

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดชอตทกีโดยมี
อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

STUDY OF DESIGN AND FABRICATION OF ITO THIN FILMS
TRANSPARENT ELECTRODE SCHOTTKY PHOTODETECTOR



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....103048
วัน,เดือน,ปี.....24 ส.ค. 2552

๖. 12092603
.....
.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดชอตทกีโดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส
STUDY OF DESIGN AND FABRICATION OF ITO THIN FILMS TRANSPARENT
ELECTRODE SCHOTTKY PHOTODETECTOR



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2551

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดซีออตทิพย์ โดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

จัดทำโดย

นางสาวฤดีพร เลิศวสินกุล

นายฤทธิชัย ครุณเนตร

นางสาวสุรดา เอี่ยมานะพงษ์



รายงานฉบับนี้ ได้รับการตรวจสอบ โดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ชื่อ.....*ผู้จัดทำ*.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(*ผศ. รัชกร เอี่ยมานะพงษ์*)

วันที่.....*17 มี.ค. 52*.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดชอตกีย์โดยมี อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

นางสาวฤดีพร เลิศวสินกุล รหัส 48010743

นายฤทธิชัย ดรอุเนตร รหัส 48010745

นางสาวสุรดา เอื้อมานะพงษ์ รหัส 48011016

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาปรับปรุงคุณภาพฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ซึ่งเตรียมโดยวิธีอาร์-เฟสปิดเตอร์ริง บนแผ่นฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่กระจกสไลด์ ด้วยวิธีการอบฟิล์ม (Annealing) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน แล้วนำฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ที่ได้จากการอบฟิล์มในเงื่อนไขต่าง ๆ มาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าเงื่อนไขในการปรับปรุงฟิล์มที่เหมาะสม ซึ่งค่าที่ได้พบว่า เมื่อวัดการส่องผ่านแสงด้วย UV – Visible Spectrophotometer แก้วชิ้นงานจะมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านเท่ากับ 90% และวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามามีค่าเท่ากับ $9 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ ด้วยเครื่องมือ Four Point Probe จากข้อมูลได้นำมาสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงที่มีฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วโปร่งใส และนำไปวัดคุณสมบัติต่างๆของตัวตรวจวัดแสง พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างได้นี้มีลักษณะของรอยสัมผัสชอตกีย์โดยมีค่าแรงดันตกคร่อมภายใน (V_{bi}) เท่ากับ 0.27 V และค่ากัมพวงศักย์ ($q\phi_{bn}$) ประมาณ 0.72 eV โดยมีค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดัน 0 V ประมาณ 98 pF/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF DESIGN AND FABRICATION OF ITO THIN FILMS TRANSPARENT ELECTRODE SCHOTTKY PHOTODETECTOR

Miss.Ruedeporn Lertwasinkun Student ID 48010743

Mr.Rittichai Darunnate Student ID 48010745

Miss.Surada Ueamanapong Student ID 48011016

Assist.Prof.Dr.Surasak Niemcharoen (Advisor)

Educational Year 2008

Abstract

This project has treated quality of indium-tin oxide (ITO) thin films preparation by using a radio frequency (RF) reaction sputtering system at room temperature. Films were deposited on non-heated glass slide. The temperatures of annealing were varied at 300 °C. Time of annealing was 15 minutes. Effect of atmosphere, oxygen and nitrogen flow on properties of ITO films has been studied. The optical properties were characterized by UV-VIS Spectrophotometer. Electrical properties were characterized by Four Point Probe. The results show that transmittance and sheet resistance could be improved by heat treatment. We could get the minimum resistivity of $9 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ and over 90% of the average transmittance in visible light. The data of ITO thin films will induce to build transparent electrode instead contact electrode for schottky photodetectors. The results of ITO thin films transparent electrode schottky photodetectors fabrication were found that built in voltage (V_{bi}) = 0.27 V and work function ($q\phi_{bn}$) = 0.72 eV. The capacitance was 98 pF/cm² while the voltage was 0 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 อินเดียมทินออกไซด์.....	5
2.1.1 สมบัติทางโครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์.....	5
2.1.2 สมบัติทางแสงของอินเดียมทินออกไซด์.....	6
2.1.3 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์.....	8
2.2 ตัวตรวจวัดแสง.....	10
2.2.1 หลักการพื้นฐาน.....	10
2.2.2 ประเภทของตัวตรวจวัดแสง.....	10
2.2.2.1 Photoresistor หรือ Light Dependent Resistor (LDR).....	11
2.2.2.2 Photovoltaic cell หรือ Solar cell.....	11
2.2.2.3 Photomultiplier Tube Photomultiplier Tube (PMT).....	12
2.2.2.4 Photodiodes.....	12
2.2.2.4.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ.....	17
2.3 รอยสัมผัสชนิดกึ่ง.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.3.1	โครงสร้างของซีดทีอีโฟโตไดโอด.....	19
2.3.2	กลไกการเกิดรอยสัมผัสซีดทีอี.....	20
2.3.3	รอยสัมผัสซีดทีอีขณะได้รับไบอัส.....	23
2.3.3.1	รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง.....	23
2.3.3.2	รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	24
2.3.4	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสซีดทีอี.....	25
2.3.5	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสซีดทีอี.....	26
บทที่ 3	การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	27
3.1	การออกแบบและโครงสร้าง.....	27
3.2	กระบวนการสร้าง.....	30
บทที่ 4	การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	41
4.1	การทดลองตอนที่ 1.....	41
4.1.1	การศึกษาและเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์.....	41
4.1.2	ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยที่ไม่มีแอนนีส.....	42
4.1.2.1	คุณสมบัติทางโครงสร้าง.....	42
4.1.2.2	คุณสมบัติทางแสง.....	46
4.1.2.3	คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	47
4.1.3	ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ถูกแอนนีสในออกซิเจน.....	47
4.1.3.1	คุณสมบัติทางโครงสร้าง.....	47
4.1.3.2	คุณสมบัติทางแสง.....	51
4.1.3.3	คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	52
4.1.4	ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ถูกแอนนีสในไนโตรเจน.....	53
4.1.4.1	คุณสมบัติทางโครงสร้าง.....	53
4.1.4.2	คุณสมบัติทางแสง.....	55
4.1.4.3	คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.1.5	ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยแอนนูลในบรรยากาศของอากาศ.....	57
4.1.5.1	คุณสมบัติทางโครงสร้าง.....	57
4.1.5.2	คุณสมบัติทางแสง.....	59
4.1.5.3	คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	60
4.2	การทดลองตอนที่ 2.....	62
4.2.1	ส่วนที่ 1 ออกแบบและหาขนาด รูปร่างของพื้นที่รับแสงที่เหมาะสม.....	62
4.2.2	ส่วนที่ 2 สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง.....	64
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง.....	68
	กิตติกรรมประกาศ.....	70
	เอกสารอ้างอิง.....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่

2.1	โครงสร้างอะตอมของอินเดียม (In_2O_3) ถูกเจือด้วยดีบุก (Sn).....	5
2.2	โครงสร้างผลึกแบบ Cubic bixbyte ของ ITO.....	6
2.3	การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จากแถบพลังงานเวเลนซ์ไปสู่แถบการนำ เมื่อได้รับพลังงานมากกว่าค่าช่องว่างพลังงาน (E_g).....	7
2.4	ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดง โครงสร้างพื้นฐานของ โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn.....	14
2.5	แถบพลังงาน โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn.....	14
2.6	วงจรมูลของ โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn.....	15
2.7	ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าใน โฟโตไดโอดเส้นหมายเลข 1 แสดงในสภาพที่มีคและมีรูปร่างเหมือนของไดโอดทั่วไป หมายเลข 2 และ 3 แสดงในสภาพมี แสงและเส้นกราฟจะเคลื่อนลงด้านล่าง.....	16
2.8	ความเข้มแสงกับกระแสลัดวงจรและความเข้มแสงกับแรงดันวงจรเปิด.....	18
2.9	โครงสร้างของซีดทีซี โฟโตไดโอด.....	19
2.10	แถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสซีดทีซี.....	21
2.11	แถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสซีดทีซี.....	22
2.12	แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	23
2.13	แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	24
2.14	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดทีซีไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น.....	25
2.15	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีซีไดโอด.....	26
3.1	ขนาดและลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และวงกลมของฟิล์มบางอินเดียมทิน ออกไซด์ตามลำดับ.....	28
3.2	กระจกต้นแบบของออกไซด์ (Oxide Mask).....	28
3.3	กระจกต้นแบบของอินเดียมทินออกไซด์ (ITO Mask).....	29
3.4	กระจกต้นแบบของอลูมิเนียม (Aluminium Mask).....	29
3.5	สรุปกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง Schottky Photo Detector โดยมีอินเดียมทินออกไซด์ เป็นขั้วไฟฟ้าโปรงใส.....	40
4.1	ลักษณะของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ทำการเตรียมที่เวลาต่างๆ.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

4.2 องค์ประกอบทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ คือ 5, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ.....	43
4.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ (a) 5 นาที, (b) 15 นาที, (c) 30 นาที และ (d) 60 นาที.....	44
4.4 การวัดความหนาของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ โดยใช้เทคนิค SEM.....	45
4.5 การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนาต่างๆ.....	46
4.6 สภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ความหนาของฟิล์มค่าต่างๆ.....	47
4.7 ลักษณะทางโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงหลังจากทำการแอนนีสในบรรยากาศของออกซิเจน (a) 754 Å, (b) 2,296 Å, (c) 5,218 Å และ (d) 11,665 Å ตามลำดับ.....	48
4.8 ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางหลังจากแอนนีสในบรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ความหนาต่างๆ (a) 754 Å, (b) 2,296 Å, (c) 5,218 Å และ (d) 11,665 Å ตามลำดับ.....	49
4.9 ตัวอย่างการแนวโน้มของขนาดเกรนที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ.....	50
4.10 ตัวอย่างการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนีสในบรรยากาศของ ออกซิเจนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	51
4.11 กราฟแสดงแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจาก แอนนีสในบรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52
4.12 ตัวอย่างพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 500 °C (a) 754 Å, (b) 2,296 Å, (c) 5,218 Å และ (d) 11,665 Å ตามลำดับ.....	53
4.13 ตัวอย่างการแนวโน้มของขนาดเกรนที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆหลังจากแอนนีสใน บรรยากาศของไนโตรเจน.....	54
4.14 กราฟแสดงแนวโน้มการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิในการแอนนีสต่างๆ.....	55
4.15 กราฟแสดงแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังจากแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิในการแอนนีสต่างๆ.....	56
4.16 ตัวอย่างพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนีสในบรรยากาศของอากาศ ที่อุณหภูมิ 500 °C (a) 754 Å, (b) 2,296 Å, (c) 5,218 Å และ (d) 11,665 Å.....	57
4.17 แนวโน้มขนาดของเกรนที่หลังจากแอนนีสในบรรยากาศของอากาศ.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

4.18 กราฟแสดงแนวโน้มของการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนิลในบรรยากาศของอากาศ ที่อุณหภูมิในการแอนนิลต่างๆ.....	59
4.19 กราฟแสดงแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังจากแอนนิลในบรรยากาศของอากาศ ที่อุณหภูมิในการแอนนิลต่างๆ.....	60
4.20 อุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว.....	64
4.21 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของซีดทีกีบีแบริเออร์.....	64
4.22 กราฟแสดงความหนาแน่นของกระแส-แรงดัน.....	65
4.23 ลักษณะกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง.....	66
4.24 กราฟแสดงอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง.....	66
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและแรงดันย้อนกลับ.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

4.1	เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มและขนาดของเกรนที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ.....	45
4.2	การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนिलในบรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52
4.3	กระแสมืดของแต่ละรูปร่างที่ขนาดพื้นที่รับแสงต่างๆ.....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในอดีตที่ผ่านมาการนำฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและมูลค่าของอุปกรณ์ดังกล่าวมีมากมาย ซึ่งวัสดุที่ถูกพัฒนาเป็นออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งใส (Transparent Conducting Oxides : TCOs) มีอยู่หลายชนิด เช่น ZnO (S. Fay *et al.*, 2004) , In_2O_3 (Y.Sawada *et al.*, 2002) , SnO_2 (Fukano *et al.*, 2004) โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีลักษณะข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน (B. G. Lewis *et al.*, 2000) ดังเช่น การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ลงบนดอกสว่านหรือสายนาฬิกา ช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่ผิววัสดุ และทนทานต่อการเสียดสี การเคลือบฟิล์มบางลงบนผิวเลนส์เพื่อช่วยลดการสะท้อนของแสงและช่วยเพิ่มความชัดเจนในการมองเห็นในบริเวณที่แสงน้อย เป็นต้น แต่ในประเทศไทยการนำฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ยังไม่ได้รับความนิยมนักในสมัยนั้น ต่อมาได้มีการศึกษาและวิจัยพบว่า ฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่เกิดจากการนำทินออกไซด์ (SnO_2) เจือลงไปอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) และแกลดเมียมทินออกไซด์ จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีการสะท้อนคลื่นความร้อน ได้ดี แต่การเคลือบด้วยแกลดเมียมทินออกไซด์มีการใช้งานไม่แพร่หลายนักเนื่องจากแกลดเมียมเป็นสารพิษก่อให้เกิดอันตราย หลังจากนั้นจึงมีการนำฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์มาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากอินเดียมทินออกไซด์มีความโปร่งใสสูงถึง 95% สภาพต้านทานที่ต่ำมากอยู่ในลำดับ $10^{-4} \Omega\text{-cm}$ ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ดีและสามารถนำไปประยุกต์ได้อย่างมากมาย เช่น จอ LCD การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) อุปกรณ์แสดงผลอย่างเช่น LCD (liquid crystal display) กระจกปรับแสง (smart window) ตามอาคารต่างๆ เพื่อควบคุมปริมาณแสงจากภายนอกเข้าสู่อาคาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงและไฟฟ้ามืดขึ้น และนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสแทนขั้วโลหะที่บดบังแสงของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดรอยสัผัสสัมผัสออปติคัล เป็นต้น

ซึ่งการเตรียมฟิล์มบาง (ITO) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีจุ่ม (dip-coating) (S. C.Ray *et al.*, 1998) วิธีโซลเจล (sol-gel) (Seung-Chul Lee *et al.*, 2003) วิธีไพโรซอล (pyrosol) (A. Tunic *et al.*, 2003) วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) (Fukano *et al.*, 2004) และวิธีสปัตเตอริง (sputtering) (B. Oh *et al.*, 2005) เป็นต้น จากคุณสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์ที่มีความโปร่งใสสูง (High Transparent) และความต้านทานต่ำ (Low Resistance) ซึ่งแสดงถึงความสามารถด้านการนำไฟฟ้าของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้แทนขั้วโลหะได้ จึงได้มีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้ฟิล์มบางโปร่งใสอินเดียมทินออกไซด์มาทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัดแสง และในรายงานฉบับนี้ได้นำเสนอการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ในการสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ว่ามีคุณสมบัติอย่างไรเมื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 2 ตอนด้วยกัน คือ ตอนที่ 1 ได้ศึกษาการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองที่เป็นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการอาร์เอฟสปีดเตอริง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ๆ โดยมุ่งเน้นด้านการศึกษาคงสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง ที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มบางที่มีฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เพื่อพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ตอนที่ 2 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นอินเดียมทินออกไซด์ และศึกษาคงสมบัติต่างๆว่ามีความเหมาะสมและสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกหรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการอาร์เอฟสปีดเตอริง
2. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ โดยเตรียมบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางและปรับปรุงคุณภาพฟิล์ม
3. เพื่อศึกษาคงสมบัติทางด้านโครงสร้างด้วยการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการของ X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเคลื่อนที่ (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) หลังจากการปลูกฟิล์มและปรับปรุงคุณภาพฟิล์ม
4. เพื่อศึกษาคงสมบัติทางไฟฟ้า โดยศึกษาค่าสภาพต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง
5. เพื่อศึกษาคงสมบัติทางแสง โดยศึกษาคงค่าโปร่งใสของฟิล์มบาง
6. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง
7. เพื่อศึกษาคงสมบัติของซีกอ็อกไซด์ที่มีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ โดยวิธีการอาร์เอฟสปีดเตอริง
2. นำฟิล์มที่ได้ไปวัดผลต่างๆ เช่น ลักษณะทางโครงสร้าง สภาพต้านทาน ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาการอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของอากาศ ออกซิเจนและไนโตรเจน ตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที
4. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ หลังจากทำการอบฟิล์ม โดยนำฟิล์มไปวัดผลต่างๆ เช่น ลักษณะทางโครงสร้าง สภาพต้านทาน ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน เป็นต้น
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด ทั้งในเรื่องการส่องผ่านและสภาพต้านทาน
6. ออกแบบลักษณะรูปร่าง และขนาดพื้นที่ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เหมาะสมในการใช้เป็นพื้นที่รับแสง
7. ทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส
8. ทดสอบสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง เช่น ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี (I-V), แรงดันภายใน (V_{oc}), ความสูงกำแพงศักย์ช็อคกี (Φ_{bn}), กระแสมืด (I_0), อัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืด (I/I_0) และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V)

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

1. สามารถสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคเตอร์ลงบนฐานรองที่เป็นกระจกได้
2. ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ มีความต้านทานเชิงแผ่นลดลง เมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น
3. ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ มีการส่องผ่านของแสงได้ดีเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น
4. ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มีความเป็นผลึกสูงขึ้นหลังจากทำการอบฟิล์ม (Annealing)
5. ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ มีความต้านทานเชิงแผ่นลดลงหลังจากทำการอบ
6. ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ มีการส่องผ่านของแสงเพิ่มขึ้นหลังจากทำการอบฟิล์ม
7. ได้เงื่อนไขในการสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่เหมาะสมในการสร้างตัวตรวจวัดแสง
8. สามารถออกแบบและหารูปร่างรวมถึงขนาดพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงได้
9. สามารถสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าบนฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ได้
10. อุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ทำการสร้างมีประสิทธิภาพดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และความสามารถในการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองที่เป็นกระจกใส ด้วยวิธีการอาร์เอฟสปีดเตอร์ริงได้
2. มีความรู้ความชำนาญในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่อง XRD, SEM, UV-VIS Spectrophotometer, Surface Profile และ Four Point Probe
3. ทราบตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์
4. ได้เรียนรู้กระบวนการสร้างต่างๆ อาทิเช่น การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน, กระบวนการออกซิเดชัน, กระบวนการแพร่สารเจือ, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี, กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม และกระบวนการอบฟิล์ม เป็นต้น
5. อินเดียมทินออกไซด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดซีเอทีได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

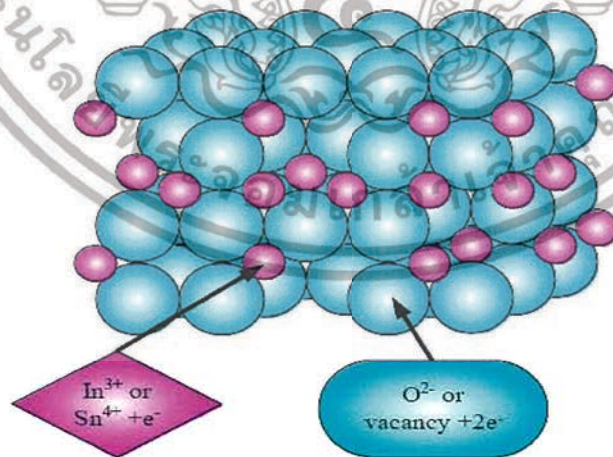
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 อินเดียมทินออกไซด์

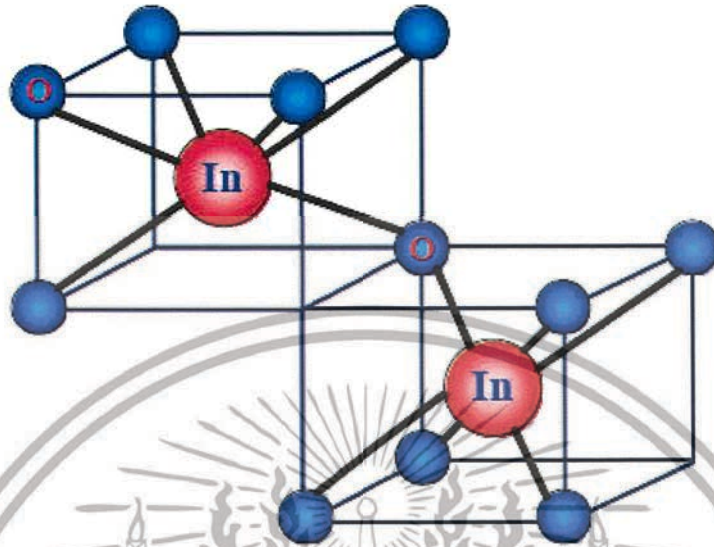
2.1.1 สมบัติทางโครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์

อินเดียมทินออกไซด์ (Tin-doped indium oxide หรือ ITO) เกิดจากการเจือทินุก (Sn) ลงไปในอินเดียมออกไซด์ (Indium (III) oxide หรือ In_2O_3) ซึ่งทินุกจะเข้าไปแทนที่อะตอมของอินเดียมไอออน (In^{3+}) เมื่อทินุกไปสร้างพันธะระหว่างออกซิเจนจะทำให้เกิดเป็นทินออกไซด์แบบ SnO หรือ SnO_2 โดยที่ทินุกแต่ละตัวจะมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ +2 และ +4 ตามลำดับ ค่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้มีผลโดยตรงกับสภาพความนำไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ โดยที่อิเล็กตรอนที่มีค่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่ต่ำกว่า SnO ซึ่งมีเวเลนซ์เท่ากับ +2 จะทำให้ความหนาแน่นของพาหะลดลงเนื่องจากมีโฮลเกิดขึ้นซึ่งทำให้สภาพความนำไฟฟ้าลดลง และในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนของ SnO_2 ซึ่งมีเวเลนซ์เท่ากับ +4 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเจือชนิดเอ็น (n-type) ซึ่งไม่จำเป็นต้องทำการ โด๊ป โดย In^{3+} ถูกแทนที่ด้วย $\text{Sn}^{4+} + e^-$ ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.1 ทำให้มีอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเกิดช่องว่างของออกซิเจนจะมีผลทำให้สภาพความนำไฟฟ้าดีขึ้นซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{SnO}_2$ โดยที่โครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็น In_2O_3 แต่ละอะตอมบางตัวของ In ถูกแทนที่ด้วย Sn ซึ่งจะมีโครงสร้างผลึกแบบ cubic bixbyte ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมของอินเดียม (In_2O_3) ถูกเจือด้วยทินุก (Sn)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบ Cubic bixbyte ของ ITO

