 400 °C และ 500 °C โดยผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4

จากสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ที่อุณหภูมิในการแอนนัลต่างๆ กันคือ 200, 300, 400 และ 500 °C จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลมีค่าสูงขึ้นจะทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง ในขณะที่แนวโน้มของค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะมีค่าสูงขึ้น โดยอาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิเป็นตัวช่วยให้ ITO มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จากงานวิจัยที่ได้มีการศึกษามาแล้ว [58] ซึ่งพบว่าเมื่อทำการแอนนัลในบรรยากาศไนโตรเจน โดยให้อุณหภูมิในการแอนนัลมีค่าเท่ากับ 300 °C จะทำให้เกรนมีขนาดที่โตขึ้นกว่าก่อนทำการแอนนัลโดยมีค่าเท่ากับ 48 และ 55 nm ก่อนและหลังทำการแอนนัลตามลำดับ โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของพาหะ ที่มีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ความหนาแน่นของพาหะที่สูงขึ้นนี้จะทำให้ระดับพลังงานของอินเดียมออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยทำให้มีปริมาณของพาหะนำไฟฟ้า หรือ อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ ITO มีลักษณะคล้ายกับโลหะมากยิ่งขึ้น และมีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น หรือ สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าต่ำลงนั่นเอง [13,18,19] แต่เมื่อทำการพิจารณาถึงสภาพคล่องของพาหะจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 500 °C สภาพคล่องของพาหะจะมีค่าลดลง ซึ่งอาจมีผลมาจากการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นช่วงของอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง จนกระทั่งส่งผลกระทบต่อฟิล์ม ITO ทำให้เกิดข้อบกพร่องของผลึกขึ้น จึงส่งผลทำให้สภาพคล่องของพาหะที่อุณหภูมิ 500 °C มีค่าลดลงนั่นเอง [59]

ตารางที่ 4.4 ลักษณะสมบัติของฟิล์มบาง ITO ที่ความหนา 500 nm โดยแอนนัลในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

Temperature (°C)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	Carrier concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{sec}^{-1}$)	Transmittance (%) [58]
200	9.3×10^{-4}	4.9×10^{20}	11.1	86
300	8.0×10^{-4}	6.8×10^{20}	11.8	88
400	7.6×10^{-4}	7.2×10^{20}	12.3	89
500	7.2×10^{-4}	7.4×10^{20}	11.2	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ในการทดลองยังพบอีกว่าเมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C นั้นฟิล์ม ITO จะมีการหลุดล่อนออกจากฐานรองหลังจากผ่านกระบวนการแอนนีสที่อุณหภูมิดังกล่าวแล้ว ซึ่งอาจเกิดจากการที่ ITO และ ฐานรองที่เป็นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างบนซิลิคอนชนิดเอ็นมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว (expansion coefficients) ทางความร้อนที่แตกต่างกันซึ่งการหลุดล่อนของฟิล์มที่อุณหภูมิดังกล่าวนั้นเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษ ถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสฟิล์มบาง ITO ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ [58] ดังนั้นอุณหภูมิแอนนีสที่ 400 °C และ 500 °C จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการสร้างของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ทำให้การเลือกอุณหภูมิที่จะนำมาใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นถูกจำกัดอยู่ที่อุณหภูมิ 300 °C ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C นั้น ITO จะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าก็ตาม ดังนั้นในการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ด้วยกระบวนการแอนนีสในงานวิจัยนี้จะได้ทำการแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ฟิล์ม ITO ที่มีความหนาเท่ากับ 500 nm มีสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $8 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ ความหนาแน่นของพาหะเท่ากับ $6.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ สภาพคล่องของพาหะเท่ากับ $11.8 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเท่ากับ 88% โดยผลการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของ ITO ก่อนและหลังทำการแอนนีสได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

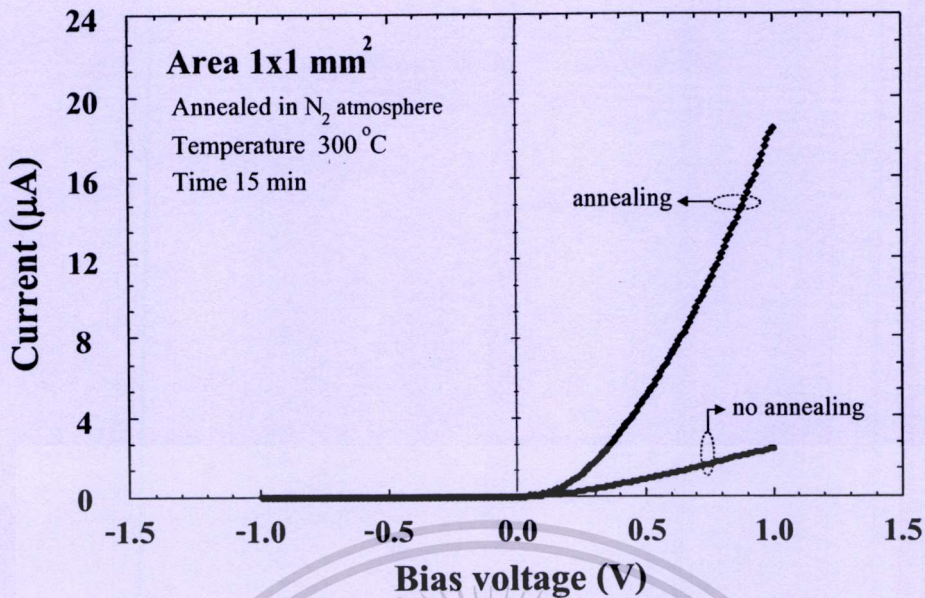
ตารางที่ 4.5 ลักษณะสมบัติของฟิล์มบาง ITO ที่ความหนา 500 nm ก่อน และหลังทำการแอนนีสในบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที

Conditions	Carrier concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	Transmittance (%) [58]	Grain Size (nm) [58]
no annealing	4.2×10^{20}	10.9	11×10^{-4}	85	48
annealing	6.8×10^{20}	11.8	8×10^{-4}	88	55

4.2.2 การทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อสมบัติของรอยสัมผัสขั้ว

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO และได้ทราบถึงอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการแอนนีสรอยสัมผัสขั้วระหว่าง ITO และ ซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีลักษณะของลวดลายเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีขนาดของพื้นที่ เท่ากับ 1 mm^2 แล้ว ดังนั้นในการทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาถึงสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสขั้วที่สำคัญซึ่งได้แก่ แรงดันภายใน (V_b) และความสูงกำแพงขั้ว (ϕ_b) โดยทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสขั้ว และคำนวณผลเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็น ก่อนและหลังทำการแอนนีสล

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็น ก่อนและหลังทำการแอนนีสลดังแสดงในรูปที่ 4.42 นั้น จะเห็นได้ว่าส่วนกลับของค่าความชันของกราฟในด้านแรงดันไบอัสตรง จะหมายถึงความต้านทานอนุกรม หรือ ความต้านทานในเนื้อสารรวมถึงความต้านทานที่บริเวณรอยสัมผัส (จาก $V = IR$) ซึ่งในกรณีของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ได้ผ่านการแอนนีสลพบว่ากราฟมีลักษณะของความชันที่น้อยกว่ารอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ไม่ได้ผ่านการแอนนีสลอย่างเห็นได้ชัด หรืออาจกล่าวได้ว่ารอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ได้ผ่านการแอนนีสลนั้นมีค่าความต้านทานอนุกรมที่ต่ำกว่ารอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ไม่ได้ผ่านการแอนนีสล โดยจะเห็นได้ว่าลักษณะของความต้านทานนั้นสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะสภาพต้านทานไฟฟ้าของ ITO ก่อนและหลังทำการแอนนีสลดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งค่าความต้านทานที่ลดลงนั้นรวมถึงผลของความต้านทานที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็นด้วย ซึ่งเป็นไปได้ว่ารอยสัมผัสชนิดกึ่งที่เกิดระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็นนั้นมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นนั่นเอง

