



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การออกแบบ และการสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO

แบบเชิงราบ

จัดทำโดย

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2554

b. 12598306
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

เลขที่..... 130289

เลขทะเบียน..... 2

วัน เดือน ปี..... 2 ส.ค. 2557

RCH

TK

8360

-L5

ศ 854 ก

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาการออกแบบ การสร้าง และวัดลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้า แบบอินเตอร์ดิจิทัล โดยมีความมุ่งหมายที่ต้องการเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ให้มากขึ้น โดยนำวัสดุหน้าไฟฟ้าโปร่งใส ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าลงบนซิลิคอนชนิดเอ็นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ให้ ITO มีความหนาที่เหมาะสม กล่าวคือ มีสภาพการนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่สูง โดยออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) มีค่าอยู่ระหว่าง 20-80 μm เมื่อศึกษาถึงลักษณะสมบัติการตอบสนองทางแสงกระแสตรง และกระแสสลับของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO พบว่าลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขณะที่การตอบสนองทางความถี่มีค่าลดลง เมื่อขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ITO เพิ่มขึ้น โดยจากผลการทดลองพบว่าที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm นั้นมีลักษณะสมบัติการตอบสนองทางแสง กระแสตรงและกระแสสลับเหมาะสมกันมากที่สุด โดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง 25,000 lux ภายได้แรงดันไบอัส 10 V เท่ากับ 1,900 เท่า ประสิทธิภาพควอนตัม 6.3% สภาพการตอบสนองทางแสง 0.042 A/W และการตอบสนองทางความถี่ 350 kHz

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

ABSTRACT

This report is a study on design, fabrication and characteristics of interdigitated ITO/n-Si/ITO photodetectors. The purpose of this report is to increase the photocurrent of MSM structure. By using transparent conducting oxide (ITO) as electrode, the transparent electrodes were deposited 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 report, ITO/n-Si/ITO photodetectors were designed to have electrode widths (W) and electrode spacings (S) between 20 and 80 μm . 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 were increased while the frequency response was decreased, where increasing the electrode width. The experimental results showed that the optimized between optical response direct current and alternating current of electrode width and electrode spacing was 40 μm . The photo/dark current, at illuminance 25,000 lux under 10 V bias voltage, quantum efficiency, responsivity and cutoff frequency were 1,900 times, 6.3%, 0.042 A/W and 350 kHz, respectively.

Experimental results indicated 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

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีงบประมาณ 2554

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ดังนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ศุภเดช รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง จากสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ดร. สัญญา คุณขาว จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีปทุม และ ดร. อัมพร โพธิ์โย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกุลวรางค์ นุตะมาน และคุณอิสระ ศรีธนะชัย นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ที่ช่วยจัดเตรียมชิ้นงาน และวัดผลการทดลอง ขอขอบคุณ คุณอวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ และคุณรัตนาวรรณ สันบุญตัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือวัดการทดลองบางส่วนด้วยเครื่องมือวัดของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

30 กันยายน พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย และวิธีดำเนินงาน.....	6
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.7 เอกสารอ้างอิง.....	7
บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแสง และตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM.....	10
2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง.....	10
2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง.....	11
2.1.3 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	12
2.1.4 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	14
2.2 อินเดียมทินออกไซด์.....	15
2.2.1 สมบัติทั่วไปของอินเดียมทินออกไซด์.....	15
2.2.2 สมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์.....	16
2.3 ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM.....	17
2.3.1 โครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2	โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	19
2.3.3	โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ.....	20
2.3.4	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....	21
2.3.5	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....	22
2.3.6	ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพตอบสนอง และผลตอบสนองต่อ สเปกตรัม.....	23
2.3.7	ความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์.....	25
2.4	เอกสารอ้างอิง.....	26
บทที่ 3	การออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO.....	28
3.1	การออกแบบลวดลาย และการสร้างกระจกต้นแบบ.....	28
3.1.1	ลวดลายที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO.....	29
3.1.1.1	ลวดลายการวัดระยะการส่งผ่าน หรือการวัดแบบ TLM.....	30
3.1.1.2	ลวดลายการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์.....	31
3.1.2	ลวดลายตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ ดิจิตัลชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al.....	32
3.2	กระบวนการสร้าง.....	35
3.3	เอกสารอ้างอิง.....	42
บทที่ 4	การทดลอง ผลการทดลอง.....	44
4.1	ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO	44
4.1.1	สภาพต้านทานของ ITO ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม.....	44
4.1.2	ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของ ITO เมื่อเปลี่ยน แปลงความหนาของฟิล์ม.....	47
4.2	การทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสชนิดคัลกี.....	53
4.3	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณ แสงกระแสตรง.....	58
4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้า เป็นแบบอินเทอร์ดิคิต.....	58
4.4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะ ไม่ได้รับแสง.....	59
4.4.1.2 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน.....	61
4.4.1.3 ผลของจำนวนขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน.....	64
4.4.1.4 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแส แสง-แรงดัน.....	65
4.4.1.5 ผลของความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ต่อลักษณะสมบัติกระแส แสง-แรงดัน.....	68
4.4.2 สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัด แสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิคิต.....	71
4.5 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณ แสงกระแสสลับ เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่.....	76
4.6 เอกสารอ้างอิง.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	84
ภาคผนวก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีสปีดเตอริงต่างๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 50
4.2	ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง.....52
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.....79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM แบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit) ซึ่งสร้างขั้วโลหะ 2 ข้างบนสารกึ่งตัวนำ และมีส่วนรับแสงอยู่ที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ (หรือขั้วไฟฟ้า) ทั้งสอง (Electrode Spacing: S) และ (ข) ภาพแสดงด้านบน และภาคตัดขวางของ โครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ.....	2
1.2 (ก) ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิคิเทท โดยใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโลหะที่บดแสง บริเวณรับแสงของ โครงสร้าง MSM แบบนี้จะอยู่ระหว่างขั้วของขั้วโลหะ Al (หรือระหว่างฟิงเกอร์) และ (ข) ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิคิเทท และบริเวณรับแสงของ โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบ โปร่งใสของ ITO.....	5
2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่าง ๆ	
(ก) ช่องแถบตรง และ (ข) ช่องแถบไม่ตรง.....	12
2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	13
2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	
(ก) ชนิดเอ็น และ (ข) ชนิดพี.....	13
2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ	
(ก) แบบโดยตรง และ (ข) แบบโดยอ้อม.....	14
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพาหะ และเปอร์เซ็นต์การเจือปนลง ในอินเดียมออกไซด์ จากการทดลอง [2.8-2.10].....	16
2.6 แผนภาพแถบพลังงานของอินเดียมออกไซด์ และ อินเดียมทินออกไซด์.....	17
2.7 (ก) ภาพภาคตัดขวางของ โครงสร้าง MSM และ (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน.....	18
2.8 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างเมื่อ ได้รับแรงดัน ไบอัส.....	20
2.9 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM เมื่อ ได้รับ ไบอัสและมีแสงตกกระทบ.....	20
2.10 ความจุไฟฟ้าของ โครงสร้าง MSM เมื่อ ได้รับแรงดัน ไบอัส.....	22
2.11 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM.....	22
2.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อ ได้รับแสงตกกระทบ.....	23
2.13 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของตัวตรวจวัดแสงตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอน.....	24
2.14 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	ลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง และลวดลายที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO (ก) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (ข) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้น ITO (ค) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม และ (ง) ภาพถ่ายกระจกต้นแบบ.....29
3.2	ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM (ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ (ข) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอน ไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการสร้าง ตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....30
3.3	ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....31
3.4	ลักษณะโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล และตัวแปร ที่ใช้ในการกำหนดขนาดต่าง ๆ.....32
3.5	ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มี ขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล (ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....33
3.6	ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้า แบบอินเตอร์ดิจิตัล (ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....34
3.7	ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) สภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ 35
3.8	แผนผังกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO..... 35
3.9	ความแตกต่างระหว่างกระบวนการกัดชั้นฟิล์มแบบลิฟออฟและการกัดชั้นฟิล์มทั่วไป.....40
3.10	ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่เคลือบบนฐานรองที่เป็นกระจกโดยมีความหนาประมาณ 500 nm.....40
3.11	ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่มีการกัดชั้นฟิล์มด้วยวิธีต่างกันที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) การกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ และ (ข) การกัดชั้นฟิล์มแบบทั่วไป..... 41
3.12	กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO.....41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	42
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิต	
(ก) ชินงานที่ผ่านการเชื่อมต่อดัวยกาวเงิน และ (ข) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	
4.1	45
ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนชั้นฟิล์ม ITO ที่ใช้ในการวัดสภาพด้านทาน	
(ก) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี TLM และตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	
4.2	46
ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาค่าสภาพด้านทานโดยเทคนิค TLM.....	
4.3	46
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพด้านทานกับความหนาของฟิล์ม ITO.....	
4.4	47
ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ (ก) แสดงขั้วโลหะอลูมิเนียมของชินงานที่ผ่านการเชื่อมต่อดัวยกาวเงิน และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัด.....	
4.5	49
ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1324})$ กับค่าสนามแม่เหล็กที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ.....	
4.6	49
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพด้านทาน, ความหนาแน่นของพาหะและ สภาพคล่องของพาหะ กับ ความหนาของฟิล์ม ITO.....	
4.7	51
แผนภาพแสดงสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ, สารกึ่งตัวนำ และฉนวน.....	
4.8	52
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความหนาฟิล์ม ITO.....	
4.9	53
แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัสซีออตต์กี.....	
4.10	53
ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอน ชนิดเอ็น.....	
4.11	54
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัส เพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ.....	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.12	ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง 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 โดย (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้า.....	56
4.13	ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และ จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว โดย (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้า.....	56
4.14	แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM.....	56
4.15	ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al.....	57
4.16	แถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อน โดย (ก) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็น และ (ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิดเอ็น.....	58
4.17	แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	59
4.18	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า.....	59
4.19	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง.....	61
4.20	แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในช่วง 5,000-25,000 lux.....	62
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงที่แรงดัน ไบอัส 5 V และ 10 V.....	63
4.23 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al.....	63
4.24 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ตั้งแต่ 2, 4 และ 8 ขั้ว.....	65
4.25 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า.....	65
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า.....	66
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัส และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ.....	67
4.28 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าต่างกัน ขณะให้แรงดันไบอัส โดย (ก) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า กว้าง และ (ข) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง และมีระยะห่างระหว่างขั้ว ไฟฟ้านั้น.....	68
4.29 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยน แปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20-80 μm	68
4.30 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เมื่อมีการเปลี่ยน แปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20 -80 μm	69
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความกว้างของขั้วไฟฟ้าเปรียบเทียบ ระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al.....	69
4.32 การสะท้อน และทะลุผ่านของแสงที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM (ก) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะ โปร่งใสชนิด ITO/n-Si/ITO และ (ข) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะทึบแสงชนิด Al/n-Si/Al.....	71
4.33 แผนภาพการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500 Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V.....	72
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่นใน ช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20-80 μm	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความกว้างของ ขั้วไฟฟ้า ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ.....	73
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัม กับความยาวคลื่นในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20-80 μm	74
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่น เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al.....	75
4.38 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500 Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V.....	76
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เพื่อหาความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ความกว้างของขั้วไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al.....	78
4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คutoffและความจุไฟฟ้า กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า...78	
4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความถี่คutoff กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า.....80	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	หมายถึง	กล่าวถึงครั้งแรกในหัวข้อ
A	พื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ	4.2
B	สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	4.1.2
c	ความเร็วแสงในสุญญากาศ	2.1.1
C_A	ความจุไฟฟ้าด้านแอนโนด	2.3.4
C_C	ความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด	2.3.4
C_T	ความจุไฟฟ้ารวม	2.3.4
d	ความหนาของฟิล์ม ITO	3.1.1.1
E	พลังงาน	2.1.3
E_A	ระดับผู้รับ	2.1.3
E_C	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า	2.1.3
E_D	ระดับผู้ให้	2.1.3
E_{FM}	ระดับเฟอร์มิของโลหะ	2.3.1
E_{FS}	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ	2.3.1
E_g	ช่องว่างพลังงาน	2.1.2
E_{photon}	พลังงานของโฟตอน	2.1.1
E_v	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์	2.1.3
f_c	ความถี่คัทออฟ	2.3.7
F	แรงกระทำ	4.1.2
h	ค่าคงที่ของพลังค์	2.1.1
I_0	กระแสรั่วไหล	4.4.11
I_c	กระแสคอนดักเตอร์	2.3
I_d	กระแสไดโอด	2.3
I_{dark}	กระแสมืด	2.3.2
I_{mea}	กระแสรวมที่วัดได้จากวงจรที่ใช้ในการทดลอง	4.4.1.2
I_{MS}	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ	2.3.2
I_{SM}	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ	2.3.2
I_p	กระแสแสง	2.3.6
I_{photo}	กระแสแสง	2.3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	หมายถึง	กล่าวถึงครั้งแรกในหัวข้อ
J	ความหนาแน่นกระแส	4.2
k	เลขคลื่น	2.1.2
k	ค่าคงที่โบสตันน์	4.2
L	ความยาวของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิคิต	3.1.2
L	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM	3.1.1.1
n	ความหนาแน่นของพาหะ	4.1.2
N	จำนวนขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิคิต	3.1.2
N_D	อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si	2.3.2
P_m	กำลังไฟฟ้าอินพุท	2.3.6
q	ประจุอิเล็กตรอน	2.1.1
R	ความต้านทาน	4.1.1
R	ค่าคงที่ของริชาร์ดสัน	4.2
R_c	ความต้านทานที่รอยต่อ	4.1.1
R_H	สัมประสิทธิ์ของฮอลล์	4.1.2
R_L	ความต้านทาน โหลด	4.4.2
R_s	ความต้านทานในเนื้อสาร	4.1.1
S	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิคิต	1.1
S	ความกว้างของขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM	3.1.1.1
v	ความเร็ว	4.1.2
V_A	แรงดันไบอัส	2.3.4
V_{bi}	แรงดันภายใน	2.3.2
V_{bi1}	แรงดันภายในด้านขั้วแคโทด	2.3.1
V_{bi2}	แรงดันภายในด้านขั้วแอนโนด	2.3.1
V_H	แรงดันฮอลล์	4.1.2
V_1	แรงดันไบอัสขั้วแคโทด	2.3.2
V_2	แรงดันไบอัสขั้วแอนโนด	2.3.2
t_f	ช่วงเวลาขาลง	2.3.7
t_r	ช่วงเวลาขาขึ้น	2.3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	หมายถึง	กล่าวถึงครั้งแรกในหัวข้อ
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์	4.2
W	ความกว้างของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล	3.1.2
W	ความยาวของขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM	3.1.1.1
W_A	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอโนด	2.3.2
W_C	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด	2.3.2
W_d	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	2.3.1
W_{d1}	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด	2.3.1
W_{d2}	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอโนด	2.3.1
α	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	2.3.6
\mathcal{H}	สภาพการตอบสนอง	2.3.6
\mathcal{E}_s	เปอร์เซ็นต์ของสารกึ่งตัวนำ	2.3.2
η	ประสิทธิภาพควอนตัม	2.3.6
η_{ext}	ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก	2.3.6
η_{int}	ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน	2.3.6
λ	ความยาวคลื่นแสง	2.1.1
λ_p	ความยาวคลื่นคัทออฟ หรือความยาวคลื่นมากที่สุด	4.4.2
ν	ความถี่ของแสง	2.1.1
ϕ_{bn}	ความสูงกำแพงศักย์ของอิลีกตรอน	2.3.1
μ	สภาพคล่องของพาหะ	4.1.2
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า	4.1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal structure) หรือโครงสร้าง MSM เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานทางด้านการตรวจวัดแสง ซึ่งมีข้อดีหลายประการ แต่ข้อดีที่สร้างได้ง่าย และมีความจุไฟฟ้าต่ำ ถือได้ว่าเป็นจุดเด่นที่สำคัญของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงชนิดอื่น ๆ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึง ความเป็นมาของการวิจัย วัตถุประสงค์ที่เป็นเป้าหมายหลักของรายงานการวิจัยเล่มนี้ หัวข้อถัดมาพูดถึงแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน และในหัวข้อสุดท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

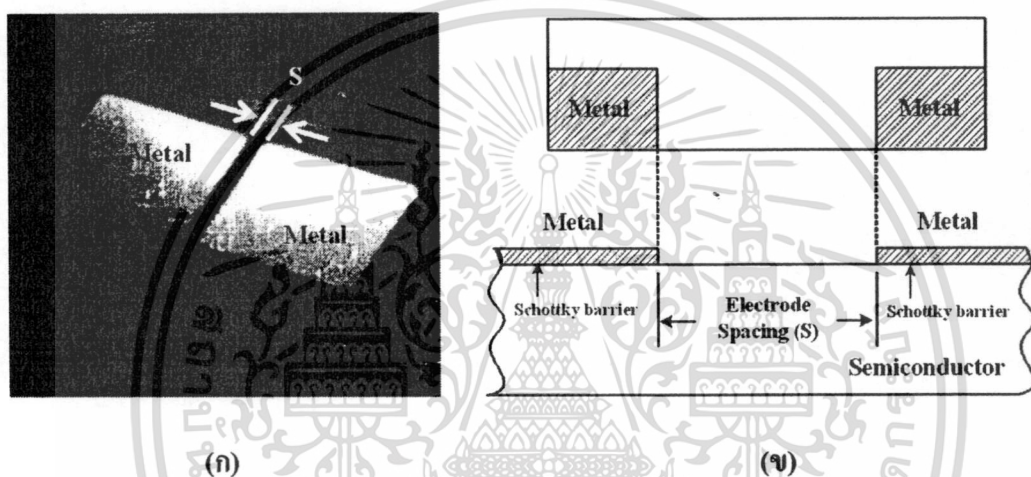
เมื่อกล่าวถึงสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor devices) ในปัจจุบัน พบว่าอุปกรณ์เหล่านั้นได้เข้าไปมีบทบาทอย่างมากในด้านการสื่อสาร การแพทย์ หรือแม้กระทั่งด้านการขนส่งก็ตาม เนื่องจากชิ้นส่วน หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้นเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเหล่านั้นจะถูกใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องมือ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าในงานด้านต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ยังสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ได้หลายประเภท แต่ในรายงานฉบับนี้จะให้ความสนใจเฉพาะสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ถูกนำไปใช้งานที่มีความเกี่ยวข้องกับแสง ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง (optical semiconductor devices)” เช่น ตัวตรวจวัดแสง (โฟโตดีเทคเตอร์) หรือโฟโตไดโอด สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยทำหน้าที่รับข้อมูลทางแสงที่เกิดจากการส่งผ่านข้อมูลทางแสงชนิดต่าง ๆ เช่น การส่งผ่านข้อมูลผ่านระบบเส้นใยแก้วนำแสง (fiber optic system) หรือการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบคอมแพคดิสก์ (compact disc: CD) ซึ่งใช้แสงในการอ่านและบันทึกข้อมูล เป็นต้น โดยตัวตรวจวัดแสงนั้นมีโครงสร้างหลายลักษณะด้วยกัน เช่น พี-เอ็น โฟโตไดโอด, พิน โฟโตไดโอด, อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด และตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เป็นต้น ตัวตรวจวัดแสงแต่ละชนิดนั้นมีจุดเด่นที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ถึงแม้ว่าสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง สามารถแบ่งชนิดของอุปกรณ์ได้อีกหลายชนิด เช่น ตัวตรวจวัดแสง เซลแสงอาทิตย์ และอุปกรณ์เปล่งแสง (light emitting diode : LED) เป็นต้น แต่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
รายงานฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษา ออกแบบ สร้าง และวัดสมบัติทางไฟฟ้าเฉพาะ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง ที่ทำหน้าที่เป็นตัวจับแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า “ตัวตรวจวัดแสง (photodetector)” โดยมีโครงสร้างเป็นแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM

ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM นี้จะประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ หรือรอยสัมผัสชนิดช็อคกี้จำนวนสองรอยสัมผัสเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีจุดเด่นหลายประการ อาทิ เช่น เป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างได้ง่าย และสามารถสร้างร่วมกับวงจรรวมได้ เนื่องจากมีโครงสร้างแบบเชิงราบ (planar structure) และกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ (metal oxide semiconductor field effect transistor : MOSFET) อีกทั้ง



รูปที่ 1.1 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM แบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit) ซึ่งสร้างขั้วโลหะ 2 ข้างบนสารกึ่งตัวนำ และมีส่วนรับแสงอยู่ที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ (หรือขั้วไฟฟ้า) ทั้งสอง (Electrode Spacing: S) และ (ข) ภาพแสดงด้านบน และภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ

ตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำจึงสามารถตอบสนองต่อสัญญาณความถี่สูงได้ดี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ถูกตีพิมพ์อย่างต่อเนื่อง สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ หรือในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงทั่วไป มักมีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบแถบตรง (direct band gap) เนื่องจากสามารถดูดกลืน หรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) เป็นต้น แต่เนื่องจากกระบวนการเตรียมแกลเลียมอาเซไนด์ให้อยู่ในรูปผลึกเชิงเดี่ยวสามารถควบคุมได้ยาก อีกทั้งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีพิษจึงต้องใช้เครื่องมือที่ออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งมียุ่งยากต่อการสร้างจำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์และความชำนาญในการเตรียมอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แกลเลียมอาเซไนด์นั้นมียาคสูง ต่าง

จากสารกึ่งตัวนำจำพวกซิลิคอนที่สามารถพบได้จำนวนมาก เนื่องจากซิลิคอนมีส่วนประกอบของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรายเป็นหลัก อีกทั้งกระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก และถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการสร้างวงจรรวม จึงทำให้ซิลิคอนมีราคาต่ำกว่าแกเลียมอาเซไนด์มาก และถึงแม้ว่าซิลิคอนจะเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบแถบไม่ตรง (indirect band gap) ซึ่งมีความสามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้น้อยกว่าแกเลียมอาเซไนด์ แต่ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงบางประเภทต้องการการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ซิลิคอนสามารถตอบสนองได้พอดี กล่าวคือ มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-1000 นาโนเมตร และไม่จำเป็นต้องใช้งานที่ความถี่สูงๆ เช่น งานระบบเก็บข้อมูล [1.1] หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อิริส (electronic iris) [1.2-1.4] เป็นต้น ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับตัวตรวจจับแสงชนิดต่างๆ จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจ ในรายงานการวิจัยเล่มนี้จึงเลือกที่จะศึกษาตัวตรวจจับแสงที่มีโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ใช้ซิลิคอนทำหน้าที่เป็นฐานรอง หรือส่วนดูดกลืนแสง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ให้ความสนใจขั้วโลหะ โปร่งใส (transparent electrode) แทนที่ขั้วโลหะแบบทึบแสง ดังที่เคยได้นำเสนอในวารสาร และประชุมวิชาการต่าง ๆ [1.2], [1.5-1.8] เนื่องจากขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสจะมีจุดเด่นในเรื่องการเพิ่มปริมาณกระแสแสง ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะออกแบบ และสร้างตัวตรวจจับแสง โครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO โดยที่ ITO คือ อินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide) และ n-Si คือ ซิลิคอน (silicon) ชนิดเอ็น ซึ่ง ITO จะมีคุณสมบัติคล้ายกับโลหะ และมีลักษณะโปร่งใสไม่ทึบแสงเหมือนกับโลหะทั่วไป เช่น อลูมิเนียม (Al), โมลิบดีนัม (Mo), ทองแดง (Cu), ทังสเตน (W) และทองคำ (Au) เป็นต้น จึงเรียกกันว่า “ตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส” (transparent conducting oxide: TCO) สำหรับตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส นั้นมีอยู่ด้วยกันหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น ชนิดสารประกอบ 2 ชนิด หรือ ชนิดสารประกอบ 3 ชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), แคดเมียมออกไซด์ (CdO), แกเลียมอินเดียมออกไซด์ (GaInO₃) และ อินเดียมทินออกไซด์ (In_xSn_{1-x}O₂: ITO) เป็นต้น แต่ตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสที่เป็นที่นิยมใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงไม่ว่าจะเป็นจอแสดงผลแบบแอลซีดี, การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ รวมไปถึงการสร้างขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ โดยส่วนใหญ่แล้วจะเลือกใช้อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ที่เกิดจากการเจือดีบุก (Sn) ลงในสารประกอบอินเดียมออกไซด์ (In₂O₃) เนื่องจาก ITO เป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสที่มีลักษณะเด่นหลายประการ [1.9-1.13] กล่าวคือ (1) ยึดติดแน่นกับแผ่นผลึกซิลิคอนได้ดี (2) มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการนำไฟฟ้า คือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 10^{-3} - 10^{-4} Ω-cm. (3) มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงสุดถึง 95% มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 3.3-4.3 eV. ทำให้แสงสามารถส่องผ่าน ITO ได้ดีในหลายความยาวคลื่น หรือตั้งแต่ความยาวคลื่นช่วงของตามองเห็น ไปจนถึงแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด (380-2000 นาโนเมตร) อีกทั้ง (4) มีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นความร้อนหรือมีคุณสมบัติเป็นชั้นป้องกันการสะท้อน โดยมีค่าดัชนีหักเหประมาณ 2.0 ที่สำคัญ (5) สามารถสร้างเป็นรอยสัมผัสขั้วต่อ

ก็ยี่ได้ติดตั้งกับซิลิคอนชนิดอื่น และซิลิคอนชนิดพี รวมถึง (6) คงทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี และ (7) สามารถเตรียมฟิล์ม ITO ได้หลากหลายวิธี [1.14] เช่น วิธีการสปัตเตอร์ (sputter), วิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (evaporation), วิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) และวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) เป็นต้น

ดังที่กล่าวไว้แล้วในข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสลงบนซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อสร้างรอยสัมผัสขั้วต่อที่ดี โดยเลือกเทคนิคการสร้าง ITO ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ที่ใช้ความถี่คลื่นวิทยุ (radio frequency Sputter หรือ RF Sputter) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์ม ITO ได้ดี และยังสามารถสร้างขึ้นได้ภายในห้องปฏิบัติการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสง MSM ให้มีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้น ด้วยการนำ ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสบนซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดเป็นตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สามารถนำไปตรวจวัดแสงที่มีความเข้มน้อย ๆ ได้

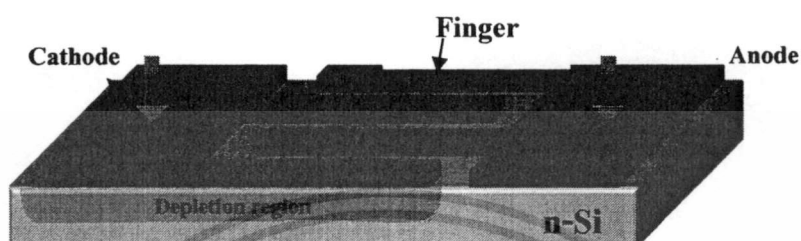
โดยมีวัตถุประสงค์ตามลำดับขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ และหาความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-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 ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทเทด (interdigitated) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งมีข้อได้เปรียบ คือ ให้กระแสแสงที่สูงในขณะที่ใช้พื้นที่บนสารกึ่งตัวนำน้อยกว่าขั้วไฟฟ้าแบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit) ที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.1
4. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO เมื่อได้รับแรงดันไบอัส หรือความเข้มแสงค่าต่างๆ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า และ จำนวนขั้วไฟฟ้า
5. เพื่อศึกษาผลของประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทเทด รวมถึงเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล รวมถึงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.2 (ก) ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิตัล โดยใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโลหะที่บดแสง บริเวณรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบนี้จะอยู่ระหว่างขั้วของขั้วโลหะ Al (หรือระหว่างฟิงเกอร์) และ (ข) ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิตัล และบริเวณรับแสงของโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสของ ITO

โดยทั่วไปตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM จะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจำนวนสองรอยสัมผัส (รอยสัมผัสแบบช็อดดักกี) และมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัส หรือ บริเวณที่เป็นซิลิคอนทำหน้าที่เป็นช่องรับสัญญาณทางแสงและเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า หรือกระแสแสงนั่นเอง นอกจากนี้ยังได้นำเอาโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิตัลมาประยุกต์ใช้เป็นลักษณะของขั้วไฟฟ้า เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสง จึงทำให้ได้รับกระแสแสงสูงขึ้นกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าแบบช่องรับแสงเดี่ยว แต่ใช้พื้นที่สร้างตัวตรวจวัดแสงน้อยกว่า ในกรณีตัวตรวจวัดแสง MSM ที่เลือกใช้โลหะแบบที่บดแสง พบว่าบริเวณรับแสงมีเพียงบริเวณที่เป็นซิลิคอน ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่านั้น เนื่องจากการเลือกใช้โลหะที่มีลักษณะที่บดแสง ทำให้แสงที่ตกกระทบบนขั้วไฟฟ้าเกิดการสะท้อนกลับ (shadowing effect) เมื่อโฟตอนหรือแสงไม่สามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะลงไปได้ การกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในซิลิคอนภายใต้ขั้วไฟฟ้าจึงไม่เกิดขึ้น [1.15]