2.1.2 สมบัติทางแสงของอินเดียมทินออกไซด์

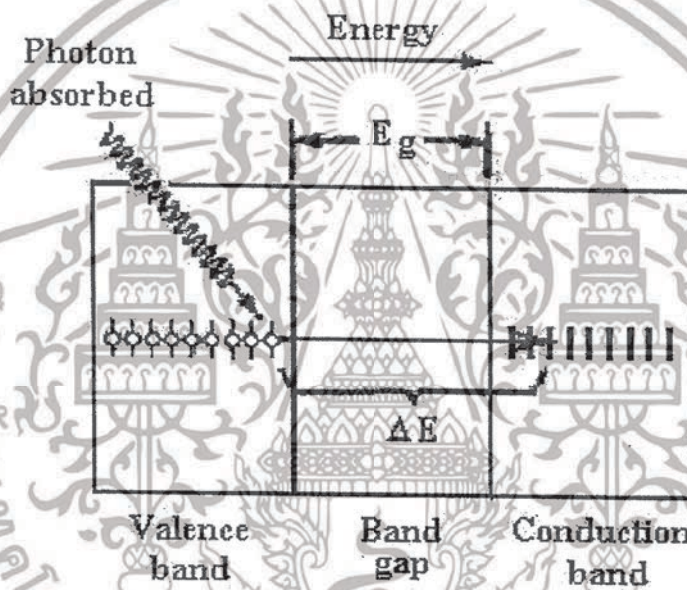
สมบัติทางแสงของฟิล์มบาง อินเดียมทินออกไซด์ เกิดจากการที่อิเล็กตรอน หรือ ไอออนของอินเดียมทินออกไซด์ไปปฏิสัมพันธ์กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่แถบพลังงานหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดสมบัติต่างๆในวัสดุอันประกอบด้วยสมบัติในการดูดกลืนของแสง (Absorption) สมบัติในการสะท้อนของแสง (Transmission) โดยสมบัติในการดูดกลืน และการส่องผ่านของแสงของวัสดุใดๆ จะสัมพันธ์กับช่องว่างพลังงาน (Energy Gap, E_g) ของวัสดุนั้นๆ โดยวัสดุจะมีการเปลี่ยนสภาพของตัวเองจากสภาพการส่องผ่านมาเป็นสภาพดูดกลืนเมื่ออิเล็กตรอนจากแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valence Band) ไปสู่แถบการนำ (Conduction Band) ดังรูปที่ 2.3 ในกรณีนี้วัสดุจะมีการส่องผ่านน้อยแต่มีการดูดกลืนมาก แต่ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานน้อยกว่าค่าช่องว่างพลังงาน จะทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบพลังงานเวเลนซ์ไปสู่แถบการนำได้ ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุมีการดูดกลืนน้อย นอกจากนี้ค่าพลังงานที่ให้แก่อิเล็กตรอนจะสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่นแสง โดยจะสามารถหาค่าความยาวคลื่นแสงของจุดเปลี่ยนสถานะ (Threshold Wavelength) ได้จากสมการที่ 2.1

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g} = hv \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ
$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

- โดยที่ λ_g เป็นค่าความยาวคลื่นแสงของจุดเปลี่ยนสถานะ (เมตร)
 h เป็นค่าคงที่ของพลังค์ (Planck) มีค่าเท่ากับ 6.63×10^{-34} J.s
 c เป็นอัตราเร็วของแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s
 v เป็นความถี่ของคลื่นแสง (s^{-1})



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จากแถบพลังงานเวเลนซ์ไปสู่แถบการนำ เมื่อได้รับพลังงานมากกว่าค่าช่องว่างพลังงาน (E_g)

สำหรับฟิล์มบาง ค่าคงที่ทางแสงจะเป็นตัวบอกลักษณะปฏิกิริยาของแสงกับวัสดุใดๆ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$N = n + ik \quad (2.3)$$

ในส่วนจำนวนจริงหรือค่าดัชนีหักเหแสง (n) จะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าความเร็วเฟสของแสงในวัสดุใดๆ โดยจะสัมพันธ์กันดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.4)$$

โดยที่ v คือ อัตราเร็วของแสงในวัสดุใดๆ (m/s)
 c คือ อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ (m/s) และใน ส่วนจินตภาพหรือค่า Extinction Coefficient (k) จะสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนแสงในวัสดุใดๆ โดยจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงดังสมการ

$$\alpha = 4\pi k / \lambda \quad (2.5)$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง
 λ คือ ค่าความยาวคลื่นของแสง

ค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มอินเดียม ทิน ออกไซด์ โปร่งใส ในช่วงการมองเห็นจะมีค่าประมาณ 1.95 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเคลือบมีบทบาทต่อค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มอินเดียม ทิน ออกไซด์ น้อยมาก ดังนั้นในการใช้งานส่วนมากค่าดัชนีหักเหแสงจึงไม่ได้รับความสนใจมากนักเมื่อเทียบกับค่า Extinction Coefficient ซึ่งจะแปรผันกับค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มดังสมการ

$$k \propto \sqrt{\sigma} \quad (2.6)$$

เมื่อ K คือ ค่า Extinction Coefficient
 σ คือ ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์ม

2.1.3 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง อินเดียม ทิน ออกไซด์ จะพิจารณาจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแล้ววัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบนฟิล์มบาง โดยค่าศักย์ไฟฟ้าจะแปรผกผันกับค่าความต้านทานที่เรียกว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet Resistance, R_s) คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R_s = \frac{V}{I} C.F. \quad \Omega/sq. \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V และ I คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า ตามลำดับ

C.F คือค่า Correction Factor

เมื่อหาค่าความต้านทานเชิงแผ่น แล้วจะสามารถหาค่าสภาพความต้านทาน (Resistivity, ρ) โดยใช้

$$\rho = R_s d \quad \Omega\text{-cm} \quad (2.8)$$

โดยที่ d คือค่าความหนาของฟิล์มในหน่วยเซนติเมตร

จากที่ผ่านมาจะพบว่าค่าพิกัดความต้านทานของฟิล์มบางจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเคลือบ ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นงาน ความดันก๊าซออกซิเจนขณะเคลือบ และอัตราการเคลือบ เป็นต้น นอกจากนี้ในงานวิจัยของ R. Blacker ได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของค่าสภาพความต้านทานของฟิล์มบางกับการเกิดไฟฟ้าสถิตที่ผิวฟิล์ม โดยพบว่า การเคลือบฟิล์มบางที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีจะช่วยให้เลนส์ลดปริมาณประจุที่สะสมบนผิวเลนส์ซึ่งจะช่วยให้ปริมาณไฟฟ้าสถิตบนผิวเลนส์ลดลงไป การลดลงของประจุไฟฟ้าที่ผิวเลนส์จะสัมพันธ์กับค่าสภาพความต้านทานที่ผิวเลนส์ดังสมการ

$$\tau = \rho_s C \quad (2.9)$$

$$t = \tau \left(-\ln \frac{V_t}{V_0} \right) \quad (2.10)$$

โดยที่ t = เวลาในการลดลงของแรงดันที่ผิววัสดุจากแรงดัน V_0 ถึงแรงดัน V_t (วินาที)

τ = อัตราการเสื่อมลงของประจุ (s)

ρ_s = ค่าสภาพความต้านทานที่ผิวเลนส์ ($\Omega/\text{sq.}$)

C = ค่าความจุไฟฟ้า (F)

V_{t_0} = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผิวเลนส์ที่เวลา t ใดๆ และที่เวลาเริ่มต้น ($t=0$) (V)

จากสมการ เวลาที่ใช้ในการลดแรงดันไฟฟ้าหรือปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผิวเลนส์จะมีค่าลดลงเมื่อค่าสภาพความต้านทานที่ผิวของเลนส์มีค่าน้อยลง ดังเช่นถ้าสมมุติให้เลนส์มีค่าความจุไฟฟ้า 20 pF และเลนส์มีค่าสภาพความต้านทานที่ผิว $1 \times 10^{13} \Omega/\text{sq.}$ แล้ว จะใช้เวลาประมาณ 700 s ในการลดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผิวเลนส์จาก 1,000 V ให้เหลือ 30 V และที่ค่าความจุไฟฟ้าและค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าที่ผิวเลนส์เดียวกันนี้ ถ้าเลนส์มีค่าสภาพความต้านทาน $1 \times 10^{10} \Omega/\text{sq.}$ แล้วจะใช้เวลาเพียง 0.7 s โดยประมาณ และค่าสภาพความต้านทานที่ผิวเลนส์นี้ก็คือค่าสภาพความต้านทานของฟิล์มนำไฟฟ้าที่เคลือบบนผิวเลนส์หรือก็คือฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเชิงแผ่นกับ Static Resistance ของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ อาจเขียนได้ดังสมการ

$$R_s = \rho_0 / d \quad (2.11)$$

โดยที่ R_s คือ ค่าความต้านทานเชิงแผ่น
 d คือ ค่าความหนาของฟิล์ม
 ρ_0 คือ ค่า Static Resistivity ของฟิล์ม ITO

2.2 ตัวตรวจวัดแสง

อุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มแสงหรือ Photodetector เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้โดยการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนไปใช้ในการกระตุ้นให้สารหรือวัสดุมีการปลดปล่อยพาหะอิสระทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น อุปกรณ์ตรวจวัดแสง มีด้วยกันหลายชนิดและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ในบทความนี้ผู้เขียนจะแนะนำ อุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดหลักๆ หลักการ และการนำไปใช้งานของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง แต่ละชนิด

2.2.1 หลักการพื้นฐาน

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่ตกกระทบตัวเครื่องให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น ศักย์หรือกระแส ของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงหลายๆชนิดจะทำการแปลงสัญญาณนี้โดยการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ (electron-hole pairs) ขึ้นจากการดูดกลืนโฟตอน อิเล็กตรอนอิสระนี้จะเกิดขึ้นในแถบการนำและโฮลอิสระเกิดในแถบเวเลนซ์ พาหะอิสระเหล่านี้จะเกิดการเคลื่อนในอุปกรณ์วัดจนสร้างสนามไฟฟ้าและทำให้เกิด กระแสไฟฟ้า (photocurrent, I_{ph}) ประจุไฟฟ้า (e) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกเก็บสะสมรวบรวมไว้ที่วงจรภายนอกหรือประจุไว้ในแบตเตอรี่

2.2.2 ประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Photodetector)

Photodetector สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้อย่างหลากหลายตามแต่การนำไปใช้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งาน แต่โดยทั่วไปแล้วจะสามารถแบ่งได้ดังนี้ Photoresistor, Photovoltaic cell, Photomultiplier Tube และ Photodiode

2.2.2.1 Photoresistor หรือ Light Dependent Resistor (LDR)

Photoresistor เป็นอุปกรณ์ที่ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น Photoresistor ทำมาจากสารกึ่งตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ซึ่ง โดยทั่วไปแล้วจะผลิตจาก Cadmium Sulfide (CdS) ซึ่งมีความไวในช่วงแสงขาว หรือมีส่วนประกอบของ Lead Sulfide (PbS), Lead Selenide (PbSe) และ Lead Telluride (PbTe) ที่มีความไวในช่วงอินฟราเรด อุปกรณ์ตรวจวัดแสง ชนิดนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อแสงที่ตกกระทบมีความถี่เพียงพอที่จะทำให้ อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์กระโดดไปยังแถบการนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถนำกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มแสง การนำไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเวลาในการตอบสนองจะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของพาหะ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 50 มิลลิวินาที Photoresistor มีราคาไม่แพงมากนัก มีขนาดเล็ก และนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น มิเตอร์วัดแสงของกล้องถ่ายรูปสัญญาณเตือนความปลอดภัย หรือ ไฟตามท้องถนนที่เปิด-ปิดได้อย่างอัตโนมัติตามระดับความเข้มของแสง อาทิตย เป็นต้น

2.2.2.2 Photovoltaic cell หรือ Solar cell

เซลล์สุริยะ เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric Effect) ในการให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าจากแสงสว่างโดยส่วนประกอบหลัก คือ เซลลิกอนที่ถูกโด๊ป (การเพิ่มสารเพียงเล็กน้อยเข้าไปในสารกึ่งตัวนำเพื่อให้มีลักษณะเฉพาะตามต้องการ) ด้วยสารที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน เป็น 5 เช่น อาร์เซนิก หรือ ฟอสฟอรัส จนได้เป็นสารที่ เรียกว่า n-type หรือสารที่มีเวเลนซ์ อิเล็กตรอนเป็น 3 เช่น โบรอนจนได้เป็น p-type

กระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ประเภทนี้จะเป็นกระแสตรงที่สามารถประจุเข้าแบตเตอรี่หรือทำการแปลงสัญญาณให้ เป็นกระแสสลับได้ด้วยอินเวอร์เตอร์ เซลล์สุริยะมีการนำไปใช้ในการให้พลังงานกับอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น ดาวเทียมเครื่องคิดเลข ป้ายโฆษณา อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ไปในบ้าน หรือป้อนกลับเข้าสู่ระบบ เป็นต้น เซลล์สุริยะมีทั้งแบบที่ทำมาจากเซลล์ซิลิกอนผลึกเดี่ยว, แบบหลายๆผลึก และที่ไม่เป็นผลึก โดยแบบผลึกเดี่ยวจะให้ประสิทธิภาพมากที่สุดแต่จะมีราคาแพงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.3 Photomultiplier Tube Photomultiplier Tube (PMT)

ทำจากวัสดุที่เป็นโลหะประเภท alkali ซึ่งจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวหน้าเมื่อได้รับแสงตกกระทบหรือที่เรียกว่า Photoemissive Effect โดยโฟตอนที่มาตกกระทบนั้นจะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเหล่านี้หลุดออกมาได้ PMT เหมาะสำหรับการตรวจวัดแสงที่มีความเข้มต่ำและให้ผลได้อย่างรวดเร็ว PMT สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ Side-on Photomultiplier และ End-on Photomultiplier โดยที่ Side-on มีราคาสูงกว่าแบบ End-on ทั้งคู่เหมาะสำหรับงานด้าน Photometry และ Spectrophotometry แต่ข้อเสียของ PMT ชนิด Side-on จะให้ความไวที่ไม่แน่นอน ในขณะที่แบบ End-on หรือ Head-on นั้นจะให้ความไวที่เสถียรมากกว่า

2.2.2.4 Photodiodes

Photodiode เป็นอุปกรณ์ประเภทหนึ่งของ อุปกรณ์ตรวจวัดแสง มักใช้ตรวจวัดความเข้มแสงในงานทางด้านวิทยาศาสตร์และในอุตสาหกรรมที่ต้องการ ความแม่นยำสูง สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาทำเป็น Photodiode ได้แก่ ซิลิคอน อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์เจอร์มาเนียม, แกลเลียมไนไตรด์ และซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นต้น อุปกรณ์วัดประเภทนี้มีลักษณะเป็น p-n junction ได้แก่ PN Photodiode, PIN Photodiode และ Avalanche Photodiode (APD) โดย Photodiode อย่างง่ายที่สุดคือแบบ PN ซึ่งสามารถทำงานได้ 2 แบบ คือ Photovoltaic Mode ซึ่งจะทำงานได้โดยไม่ต้องใส่ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มเข้าไป และ Photoconductive Mode ซึ่งทำงานได้เมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าในลักษณะ reverse bias สำหรับการตอบสนองนั้นในแบบ Photoconductive Mode จะให้ผลที่รวดเร็วกว่า เพราะมีชั้น depletion region ที่กว้างกว่าและสนามไฟฟ้าที่แรงกว่า เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนประจุพาหะไปยังขั้วไฟฟ้าลดลง แต่มีข้อเสียตรงที่จะมีสัญญาณรบกวนเมื่อมีกระแสรั่วไหล

Internal Quantum Efficiency (QE) เป็นค่าที่แสดงจำนวนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อปริมาณโฟตอนที่ถูกดูดกลืน สำหรับค่า External Quantum Efficiency (η) นั้นหาได้จากจำนวนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้นค่า QE จึงมีค่ามากกว่า η แต่โฟตอนไม่ได้ถูกดูดกลืนทุกตัว และคู่อิเล็กตรอน-โฮลบางคู่อาจเกิดการรวมตัวก่อนที่จะเกิดเป็นกระแส ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงสัญญาณจากโฟตอนที่ได้รับให้กลายเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลจึงต้องคำนวณจากค่า η กระแส I_{ph} ใน วงจรภายนอกสามารถคำนวณได้จากการไหลของอิเล็กตรอนผ่าน Photodiode ต่อวินาที จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกเก็บสะสมภายใน 1 วินาที จึงมีค่าเป็น I_{ph}/e ถ้า P_o คือ พลังงานแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นจำนวนโฟตอนจะเท่ากับ P_o/h ค่า η จึงสามารถหาได้ดังนี้

$$\eta = \frac{I_{oh}/e}{P_o/hv} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	h	คือ ค่าคงที่ของ Planck
	e	คือ ประจุไฟฟ้า
	v	คือ ความถี่

ค่า QE ของอุปกรณ์ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำที่ค่าความยาวคลื่นที่สนใจและโครงสร้างของอุปกรณ์

ค่า QE สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการลดการสะท้อนที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ เพิ่มการดูดกลืนภายใน depletion layer และการป้องกันการรวมตัวหรือจับตัวของพวกพาหะก่อนที่จะถูกเก็บรวบรวม การตอบสนอง (R) (หรือ Spectral Responsivity หรือ Radiant Sensitivity) ขึ้นกับ QE และความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ ค่า R ของเครื่องตรวจวัดจะแสดงประสิทธิภาพของมันในรูปแบบของ I_{ph} ต่อค่าพลังงานของแสงที่ตกกระทบที่ค่าความยาวคลื่นนั้นๆ

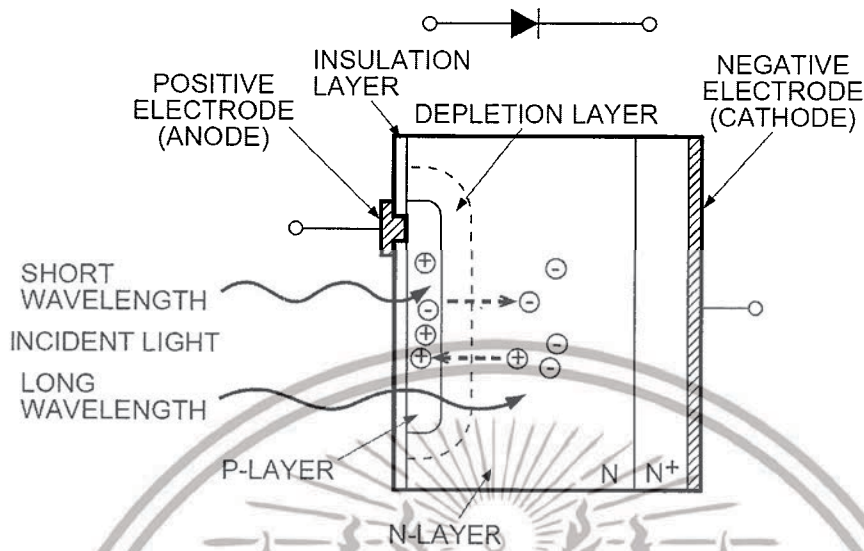
$$R = \frac{\eta e}{h\nu} \quad (2.13)$$

จากสมการนี้จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าการตอบสนองขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่น ซึ่งทำให้สามารถแบ่งประเภทของ Photodiode ตามช่วงความยาวคลื่นที่ใช้วัด ได้แก่

- X-ray Photodiode เหมาะสำหรับการตรวจวัดแสงในช่วงของรังสีเอ็กซ์, รังสีแกมมา และการแผ่ของรังสีเบตา
- UV Enhanced Photodiode เหมาะสำหรับแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงสีน้ำเงิน
- Visible Photodiode เหมาะสำหรับแสงขาว
- IR Enhanced Photodiode เหมาะสำหรับการตรวจวัดแสงในช่วงของรังสีอินฟราเรด

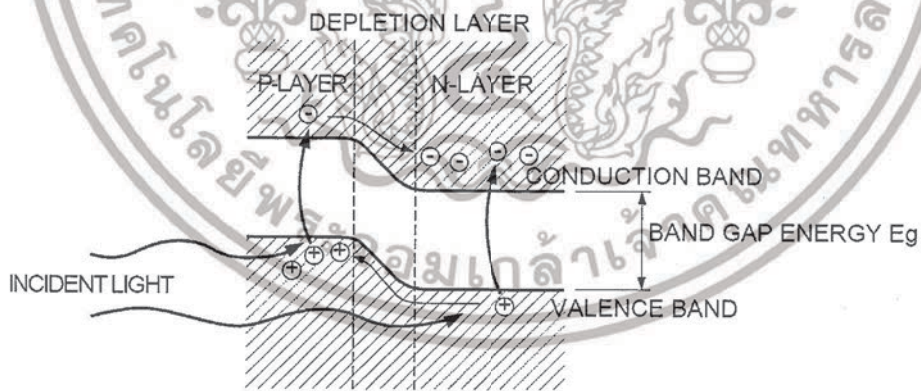
หลักการทำงานโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานชนิดรอยต่อ pn รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด ที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และต่อติดกับชนิด n เป็นรอยต่อ pn ที่รอยต่อ pn นี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิคอนนั้น ชั้น p เตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ซิลิคอนด้วยความลึกประมาณ $1 \mu\text{m}$ ที่ปริมาณตรงกลางรอยต่อ pn เป็นย่านปลอดพาหะ ในการผลิตจริงจะมีการควบคุมความหนาและปริมาณการโด๊ปสารเจือปนของชั้น p ชั้น n และชั้นล่างสุด (n^+) ให้เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้โฟโตไดโอดไวต่อแสงในย่านที่ต้องการได้และสามารถทำงานที่ความถี่ที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ ถ้า $h\nu > E_g$ แสงก็จะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืนโดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน และที่แถบเวเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่