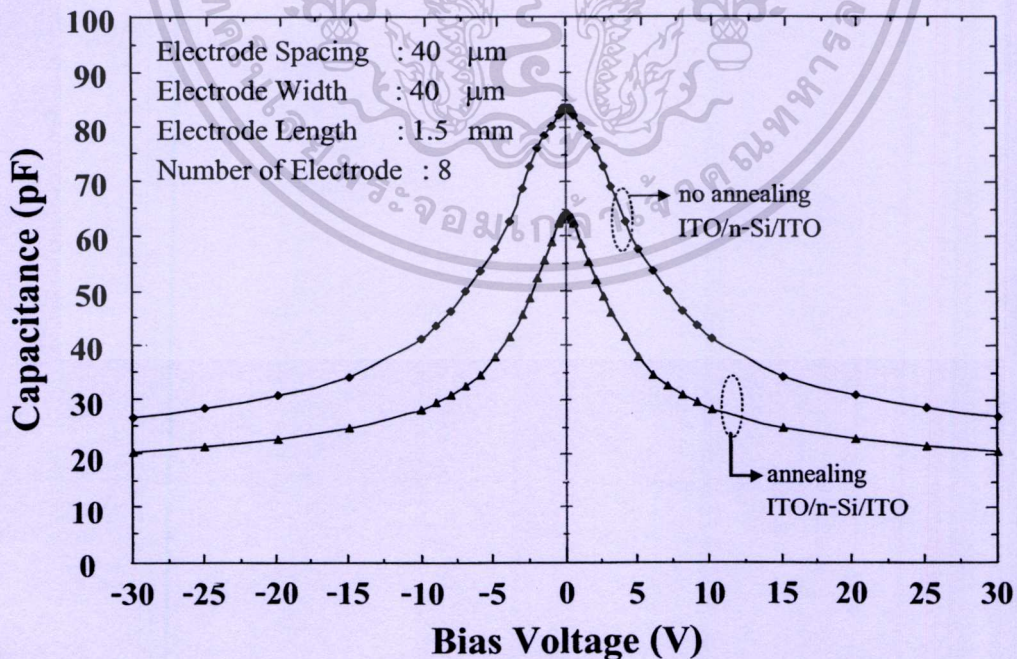
จากการประมาณค่าเพื่อหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง พบว่ารอยสัมผัสชนิดกึ่งก่อนและหลังทำการแอนนีสลมีแรงดันภายในที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าประมาณ 0.34 V และเมื่อทำการหาค่าค่าแกงศักย์ชนิดกึ่งด้วยการประมาณค่ากระแสสัมพันธ์ด้วยย้อนกลับ ร่วมกับการคำนวณจากสมการที่ 4.14 พบว่าค่าค่าแกงศักย์ชนิดกึ่งของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นก่อนและหลังทำการแอนนีสลต่างก็มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 0.76 V ซึ่งต่างจากรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็นจากงานวิจัยที่ผ่านๆ มาที่อุณหภูมิซินเตอร์ริงมีผลต่อแรงดันภายในและค่าแกงศักย์ชนิดกึ่ง [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

เพื่อเป็นการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่สร้างขึ้น จึงได้ทำการวัดคุณสมบัติดังกล่าวด้วยชุดอุปกรณ์ดังแสดงรูปที่ 4.14 เช่นเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.3 โดยผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อนและหลังทำการแอนนีส ได้แสดงดังในรูปที่ 4.43

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.43 จะเห็นได้ว่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที มีลักษณะสมมาตรกัน และมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัสเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านการแอนนีส โดยมีค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบอัส 10 V เท่ากับ 26 pF ขณะที่ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านการแอนนีสนั้นจะมีค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบอัส 10 V เท่ากับ 40 pF ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้หลังจากผ่านกระบวนการแอนนีสจะมีค่าลดลงถึง 1.6 เท่า ซึ่งอาจมีผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสทำให้รอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นมีความสมบูรณ์มากขึ้นส่งผลให้สถานะพื้นผิวต่างๆ ลดลงได้ หรืออาจมีผลมาจากชั้นออกไซด์บางๆ (SiO_x) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอน และออกซิเจนส่วนเกินจากกระบวนการเคลือบฟิล์ม ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น [54] ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสดังกล่าวมีค่าลดลงนั่นเอง



รูปที่ 4.43 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อการตอบสนองทางแสงด้วยสัญญาณแสงกระแสดตรง และสัญญาณแสงกระแสสลับ

เพื่อเป็นการศึกษา และเปรียบเทียบถึงผลการตอบสนองทางแสง ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังจากผ่านกระบวนการแอนนีสต่อสัญญาณแสงชนิดต่างๆ ในหัวข้อนี้จึงจะได้กล่าวถึง ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังผ่านกระบวนการแอนนีสเพื่อศึกษาถึงการตอบสนองต่อแสงกระแสดตรง รวมถึงลักษณะของผลตอบสนองทางแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่างๆ เพื่อเป็นการศึกษาถึงผลตอบสนองต่อแสงกระแสสลับ หรือการตอบสนองทางความถี่ และความถี่คutoffของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังผ่านกระบวนการแอนนีส โดยจะได้กล่าวต่อไปดังนี้

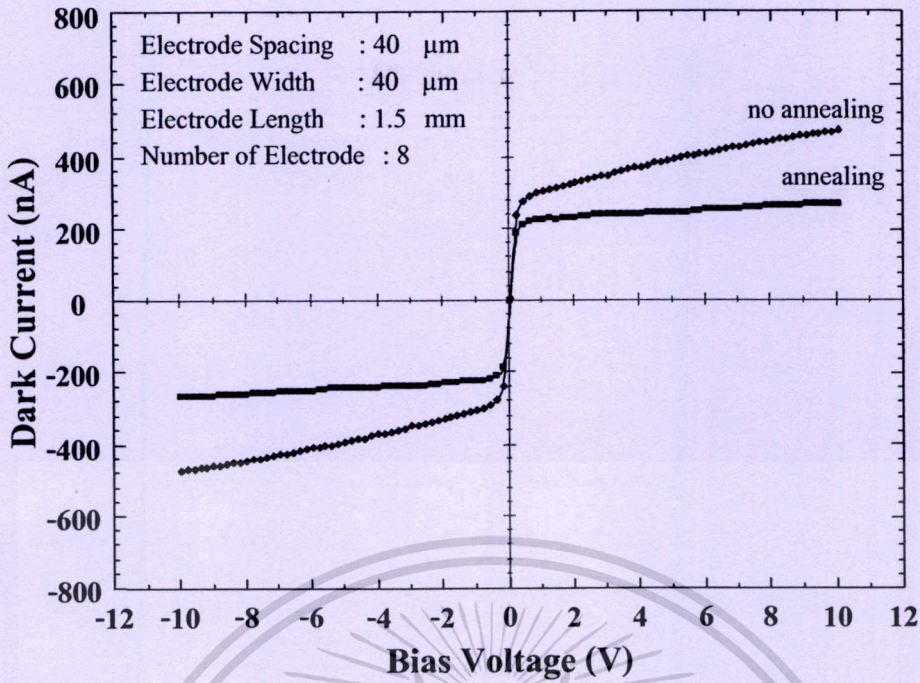
4.2.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน หรือกระบวนการแอนนีส ทั้งขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสงเพื่อเป็นการหาค่ากระแสมืด และกระแสแสง อีกทั้งเพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแอนนีส ดังนี้

4.2.4.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสง

ในการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงในการทดลองนี้ ได้ทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงด้วยชุดอุปกรณ์ดังแสดงรูปที่ 4.17 เช่นเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.4.1.1 โดยผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหาค่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีสดังแสดงในรูปที่ 4.44

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.44 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ผ่านกระบวนการแอนนีสจะมีค่ากระแสมืดที่แรงดันไบอัส 5 V เท่ากับ 240 nA ขณะที่ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแอนนีสนั้นจะมีค่ากระแสมืดที่แรงดันไบอัส 5 V เท่ากับ 380 nA โดยจากค่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้หลังจากผ่านกระบวนการแอนนีสจะมีค่าลดลงถึง 140 nA ทั้งที่ค่ากำแพงศักย์ขั้วต่อที่ทำได้จากการทดลองที่ 4.2.2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้คาดได้ว่าการลดลงของค่ากระแสมืดนี้ อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสทำให้รอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นมีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้สถานะพื้นผิวต่างๆ ที่เกิดจากการไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น และ ITO ลดลงได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กระแสมืดที่เกิดขึ้นเนื่องจากสถานะพื้นผิวเหล่านี้ลดลงตามไปด้วย



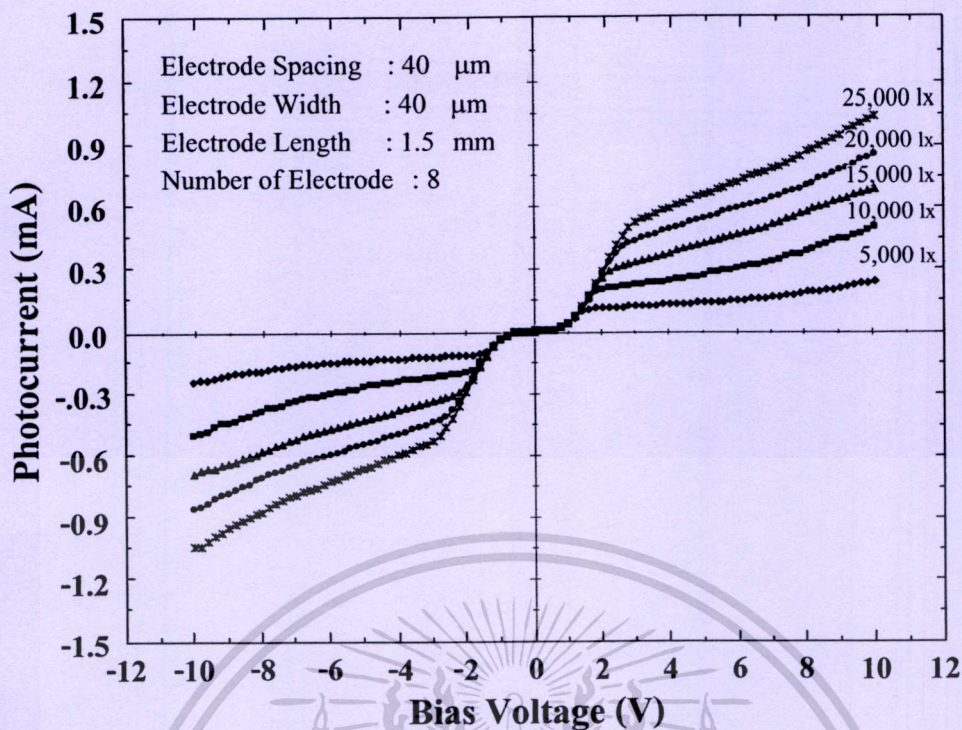
รูปที่ 4.44 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เปรียบเทียบระหว่างก่อน และหลังทำการแอนนีส