เอกสารนี้จัดทำขึ้นในรูปที่ 1.2 (ก) ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่มีความโปร่งใส ดังในรูปที่ 1.2 (ข) จะเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากแสงที่ตกกระทบสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าลงไปในซิลิคอนหรือบริเวณปลอดพาหะภายใต้ขั้วไฟฟ้าได้ และไปกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ส่งผลให้เกิดกระแสแสงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งใส และมีโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิตเท ชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วโลหะทึบแสงทั่วไป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสามารถบรรลุตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ ในการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิตเท นั้น จึงได้มีการวางขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO เพื่อหาความหนาของฟิล์ม ITO ที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM จากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยคำนึงถึงสมบัติทางแสง คือ เปอร์เซ็นการส่องผ่านแสงควบคู่ไปด้วย จากนั้นทำการออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิตเท โดยการเคลือบฟิล์มโลหะโปร่งใส ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ชนิดเอ็น ระนาบ (100) สภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ ซึ่งบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกันนั้น ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิตเทที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า, ขนาดขั้วไฟฟ้า และจำนวนขั้วไฟฟ้าที่เท่ากันกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้า, กระแสแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพการตอบสนองทางแสง และผลตอบสนองทางความถี่ ระหว่างตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง และตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส โดยในการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะมีการศึกษาเงื่อนไขในการออกแบบโครงสร้างขั้วไฟฟ้าโปร่งใสแบบอินเตอร์ดิจิตเทพร้อมด้วย กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า, ขนาดขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20, 40, 60 และ 80 μm และจำนวนขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 2, 4 และ 8 ขั้ว เพื่อเป็นการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย และวิธีดำเนินงาน

ลำดับขั้นตอนของการวิจัย และการดำเนินงาน มีดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการการทำงานของตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM
2. ศึกษาเทคนิคการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ โปร่งใส ITO ด้วยการวัดระยะการส่งผ่าน (transmission line method; TLM) และปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาลักษณะ โครงสร้างแบบอินเตอร์ดิคิต และตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อ โครงสร้างนี้
4. ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มี ITO เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส
5. ออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้า แบบอินเตอร์ดิคิต เพื่อใช้ในการทดลอง
6. ศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพการตอบสนอง ทางแสง และผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO
7. นำตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ไปผ่านกระบวนการแอนนีก และ ศึกษาลักษณะ กระแส-แรงดัน, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพการตอบสนองทางแสง, ผลตอบสนองทางความถี่ และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความเข้าใจ และองค์ความรู้ในกระบวนการออกแบบ และการสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO
2. ความเข้าใจในเทคนิคการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO รวมถึงการวิเคราะห์ผลทางกายภาพของอุปกรณ์ด้วย
3. เป็นข้อมูลที่สำคัญส่วนหนึ่งในการเรียนการสอนวิชาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสง
4. ผลิตนุผลการทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในระดับปริญญาตรี และปริญญาโท
5. เป็นพื้นฐานเทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาประเทศต่อไปในอนาคต
6. มีผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับประเทศ

1.7 เอกสารอ้างอิง

- [1.1] M. Seto, V.-J. Leduc and A. M. F. Lammers, "Al-n-Si Double Schottky Photodiodes for Optical Storage System", 27th European Solid-State Device Research Conference, Stuttgart, 1997
- [1.2] S. Niemcharoen, K. Kobayashi, M. Kimura and K. Sato, "Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Conditions", Solid-State Electronics, Vol. 45, No. 10, 2001, pp. 1815-1819
- [1.3] T. Masui, S. Khunkhao, K. Kobayashi, S. Niemcharoen, S. Supadech and K. Sato, "Photo-sensing Properties of Interdigitated Metal-Semiconductor-Metal Structure with Undepleted Region", Solid-State Electronics, Vol. 47, No. 8, 2003, pp. 1385-1390

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [1.4] S. Khunkhao, Y. Yasumura, K. Kitagawa, T. Masui and K. Sato, "On Laterally Spreading of Space-Charge-Region in Planar Metal-Semiconductor-Metal Structures", *Solid-State Electronics*, Vol. 47, No. 10, 2003, pp. 1811-1816
- [1.5] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมา, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [1.6] ธเนศ โชะเหม, มานิตา ดั่งแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมาที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง", *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2548, หน้า 13-18
- [1.7] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สุรชาติ เมืองอำ, "อุปกรณ์ตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr แบบสลิคเดี่ยวในแนวระนาบ", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30*, พ.ศ. 2550, หน้า 560-563
- [1.8] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ กฤษณะ อังศเกษตร, "เทคนิคอาร์เอฟสปีดเดอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโฟโตไดโอด ชนิด Cr/p-Si/Cr ที่มีกระแสมืดต่ำ", *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2553, หน้า 31-36
- [1.9] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กุลวรางค์ นุตะมาน และ อิศระ ศรีธนะชัย, "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโปร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31)*, พ.ศ. 2551, หน้า 1201-1204
- [1.10] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วโลหะ โปร่งแสง", *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2554, หน้า 25-30
- [1.11] 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
- [1.12] Jianming Zhou, **Indium Tin Oxide (ITO) Deposition, Patterning and Schottky Contact Fabrication**, Department of Microelectronic Engineering, College of Engineering, Rochester Institute of Technology, 2005
- [1.13] อิศระ ศรีธนะชัย, คุณสมบัติตัวตรวจวัดแสงชนิดช็อคกี๋ โดยมีสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552

- [1.14] ไชยรัตน์ สุรินทร์, การเตรียมกระจกสะท้อนคลื่นความร้อนชนิดอินเดียมออกไซด์เจือดีบุก ออกไซด์ โดยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ. 2536
- [1.15] มานิตา ดั่งแสง, การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิตัล, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548



บทที่ 2

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแสง และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

วัสดุโปร่งใส (transparent materials) เป็นวัสดุที่มีจุดเด่นที่สามารถควบคุมปริมาณหรือความเข้มแสงให้ผ่านตัววัสดุได้ วัสดุโปร่งใสถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ดังเช่น ในอุตสาหกรรมกระจก เพื่อสร้างกระจกป้องกันความร้อน ทำให้ใช้พลังงานภายในอาคารที่อยู่อาศัย และสำนักงานทั่ว ๆ ไปน้อยลง การเคลือบวัสดุโปร่งใสในอุตสาหกรรมแว่นตา และการใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากการใช้งานของวัสดุโปร่งใสเกี่ยวข้องกับ การส่งผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นย่านต่าง ๆ ดังนั้นคุณสมบัติในการทะลุผ่านของแสงในวัสดุโปร่งใสจึงเป็นเรื่องสำคัญ ที่ต้องเรียนรู้ และทำความเข้าใจ เพื่อนำวัสดุเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้งานได้ อย่างถูกต้อง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแสง เมื่อแสงตกกระทบที่ผิวของสารกึ่งตัว จากนั้นกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของวัสดุโปร่งใส โดยเฉพาะวัสดุโปร่งใส ITO ซึ่งเป็นวัสดุที่สำคัญของงานวิจัยนี้ และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รวมทั้งสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงที่สำคัญ

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้ว เกิดกลไกภายในสารกึ่งตัวนำ 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) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสง ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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

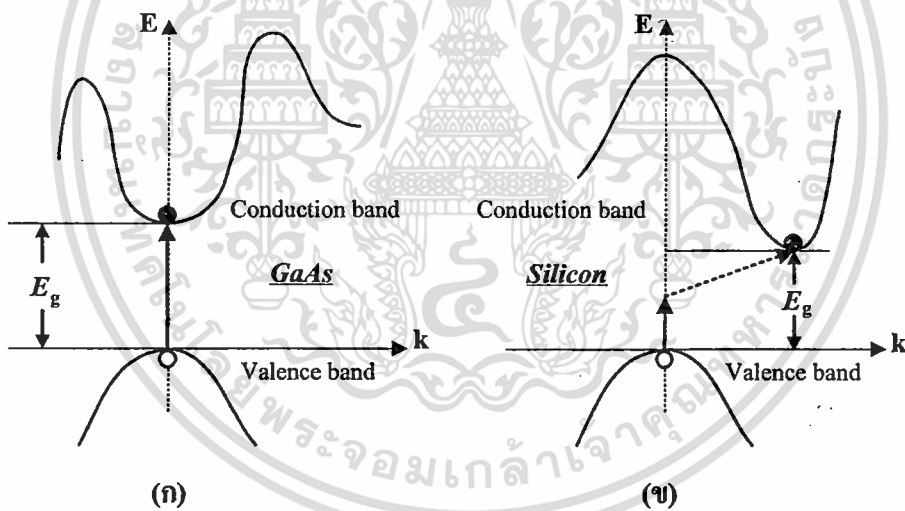
เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap ; E_g) ของสารกึ่งตัวนำ ($E_{\text{photon}} \geq E_g$ (semi)) สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_g$ (semi)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

2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง [2.1]

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 $k = 0$

แต่จากรูปที่ 2.1 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าจะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือ จุดทั้งสองนี้มีค่า k หรือค่าโมเมนตัมที่ต่างกัน ดังนั้นลักษณะสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะแตกต่างกันมาก เช่นลักษณะสมบัติทางด้านแสง (optical properties) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงโฟตอนจากแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา การคำนวณค่าไม่อาจรวมได้ทั้งหมด อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (E_g) และเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบนี้เกิดได้ง่ายทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดีจึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (optical devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง เลเซอร์ไดโอด และตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกกลับลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อนแล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด ในทำนองเดียวกันพลังงานโฟตอนจากแสงไม่สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรงถึงแม้ว่าพลังงานจากโฟตอนจะมีค่าเพียงพอ แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า จึงทำให้สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงมีการดูดกลืนหรือการคายพลังงานแสงไม่คืบนัก สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงนี้จึงไม่นิยมนำมาทำเป็นไดโอดเปล่งแสง หรือเลเซอร์ไดโอด แต่สำหรับตัวตรวจวัดแสงยังคงมีการใช้งานอยู่ โดยเฉพาะซิลิคอน



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่าง ๆ

(ก) ช่องแถบตรง และ (ข) ช่องแถบไม่ตรง

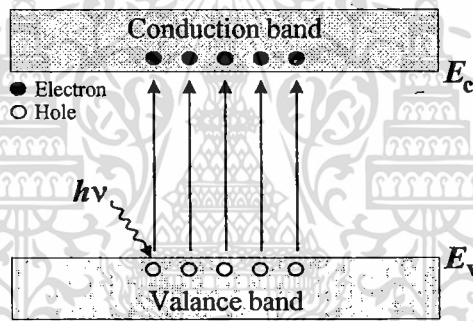
2.1.3 การดูดกลืนแสง และการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล [2.1]

กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดจากการให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ($> E_g$) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ($E = h\nu$) ที่มีพลังงานมากพอ ($> E_g$) ที่จะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อดูดกลืนแสงเข้าไปแล้วสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้น

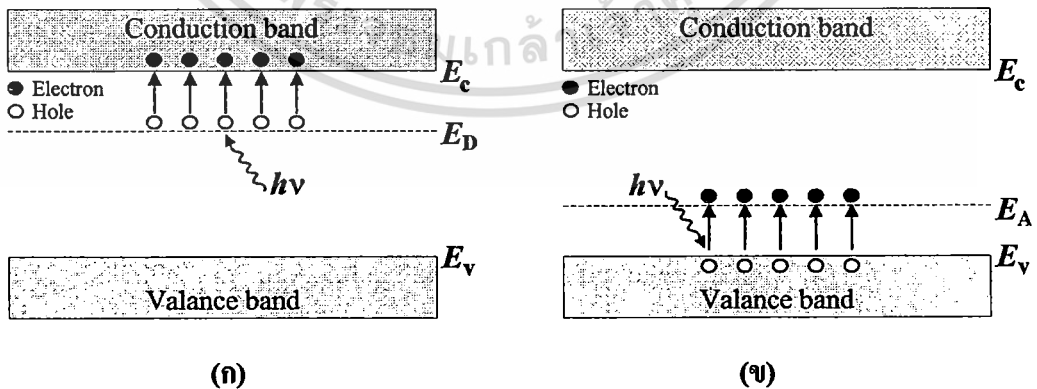
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แถบวาเลนซ์ซึ่งก็คือ โฮล ซึ่งการเกิดอิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส จะทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (donor level: E_D) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ในส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level: E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ



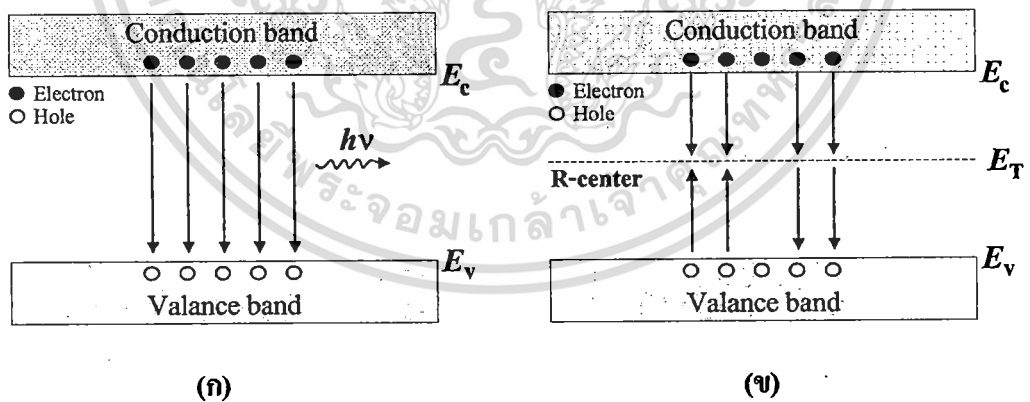
รูปที่ 2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ โดย (ก) สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น และ (ข) สารกึ่งตัวนำ ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะ คือ โฮล และอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลตทิซ (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (recombination and generation process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใด ๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบ โดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือโฟตอนได้ง่าย



รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบโดยตรง และ (ข) แบบโดยอ้อม

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมไม่ว่องไวใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือ หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

2.2 อินเดียมทินออกไซด์ [2.2-2.6]

ตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ (transparent conducting oxide: TCO) ชนิดอินเดียมทินออกไซด์ หรือ ITO ได้ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 เป็นต้นมา โดยมีจุดประสงค์ของการคิดค้นตัวนำชนิดนี้ขึ้น เพื่อต้องการได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่าฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ทั่วไป สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆ ไม่จะเป็นจอแสดงผลแบบแอลซีดี, การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแม้กระทั่งนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง 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

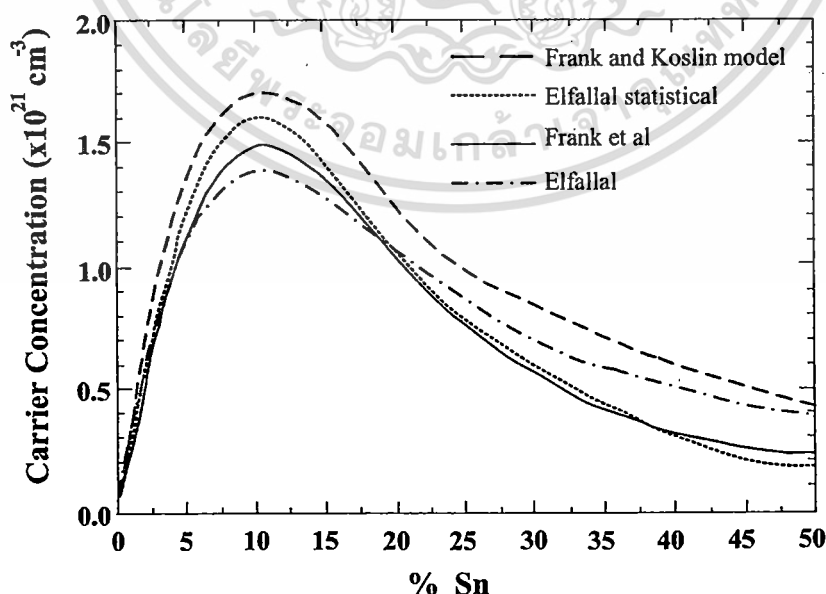
จากงานวิจัยของ I. Hamberg และ C.G. Granqvist ซึ่งได้ศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีต่าง ๆ กัน ด้วยเครื่อง Transmission electron microscope (TEM) พบว่าอินเดียมทินออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างในการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบ Body Centered Cubic (BCC) โดยมีค่าคงที่ผลึก (lattice constant) ประมาณ 10.118 Å และสีของฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีสีเหลืองสว่างโดยขึ้นกับระดับการเกิดซิคเซชัน [2.7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

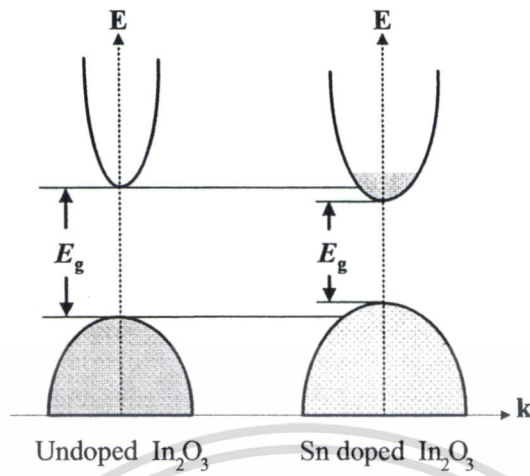
2.2.2 สมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์

อินเดียมทินออกไซด์จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานที่ค่อนข้างกว้าง มีค่าอยู่ที่ประมาณ 3.3-4.3 eV โดยมีคุณสมบัติทางแสงเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำทั่วไป กล่าวคือ มีการดูดกลืนพลังงานแสง และการส่องผ่านของแสงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 ข้างต้น โดยจากช่องว่างแถบพลังงานของอินเดียมทินออกไซด์ จึงทำให้อินเดียมทินออกไซด์สามารถให้แสงส่องผ่านได้ตั้งแต่ 380-2000 นาโนเมตร หรือตั้งแต่ความยาวคลื่นช่วงของตามองเห็นไปจนถึงแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด และมีค่าดัชนีหักเหแสงในช่วงการมองเห็นประมาณ 2

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์นั้นจะถูกกำหนดด้วยตัวแปรที่สำคัญ คือ ระดับความเข้มข้นในการเจือสาร ซึ่งเมื่อมีการเจือดีบุกลงในอินเดียมออกไซด์มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวค่าหนึ่ง แล้วความหนาแน่นของพาหะเหล่านั้นก็จะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความน่าจะเป็นในการเข้าครอบครองของประจุบวกที่อยู่ในตำแหน่งข้างเคียงของอะตอมดีบุก ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าในอินเดียมทินออกไซด์ลดลง โดยจากรูปที่ 2.5 นั้น อินเดียมทินออกไซด์มีค่าความหนาแน่นของพาหะสูงที่สุดอยู่ที่ระดับ 10^{21} ที่ความเข้มข้นของดีบุกประมาณ 10% โดยความหนาแน่นของพาหะนี้มีความสัมพันธ์ และเกี่ยวข้องกับสภาพนำไฟฟ้าของของอินเดียมทินออกไซด์ที่มีค่ามากกว่า $10^3 (\Omega\text{-cm})^{-1}$ โดยระดับความเข้มข้นในการเจือดีบุกลงในอินเดียมออกไซด์จะทำให้ระดับพลังงานของอินเดียมออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งทำให้อินเดียมทินออกไซด์มีคุณสมบัติที่คล้ายโลหะ กล่าวคือ มีพาหะนำไฟฟ้า หรืออิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบนำไฟฟ้าพร้อมที่จะนำไฟฟ้าได้เสมอ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพาหะ และ เปอร์เซ็นต์การเจือดีบุก ลงในอินเดียมออกไซด์ จากการทดลอง [2.8-2.10] งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบพลังงานของอินเดียมออกไซด์ และ อินเดียมทินออกไซด์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าในข้างต้นจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นงาน, ความดันก๊าซออกซิเจนในกระบวนการเคลือบ และ อัตราการเคลือบ เป็นต้น

2.3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ โครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ จะประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ หรือรอยสัมผัสชนิดเดียวกัน 2 รอยสัมผัสที่ต่อแบบหันหลังชนกัน (สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับรอยสัมผัสชนิดเดียวกัน สามารถอ่านได้จากเอกสารอ้างอิง [2.11, 2.12])

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนที่สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง และตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วสั้น ความหมายของโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง คือ โครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่เหมาะสมกับการใช้งานแล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังคงเหลือส่วนบริเวณที่เป็นกลาง ซึ่งเรียกว่า “บริเวณนิวทรัล (neutral region)” ระหว่างบริเวณปลอดพาหะกับรอยสัมผัสชนิดเดียวกันที่ได้รับการต่อแบบไบอัสตรง จากโครงสร้าง MSM รูปแบบนี้ พบว่ากระแสแสงจะเกิดขึ้นสองส่วนเป็นกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ (I_C) และ กระแสแสงโฟโตไดโอด (I_D) จึงทำให้เกิดจุดเด่น คือ สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน ในทางกลับกัน โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นจะหมายถึงโครงสร้าง MSM ที่ได้รับการไบอัสแล้วบริเวณปลอดพาหะจะครอบคลุมช่องรับแสงทั้งหมดไม่มีบริเวณนิวทรัล ซึ่งทำให้มีจุดเด่นตรงที่ได้รับกระแสแสงมากขึ้น

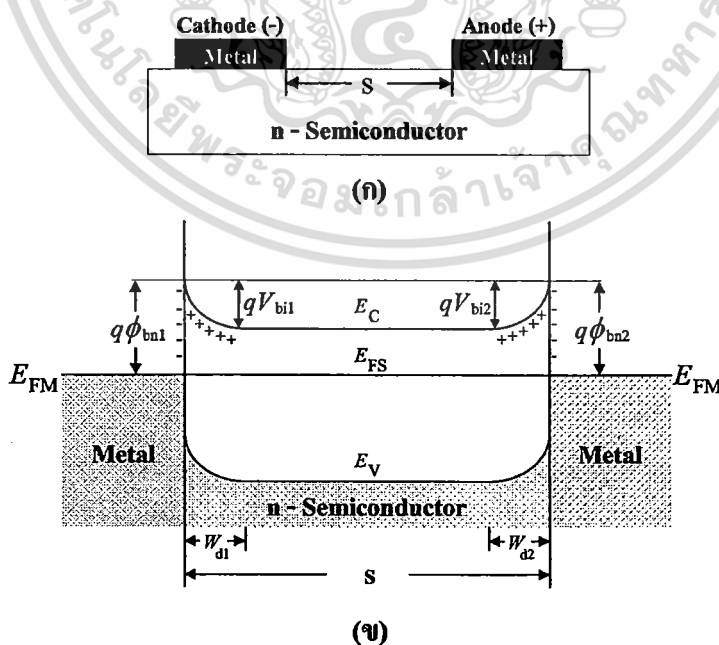
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่เดียวกันจะได้รับการตอบสนองทางความถี่เพิ่มขึ้น ด้วยแต่โครงสร้างแบบนี้จะไม่สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน

สำหรับในส่วนของทฤษฎีต่อจากนี้ไปจะขอกกล่าวถึงเฉพาะโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เท่านั้น

2.3.1 โครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ จำนวนสองรอยสัมผัสต่อกันแบบหันหลังชนกันมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (S) โดยสารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองทั้งสอง จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล ความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.7 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสช็อคกีซึ่งได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ช็อคกีของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร



รูปที่ 2.7 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM และ

(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในงานวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคกีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคกีย์ ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current: I_{dark}) ของโครงสร้าง MSM โดยกระแสมืดของโครงสร้าง MSM จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก [2.13]

ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้าง MSM กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง คือ มีผลรวมความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดและด้านแอโนดน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจึงทำให้เกิดมีบริเวณนิวทรัลขึ้น ซึ่งบริเวณนิวทรัลนี้จะพิจารณาว่ามีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด สามารถหาได้จากที่ 2.3

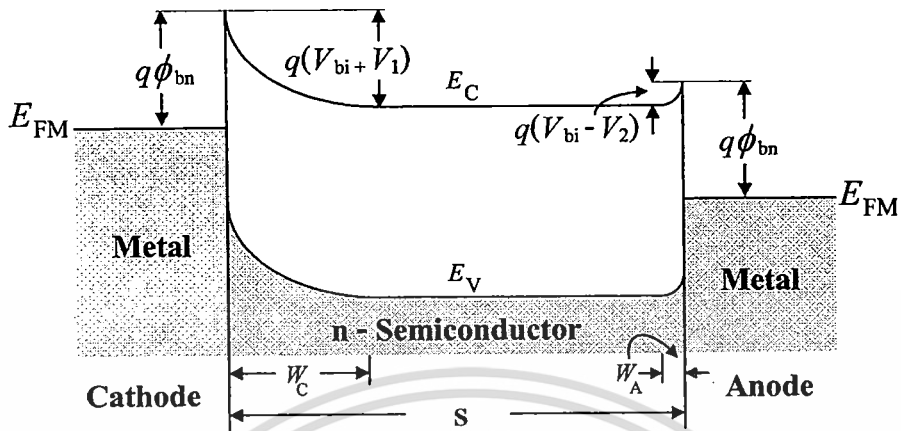
$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_1)}{qN_D}} \quad (2.3)$$

ส่วนที่รอยสัมผัสด้านแอโนด กำแพงศักย์ภายในมีค่าลดลงเป็น $V_{bi} - V_2$ และบริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด (W_A) มีขนาดแคบลง ดังสมการที่ 2.4

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_2)}{qN_D}} \quad (2.4)$$

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

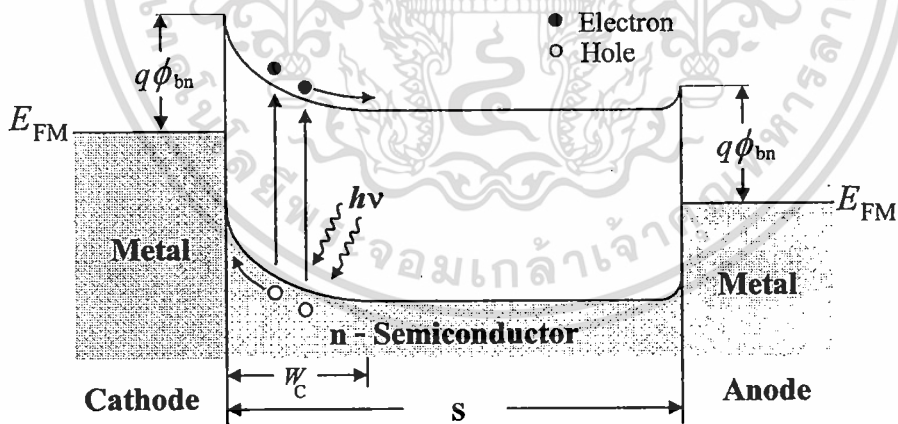
V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง เมื่อ ได้รับ แรงดัน ไบอัส

2.3.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ

โครงสร้าง MSM สามารถใช้ทำหน้าที่ตรวจจับแสงได้ดีเช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสงชนิดอื่น ๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกระแสแสงในตัวตรวจจับแสง โครงสร้าง MSM



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM เมื่อ ได้รับ ไบอัสและมีแสงตกกระทบ

เมื่อ โครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (s) แถบพลังงานของตัวตรวจจับแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัส แสดงดังรูปที่ 2.9 เมื่อแสงตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่าง

เอกซิทอนเป็นเอ็กซิตอนที่พลังงานสูงที่พบในสารกึ่งตัวนำ เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อคุณได้เห็นเว็บไซต์นี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า กระแสแสง (photocurrent: I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะ และถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [2.14, 2.15]

2.3.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยความจุไฟฟ้ารวม (C_T) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสองประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด (C_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านแอนโนด (C_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.5, 2.6 และ 2.7