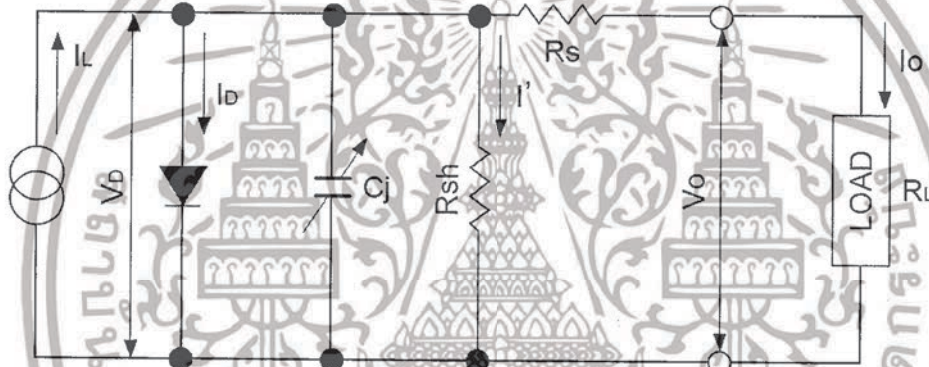
รูปที่ 2.5 แถบพลังงานโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p และ n อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้น p ลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใน (built-in potential) พัดพาให้วิ่งไปสู่ชั้น n ส่วนกรณีโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนของแสง (photo flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืนอิเล็กตรอนที่สะสมในชั้น n จะทำให้ชั้น n มีประจุไฟฟ้าเป็นลบและโฮลที่ไปสะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ต่อจากนั้นถ้าเราต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลก็จะไหลออกจากชั้น p ไปสู่วงจรรภายนอก

วงจรมูลของโฟโตไดโอดจะเห็นว่า กระแสเนื่องจากแสงแทนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (I_L) กระแสไฟฟ้าที่ออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อ p-n โดยมีความต้านทานของรอยต่อแบบชันต์มีค่ามาก ความจุไฟฟ้าของรอยต่อ ความต้านทานอนุกรมมีค่าน้อยต่ออยู่ แสดงในรูปที่ 2.6 โดยที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นคือ



รูปที่ 2.6 วงจรมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

- | | |
|---|--------------------------------------|
| I_L : กระแสไฟฟ้าโฟโต้ที่เกิดจากแสง | I_D : กระแสไฟฟ้ามืดในไดโอด |
| C_j : ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ pn | R_{sh} : ความต้านทานชันต์ |
| R_S : ความต้านทานอนุกรม | I' : กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh} |
| V_D : แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด | I_O : กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต |
| I_S : กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับของโฟโตไดโอด | V_O : แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต |

จากวงจรนี้สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้

$$I_O = I_L - I_D - I' = I_L - I_S \left(\exp \frac{qV_D}{kT} - 1 \right) - I' \quad (2.14)$$

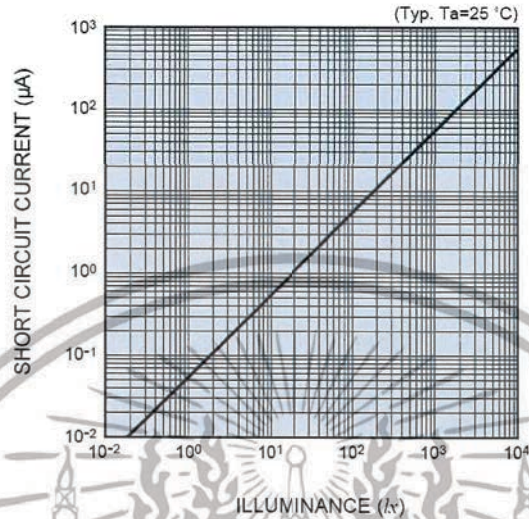
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่ส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะมีรูปเหมือนของไดโอดที่ใช้เป็นตัวเรกติไฟร์แสดงที่รูปที่ 2.7 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอดจะทำให้เส้น I-V เลื่อนแบบขนานไปสู่หมายเลข 2 และถ้าความเข้มของแสงมากขึ้น กระแสก็จะเลื่อนไปที่ I_{sc} โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปสู่แคโทด ถ้าเป็นวงจรเปิดเราจะได้แรงดันวงจรเปิด V_{oc} หรือ V_{oc} และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มของแสงในลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมากแสดงรูปที่ 2.8

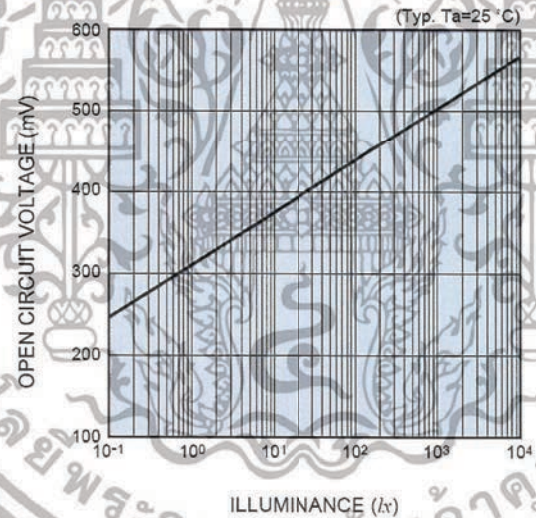


รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอดเส้นหมายเลข 1 แสดงในสภาพที่มืดและมีรูปร่างเหมือนของไดโอดทั่วไป หมายเลข 2 และ 3 แสดงในสภาพมีแสงและเส้นกราฟจะเคลื่อนลงด้านล่าง

(a) Short circuit current



(b) Open circuit voltage



รูปที่ 2.8 ความเข้มแสงกับกระแสลัดวงจรและความเข้มแสงกับแรงดันวงจรเปิด

2.2.2.4.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงอินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุต ได้เมื่อมีแสงมากระทบ ปัจจุบันมีการพัฒนาให้โฟโตไดโอดมีโครงสร้างและคุณสมบัติเด่นแตกต่างกันออกไปมากมายหลายชนิด เช่น

1. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn (pn photodiode) และแบ่งออกเป็น

- ชนิดพลาแนร์ดิฟฟิวชัน (planar diffusion)

โฟโตไดโอดชนิดพลาแนร์ดิฟฟิวชัน (Planar diffusion type) มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ pn และมีฉนวน SiO_2 เคลือบทับ มีกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อย วัสดุที่ใช้ได้แก่ Si, GaAs, GaP, Ge และ GaAs เป็นต้น

- ชนิดพลาแนร์ดิฟฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ (low capacitance planar diffusion)

โฟโตไดโอดชนิดพลาแนร์ดิฟฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ (Low capacitance planar diffusion type) เป็นชนิดที่ชนิดที่ออกแบบให้สารเจือปนในชั้น n มีปริมาณน้อย ทำให้ชั้น n มีความต้านทานสูงและชั้นปลอดพาหะค่อนข้างหนา เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าน้อย ทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วมาก ช่วงเวลาขาขึ้นมีค่าเพียง 1 ใน 10 ของชนิดแรก นอกจากนี้เนื่องจากชั้น p มีความบางมาก จึงตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

- ชนิดรอยต่อ pnn⁺

โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pnn⁺ สารกึ่งตัวนำชั้น n⁺ มีค่าสภาพความต้านทานต่ำโดยการโคปด้วยสารเจือปนปริมาณมากๆ และชั้น n⁺ หนาหลายๆจนทำให้ที่รอยต่อระหว่างชั้น n และชั้น n⁺ เปรียบเสมือนชั้นปลอดพาหะ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ไม่มีผลตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด จึงทำให้วัดแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

2. พินโฟโตไดโอด (pin photodiode)

โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pin หรือพินโฟโตไดโอด ที่บริเวณตรงระหว่างชั้น p และ n มีการใส่ชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic, i) ทำให้โฟโตไดโอดทำงานได้รวดเร็วมากเป็นพิเศษ เพราะชั้น i หนาและมีค่าคาปาซิแตนซ์น้อยมาก ในการใช้งานจะใช้วิธีไบอัสแบบย้อนหลังจึงทำให้กระแสไฟฟ้ารั่วมีค่าน้อย

3. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อช็อตกี (Schottky Photodiode)

โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อช็อตกี (Schottky Photodiode) เป็นโฟโตไดโอดรอยต่อช็อตกี ใช้วิธีเคลือบโลหะที่บางๆ ลงบนที่ผิวของสารตัวนำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อช็อตกี เช่น เคลือบทองคำลงบน GaAs ชนิด n เนื่องจากโลหะที่เคลือบนั้นบางมาก ดังนั้นโฟโตไดโอดชนิดนี้ตอบสนองต่อแสงตั้งแต่ย่านมองเห็นไปจนถึงย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดี

4. อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode)

โฟโตไดโอดชนิดรอยต่ออะวาลานซ์ (Avalanche photodiode) เป็นโฟโตไดโอดที่มีการขยายสัญญาณอยู่ภายในทำงานโดยใช้สนามไฟฟ้าสูงป้อนเข้าสู่รอยต่อพีเอ็น แบบย้อนกลับจนทำให้พาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงถูกเร่งให้วิ่งไปชนกับอะตอมตัวอื่นๆ และเกิดอิเล็กตรอนชดที่สอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(secondary electrons) ขึ้นมาใหม่ และกระบวนการเช่นนี้เกิดขึ้นซ้ำๆ กันซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์อะวาแลนช์ (avalanche effect) ทำให้สามารถตรวจวัดแสงที่มีความเข้มต่ำมากๆ ได้ดี เพราะโฟโตไดโอดชนิดนี้มีกลไกของการขยายสัญญาณอยู่ภายใน นอกจากนี้ก็มีผลตอบสนองที่รวดเร็วมกด้วย

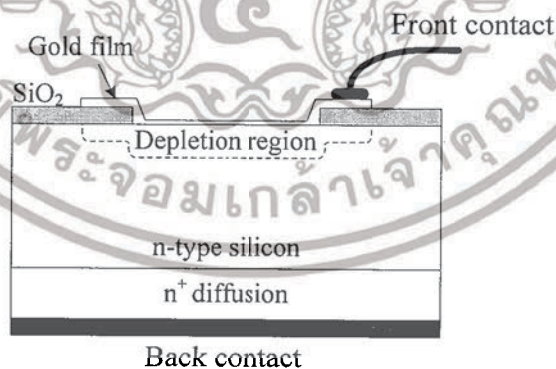
โฟโตไดโอดทั้งหมดมีคุณสมบัติทั่วไป คือ

1. สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงอินพุตแบบเชิงเส้นได้ดี (excellent linearity)
2. มีสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise)
3. ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้าง (wide spectral response)
4. มีความคงทนทางกลศาสตร์ (mechanical ruggedness)
5. มีขนาดกะทัดรัดและเบา (compact & light weight)
6. มีอายุการใช้งานยาวนาน (long life time)

2.3 รอยสัมผัสชนิดซีดกี

2.3.1 โครงสร้างของซีดกีโฟโตไดโอด

ซีดกีโฟโตไดโอด สร้างขึ้นจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้น p จะถูกแทนด้วยฟิล์มโลหะที่บางมาก เช่น ทองคำ หนาประมาณ 15 nm โครงสร้างของซีดกีโฟโตไดโอด แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของซีดกีโฟโตไดโอด

ชั้นฟิล์มโลหะบางๆ นี้ จะทำให้แสงสามารถผ่านทะลุชั้นโลหะลงไปได้ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะจะเกิดขึ้นที่ชั้นฟิล์มโลหะ โฟตอนที่ทะลุผ่านชั้นฟิล์มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะบางๆ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ถ้าเปรียบเทียบกับ ฟิน-โฟโตไดโอดแล้ว ซ็อตทีย์โฟโตไดโอดจะมีชั้นคูดกลืนแสงแคบกว่า ทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้จากโครงสร้างซ็อตทีย์โฟโตไดโอดยังมีค่าของความต้านทานและความจุไฟฟ้าในโครงสร้างมีค่าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูงกว่า สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ได้ดี

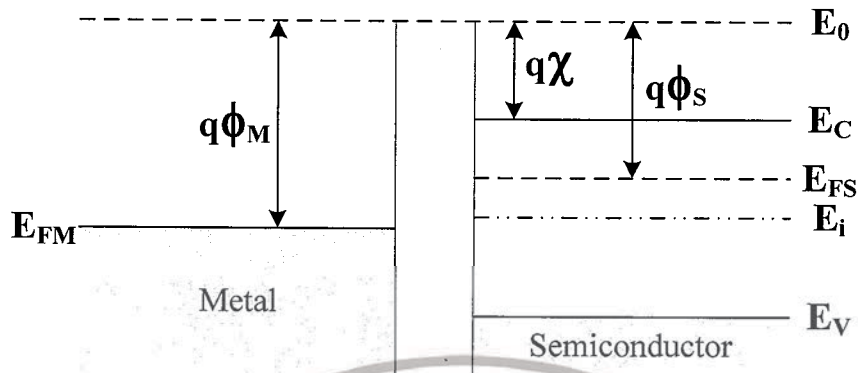
อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นคูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าต่ำ ในส่วนของฟิล์มโลหะด้านหน้าต้องมีความบางมาก เพื่อให้แสงสามารถผ่านชั้นโลหะลงไปได้ อีกทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว (surface state) ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอนและระดับจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้าคือ รอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก (ohmic contact) และรอยสัมผัสแบบซ็อตทีย์ (schottky contact) ซึ่งรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิกเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัส ส่วนรอยสัมผัสแบบซ็อตทีย์เป็นรอยสัมผัสที่แสดงคุณสมบัติเรกติไฟร์ (rectifier) คล้ายกับ ไดโอด โดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นรอยสัมผัสแบบซ็อตทีย์เท่านั้น

2.3.2 กลไกการเกิดรอยสัมผัสซ็อตทีย์

แถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.10 ระดับสุญญากาศ (vacuum level, E_0) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศนี้นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มี (fermi level, E_{FM}) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มีและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ เขียนแทนด้วย ϕ_M มีค่าดังสมการที่ 2.15 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น อลูมิเนียม มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 4.3 eV

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (2.15)$$

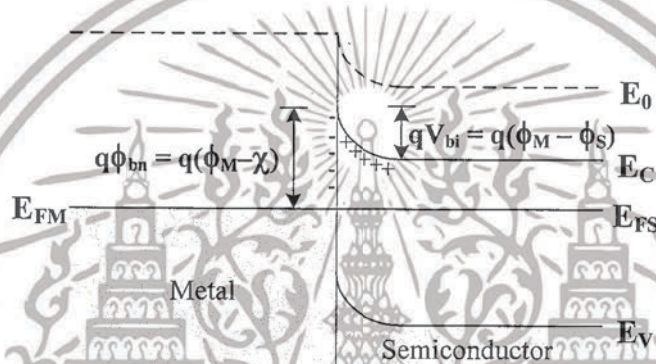
ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มีจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (E_i) และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย ϕ_s มีค่าเท่ากับความต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มี ดังสมการที่ 2.16

$$q\phi_s = E_0 - E_{FS} \quad (2.16)$$

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

การเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M > q\phi_s$) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มีของโลหะ จึงเกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D^+) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช้อตคกี

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier, V_{bi}) ปกป้องการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.17

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_s) \tag{2.17}$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ช้อตคกี (schottky barrier, ϕ_{bn}) มีค่าดังสมการที่ 2.18 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช้อตคกีต่างๆกัน

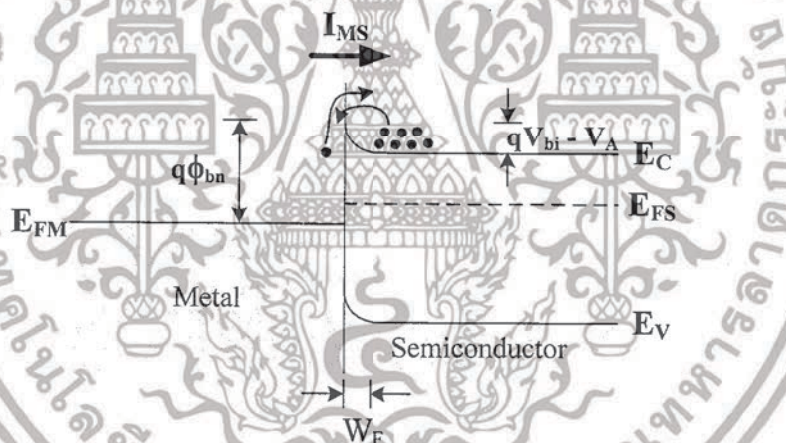
$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \tag{2.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 รอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วขณะได้รับไบอัส

2.3.3.1 รอยสัมผัสชนิดขั้วตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.12 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายใน ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi}-V_A)$ และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงศักย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ (2.19)



รูปที่ 2.12 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.19)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (n-Si) [12]

ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ชนิดกึ่งขั้ว

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

k คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคติจี้เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ (2.20)

$$I_R = A R T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.20)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (n-Si) [12]

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

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

ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคติจี้

k คือ ค่าคงที่โบสต์มันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width, W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ (2.21) โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.21)$$

โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

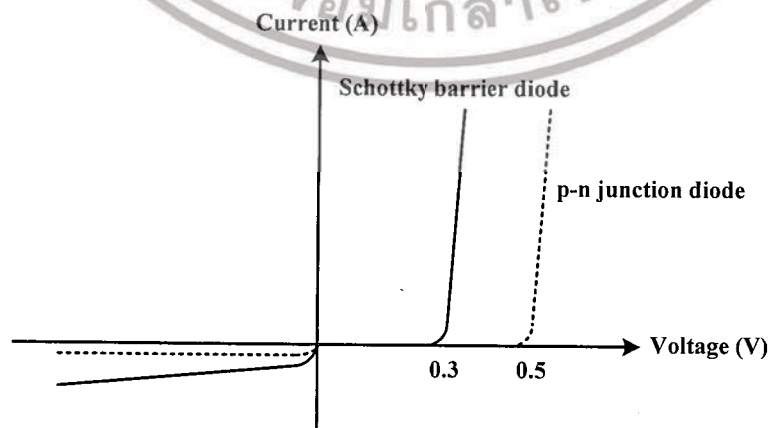
q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ ค่าแรงศักย์เกิดขึ้นในค่านสารกึ่งตัวนำ

2.3.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกี

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสสกรคติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับ ไดโอดแบบรอยต่อ p-n คือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือ ไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่าแรงดันภายในของ肖ตกีไดโอดมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ p-n ที่มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V และเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนกระแสรั่วไหลของ肖ตกีไดโอดมีค่าสูงกว่าไดโอดแบบรอยต่อ p-n เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.14 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ肖ตกีไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ

ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ มีค่าดังสมการที่ 2.22

$$C = \frac{A\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.22)$$

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 แรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.15 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

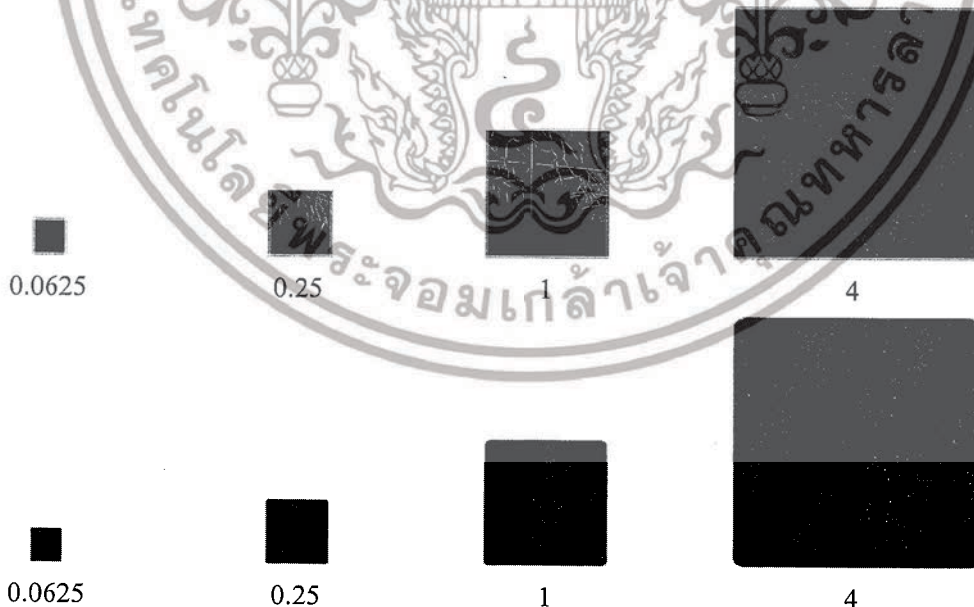
บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

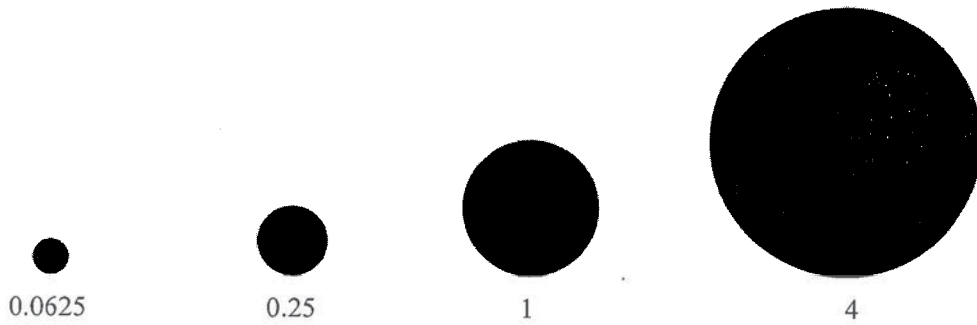
หลังจากที่ได้มีการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ และเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางแล้ว ประโยชน์ขั้นต้นนั้นจะเป็นการนำฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มาทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจจับแสง Schottky Photo Detector ทำการออกแบบเพื่อศึกษาหา ลักษณะ โครงสร้าง และขนาดพื้นที่ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ซึ่งเป็นพื้นที่รับแสงที่เหมาะสม โดยจะศึกษาผลของแรงดันภายใน (V_{bi}), ความสูงกำแพงศักย์ช็อคกี (ϕ_{bn}), ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี (I-V), กระแสมืด (I_0), อัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืด (I/I_0) และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V) ด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ได้การตอบสนองต่อแสงที่ดีที่สุด

3.1 การออกแบบและโครงสร้าง

การออกแบบลักษณะ โครงสร้างต่างๆ คือ สี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมมนขอบ และวงกลม ขนาดพื้นที่ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ คือ 0.0625 mm^2 , 0.25 mm^2 , 1 mm^2 และ 4 mm^2 ดังรูปที่ 3.1