4.2.4.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

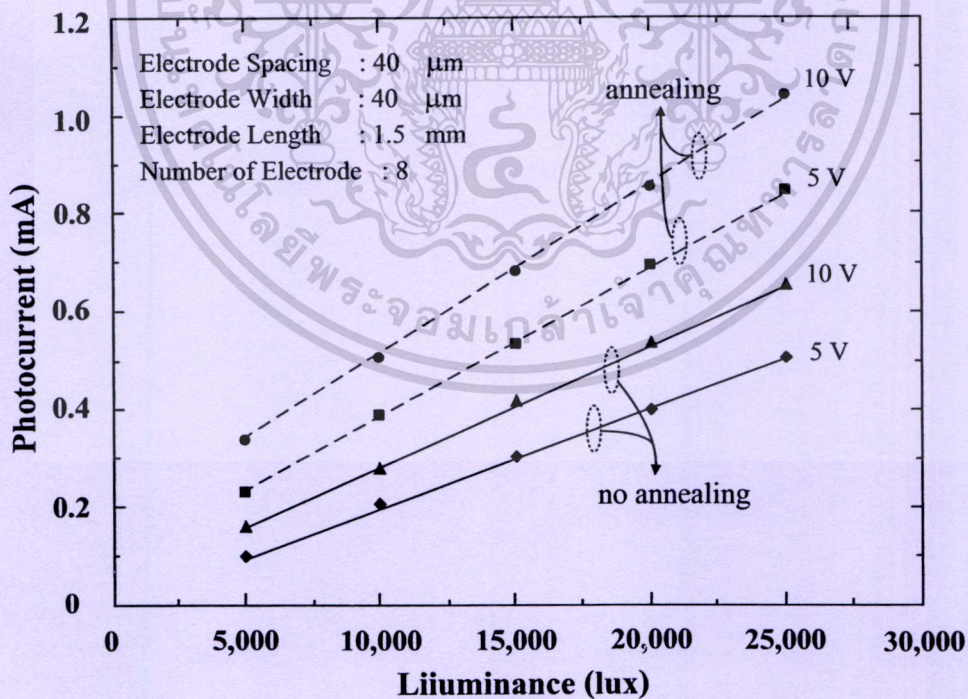
เพื่อเป็นการหากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ผ่านกระบวนการแอนนีส รวมถึงทำการเปรียบเทียบผลของกระแสแสงที่ได้รับระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีส จึงได้ทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนดังแสดงในรูปที่ 4.20 เช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.1.4.1.1

จากผลของลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในรูปที่ 4.45 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจน ด้วยอุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 15 นาที นั้นสามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้เป็นอย่างดี และดีขึ้นกว่าก่อนทำการแอนนีส โดยกระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น ดังความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีสได้ในรูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ผ่านการแอนนีสจะมีกระแสแสงที่ความเข้มแสง 5000, 10000, 15000, 20000 และ 25000 lux ประมาณ 0.14, 0.26, 0.42, 0.54 และ 0.66 mA ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืด ($I_{\text{photo}}/I_{\text{dark}}$) ที่ความเข้มแสง 25,000 lux และแรงดันไบอัส 10 V ประมาณ 3,950 เท่า ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ทำการแอนนีสมีอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง และแรงดันไบอัสค่าเดียวกันอยู่ที่ประมาณ 1,900 เท่า ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

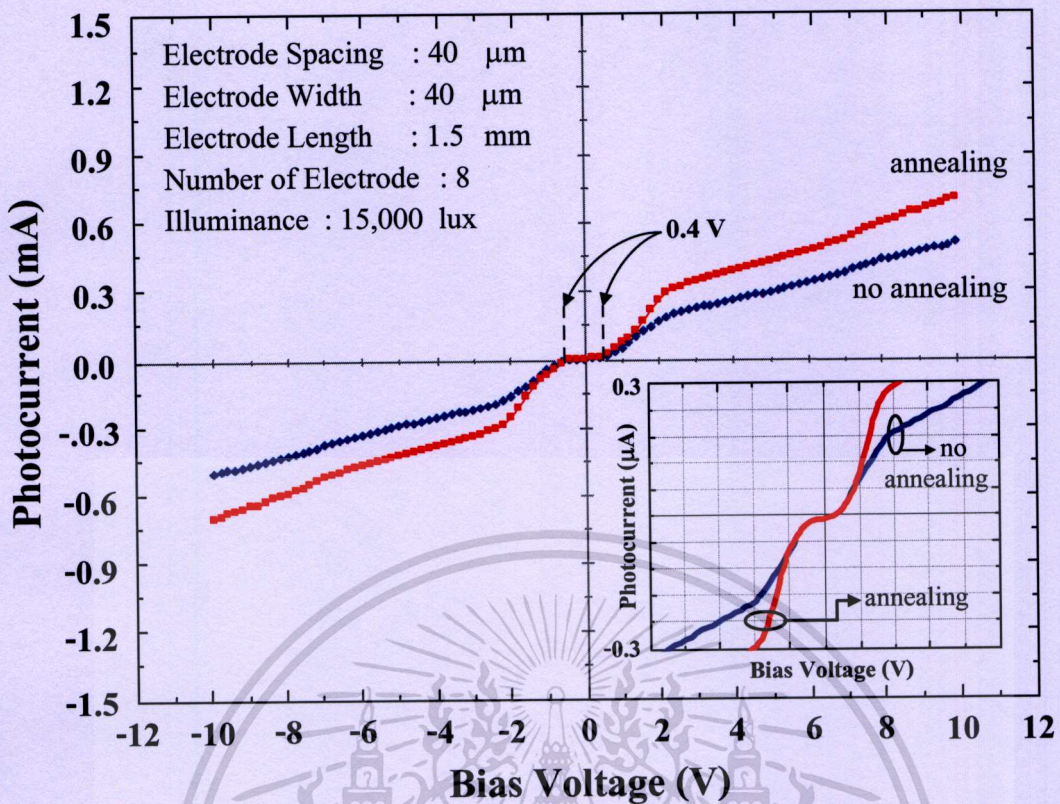


รูปที่ 4.45 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ที่ความเข้มแสงในช่วง 5,000 – 25,000 lux



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีสล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีสล

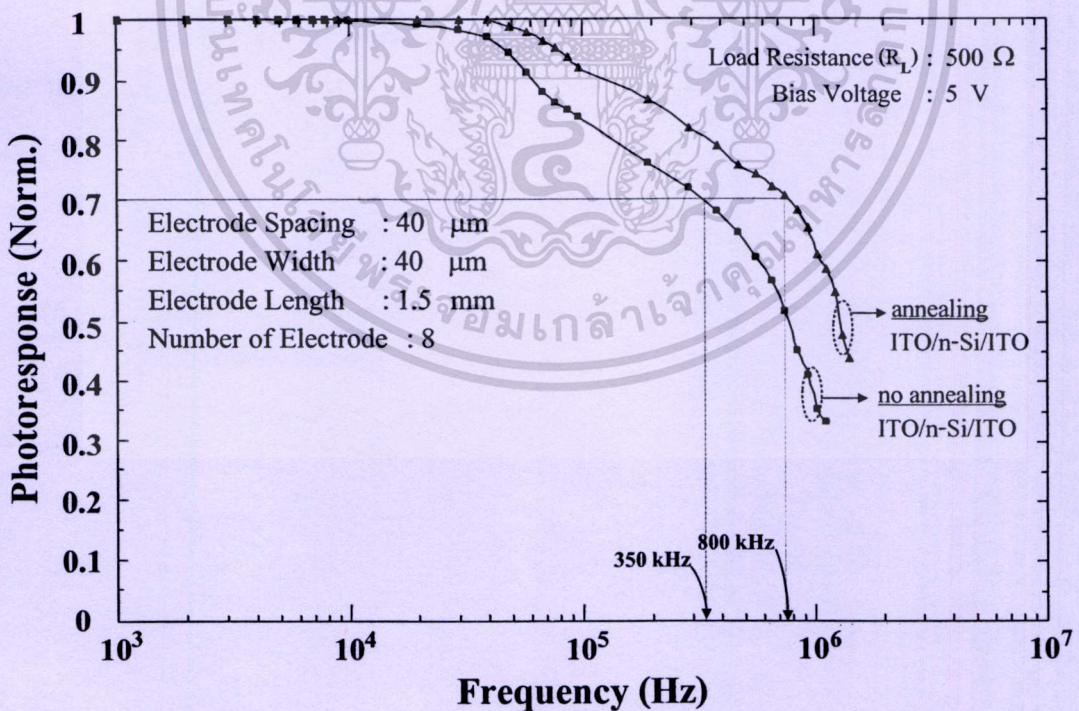
เมื่อนำลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีสลมาทำการเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.47 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัสมีค่าต่ำหรือประมาณ 0 – 0.4 V กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO หลังจากทำการแอนนีสลยังคงมีค่าต่ำมากเหมือนตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านการแอนนีสล ซึ่งเป็นไปได้ว่าชั้นของออกไซด์บางๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอนตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.13 ยังคงมีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของกระแสแสงอยู่ ส่งผลทำให้แรงดัน ไบอัสที่ป้อนแก่ตัวตรวจวัดแสงไปตกคร่อมที่บริเวณชั้นของออกไซด์เหล่านั้น เช่นเดียวกันกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านการแอนนีสล ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานที่แรงดัน ไบอัสค่าต่ำๆ แต่จะสามารถใช้งานได้ดี และให้กระแสแสงที่สูงเมื่อให้แรงดัน ไบอัสมีค่าสูงกว่า 0.8 V

โดยสามารถอธิบายถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแอนนีสลต่อลักษณะของกระแสแสงได้ดังนี้ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของกระแสแสงเมื่อตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ได้รับการแอนนีสลนั้นมีผลมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นเกิดเนื่องจาก ITO มีคุณสมบัติเฉพาะที่ดีขึ้น เช่น มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านทางแสงสูงขึ้น โดยมีค่าเพิ่มจาก 85% เป็น 88% ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แสงสามารถส่องผ่าน

ลงมายังบริเวณซิลิคอนที่ทำหน้าที่เป็นบริเวณรับแสงได้มากยิ่งขึ้น จึงทำให้มีปริมาณกระแสแสงที่เพิ่มขึ้น หรืออาจเกิดเนื่องจากชั้นออกไซด์บางๆ ที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอนมีความสมบูรณ์มากขึ้น รวมทั้งสถานะพื้นผิวที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นมีปริมาณลดลงทำให้กับดักพาหะที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับออกไซด์ (SiO_x) ลดลงไปด้วย [29,54] ดังนั้นเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับการกระตุ้นจากแสงที่ตกกระทบ และเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จึงทำให้โฮลที่เกิดในบริเวณหลอดพาหะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วแคโทดเพื่อเกิดเป็นกระแสแสงได้ โดยมีปริมาณของโฮลที่ถูกกับดักโฮลที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับออกไซด์จับลดน้อยลง จึงส่งผลให้กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ได้รับการแอนนีสนั้นมีความเพิ่มขึ้นนั่นเอง

4.2.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อผลตอบสนองทางความถี่

ผลการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิแอนนีสต่อผลตอบสนองทางความถี่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีสดังแสดงในรูปที่ 4.48 นั้น ได้ทำการวัดโดยชุดทดลองดังรูปที่ 4.37 เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 4.1.5



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เพื่อหาความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนีส

เมื่อพิจารณาถึงความถี่คutoffของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนัลที่แรงดัน ไบอัส 5 V ความต้านทานโหลด 500 Ω พบว่าความถี่คutoffของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลังทำการแอนนัลมีค่าเท่ากับ 350 kHz และ 800 kHz ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถี่คutoffของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากได้รับการแอนนัลถึง 2.3 เท่าด้วยกัน ซึ่งผลการตอบสนองทางความถี่นี้มีความสอดคล้องกับผลของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันในหัวข้อ 4.2.3 ที่ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO หลังได้รับการแอนนัลมีค่าความจุไฟฟ้าที่ลดต่ำลง จึงส่งผลให้ค่าเวลาคงตัวซึ่งเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเร็วของตัวตรวจวัดแสงมีค่าลดลงตามไปด้วย ทำให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ได้รับการแอนนัลในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที มีผลตอบสนองทางความถี่ที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมนั่นเอง [29, 54]

จากการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิแอนนัลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO พบว่าการแอนนัลในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที ส่งผลให้รอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่าง ITO กับซิลิคอนชนิดเอ็นมีความสมบูรณ์มากขึ้น โดยสามารถทราบได้จากค่าความจุไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงชนิดเดียวกันนี้ ก่อนทำการแอนนัล รวมถึงกระแสแสง และผลตอบสนองทางความถี่หรือความถี่คutoffของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO หลังจากทำการแอนนัลมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งต่างก็มีผลมาจากการปรับปรุงคุณภาพของ ITO และ รอยสัมผัสของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ด้วยกระบวนการทางความร้อน หรือกระบวนการแอนนัลนั่นเอง

ตารางที่ 4.6 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ชนิดต่างๆ ที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว และได้รับแรงดัน ไบอัส 5 V

MSM Photodetectors	Capacitance (pF)	Dark current (nA)	Photocurrent [15,000 lux] (mA)	Frequency cut off (MHz)
ITO/n-Si/ITO (annealing)	34	240	0.42	0.80
ITO/n-Si/ITO (no annealing)	55	380	0.30	0.35
Al/n-Si/Al	26	290	0.05	1.00

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากความมุ่งหมายของงานวิจัยที่ต้องการเพิ่มปริมาณกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ให้มากยิ่งขึ้น ด้วยการเพิ่มพื้นที่ของบริเวณรับแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ให้มากขึ้น โดยนำวัสดุนำไฟฟ้าที่มีลักษณะโปร่งใส ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าลงบนซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดแสงความเข้มน้อยๆ ได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการเอพสปีดเทอริง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาตั้งแต่ประมาณ 200 – 1200 nm ก่อนที่จะนำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาถึงความหนาที่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM ซึ่งพบว่าสมบัติต่างๆของ ITO นั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์ม ITO เนื่องจาก ITO มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง คือ มีขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้น โดยสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO คือ ความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพคล่องของพาหะจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขณะที่สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงสมบัติทางแสงของ ITO พบว่า เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านทางแสงของ ITO ลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งสมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของ ITO มีค่าแปรผกผันกัน กล่าวคือเมื่อ ITO มีสมบัติทางไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้มีสมบัติทางแสงลดลง ดังนั้นจึงต้องทำการหาความเหมาะสมระหว่างสมบัติทั้งสองซึ่งพบว่าที่ความหนาประมาณ 500 nm เป็นความหนาที่ดีที่สุดเนื่องจากเป็นความหนาน้อยที่สุดที่ ITO มีทั้งสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ควบคู่กับสมบัติทางแสงที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ให้มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตเท และมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W), ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) หรือ จำนวนขั้วไฟฟ้า (N) โดยออกแบบให้ความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 2, 4 และ 8 ขั้ว จากนั้นเมื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเท โดยใช้การสกัดชั้นฟิล์ม ITO ด้วยเทคนิคลิฟออฟตามเงื่อนไขความหนาข้างต้นแล้ว จึงได้นำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนี้ไปทำการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง ซึ่งสามารถสรุปสาระสำคัญต่างๆ ได้ดังนี้

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดแสงความเข้มน้อยๆ ได้เป็นอย่างดีตามที่ได้คาดการณ์ไว้ เนื่องจากให้กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดที่ค่อนข้างต่ำ โดยที่กระแสแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสและความเข้มแสง อีกทั้งมีปริมาณกระแสแสงที่สูงโดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง 25,000 lux แรงดันไบอัส 10 V มากถึง 1,900 เท่า และมีกระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากับที่แรงดันไบอัส 10 V ถึง 10 เท่า โดยมีลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวทางแสงของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่ทำให้แสงสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าจนกระทั่งถึงบริเวณซิลิคอนชนิดเอ็นหรือบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระแสแสงส่วนใหญ่ได้ ทำให้แสงสามารถไปกระตุ้นอิเล็กตรอน และโฮลภายในบริเวณปลอดพาหะที่อยู่ใต้ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสแสงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าจะทำให้พื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มีลักษณะสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง โดยมีกระแสแสงเท่ากับ 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 mA, ประสิทธิภาพควอนตัมเท่ากับ 6.0, 6.3, 6.6 และ 6.8% และสภาพการตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.039, 0.042, 0.044 และ 0.046 A/W เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ ซึ่งทำให้ผลที่ได้แตกต่างไปจากตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสงโดยทั่วไป ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงจำนวน และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าให้ผลที่ใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง กล่าวคือ กระแสแสงและกระแสมืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นยังคงมีกระแสแสงที่แรงดันไบอัส 0 – 0.8 V ที่ค่อนข้างน้อย และน้อยกว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากัน จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงในงานวิจัยนี้อาจจะไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานที่แรงดันไบอัสค่าต่ำๆ หรือที่แรงดันไบอัสต่ำกว่า 0.8 V

ในส่วนของการเพิ่มขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้านั้นส่งผลให้การตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าลดต่ำลง โดยมีค่าเท่ากับ 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz และ 90 kHz เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ โดยที่ตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีการตอบสนองทางความถี่อยู่ในระดับที่ไม่สูงมากนักโดยมีความถี่คัทออฟที่น้อยกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากันอยู่ประมาณ 0.35 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยจากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

และความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40 \mu\text{m}$ นั้นมีการตอบสนองต่อแสงทั้งกระแสตรง และ กระแสสลับได้ดีที่สุด