$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \quad (2.5)$$

โดยที่

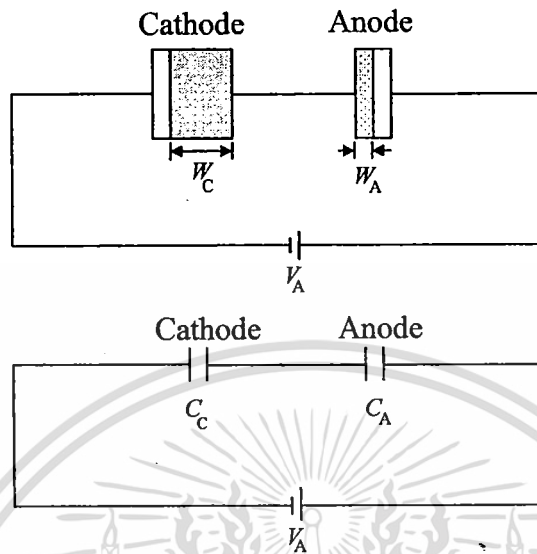
$$C_C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.6)$$

$$C_A = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.7)$$

โดย ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

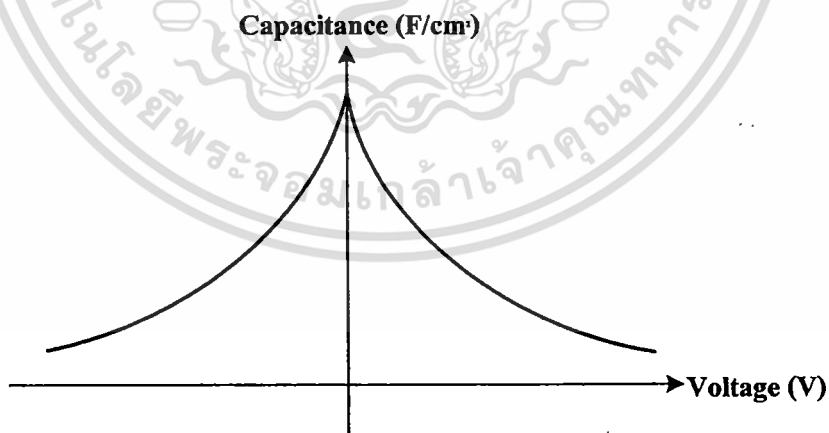
N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

- V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
- V_A คือ แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสด้านแคโทด



รูปที่ 2.10 ความจุไฟฟ้าของ โครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

จากรูปที่ 2.11 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส โดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ

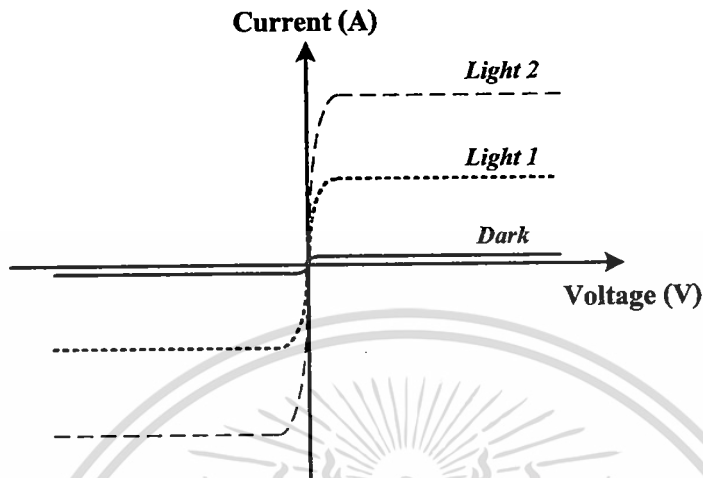


รูปที่ 2.11 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

2.3.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ในรูปที่ 2.12 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับไบอัสตรงและด้านที่รับไบอัสย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบบนมีความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 2.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบน

2.3.6 ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพตอบสนอง และผลตอบสนองต่อสเปกตรัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency: η) หมายถึง จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสออกสู่วงจรรภายนอก แบ่งได้เป็น ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency: η_{int}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบน ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency: η_{ext}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบน ดังนั้นจึงต้องรวมผลของการสะท้อน และค่าคงที่การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ (absorption coefficient: α) ด้วย โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพควอนตัมจะหมายถึงประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.8 คือ

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / h\nu} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{inc}} \quad (2.8)$$

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

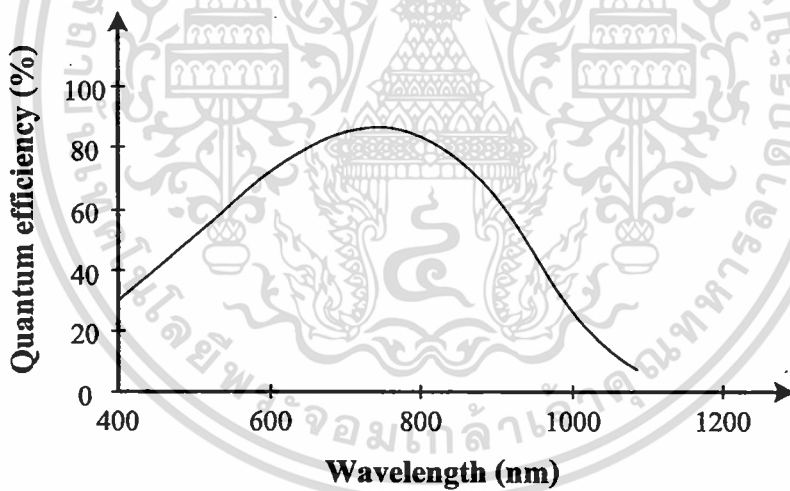
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในโดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 90% แต่ถ้าไม่มีการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนบนผิวของตัวตรวจวัดแสง แสงที่ตกกระทบชั้นสารกึ่งตัวนำจะสะท้อนออกไปประมาณ 30% เนื่องจากดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำและอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกจะถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 70% [2.16]

สภาพตอบสนอง (responsivity; \mathcal{R}) หมายถึง กระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสง ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม สามารถหาได้จากสมการที่ 2.9 คือ

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 พบว่า ค่าสภาพตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของตัวตรวจวัดแสงตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอน

ผลตอบสนองของสเปกตรัมของแสง หมายถึง คุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืนโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ โฟตอนที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นมากขึ้นและมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้ไอเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้า เมื่อความยาวคลื่นลดลงค่าคงที่ในการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการดูดกลืน โฟตอนเฉพาะบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์เอกรวมตัวที่ผิวทำให้ผลตอบสนองตัวตรวจวัดแสงลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ผลตอบสนองต่อการคำนวณรวมตัวที่ผิวทำให้ผลตอบสนองตัวตรวจวัดแสงลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ผลตอบสนองต่อ

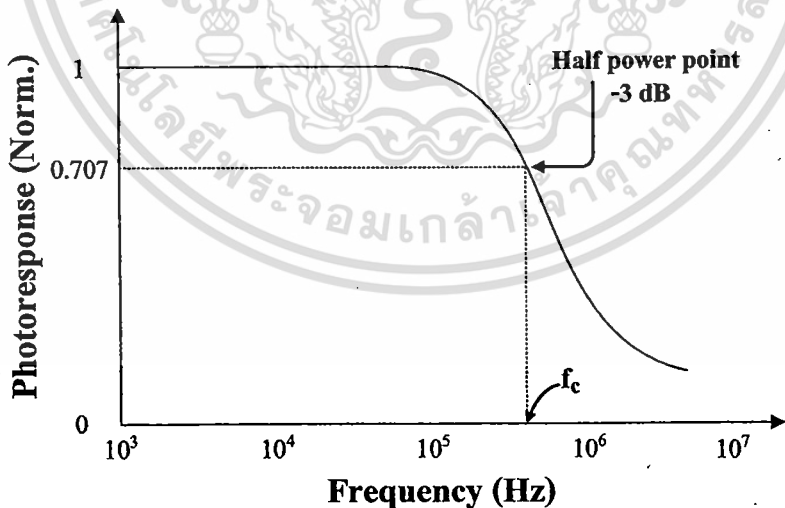
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมของแสงในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน สำหรับตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอนจะมีผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงดังรูปที่ 2.13

จากรูปที่ 2.13 จะพบว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น โดยมีผลตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared) และการตอบสนองจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นความยาวคลื่นสูงสุดที่สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถตอบสนองได้ คือ 1110 nm

2.3.7 ความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอกตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาที่ขาขึ้น (t_r) และช่วงเวลาที่ขาลง (t_f) โดยช่วงเวลาที่ขาขึ้นและช่วงเวลาที่ขาลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นกับแพ็คเกจต่าง ๆ คือ เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ, เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ และค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงกับค่าโหลด ความต้านทานภายนอก ดังนั้นถ้าต้องการให้ตัวตรวจวัดแสงตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูง ๆ จะต้องพิจารณาถึงแพ็คเกจทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มีพื้นที่ขนาดเล็กๆ เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

แบนด์วิดท์ (bandwidth) คือ อัตราความเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณความถี่ค่าต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น

เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางประการที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประการของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.14 ในทางปฏิบัติการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency: f_c) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (half power point) หรือมีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงมีความหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่ตัวตรวจวัดแสงสามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานตัวตรวจวัดแสงมีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ

2.4 เอกสารอ้างอิง

- [2.1] สมเกียรติ สุภเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544
- [2.2] อรรถพร คำคำชื่น, **การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองรับพลาสติกโดยอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบควบคุมเวลาก๊าซ**, คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [2.3] จิรโชติ อินทร์เนตร, **การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีการระเหยสารแบบใช้ไอออนช่วย**, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2544
- [2.4] 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
- [2.5] ไชยรัตน์ สุรินทร์, **การเตรียมกระจกสะท้อนคลื่นความร้อนอินเดียมออกไซด์เจือทินออกไซด์โดยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน**, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2536
- [2.6] พิรินทร พลายเวช, **การเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเพื่อใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์**, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [2.7] 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, 1984, pp. 721-723
- [2.8] 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

- [2.9] Joseph Ederth, **Electrical Transport in Nanoparticle Thin Films of Gold and Indium Tin Oxide**, doctoral degree dissertation, Uppsala University, 2003, pp. 4-6
- [2.10] 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, 1989, pp. 33-44
- [2.11] สมเกียรติ ศุกเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545
- [2.12] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาเนอร์**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [2.13] 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
- [2.14] S. Khunkhao, Y. Yasumura, K. Kitagawa, T. Masui and K. Sato, "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
- [2.15] S. Niemcharoen, K. Kobayashi, M. Kimura and K. Sato, "Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Condition", *Solid-State Electronics*, Vol. 45, No. 10, October 2001, pp. 1815-1819
- [2.16] P. R. Berger, "MSM photodiodes", *IEEE Potentials*, Vol. 15, No. 2, 1996, pp. 25-29

Letter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO

เพื่อให้สอดคล้องกับการดำเนินงานที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ดังนั้นในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงการออกแบบ และการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่ใช้ ITO เป็นขั้วโลหะโปร่งแสง โดยทำการออกแบบลวดลายทางเรขาคณิตของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ให้มีลวดลายเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบลวดลาย และการสร้างกระจกต้นแบบ

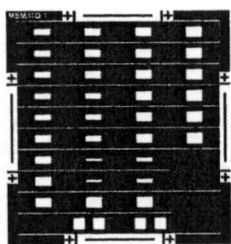
การออกแบบลวดลาย ถือเป็นขั้นตอนแรกสำหรับกระบวนการสร้างทั้งหมด เนื่องจากในการออกแบบนั้น จะต้องเริ่มจากการศึกษาถึงข้อจำกัดต่างๆ ของลวดลายที่จะทำการออกแบบ รวมถึงข้อจำกัดในกระบวนการสร้างที่แตกต่างกันของแต่ละห้องปฏิบัติการ โดยหลังจากการออกแบบลวดลายแล้ว ยังจะต้องทำการจัดวางลวดลายให้อยู่ในตำแหน่งที่มีความเหมาะสมสำหรับในกระบวนการสร้าง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

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

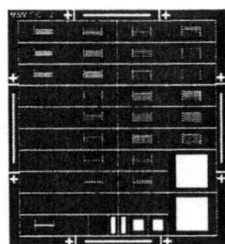
- 1 กระจกต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (oxide mask) ใช้ในการลอกชั้นออกไซด์เพื่อให้เกิดพื้นที่รับแสง และให้มีบริเวณที่ยังคงเป็นชั้นป้องกันไม่ให้เกิดรอยสัมผัสที่ไม่ต้องการ
- 2 กระจกต้นแบบสำหรับชั้น ITO (contact mask) ใช้เป็นต้นแบบในการสร้างลวดลายชั้น ITO เพื่อให้เกิดรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ
- 3 กระจกต้นแบบสำหรับใช้สร้างลวดลายของชั้นอลูมิเนียม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

โดยมีลวดลายที่ได้ทำการออกแบบไว้ เพื่อใช้ในการทดลองต่างๆ ดังนี้

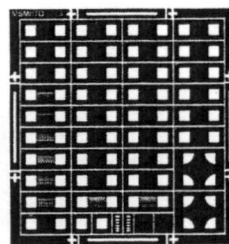
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



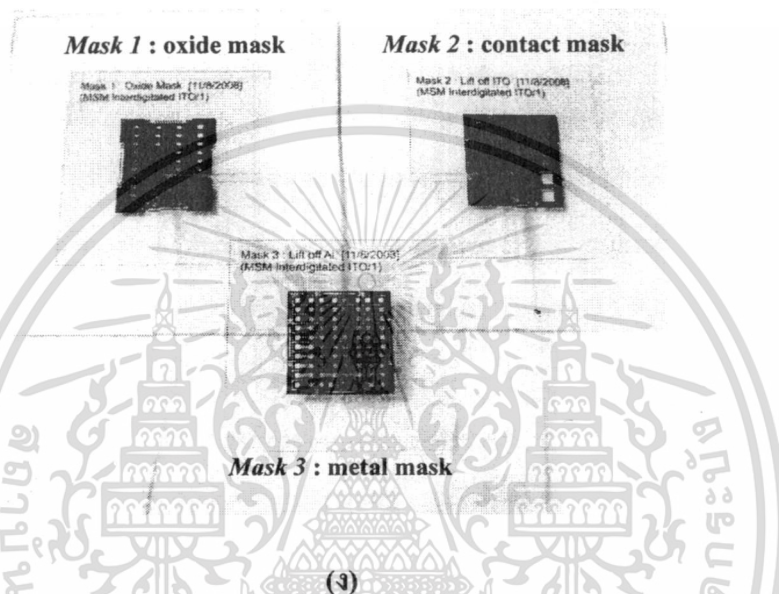
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.1 สวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง และสวดลายที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO

- (ก) สวดลายต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (ข) สวดลายต้นแบบสำหรับชั้น ITO
(ค) สวดลายต้นแบบสำหรับชั้นออกซิเดียม และ (ง) ภาพถ่ายกระจกต้นแบบ

3.1.1 สวดลายที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO

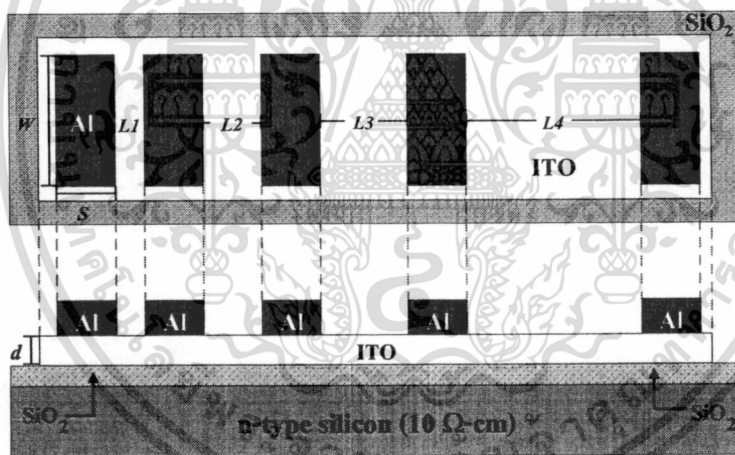
จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาถึงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคเตอริง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำไปพิจารณาเลือกความหนาของฟิล์ม ITO ที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส และพิจารณาเลือกอุณหภูมิในการปรับปรุงคุณภาพของ ITO และ รอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็น โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษานั้นประกอบไปด้วยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพคล่องของพาหะ ซึ่งลักษณะสมบัติของ ITO ต่างๆ เหล่านี้สามารถหาได้ด้วยการวัดจากระยะการส่งผ่าน (transmission line method; TLM) และ การวัดโดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) โดยรูปแบบของสวดลายที่ใช้ในการวัด และสิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบสำหรับเทคนิคการวัดด้วยวิธี TLM และ ปรากฏการณ์ของฮอลล์มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

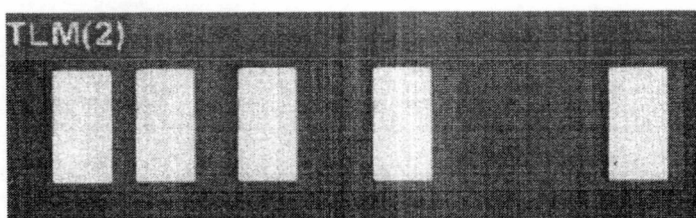
3.1.1.1 ลวดลายการวัดระยะการส่งผ่าน หรือ การวัดแบบ TLM

เทคนิคการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM เป็นเทคนิคการวัดเพื่อหาค่าความต้านทานภายในเนื้อสาร โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก เพื่อหาค่าความต้านทานในเนื้อสารที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าจากโลหะอลูมิเนียมเพื่อให้เกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกกับ ITO [3.1] โดยมีรูปแบบของลวดลาย และ โครงสร้างของชิ้นงานที่ใช้ในการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยจากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า 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

เทคนิคการวัดแบบ TLM ถือเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ความแม่นยำที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากการกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และขนาดของขั้วไฟฟ้าที่แน่นอน อีกทั้งมีขนาดของลวดลายที่ค่อนข้างเล็ก



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM

(ก) ลักษณะ โครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ

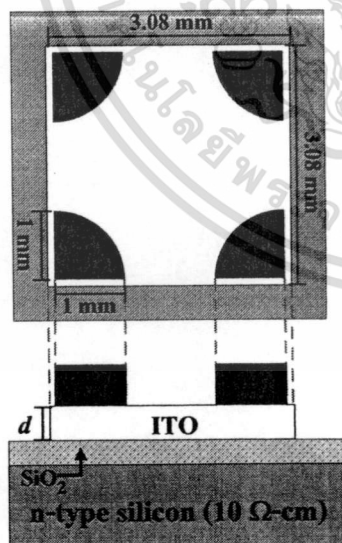
(ข) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สร้างตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

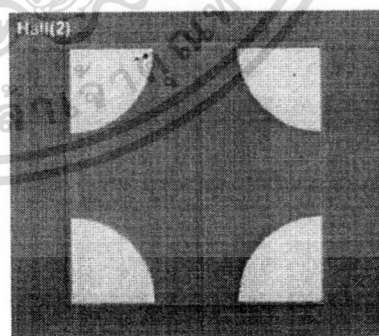
3.1.1.2 ลวดลายการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์

ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นเทคนิคการวัดที่มีความสำคัญ และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการทดลองนี้สามารถหาพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของวัสดุ หรือสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดได้ เช่น ค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยมีหลักการง่ายๆคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุ หรือแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ขณะให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านวัสดุ หรือแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับทิศของกระแส จะทำให้มีสนามไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ทางด้านขวางเกิดขึ้น โดยมีทิศตั้งฉากกับทิศของกระแส และทิศของสนามแม่เหล็ก ซึ่งความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะได้ [3.2] โดยวิธีการทดลอง และการคำนวณผลจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.2

จากหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าจะต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า และวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวขวาง ดังนั้นการออกแบบชิ้นงานที่จะนำมาทำการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์นี้ จะต้องทำการออกแบบใช้ชิ้นงานมีขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในการทดลองทั้งหมด 4 ขั้ว และเพื่อให้ค่าที่ทำการวัดได้มีความถูกต้อง 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 ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์

(ก) ลักษณะ โครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

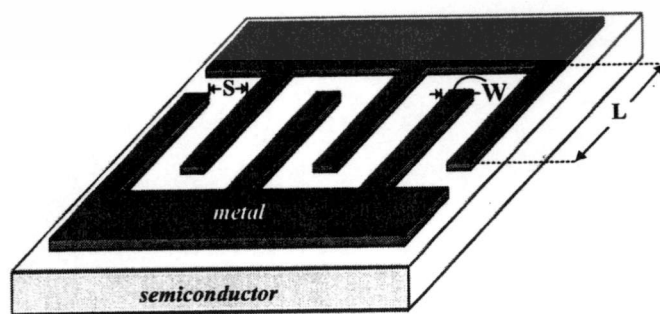
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ลวดลายตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทคนิก ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทคนิกนั้นจะมีลักษณะคล้ายส้อม (fork shape) หรือ นิ้วมือ (finger shape) สลับกัน 2 ด้านดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตเทคนิกนั้นมีตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาดที่สำคัญ 3 ตัวแปรด้วยกัน คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) และความยาวของขั้วไฟฟ้า (L) ซึ่งการออกแบบขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทคนิกให้มีขนาด และจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ที่เหมาะสมจะทำให้ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแสงได้สูงที่สุด [3.3, 3.4]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทคนิก ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al โดยให้มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาด และจำนวนขั้วไฟฟ้าต่างๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสง ดังนี้

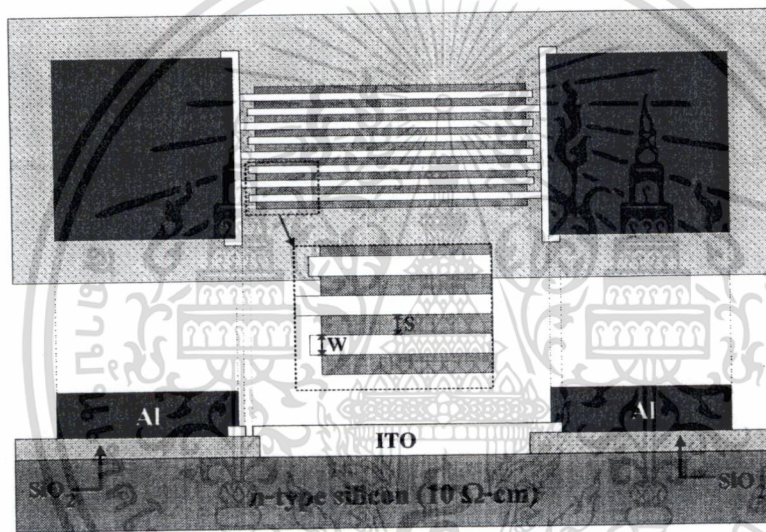
- (1) ออกแบบให้มีจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) เปลี่ยนแปลง เท่ากับ 2, 4 และ 8 ขั้ว โดยที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าคงที่เท่ากับ $40\ \mu\text{m}$ และความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $1.5\ \text{mm}$ เพื่อใช้ในการศึกษาผลของจำนวนขั้วไฟฟ้า
- (2) ออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) เปลี่ยนแปลง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



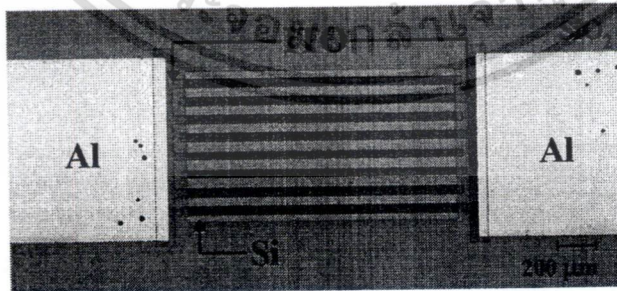
รูปที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทคนิก และตัวแปรที่

เอกสารนี้เป็น ใช้ในการกำหนดขนาดต่างๆ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับ ซิลิคอนชนิดเอ็็น (n-Si) โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นชั้นที่ใช้ในการกำหนดขนาดของพื้นที่รับแสง (active area) และมีโลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (bonding pad) อยู่บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีขนาด 1 x 1 mm² ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้จะต้องทำการออกแบบลวดลายต้นแบบด้วยกัน 3 ลวดลาย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 โดยจากลวดลายดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหนึ่งในนั้นเป็นลวดลายของโลหะอลูมิเนียม ซึ่งทำให้ในงานวิจัยนี้สามารถออกแบบตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตทให้อยู่ในลวดลายต้นแบบเดียวกันกับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตท

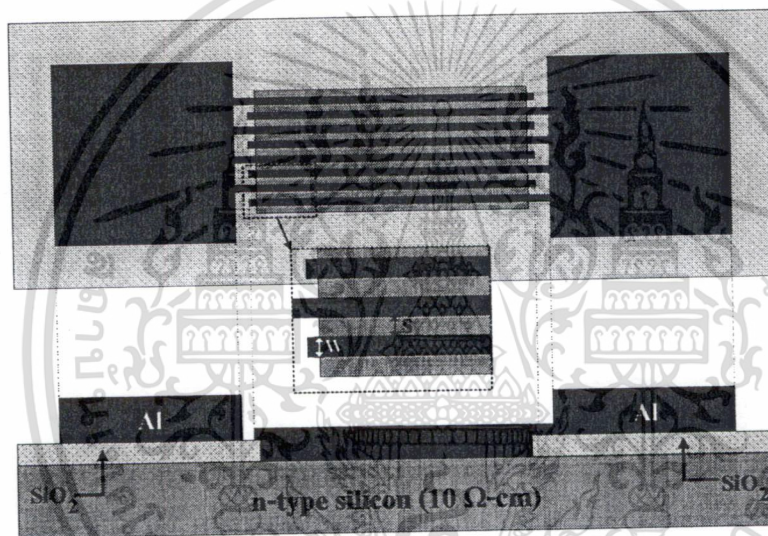
(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

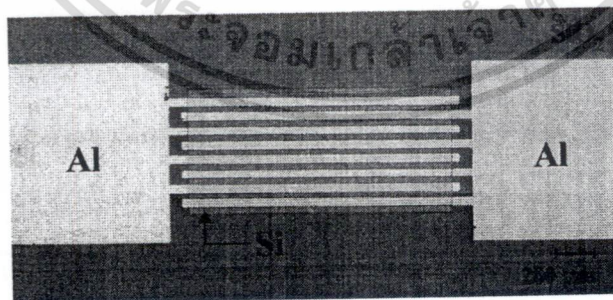
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรรมใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al นั้นจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนชนิดเอ็น 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 ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิต

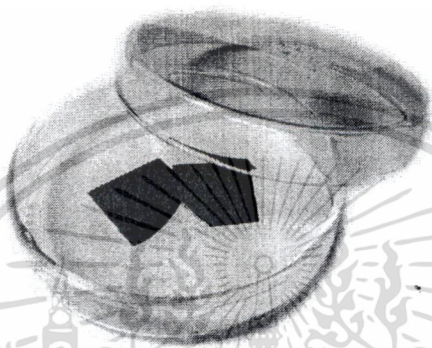
(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

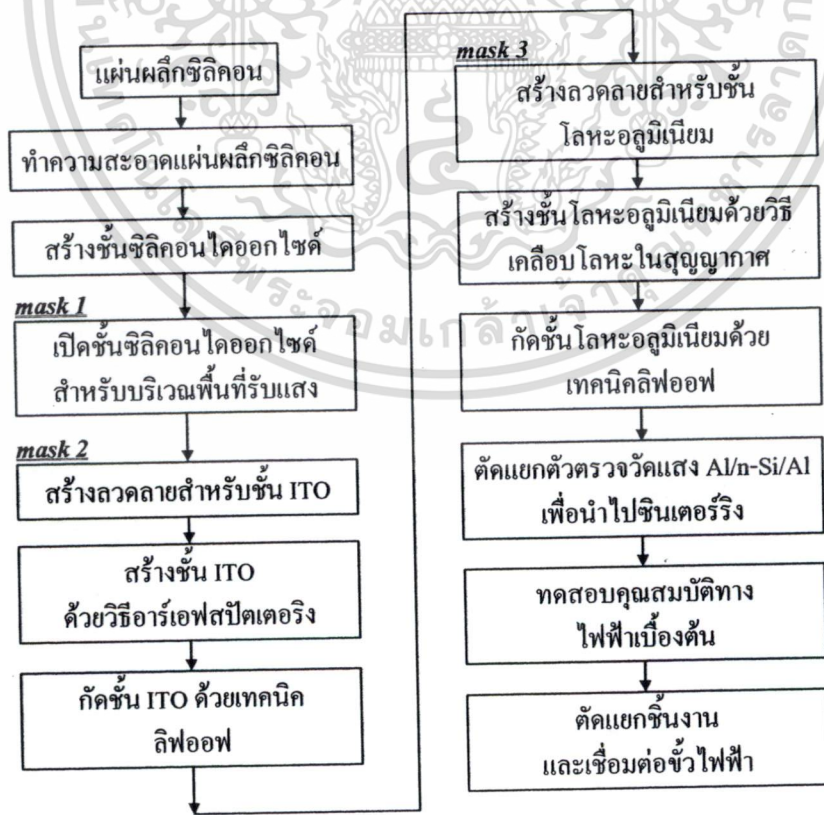
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสร้าง

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



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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.8 แผนผังกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างนี้จะได้กล่าวถึงลำดับ และขั้นตอนรวมถึงเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 5 กระบวนการ คือ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน กระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงาน ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีพื้นฐาน หรือกระบวนการลิฟออฟ กระบวนการเคลือบโลหะด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง หรือวิธีเคลือบโลหะด้วยความร้อนในสุญญากาศ และกระบวนการซินเตอร์ริง ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนเบื้องต้น

การทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันที่ผิวของแผ่นผลึกออก โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อุลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water ; DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง จากนั้นเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดไนตริก (nitric acid : HNO_3) จำนวน 2 แก้วๆ ละ 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- ล้างในน้ำ DI 1 แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึกแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรโคโลเอทรีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (Acetone) 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ (slide etching) ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนสร้างชั้นออกไซด์

- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ที่มีความเข้มข้น 5 % ใช้เวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำ DI 2 แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการออกซิเดชัน

ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซ ออกซิเจน 1100 cc/นาที

3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 1

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 1 (oxide mask) เป็นการเปิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้น เพื่อให้เกิดบริเวณรับแสง หรือเปิดช่องให้เกิดพื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (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 ด้วยเครื่องปรับชั้นมาสก์ (mask aligner)
- ขั้่นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขั้่นลวดลาย (AZ developer) เป็นเวลา 30 วินาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- กัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสง โดยการจุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์ ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ 1000 Å/นาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยการจุ่มในอะซิโตนจนไม่มีน้ำยาไวแสง
- ล้างในน้ำ DI 2 แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 2 สำหรับเทคนิคลิฟออฟ (lift off technique)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 2 (contact mask) เป็นการสร้างลวดลายสำหรับ ITO ที่จะทำการสร้างในขั้นตอนต่อไป โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ที่ 2 ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาส์ค
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย เป็นเวลา 40 วินาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

5. กระบวนการเคลือบฟิล์ม ITO

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยฟิล์ม ITO โดยเทคนิคอาร์เอฟสปัตเตอริง (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 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 สำหรับเทคนิคการลิฟออฟ

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 (metal mask) เป็นการสร้างลวดลายสำหรับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมที่จะทำการสร้างในขั้นตอนต่อไป โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 นี้ จะมีเงื่อนไขของกระบวนการที่สอดคล้องสำหรับการกัดชั้นฟิล์มอลูมิเนียมด้วยเทคนิคลิฟออฟ โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (PFI 34 A) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงมีความหนาประมาณ $1.5 \mu\text{m}$
- อบแผ่นครั้งแรก ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 45 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ที่ 2 ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาส์ค ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย เป็นเวลา 40 วินาที
- ล้างในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

8. กระบวนการเคลือบฟิล์ม โลหะอลูมิเนียม

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะ

ในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr
 เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กระบวนการกัดชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม ด้วยเทคนิคลิฟออฟ

- จุ่มในอะซิโตน
- ล้างในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ตัดแยกเฉพาะตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เพื่อเข้าสู่กระบวนการขึ้นเตอร์ริงต่อไป

10. กระบวนการขึ้นเตอร์ริงสำหรับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al

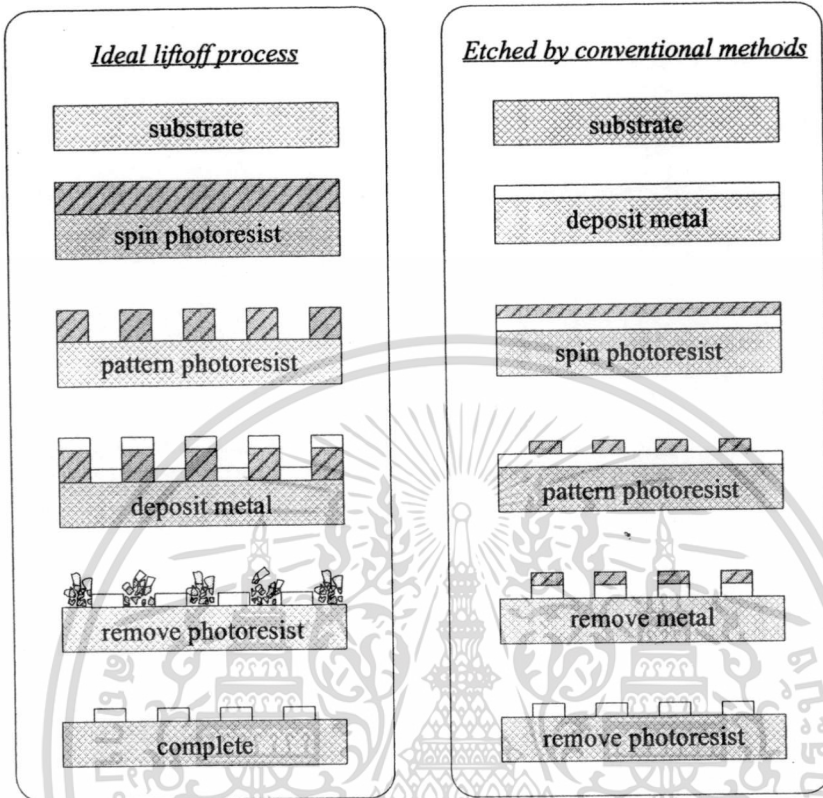
กระบวนการขึ้นเตอร์ริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500°C โดยให้มีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1000 cc/นาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดี และมีกระแสรั่วไหลต่ำที่สุด [3.5]

จากกระบวนการสร้างในหัวข้อที่ 3.2.1 จะเห็นได้ว่าในขั้นตอนของการกัดชั้นฟิล์ม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ ซึ่งแตกต่างไปจากการกัดชั้นฟิล์มโลหะในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่ห้องปฏิบัติการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [3.6-3.9] กล่าวคือ ในกระบวนการกัดชั้นฟิล์มโดยทั่วไป (etched by conventional methods) นั้น จะมีการเคลือบฟิล์มที่ทำการสร้างลวดลายก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี แต่ในกรณีของกระบวนการลิฟออฟนั้นจะทำการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคต่าง ๆ กัน โดยสามารถเปรียบเทียบกระบวนการสร้างสำหรับการกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ และกระบวนการกัดชั้นฟิล์มโดยทั่วไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 [3.10, 3.11]

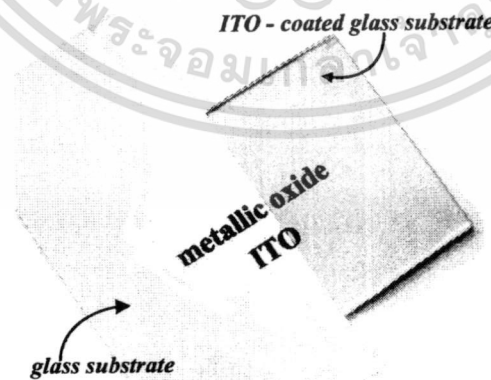
จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่ากระบวนการลิฟออฟนั้นเป็นกระบวนการสร้างลวดลายของชั้นฟิล์มโลหะที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งมีฟิล์มโลหะจำนวนมากที่มักใช้การสร้างลวดลายด้วยวิธีนี้ เช่น แพลทินัม (Pt), แทนทาลัม (Ta), นิกเกิล (Ni) หรือ ฟิล์มบางอื่นๆ ที่มีความยุ่งยากในการกัดชั้นฟิล์มด้วยวิธีทั่วไป โดยกระบวนการลิฟออฟแบบพื้นฐานนั้นลวดลายจะถูกสร้างลงบนฐานรองด้วยน้ำยาไวแสง โดยชั้นฟิล์มโลหะ หรือฟิล์มบางอื่นๆ จะถูกเคลือบลงบนชั้นของน้ำยาไวแสง และบางส่วนจะครอบคลุมลงมายังบริเวณที่เปิดลวดลายของน้ำยาไวแสงไว้ ดังนั้นเมื่อทำการล้างน้ำยาไวแสงออกจึงจะเหลือเพียงชั้นฟิล์มที่ต้องการเท่านั้น [3.10-3.12] และเนื่องจากตัวตรวจวัดแสง MSM ที่จะได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ มีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสจากฟิล์ม ITO ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟิล์ม ITO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์นั้นมีลักษณะโปร่งใสจนกระทั่งสามารถมองเห็นตัวอักษรที่อยู่ด้านหลังของฟิล์ม ITO ได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของ ITO ในขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์ม ITO แบบทั่วไปได้ค่อนข้างยาก จึงทำให้มีการกัดชั้นฟิล์มเกินจากลวดลายต้นแบบ (over etched) เป็นเหตุให้ลวดลายของชิ้นงานที่ได้ไม่คมชัดดังแสดงในรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้กระบวนการลิฟออฟในการสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง
นั่นเอง

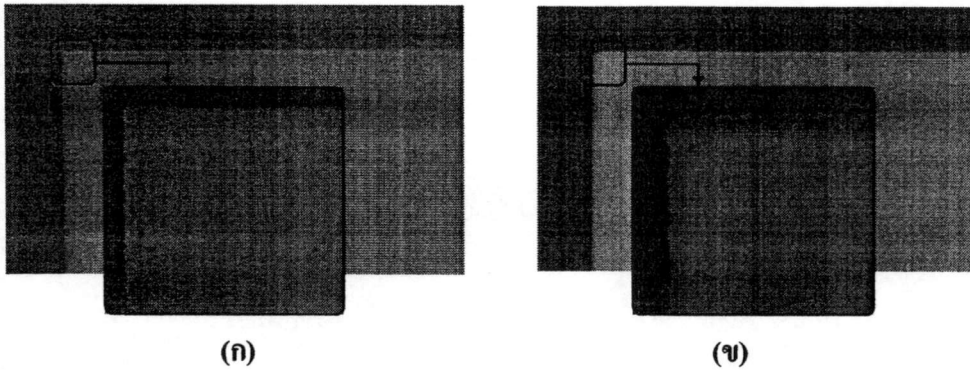


รูปที่ 3.9 ความแตกต่างระหว่างกระบวนการกัดชั้นฟิล์มแบบลิฟออฟ และการกัดชั้นฟิล์มทั่วไป



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่เคลือบบนฐานรองที่เป็นกระจก โดยมีความหนาประมาณ 500 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่มีการกักชั้นฟิล์มด้วยวิธีต่างกัน ที่กำลังขยาย 100 เท่า
 (ก) การกักชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิโธฟ และ (ข) การกักชั้นฟิล์มแบบทั่วไป

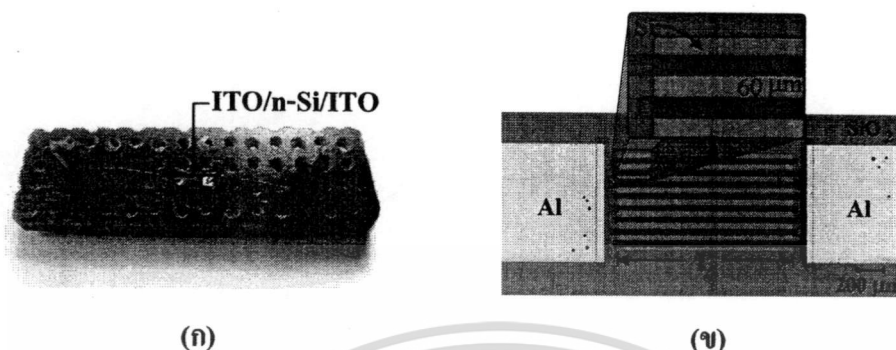
โดยสามารถสรุปกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังกระบวนการในรูปที่ 3.12 แผ่นผลึกซิลิคอนจะถูกนำไปเคลือบโลหะอลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า และนำไปตัดแยกชิ้นงานออกจากกัน โดยชิ้นงานจะถูกนำไปเชื่อมต่อกันเพื่อใช้ในการทดสอบวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไปนี้แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต (ก) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้า และ (ข) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 100 เท่า

3.3 เอกสารอ้างอิง

- [3.1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กุลวรางค์ นุตะมาน และ อิศระ ศรีชนชัย, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโพร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), พ.ศ. 2551, หน้า 1201-1204
- [3.2] สมเกียรติ สุกเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544
- [3.3] มานิตา ค้วงแสง, **การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิต**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- [3.4] A. Müller, G. Konstantinidis, M. Dragoman, D. Neculoiu, A. Dinescu, M. Androulidaki, M. Kayambaki, A. Stavriniadis, D. Vasilache, C. Buiculescu, I. Petrini, C. Anton, D. Dascalu and A. Kostopoulos, “Ultraviolet MSM Photodetector Based on GaN Micromachining”, *Microelectronics Journal*, 2008
- [3.5] Chino K, “Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment”, *Solid State Electronics*, Vol. 16, 1973, pp. 119-121
- [3.6] สรายุทธ์ วิสวแสงสุข, **การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [3.7] ชเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สราวุธ วิศวแสงสุข “ผลกระทบของอุณหภูมิขึ้นเตอริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิดAl/n-Si/Al แบบพลาสมา”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, พ.ศ. 2547, หน้า 14-19
- [3.8] ชเนศ โชะเหม, มานิตา ดั่งแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด ชนิดAl/n-Si/Al แบบพลาสมาที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2548, หน้า 13-18
- [3.9] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, วรเทพ น้อยปรีชา และ สัญญา คุณขาว, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบสลิคเดี่ยวที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก ชนิด Al/n-Si/Al”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), พ.ศ. 2550, หน้า 592-595
- [3.10] Biren Patel, Akil Sutton and Leslie George, “Lift-off Process Using Positive Photoresist”, March 6, 2003
- [3.11] P. Carlberg, M Graczyk, E.-L. Sarwe, I. Maximov, M. Beck and L. Montelius, “Lift-off process for nanoimprint lithography”, Microelectronic Engineering, Vol. 67-68, 2003, pp. 203-207
- [3.12] D. Monsma and I. Applebaum, “A reliable lift-off process”, Marcuslab Harvard University, 2002

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงลำดับขั้นตอนของการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย โดยในช่วงแรกจะทำการศึกษาถึงสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง ITO ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน เพื่อความเหมาะสมของฟิล์มบาง ITO ที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเทอร์ดิเจิต ตามที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 3 จากนั้นนำเสนอผลการทดลองการวัดสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ในลักษณะของรอยสัมผัสข้อต่อคีย์, ความจุไฟฟ้า, ผลกระทบของลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพตอบสนองทางแสง และผลตอบสนองทางความถี่ที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสงที่ได้มีการออกแบบไว้ เพื่อเป็นการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้

4.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO

ในงานวิจัยนี้ลักษณะของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิดเอ็น ซึ่ง ITO นั้นทั่วไปมีสมบัติเป็นวัสดุตัวนำที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีใกล้เคียงกับ โลหะ อีกทั้งมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น คือ มีลักษณะโปร่งใส จนในบางครั้งจึงเรียก ITO ว่าเป็นโลหะโปร่งใส ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงเป็นการศึกษาสมบัติเฉพาะตัวต่าง ๆ ของ ITO เพื่อหาความเหมาะสมของฟิล์มบาง ITO ที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

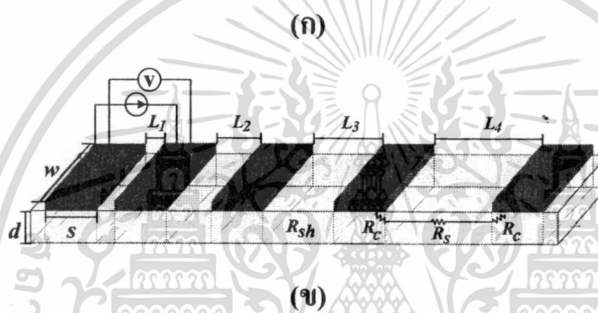
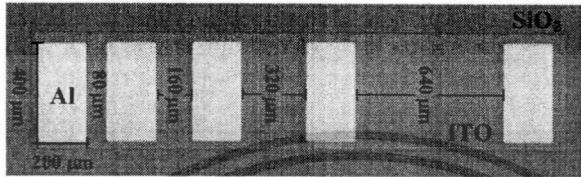
4.1.1 สภาพต้านทานของ ITO ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยลวดลายที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทาน เป็นลวดลายแบบ TLM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะอลูมิเนียม เพื่อสร้างให้เกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกโดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้า ($S \times W$) 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 นั้นจะถูกกำหนดด้วยเวลาในการสปัตเตอร์ คือ 15, 30, 45, และ 60 นาที โดยสามารถหาความหนาของชั้นฟิล์มที่เวลาในการสปัตเตอร์ต่าง ๆ นี้ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีความหนาของฟิล์มประมาณ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ [4.1]

ในการทดลองได้นำชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาทำการทดสอบ เพื่อหาค่าสภาพต้านทาน ด้วยการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1 (ข) ซึ่งในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ด้วย

วิธี TLM ในการทดลองนี้จะใช้ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ และระบบวัดความต่างศักย์ (source meter) ของบริษัท Keithley รุ่น 2400 โดยจ่ายกระแสค่าคงที่เท่ากับ 10 mA

จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ นำมาคำนวณหาความต้านทาน จากนั้นนำค่าความต้านทานที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ ρ/dW ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ดังนี้



รูปที่ 4.1 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนชั้นฟิล์ม ITO ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทาน โดย (ก) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี TLM และตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

จากรูปที่ 4.1 (ข) จะได้ว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ [4.2-4.5]

$$R = 2R_c + R_s \tag{4.1}$$

โดยความต้านทานในเนื้อสาร R_s มีค่าเท่ากับ

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

แทนสมการที่ 4.2 ลงในสมการที่ 4.1

จะได้ R อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นที่มีความชันเท่ากับ ρ/dW ดังสมการที่ 4.3

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

โดยที่ R_c คือ ความต้านทานที่รอยสัมผัส

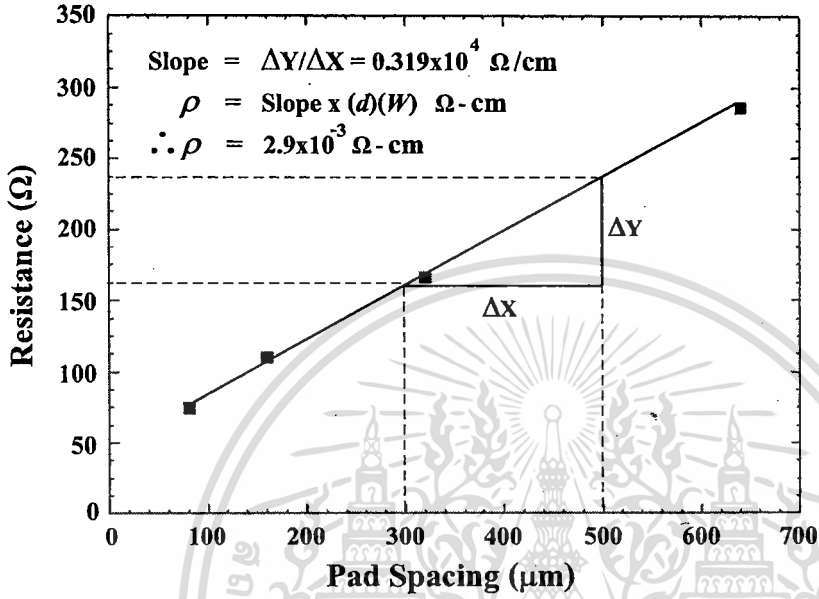
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_s คือ ความต้านทานในชั้นฟิล์ม ITO

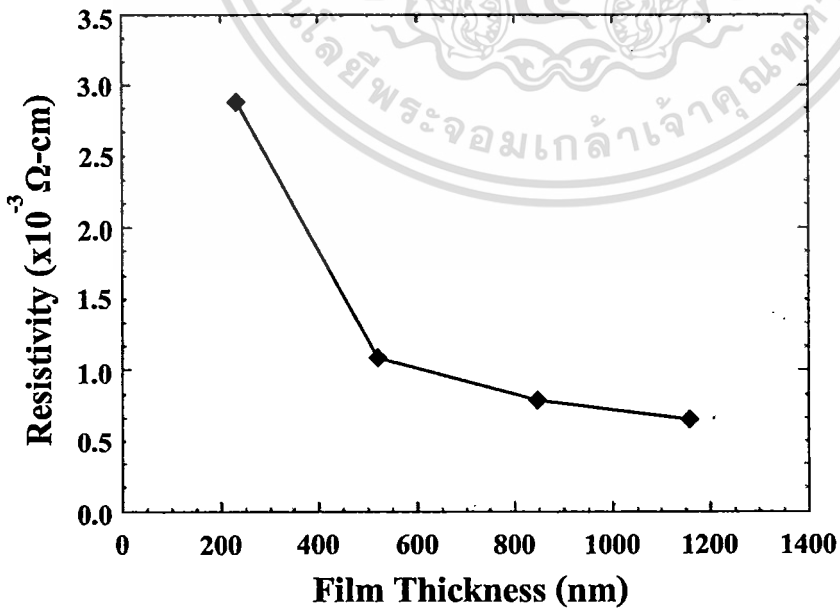
d คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม ITO

W คือ ความกว้างของขั้วไฟฟ้า

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า



4.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาค่าสภาพต้านทาน โดยใช้เทคนิคของ TLM



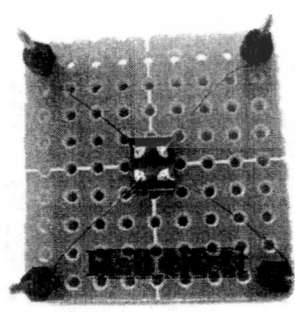
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานกับความหนาของฟิล์ม ITO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

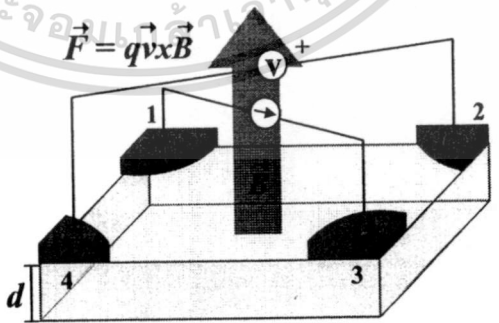
จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.2 เพื่อหาค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง ITO ที่ขนาดต่าง ๆ กัน จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสภาพต้านทานจะมีค่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 500 nm เป็น 230 nm และมีการเปลี่ยนแปลงลดน้อยลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 230 nm ไป โดยมีค่าเท่ากับ 2.9×10^{-3} , 1.1×10^{-3} , 0.8×10^{-3} และ $0.6 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ที่ความหนาฟิล์ม 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ ซึ่งการทดลองนี้มีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาการศึกษาถึงโครงสร้างผลึกของ ITO และพบว่าเมื่อเตรียมฟิล์มบาง ITO ให้มีความหนาของฟิล์มมากขึ้นจะทำให้ ITO มีความเป็นผลึกสูงขึ้น และมีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น เช่น เมื่อฟิล์มบาง ITO มีความหนาเท่ากับ 230 nm จะมีขนาดของเกรนเท่ากับ 32 nm และเมื่อฟิล์มบาง ITO มีความหนาเท่ากับ 500 nm จะมีขนาดของเกรนเท่ากับ 48 nm เป็นต้น [4.6] โดยอาจกล่าวได้ว่าขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นนั้นเป็นเหตุให้การกระเจิงหรือการชนของอิเล็กตรอนที่บริเวณขอบของเกรนลดลง ผลให้สภาพการนำไฟฟ้าดีขึ้น หรือมีค่าสภาพต้านทานลดลงนั่นเอง

4.1.2 ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของ ITO เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

การหาความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพคล่องของพาหะในการทดลองนี้จะใช้การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ การออกแบบสวิตช์ที่ใช้ในการวัดนั้นได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยมีลักษณะของสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) คือ มีรัศมีของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมเท่ากับ 1 mm โดยความหนา (d) ของฟิล์มบาง ITO นั้นจะถูกกำหนดด้วยเวลาในการสปัตเตอร์คือ 15, 30, 45, และ 60 นาที เช่นเดียวกับการหาค่าสภาพต้านทานที่ผ่านมา



(ก)



(ข)

ที่ 4.4 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดย (ก) แสดงขั้วโลหะอลูมิเนียมของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาว

และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำชิ้นงานที่สร้างขึ้น มาทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของ โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อนและหลังให้สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับชิ้นงานดังในรูปที่ 4.4 (ข) ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ และระบบวัดความต่างศักย์ของบริษัท Keithley รุ่น 2400 และ กำเนิดสนามแม่เหล็กของบริษัท Ohsumi Electric manufacture

จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ นำมาหาความต้านทาน ดังแสดงในสมการที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ความต้านทานที่ได้ ($R_{13} - R_{24} = \Delta R_{1324}$) คูณกับความหนาของฟิล์ม จากนั้นทำการพล็อตกราฟ สัมพันธ์ระหว่างค่า (d)(ΔR_{1324}) กับค่าสนามแม่เหล็ก (B) ตามสมการเชิงเส้นที่ 4.9 ดังแสดง ที่ 4.5 ซึ่งความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ R_H แทนค่า R_H ลงในสมการที่ 4.10 และ 4.11 เพื่อ หาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ตามลำดับ [4.2, 4.7]

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

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

สมการที่ 4.5 ลบด้วยสมการที่ 4.4 จะได้
$$V'_{24} = V_H + V_{24}$$

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

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

V_H คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage)

R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

B คือ ค่าสนามแม่เหล็ก (หน่วย: Tesla)

สมการที่ 4.6 ลงสมการที่ 4.7 จะได้

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

ให้สมการที่ 4.9 อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นโดยมีความชันเท่ากับ R_H

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

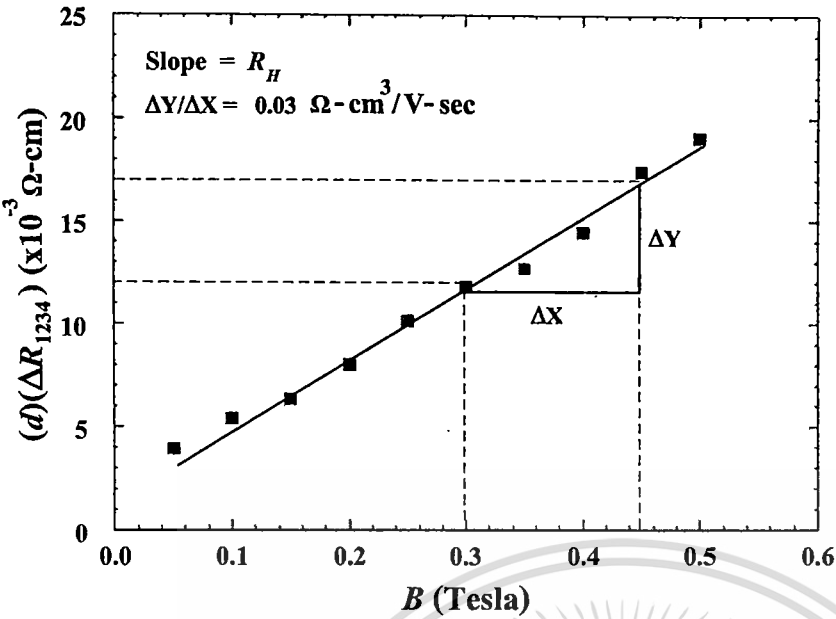
ความหนาแน่นของพาหะสามารถหาได้จาก (เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน)

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

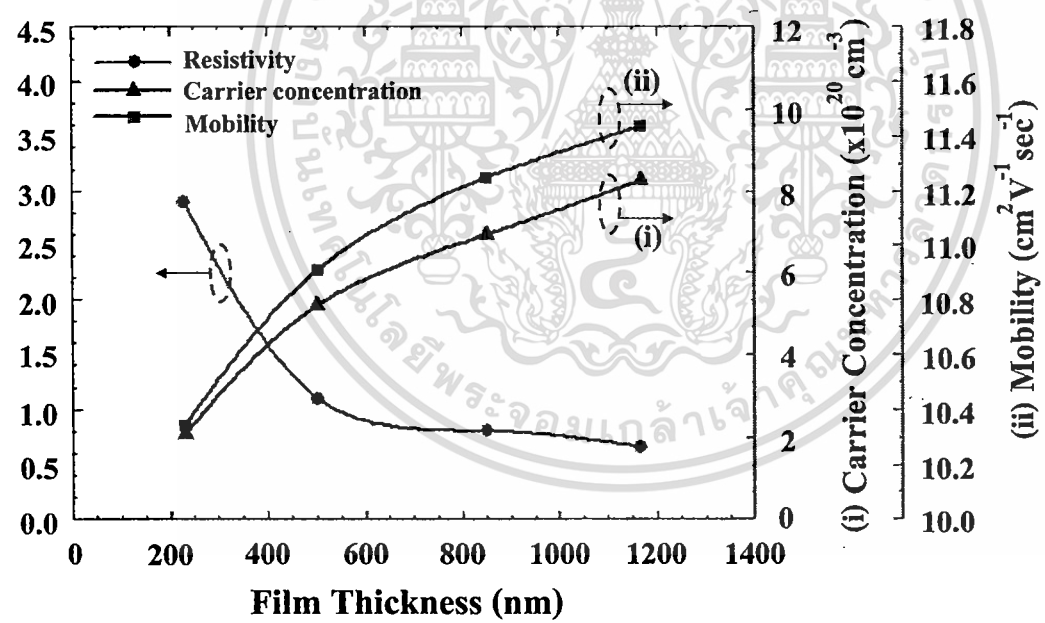
สภาพคล่องของพาหะสามารถหาได้จาก (สภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากการทดลองที่ผ่านมา) นั่นคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทาน, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะกับความหนาของฟิล์ม ITO

จากตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(d)(\Delta R_{1324})$ กับสนามแม่เหล็กในรูปที่ 4.5 จะเห็นความชันของกราฟมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม หมายถึงค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการทดลองมีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก จากการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์นี้ทำให้สามารถได้ว่า ITO ที่สร้างขึ้นในการทดลองนี้มีประจุพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน หรือเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

าชนิดอื่น เนื่องจากการทดลองได้ทำการให้กระแสไฟฟ้าคงที่จากขั้ว 1 ไปยังขั้ว 3 ดังนั้น อิเล็กตรอนภายในเนื้อสารจึงมีการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้า คือมีการเคลื่อนที่จากขั้ว 3 ไปขั้ว 1 ต่อมาเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับชิ้นงานจึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยมีทิศเบี่ยงเบนมายังขั้วที่ 2 เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนก็จะถูกกระทำของสนามแม่เหล็กมากขึ้นทำให้มีการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมายังขั้วที่ 2 มากยิ่งขึ้น จึงทำให้ต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงลอเรนซ์ $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ นั่นเอง

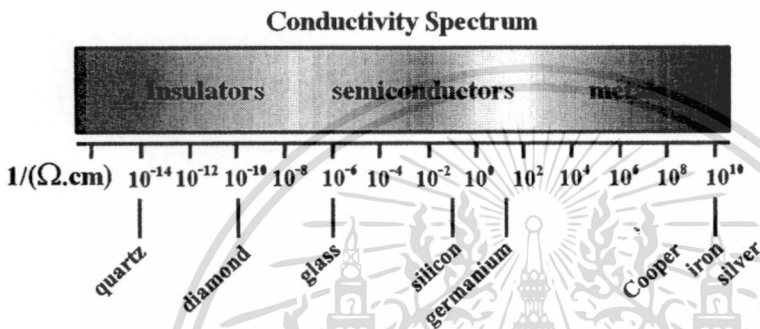
จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแบบสี่แกน โดยแกนด้านซ้ายมือเป็นแกนสภาพต้านทานจากการทดลองที่ 4.1.1 ส่วนแกนด้านขวามือ (i) เป็นแกนความหนาแน่นของพาหะ และ (ii) แกนสภาพคล่องของพาหะกับความหนาของฟิล์ม ITO แสดงให้เห็นว่าสภาพต้านทาน, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะนั้นขึ้นกับความหนาของฟิล์ม ITO โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าสภาพต้านทานจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของพาหะและ สภาพคล่องของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกันกล่าวคือ เมื่อ ITO มีความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้นจึงทำให้การนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นหรือมีสภาพต้านทานมีค่าลดต่ำลง สภาพต้านทานที่ลดลงนั้นเกิดเนื่องจากขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นส่งผลทำให้การกระเจิงหรือการชนของอิเล็กตรอนที่บริเวณขอบของเกรนลดลง ซึ่งการลดการกระเจิงของอิเล็กตรอนนั้นยังทำให้สภาพคล่องตัวของพาหะดีขึ้นไปอีกด้วย 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 ตามลำดับ

ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะจากการทดลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน การทดลองที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทำให้ทราบได้ว่าฟิล์ม ITO ที่เตรียมด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง และการวัดผลในการทดลองนี้เป็นที่ยอมรับได้ในระดับที่ดี

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีสปีดเตอร์ริงต่างๆ 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.
Sputtering	750	6.0×10^{20}	34.7	3.0×10^{-4}	90	[4.8]
Sputtering	500	1.2×10^{21}	13.0	4.0×10^{-4}	95	[4.9]
Metron	80	6.0×10^{20}	26.0	4.0×10^{-4}	85	[4.10]
Sputtering	60	2.0×10^{20}	26.0	1.2×10^{-3}	-	[4.11]
Sputtering	100	9.0×10^{20}	34.7	2.0×10^{-4}	85	[4.12]

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการนำ ITO ไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการนำไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้ด้วย โดยสามารถหาสภาพนำไฟฟ้าของได้จากส่วนกลับของค่าสภาพต้านทาน ($1/\rho$) จากการทดลองที่ 4.1.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.35×10^3 , 1.3×10^3 และ 1.5×10^3 ($\Omega\text{-cm}$)⁻¹ ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ลำดับ จะเห็นได้ว่า ITO มีสภาพนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง อาจจัดได้ว่าอยู่ในช่วงต้น หรือเริ่มจะมีสภาพนำไฟฟ้าเข้าใกล้การนำไฟฟ้าของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 สามารถกล่าวได้ว่า ITO ที่สร้างจากการทดลองนี้สามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแทนโลหะได้จริง



รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงสภาพการนำไฟฟ้าของ โลหะ, สารกึ่งตัวนำ และฉนวน

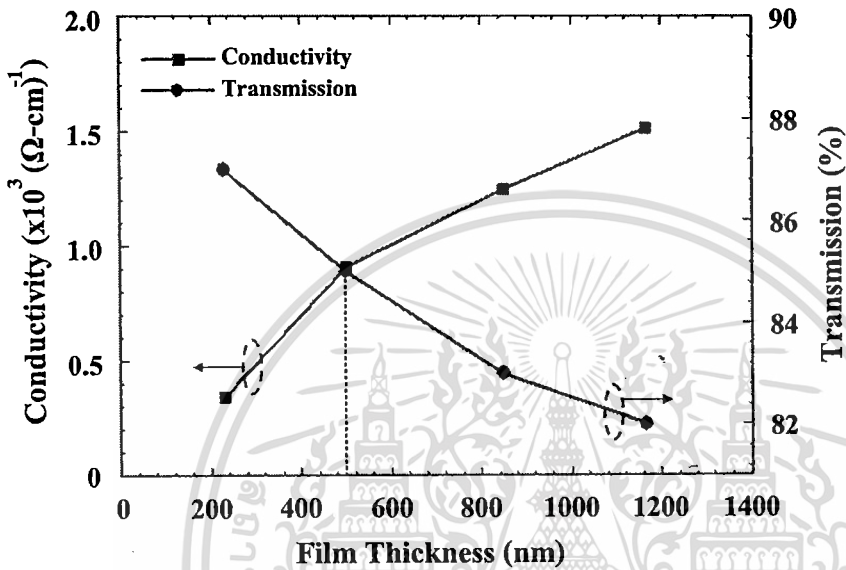
หลังจากทำการศึกษารามิเตอร์พื้นฐานของฟิล์มบาง ITO แล้ว และพบว่า ITO ที่ทำการขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงที่เวลาต่าง ๆ นั้นสามารถที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสตัวตรวจวัดแสงได้ เนื่องจากมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และมีค่าความหนาแน่นพาหะใกล้เคียงกับโลหะแล้ว [4.13] แต่ก็ยังคงมีอีกหนึ่งปัจจัยที่จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกเงื่อนไขที่จะใช้ในการสปีดเตอริง ITO เพื่อนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส คือ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (%T) ซึ่งมีแปรผกผันกับการนำไฟฟ้า และความหนาของฟิล์ม กล่าวคือ เมื่อเวลาในการสปีดเตอริงเพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 87%, 85%, 83% และ 82% ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ [4.6] ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการเลือกความหนาของ ITO ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูง เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณแสงที่จะตกกระทบบลงซิลิคอนให้มากขึ้น โดยคาดว่าจะสามารถเพิ่มกระแสแสงแก่ตัวตรวจวัดแสงได้

เพื่อเป็นการหาความหนาของฟิล์ม ITO ที่มีสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเหมาะสมที่สุด จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความหนาของฟิล์ม ITO ดังแสดงในรูปที่ 4.8

จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความหนาฟิล์มประมาณ 500 nm นั้น มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส เนื่องจากมีทั้งสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูง ทั้งความหนาของฟิล์มยังมีค่าใกล้เคียงกับความหนาของชั้นโลหะในกระบวนการสร้างตัว

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดแสง โครงสร้าง MSM ที่ผ่านมา [4.14-4.17] ดังนั้นในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในงานวิจัยนี้ การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงที่เวลา 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 $10.9 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ และ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเท่ากับ ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.2



4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความหนาของ ITO

4.2 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง

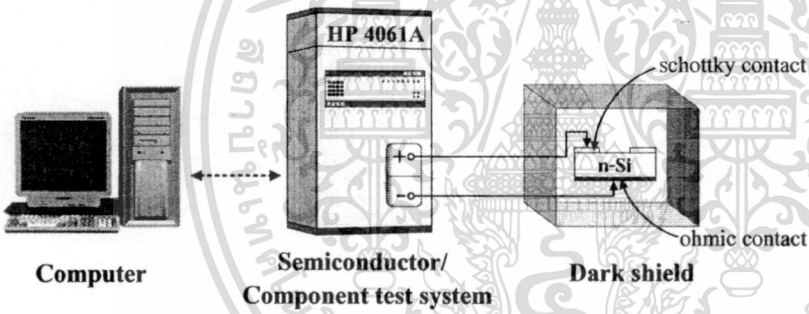
Thickness (nm)	Carrier concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	Transmittance (%) [4.6]
230	2.2×10^{20}	10.3	2.9×10^{-3}	87
500	4.2×10^{20}	10.9	1.1×10^{-3}	85
850	6.9×10^{20}	11.3	0.8×10^{-3}	83
1160	8.3×10^{20}	11.5	0.6×10^{-3}	82

ในการทดลองที่ 4.1.1 และ 4.1.2 ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์ม ITO ลงบนกระจกที่เป็นกระจก เพื่อเป็นการประหยัด และสะดวกในการทดลอง โดยหลังจากที่ได้เงื่อนไขความหนาฟิล์มที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการทดลองอีกครั้ง โดยสร้างลวดลายรวมอยู่ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 กล่าวคือ สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ $4,000 \text{ \AA}$ พบว่าผลต่าง ๆ ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ศึกษานั่น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

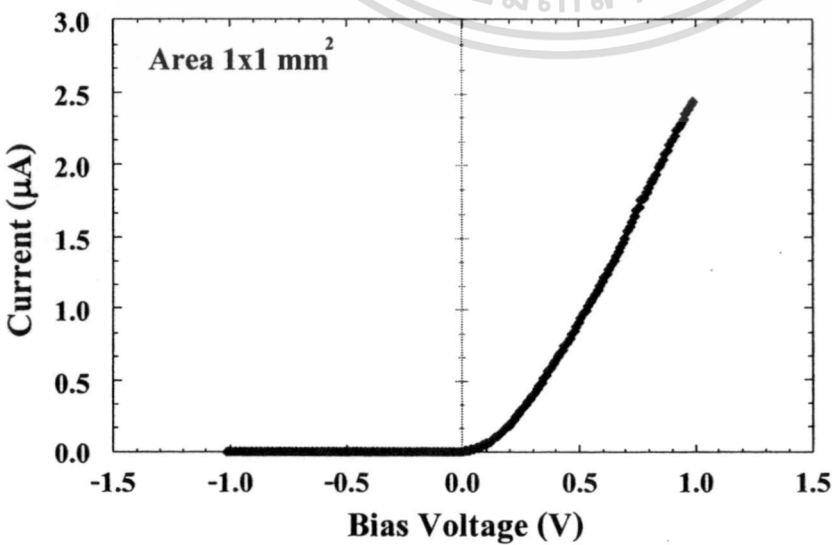
การทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสชนิดคัททีย์

จากการทดลองที่ผ่านมาได้ทำการหาความหนาของฟิล์ม ITO ที่เหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM แล้ว ในการทดลองนี้จึงเป็นการกล่าวถึงตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM ที่สร้างขึ้น และเนื่องจากตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ประกอบไปด้วยรอยสัมผัสชนิดคัททีย์ 2 รอยสัมผัสด้วยกัน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาถึงพื้นฐานของรอยสัมผัสชนิดคัททีย์ที่สำคัญ ได้แก่ แรงดันภายใน (V_{bi}) และความสูงกำแพงศักย์คัททีย์ (ϕ_{bn})

รอยสัมผัสชนิดคัททีย์ระหว่าง ITO และ ซิลิคอนชนิดเอ็น ในการทดลองนี้มีลักษณะของลวดลายแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดของพื้นที่ (A) เท่ากับ 1 mm^2 ซึ่งการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดคัททีย์ โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ของ Agilent ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ร่วมกับการคำนวณจะทำให้สามารถทราบถึงแรงดันภายใน และความสูงกำแพงศักย์ชนิดคัททีย์ได้ ซึ่งลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดคัททีย์จะแสดงในรูปที่ 4.10

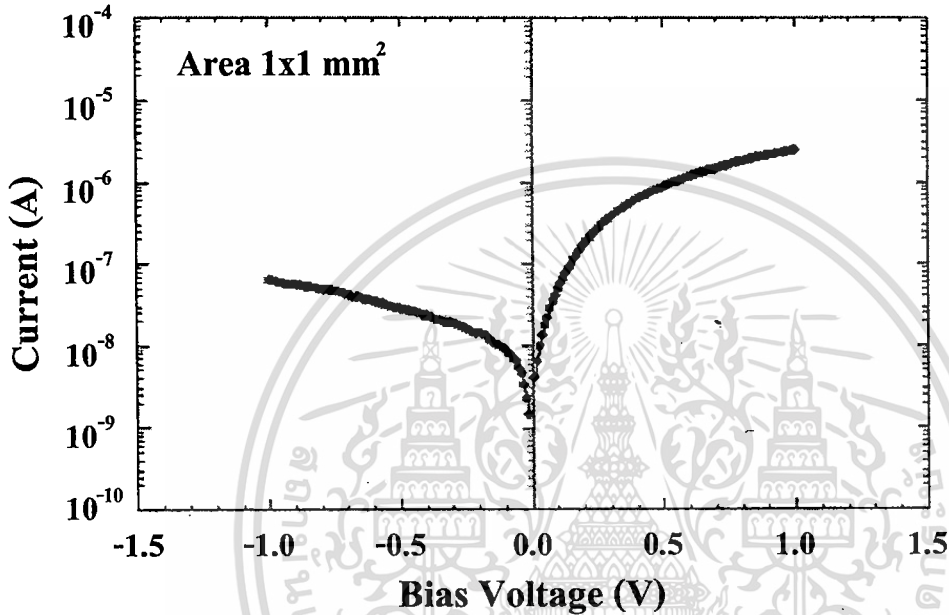


รูปที่ 4.9 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัสชนิดคัททีย์



รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอน ชนิดเอ็น ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าลักษณะของความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบเรกติไฟร์ หรืออาจกล่าวได้ว่ารอยสัมผัสที่นั่นเป็นรอยสัมผัสแบบซีกออตต์กี้นั่นเอง ซึ่งสามารถหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสซีกออตต์กี้นี้ โดยพบว่ารอยสัมผัสซีกออตต์กี้นี้มีแรงดันภายในประมาณ 0.34 V ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันภายในของรอยสัมผัสซีกออตต์กี้นี้ทั่วไปที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.2-0.4 V [4.18]



ที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งลึอกกับแรงดัน ไบอัส เพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

สำหรับค่าแ่งศักย์ซีกออตต์กี้นี้สามารถหาได้ด้วยเทคนิคกระแส-แรงดันเช่นกัน [4.19] โดยนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (แกนตั้ง) ในแบบกึ่งลึอกกับแรงดัน ไบอัส (แกนนอน) ในลักษณะเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.11 จากนั้นทำการประมาณกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (J_0) หรือ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสที่มีขนาดพื้นที่ 1 mm^2 ที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ จากจุดตัดแกนแรงดันเท่ากับศูนย์ โวลต์ของกราฟด้านไบอัสตรง โดยจะได้กระแสไหลมีค่าเท่ากับ $1 \times 10^{-8} \text{ A}$ และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 จะสามารถหาค่าแ่งศักย์ซีกออตต์กี้นี้ได้

$J_0 = I_0/A$ ความหนาแน่นกระแสจะมีค่าเท่ากับ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J_0 คือ ความหนาแน่นกระแสอิมิต์ย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

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

ใน ความสูงกำแพงศักย์ช็อคต์ตีย์จึงสามารถหาได้จาก

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

ที่ k คือ ค่าคงที่ของโบสตันน์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

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

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ 4.14 ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อคต์ตีย์ของรอยสัมผัสระหว่าง ITO ซิลิคอน ชนิดเอ็น โดยมีค่าเท่ากับ 0.76 V ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี และงานวิจัยอื่น ๆ [8, 4.20] โดยงานวิจัยนี้ในหัวข้อการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงสัญญาณแสงกระแสดตรง และกระแสกลับจะได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับตัวตรวจวัดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิคิตีค ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาสมบัติของรอยสัมผัสช็อคต์ตีย์ระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีขนาดพื้นที่รอยสัมผัสเท่ากับ 1 mm^2 และซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาทีด้วยเช่นกัน โดยพบว่ารอยสัมผัสช็อคต์ตีย์ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนนั้นมีค่าแรงดันภายในประมาณ 0.38 V และค่ากำแพงช็อคต์ตีย์เท่ากับ 0.72 V ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี และผลการทดลองที่มีมาก่อนหน้านี้ [4-4.17]

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิคิตีค

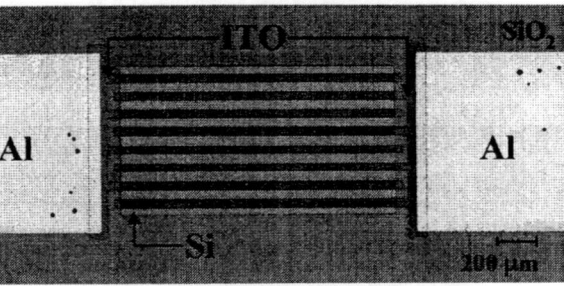
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิคิตีค หลังจากทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำมาตัดแยกชิ้นงาน และเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน เพื่อใช้ในการวัดผลการทดลองด้วยเครื่องมือวัด หรือ อุปกรณ์ต่างๆ แสดงในรูปแบบที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในการทดลองนี้ จะทำการต่อวงจรดังแสดงในรูปแบบที่ 4.14 โดยใช้เครื่องมือวัด HP 4284A ของบริษัท Agilent และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นจึงได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังรูปที่ 4.15 โดยที่ตัว

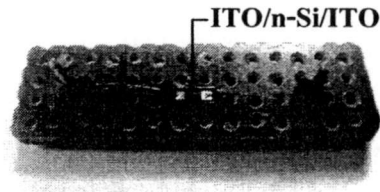
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดแสงมีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 40 μm , ขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความยาวขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว

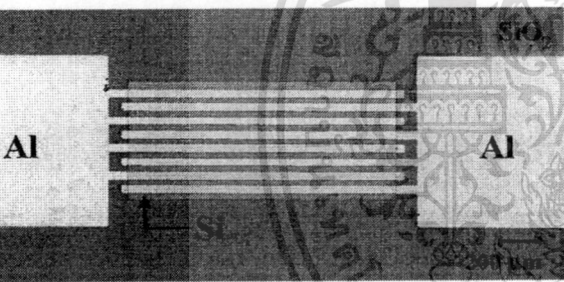


(ก)

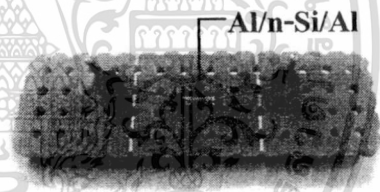


(ข)

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

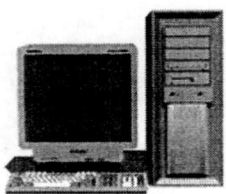


(ก)

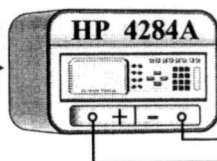


(ข)

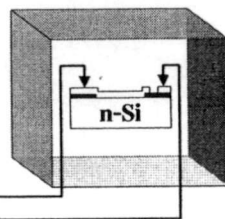
4.13 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิต โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm , ความยาวขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และ จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว โดย (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อดัวยกาวเงิน



Computer



Precision LCR Meter

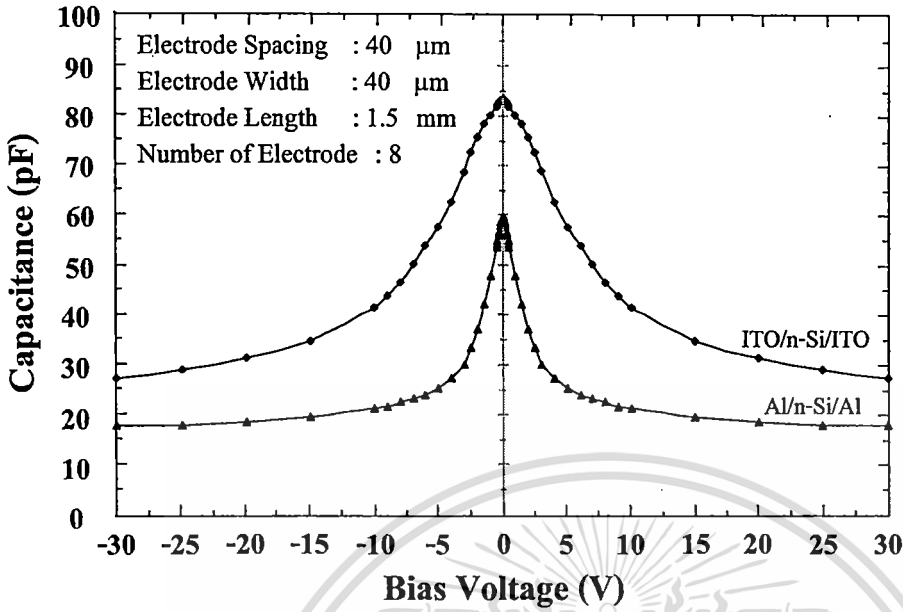


Dark shield

4.14 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สร้าง MSM ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



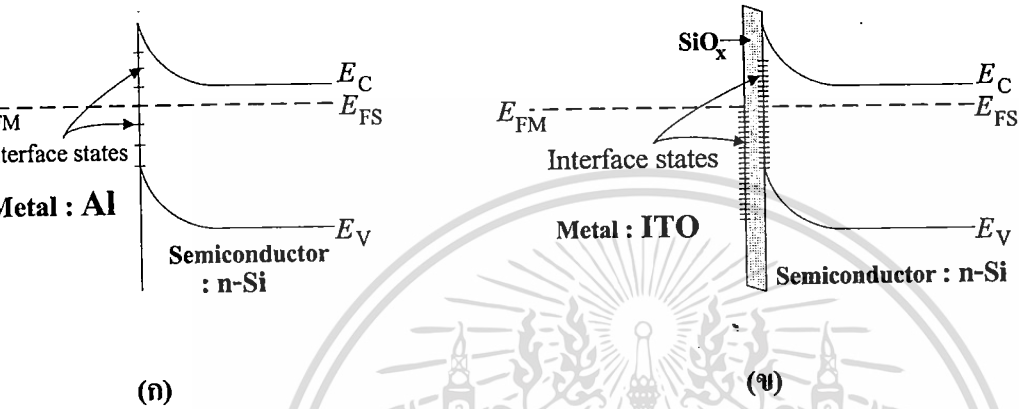
4.15 ลักษณะความจุไฟฟ้าแรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าแรงดันของตัวตรวจวัดแสง MSM ซึ่งขึ้นนั้นมีความสมมาตรกัน และมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัสตามความสัมพันธ์ของสมการ 4.15 กล่าวคือ เมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มีค่าประมาณ 30 pF และ 21 pF ตามลำดับ โดยตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO นั้นมีความจุสูงกว่า ตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ทั้งนี้ตัวตรวจวัดแสงทั้งสองมีขนาดพื้นที่ (A) เท่ากัน ซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ดังเช่น การเกิดขึ้นออกไซด์บางๆ (interface oxide: SiO_x) ที่บริเวณสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน เนื่องจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอน และออกซิเจนส่วนเกิน (excess oxygen) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเคลือบฟิล์ม ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง [4.21-4.23] หรือเกิดขึ้นเนื่องจากผลการกระจายของสถานะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอน (interface state) มีปริมาณมาก [4.21, 4.22] เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของแถบพลังงานของ ITO และซิลิคอน ชนิดอื่นได้ดังรูปที่ 4.16

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

ที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C)
- N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
- V_b คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
- V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ
- W คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ



4.16 แถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดต่างๆในภาวะสมดุลความร้อน โดย (ก) แถบพลังงานของสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอน ชนิดเอ็น และ (ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างและซิลิคอน ชนิดเอ็น

การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสงแตรตรง

การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงด้วยสัญญาณแสงแตรตรงนี้ ได้ทำการศึกษา ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเทอร์ ดิจ [4.24]

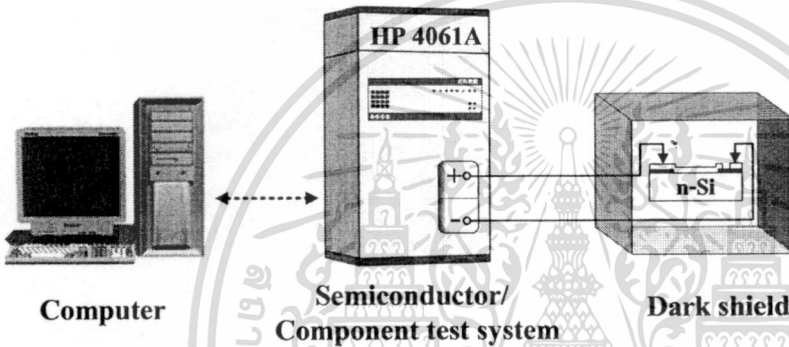
ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/ITO ทั้งขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง เพื่อเป็นการหาค่ากระแสมืด และกระแสแสง มีการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S), ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W), จำนวนขั้วไฟฟ้า (N) และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน และมีขนาด, ระยะห่าง และจำนวนของขั้วไฟฟ้าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

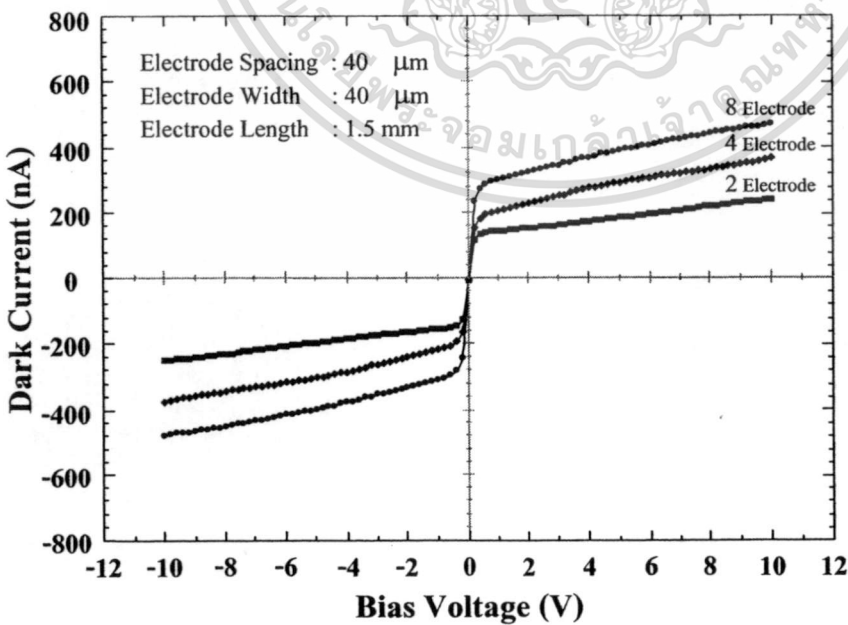
4.4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสง

การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ เพื่อหาค่ากระแส (I_{dark}) ของตัวตรวจวัดแสงนั้น จะทำการต่อวงจรเพื่อใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยใช้อุปกรณ์วัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ของบริษัท Agilent

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะได้รับแสงตกกระทบบ แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่ากระแสมีค่ามีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส มีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการป้อนแรงดันไบอัสกลับแก่รอยสัมผัสชนิด Schottky ของตัวตรวจวัดแสงทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้น จึงส่งผลให้กระแสที่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นด้วย



ที่ 4.17 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบบ



ที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงนั้น มีผลต่อกระแสที่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับการเพิ่มแรงดันไบอัส คือกระแสจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีจำนวนขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้า 2, 4 และ 8 ขั้ว จะมีกระแสที่เท่ากับ 180 nA, 290 nA, และ 380 nA ตามลำดับ ทั้งนี้การที่กระแสเปลี่ยนแปลงตามจำนวนของขั้วไฟฟ้านั้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพื้นที่ของรอยสัมผัสช็อคติจี้ ซึ่งจากสมการที่ 4.16 กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคติจี้จะแปรผันตรงกับขนาดของพื้นที่รอยสัมผัส