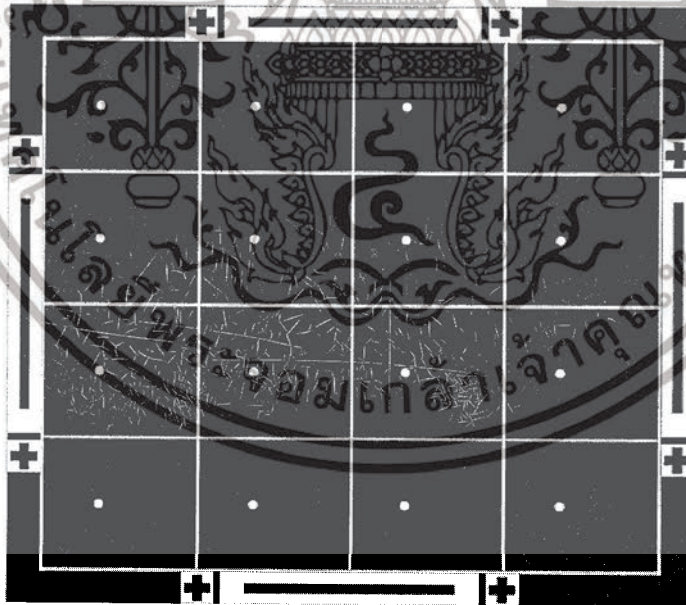


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



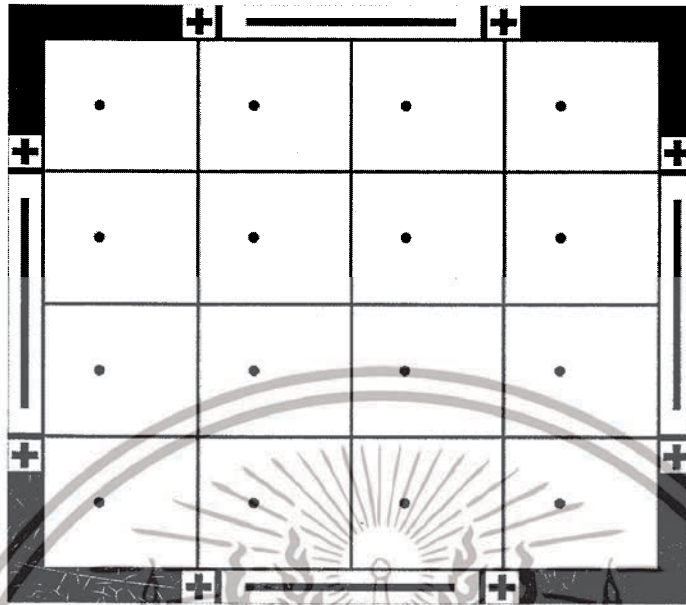
รูปที่ 3.1 ขนาดและลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และวงกลมของฟิล์มบางอินเดียมทิน ออกไซด์ตามลำดับ

การออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบ (Photomask) เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสง Schottky Photo Detector ทำการออกแบบกระจกต้นแบบไว้ทั้งหมด 3 แบบ คือ Oxide Mask, Al Mask และ ITO Mask ดังรูปที่แสดงต่อไปนี้

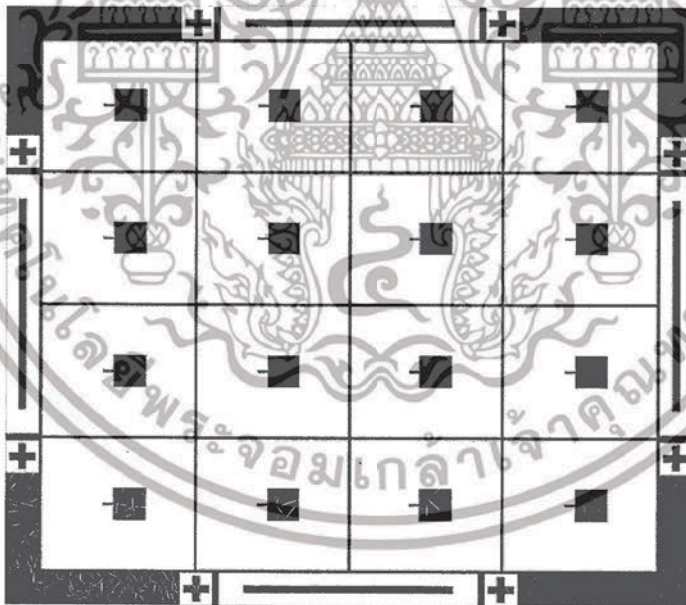


รูปที่ 3.2 กระจกต้นแบบของออกไซด์ (Oxide Mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กระดาษต้นแบบของอินเดียมทินออกไซด์ (ITO Mask)



รูปที่ 3.4 กระดาษต้นแบบของอลูมิเนียม (Aluminium Mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง Schottky Photo Detector โดยมีอินเดียมทินออกไซด์ เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสจะใช้เทคโนโลยีของซิลิคอนซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมที่ใช้ใน ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ การสร้างลวดลายต่างๆจะใช้เทคนิคของโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หลังจากขั้นตอนการออกแบบและการสร้างกระจกต้นแบบ (Photomask) แล้ว จึงเริ่มกระบวนการสร้างโดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็็น ระบาย (100) ซึ่งมีค่าสภาพต้านทาน (Resistivity) 1-10 Ω -cm และมีความหนาประมาณ 300 μm ขั้นตอนกระบวนการสร้างมี ดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

- อุลตราโซนิก (Ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ที่ขจัดไอออนแล้ว (di-ionization water, ID) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดพิริยา (Piranha) จำนวน 1 แก้ว 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลเอทรีลีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวก ไขมัน
- อุลตราโซนิกในอะซิโตน (Acetone) 3 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric Acid, HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เป็นเวลา 20 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 1

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน (Thermal Oxidation) ให้ได้ ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 5,000 Å เส้นใยและกระบวนการสร้างมีดังนี้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

1,200 cc/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการออกซิเดชันแบบขึ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1,000 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1,200 cc/นาที

3. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็นเข้มขึ้น

การแพร่สารเจือชนิดเอ็นเข้มขึ้นที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำให้อรอยสัมผัสของ อลูมิเนียมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสชนิด โอห์มมิก (ohmic contact) ขั้นตอนการแพร่สารเจือมีดังนี้

- สกัดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ด้านหลังแผ่นซิลิคอน โดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH₄F อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1,000 Å/นาที เป็นเวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- เปิดเตา ปรับอุณหภูมิของเตาเป็น 1,050 °C และทำการจ่ายก๊าซไนโตรเจนขึ้นต้น โดยมีอัตราการไหล 500 cc/นาที
- ใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิภายในเตา เมื่ออุณหภูมิของเตามีค่าประมาณ 1050 °C แล้วให้เพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็น 800 cc/นาที
- ทำการดันโบทที่มีแผ่น Phosphorus และแผ่นซิลิคอนอยู่เข้าไป โดยเริ่มจากนำโบทวางทิ้งไว้ที่ปากเตาเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ทั้งแผ่น Phosphorus และแผ่นซิลิคอนมีการปรับอุณหภูมิ จากนั้นค่อยๆดันโบทเข้าไปในเตาจนถึงตำแหน่งที่เหมาะสม (ประมาณกลางเตา) ทิ้งไว้ 20 นาที
- หยุดการจ่ายก๊าซไนโตรเจน แล้วทำการจ่ายก๊าซออกซิเจน (แบบแห้ง) โดยมีอัตราการไหล 1,200 cc/นาที และมีอุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที
- เมื่อครบตามเวลา ค่อยๆดึงโบทออก แล้วทิ้งไว้ที่ปากเตา เป็นเวลา 5 แล้วนำโบทออกจากเตา

4. กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 2

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน (Thermal Oxidation) ให้ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1,500 Å เส้นใยและกระบวนการสร้างมีดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เดิมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นซิลิคอน โดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH₄F อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1,000 Å/นาที เป็นเวลา 5 นาที
 - จุ่มใน DI 2 แก้ว
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1,200 cc/นาที
 - ทำการออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 10 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1,000 cc/นาที
 - ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1,200 cc/นาที
5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 1 (Oxide Mask)
- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
 - เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
 - อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
 - ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 1 (Oxide Mask) ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
 - ชี้นลวดลายขี้ยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขี้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้วๆ ละ 15 วินาที
 - จุ่มใน DI 2 แก้ว
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - อบแผ่นครั้งที่สอง (post bake) ให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สกัดชั้นซัลฟิดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสงโดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH₄F อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซัลฟิดออกไซด์ 1,000 Å/นาที เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

6. กระบวนการสปีดเตอร์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

การปลูกฟิล์มบางของอินเดียมทินออกไซด์ จะใช้สารเคลือบเป็นเป้า (target) เป็นอินเดียมทินออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 นิ้ว ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง In₂O₃ 90 wt% กับ SnO₂ 10 wt% ในโครงการนี้ใช้เทคนิคในการปลูกฟิล์มบางที่ไม่มีการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับโดยขั้นตอนการทำงานในระบบมีดังนี้

- ติดตั้ง ITO target
- เช็กระบบ

chamber	:	close
main valve (MV.)	:	close
roughing valve (RV.)	:	close
forline valve (FV.)	:	close
needle valve (NV.)	:	close
stop valve	:	close
cooling water valve	:	close

- เปิดวาล์ว cooling water (หมุน 2.5 รอบ และวาล์วทุกตัวเปิด)
- เปิดสวิตช์ Rotary pump (main switch) และเปิดสวิตช์ diffusion pump (diffusion pump) จะทำงานหลังจากเปิดแล้วประมาณ 20 นาที ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 400 °c) แล้วรอประมาณ 2-5 นาทีก่อนเปิดวาล์ว RV.
- เปิดวาล์ว RV. (ค่อยๆหมุน) และรอจนกว่าจะได้ pressure < 1x10⁻¹ bar อีกจึงปิดวาล์ว NV. แล้วเปิดที่หัวถังของอาร์กอนแก๊ส ปรับความดันให้ได้ 10 Psi แล้วปิดหัวถังอาร์กอนแก๊ส กลับมาเปิดวาล์ว NV. ใหม่รอให้ได้ pressure < 1x10⁻¹ bar อีกครั้ง ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างนี้ประมาณ 3 ครั้ง เมื่อครบแล้วให้ปิด stop valve และเปิดอาร์กอนแก๊สมาข้างไว้
ในท่อ)

- ปิดวาล์ว RV.
- เปิดวาล์ว FV. แล้วทดลองใช้ geissler tube วัดอากาศใน Chamber (geissler tube ไม่ควรติด) รอประมาณ 3 นาที
- เปิดวาล์ว MV. (ค่อยๆเปิดจนสุด) และรอนระบบมี pressure ใน chamber $< 1 \times 10^{-5}$ bar โดยวัดได้จาก B-A vacuum gauge (หรือ ion-gauge)
- เติม liquid N_2 เมื่อได้ pressure ประมาณ 1×10^{-5} bar และเติมทุกๆ 30 นาทีจนกว่าจะได้ base pressure $< 1 \times 10^{-6}$
- ปิดสวิทช์ B-A vacuum gauge
- ปิดวาล์ว NV. แล้วเปิดหัวถัง Ar gas ปรับ regulator ให้ได้ 10 Psi
- ปิดวาล์ว MV.
- เปิดวาล์ว MV. สำหรับ flow Ar gas โดยหมุนวาล์ว MV. ประมาณ 2.5 – 3 รอบ
- เปิดวาล์ว MV. (ค่อยๆหมุน สำหรับควบคุม pressure ให้ได้ 4×10^{-2} bar ขณะทำ sputtering
- เปิดสวิทช์ RF power switch โดย

AC power switch	:	On
RF power switch	:	On
- ปรับ RF power set (ยังไม่เปิด Shutter)

forward power	100	W.
(ทำการเพิ่มทีละ 20 W ทุกๆ 5 นาที)		
reflect power	<50	W.
anode voltage	<1.5	kV.
- ทำการ pre-sputter โดยยังไม่ต้องเปิด shutter เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เปิด shutter ทำการ sputter ตามเวลาที่ต้องการ
- ปิด shutter
- ปรับ RF power set ของ forward power โดยลดลงทีละ 20 W ทุกๆ 5 นาที จนเป็นสวิทช์ของ RF power switch
- ปิด Ar gas โดย

ปิดวาล์ว NV.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stop valve

ปิดหัวถังแก๊ส

- เปิดวาล์ว MV. จนสุด และรออีก 1 ชั่วโมง
 - ปิดสวิตช์ AC switch ของ RF power switch หลังจากปิดสวิตช์ RF switch แล้ว 15 นาที
 - ปิดวาล์ว MV.
 - ปิดสวิตช์ diffusion pump แล้วรออีก 30 นาที
 - ปิดวาล์ว FV.
 - ปิดสวิตช์ rotary pump
 - Leak pressure ของ rotary pump ในทันที
 - ปิดระบบ cooling water
7. กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 2 (ITO Mask)
- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
 - เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
 - อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
 - ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 3 (ITO Mask) ด้วยเครื่องปรับชั้นมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
 - ชื่นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
 - จุ่มใน DI 2 แก้ว
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - สกัดชั้นฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ออก เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส โดยจุ่มลงในสารละลาย HCL(HCL : DI อัตราส่วน 1 : 1) ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 30 วินาที
 - จุ่มใน DI 2 แก้ว
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

8. กระบวนการอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Annealing)

การอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เป็นกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้โครงสร้างของฟิล์มสมบูรณ์ขึ้น มีสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น และทำให้การยึดเกาะกับซิลิคอนดีขึ้น โดยนำชิ้นงานไปอบในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1,000 cc/นาที

9. กระบวนการเคลือบฟิล์ม โลหะอลูมิเนียม (ด้านหน้าแผ่นซิลิคอน)

เคลือบผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr

10. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 3 (Aluminium Mask)

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 2 (Aluminium Mask) ด้วยเครื่องปรับซ้อณมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- จุ่มลงในน้ำยาละลายฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มลงในน้ำยาจุ่มละลาย (AZ Developer) 2 แก้วๆ ละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นครั้งที่สอง (post bake) ให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- สกัดชั้นฟิล์ม โลหะอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อสร้างเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้สารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching) ซึ่งมีส่วนผสมของ H_3PO_4 : HNO_3 :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{CH}_3\text{COOH} : \text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ทำการจุ่มลงในสารละลายสกัดชั้น
อลูมิเนียมที่อุณหภูมิประมาณ 40°C เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที

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

11. กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม (ด้านหลังแผ่นซิลิคอน)

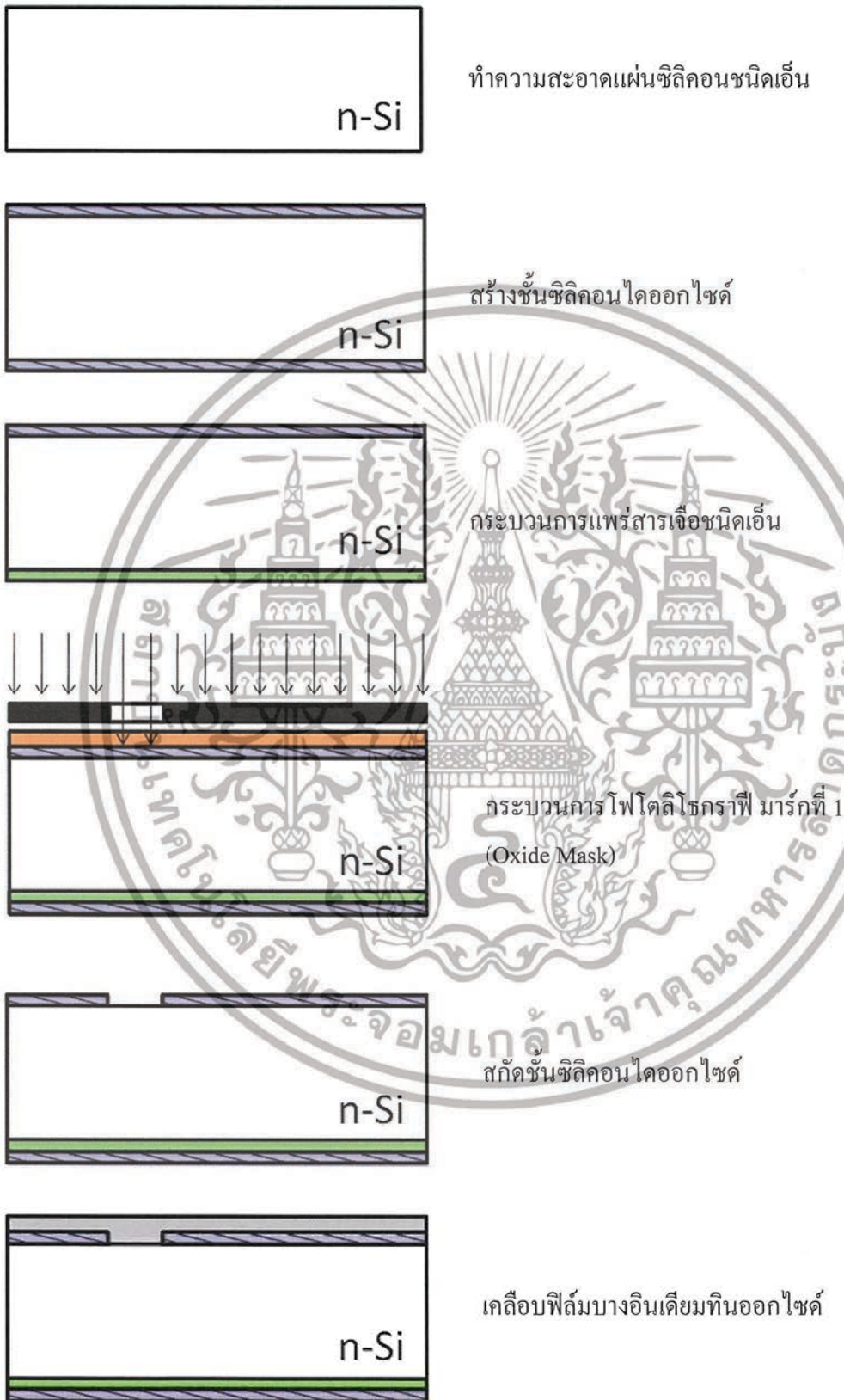
- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 5-10 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที
- ทำการสกัดชั้นออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน โดยจุ่มในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric Acid: HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เป็นเวลา 20 นาที
- เคลือบด้านหลังของแผ่นซิลิคอนด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr

12. กระบวนการอบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม (Sintering)

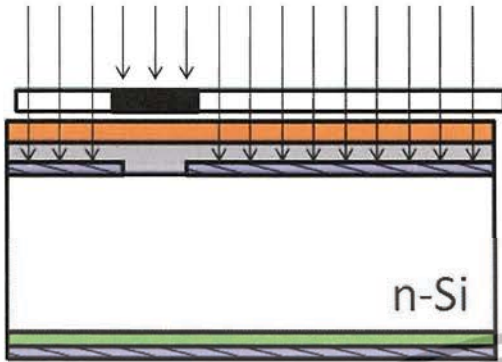
กระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 480°C โดยมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1000 cc/นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดีและมีกระแสรั่วไหลต่ำ

สรุปกระบวนการสร้าง Schottky Photo Detector โดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า
ไปเร่งใส่ได้ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



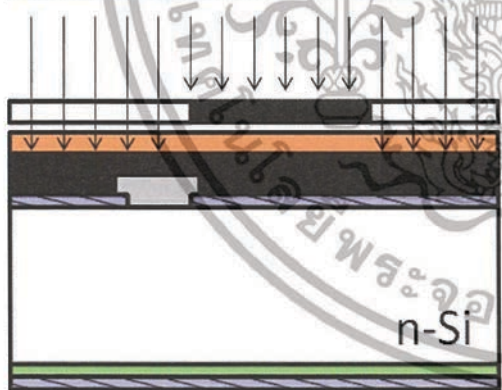
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 2
(ITO Mask)



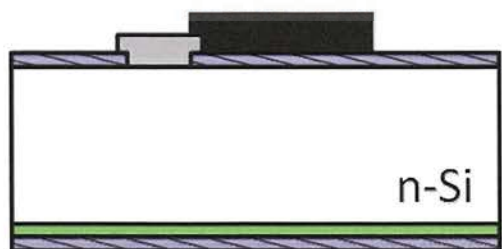
สกัดชั้นฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์



เคลือบชั้นอลูมิเนียม ด้านหน้าแผ่นผลึก

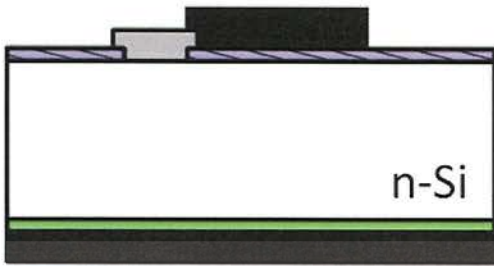


กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 3
(Aluminium Pad Mask)



สกัดชั้นอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เคลือบชั้นออกซิเดียม ด้านหน้าแผ่นผลึก

รูปที่ 3.5 สรุประบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง Schottky Photo Detector โดยมีอินเดียมทินออกไซด์ เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษและการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เหมาะสมในการนำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดช็อตกีย์โครงสร้าง ITO/n-Si แบบแนวตั้ง โดยในการศึกษาคุณสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์นี้ จะได้ศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้า และหลังจากที่ได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมแล้ว จะทำการออกแบบในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงต่อไป การศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงจะทำการศึกษาคุณสมบัติ I-V และ C-V ซึ่งรายละเอียดการศึกษาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์และการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองตอนที่ 1

4.1.1 การศึกษาและเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

ในการเริ่มต้นหาค่าที่เหมาะสมของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์นั้น ควรเข้าใจลักษณะของสารประกอบโปร่งใสฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อน ซึ่งสารประกอบโปร่งใสชนิดนี้เป็นสารตัวนำ มีคุณสมบัติโปร่งใส แข็งแต่เปราะ มีจุดเดือดที่สูงและเป็นสารประกอบประเภทอัลลอยด์ ฉะนั้นเมื่อเรามาคววิธีในการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก็มีหลายวิธี แต่ในการทดลองของเราจะใช้วิธี r.f. sputter เป็นวิธีที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่มีจุดหลอมเหลวสูง กระนั้นอีกเหตุผลที่ทำให้เราเลือกใช้วิธี อาร์เอฟ สปีดเตอร์ คือ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มีเครื่องมือที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางคือ LPCVD, Evaporator และ r.f. sputter ที่สามารถสร้างฟิล์มบางแล้วมีคุณสมบัติในเรื่องของ ความสม่ำเสมอของพื้นผิวฟิล์ม คุณภาพของฟิล์มบางและความเหมาะสมสำหรับสร้างในเทคโนโลยีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และในการเตรียมฟิล์มบางนั้นเราจะคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความหนาของฟิล์มบาง การส่องผ่านแสงของฟิล์มบาง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ดังนั้นเราจึงทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของฟิล์มบางเพื่อที่จะทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