จากลักษณะของความจุไฟฟ้า และกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ทั้งที่มีขนาดเท่ากันนั้น หรือแม้กระทั่งกระแสแสงในช่วง แรงดันต่ำ และผลตอบสนองทางความถี่ ที่มีค่าน้อยกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ทำให้ในงานวิจัยนี้พยายามที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของลักษณะสมบัติต่างๆข้างต้น ด้วยการนำตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ไปผ่านกระบวนการแอนนัลในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ กล่าวคือ มีกระแสแสงที่สูงขึ้น โดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง $25,000 \text{ lux}$ แรงดันไบอัส 10 V ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40 \mu\text{m}$ ความยาวขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว เท่ากับ 3,600 เท่า ซึ่งมากกว่าก่อนการแอนนัลถึง 2 เท่า เนื่องจากมีกระแสรั่วไหลลดลง และมีประสิทธิภาพการส่องผ่านแสงของ ITO ที่มากขึ้น โดยค่าความจุไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองทางความถี่ก็มีค่าลดลงด้วยเป็นผลให้มีค่าความถี่คัทออฟที่สูงขึ้น โดยมีค่าสูงขึ้นกว่าก่อนแอนนัลถึง 2.3 เท่าด้วยกัน โดยมีค่าเท่ากับ 800 kHz และทำให้มีการตอบสนองทางความถี่ที่ดีใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al มากขึ้น ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการแอนนัลทำให้รอยสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอนชนิดเอ็นมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นนั่นเอง

จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่ดี กล่าวคือ มีกระแสรั่วไหลต่ำ กระแสแสงที่สูง และมีการตอบสนองต่อความถี่ที่ดีนั้นจะต้องได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน หรือผ่านกระบวนการแอนนัลก่อน โดยในการพัฒนาให้ตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ที่ดียิ่งขึ้นในอนาคตต่อไปนั้น ควรทำการออกแบบให้ขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นแบบสั้น เพื่อให้มีปริมาณกระแสแสงที่สูงขึ้น และมีการตอบสนองทางความถี่ที่เพิ่มมากขึ้น หรืออาจทำการสร้างส่วนป้องกันการสะท้อน ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อป้องกันการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบลงที่บริเวณรับแสงของตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Seto M., Leduc V.-J., and Lammers A. M. F., "Al-n-Si Double Schottky Photodiodes for Optical Storage Systems", **27th European Solid-State Device Research Conference**, Stuttgart, September 1997.
- [2] 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.
- [3] Khunkhao S., Yasumura Y., Kitagawa K., Masui T., and Sato K., "On Laterally Spreading of Space-Charge-Region in Planar Metal-Semiconductor-Metal Structures", **Solid-State Electronics**, Vol. 47, No. 10, October 2003, pp. 1811-1816.
- [4] สราวุธ วิศวแสงสุข, "การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al", บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2545
- [5] ธเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สราวุธ วิศวแสงสุข "ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์", **วิศวกรรมลาดกระบัง**, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, พ.ศ. 2547, หน้า 14-19
- [6] ธเนศ โชะเหม, มานิตา ค้วงแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด ชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง", **วิศวกรรมลาดกระบัง**, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2548, หน้า 13-18
- [7] มานิตา ค้วงแสง, "การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิต", บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- [8] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, วรเทพ น้อยปรีชา และ สัญญา คุณขาว, "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบสลิตเดี่ยวที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก ชนิด Al/n-Si/Al", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), พ.ศ. 2550, หน้า 592-595
- [9] A. C. Davidson, F. W. Wise, R. C. Compton, D. T. Emerson, J. R. Shealy, M. Currie, and C.-C. Wang, "High-Performance MSM Photodetectors Using Cu Schottky Contacts", **IEEE Photonics Technology Letters**, Vol. 9, No. 5, May 1997, pp. 657-659
- [10] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนร์", บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547

- [11] J.D. Hwang, W.T. Chang, Y.H. Chen, C.Y. Kung, C.H. Hu, P.S. Chen, "Suppressing the dark current of metal–semiconductor–metal SiGe/Si heterojunction photo detector by using asymmetric structure", **Thin Solid Films**, Vol. 515, pp. 3837–3839
- [12] Ricardo L. Ohta, Carlos E. Viana, Nilton I. Morimoto, and Ben-Hur V. Borges, "Fabrication of Ti-Si-Ti Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors Using Low Temperature Rapid Thermal Annealing", **Journal Integrated Circuits and Systems**, Vol. 2, No. 2, 2007, pp 85-88
- [13] อรรถพร คล้ำชื่น "การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองรับพลาสติกโดยอาร์เอฟแมกเนตรอนสปีดเตอริงแบบควบคุมเวลาก๊าซ", คณะวิทยาศาสตร์ สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [14] K. Kuwano, S. Ashok, "Investigation of sputtered indium-tin oxide/silicon interfaces : ion damage, hydrogen passivation and low-temperature anneal", **Applied Surface Science**, Vol. 117, No. 118, 1997, pp. 629-633
- [15] จิรโชติ อินทร์เนตร, "การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีการระเหยสารแบบใช้ไอออนช่วย", คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระบุรี, พ.ศ. 2544
- [16] Daeil Kim, Steven Kim, "Effect of ion beam energy on the electrical, optical, and structural properties of indium tin oxide thin films prepared by direct metal ion beam deposition technique", **Thin Solid Films**, Vol. 408, pp. 218-222
- [17] G. Hodes, L. Thompson, J. DuBow, and K. Rajeshwar, "Heterojunction Silicon/Indium Tin Oxide Photoelectrodes: Development of Stable Systems in Aqueous Electrolytes and Their Applicability to Solar Energy Conversion and Storage", **J. Am. Chem. Soc.**, Vol. 105, No. 3, 1983, pp. 324-330
- [18] Jianming Zhou, "**Indium Tin Oxide (ITO) Deposition, Patterning and Schottky Contact Fabrication**" Department of Microelectronic Engineering College of Engineering Rochester Institute of Technology, December 2005
- [19] ไชยรัตน์ สุรินทร์, "การเตรียมกระจกสะท้อนคลื่นความร้อนชนิดอินเดียมออกไซด์เจือทินบุกออกไซด์โดยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน", คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระบุรี, พ.ศ. 2536
- [20] Soohwan Jang, F. Ren, N. Emanetoglu, H. Shen, W. Chang, and S. J. Pearton, "Design of Transparent Indium Tin Oxide-Based Interdigitated Fingers for Metal Semiconductor Metal Photodetector", **J. Electrochem. Soc.**, Volume 154, Issue 9, pp. H830-H832, 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] พรินทร์ พลายนเวช, “การเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเพื่อใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณบูรรี, พ.ศ. 2547
- [22] สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545
- [23] A. Müller, G. Konstantinidis, M. Dragoman, D. Neculoiu, A. Dinescu, M. Androulidaki, M. Kayambaki, A. Stavrinidis, D. Vasilache, C. Buiculescu, I. Petrini, C. Anton, D. Dascalu, A. Kostopoulos, “Ultraviolet MSM Photodetector Based on GaN Micromachining”, *Microelectronics Journal*, 2008
- [24] ธเนศ โชะหะเหม, “การออกแบบและการสร้างตัวตรวจจับแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา”, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- [25] สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- [26] I. Elfallal, R. D. Rilkington, A. E. Hill. “Formation of a statistical thermodynamic model for the electron concentration in heavily doped metal oxide semiconductor applied to the tin-doped indium oxide system”, *Thin solid films*, Vol.223, No.2, Feb. 1993, pp.303-310
- [27] Joseph Ederth, “Electrical Transport in Nanoparticle Thin Films of Gold and Indium Tin Oxide”, doctoral degree dissertation, Uppsala University, pp. 4 – 6, 2003.
- [28] L. Gupta, A. Mansingh and P. K. Srivastava, “Band Gap Narrowing and the Band Structure of Tin Doped Indium Oxide Films”, *Thin Solid Films*, 176, pp.33 – 44, 1989.
- [29] G. Hodes, L. Thompson, J. DuBow, and K. Rajeshwar, “Heterojunction Silicon/Indium Tin Oxide Photoelectrodes: Development of Stable Systems in Aqueous Electrolytes and Their Applicability to Solar Energy Conversion and Storage”, *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 105, No. 3, pp.325, 1983
- [30] Tiberiu Mizrah, “Operation of ITO/Si heterojunction Solar cell”, *Applied Physics Letters*, Vol. 29, No. 10, 1976 , pp.682 - 683
- [31] P. R. Berger, “MSM photodiodes”, *IEEE Potentials*, Vol. 15, No. 2, 1996, pp. 25-29.

- [32] I. Hamberg, C.G.Granqvist, "Optical Properties of Transparent and Heat-reflecting Indium Tin Oxide Films: The Role of Ionized Impurity Scattering", **Appl. Phys. Letters**, Vol. 44, No. 8, pp. 721-723, 1984
- [33] S. M.Sze., D.J. Coleman., Jr. and A.Loya. "Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structure" **Solid-State Electronics**, Vol. 14, 1971, pp. 1209-1218.
- [34] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กุลวรางค์ นุตะมาน และ อิศระ ศรีธนะชัย, "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโพร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EEC ON-31), พ.ศ. 2551, หน้า 1201-1204
- [35] Kwangju Institute of Science & Technology(K-JIST), "Design and fabrication of low noise InP/InGaAs PIN photodetector"
- [36] Chino K., "Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment", **Solid State Electronics**, Vol. 16, 1973, pp. 119-121
- [37] Biren Patel, Akil Sutton, Leslie George, Advisor: Dr. James Zhou, "Liftoff Process Using Positive Photoresist", March 6, 2003
- [38] P. Carlberg, M Graczyk, E.-L. Sarwe, I. Maximov, M. Beck, L. Montelius, "Lift-off process for nanoimprint lithography", **Microelectronic Engineering** 67–68 (2003), pp. 203–207
- [39] D. Monsma, I. Applebaum, "A reliable lift-off process", Marcuslab Harvard University, Aug 2002
- [40] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech, S. Ueamanapong, N. Atiwong sangthong, "Analysis the Suitable Indium Tin Oxide Thin Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication", **31st Electrical Engineering Conference (EECON-31)** , 2007, pp. 1212-1215
- [41] Dieter K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization 2nd", pp. 147-159, (1998)
- [42] H. Murrman and D. Widman, "Current crowding on metal contacts to planar devices", **IEEE Trans. Electron. Devices**, vol. ED-16, 1969, pp. 1022
- [43] G.K. Reeves, H.B. Harrison, "Obtaining the Specific Contact Resistance from Transmission Line Model Measurement", **IEEE Electron Device Letters**, Vol. EDL-3, No., 5, pp.111-113, 1982