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

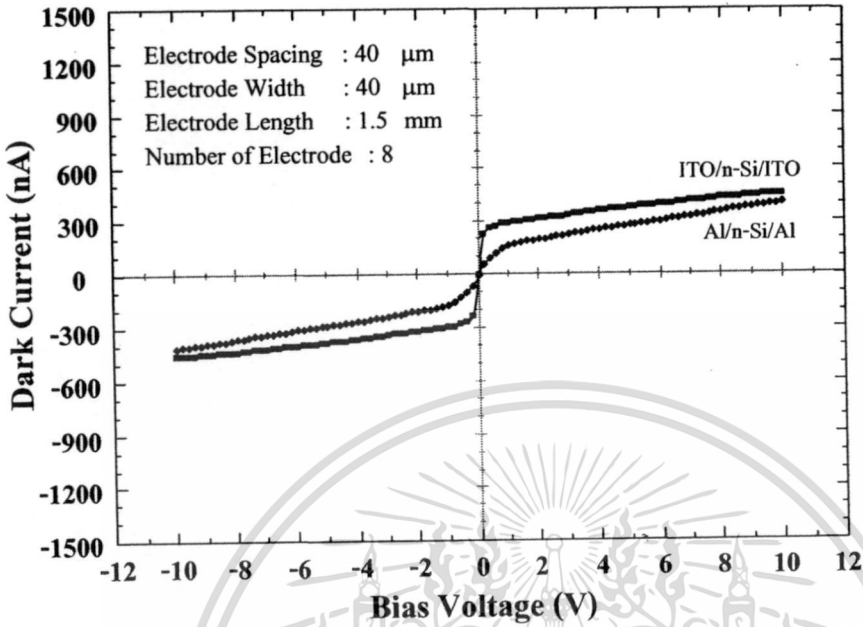
- ที่
- A คือ พื้นที่รอยสัมผัส
 - R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (n-Si)
 - T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 - q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
 - ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคติจี้
 - k คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล และขนาดของพื้นที่ของรอยสัมผัสจึงคาดได้ว่า การเพิ่มขนาดพื้นที่รอยสัมผัสด้วยการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้า, จำนวนขั้วไฟฟ้า และความยาวขั้วไฟฟ้าจะทำให้มีค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกระแสของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ในการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติกระแส-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 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้วตามลำดับ พบว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al นั้นมีกระแสที่ต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO โดยที่แรงดันไบอัส 5 V มีค่ากระแสของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เท่ากับ 290 nA ส่วนของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าเท่ากับ 380 nA ซึ่งการที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al มีกระแสที่ต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ทั้งที่มีกำแพงศักย์ช็อคติจี้ต่ำกว่า อาจมีสาเหตุมาจากที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ได้ผ่านการชินเตอริงที่อุณหภูมิ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งกระบวนการชินเตอริงนี้ทำให้รอยสัมผัสช็อคติจี้ระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็นมีคุณสมบัติมากขึ้น อีกทั้งช่วยลดผลของสถานะพื้นผิวอีกด้วย เป็นผลให้กระแสมีค่าต่ำกว่า 25] ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการดังกล่าว จึงยังคงมีผลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

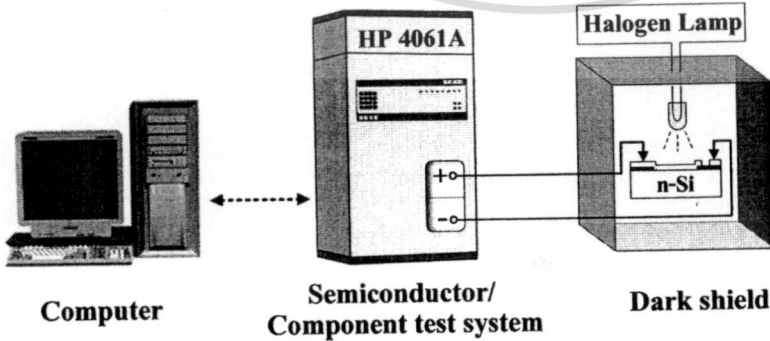
านะพื้นผิว ที่เกิดจากการไม่เข้ากันของ โครงสร้างผลึกระหว่างซิลิคอนชนิดเอ็น และ ITO จึงเป็น ให้มีกระแสมืดสูงกว่ำนั่นเอง [4.21]



รูปที่ 4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง

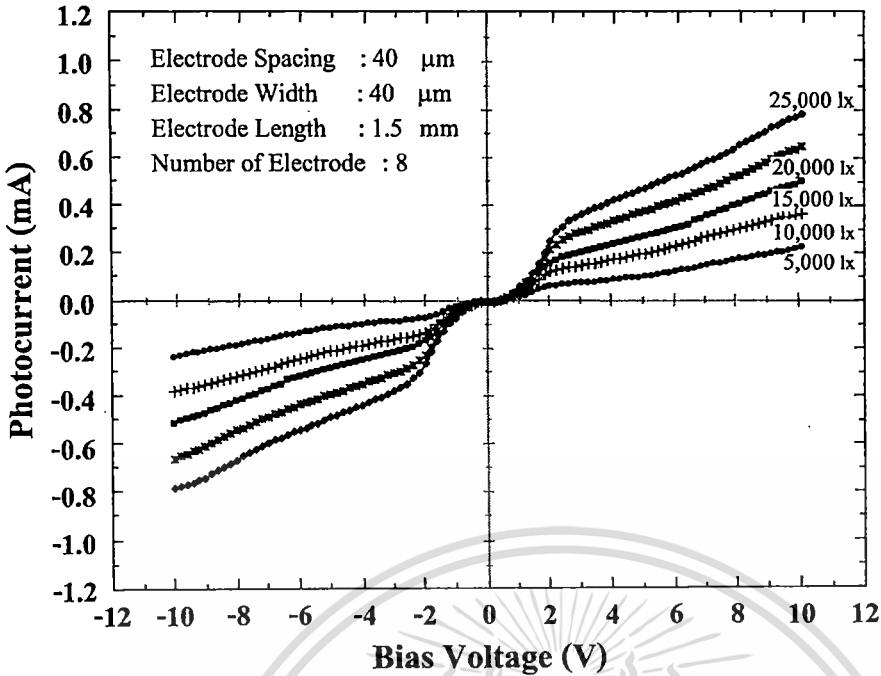
4.4.1.2 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเพื่อหาค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่า ่าง ๆ และตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของกระแสแสงกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไป จะทำการ ่อวงจร โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ของบริษัท Stocker & Yale รุ่น 20 Series ดัง แสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่ 4.21 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในช่วง 5,000-25,000 lux

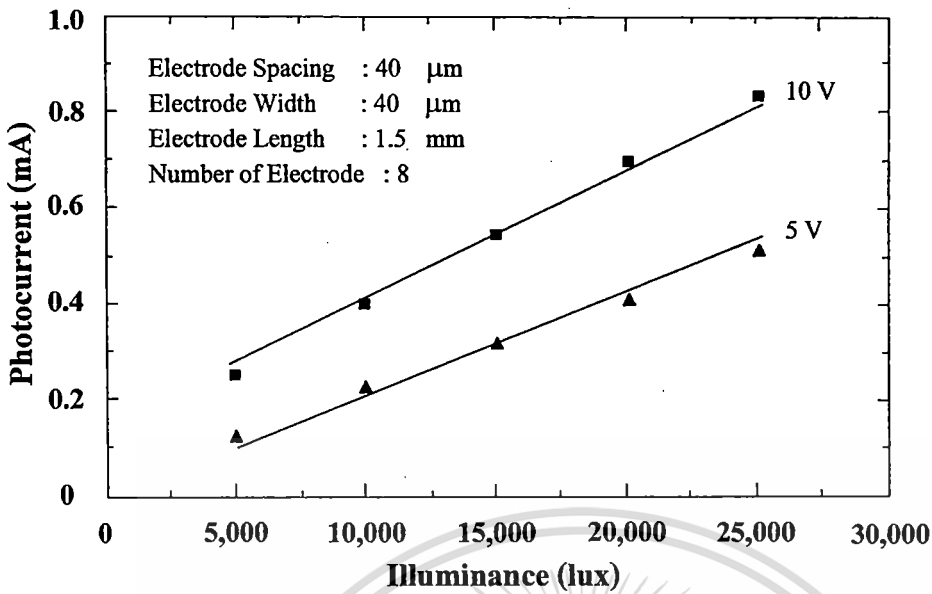
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงค่าต่าง ๆ โดยที่กระแสแสง (I_{photo}) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.17 คือ

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

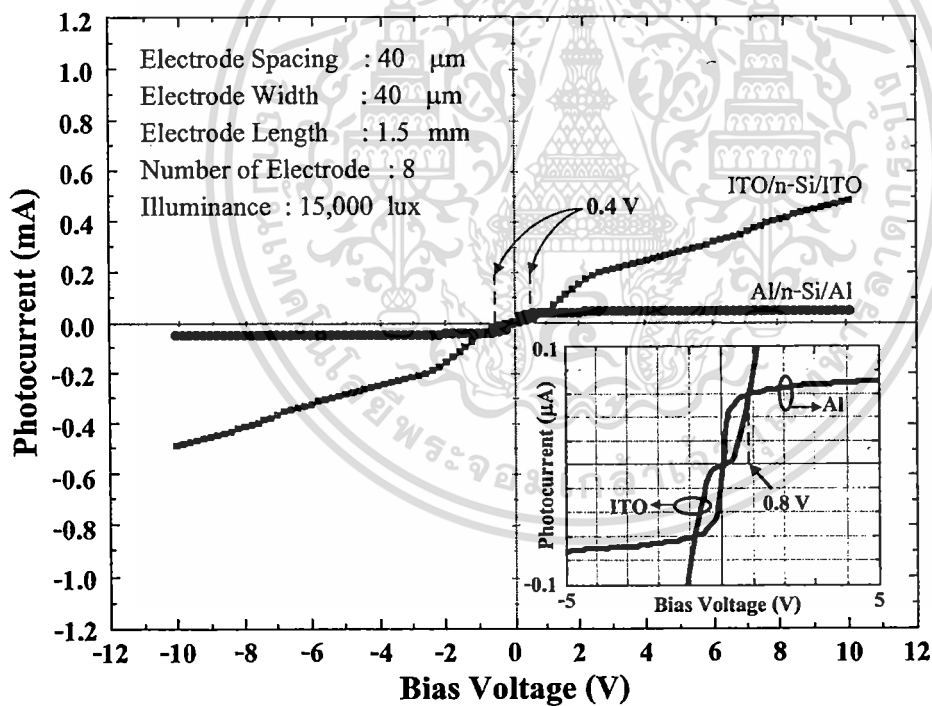
ที่ I_{mea} คือ กระแสรวมที่วัดได้จากวงจรที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในรูปที่ 4.21 เห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นสามารถตอบสนองต่อแสง กระแสตรงได้เป็นอย่างดี โดยกระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น ดัง ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงได้ในรูปที่ 4.22 ซึ่งที่แรงดันไบอัส 5 V จะมี กระแสแสงที่ความเข้มแสง 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 จะมีอัตราส่วนของกระแสแสง ต่อกระแสมืดประมาณ 1,400 และ 1,900 เท่า ตามลำดับ ซึ่งจากลักษณะสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นทำ ให้ทราบได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสงได้ แม้ความเข้มแสงที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าน้อยก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V



รูปที่ 4.23 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด 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-แรงดันของทั้งสองชนิดนี้แสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีคุณสมบัติที่ไวต่อแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al

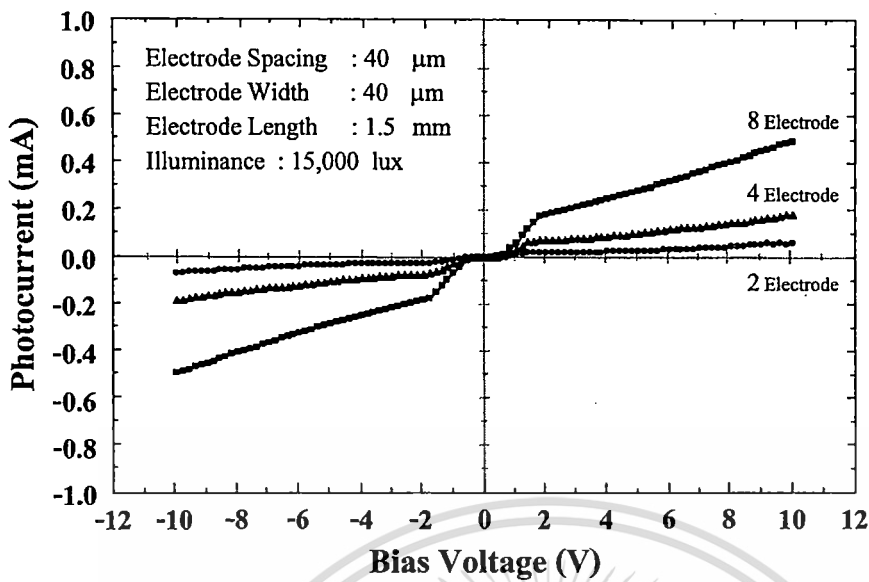
แรงดันในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัสประมาณ 0-0.4 V กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO จะมีค่าต่ำมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสง แรงดันไบอัสจะไปตกคร่อมที่บริเวณชั้นของออกไซด์บาง ๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.13 มากกว่าที่บริเวณปลอดพาหะ เนื่องจากค่าความต้านทานในชั้นออกไซด์มีค่าสูง [4.21, 4.26-4.28] ดังนั้นในช่วงแรงดันไบอัสต่ำ แรงดันไบอัสจึงมีผลต่อบริเวณปลอดพาหะค่อนข้างน้อย ทำให้ยังคงมีพื้นที่ที่เกิดกระแสแสงน้อย กระแสแสงจึงมีค่าต่ำ ต่อมาเมื่อให้แรงดันไบอัสสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่ามากพอที่จะส่งผลต่อบริเวณปลอดพาหะได้ ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างขึ้นตามแรงดันไบอัส ดังนั้นกระแสแสงที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันจะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัส 0-0.8 V กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าน้อยกว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO นั้น ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานที่แรงดันไบอัสค่าต่ำ ๆ หรือที่แรงดันไบอัสต่ำกว่า 0.8 V

4.4.1.3 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 เท่าจะทำให้กระแสแสงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนขั้วไฟฟ้าทำให้บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นบริเวณด้านใต้ และด้านข้างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่ามากขึ้นนั่นเอง โดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ต่างก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [4.16]

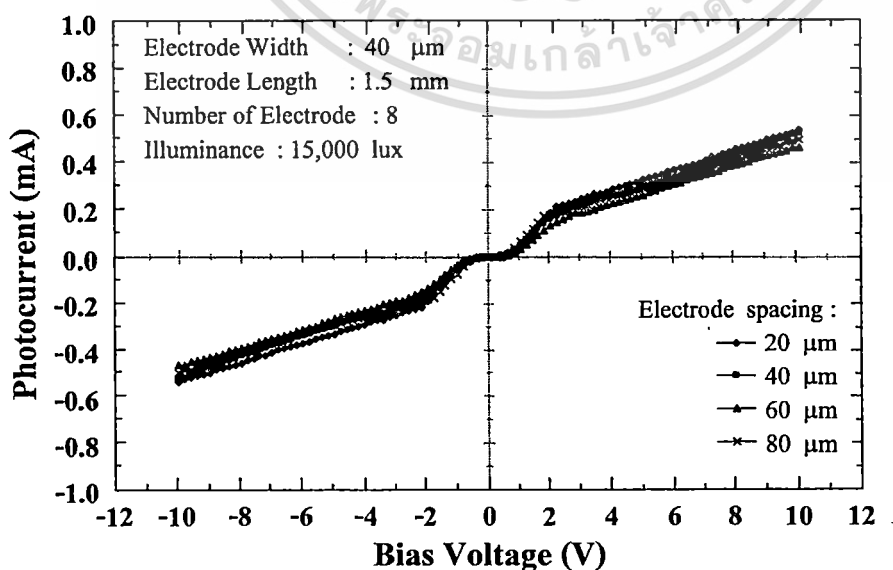
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสงมีจำนวนขั้วไฟฟ้ามากที่สุด โดยคำนึงถึงอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืด และข้อจำกัดของแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ขนาดโพกัสของแสงที่ตกกระทบจะต้องครอบคลุมบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งหมด เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้อย่างถูกต้อง



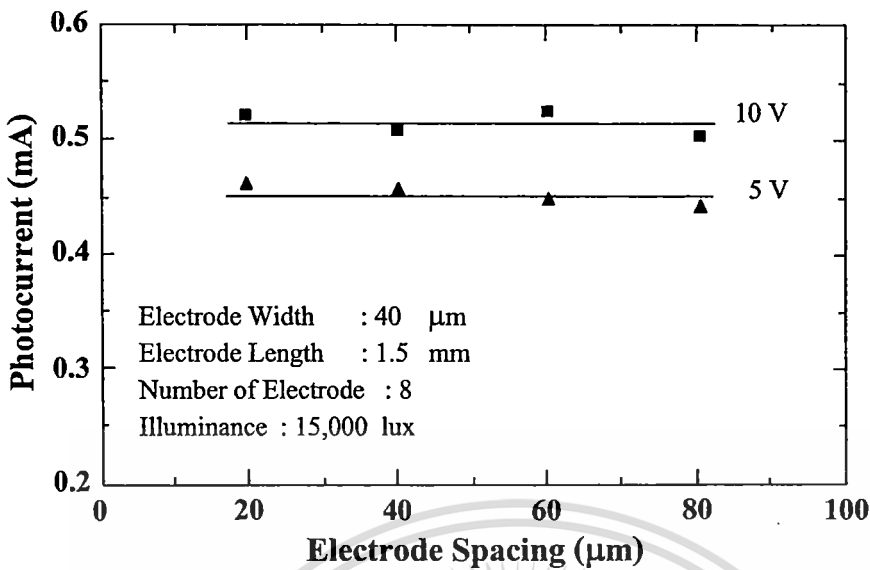
รูปที่ 4.24 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ตั้งแต่ 2, 4 และ 8 ขั้ว

4.4.1.4 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

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



รูปที่ 4.25 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

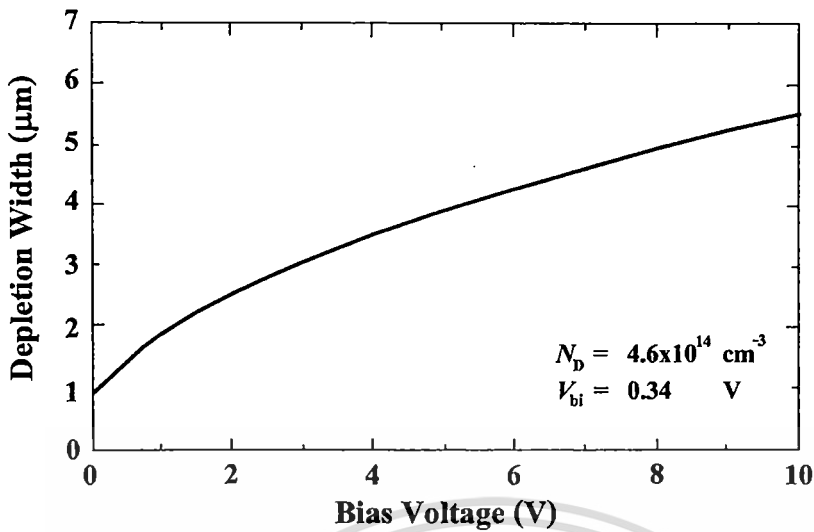


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

โดยสาเหตุที่กระแสแสงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) ที่คำนวณเทียบกับแรงดันไบอัสจากสมการที่ 4.18 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัส 10 V จะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวประมาณ 5.4 μm ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยที่สุดของตัวตรวจจับแสงที่สร้างขึ้นมีขนาดถึง 20 μm ดังนั้นพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วไฟฟ้าจึงประกอบไปด้วยบริเวณปลอดพาหะ และบริเวณที่เป็นกลาง หรือบริเวณนิวทรัลซึ่งแสดงสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า คือ ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เนื่องจากพิจารณาว่าแรงดันไบอัสทั้งหมดจะตกคร่อมเฉพาะที่บริเวณปลอดพาหะ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระแสแสงส่วนมาก ดังนั้นการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งไม่ได้เป็นการเพิ่มพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะ จึงทำให้กระแสแสงที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง [4.29-4.31] โดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจจับแสง Al/n-Si/Al นั้น ให้ผลเช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสง ITO/n-Si/ITO และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [4.16]

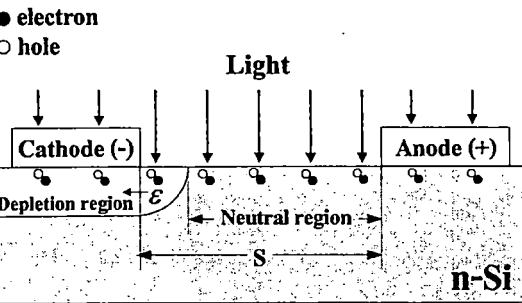
$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} + V_A) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

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

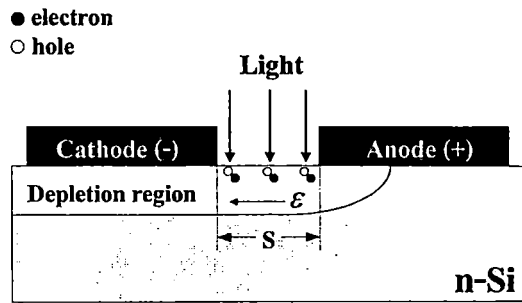


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัส และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

ดังนั้นในการออกแบบขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM ในลักษณะอินเตอร์ดิจิตัล จึงควรออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดไม่กว้างจนเกินไปเพื่อลดพื้นที่บริเวณนิวทรัล อีกทั้งเป็นการลดขนาดของตัวตรวจวัดแสงได้อีกด้วย แต่การลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจนกระทั่งมีบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะ S ทั้งหมดจะทำให้โครงสร้างรวมถึงหลักการการทำงานของตัวตรวจวัดแสงเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 4.28 กล่าวคือ โครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง ที่สร้างลงบนซิลิคอนชนิดเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ก) กระแสแสงจะเกิดขึ้นเนื่องจากโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทดเป็นส่วนใหญ่ โดยเกิดขึ้นเฉพาะภายในบริเวณปลอดพาหะ ส่วนกรณีโครงสร้าง MSM ที่มีบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะ S ทั้งหมด หรือ MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ข) กระแสแสงจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของทั้งอิเล็กตรอนและโฮล โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด ดังนั้นตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้นจึงเป็นอีกหนึ่งโครงสร้างที่สามารถเพิ่มกระแสแสงของตรวจวัดแสง MSM ได้ โดยสามารถให้กระแสแสงสูงกว่า MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างมากกว่า 2 เท่า [4.32] แต่การออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้นนั้นจำเป็นต้องใช้กระจัดแบบโครเมียมที่มีความคมชัดสูง เนื่องจากมีขนาดลวดลายที่เล็ก ซึ่งกระจัดแบบโครเมียมนี้มีราคาค่อนข้างสูง ต่างจากตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างที่สามารถสร้างกระจัดแบบได้ง่ายและมีราคาถูก อีกทั้งยังสามารถเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงได้เช่นเดียวกัน โดยการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะแบบโปร่งใสดังเช่นในงานวิจัยนี้ เป็นต้น



(ก)

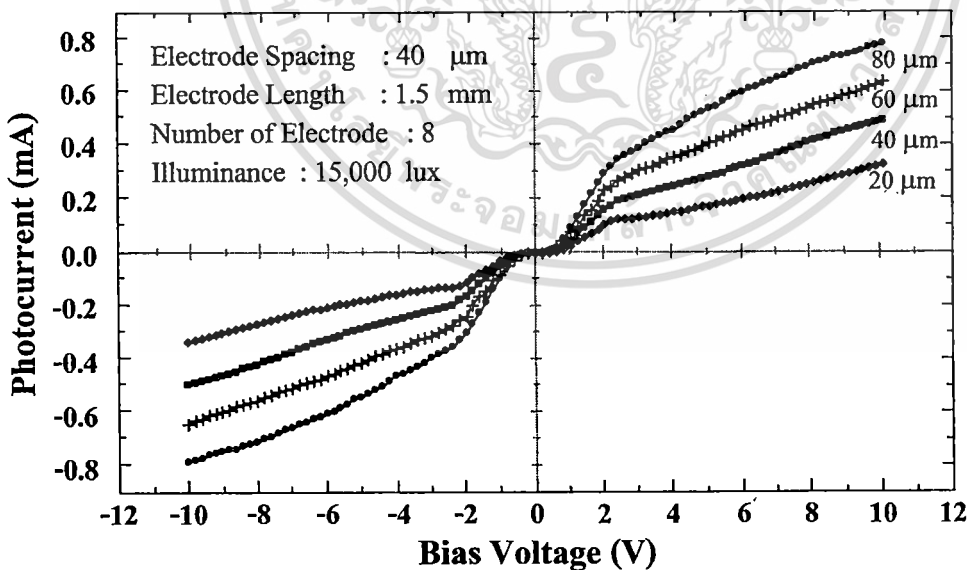


(ข)

รูปที่ 4.28 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าต่างกัน ขณะให้แรงดันไบอัส โดย (ก) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง และ (ข) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น

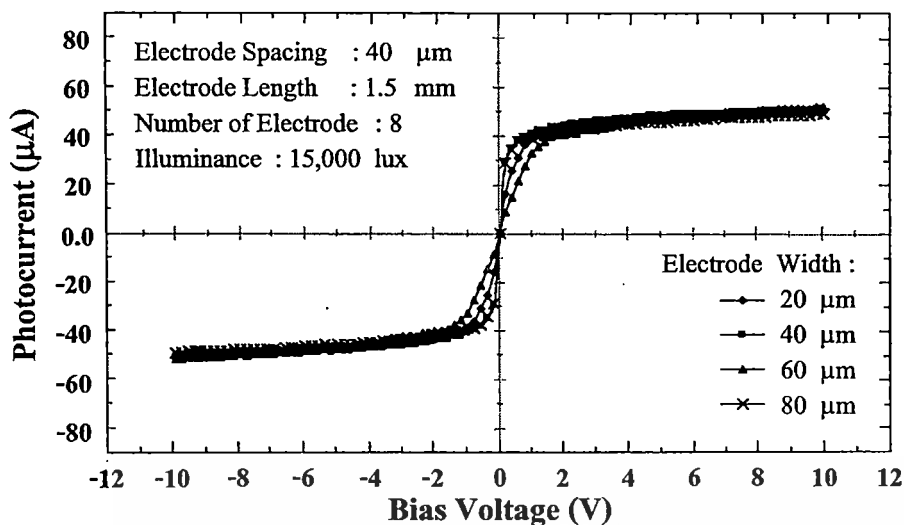
4.4.1.5 ผลของความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้างแสดงในรูปแบบที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีลักษณะของกระแสแสงแปรผันตามขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ขณะที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al กลับมีลักษณะของกระแสแสงที่คงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.30

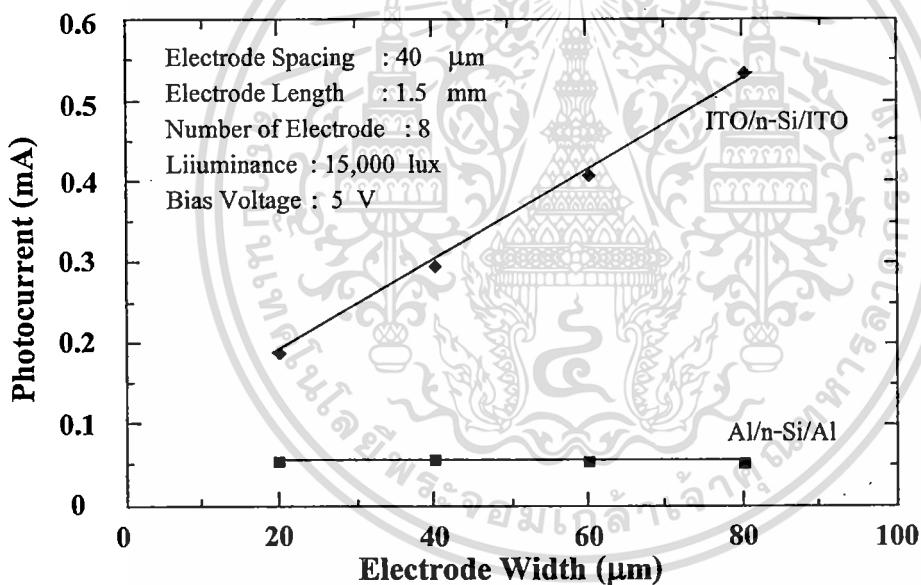


รูปที่ 4.29 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20-80 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20-80 µm



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 จะเห็นได้ว่ากระแสแสงตัวตรวจวัดแสง 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 เมื่อ