ในขั้นแรกจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ โดยใช้ เวลาในการสปีดเตอร์ 5, 15, 30 และ 60 นาที ซึ่งผลการทดลองที่ทำการวัด คือ

1. คุณสมบัติทางโครงสร้าง
 - องค์ประกอบทางโครงสร้าง
 - ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม

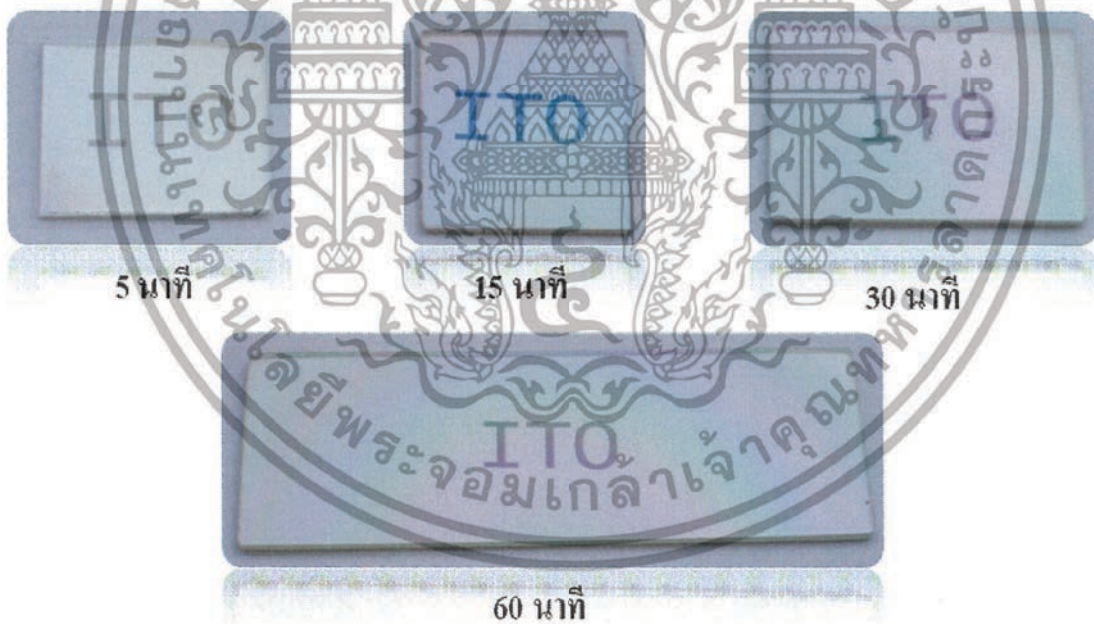
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คุณสมบัติทางแสง
 - ความโปร่งใสของฟิล์ม
 - ช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
3. คุณสมบัติทางไฟฟ้า
 - สภาพต้านทานเชิงแผ่น

โดยเมื่อเราทำการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์แล้วจะทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการแอนนีส (annealing) ที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที ในบรรยากาศของออกซิเจน, ไนโตรเจน และอากาศ ตามลำดับ

4.1.2 ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยที่ไม่มีการแอนนีส

4.1.2.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง

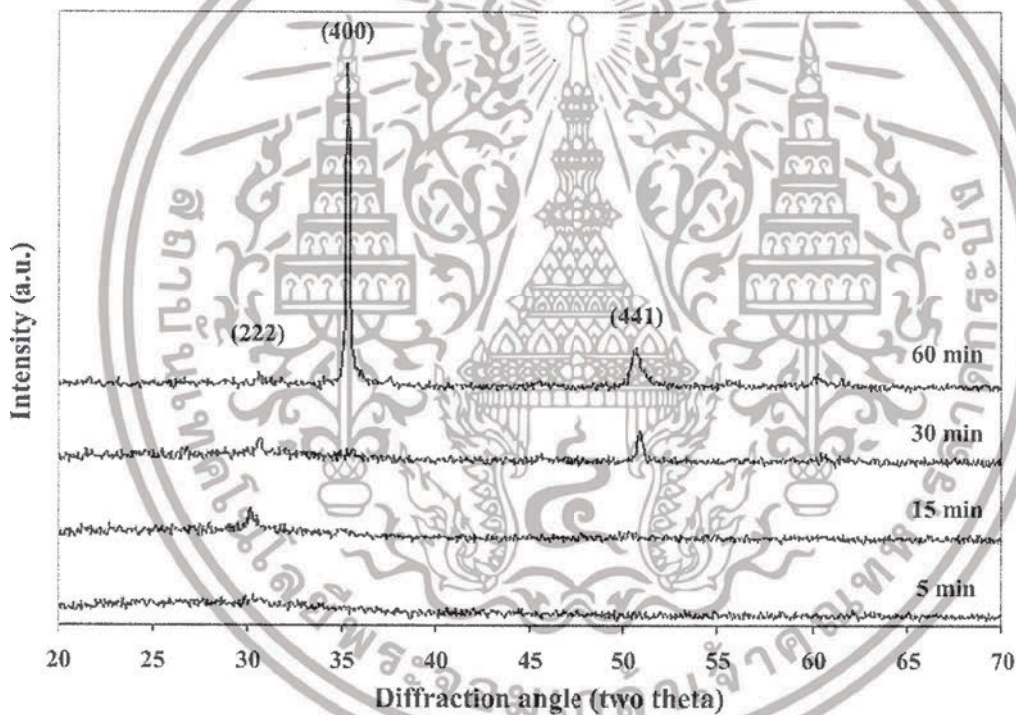


รูปที่ 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ทำการเตรียมที่เวลาต่างๆ

ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียม ณ เวลาต่างกันจะเห็นได้จากรูปที่ 4.1 พื้นผิวทั่วไปของฟิล์มบางจะมีริ้วเกิดขึ้นนั่นคือความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มบางในจุดต่างๆ โดยที่ความหนาที่แตกต่างกันมีค่าไม่มากนัก ที่เวลาในการเตรียมฟิล์มบาง 5 นาที ฟิล์มบางจะมีริ้วเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยและมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

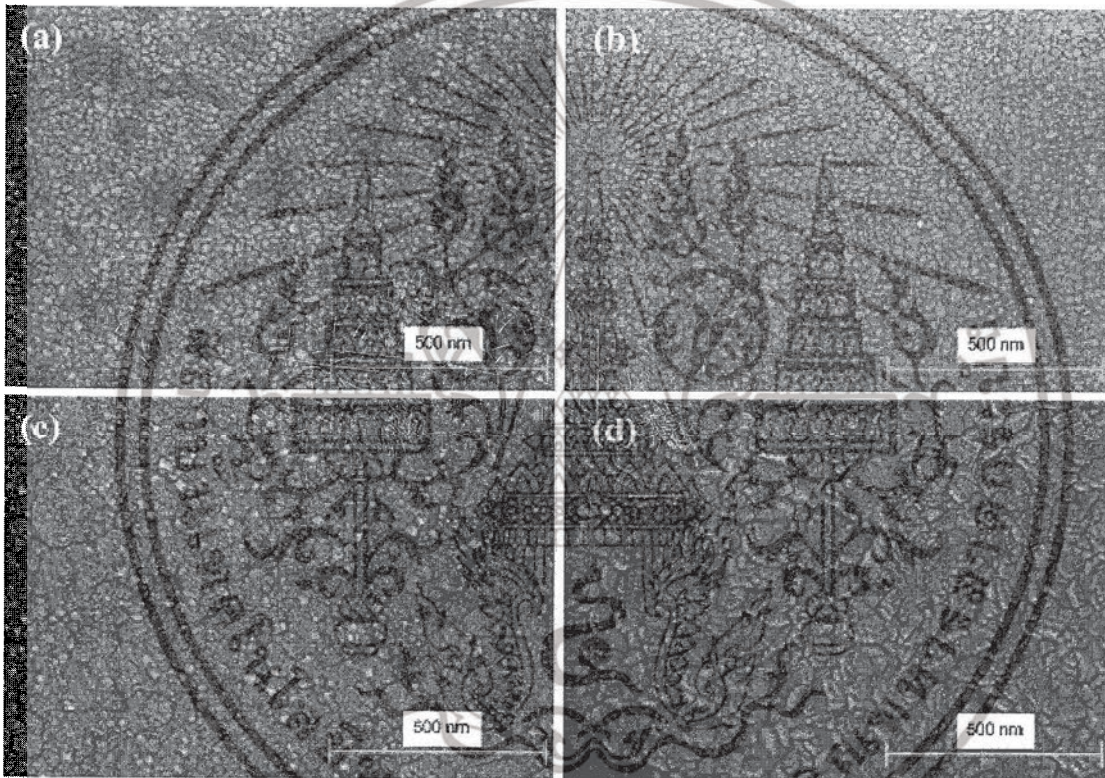
โปรงใสสูง สังเกตได้จากตัวหนังสือ ITO ที่อยู่ด้านหลังแผ่นฟิล์มบาง จากรูปที่เวลาในการเตรียมฟิล์มบาง 15 นาที ฟิล์มบางมีริ้วเกิดขึ้นเล็กน้อยแต่ยังคงความโปรงใสที่ค่อนข้างสูงอยู่ เมื่อเวลาในการเตรียมเพิ่มขึ้นเป็น 30 นาที ฟิล์มมีริ้วเกิดขึ้นชัดเจนแต่ความใสของฟิล์มเริ่มลดน้อยลงไปและเมื่อมาดูฟิล์มบางที่เวลาในการเตรียม 60 นาที ความโปรงใสของฟิล์มบางมีค่าน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเจนแต่ริ้วที่เกิดขึ้นบนผิวฟิล์มก็มากตามไปด้วย ริ้วที่เกิดขึ้นนี้อาจจะบ่งบอกถึงปริมาณของอินเดียมทินออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการเตรียมเพิ่มขึ้น ลักษณะของริ้วจะมีสีต่างๆที่เกิดขึ้นโดยริ้วที่มีความหนาและมีคุณสมบัติคือ ริ้วที่เป็นสีม่วง โดยจะมีความหนากว่าบริเวณอื่น คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าก็ดีกว่าอีกด้วย



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ คือ 5, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ จากรูปนี้ จะแสดงระนาบต่างๆ คือ (222), (400) และ (441) ซึ่งระนาบเหล่านี้เป็นระนาบของอินเดียมทินออกไซด์ ฉะนั้นจึงมั่นใจว่าฟิล์มบางที่ทำการปลูกนี้มีองค์ประกอบของอินเดียมทินออกไซด์อยู่ และจะเห็นจากรูปได้ว่าที่ระนาบ (400) เมื่อเวลาในการเตรียมฟิล์มบางเพิ่มขึ้นความเด่นชัดของระนาบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

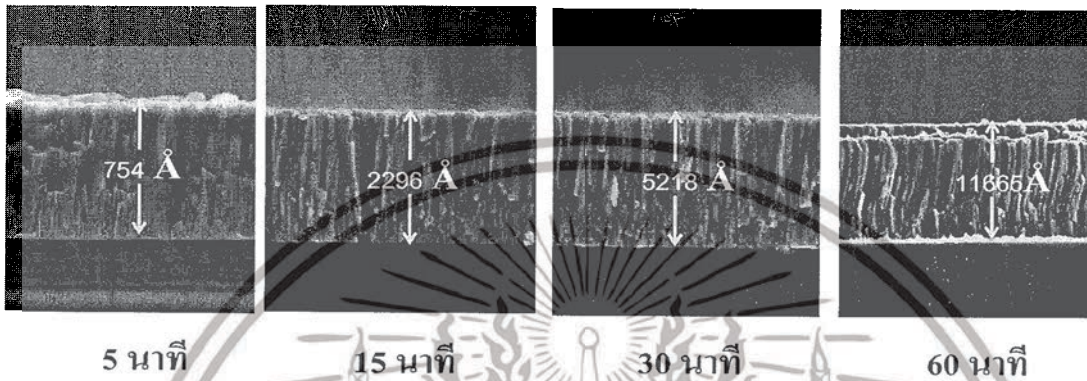
เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจนที่สุด เป็นผลจากการจัดเรียงตัวของผลึกที่ค่อนข้างสมบูรณ์ทำให้เห็น
 ระนาบที่ชัดเจน ส่วนระนาบ (222) และ (441) ถึงแม้ว่าจะมีระนาบที่ไม่ชัดเจนนักเป็นผล
 เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวที่ยังไม่ค่อยสมบูรณ์นักแต่ก็ยังคงลักษณะของอินเดียมทินออกไซด์ ที่
 เวลาในการสปีดเตอร์น้อยๆนั้นระนาบของกราฟที่ได้จะมีระนาบที่ไม่เด่นชัด แสดงถึงว่า
 องค์ประกอบของอินเดียมทินออกไซด์มีอยู่ค่อนข้างน้อย และเมื่อทำการสปีดเตอร์ที่เวลาเพิ่มมาก
 ขึ้นระนาบของอินเดียมทินออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงได้จากระนาบที่เพิ่มสูงขึ้นดังรูป



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ (a) 5 นาที, (b) 15 นาที, (c) 30 นาที และ (d) 60 นาที

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.3 จากรูป(a) เมื่อเวลาใน
 การสปีดเตอร์ 5 นาที เห็นได้ชัดเจนว่าเกิดความไม่สม่ำเสมอบนผิวฟิล์มดังภาพจะมีจุดดำๆกระจาย
 อยู่ทั่วบริเวณและขนาดของเกรนมีขนาดค่อนข้างเล็ก รูป(b) เวลาในการสปีดเตอร์ 15 นาที เกรนมี
 ความสม่ำเสมอเพิ่มมากขึ้นและขนาดของเกรนมีขนาดโตขึ้นมากกว่าที่สปีดเตอร์ที่ 5 นาที รูป(c)
 เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที จากรูปนั้นแสดงถึงขนาดของเกรนไซด์ที่มีขนาดโตขึ้นกว่าเดิมอย่าง
 ชัดเจนและความราบเรียบบนพื้นผิวฟิล์มก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และรูป(d) เวลาในการสปีดเตอร์ 60 นาที
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ในการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของเกรนจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีขนาดใหญ่กว่าที่เวลาในการเตรียม 5, 15 และ 30 นาที ส่วนความราบเรียบนั้นก็มีความราบเรียบค่อนข้างสูง จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการเตรียมฟิล์มบางเพิ่มมากขึ้นขนาดของเกรนและและความราบเรียบของผิวฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.4 การวัดความหนาของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ โดยใช้เทคนิค SEM

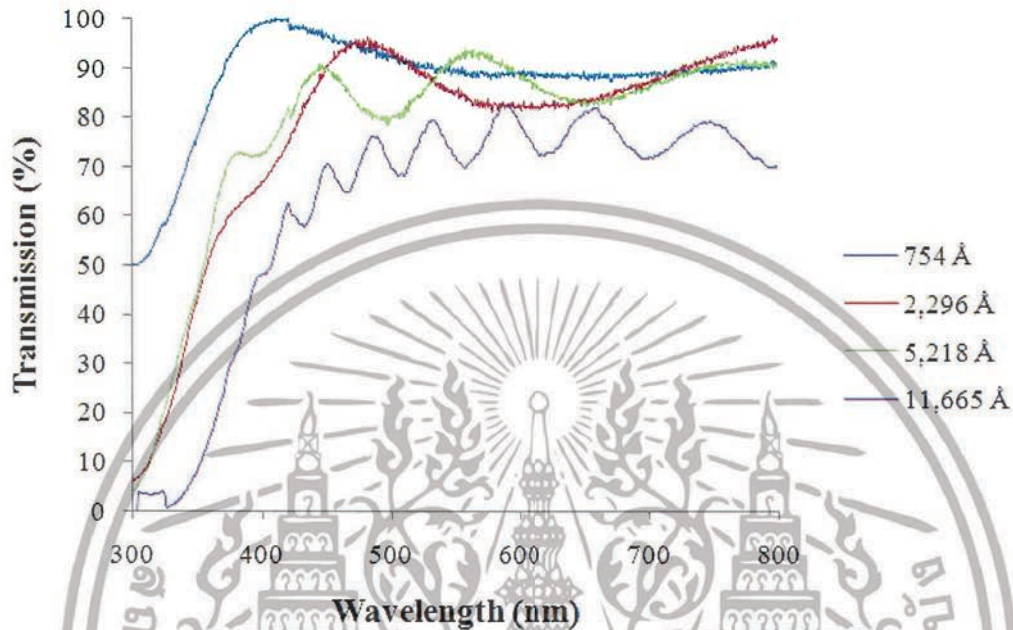
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นความหนาของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาในการเตรียมต่างกัน ดังจะเห็นได้จากรูปเมื่อเวลาในการสปีดเตอร์เพิ่มมากขึ้นความหนาของฟิล์มก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็นอัตราส่วนของความหนาต่อเวลาในการสปีดเตอร์ และระนาบของเกรนนั้นเป็นแนวตั้ง ซึ่งเป็นผลดีในเรื่องของแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวฟิล์ม ทำให้การกระเจิงของแสงมีค่าค่อนข้างน้อย จากรูปเห็นถึงความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง เมื่อเวลาในการสปีดเตอร์ 5 นาทีความสม่ำเสมอหรือความราบเรียบของฟิล์มบางจะมีค่าค่อนข้างน้อยและเมื่อเวลาในการสปีดเตอร์เพิ่มมากขึ้นความสม่ำเสมอและความราบเรียบของฟิล์มบางก็จะเพิ่มไปด้วย

เวลาการสปีดเตอร์	ความหนาฟิล์ม (Å)	ขนาดเกรน (nm)
5 นาที	754	24
15 นาที	2,296	32
30 นาที	5,218	48
60 นาที	11,665	72

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มและขนาดของเกรนที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 คุณสมบัติทางแสง

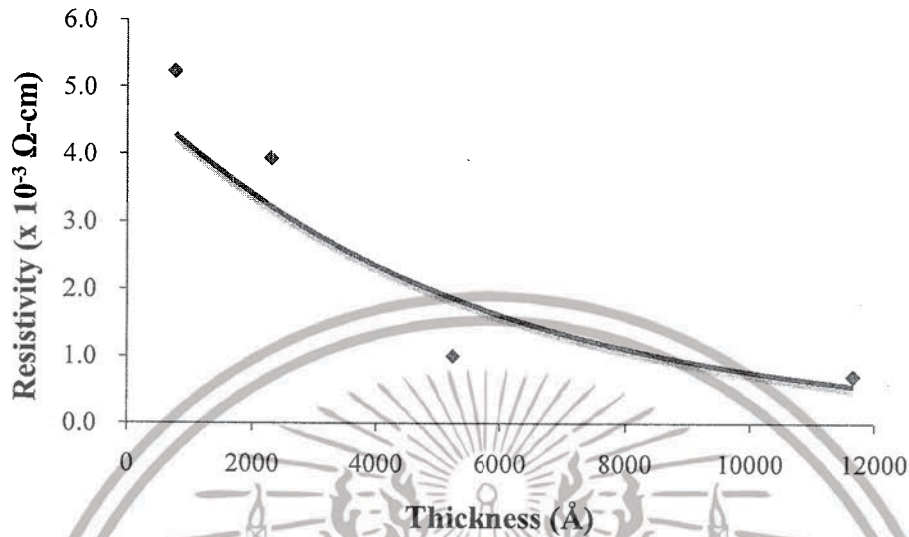


รูปที่ 4.5 การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนาต่างๆ

จากรูป 4.5 สามารถบอกถึงความโปร่งใสของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ในรูปจะใช้ความหนาแทนเวลาในการสเปกโตรซึ่งสามารถดูได้จาก ตารางที่ 1 ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดงประมาณ 630 – 700 nm ที่ความหนา 754 Å การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางมีค่าประมาณ 82 % มีค่าค่อนข้างสูง ที่ความหนา 2,296 Å การส่องผ่านแสงมีค่าประมาณ 85% ซึ่งจะมีการส่องผ่านแสงที่เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ความหนาฟิล์ม 754 Å ที่ความหนาฟิล์มบาง 5,218 Å การส่องผ่านแสงมีค่าประมาณ 87% และเมื่อความหนาของฟิล์มบาง 11,665 Å การส่องผ่านแสงจะมีค่าสูงที่สุดคือ 89% จากผลการทดลองทั้งหมดนี้เราจะสังเกตได้ว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น โดยจากตารางที่ 1 นั้น ขนาดของเกรนก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อแสงตกกระทบผิวฟิล์มที่มีเกรนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ การกระเจิงของแสงที่ระยะขอบเกรนของฟิล์มบางที่มีเกรนขนาดเล็กจะมีค่ามากกว่าฟิล์มบางที่มีเกรนขนาดใหญ่ ส่งผลให้การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางที่ความหนาฟิล์มสูงๆมีค่าการส่องผ่านแสงที่สูงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาภาพโดยรวมของการส่องผ่านทั้งหมดจะเห็นว่าการแทรกสอด แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่เราทำการเตรียมนั้นมีความราบเรียบและสม่ำเสมอค่อนข้างสูง และฟิล์มที่มีความหนา 11,665 Å มีความสม่ำเสมอสูงที่สุดสังเกตได้จากจำนวนริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า