- [44] Norman G. Einspruch, Simon S. Cohen, and Gennady Sh. Gidenblat, “VLSI Electronics **Microstructure Science 13**”, 97 – 111, 1986
- [45] I. Srihanachaia, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen, S. Supadech, “Preparation and Properties Indium Tin-Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photo detectors”, **International Conference on Smart Materials-Smart/Intelligent Materials and Nano Technology & 2nd International Workshop on Functional Materials and Nanomaterials (SmartMat-, 08 & IWO FM 2)**, 22-25, April 2008
- [46] J. C. C. Fan, F. J. Bachner and G. H. Foley, “Effect of Oxygen Partial Pressure During Deposition on Properties of r.f. Sputtered Sn-Doped In_2O_3 Films”, **Applied Physics Letters**, Vol.31, No.11, 1977, pp. 773 – 775
- [47] K. Sreenivas, T. Sundarsena Rao, A. Mansnigh and S. Chandra, “Preparation and Characterization of r.f. Sputtered Indium Tin Oxide Films”, **Journal of Applied Physics**, Vol.57, No.2, 1985, pp. 384 – 392
- [48] M. Buchanan, J. B. Webb and D. F. Williams, “The Influence of Target Oxidation and Growth Related Effects on the Electrical Properties of Reactively Sputtered Films of Tin-Doped Indium Oxide”, **Thin Solid Films**, Vol.80, 1981, pp. 373 – 382
- [49] J. Bregman, Y. Shapira and H. Aharoni, “Effects of Oxygen Partial Pressure During Deposition on the Properties of Ion-Beam-Sputtered Indium-Tin Oxide Thin Films”, **Journal of Applied Physics**, Vol.67, No.8, 1990, pp. 3750 – 3753
- [50] M. Higuchi, S. Uekusa, R. Nakano and K. Yokogawa, “Post-Deposition Annealing Influence on Sputtered Indium Tin Oxide Film Characteristics”, **Japanese Journal of Applied Physics**, Vol.33, 1994, pp. 302–306
- [51] H. Kim, C. M. Gilmore et al., “Electrical, optical, and structural properties of indium–tin–oxide thin films for organic light-emitting devices”, **Journal of Applied Physics**, Vol.86, No.11,1999
- [52] H kobayashi, T. Lshida , K. Nakamura, Y. Nakato, H.Tsubomura, “Properties of Indium Tin Oxide Films Prepared by the Electron Beam Evaporation Method in Relation to Characteristics of Indium Tin Oxide/Silicon Junction Solar Cells”, **Journal of Applied Physics**, Vol. 73, No.7344, 1993

- [53] T. Lshida, H kobayashi and Y. Nakato, "Structures and Properties of Electron-Beam-Evaporated Indium Tin Oxide Films as Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy and Work-Function Measurements", **Journal of Applied Physics**, Vol.72, No.5288, 1992
- [54] M. Seto, C. Rochefort, S. de Jager, Hendriks, R. F. M. Hooft, G. W. van der Mark, "Low-leakage-current metal-insulator-semiconductor-insulator-metal photodetectors on silicon with a SiO₂ barrier-enhancement layer", **Applied Physics Letters**, Vol. 75, Issue 13, id. 1976, 1999
- [55] M.-K. Lee, Y.-C Tseng, C.-H. Chu, "A high-gain Porous Silicon Metal-Semiconductor-Metal Photodetector through Rapid Thermal Oxidation and rapid Thermal Annealing", **Applied Physics A Materials Science & Processing**, Vol. 66, 1998, pp. 541-543
- [56] D. V. Sviridov, A. I. Kulak, "Photoelectrochemical oxidation of sulphur dioxide on a polyaniline-modified n-Si/ITO electrode", **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 39, 1995, pp. 49-53
- [57] วรเทพ น้อยปรีชา, "การออกแบบและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น", คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552
- [58] I. Srithanachai, S. Niemcharoen, S. Ueamanapong, K. Nutaman and A. Pankiew, "Effect of Sintering Treatment of Indium Tin Oxide Thin Films Prepared by R.F. Sputtering", The 7th International Conference on Materials Processing for Properties and Performance, 2008
- [59] Elias Aperathitis, Marcus Bender, Mircea Modreanu, "Properties of R.F-sputtered indium-tin-oxynitride thin films, **Applied Physics**, Vol 94, pp. 1258



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ลักษณะสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์

ตารางที่ ก.1 ลักษณะสมบัติโดยทั่วไปของอินเดียมทินออกไซด์

Physical and Optical Properties	
State of matter	Solid
Melting point	1800-2200 K (2800-3500 °F)
Density	7120-7160 kg/m ³ at 293 K
Color (in powder form)	Pale yellow to greenish yellow
Energy band gap	3.3-4.3 eV *
Reflection index	≈ 1.8-2.0 *

* ค่าต่างๆ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบ SnO₂

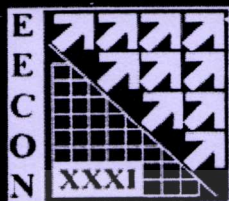
ภาคผนวก ข
ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ข.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ในวิทยานิพนธ์นี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ค่าคงที่ของพลังค์	h	6.626×10^{-34}	J-sec
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	c	3×10^8	m/sec
ค่าคงที่รีชาร์ดสัน	R	110	$\text{Acm}^{-3}\text{K}^{-2}$
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.602×10^{-19}	C
ค่าคงที่โบสตันน์	k	1.38×10^{-23}	J/K
เปอร์มิตทิวิตีในสุญญากาศ	ϵ_0	8.854×10^{-14}	F/cm

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31

31st Electrical Engineering Conference (EECON-31)



- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุม และการวัดคุม (CT)
- ไฟโตนิคส์ (PH)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

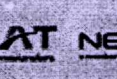
29 - 31 ตุลาคม 2551

ณ โรงแรมอีสต์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

ร่วมจัดโดย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
SRINAKHARINWIROT UNIVERSITYมหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

สนับสนุนโดย

Western
Digital

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโปร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

Electrical Properties of Indium Tin Oxide Thin Films

Using for Transparent Electrode in Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors

ศุภศักดิ์ เนียมเจริญ กุลวรารักษ์ นุตะมาน และ อิศระ ศรีธนะชัย

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 3 หมู่ 2 ถนนลาดกอง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร (66)-2739-0643 E-mail: knsurasak@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคโตรริง ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที ก่อนที่จะนำไปสร้างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al) ลงบนฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อนำไปวัดคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ และ TLM แล้วนำค่าที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคโตรริง กับ ค่าสภาพต้านทาน (ρ), ค่าความหนาแน่นของพาหะ (n), ค่าสภาพคล่องของพาหะ (μ) และค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัส (ρ_c) ระหว่างฟิล์มบาง ITO และขั้วโลหะอลูมิเนียม รวมถึงทำการเปรียบเทียบ และหาค่าเบื้องต้นมาตรฐานของค่าสภาพต้านทานที่ได้จากการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์, TLM และ เครื่องวัดความต้านทานแบบ 4 จุด

คำสำคัญ: ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์, ปรากฏการณ์ฮอลล์, TLM

Abstract

Indium-tin-oxide (ITO) thin films were prepared by R.F. sputtering at sputter times 15, 30, 45 and 60 minutes before the deposition of aluminium (Al) onto ITO thin films by thermal evaporator for measuring the basic electrical properties from Hall effect and transmission line method (TLM). From the results in Hall effect and TLM were investigated for the relations between the sputter times and resistivity, carrier concentration, Hall mobility, specific contact resistivity. Include compared and calculated the standard deviation of resistivity that can be found from Hall effect, TLM and 4 point probe.