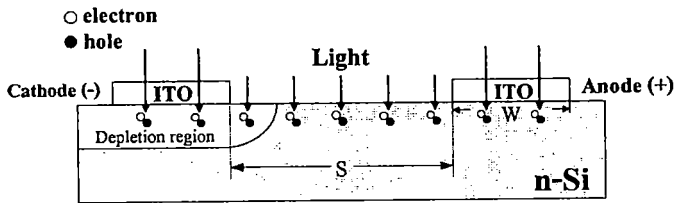
ตรวจวัดแสงมีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้เมื่อเพิ่มขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสขึ้น 20 μm จะมีกระแสแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 0.1 μA ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al นั้นมีกระแสแสงที่แรงดันไบอัส 5 V ประมาณ 46.4, 48.4, 46.8 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 ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการนำวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส ITO มาใช้สร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM นั้นสามารถเพิ่มปริมาณกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ได้ โดยการเพิ่มขนาดของขั้วไฟฟ้าจะยิ่งทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้นต่างจากตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าทึบแสงทั่วไป

โดยปริมาณกระแสแสงที่มีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al และการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงเมื่อเพิ่มขนาดความกว้างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีผลมาจากสมบัติเฉพาะตัวทางแสงของวัสดุตัวนำโปร่งใส ITO นั่นเอง กล่าวคือ ITO มีลักษณะโปร่งใสและยอมให้แสงส่องผ่านได้ตั้งแต่ความยาวคลื่น 380-2000 nm โดย ITO ที่เตรียมขึ้นในการทดลองนี้มีปริมาณโปร่งใสมากถึง 85% ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.2 ดังนั้นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองจึงสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้า ITO จนถึงบริเวณชิลิคอนชนิดอื่น หรือบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระแสแสงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ก) ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่แสงไม่สามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมลงไปได้ เนื่องจากอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นโลหะทึบแสง ดังนั้นเมื่อแสงตกกระทบลงบนขั้วไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนกลับ จึงไม่ทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอน และโฮลภายในบริเวณปลอดพาหะที่อยู่ใต้ขั้วไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.32 (ข) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีกระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ซึ่งการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้านั้นทำให้มีพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

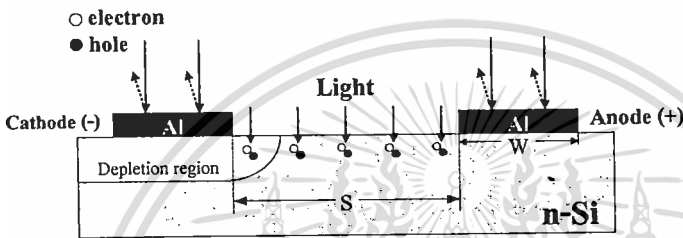
จากการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสเป็นแบบอินเตอร์ดิคิตในหัวข้อที่ 4.4.1 นั้น จะเห็นได้ว่าผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิคิต ไม่ว่าจะเป็นระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า หรือจำนวนขั้วไฟฟ้า ต่างก็ให้ผลการทดลองในลักษณะที่ใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าเป็นแบบทึบแสงของโลหะอลูมิเนียมชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น หรือของโลหะทึบแสงชนิดอื่น ๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4.14-4.17] จึงทำให้ในการทดลองต่อจากนี้ไป ในงานวิจัยนี้จึงได้ให้ความสนใจศึกษาเฉพาะตัวแปรที่ให้ผลของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปจากผลของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าเป็นแบบทึบแสง กล่าวคือจะได้ การศึกษาเฉพาะผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่มีต่อสภาพการตอบสนองทางแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม และการตอบสนองทางความถี่ต่อไป ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.32 การสะท้อน และทะลุผ่านของแสงที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

(ก) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะ โปร่งใสชนิด ITO/n-Si/ITO

(ข) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะทึบแสงชนิด Al/n-Si/Al

4.4.2 สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะ

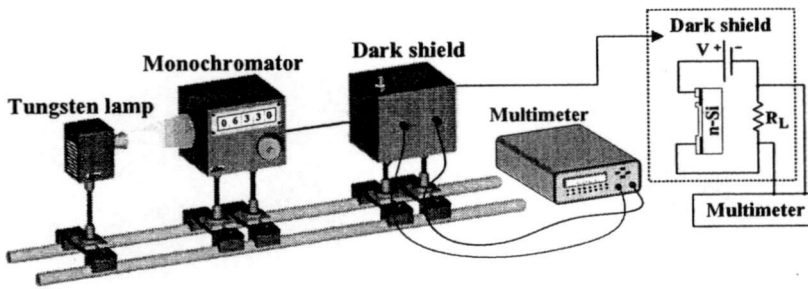
ขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงสภาพตอบสนองทางแสง (responsivity; \mathcal{R}) และประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency; η) ของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จากลักษณะของอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อพลังงานแสงค่าต่าง ๆ ที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสง โดยได้ทำการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสที่มีต่อสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม อีกทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา

ทำการต่อวงจรเพื่อใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.33 โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดทังสเตน (tungsten lamp) แล้วส่งผ่านไปยังเครื่อง โมโนโครมาเตอร์ (monochromator) ของบริษัท Nikon รุ่น G-250 เพื่อให้แสงสามารถผ่านได้เฉพาะความยาวคลื่นแสงที่กำหนด (500-1,000 nm) โดยแสงที่ผ่านจากเครื่อง โมโนโครมาเตอร์จะถูกวัดพลังงานแสง (พลังงานอินพุท: P_m) ด้วยเครื่องเพาเวอร์มิเตอร์ (power meter) ของบริษัท Edmund optics, Inc. รุ่น W54-018 จากนั้นแสงจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตกกระทบยังตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ทำให้เกิดกระแสแสงขึ้น (I_p) โดยจะทำการวัดกระแสแสงที่เกิดขึ้นนี้ ด้วยเครื่องมือวัดของบริษัท Keithley รุ่น 2400



ที่ 4.33 แผนภาพการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V

นำค่ากระแสแสง และพลังงานอินพุตที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาสภาพตอบสนองทางแสงจากสมการที่ 4.19 โดยความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสภาพตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความยาวคลื่นแสง 830 nm จะมีสภาพตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.039, 0.042, 0.044 และ 0.046 A/W เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ

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

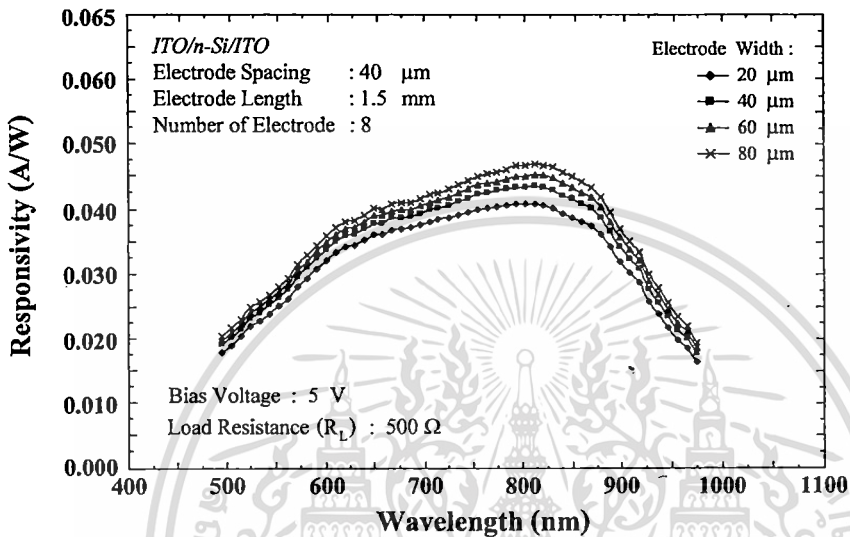
เมื่อนำสภาพตอบสนองทางแสง มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 เห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของสภาพตอบสนองทางแสงเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.34 ร่วมกับรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าสภาพตอบสนองทางแสงยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น (λ_p) เป็น 830 nm แล้วจึงมีค่าลดลงไม่เพิ่มตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสัมพันธ์กับการตกคลื่นแสง และความสัมพันธ์ของ $E = h\nu$ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3.6

เมื่อนำค่าสภาพตอบสนองทางแสงไปคำนวณหาประสิทธิภาพควอนตัม จากสมการที่ 4.20 จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.36

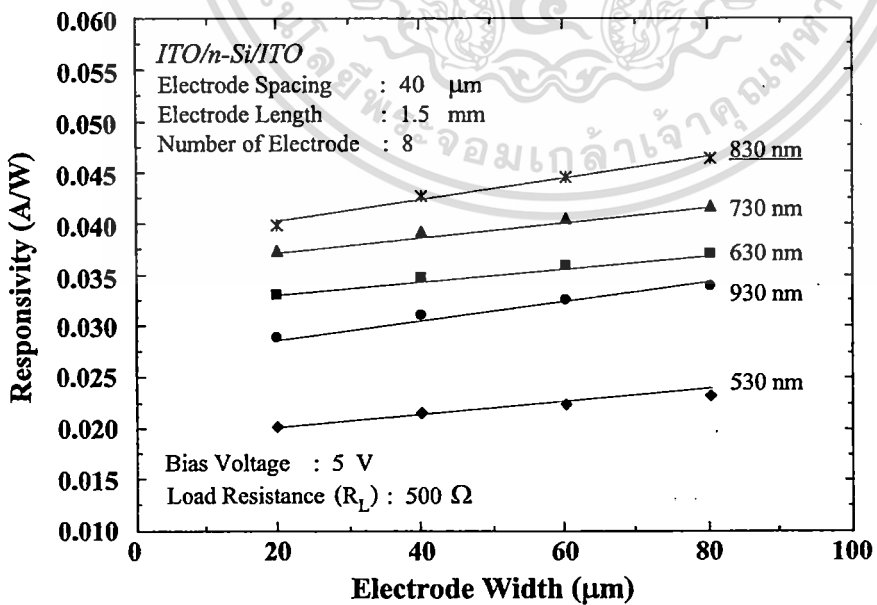
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- โดยที่ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์
 λ คือ ความยาวคลื่นแสง
 c คือ ความเร็วแสง

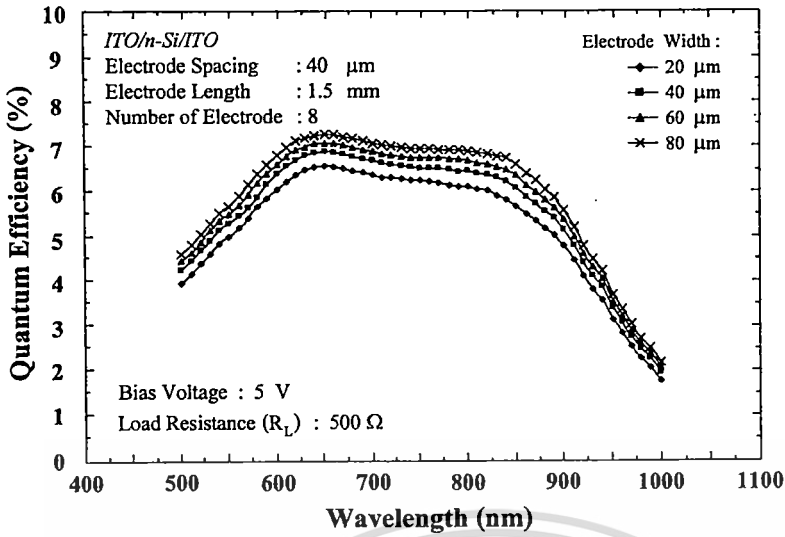


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่นในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20-80 μm



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสงกระแสตรงกับความกว้างของขั้วไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัม กับความยาวคลื่นในช่วง 500-1000 nm เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20-80 μm

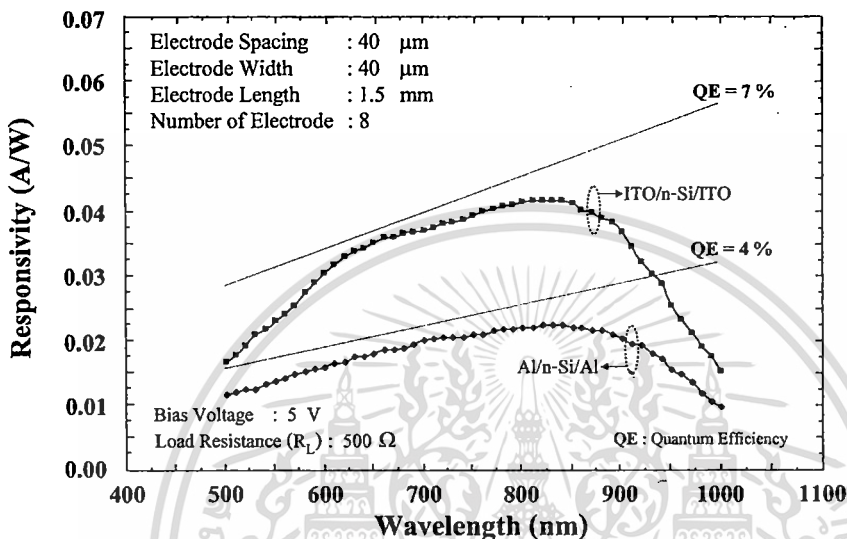
โดยจากรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO มีขนาดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันกับสภาพตอบสนองทางแสงที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ความยาวคลื่น 830 nm จะมีประสิทธิภาพควอนตัมเท่ากับ 6.0, 6.3, 6.6 และ 6.8% เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ และเมื่อทำการพิจารณาผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถตอบสนองต่อแสงกระแสดตรง โดยมีสภาพตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.046 A/W (ความยาวคลื่น 830 nm) และประสิทธิภาพควอนตัมสูงสุดเท่ากับ 7.4 % (ความยาวคลื่น 625 nm) เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 80 μm นั่นเอง

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของสภาพตอบสนองทางแสง 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 จึงได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสง กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500-1,000 nm ของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.37

จากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสง กับความยาวคลื่นเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังรูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพควอนตัมและการตอบสนองทางแสงนั้นมีลักษณะที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา โดยที่ตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al นั้นมีสภาพตอบสนองทางแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นเดียวกันคือ 830 nm ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.042 และ 0.023 A/W ตามลำดับ โดยจะ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีความสามารถในการตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้
 กว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
 วอนต์ที่สูงที่สุดของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิดพบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมี
 ประสิทธิภาพวอนต์ที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยมีค่าเท่ากับ 6.95 และ 3.66%
 ตามลำดับ



ปีที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่นเปรียบเทียบ
 ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al

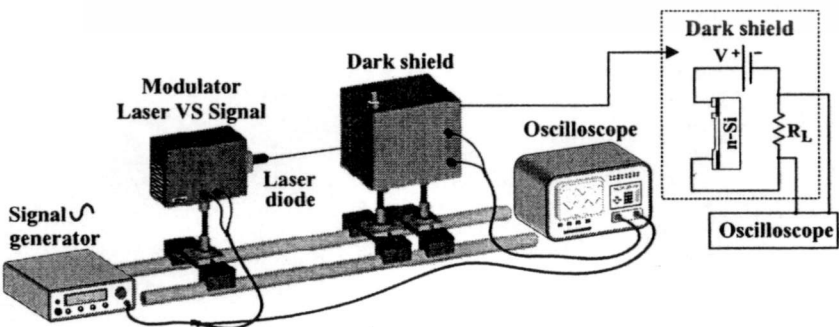
จากสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพวอนต์ของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด
 ITO/n-Si/ITO เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความ
 กว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส นั้น จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับลักษณะกระแสแสง-
 แรงดันในหัวข้อ 4.4.1 กล่าวคือสภาพตอบสนองทางแสง, ประสิทธิภาพวอนต์ และกระแสแสง
 ของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ
 ITO กว้างขึ้น และมีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งมีผลมาจากการที่สภาพตอบ
 สนองทางแสง และประสิทธิภาพวอนต์นั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่ากระแสแสงที่
 เกิดขึ้นต่อพลังงานแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายถึงผลของสภาพตอบสนองทางแสง
 และประสิทธิภาพวอนต์ได้เช่นเดียวกับผลของกระแสแสงที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ตัวตรวจวัด
 แสงที่สามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่าในขณะที่มีพลังงานแสงค่าเดียวกันตกกระทบนั้นจะมีสภาพ
 ตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพวอนต์ที่สูงกว่านั่นเอง

ถึงแม้ว่าตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จะมีสภาพตอบสนองทางแสง และประ
 สิทธิภาพวอนต์ที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แต่สภาพตอบสนองทางแสง และประ
 สิทธิภาพวอนต์ที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ไม่มี
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วนป้องกันการสะท้อน (antireflection) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน หรือจากลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นแบบกว้าง ทำให้กระแสแสงที่เกิดขึ้นนั้นส่วนมากจะเกิดมาจากประจุของพาหะส่วนน้อยหรือโฮลในบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นถ้าพิจารณาถึงประสิทธิภาพควอนตัมที่มีความหมายถึงจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวน โฟตอนที่ตกกระทบ จึงจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ส่วนหนึ่งน่าจะลดลงเนื่องจาก โครงสร้างดังกล่าว หรืออาจเกิดขึ้นจากการที่ชั้นออกไซด์บางๆ หรือสถานะพื้นผิวที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นทำหน้าที่เป็นกับดักพาหะ (hole traps) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับออกไซด์ (SiO_x) ดังนั้นเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับการกระตุ้นจากแสงที่ตกกระทบและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น โฮลที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะจะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าแรงให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วแคโทดเพื่อเกิดเป็นกระแสแสง แต่ทันทีที่โฮลถูกแรงกระทำของสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่โฮลกลับถูกกับดักโฮลที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับออกไซด์จับ ทำให้กระแสแสงที่น่าจะเกิดขึ้น ได้อีกส่วนหนึ่งลดลงไป ด้วยเหตุนี้จึงอาจส่งผลให้สภาพตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีค่าน้อยลงนั่นเอง [4.21, 4.26]

4.5 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสงกระแสสลับ เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ [4.33]

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



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

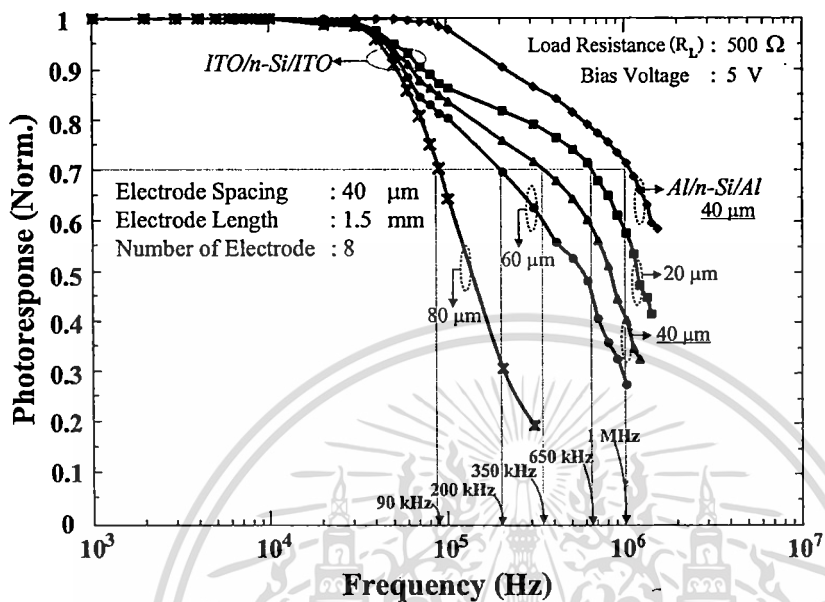
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการต่อชุดทดลองดังรูปที่ 4.38 โดยใช้แหล่งจ่ายแสงจากเลเซอร์ไดโอด (laser diode) ของบริษัท RS components Co., Ltd. รุ่น Beta TX series no.194-004 ความยาวคลื่น 670 nm กำลังงาน 67 mW และทำการมอดูเลท (modulated) สัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sine wave) เข้ากับเลเซอร์ไดโอด ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) ของบริษัท Tektronix Co., Ltd. รุ่น AFG 300 โดยรับสัญญาณให้มีขนาด 400 mV_{pp} จากนั้นฉายแสงไปยังตัวตรวจวัดแสงที่ถูกต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน $500 \ \Omega$ และป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 5 V เพื่อวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป ขณะป้อนสัญญาณความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณค่าต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตในลักษณะนอร์มอลไลซ์ (normalize) กับความถี่ในระบบกึ่งล็อก เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ที่มีค่าสูงสุด หรือความถี่คัทออฟ (cutoff frequency: f_c) ดังแสดงในรูปที่ 4.39

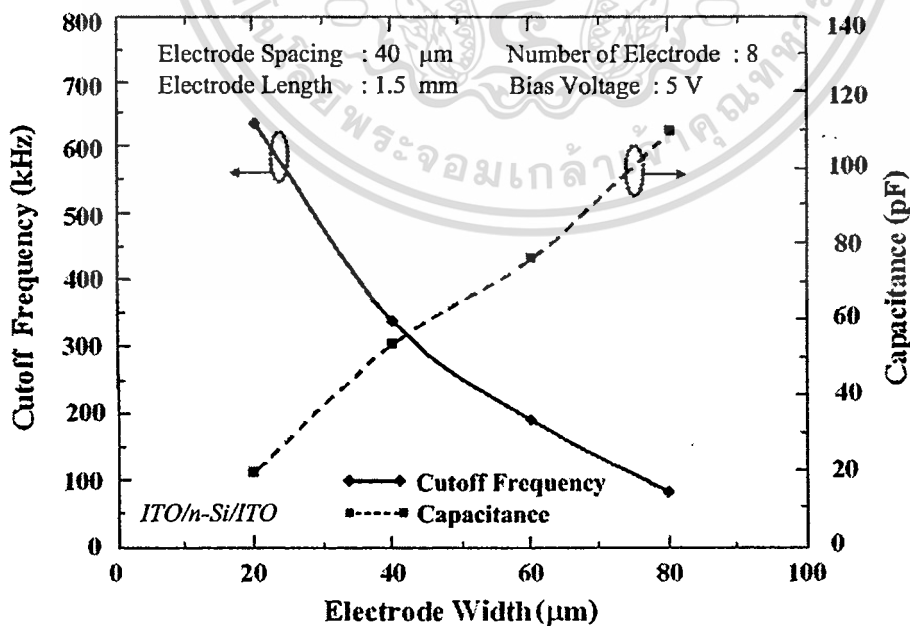
ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ต่อผลตอบสนองทางความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 20, 40, 60 และ $80 \ \mu\text{m}$ จะทำให้ความถี่คัทออฟมีการเปลี่ยนแปลงจาก 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz และ 90 kHz ตามลำดับ กล่าวคือความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าลดลงเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากการที่ความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่ของรอยสัมผัส ทำให้เมื่อความกว้างขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นจึงมีค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 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

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 mm และมีจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าความถี่คัทออฟเท่ากับ 350 kHz โดยมีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีความถี่คัทออฟเท่ากับ 1 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 ทำให้เวลาในการคำนวณไม่ต่างกันเท่าไรนัก อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นการส่งผ่าน (transit time) และเวลาในการแพร่ (diffusion time) ของพาหะผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นออกไซด์กับซิลิคอนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการล่าช้ากว่าจะได้รับกระแสแสง หรือกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทออกมาทำให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าต่ำนั่นเอง [4.21, 4.26]



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



รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คutoff และความจุไฟฟ้ากับความกว้างของขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

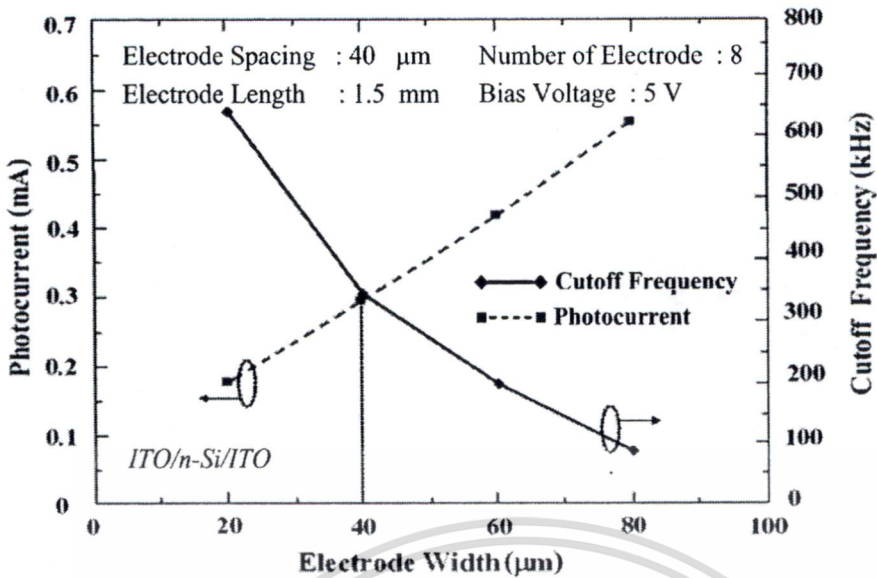
จากผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า และการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ต่อสัญญาณแสงกระแสตรงและกระแสสลับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดิเจิตท รวมถึงทำการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO สามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้เป็นอย่างดีโดยสามารถให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ถึง 10 เท่าที่แรงดันไบอัส 10 V รวมถึงมีสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมมากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al อีกด้วย และเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของ ITO จึงทำให้การเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีผลทำให้การตอบสนองทางแสงกระแสตรงเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าที่บวมแสงทั่วไป แต่ในส่วนของ การตอบสนองต่อแสงกระแสสลับนั้นจะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO สามารถให้การตอบสนองได้ดีต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยจะเห็นได้จากความถี่คutoff ที่มีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ซึ่งสอดคล้องกับผลของความจุไฟฟ้าที่ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ให้มีความกว้างของขั้วไฟฟ้ามักขึ้นนั้นจะส่งผลให้การตอบสนองต่อแสงกระแสตรงดีขึ้น แต่กลับทำให้การตอบสนองทางความถี่ลดต่ำลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าขนาดของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ คือ ที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm เนื่องจากที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาด 20 μm การตอบสนองต่อแสงกระแสตรงจะมีค่าลดลง และถ้าความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาด 60 และ 80 μm จะทำให้มีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำนั่นเอง โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อการตอบสนองทางแสงใด ๆ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับกับความกว้างของขั้วไฟฟ้าคือ 40 μm จึงมีความเหมาะสมที่สุด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความถี่ที่ออฟกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า

1.6 เอกสารอ้างอิง

- [4.1] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech, S. Ueamanapong and N. Atiwongsangthong, "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
- [4.2] Dieter K. Schroder, **Semiconductor Material and Device Characterization**, 2nd, 1998, pp. 147-159
- [4.3] H. Murrman and D. Widman, "Current crowding on metal contacts to planar devices", IEEE Trans. Electron. Devices, vol. ED-16, 1969, pp. 1022
- [4.4] G.K. Reeves and H.B. Harrison, "Obtaining the Specific Contact Resistance from Transmission Line Model Measurement", IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-3, No. 5, 1982, pp.111-113
- [4.5] Norman G. Einspruch, Simon S. Cohen, and Gennady Sh. Gidenblat, **VLSI Electronics Microstructure Science** 13, 1986, pp. 97-111
- [4.6] I. Srithanachaia, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen and 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 & IWOFM 2), 2008, pp. 22-25

- 4.7] สมเกียรติ สุภคเดช, เขมิกอนดักเตอร์ฟิล์มส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544
- 4.8] 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
- 4.9] 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
- 4.10] 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
- 4.11] 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
- 4.12] 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
- 4.13] 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
- 4.14] ชเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สราวุธ วิศวกรรมวิศวะแสงสุข "ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, พ.ศ. 2547, หน้า 14-19
- 4.15] ชเนศ โชะเหม, มานิตา คิ้วแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด ชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2548, หน้า 13-18
- 4.16] มานิตา คิ้วแสง, การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิต, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- 4.17] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, วรเทพ น้อยปรีชา และ สัญญา คุณขาว, "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบสลิตเดี่ยวที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก ชนิด Al/n-Si/Al "
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Si/Al”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), พ.ศ. 2550, หน้า 592-595
- 4.18] สมเกียรติ สุภเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545
- 4.19] Chino K, “Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment”, Solid- State Electronics, Vol. 16, 1973, pp. 119-121
- 4.20] 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
- 4.21] 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
- 4.22] H. Kobayashi, T. Lshida, K. Nakamura, Y. Nakato and 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. 72, 1992, pp. 5288
- 4.23] 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, 1993, pp. 4344
- 4.24] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีกระแสสูง โดยใช้ขั้วโลหะโปร่งใส”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2553, หน้า 25-30
- 4.25] ธเนศ โชะเหม, **การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา**, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- 4.26] M. Seto, C. Rochefort, S. de Jager, Hendriks, R. F. M. Hooft and 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, No. 13, 1999, pp. 1976-1978
- 4.27] M.-K. Lee, Y.-C Tseng and 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4.28] D. V. Sviridov and 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
- [4.29] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมาร์, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [4.30] S. Khunkhao, Y. Yasumura, K. Kitagawa, T. Masui and K. Sato, "On Laterally Spreading of Space-Charge-Region in Planar Metal-Semiconductor-Metal Structures", *Solid-State Electronics*, Vol. 47, No. 10, 2003, pp. 1811-1816
- [4.31] S. Niemcharoen, K. Kobayashi, M. Kimura and K. Sato, "Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Condition", *Solid-State Electronics*, Vol. 45, No. 10, 2001, pp. 1815-1819
- [4.32] วรเทพ น้อยปรีชา, การออกแบบและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552
- [4.33] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วโลหะโปร่งใส", *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2554, หน้า 25-30