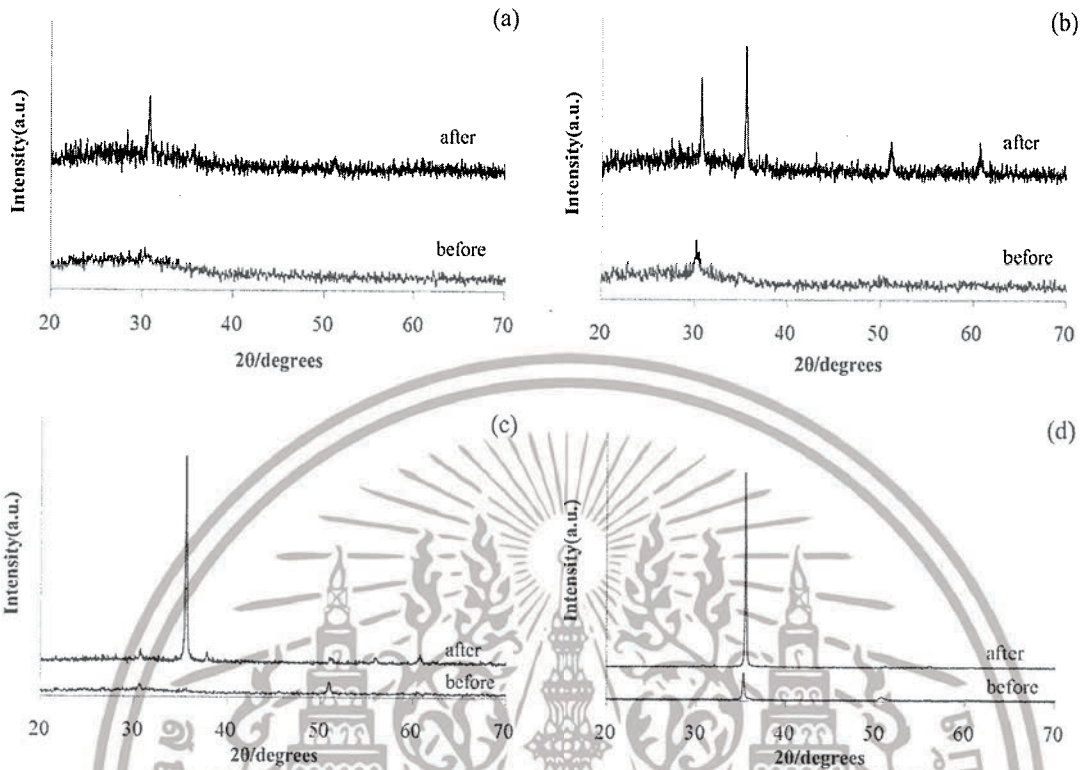
รูปที่ 4.6 สภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ความหนาของฟิล์มค่าต่างๆ

สภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ความหนาเปลี่ยนไปนั้นแสดงดังรูปที่ 4.6 จากรูปเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานแผ่นกับความหนา แนวโน้มของกราฟนั้นเมื่อความหนามีค่าเพิ่มขึ้นสภาพต้านทานจะมีค่าน้อยลง เพราะว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนและความราบเรียบของผิวฟิล์มจะมีค่าค่อนข้างดีทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะไปได้สะดวก ซึ่งตรงกันข้ามกับฟิล์มที่มีความหนาน้อย ขนาดเกรนน้อย ความสม่ำเสมอของผิวฟิล์มก็น้อย ทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะไม่สะดวกส่งผลให้เมื่อมีกระแสไหลในพื้นผิวฟิล์มจะมีค่าน้อย โดยที่สภาพต้านทานมีค่าเป็นส่วนกลับของกระแส ฉะนั้นเมื่อกระแสมีค่าน้อย สภาพต้านทานเลยมีค่ามากขึ้น

4.1.3 ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยแอนนูลฟิล์มบางในบรรยากาศของออกซิเจน

4.1.3.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง

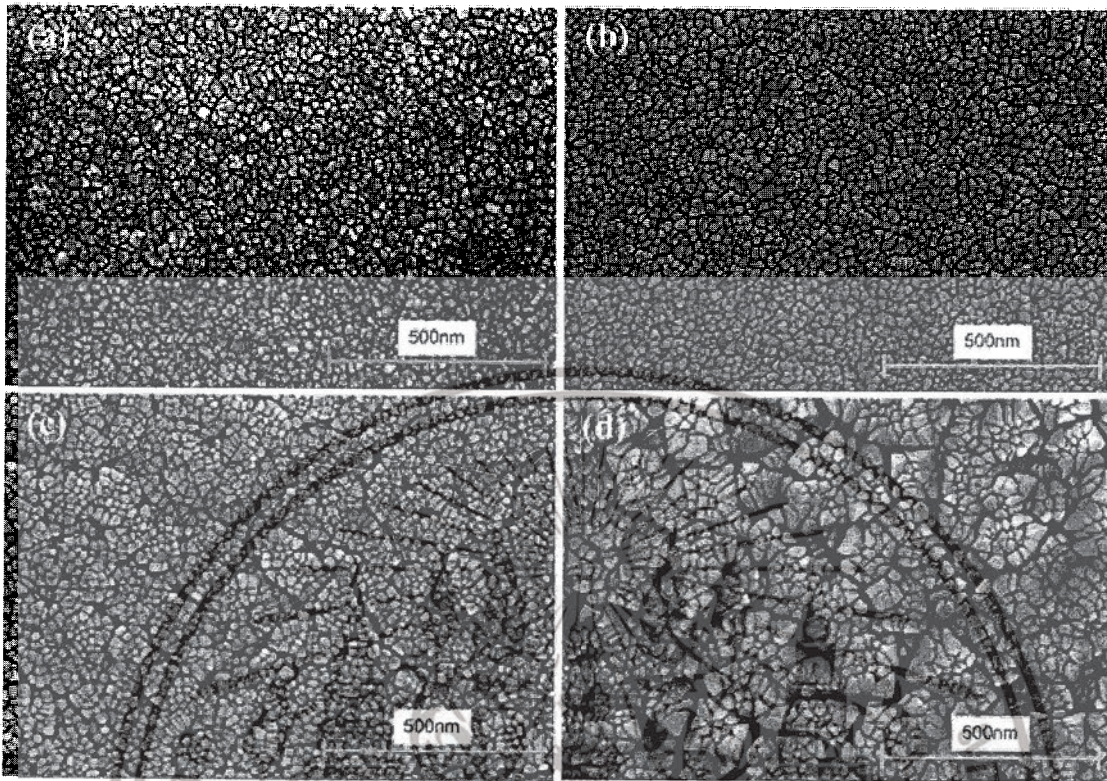
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ลักษณะทาง โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงหลังจากทำการแอนนีกในบรรยากาศของออกซิเจน (a) 754 Å, (b) 2,296 Å, (c) 5,218 Å และ (d) 11,665 Å ตามลำดับ

เมื่อเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนาต่างๆแล้วกระบวนการแอนนีกเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มบาง โดยจะทำให้ผลึกมีการจัดเรียงตัวใหม่และจัดตำแหน่งให้ดีขึ้นกว่าเดิม จากรูปที่ 4.7 รูป(a) หลังจากที่ทำการแอนนีกกราฟมีความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นคือมีความเด่นชัดขึ้นกว่าเดิมแสดงได้ว่าเกรนมีการจัดเรียงตัวให้ดีขึ้นจึงส่งผลทำให้การแสดงลักษณะของอินเดียมทินออกไซด์ออกมาได้อย่างชัดเจน รูป(b) มีลักษณะเดียวกับรูป(a) แต่จะมีการแสดงระนาบที่เด่นชัดกว่าเพราะว่ามีปริมาณอินเดียมทินออกไซด์อยู่มากกว่า รูป(c) มีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมค่อนข้างมากจะสังเกตได้จากรูป ก่อนแอนนีกระนาบมีค่าที่ไม่ค่อยเด่นชัดมากแต่หลังจากแอนนีกระนาบมีความเด่นชัดขึ้นมาก และรูป(d) ความเด่นชัดของระนาบก็เพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ในรูปที่แสดงทั้งหมดนี้อาจจะเห็นระนาบที่แสดงเด่นไม่ที่ระนาบ เนื่องจากการเปรียบเทียบกับค่าสูงสุดทำให้ระนาบที่มีค่าน้อยถูกกดลงไป แต่ก็ยังแสดงให้เห็น ได้ชัดว่าฟิล์มที่เราทำการเตรียมนี้มีองค์ประกอบของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์อยู่ และการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มในบรรยากาศของออกซิเจนส่งผลทำให้ฟิล์มมีความสมบูรณ์มากขึ้นกว่าเดิมเมื่อสังเกตที่ระนาบที่มีความเด่นชัดขึ้น

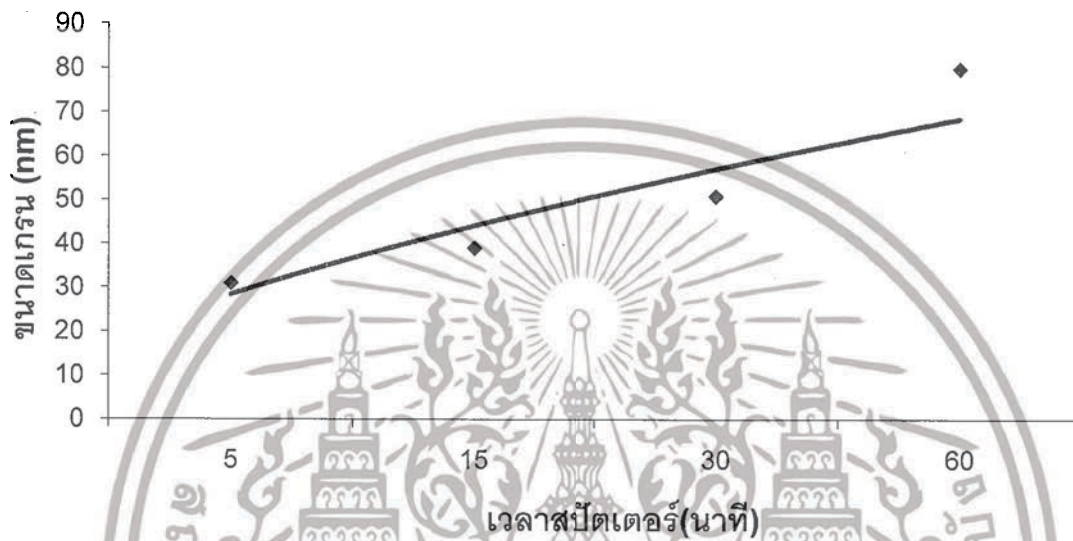
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางหลังจากแอนนิลในบรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ความหนาต่างๆ (a) 754 Å, (b) 2,296 Å, (c) 5,218 Å และ (d) 11,665 Å ตามลำดับ

หลังจากที่เราทำการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ไปแล้วนั้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นคือ เกรนมีการจัดเรียงตัวขึ้นใหม่ในทิศทางที่ดีกว่าเดิม ฟิล์มแสดงสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์ออกมามากกว่าเดิม (สังเกตได้จากกระนาบที่เด่นชัดขึ้น) ต่อจากนี้เป็นผลการทดลองจากเครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM) จากรูปที่ 4.8 ลักษณะเกรนไซค์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและความสม่ำเสมอของฟิล์มจะมีค่าดีกว่าเดิมดูได้จากรูป(a) ในรูป(b) เกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นจากเดิม เกรนมีขนาดโตขึ้นและความราบเรียบค่อนข้างสูง รูป(c) เกรนมีขนาดโตขึ้นและมีความราบเรียบดีกว่าเดิม และรูป(d) เกรนมีขนาดโตขึ้นและใหญ่ที่สุด ความหนาแน่นของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นถึงรอยแตกบนพื้นผิวฟิล์มที่มีอย่างประปรายเป็นผลเนื่องมาจากเมื่อทำการแอนนิลฟิล์มบาง พื้นผิวฟิล์มบางมีอัตราการหดและขยายตัวที่ไม่เท่ากันทำให้เกิดความเค้นและความเครียดขึ้นบริเวณพื้นผิวฟิล์มบาง จึงทำให้สังเกตเห็นลักษณะฟิล์มบางที่มีรอยแตกได้เฉพาะพื้นผิว แต่เมื่อใช้เทคนิค SEM ส่องฟิล์มในแนวตัดขวาง ฟิล์มจะไม่มีรอยแตกเลยจึงสรุปได้ว่า รอยแตกที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดเฉพาะบริเวณผิวฟิล์มด้านบนแต่ไม่ลึกลงไปในเนื้อฟิล์ม และรอยแตกนี้ถึงแม้จะมีความกว้างไม่มากแต่ก็ส่งผลกระทบต่อเรื่องของการยึดติดกับฐานรอง หลังจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นชอบที่จะเอามาใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ทำการแอนนีสเฟรจฟิล์มบางที่มีรอยแตกจะร้อนออกจากรูปร่างได้ง่ายกว่าฟิล์มที่ไม่มีรอยแตกเกิดขึ้น

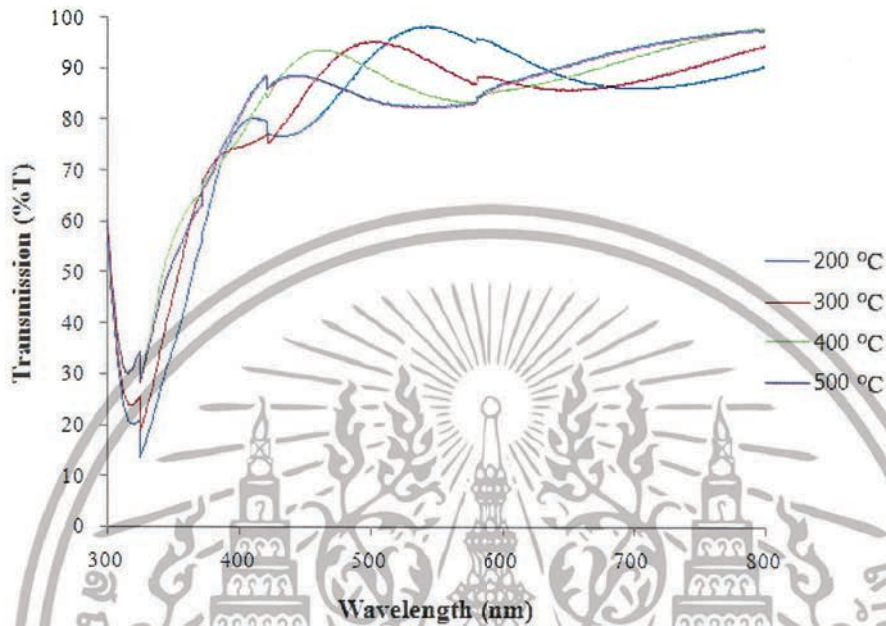


รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการแนวโน้มการของขนาดเกรนที่เวลาในการสัปดาห์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 เมื่อเวลาในการสัปดาห์เพิ่มขึ้น ขนาดของเกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการแอนนีสฟิล์มบางทำให้ผลึกมีการจัดเรียงตัวใหม่และมีการจัดเรียงตัวให้สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ขนาดของเกรนที่เวลาในการเตรียม 5, 15, 30 และ 60 นาที มีขนาดโตขึ้นหลังจากการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.2 คุณสมบัติทางแสง



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนัลในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิต่างๆ

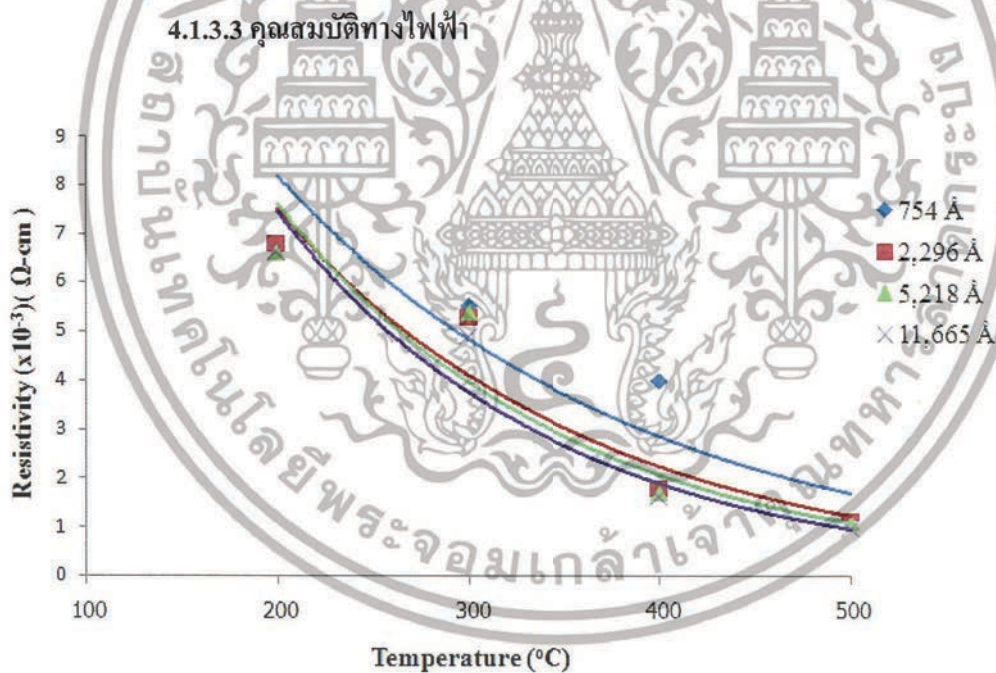
จากรูปที่ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองเดิมซึ่งไม่ได้ทำการแอนนัล กราฟนี้บ่งบอกถึงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางว่ามีค่ามากขึ้น โดยที่อุณหภูมิในการแอนนัล 300 °C จะมีการส่งผ่านแสงที่น้อยที่สุดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเกรนมีค่าน้อยกว่าการแอนนัลที่อุณหภูมิอื่นๆ และการส่งผ่านแสงจะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิในการแอนนัลที่ 500 °C เป็นผลเนื่องจากเมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนั้นเกรนมีการจัดเรียงตัวใหม่ซึ่งจะทำให้ขนาดของเกรนและความสม่ำเสมอของพื้นผิวฟิล์มดีขึ้นกว่าเดิม ฉะนั้นจากผลการทดลองแล้วนั้นจะสรุปได้ว่าเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิที่ 500 °C การกระเจิงที่ระยะขอบเกรนของฟิล์มจะมีค่าน้อยที่สุดทำให้การส่งผ่านแสงมีค่าสูงที่สุด และการส่งผ่านแสงจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลมีค่าลดลง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการส่งผ่านแสงที่อุณหภูมิและความหนาของฟิล์มบางค่าต่างๆ จะเห็นได้จากตารางการส่งผ่านแสงจะมีค่าสูงที่สุดที่ อุณหภูมิในการแอนนัล 500 °C และความหนาฟิล์ม 11,665 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ/ความหนาฟิล์ม	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
754 Å	85 %	87 %	87.5 %	88 %
2,296 Å	86 %	88 %	86 %	89 %
5,218 Å	86 %	87.5 %	88 %	88 %
11,665 Å	88 %	89 %	89.5 %	90 %

ตารางที่ 4.2 การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนัลในบรรยากาศ ออกซิเจนที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนัลในบรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิต่างๆ

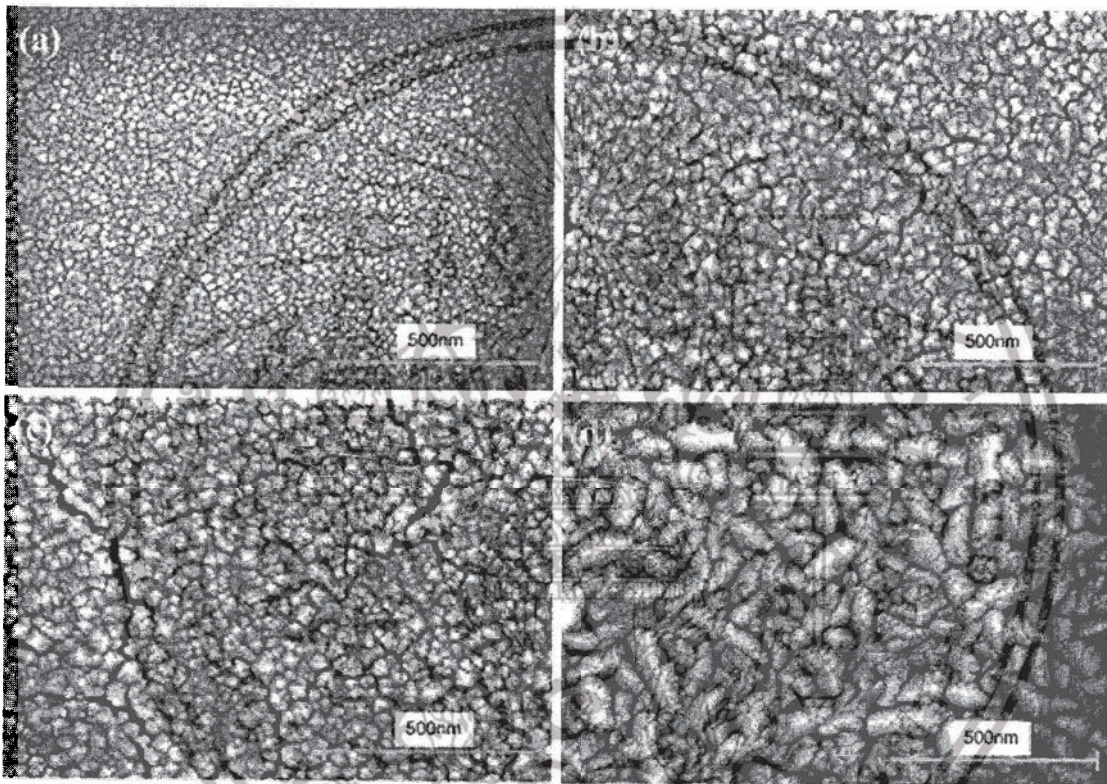
จากรูปที่ 4.11 จะเห็นแนวโน้มสภาพต้านทานของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลเพิ่มมากขึ้นและจะเห็นได้ชัดว่าที่ความหนา 11,665 Å ฟิล์มบางมีสภาพต้านทานต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบที่จุดอุณหภูมิเดียวกัน เป็นผลเนื่องจากเมื่อทำการแอนนัลพื้นผิวฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการจัดเรียงผลึกเกรนทำให้พาหะสามารถถ่ายโอนได้สะดวกขึ้น เมื่อพาหะเคลื่อนที่ได้สะดวก ทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความต้านทานมีค่าลดลง (จากความสัมพันธ์ $V=IR$)

4.1.4 ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยแอนนีกัลฟิล์มบางในบรรยากาศของไนโตรเจน

4.1.4.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนีกัลในบรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 °C (a) 754 Å, (b) 2,296 Å, (c) 5,218 Å และ (d) 11,665 Å ตามลำดับ

ผลึกมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทำให้รูปร่างของเกรนเปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.12 หลังจากทำการแอนนีกัลในบรรยากาศของไนโตรเจน รูปร่างของเกรนมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยจะมีลักษณะที่เกาะเป็นกลุ่มเป็นก้อนและมีการจัดเรียงตัวตามแนวยาวเป็นผลเนื่องจาก เมื่อแอนนีกัลในบรรยากาศของไนโตรเจน ไนโตรเจนอาจจะเข้าไปในโครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์ทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้เกรนมีรูปร่างที่ไม่เหมือนเดิม อย่างไรก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับส่งผลดีต่อฟิล์มบางเพราะว่าเกรนมีรูปร่างตามแนวยาว จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีความสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นค่อนข้างสูง จากรูป 4.12(a) คุณลักษณะของเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นจากเดิมที่ไม่ได้แอนนีกัล เกรนมีขนาดโตขึ้นและมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ในรูป(b) รูปร่างของเกรนคล้ายรูป(a) เนื่องจากเกรนยังมีขนาดเล็กยังไม่เริ่มจัดรูปร่างให้เห็นได้อย่างชัดเจน แต่ขนาดของเกรนโตขึ้นจากเดิม รูป(c) ความหนาแน่นของฟิล์มมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเห็นได้จากรูปร่างของเกรนมีขนาดโตขึ้นและรูปร่างเริ่มสังเกตได้ชัดเจนขึ้นว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและในรูป(d) เกรนมีการจัดเรียงรูปร่างใหม่ให้เห็นอย่างชัดเจน โดยเกรนจะมีลักษณะตามยาว ความหนาแน่นสูง และความราบเรียบดีมาก ภาพโดยรวมหลังจากทำการปรับปรุงคุณภาพแล้วนั้น ฟิล์มมีสมบัติทางโครงสร้างที่ดีขึ้น แต่จะมีลักษณะคล้ายกับแอนนีกัลในบรรยากาศของออกซิเจนคือ มีรอยแตกบนผิวฟิล์ม

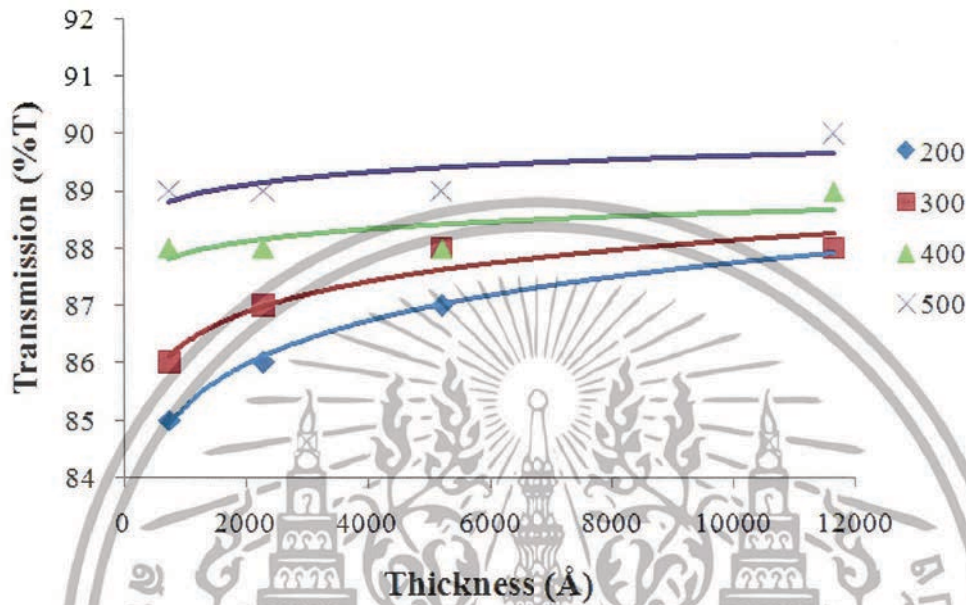


รูปที่ 4.13 ตัวอย่างการแนวโน้มของขนาดเกรนที่เวลาในการสปีดเตอร์ต่างๆหลังจากแอนนีกัลในบรรยากาศของไนโตรเจน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนและเวลาในการสปีดเตอร์ เมื่อเวลาในการสปีดเตอร์เพิ่มขึ้นเกรนมีการจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์และเกาะกันเป็นกลุ่ม ทำให้ขนาดของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการสปีดเตอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเกรนก่อนแอนนีกัลแล้วนั้น หลังจากทำการแอนนีกัลขนาดของเกรน โตขึ้นจากเดิม เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างอินเดียมทินออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.2 คุณสมบัติทางแสง

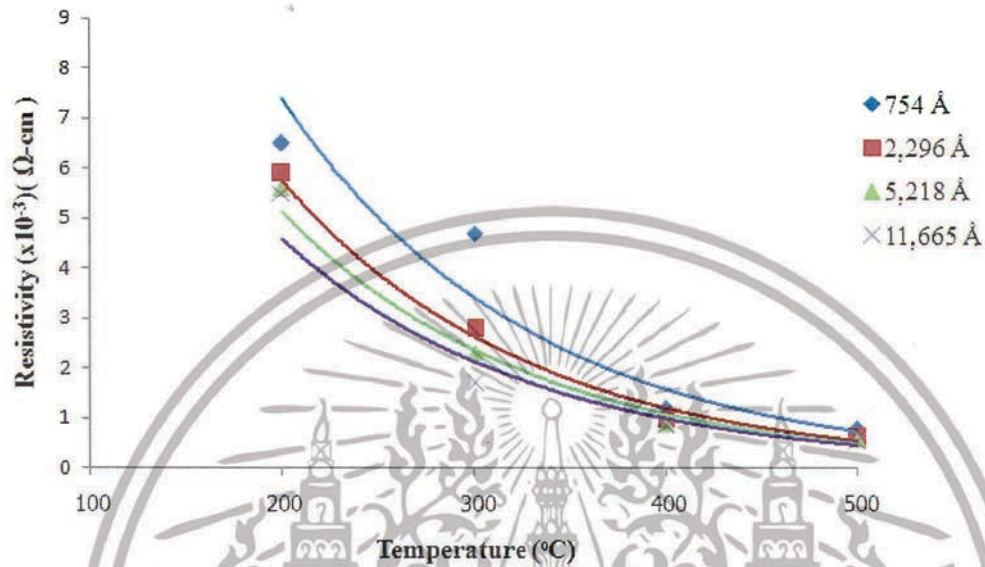


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงแนวโน้มการส่งผ่านแสงหลังจากแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิในการแอนนีสต่างๆ

เมื่อเกรนมีการจัดเรียงตัวใหม่ในทิศทางที่ดีขึ้น จะส่งผลต่อการส่งผ่านแสงด้วยแสดงได้จากรูปที่ 4.14 เมื่อสังเกตที่อุณหภูมิ 500 °C การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆที่จุดเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบการส่งผ่านแสงกับ ไม่มีการแอนนีสและการแอนนีสในบรรยากาศออกซิเจนแล้วนั้น การส่งผ่านแสงที่แอนนีสในบรรยากาศไนโตรเจนจะมีค่ามากกว่าฟิล์มที่ไม่แอนนีสแต่จะมีค่าน้อยกว่าฟิล์มที่แอนนีสในบรรยากาศออกซิเจน เป็นผลเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่เปลี่ยนไปนั่นเอง เมื่อไม่มีการแอนนีสค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 3.4 eV หลังจากแอนนีสในบรรยากาศออกซิเจนค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.9 eV ทำให้ขอบเขตของแสงที่สามารถส่งผ่านได้นั้นมีมากขึ้น และในบรรยากาศของไนโตรเจนค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 3.7 eV ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในออกซิเจนทำให้การส่งผ่านแสงของไนโตรเจนน้อยกว่าออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

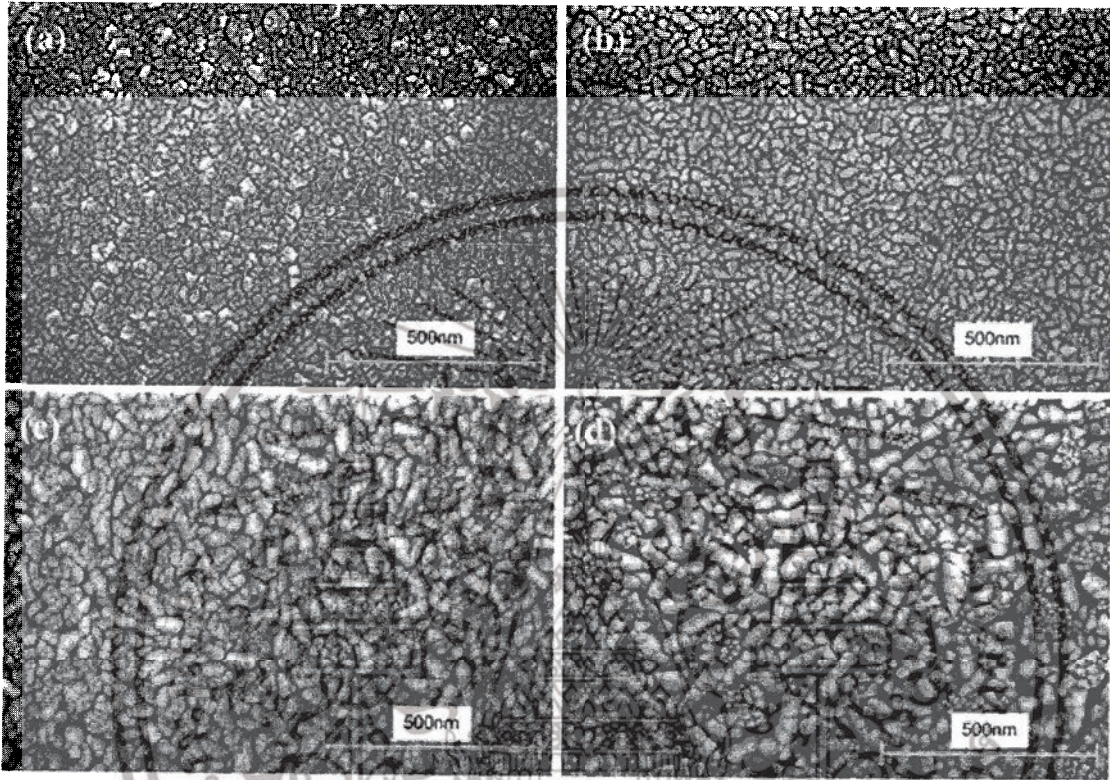


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงแนวโน้มนำสภาพต้านทานแผ่นหลังจากแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิในการแอนนีสต่างๆ

จากรูปจะเห็นว่าแนวโน้มนำมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการแอนนีสเพิ่มขึ้นเป็นผลกระทบบจากเกรนที่มีขนาดโตขึ้นทำให้พาหะมีความคล่องตัวมาก เมื่อพาหะมีการถ่ายโอนที่ฉับพลันผิวฟิล์มส่งผลให้เกิดกระแสขึ้นซึ่งในทางตรงกันข้ามนั้นค่าสภาพต้านทานแผ่นจะมีค่าลดลง(ความสัมพันธ์ $V = IR$) จากกราฟค่าสภาพต้านทานที่อุณหภูมิในการแอนนีสที่ 500 °C จะมีค่าน้อยที่สุดที่จุดของอุณหภูมิเดียวกัน

4.1.5 ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยแอนนีสฟิล์มบางในบรรยากาศของอากาศ

4.1.5.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากแอนนีสในบรรยากาศของอากาศ ที่อุณหภูมิ 500 °C (a) 754 Å, (b) 2,296 Å, (c) 5,218 Å และ (d) 11,665 Å

ลักษณะของเกรนในกรณีที่ผ่านมาหลังจากทำการแอนนีสเกรนมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ดีขึ้นคือ เกรนมีขนาดโตขึ้น เกรนมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบดีขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในโครงสร้างที่เปลี่ยนไป หลังจากแอนนีสในออกซิเจนเกรนก็มีรูปร่างที่แตกต่างจากแอนนีสในไนโตรเจน สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเกิดจากผลกระทบของออกซิเจนและไนโตรเจนเข้าไปในโครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์ทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนไปและรูปร่างที่แตกต่างกัน เมื่อเราทำการแอนนีสฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ในบรรยากาศ ซึ่งบรรยากาศประกอบไปด้วยก๊าซไนโตรเจน 79% และ ออกซิเจน 16% ในรูป(a) เกรนมีลักษณะรูปร่างคล้ายๆ เกรนโดยทั่วไปเนื่องจากการก่อตัวอย่างไม่สมบูรณ์มากนักแต่หลังจากที่ความหนาในการเตรียมเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูป(b) เกรนเริ่มก่อตัวเป็นรูปร่างมากขึ้นทำให้เริ่มเห็นถึงรูปร่างของเกรนที่เปลี่ยนไปจากเดิม แต่ที่น่าสังเกตคือเกรนที่เกิดขึ้นนี้มีรูปร่างคล้ายเกรนที่เกิดขึ้นในการแอนนีสออกไซด์เป็นออกไซด์ที่ลงบนวัสดุที่มีการแข็งในเพื่อทำการทำฟิล์ม โดยอยู่ใต้ชั้นของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ อย่างไรก็ตาม ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนและไนโตรเจนรวมกัน ซึ่งตรงกับทฤษฎีที่ว่าด้วยองค์ประกอบของอากาศที่ประกอบด้วยไนโตรเจนและออกซิเจน แต่จากรูป(b) ก็แบ่งแยกและบอกปริมาณของเกรนที่แตกต่างกันไม่ชัดเจน และเมื่อเตรียมฟิล์มบางที่ความหนา 5,218 Å ดังแสดงในรูป(c) เกรนเริ่มก่อตัวโดยมีขนาดโตขึ้นและสามารถจำแนกชนิดของเกรนที่แตกต่างและประมาณที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจากรูป(d) ยิ่งบ่งบอกได้อย่างชัดเจนมากขึ้นว่าเกรนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากผลกระทบของออกซิเจนและไนโตรเจนที่เข้าไปในโครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์ทำให้โครงสร้างมีลักษณะเปลี่ยนไป เมื่อสังเกตถึงปริมาณ โครงสร้างส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นแล้วนั้นจะมีลักษณะคล้ายกับแอนนิตในบรรยากาศของไนโตรเจน เกรนส่วนน้อยจะมีลักษณะคล้ายกับแอนนิตในบรรยากาศของออกซิเจน ภาพโดยรวมแล้วนั้นเกรนมีการจัดเรียงตัวที่สมบูรณ์มาก ความหนาแน่นสูงและความสม่ำเสมอของพื้นผิวค่อนข้างดี

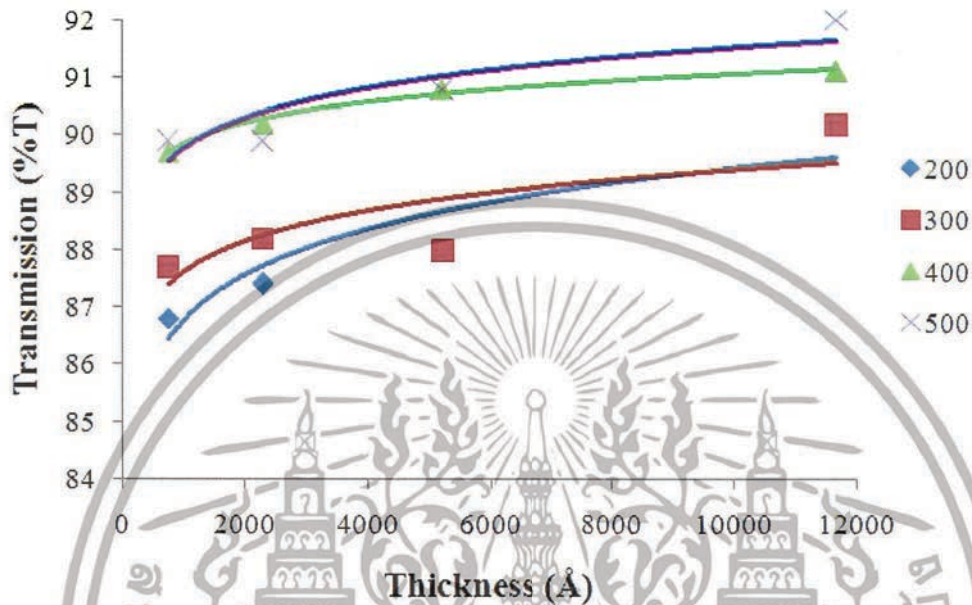


รูปที่ 4.17 แนวโน้มขนาดของเกรนที่หลังจากแอนนิตในบรรยากาศของอากาศ

หลังจากแอนนิตในบรรยากาศเกรนมีลักษณะที่โตขึ้นจากเดิมและขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาในการเตรียมฟิล์มบางเพิ่มขึ้น ถึงแม้ขนาดของเกรนที่เปลี่ยนไปนั้น แต่จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับการแอนนิตในบรรยากาศของไนโตรเจนและออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

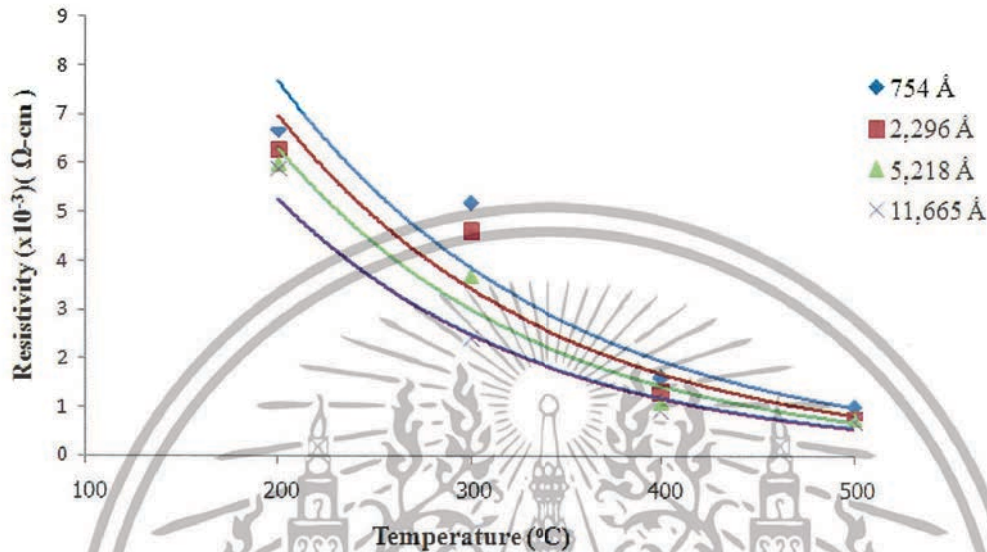
4.1.5.2 คุณสมบัติทางแสง



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงแนวโน้มของการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนีสในบรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิในการแอนนีสต่างๆ

จะเห็นได้จากรูปที่ 4.18 แนวโน้มโดยรวมของการส่องผ่านแสงที่ความหนาของฟิล์มบางมากขึ้นจะมีเพิ่มขึ้นและที่อุณหภูมิในการแอนนีส 500 °C การส่องผ่านแสงยังมีค่ามากที่สุดถึงแม้จะมีผลกระทบทั้งใน โครงเงินและออกซิเจนที่เข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์ ดังนั้นพอจะสรุปได้ว่าเมื่อเราแอนนีสที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าการส่องผ่านแสงมีค่าสูงขึ้นและที่ความหนาของฟิล์มมีค่ามากการส่องผ่านแสงก็จะมากตามไปด้วย

4.1.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังจากแอนนีสในบรรยากาศของอากาศ ที่อุณหภูมิในการแอนนีสต่างๆ

เมื่อดูค่าแนวโน้มที่ลดลงของสภาพต้านทานนั้นบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังจากแอนนีสว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์มบางให้ดีขึ้น โดยภาพรวมของรูปที่ 4.19 สภาพต้านทานจะมีค่าลดลงเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนีส ซึ่งเป็นผลที่เกิดขึ้นคล้ายๆกับการแอนนีสในบรรยากาศของออกซิเจนและไนโตรเจน แต่เมื่อเปรียบเทียบข้อดีของการแอนนีสในบรรยากาศคือการรวมเอาข้อดีของทั้ง 2 บรรยากาศมารวมกันไว้ทำให้ผลที่ออกมาทั้งค่าการส่องผ่านและสภาพต้านทานดีด้วย

จากผลการทดลองหาความเหมาะสมของฟิล์มบางที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ในชั้นแรกเมื่อทำการเตรียมฟิล์มบางโดยที่ยังไม่มีการแอนนีส จะเห็นได้ชัดเจนว่าการส่องผ่านแสงยังมีค่าที่ค่อนข้างสูงและสภาพต้านทานมีค่าต่ำ แต่ก็ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งในการที่จะพัฒนาให้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ทำการสร้างนี้มีคุณภาพมากขึ้นกว่าเดิม โดยการแอนนีสซึ่งหลังจากทำการแอนนีสในบรรยากาศต่างๆแล้วจะเห็นผลที่ออกมาได้นั้น การส่องผ่านแสงในก๊าซออกซิเจนจะมีการส่องผ่านแสงที่สูงมากถึง 92% แต่ค่าสภาพต้านทานก็มีค่าลดลงไม่มากนัก ในการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 °C เนื่องจากเมื่อออกซิเจนเข้าไปในโครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์ความโปร่งใสของฟิล์มจะมีมากขึ้นกว่าเดิมทำให้การส่องผ่านมีค่าสูงขึ้น ส่วนในเรื่องของสภาพต้านทานที่ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มากนักเป็นผลจากที่ออกซิเจนเข้าไปในโครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์และเข้าไปจับกับอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในโครงสร้างทำให้อิเล็กตรอนอิสระมีปริมาณที่น้อยลง นั่นเป็นปัจจัยที่ทำให้สภาพคล่องของพาหะและปริมาณพาหะมีค่าน้อยลงส่งผลให้สภาพต้านทานมีค่าลดลงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนแอนนัล ส่วนการแอนนัลในบรรยากาศของไนโตรเจนซึ่งเป็นที่รู้กันว่าไนโตรเจนมีลักษณะเฉพาะตัวคล้ายกับก๊าซเฉื่อย (ไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาก่อนข้างยาก) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ฉะนั้นเมื่อแอนนัลในบรรยากาศของไนโตรเจน การส่องผ่านแสงจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากเมื่อฟิล์มมีการก่อรูปขึ้นใหม่ทำให้ลดการสะท้อนที่ระยะของเกรนเมื่อแสงมาตกกระทบจะสามารถทะลุผ่านได้มากยิ่งขึ้นกว่าเดิม โดยจะมีการส่องผ่านแสงสูงถึง 90% ที่อุณหภูมิในการแอนนัลที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และสภาพต้านทานของฟิล์มนั้นเนื่องจากไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยาทำให้ปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระยังมีมากเช่นเดิมและหลังจากแอนนัลเสร็จฟิล์มก็มีการก่อรูปขึ้นใหม่โดยมีความสมบูรณ์มากขึ้นกว่าเดิมทำให้สภาพต้านทานของฟิล์มมีค่าลดลงประมาณ $10^4\ \Omega\text{-cm}$ และเมื่อแอนนัลในบรรยากาศการส่องผ่านแสงจะมีค่าอยู่ประมาณ 90% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแอนนัลในไนโตรเจน ส่วนสภาพต้านทานนั้นเนื่องจากในบรรยากาศประกอบไปด้วยก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน สภาพต้านทานที่วัดได้ออกมานั้นจะมีค่าที่สูงกว่าแอนนัลในไนโตรเจนและต่ำกว่าแอนนัลในออกซิเจน เป็นผลเนื่องจากผลกระทบของไนโตรเจนและออกซิเจนที่เข้าไปในโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