Keywords: Indium-tin-oxide (ITO) thin films, Hall effect, TLM

1. บทนำ

ในปัจจุบันฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) กำลังเป็นที่สนใจของภาคอุตสาหกรรมจำพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวทางด้าน การนำไฟฟ้า และการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางชนิดนี้ โดยฟิล์มบาง ITO นั้นมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่เกิดจากการเจือดีบุก (Sn) ลงในสารประกอบอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) แล้วให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง $10^{-1}-10^{-4} \Omega\text{cm}$. อีกทั้ง ITO เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างโดยมีค่าอยู่ที่ 3.3-4.3 eV.[1] นั้นแสดงให้เห็นว่า ITO สามารถให้แสงส่องผ่านได้ตั้งแต่ช่วงของตามองเห็นไปจนถึงแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ ITO ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการนำไปเคลือบลงบนผิววัสดุที่ออกฤทธิ์สะท้อนแสง, จอแสดงผลแบบแอลซีดี รวมไปถึงการนำไปใช้เป็นขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง และขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของอุปกรณ์ชนิดต่างๆ อีกด้วย [2]

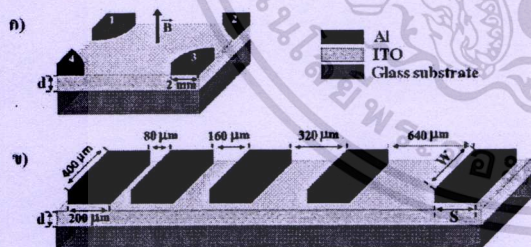
จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามพบว่าอุปกรณ์ตรวจวัดแสงประเภท โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) นั้น กระแสแสงที่เกิดขึ้นถูกจำกัดด้วยบริเวณพื้นที่รับแสง เนื่องจากพื้นที่ที่แสงสามารถตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ได้ มีเพียงบริเวณที่ไม่มีขั้วไฟฟ้าอยู่เท่านั้น เนื่องจากโลหะที่นำมาใช้สร้างขั้วไฟฟ้า ส่วนมากจะมีลักษณะที่บดบัง เช่น โมลิบดีนัม (Mo), อลูมิเนียม (Al) และ ทองแดง (Cu) เป็นต้น ดังนั้นการนำ ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ จึงน่าจะเป็นการเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ได้

ในบทความนี้จึงได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO ที่ทำการเตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคโตรริง และทดสอบคุณภาพของรอยสัมผัสโอมิกที่เกิดขึ้นเมื่อทำการสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมลงบนฟิล์มบาง ITO เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยใช้การวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) และ TLM (transmission line method) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในอนาคตต่อไป

2. การทดลอง

ทำการเตรียมชิ้นงานที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และ TLM โดยการสร้างลวดลายของบนกระจกฐานรองด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จากนั้นนำกระจกฐานรองที่สร้างลวดลายแล้วไปเตรียมฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอโรสเปคเตอริง โดยใช้กำลังในการสเปคเตอร์ 100 วัตต์ และความดันก๊าซอาร์กอน 1.5×10^{-2} torr ที่เวลาต่างๆ กัน คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที นำฟิล์มบางที่ได้ไปผ่านกระบวนการลิฟออฟ (lift off) เพื่อให้ปรากฏลวดลายตามที่ออกแบบไว้ โดยฟิล์มบางที่ผ่านกระบวนการข้างต้นจะถูกนำไปทดสอบอฮูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่ความดันประมาณ 10^{-6} torr อฮูมิเนียมจะมีความหนาประมาณ 3000 Å จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีอีกครั้งหนึ่ง เพื่อสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าโดยรูปแบบของลวดลายที่ใช้วัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นมีขนาดครึ่งหนึ่งของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2 mm. และรูปแบบของลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วย TLM นั้นมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 200x400 μm. มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (pad spacing) เท่ากับ 80, 160, 320 และ 640 μm. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1

ชิ้นงานที่เตรียมเพื่อใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ จะถูกนำไปวัดความหนาแน่นของพาหะ (n) และ สภาพคล่องของพาหะ (μ) โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจากขั้วที่ 1 ไปยังขั้วที่ 3 และ วัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้วที่ 2 กับ 4 ในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับชิ้นงาน และ ทำการวัดสภาพต้านทาน (ρ) โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจากขั้ว 1 ไปยังขั้ว 2, ขั้ว 2 ไปยังขั้ว 3 และ วัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้ว 4 กับ 3, ขั้ว 1 กับ 4 ตามลำดับ กรณีชิ้นงานที่ใช้วัด TLM จะถูกนำไปวัดสภาพต้านทาน เพื่อทำการเปรียบเทียบกับกรวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ และ การวัดด้วยเครื่องวัดความต้านทานแบบ 4 จุด นอกจากนี้ยังนำไปหาค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัส (ρ_c) โดยการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และ ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆ



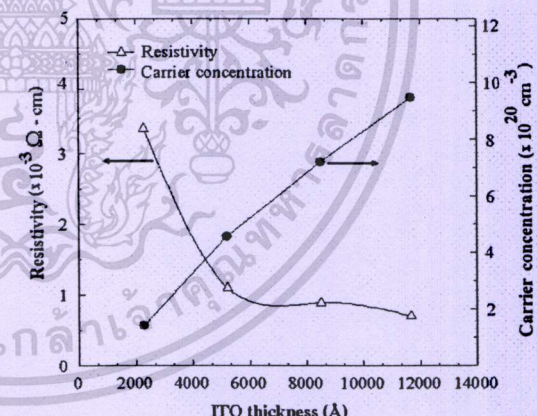
รูปที่ 1 โครงสร้างของ ITO ที่เคลือบลงบนฐานรองที่เป็นกระจก และมีอฮูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ก) รูปแบบที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ข) รูปแบบที่ใช้ในการวัด TLM

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

ข้อมูลที่ได้จากการนำชิ้นงานไปวัดปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถนำไปหาค่าความหนาแน่นของพาหะได้ โดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าสนามแม่เหล็กที่ให้แก่ชิ้นงาน กับผลคูณระหว่างความต้านทานที่วัดได้ และความหนาของฟิล์มบาง ITO ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอโรสเปคเตอริงที่เวลาต่างๆ กันคือ 15, 30, 45 และ 60 นาที จะมีความหนาของฟิล์ม (d) เท่ากับ 2296, 5218, 8500 และ 11665 Å ตามลำดับ [1] โดยความชันของกราฟจะเท่ากับความต้านทาน ฮอลล์ (R_H) นำค่าความต้านทานฮอลล์ที่ได้ไปแทนค่าในสมการ $n = 1/R_H \rho$ โดยที่ ρ มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{10} \text{ } ^\circ\text{C}$ ค่าความหนาแน่นของพาหะที่ได้ มีค่าเท่ากับ 1.42×10^{20} , 4.56×10^{20} , 7.17×10^{20} และ $9.46 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ที่เวลาในการสเปคเตอริง 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าสภาพต้านทาน ได้จากการคำนวณด้วยสมการแวนเดอร์พาว (Van der Pauw) ดังสมการที่ 1 [3]

$$\exp\left(\frac{-\pi R_A d}{\rho}\right) + \exp\left(\frac{-\pi R_B d}{\rho}\right) = 1 \tag{1}$$

โดยที่ $R_A = V_{A1} / I_{12}$ และ $R_B = V_{B1} / I_{23}$ ซึ่งค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมขึ้นที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที มีค่าเท่ากับ 3.36×10^{-3} , 1.09×10^{-3} , 8.8×10^{-4} และ $7 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ตามลำดับ จากค่าสภาพต้านทาน และ ค่าความต้านทานฮอลล์ที่ได้สามารถนำไปหาค่าสภาพคล่องของพาหะได้จากสมการ $\mu = R_H / \rho$ [3] ซึ่งฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมขึ้นที่เวลาต่างๆ นั้น มีค่าสภาพคล่องของพาหะใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ $11 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทาน, ความหนาแน่นของพาหะ และ ความหนาของฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอโรสเปคเตอริง

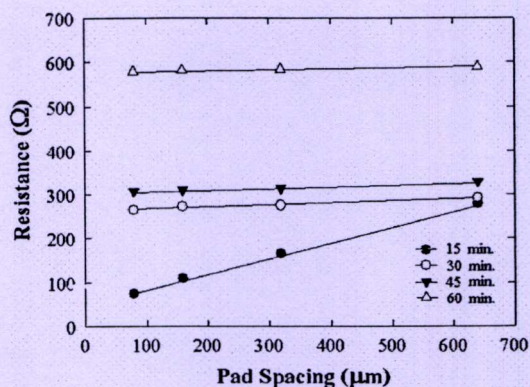
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทาน, ความหนาแน่นของพาหะ และความหนาของฟิล์มบาง ITO ในรูปที่ 2 จะเห็นว่า ความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของฟิล์มบาง ITO มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสภาพต้านทานจะมีค่าลดลง เมื่อความหนาของฟิล์มบาง ITO นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาถึงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง ITO ด้วยการใช้ XRD พบว่า เมื่อเตรียมฟิล์มบาง ITO ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้เนื้อฟิล์ม ITO มีความเป็นผลึกสูงขึ้น และมีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น [1] โดยเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นทำให้การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่บริเวณขอบของเกรนลดลงได้ จึงส่งผลให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น หรือมีค่าสภาพต้านทานลดลง ในขณะที่ความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น [2]