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากจุดมุ่งหมายของงานวิจัยที่ต้องการเพิ่มปริมาณกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ให้มากยิ่งขึ้น ด้วยการเพิ่มพื้นที่ของบริเวณรับแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ให้มากขึ้น โดยวัสดุนำไฟฟ้าที่มีลักษณะโปร่งใส ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าลงบนซิลิคอน ชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดแสงที่มีความเข้มน้อย ๆ ได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอพสปิดเตอร์ริงที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาตั้งแต่ประมาณ 200-1200 nm ก่อนที่จะนำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาถึงความหนาที่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM พบว่าสมบัติต่าง ๆ ของ ITO นั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์ม ITO เนื่องจาก ITO มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง คือ มีขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้น โดยสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO คือ ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขณะที่สภาพต้านทานจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงสมบัติทางแสงของ ITO พบว่า เปอร์เซนต์การส่องผ่านทางแสงของ ITO ลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งสมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของ ITO มีค่าแปรผกผันกัน กล่าวคือ เมื่อ ITO มีสมบัติทางไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้มีสมบัติทางแสงลดลง ดังนั้นจึงต้องทำการหาความเหมาะสมระหว่างสมบัติทั้งสอง และพบที่ความหนาประมาณ 500 nm เป็นความหนาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นความหนาที่น้อยที่สุด ITO มีทั้งสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีควบคู่กับสมบัติทางแสงที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ให้มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล และมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ ไม่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W), ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) และจำนวนขั้วไฟฟ้า (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 ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล โดยใช้การกัดชั้นฟิล์ม ITO ด้วยเทคนิคลิฟออฟตามขั้นตอนความหนาข้างต้นแล้ว จึงได้นำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนี้ไปทำการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง สามารถสรุปสาระสำคัญต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดแสงความเข้มน้อย ๆ ได้เป็นอย่างดีตามที่ได้คาดการณ์ไว้ เนื่องจากให้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระแสรั่วไหล หรือกระแสมืดที่ค่อนข้างต่ำ โดยที่กระแสแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส และความเข้มแสง อีกทั้งมีปริมาณกระแสแสงที่สูง โดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง 25,000 lux แรงดันไบอัส 10 V มากถึง 1,900 เท่า และมีกระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากัน (ที่แรงดันไบอัส 10 V) ถึง 10 เท่า โดยมีลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพตอบสนองทางแสงที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวทางแสงของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่ทำให้แสงสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าจนกระทั่งถึงบริเวณซิลิคอนชนิดเอ็นหรือบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระแสแสงส่วนใหญ่ได้ ทำให้แสงสามารถไปกระตุ้นอิเล็กตรอนและโฮลภายในบริเวณปลอดพาหะที่อยู่ใต้ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสแสงขึ้น ซึ่งการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้าจะทำให้พื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มีลักษณะสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง โดยมีกระแสแสงเท่ากับ 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 mA, ประสิทธิภาพควอนตัมเท่ากับ 6.0, 6.3, 6.6 และ 6.8% และสภาพตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.039, 0.042, 0.044 และ 0.046 A/W เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ ทำให้ผลที่ได้แตกต่างไปจากตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสงโดยทั่วไป ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงจำนวน และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าให้ผลที่ใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง กล่าวคือ กระแสแสงและกระแสมืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แต่กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิคทีเทคนิค ITO/n-Si/ITO นั้นยังคงมีกระแสแสงที่แรงดันไบอัส 0-0.8 V ที่ค่อนข้างน้อย และน้อยกว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากัน จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงในงานวิจัยนี้อาจจะไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานที่แรงดันไบอัสค่าต่ำๆ หรือแรงดันไบอัสต่ำกว่า 0.8 V

ในส่วนของการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้านั้นส่งผลให้การตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าลดต่ำลง โดยมีค่าเท่ากับ 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz และ 90 kHz เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ โดยตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีการตอบสนองทางความถี่อยู่ในระดับที่ไม่สูงมากนักโดยมีความถี่คัทออฟที่น้อยกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากันอยู่ประมาณ 0.35 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยจากการทดลองอาจกล่าวได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm นั้นมีการตอบสนองต่อแสงทั้งกระแสตรง และกระแสสลับได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ISSN 0125-1724

LADKRBANG ENGINEERING JOURNAL



วิศวกรรมลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีที่ 28 ฉบับที่ 1

เดือนกุมภาพันธ์ 2554

วิศวกรรมโทรคมนาคม

- 1. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นชนิดเรียงตรงในรูปแบบวงจรรวมซีมอส บัณฑิตวิเศษ *ภัทรศรณศิริ มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ* 1
- 2. วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์โหมดกระแสโดยใช้ CCCTA เพียงตัวเดียว *ผาณิต ละมุล มนตรี คำเงิน ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ กอบชัย เดชหาญ* 7

วิศวกรรมไฟฟ้า

- 3. การพัฒนาต้นแบบวงจรดับเบิ้ลอินพุตมีลิตเปิดเอาต์พุตแบบรวมวงจรขาทรานซิสเตอร์ *ปรัชญา สัตยารักษ์ กลุ่มมาลัย เฉลิมยานนท์ ณัฏฐา จินดาเพชร* 13

วิศวกรรมเครื่องกล

- 4. การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของปล่องหลังคาโซลาร์เซลล์ระบายอากาศแบบธรรมชาติ ร่วมกับพัดลมกระแสตรงภายใต้สภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร *ปริศนา จันทร์พงษ์* 19

วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

- 5. การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วโลหะโปร่งใส *สุรศักดิ์ เมียมเจริญ* 25
- 6. ผลกระทบของการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น *สุรดา เอื้อมานะพงษ์ อิศระ ศรีธนชัย สุรศักดิ์ เมียมเจริญ อัมพร โทธิโย* 31

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

- 7. การศึกษากิจกรรมใช้อุปทานแบบยืดหยุ่นต่อสมรรถนะขององค์กร : กรณีศึกษากลุ่มผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ไทย *ทศพล เกียรติเจริญผล ธนพล ประเสริฐนล* 37
- 8. การลดพฤติกรรมเสี่ยงของพนักงานด้วยหลักพฤติกรรมความปลอดภัย กรณีศึกษา โรงงานผลิตอะไหล่และประกอบนาฬิกา *ศิริพร เข้มทอง สิทธิพร ทิมพิศกุล* 43
- 9. การศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดตั้งโรงงานผลิตด้านกะสามะพร้าวอัดแห้งในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ *รักษ์ ผิวนิม สิทธิพร ทิมพิศกุล* 49

วิศวกรรมเคมี

- 10. การสร้างแบบจำลองศึกษาการระบายอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ *อัศวินวิทย์ เมื่อกนาโพธิ์ สุรัตน์ อารีรัตน์* 55

http://www.kmitl.ac.th/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optical Response of MSM Structure Photodetector Using Indium Tin Oxide as Transparent Electrodes

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำย่อ

บทความนี้นำเสนอการวัดการตอบสนองทางแสงแบบกระแสสลับ (ac) ในช่วงความถี่ต่ำ (1 kHz-2 MHz) ของตัวตรวจแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น โดยใช้อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต จากการศึกษาทดลองการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO จะมีค่าลดลง เมื่อให้ความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น เนื่องจากความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่มีค่ามากขึ้น พบว่า ตัวตรวจวัดแสงที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเป็น 20, 40, 60 และ 80 μm จะทำให้ความถี่คutoffมีการเปลี่ยนแปลงลงเป็น 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz และ 90 kHz ตามลำดับ

คำสำคัญ : ตัวตรวจวัดแสงแบบสารกึ่งตัวนำ; ซิลิคอนโฟโตดีเทคเตอร์; โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ; อินเดียมทินออกไซด์/เอ็น-ซิลิคอน/อินเดียมทินออกไซด์; ซีออคไซด์โฟโตไดโอด

Abstract

This paper reported the alternating current (ac) characteristics on low frequency (1 kHz-2 MHz) optical response of the n-silicon based metal-semiconductor-metal (MSM) structure photodetectors using indium tin oxide (ITO) as the interdigitated transparent electrodes. The experimental results showed that as the electrode width increased, the optical response of ITO/n-Si/ITO was reduced because the contact capacitance increased. The changing electrode widths of ITO/n-Si/ITO photodetectors were 20, 40, 60 and 80 μm , the cutoff frequencies were 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz and 90 kHz, respectively.

Key words : Semiconductor photodetector; Silicon Photodetector; Metal-semiconductor-metal; ITO/n-Si/ITO; Schottky Photodiode

บทนำ

ฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide) หรือฟิล์ม ITO เป็นสารกึ่งตัวนำแบบดีเจเนอเรต ชนิดเอ็น (n-type degenerate semiconductor) ที่มีช่องว่างแถบ

พลังงานกว้าง (~ 3.8 eV) [1] และด้วยการเจือดีบุก (tin: Sn) เข้าไปในอินเดียมออกไซด์ ทำให้ฟิล์ม ITO มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ($\approx 10^{-3}$ - 10^{-4} $\Omega\text{-cm}$) [2, 3] และมีความโปร่งใสสูง แสงสามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์ม ITO ได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

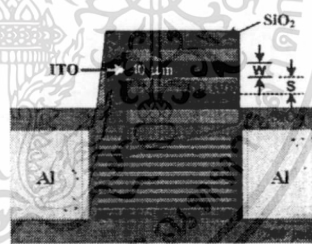
มากกว่า 85% [2]) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้าง
 ขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลาย
 ชนิด ดังเช่น ใช้สร้างในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง
 (optoelectronic devices) , ทรานซิสเตอร์แบบฟิล์มบางที่
 ทำงานด้วยสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric
 thin film transistor) และอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก
 (photovoltaic devices) [4-6] เป็นต้น ถึงแม้ว่าวัสดุที่ใช้
 ขั้วโลหะโปร่งใสจะมีหลายชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์
 (ZnO), แคดเมียมออกไซด์ (CdO) และแกเลียมอินเดียม
 ออกไซด์ (GaInO₃) เป็นต้น แต่วัสดุโปร่งใส ITO กลับ
 ได้รับความสนใจมากกว่าวัสดุโปร่งใสชนิดอื่น ๆ เพราะ
 ในช่วงที่ตามองเห็นสามารถทะลุผ่านได้ดี, มี
 ความคงทน และสามารถยึดเกาะกับซิลิคอน หรือซิลิคอนได
 ออกไซด์ได้ดี ส่วนกระบวนการสร้างฟิล์ม ITO สามารถ
 สร้างได้หลายวิธี เช่น การระเหยในสุญญากาศ, การสปัต
 เตอร์, การจุ่ม และการพ่น เป็นต้น นอกจากนี้รอยสัมผัส
 เกิดขึ้นระหว่างซิลิคอนกับฟิล์มบาง ITO ยังเป็นรอย
 สัมผัสแบบซีดดีก็ส์ ทำให้สามารถสร้างเป็นอุปกรณ์สาร
 ตัวนำได้หลายชนิด ดังเช่น โซลาร์เซลล์ [6], ตัวตรวจ
 แสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ [7] และตัว
 ตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ [8]

ในบทความนี้นำเสนอการศึกษาการตอบสนองทาง
 แสงแบบกระแสสลับ (ac optical response) ในช่วงความ
 ความถี่ตั้งแต่ 1 kHz ถึง 2 MHz ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง
 MSM ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตที่สร้างขึ้นบนแผ่น
 ซิลิคอนรองซิลิคอน ชนิด n โดยใช้ฟิล์มบาง ITO ทำหน้าที่
 เป็นขั้วโลหะโปร่งใส

การเตรียมชิ้นงาน

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM
 ชนิด ITO/n-Si/ITO เริ่มต้นโดยนำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด
 ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) 5-10 Ω -cm หนาผิว
 น้ำผลึก (100) ความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400
 μ m มาทำความสะอาด จากนั้นนำไปสร้างชั้นซิลิคอนได
 ออกไซด์ (SiO₂) หนา 400 nm แล้วเปิดชั้น SiO₂ เพื่อ
 สร้างเป็นส่วนรับแสง และรอยสัมผัสระหว่างชั้น ITO
 บนแผ่นซิลิคอน (ITO/n-Si) ด้วยกระบวนการโฟโตลิ

โกราฟี สำหรับฟิล์มบาง ITO สร้างจากเครื่องอาร์เอฟ
 สปัตเตอร์ (SPF-210 RF sputtering system ของบริษัท
 Anelva Corporation โดยใช้ความถี่วิทยุ 13.56 MHz) ที่
 ใช้กำลังไฟฟ้า 100 W ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่
 มีความดันภายในห้องสปัตเตอร์ 4×10^{-3} Pa โดยฟิล์มบาง
 ITO มีความหนาประมาณ 500 nm (อัตราการเกิดฟิล์ม
 ITO 16 nm/นาที) จากแผ่นอินเดียมทินออกไซด์บริสุทธิ์
 (99.99% ของบริษัท Kurt J. Leskar) ที่มีอัตราส่วนผสม
 ระหว่าง 90 wt% In₂O₃ กับ 10 wt% SnO₂ ขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลาง 75 cm (ฟิล์มบาง ITO จากการสปัตเตอร์ไม่ได้
 ผ่านกระบวนการให้ความร้อนระหว่างการสร้าง และ
 หลังจากการสร้างฟิล์ม) จากนั้นสร้างลวดลายโลหะ
 อลูมิเนียม (Al) ด้วยเทคนิคการระเหยในสุญญากาศ เพื่อ
 สร้างเป็นส่วนเชื่อมต่อภายนอก ในรูปที่ 1 เป็นตัวอย่าง
 ชิ้นงานของ MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สร้างเสร็จแล้ว
 จากนั้นจึงนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว ไปวัด
 สมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงต่อไป การทดลองในบทความ
 นี้ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 1 ตัวตรวจวัดแสงแบบอินเตอร์ดิจิต ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สร้างเสร็จแล้ว โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) = 60 μ m, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) = 40 μ m, ความยาวของขั้วไฟฟ้า (L) = 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า หรือ ฟิงเกอร์ (N) = 8 ขั้ว

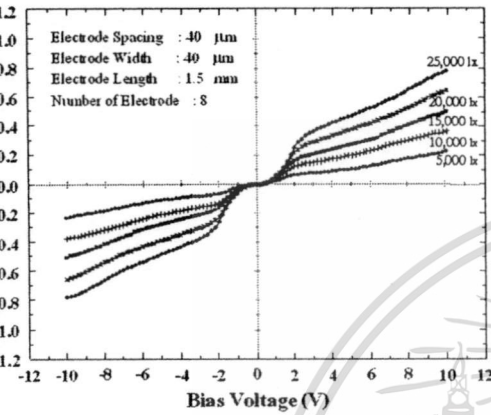
3. การทดลอง และผลการทดลอง

3.1 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันกับความเข้มแสง

ในรูปที่ 2 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน (I-V) เพื่อหากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ (จากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้น สามารถตอบสนองต่อแสงแบบกระแสตรงได้เป็นอย่างดี [8] โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

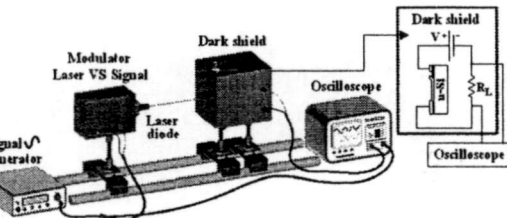
แอมป์มีค่าต่ำ (ประมาณ $1.5 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$) กระแสแสงจะ
 สูงขึ้น เมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น สำหรับ
 ส่วนของกระแสต่อกระแสมีค่าค่อนข้างสูง
 $(I_{\text{photo}}/I_{\text{dark}})$ ดังเช่น ที่ความเข้มแสง $25,000 \text{ lux}$ ให้แรงดัน
 ไบอัส 5 V กระแสแสงต่อกระแสมีค่าประมาณ $1,400$ เท่า



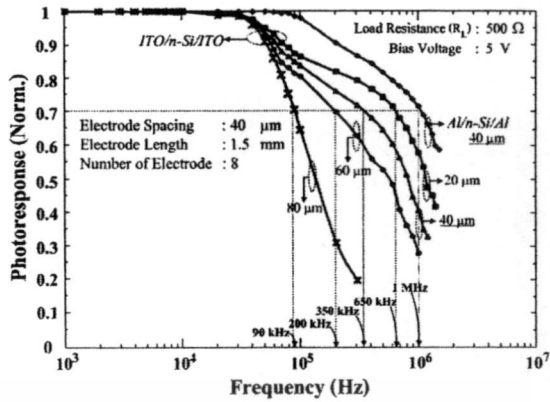
ที่ 2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ

การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง

เพื่อทำการตอบสนองทางแสง ทำการต่อวงจรดังใน
 ที่ 3 โดยใช้แหล่งจ่ายแสงจากเลเซอร์ไดโอด ความยาว
 เส้น 670 nm กำลังงาน 2.67 mW และทำการมอดูเลต
 ญาณคลื่นรูปไซน์เข้ากับเลเซอร์ไดโอดด้วยเครื่อง
 ก่อสัญญาณ จากนั้นฉายแสงไปยังตัวตรวจวัดแสงที่
 ก่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน 500Ω และป้อนแรงดัน
 ไบอัสเท่ากับ 5 V แล้ววัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง
 ออสซิลโลสโคป ขณะป้อนสัญญาณความถี่ค่าต่าง ๆ จาก
 เครื่องกำเนิดสัญญาณ



ที่ 3 แผนภาพการทดลอง เพื่อทำการตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทานโหลด (R_L) เป็น 500Ω และแรงดันไบอัส (V) กับอุปกรณ์ MSM เท่ากับ 5 V

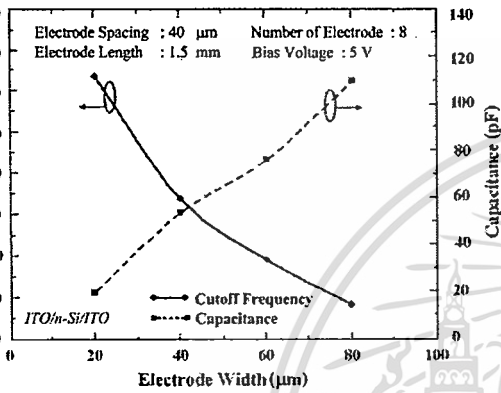


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสง (ซึ่งถูกนอร์มอลไรซ์) กับความถี่ ในช่วง 1 kHz - 2 MHz ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่เปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20 - $80 \mu\text{m}$

ในบทความที่เขียนเสนอไว้ก่อนหน้านี้ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) มีค่ามาก (ระยะ $S > 20 \mu\text{m}$) เมื่อให้ความเข้มแสง และแรงดันไบอัสแก่ MSM คงที่ค่าหนึ่ง (ยังคงเหลือบริเวณนิวทรัล) ถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนแปลงระยะ S เพิ่มขึ้น กระแสแสง [9, 10] และการตอบสนองทางแสง [9] ยังคงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบกับการตอบสนองความถี่จึงเป็นความกว้างของขั้วไฟฟ้า (โดยให้ความยาวและจำนวนของขั้วไฟฟ้ามีค่าคงที่) ดังแสดงในรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่า เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น $20, 40, 60$ และ $80 \mu\text{m}$ จะทำให้ความถี่คัทออฟมีการเปลี่ยนแปลงจาก 650 kHz , 350 kHz , 250 kHz และ 90 kHz ตามลำดับ กล่าวคือความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าลดลง เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่ของรอยสัมผัส ดังนั้นเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้น จากการวัดความจุไฟฟ้าของ ITO/n-Si/ITO ด้วยเครื่อง HP 4284A (ที่แรงดันไบอัส 5 V) ความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าเป็น $19, 55, 79$ และ 114 pF ที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้า $20, 40, 60$ และ $80 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสนั้นมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับการ

สองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง กล่าวคือเป็น
 หนึ่งของค่าเวลาคงตัว (RC time constant) ซึ่งมีค่า
 ับผลคูณระหว่างความต้านทานโหลด (R_L) กับค่า
 มจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสต่าง ๆ ของตัวตรวจวัด
 MSM (รวมถึงที่บริเวณขั้วเชื่อมต่อสาย) ดังนั้นเมื่อ
 มจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ผลตอบสนองทาง
 ับที่มีค่าลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 5



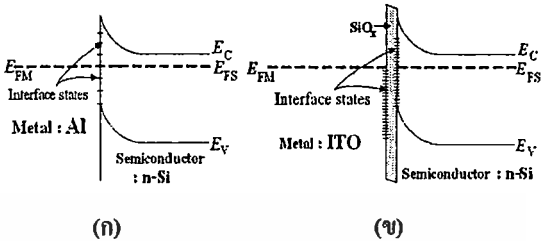
5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คutoff และความจุ
 ับกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ในช่วง 20 - 80 μm

เมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ระหว่าง
 ตรวจจับแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO กับตัวตรวจวัดแสง
 -Si/Al (ขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง) ที่มีขนาดเดียวกัน
 ะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40 μm , ความกว้างของขั้ว
 ้า 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และมี
 วนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว) และสร้างขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์
 ักกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 เห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง

ITO/n-Si/ITO มีค่าความถี่คutoffเท่ากับ 350 kHz
 มีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al ที่มี
 ถี่คutoffเท่ากับ 1 MHz เนื่องจากความจุไฟฟ้าของ
 ตรวจจับแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงกว่าตัวตรวจ
 แสง ชนิด Al/n-Si/Al เนื่องจากที่รอยสัมผัสระหว่าง
 /n-Si เกิดชั้นออกไซด์บาง ๆ (interface oxide: SiO_x)
 ากการรวมตัวกันระหว่างซิลิคอนกับออกซิเจน
 เกิน (excess oxygen) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้าง

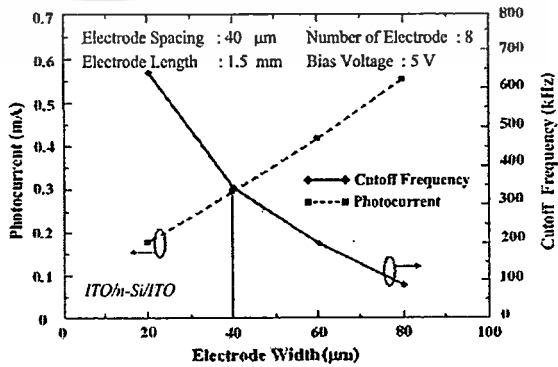
บาง ITO ด้วยวิธีการเอพิตอกซ์ [11-13] โดย
 ึงด้วยลักษณะของแถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิด
 ึ่งในรูปที่ 6 ส่งผลให้ค่าเวลาคงตัว ซึ่งเป็นตัวแปรที่

มีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง
 มีค่าเพิ่มขึ้น (ความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น) จึงทำให้ตัวตรวจ
 ัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีผลตอบสนองทางความถี่ที่
 ต่ำกว่า



รูปที่ 6 แถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดคutoffในภาวะสม
 ุคความร้อนของ (ก) รอยสัมผัส Al/n-Si (ข) รอยสัมผัส
 ITO/n-Si

ในรูปที่ 7 เป็นลักษณะสมบัติของกระแสแสง และ
 ความถี่คutoffกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า
 การเปลี่ยนแปลงลักษณะขั้วไฟฟ้า โปร่งใสของตัว
 ตรวจจับแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ให้มีความกว้างของ
 ั้วไฟฟ้ามากขึ้น จะได้กระแสแสงมากขึ้น แต่กลับทำให้
 การตอบสนองทางความถี่ลดต่ำลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้
 ่าขนาดของความกว้างของขั้วไฟฟ้า โปร่งใส ITO ที่
 เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทั้งสอง
 (กระแสแสง ที่ความเข้มแสง 15,000 lux และการตอบ
 สนองทางความถี่) ได้จากจุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองที่
 ลากลงไปตัดแกนความกว้างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ
 40 μm



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และ
 ความถี่คutoffกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า เมื่อมีการ
 เปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20-80 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ที่ได้รับแรงดันไบอัส 5 V

MSM Photodetectors	Barrier Height (eV) [8]	Dark current ($\text{pA}/\mu\text{m}^2$) [8]	Photocurrent [15,000 lux] (mA)	Capacitance (pF)	Cut off frequency (MHz)
ITO/n-Si/ITO	0.74	1.5	0.30	55	0.35
Al/n-Si/Al	0.72	1.3	0.05	26	1.00

ในตารางที่ 1 เป็นตารางสรุป เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al พบว่าตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิดมีสมบัติพื้นฐาน ความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสชนิดดีก็ย และกระแสตรง) ที่ใกล้เคียงกัน กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่ามากกว่า Al/n-Si/Al (โดยมีค่าเป็น 6 เท่าของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al) ในขณะที่การตอบสนองทางความถี่ตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al มีค่ามากกว่า โดยมีค่าประมาณ 3 เท่า เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ ITO/n-Si/ITO เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีค่ามากกว่า

สรุป

การสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จากขั้วไฟฟ้าโปร่งใสอินเดียมทินออกไซด์ มีหลากหลายแบบอินเตอร์คิเจเท พบว่าการตอบสนองสัญญาณทางแสงแบบกระแสกลับมาจากตัวแปรที่มีผลสำคัญในโครงสร้าง คือ การเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO ซึ่งความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้การตอบสนองทางความถี่มีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO กับชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเดียวกัน (ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า, ความยาวของขั้วไฟฟ้า และจำนวนขั้วไฟฟ้ามีค่าเป็น 40 μm , 40

μm , 1.5 mm และ 8 ขั้ว ตามลำดับ) ความถี่คutoff ของ ITO/n-Si/ITO จะมีค่าน้อยกว่า เพราะค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่านั่นเอง (รวมถึงผลของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนเชื่อมต่อสายคัวย) ความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al เกิดจากชั้นออกไซด์บาง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ และจากผลการทดลองยังพบอีกว่า ถ้าพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงกับการตอบสนองทางความถี่ที่ลดลง จะได้ความกว้างของขั้วไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นในบทความนี้มีค่าเท่ากับ 40 μm

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณกุลวรงค์ นุตะมาน และคุณ อิศระ ศรีรัตนชัยที่ช่วยวัดผลการทดลอง และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อบทความนี้
ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2554

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech, S. Ueamanapong and N. Atiwongsangthong, "Analysis The Suitable Indium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

in Oxide Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), หน้า 1213-1216, 2551

S. Srithanachai, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen, S. Supadech, “Preparation and Properties of Indium Tin-Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photodetectors”, Advanced Materials Research, Vol. 55-57, pp. 769-772, 2008

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กุลวรางค์ นุตะมาน และ อิศระ ศรีธนชัย, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโปร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), หน้า 1201-1204, 2551

Y. Daghan Gokdel, Ali Osman Sevim, Senol Mutlu and Arda D. Yalcinkaya, “Polymer-MEMS-Based Optoelectronic Display”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 57, No. 1, pp. 145-152, 2010
Eisuke Tokumitsu, “ITO-Channel Ferroelectric-Gate Thin Film Transistor with Large On-Current”, International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT’ 06), pp. 717-720, 2006

Tiberiu Mizrah and David Adler, “Operation of ITO/Si Heterojunction Solar Cells”, Applied Physics Letters, Vol. 29, No. 10, pp. 682-684, 1976

Surada Ueamanapong, Itsara Srithanachai, Narin Atiwongsangthong, Putapon Pengpad, Surasak Niemcharoen, Amporn Poyai and Somkiet Supadech, “Fabrication, Characterization and Analysis of ITO/n-Si Schottky Photodetector”, The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON 2010), pp. 776-779, 2010

[8] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีกระแสสูง โดยใช้ขั้วโลหะโปร่งใส”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27 ฉบับที่ 1, หน้า 25-30, 2553

[9] ธเนศ โชะเหม, มานิตา คิวงแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด ชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมาที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22 ฉบับที่ 1, หน้า 13-18, 2548

[10] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สุรชาติ เมืองอ่ำ, “อุปกรณ์ตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr แบบสลิคเดียวในแนวระนาบ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), หน้า 560-563, 2550

[11] 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”, Journal of the American Chemical Society, Vol. 105, No. 3, pp. 324-330, 1983

[12] 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. 72, pp. 5288, 1992

[13] 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. 73, pp. 4344, 1993