ฉะนั้นในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เหมาะสมในการสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงนั้น ฟิล์มบางที่แอนนัลในบรรยากาศของไนโตรเจนมีความเหมาะสมมากที่สุดเนื่องจากการส่องผ่านแสงที่สูงถึง 90% ถึงแม้จะไม่สูงมากที่สุดแต่เมื่อคำนึงถึงสภาพต้านทานแล้วด้วยนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่ามีค่าสภาพต้านทานที่ต่ำกว่าในการแอนนัลในบรรยากาศของอากาศและออกซิเจน ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแอนนัลนั้นที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึงแม้ว่าทำให้การส่องผ่านแสงสูงที่สุดเนื่องด้วยความเหมาะสมของโครงสร้างที่โคนอุณหภูมิสูงแล้วจะมีการอ่อนตัวและมีการก่อรูปใหม่ได้ง่ายกว่าเดิม แต่เมื่อมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางหลังจากแอนนัลทั้ง 4 อุณหภูมิคือ 200 300 400 และ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเห็นพื้นผิวของฟิล์มบางที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีการร่อนของฟิล์ม ส่วนที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีรอยแตกบนผิวฟิล์มถึงแม้ว่าจะไม่ร่อนก็ตามแต่ความเหมาะสมนั้นจะมีค่าลดน้อยลงไป ส่วนที่ 200 และ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ สภาพฟิล์มบางยังคงสมบูรณ์ ส่วนการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทานที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าที่ดีกว่า และความหนาของฟิล์มนั้นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา, สภาพต้านทานและการส่องผ่าน ดังนั้นเราจึงได้พารามิเตอร์ที่สามารถสร้างฟิล์มบางได้เหมาะสมที่สุดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความหนาในการสร้างฟิล์มบาง ประมาณ 2300 Å
- การแอนนีสในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน
- อุณหภูมิในการแอนนีส 300 °C
- เวลาในการแอนนีส 15 นาที

4.2 การทดลองตอนที่ 2

ในการทดลองตอนที่ 2 ได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือส่วนที่ 1 เริ่มต้นหารูปร่างและขนาดของพื้นที่รับแสงที่เหมาะสม โดยการสร้างบนฐานรองที่เป็นซิลิกอนและวัดคุณสมบัติ I-V เพื่อหาลักษณะรูปร่างและขนาดที่เหมาะสมที่สุด ส่วนที่ 2 หลังจากที่ได้ลักษณะรูปร่างที่เหมาะสมของพื้นที่รับแสงแล้วจึงทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง

4.2.1 ส่วนที่ 1 ออกแบบและหาขนาด รูปร่างของพื้นที่รับแสงที่เหมาะสม

ในส่วนนี้จะทำการออกแบบลักษณะของพื้นที่รับแสงออกเป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ

- สี่เหลี่ยม
- สี่เหลี่ยมขอบมน
- วงกลม

และพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ทำการออกแบบ คือ

- 0.0625 mm²
- 0.25 mm²
- 1 mm²
- 4 mm²

โดยพื้นที่และรูปร่างของบริเวณรับแสงนี้จะทำการสร้างบนฐานรองที่เป็นซิลิกอน ซึ่งคุณสมบัติ I-V ที่วัดจะคำนึงถึงปริมาณกระแสแสง ปริมาณของกระแสมืดและความเร็วในการเปลี่ยนสถานะปิด-เปิด (switching) เพื่อที่จะทำการเลือกลักษณะที่เหมาะสมของบริเวณรับแสงในการสร้างเป็นหัวไฟฟ้าโปร่งใสต่อไป ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้น ดังแสดงต่อไปนี้

หลังจากทำการศึกษาลักษณะพื้นที่และรูปร่างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่สร้างบนซิลิกอนชนิดอื่น

ขนาดพื้นที่รับแสง (mm ²)	กระแสมีด I ₀ (μA)		
	สี่เหลี่ยม	ขอบมน	วงกลม
0.0625	2.27	2.09	2.02
0.25	4.57	4.42	4.26
1	9.63	9.20	8.80
4	18.80	18.00	16.20

ตารางที่ 4.3 กระแสมีดของแต่ละรูปร่างที่ขนาดพื้นที่รับแสงต่างๆ

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ชัดว่าผลที่ได้จากมันที่ขนาดพื้นที่ของฟิล์มบาง 0.0625 mm² กระแสมีดมีค่าค่อนข้างน้อยประมาณ 2.02 μA และขนาดของฟิล์มบาง 0.25 mm² โดยขนาดของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นอีก 4 เท่า จะเห็นลักษณะกระแสมีดที่เพิ่มขึ้นนั้นจะมีค่าที่เป็น 2 เท่าของพื้นที่ 0.0625 mm² เมื่อเพิ่มขนาดของฟิล์มบางเป็น 1 mm² แนวโน้มของกระแสแสงและกระแสมีดยังคงเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในการเพิ่มขึ้นที่เป็นจำนวน 2 เท่าของพื้นที่ 0.25 mm² และเมื่อขนาดของฟิล์มมีค่า 4 mm² ลักษณะของกระแสมีดที่เพิ่มขึ้นยังคงมีแนวโน้มเช่นเดิม ซึ่งจากผลของกระแสมีดนั้นเราจะนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมของพื้นที่ที่เหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงผลการทดลองที่ออกมานั้นเห็นแนวโน้มของกระแสมีดที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าในกรณีพื้นที่ของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อขนาดฟิล์มบางมีขนาด 4 mm² ผลของกระแสมีดจะมีค่าสูงที่สุด จากทฤษฎีในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงนั้นเมื่อมีผลของกระแสมีดที่สูงนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดต่ำลงไป และในการทดลองนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์หาฟิล์มบางที่เหมาะสมคือ ขนาด 0.0625 mm² อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์ถึงความไวในการตอบสนองแล้ว พื้นที่ของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่มีขนาดเล็กจะมีความเร็วกว่าพื้นที่ที่ใหญ่ๆ จึงเป็นอีกเหตุผลที่เสริมการเลือกฟิล์มบางขนาด 0.0625 mm² เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มบางได้แล้วจะมาวิเคราะห์รูปร่างซึ่งในการทดลองนี้ได้สร้าง 3 ลักษณะคือ สี่เหลี่ยม สี่เหลี่ยมขอบมนและวงกลม ถึงแม้รูปร่างจะลักษณะต่างกัน (สี่เหลี่ยมขอบมนและวงกลม) แต่ได้คำนวณเปรียบเทียบพื้นที่ให้เท่ากันกับรูปร่างสี่เหลี่ยม และจากผลการทดลองที่ได้นั้นจะเห็นได้ชัดว่าลักษณะฟิล์มบางที่เป็นวงกลมมีกระแสมีดน้อยที่สุด ส่วนรูปร่างสี่เหลี่ยมขอบมนและสี่เหลี่ยมมีกระแสมีดที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากเมื่อรูปร่างเป็นวงกลมทำให้ผลของการออกของกระแสที่บริเวณขอบมีการกระจายไปทั่วบริเวณเท่าๆกันทำให้กระแสมีดมีค่าน้อย ส่วนลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมขอบมนถึงแม้จะมีส่วนที่โค้งอยู่บ้างแต่ก็ยังมีลักษณะที่เป็นเส้นตรงทำให้การกระจายของกระแสแต่ละส่วนมีค่าไม่เท่ากันทำให้เกิดกระแสมีดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าลักษณะแบบวงกลม และเมื่อลักษณะพื้นที่แบบสี่เหลี่ยมค่าของกระแสมีค่าจะสูงสุดเนื่องจากมีส่วนที่เป็นเหลี่ยมมุมเพิ่มขึ้นทำให้อิ่งทำให้การออกของกระแสทุกพื้นที่ไม่เท่ากันมากกว่าสี่เหลี่ยมขอบมน ฉะนั้นในกรณีนี้จะได้ว่าพื้นที่วงกลมจะมีกระแสมีค่าที่สุด จึงสรุปได้ว่าลักษณะฟิล์มบางที่เหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงคือ ลักษณะวงกลมที่มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 0.0625 mm^2

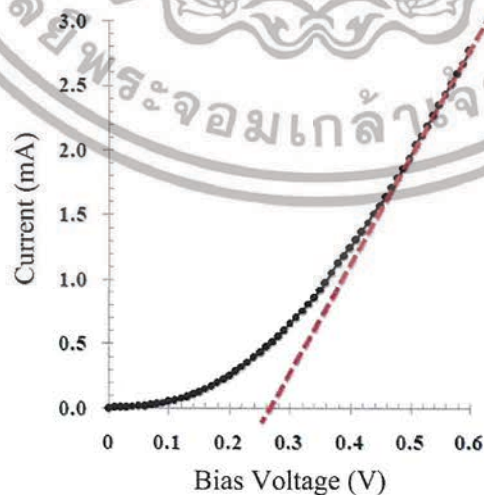
4.2.2 ส่วนที่ 2 สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง

จากการทดลองตอนที่ 1 จะได้ขนาดและพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ก็จะสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงบนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น โดยลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงมีรูปร่าง ดังรูป



รูปที่ 4.20 อุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว

ในการตรวจสอบสมบัติของรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำที่สำคัญ คือ แรงดันภายใน (V_{bi}) และความสูงของกัมแพงศักย์ (Φ_{bn}) โดยการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำและนำมาหาแรงดันภายใน แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของชนิดกึ่งตัวนำเบอร์เบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดลักษณะกระแส-แรงดันมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเป็นแกนตั้งและแรงดันเป็นแกนนอน พบว่ารอยสัมผัสแบบซีดก็ยมีแรงดัน 0.27 V ซึ่งมีค่าที่สอดคล้องกับคุณสมบัติของซีดก็ยในการทดลองที่ผ่านมา

สำหรับค่าแรงศักย์ซีดก็ยสามารถหาได้จากการนำสมบัติทางกระแส-แรงดัน มาหาค่า J_0 ดังรูปเมื่อลากเส้นตัดแกน y ก็จะได้ความหนาแน่นของกระแสที่แรงดัน ไบอัสเท่ากับศูนย์ สามารถได้จากรูปที่ 4.22

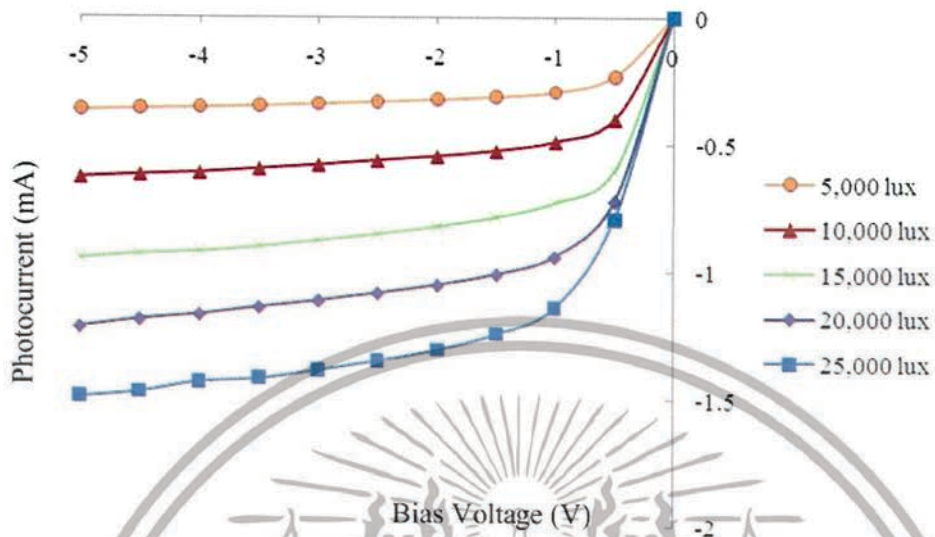


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความหนาแน่นของกระแส-แรงดัน

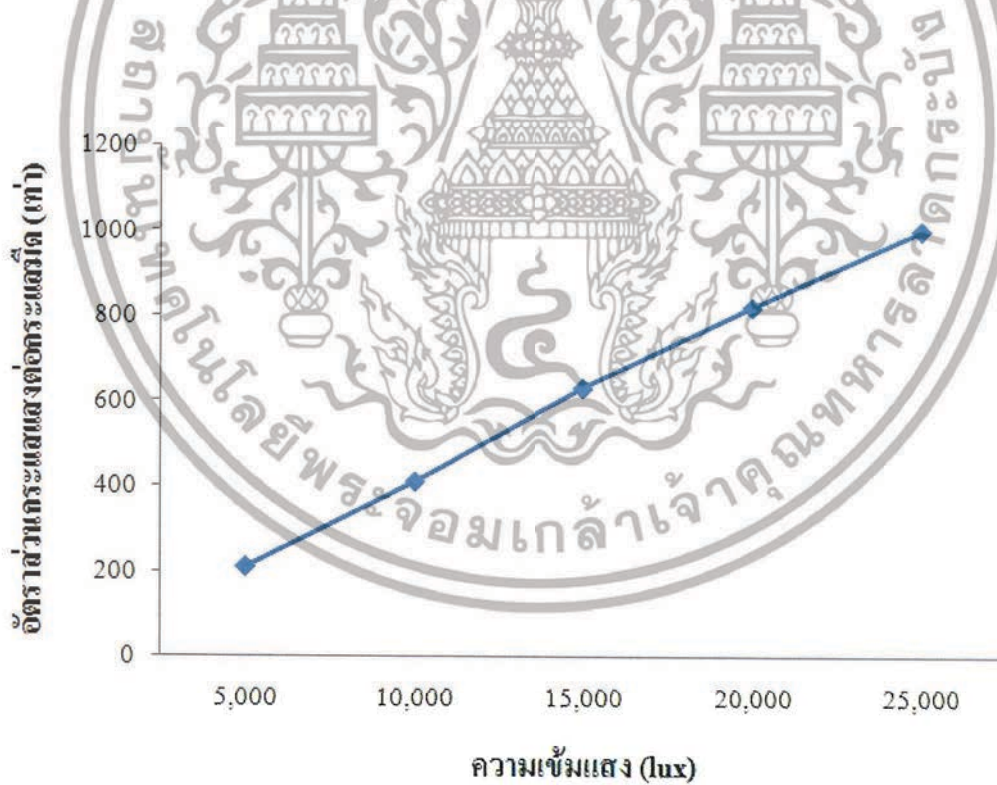
เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการ ทำให้ได้ค่าแรงศักย์ซีดก็ยเท่ากับ 0.72 V ซึ่งผลที่ได้นี้มีผลที่ตรงกับทฤษฎีและผลการทดลองที่ได้ทำมาก่อนหน้านี้

และเมื่อให้แสงตกกระทบบนอุปกรณ์ตรวจวัดแสงด้วยความเข้มแสง 5,000-25,000 lux จากรูปที่ 4,23 จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มแสง 5,000 lux กระแสแสงที่ได้มีค่าน้อย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้น สังเกตได้ว่ากระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเพิ่มแรงดันย้อนกลับมากขึ้น กระแสแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากทำให้บริเวณปลอดพาหะที่ยังขยายไม่เต็มที่ที่มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นได้อีก ส่งผลให้ค่ากระแสแสงยังคงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่จนกว่าบริเวณปลอดพาหะขยายเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



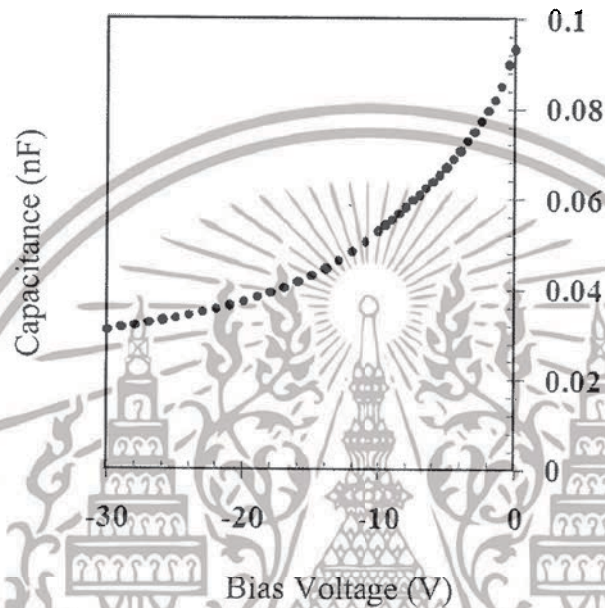
รูปที่ 4.23 ลักษณะกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมีด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดประมาณ 1,000 เท่าที่ความเข้มแสง 25,000 lux



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและแรงดันย้อนกลับ

จากกราฟจะเห็นลักษณะของความจุทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจจับแสงจะมีค่าสูงที่การป้อนแรงดันน้อยๆเนื่องจากผลของความจุในเนื้อสารและรอยต่อมีค่าสูง และเมื่อมีการป้อนแรงดันให้เพิ่มมากขึ้นกราฟจะมีความเปลี่ยนแปลงคือ ความจุทางไฟฟ้าเริ่มคงที่เนื่องจาก เมื่อป้อนแรงดันย้อนกลับทำให้ชั้นปลอดประจุมีการขยายออกทำให้ความจุทางไฟฟ้าในบริเวณเนื้อสารมีค่าลดลงเป็นผลให้ความจุทางไฟฟ้ารวมในอุปกรณ์ตรวจจับแสงมีค่าลดลงเมื่อมีการป้อนแรงดันย้อนกลับสูงขึ้น และเมื่อถึงจุดที่การขยายตัวของชั้นปลอดประจุไม่มีการขยายตัวเพิ่มจากเดิมแล้วนั้น ความจุทางไฟฟ้าก็จะมีค่าคงที่โดยจะแสดงกราฟที่เป็นเส้นตรงตามแนวราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาและเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อนำมาพัฒนาประสิทธิภาพของขั้วโปรงใสในอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โครงสร้างชนิดช็อคตีย์ เนื่องจากมีการสมมุติฐานว่าเมื่อนำฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มาเป็นขั้วไฟฟ้า จะเป็นการเพิ่มกระแสแสงให้กับตัวตรวจวัดแสง และมีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อไปในการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงในอนาคตข้างหน้า และเมื่อทำการทดลองสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองที่เป็นกระจกแล้วนั้น ได้ผลที่ค่อนข้างดีคือมีค่าการส่องผ่านที่ 85% และค่าสภาพต้านทานแผ่นมีค่าประมาณ $7 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ แต่เนื่องจากมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกจึงได้ทำการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มบางโดยวิธีแอนนีส (annealing) เพื่อที่จะพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีก จึงได้มีการแอนนีสในบรรยากาศของออกซิเจน ไนโตรเจนและบรรยากาศ ในสถานะของอุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 °C ที่เวลาในการแอนนีส 15 นาที หลังจากปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มบางแล้ว จะเห็นได้ชัดว่าค่าการส่องผ่านแสงมีค่าที่สูงขึ้น ประมาณ 90% และค่าสภาพต้านทานมีค่าที่ต่ำลง เช่นเดียวกันคือประมาณ $9 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ เป็นผลเนื่องมาจาก ผลึกหลังจากได้รับความร้อนจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้ผลึกมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยผลึกหลังจากแอนนีสจะมีขนาดโตขึ้นทำให้สภาพคล่องในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดีขึ้นกว่าเดิมส่งผลให้ค่าความต้านทานลดต่ำลง และการส่องผ่านแสงที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลเนื่องจาก หลังจากการปรับปรุงคุณภาพเกรนมีขนาดโตขึ้นทำให้การกระเจิงที่ระยะขอบเกรนมีค่าน้อยลงส่งผลให้แสงมีการกระเจิงน้อยและสามารถส่องผ่านได้มากขึ้นกว่าเดิม และหลังจากที่ทำกรอบฟิล์มบางมาแล้วนั้นจะได้คุณสมบัติของฟิล์มบางที่สามารถนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปรงใสได้คือ ที่ความหนา 2300 Å ทำการแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที

เมื่อได้คุณสมบัติที่เหมาะสมของฟิล์มบางแล้ว ทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแล้ววัดคุณสมบัติทางกระแส-แรงดันและค่าความจุทางไฟฟ้า อุปกรณ์ตรวจวัดแสงมีสมบัติทางรอยต่อแบบช็อคตีย์ โดยมีค่า V_{bi} เท่ากับ 0.27 V มีค่าความสูงกำแพงศักย์ประมาณ 0.72 eV และอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสอิ่มตัว (I/I_0) ประมาณ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 เท่า ที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux ตามลำดับ ส่วนความจุทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงมีค่าประมาณ 98 pF/cm² ที่แรงดัน 0 V และเมื่อเพิ่มแรงดันให้มากขึ้นค่าของความจุไฟฟ้าจะน้อยลงเป็นผลเนื่องจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการป้อนแรงดันย้อนกลับทำให้ค่าความจุในเนื้อสารลดลงไป ส่งผลให้ความจุไฟฟารวมทั้งรอยต่อและเนื้อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เนื่องด้วยเหตุนี้การดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารมีค่าลดลงเมื่อมีการป้อนแรงดันย้อนกลับมากขึ้น และจากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ทำการสร้างขึ้นโดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อชนิดซีอติคัล มีค่าของกระแสแสงที่ค่อนข้างสูง กำแพงศักย์ที่สอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา และความจุทางไฟฟ้ามีค่าที่ค่อนข้างน้อย ทำให้งานวิจัยนี้สามารถที่จะพัฒนาต่อไปในอนาคตได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ทรงพล รอดทอง “กระบวนการโลหะสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตรที่ สจล.” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
2. อรรณพ คล้าชื่น “การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองรับพลาสติกโดยอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริงแบบควบคุมเวลาก๊าซ” , คณะวิทยาศาสตร์ สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
3. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
4. มานิตา ค้วงแสง “การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Alแบบอินเทอร์ดิฟิเคิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้