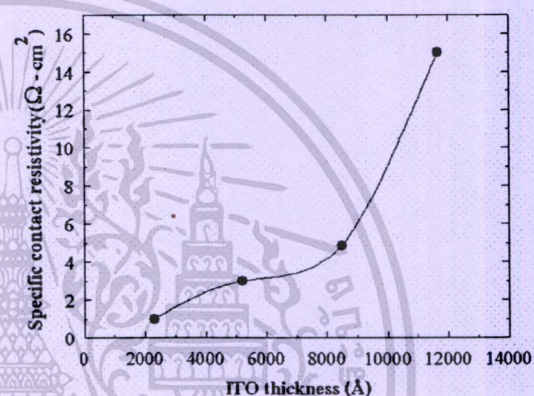
เมื่อนำค่าความต้านทานจากการวัด TLM มาพล็อตกราฟกับระยะห่างระหว่างขั้วออดมิเนียมที่สร้างลงบนฟิล์มบาง ITO และลากเส้นแนวโน้มแบบเชิงเส้น เพื่อหาค่าสภาพต้านทานจากความชันของกราฟ ดังรูปที่ 3 โดยที่ $slope = \rho d/W$ [3-4] ซึ่งสภาพต้านทานของฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมขึ้นที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที มีค่าเท่ากับ 3.45×10^3 , 1.0×10^3 , 9.7×10^4 และ $8 \times 10^4 \Omega \cdot cm$ ตามลำดับ ค่าสภาพต้านทานที่ได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์, TLM และ เครื่องวัดความต้านทานแบบ 4 จุด เมื่อนำมาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, σ) มีค่าเท่ากับ 15-22.7%, 0.5-5.8% และ 5.2-11.2% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์มีค่าสูงกว่ากรณีอื่น ๆ อาจมีผลมาจากสารละลายที่ใช้กัดชั้นออดมิเนียมส่งผลกระทบต่อรอยสัมผัสระหว่างออดมิเนียมกับฟิล์มบาง ITO ซึ่งขนาดขั้วไฟฟ้าของปรากฏการณ์ฮอลล์มีขนาดค่อนข้างใหญ่จึงเกิดผลกระทบที่ซับซ้อนกว่า TLM ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้าค่อนข้างเล็ก ซึ่งจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะเห็นได้ว่า TLM เป็นเทคนิคการวัดที่เหมาะสมต่อการวัดสภาพต้านทานมากที่สุด เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ ส่วนปรากฏการณ์ฮอลล์ถึงแม้จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงกว่ากรณีอื่น แต่จากค่าสภาพต้านทานเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับอีก 2 วิธี ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้อีก จึงทำให้ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นเทคนิคการวัดที่เหมาะสมในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ามากที่สุด

ตารางที่ 1 ค่าสภาพต้านทานเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์, TLM และ เครื่องวัดความต้านทานแบบ 4 จุด

	สภาพต้านทานเฉลี่ย ($\times 10^3 \Omega \cdot cm$)				% σ
	15 นาที	30 นาที	45 นาที	60 นาที	
Hall	3.36	1.23	0.88	0.72	15-22.7
TLM	3.45	1.00	0.97	0.80	0.5-5.8
4 point probe	4.53	1.03	0.99	0.70	5.2-11.2



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าออดมิเนียมของชิ้นงานที่ใช้ในการวัดด้วย TLM



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัส และความหนาของฟิล์มบาง ITO

สภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มบาง ITO ที่ทำการเตรียมขึ้นที่เวลาต่างๆ กับขั้วโลหะออดมิเนียม สามารถหาได้จากกราฟรูปที่ 3 โดยทำการลากเส้นกราฟตัดในแนวแกน x เพื่อหาค่าระยะการส่งผ่าน (transfer length, L_c) และ ทำการลากเส้นกราฟตัดในแนวแกน y เพื่อหาค่าความต้านทานที่รอยสัมผัส (R_c) โดยจะสามารถหาค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัส ได้จากการแทนค่าระยะการส่งผ่าน และ ค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสที่ได้จากกราฟรูปที่ 3 ลงในสมการ $\rho_c = R_c L_c W$ [3-4] ซึ่งที่ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง ITO ต่างๆ กันคือ 15, 30, 45 และ 60 นาที จะมีค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัสเท่ากับ 1.02, 2.98, 4.86 และ 15.2 $\Omega \cdot cm^2$ ตามลำดับ

จากราฟความต้านทานระหว่าง สภาพต้านทานเฉพาะของ รอยสัมผัส และความหนาของฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์ เอฟสปิดเตอร์ ในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอย สัมผัสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อฟิล์มบาง ITO มีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งการ เพิ่มขึ้นของค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัสนั้น มีความสัมพันธ์ เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของออกไซด์บางๆที่อยู่ระหว่างผิวหน้าของฟิล์ม บาง ITO กับชั้นของอูมิเนียมที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการระเหยด้วยความ ร้อนในระบบสุญญากาศ โดยออกไซด์เหล่านี้เกิดขึ้นจากออกซิเจน ส่วนเกินที่อยู่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง ITO จับตัวกับอูมิเนียมทำให้เกิด ปรากฏการณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน คือ อูมิเนียมออกไซด์ หรือ ออุมิ นานา (Al_2O_3) ขึ้น ซึ่งเมื่อทำการสปิดเตอร์ฟิล์มบาง ITO เป็นระยะเวลาสั้น ขึ้น เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีความหนาเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้มี ออกซิเจนส่วนเกินนี้เกิดขึ้นมากตามไปด้วย ทำให้มีการจับตัวของ ออกซิเจนกับอูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อความหนาของฟิล์มบาง ITO มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัสมีค่า สูงขึ้นเช่นกัน [5-6]

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO เพื่อ จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าไปเร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ด้วย ปรากฏการณ์ฮอลล์นั้น พบว่าฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธี อาร์เอฟสปิดเตอร์ที่เวลาต่างกัน หรือ มีความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นนั้น จะมีค่าสภาพต้านทานลดลง ในขณะที่มีค่าความหนาแน่นของพาหะ เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสภาพคล่องของพาหะที่เวลาต่างๆ ใกล้เคียงกัน เมื่อ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีการ TLM และ เปรียบเทียบผลการวัดค่าสภาพต้านทานที่ได้จากแต่ละวิธี คือ การวัดด้วย ปรากฏการณ์ฮอลล์, TLM และ เครื่องวัดความต้านทานแบบ 4 จุด พบว่า TLM เป็นเทคนิคการวัดที่เหมาะสมต่อการวัดค่าสภาพต้านทานมากที่สุด เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าที่สุด ส่วนการวัดด้วยปรากฏการณ์ ฮอลล์เป็นวิธีที่เหมาะสมในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจาก สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ครอบคลุมที่สุด และเมื่อศึกษา ถึงค่าสภาพต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอูมิเนียมกับ ฟิล์มบาง ITO พบว่าฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปิดเตอร์ ที่เวลาต่างกัน หรือ มีความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นนั้น จะมีค่าสภาพ ต้านทานเฉพาะของรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอูมิเนียมกับฟิล์มบาง ITO เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

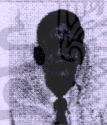
5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน และ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษา และ แนะนำสิ่งที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] I. Srihanachai, K. Nutaman, S. Niemchareon, A. Rerkratn, S. Supadech "Preparation and Indium Tin-oxide Thin Films by RF Sputtered for Photodetectors", SmartMat 08 & IWOFM2 Conference, Chiang Mai, Thailand, April 22-25, 2008
- [2] H. Kim, C. M. Gilmore et al., "Electrical, optical, and structural properties of indium-tin-oxide thin films for organic light-emitting devices", Journal of applied physics 86,11 (1999)
- [3] Wu-Yin Uen, Zhen-Yu Li et al "Low resistivity ohmic contact to n-type poly-GaN using a Ti/Au/Ni/Au multilayer metal system", Solid-State Electronics 51,460-465, 2007.
- [4] Dong-Jin Yun, Dong-Kyu Jeon, Shi-Woo Rhee, "Contact resistance between pentacene and indium-tin-oxide (ITO) electrode with surface treatment", Organic Electronic 8,690-694 (2007)
- [5] H Kobayashi, T. Lshida , K. Nakamura, Y. Nakato, H.Tsubomra "Properties of indium tin oxide films prepared by the electron beam evaporation method in relation to characteristics of indium tin oxide/silicon oxide/silicon junction solar cells", Journal of applied physics 73,7344 (1993)
- [6] T. Lshida, H Kobayashi and Y. Nakato, "Structures and properties of electron-beam-evaporated indium tin oxide films as studied by x-ray photoelectron spectroscopy and work-function measurements", Journal of applied physics 72, 5288 (1992)



นายสุรศักดิ์ นิยมเจริญ วท.บ. (ฟิสิกส์) ม.ช., วศ.ม. และ วศ.ด. (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า) ศจล. ปัจจุบันเป็นผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ศจล.



นางสาวกุลวรางค์ นุชมาน วทบ. (ฟิสิกส์ประยุกต์) ศจล ปัจจุบันเป็น นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโม โคร อิเล็กทรอนิกส์ ศจล.



นายอิสระ ศรีธนะชัช วทบ. (ฟิสิกส์ประยุกต์) ศจล ปัจจุบันเป็น นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโม โคร อิเล็กทรอนิกส์ ศจล.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกุลวรางค์ นุตะมาน
วัน เดือน ปีเกิด	24 สิงหาคม 2528
ที่อยู่	23 ถนนอิสรภาพ เขตคลองสาน แขวงสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพ 10600
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
สถาบันการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2549
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2) เครื่องมือวัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

- [1] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech, S. Ueamanapong, N. Atiwong sangthong, "Analysis the Suitable Indium Tin Oxide Thin Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication", **31st Electrical Engineering Conference (EECON-31)**, 2007, pp. 1212-1215
- [2] I. Srithanachaia, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen, S. Supadech, "Preparation and Properties Indium Tin-Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photo detectors", **International Conference on Smart Materials-Smart/Intelligent Materials and Nano Technology & 2nd International Workshop on Functional Materials and Nanomaterials (SmartMat-, 08 & IWO FM 2)**, 22-25, April 2008
- [3] I. Srithanachai, S. Niemcharoen, S. Ueamanapong, K. Nutaman and A. Pankiew, "Effect of Sintering Treatment of Indium Tin Oxide Thin Films Prepared by R.F. Sputtering", **The 7th International Conference on Materials Processing for Properties and Performance**, 2008